



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۳۵۵ تا ۳۶۲
Vol. 48, No. 4, Winter 2017, pp. 355-362



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک
AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
ASJR-ME

ارزیابی تئوری و تجربی رفتار خمشی محرک حافظه‌دار

حسن قائدعلی^{۱*}، سید علی صدوق ونینی^۲، مجتبی صدیقی^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۸ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۱۹)

چکیده

در این مقاله رفتار محرک حافظه‌دار بصورت تئوری و تجربی بررسی شده است. محرک، از ترکیب الیاف حافظه‌دار در ماده الاستومر ساخته شده است. قبل از جاسازی الیاف حافظه‌دار، به آنها یک کرنش اولیه در دمای پایین اعمال نموده و سپس در سطح خارجی تیر جاسازی شده‌اند، با اعمال دما به الیاف حافظه‌دار با توجه به اینکه در سازه تیر جاسازی شده‌اند و نمی‌توانند کرنش بازگشتی بصورت آزاد داشته باشند، تنش بازگشتی فشاری در سطح خارجی تولید خواهند نمود، این امر سبب بوجود آمدن خیز در طول تیر خواهد شد. ابتدا روابط تنش - کرنش - دما برای آلیاژهای حافظه‌دار مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه با تخمین میزان تنش بازگشتی ناشی از افزایش دما در الیاف حافظه‌دار، با استفاده از روابط تئوری و حل معادلات دیفرانسیل، خیز تئوری تیر محاسبه شده است. در نهایت آزمون‌های تجربی محرک حافظه‌دار انجام شده، الیاف حافظه‌دار در تیر با اعمال ولتاژ، افزایش دما داده و باعث به وجود آمدن خیز در تیر می‌شود. قابلیت این محرک انعطاف‌پذیری بسیار سریع است و با کنترل جریان ورودی به الیاف حافظه‌دار می‌توان تغییر مکان انتهای تیر را کنترل نمود.

کلمات کلیدی:

سیم حافظه‌دار، نیتینول، تنش، خیز، تغییر شکل، تیر الاستومر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Ghaedali, H., Sadough Vanini, S. A., and Sedighi, M., 2017. "Experimental and Theoretical Evaluation of Bending Behavior of Shape Memory Actuator". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(4), pp. 355-362.

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: h.gh6212@yahoo.com



۱- مقدمه

مقاله بر مبنای مدل راجرس [۲] استوار است. البته در حین بیان روابط به اقتضای عنوان و مسأله تعریف شده تغییراتی در روابط لحاظ شده و از مدل‌های دیگر نیز استفاده شده است. گفتنی است در بسیاری از سامانه‌ها ضروری است محرک در زمانی کوتاه نسبت به دمای خارجی عکس‌العمل نشان دهد. بنابراین براساس بررسی‌ها، در این رابطه ایده استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار راه حل مناسبی می‌باشد. به منظور صحت‌گذاری نتایج تئوری تغییر شکل محرک حافظه‌دار به صورت تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن نتایج حاصل از آزمون تجربی گویای این است که با کنترل جریان ورودی به سیم‌های حافظه‌دار می‌توان تغییر شکل سازه را کنترل نمود.

۲- بررسی تئوری

۲-۱- روابط تنش بازگشتی در الیاف حافظه‌دار

مطالعات زیادی برای مدل کردن رفتار تنش- کرنش-دمای آلیاژهای حافظه‌دار انجام شده است. تاثیر دما در آلیاژهای حافظه‌دار با مواد معمولی متفاوت است. از آنجا که تبدیل فاز ایجاد شده توسط تنش یکی از مهمترین خواص مواد حافظه‌دار است، لازم است که در ابتدا به روابط تغییر فاز و تاثیر تنش روی آن پرداخته شود. تاناکا [۱] مدلی برای رفتار آلیاژهای حافظه‌دار ارائه نمود. براساس این اصل، تغییر فاز مارتنزیت به آستنیت و بالعکس بر مبنای کمینه کردن انرژی پتانسیل کل کنترل می‌شود. راجرس و لیانگ [۲] معادلات تاناکا را مینا قرار داده و با انتگرال‌گیری از آن به معادله اساسی دیگری برای SMA رسیدند. معادلات تنش عبارتند از [۹،۲]:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} d\xi \quad (1)$$

$$= D(\xi)\varepsilon + \Theta T + \Omega(\xi)\xi$$

که در آن D مدول یانگ (مدول الاستیسیته)، Θ تانسور ترموالاستیک، Ω تانسور تغییر فاز، σ تنش، ε کرنش و ξ نسبت مارتنزیت است. که D و Ω از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$D(\xi) = \frac{D_a - D_m}{2} (\cos \xi \pi + 1) + D_m \quad (2)$$

$$\Omega(\xi) = -\varepsilon_L D(\xi) \quad (3)$$

به علاوه برای تبدیل از مارتنزیت به آستنیت، تنش، بین دو حد زیر تغییر خواهد کرد:

$$C_A(T - A_s) - \frac{\pi}{|b_A|} \leq \sigma \leq C_A(T - A_s) \quad (4)$$

همچنین نسبت مارتنزیت از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\xi = \frac{\xi_M}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1 \} \quad (5)$$

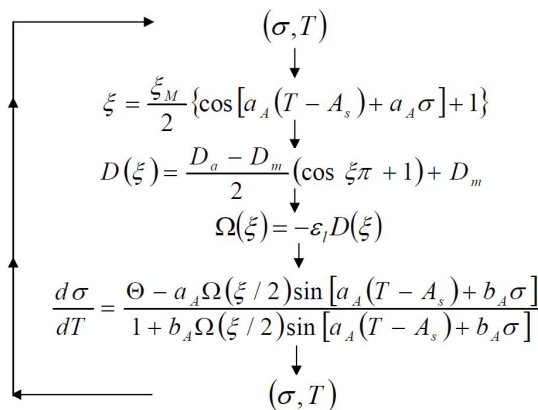
در این معادلات A_s دمای شروع آستنیت و A_f دمای پایان آستنیت

روابط حاکم بر رفتار آلیاژ حافظه‌دار ابتدا توسط تاناکا [۱] در سال ۱۹۸۶ مطرح شد، در این روابط نسبت مارتنزیت، به صورت تابع نمایی وابسته به تنش و دمای وارد بر الیاف در هر لحظه مطرح شده بود. راجرس و لیانگ [۲] در سال ۱۹۹۷ بر مبنای کار تاناکا مدلی را معرفی کردند که در آن نسبت مارتنزیت تابعی کسینوسی از تنش و دما است، پس از این سال تمام مقالاتی که در آنها به نوعی از آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است از روابط راجرس استفاده کرده‌اند. در زمینه حل تئوری، باز و همکاران [۳] بر روی یک تیر تقویت‌شده با الیاف حافظه‌دار تحقیق نموده‌اند. مقطع الیاف به صورت مستطیلی در نظر گرفته شده است و الیاف در حالت مارتنزیت دارای انحنا است. قاسمی و همکاران [۴] بر روی یک تیر کامپوزیتی با مقطع مستطیلی با یک لایه از آلیاژ حافظه‌دار که در سرتاسر بیرونی تیر جاسازی شده است بررسی تئوری انجام داده‌اند. لی و همکاران [۵] به بررسی عددی کمانش یک پوسته کامپوزیتی انحنادار با الیاف حافظه‌دار پرداختند. ماریا [۶] به بررسی تئوری خمش یک کامپوزیت با سطح مقطع مستطیلی با دو لایه از آلیاژ حافظه‌دار در سطح بالایی و زیرین پرداخته است. زانگ و زاو [۷] بر روی یک سازه کامپوزیتی با الیاف حافظه‌دار در مرکز آن کار کرده‌اند. رودریگو و همکاران [۸] به بررسی تغییر شکل‌های پیچشی یک لایه نازک کامپوزیتی با الیاف حافظه‌دار پرداختند. در این مقاله الیاف به صورت ضربدری در پوسته جاسازی شده‌اند و رفتار پیچشی پوسته تحت نیروی بازگشتی الیاف حافظه‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. در خصوص رفتار ضربه‌پذیری سازه‌های کامپوزیتی با الیاف حافظه‌دار پژوهش‌های متعددی در سالهای اخیر انجام شده است. در مراجع [۹،۱۰،۱۱] رفتار ضربه در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف حافظه‌دار مورد توجه قرار گرفته است لیکن در مقاله حاضر رفتار خمشی در تیر الاستومری با الیاف حافظه‌دار بررسی شده است. انتخاب ماده الاستومر برای زمینه تیر، اختلاف اصلی دیگری در تحقیق انجام شده با پژوهش‌های پیشین است. در مقالات پیشین [۵-۷، ۱۳، ۱۲، ۱۵] زمینه تیر از کامپوزیت بوده است. نی و همکاران [۱۴] به بررسی کامپوزیت‌های با زمینه فلزی با الیاف حافظه‌دار پرداختند. وانگ و همکاران [۱۶] نشان دادند استفاده زمینه‌های منعطف و با مدول الاستیسیته پایین، سبب افزایش تغییر شکل در کامپوزیت‌های با الیاف حافظه‌دار می‌شود. همچنین رودریگو و همکاران [۸] به منظور ایجاد تغییر شکل‌های پیچشی بزرگ، از یک زمینه نرم با الیاف حافظه‌دار استفاده نمودند.

در این پژوهش به منظور ایجاد تغییر شکل بزرگ خمشی در محرک حافظه‌دار، از ماده الاستومر بدلیل مدول الاستیسیته کم و انعطاف‌پذیری بالاتر نسبت به زمینه کامپوزیتی استفاده شده است. این تغییر شکل و رفتار خمشی محرک با سرعت بالایی نسبت به زمینه کامپوزیتی انجام می‌شود. با توجه به اینکه یکی از اهداف این مقاله کنترل شکل و سرعت در ایجاد تغییر شکل‌های خمشی در طول تیر می‌باشد، انتخاب زمینه با زمینه‌های منعطف انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد. پایه محاسبات در این

$$d\sigma = \frac{\Theta - a_A \Omega \left(\frac{\xi_0}{2} \right) \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma]}{1 + b_A \Omega \left(\frac{\xi_0}{2} \right) \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma]} dT \quad (9)$$

۳. برای حل معادله (۹) در هر مرحله نیاز به محاسبه Ω است که خود متناسب با D می‌باشد و D خود تابعی از ξ است. بنابراین در هر مرحله از حل معادله دیفرانسیل ابتدا ξ و سپس D محاسبه شده و در نهایت در معادله اصلی قرار داده خواهند شد. می‌توان روند گفته شده را با دیاگرام شکل ۱ نشان داد. با استفاده از این دیاگرام می‌توان تنش بازگشتی را در هر دمای خاص به دست آورد. همچنین می‌توان مدول الاستیسیته و نسبت مارتنزیت را در هر دما به دست آورد.



شکل ۱: نمودار محاسبه تنش - دما برای الیاف حافظه‌دار

۴. با توجه به اینکه الیاف حافظه‌دار به صورت تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته است بنابراین مشخصات الیاف در حل تئوری مشابه نمونه واقعی در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات الیاف حافظه‌دار مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

۳-۲- نتایج تئوری

برای این حالت، کرنش اولیه الیاف حافظه‌دار که در دمای مارتنزیت ایجاد می‌شوند ۵ درصد در نظر گرفته شده است. سپس سیم تا دمای ۱۸۵ درجه سانتیگراد گرم می‌شود. منحنی تنش بازگشتی بین دو محدوده مارتنزیت کامل و آستنیت کامل مطابق شکل ۲ تغییر خواهد کرد. بیشینه تنش بازگشتی ایجاد شده در الیاف حافظه‌دار در دمای ۱۸۵ درجه سانتیگراد $\sigma = 262$ MPa خواهد بود.

با توجه به تنش بازگشتی محاسبه شده در الیاف می‌توان خیز محرک را با استفاده از تئوری بارگذاری خارج از مرکز به دست آورد. بدین منظور می‌توان محرک را مشابه تیر یک‌سرگیردار فرض نمود. بنابراین نیروی ناشی از الیاف حافظه‌دار را به سطح خارجی تیر وارد نموده و خیز تیر محاسبه می‌شود. منحنی خیز محرک محاسبه شده طبق شکل ۳ خواهد بود.

می‌باشد و ثابت‌های a_A ، b_A و C_A به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s}, \quad b_A = \frac{-a_A}{C_A}, \quad C_A = \tan(\beta) \quad (6)$$

با گرفتن دیفرانسیل کامل از معادله (۵) و معادله (۷) بصورت زیر بدست می‌آید [۹]:

$$d\xi = \frac{\xi_0}{2} (-) \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma] a_A dT + \frac{\xi_0}{2} (-) \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma] b_A d\sigma \quad (7)$$

با جای گذاری رابطه (۷) در معادله (۱)، رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$d\sigma = \frac{D}{1 + b_A \Omega \left(\frac{\xi_0}{2} \right) \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma]} d\xi + \frac{\Theta - a_A \Omega \left(\frac{\xi_0}{2} \right) \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma]}{1 + b_A \Omega \left(\frac{\xi_0}{2} \right) \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma]} dT \quad (8)$$

۲-۲- محاسبه تنش بازگشتی برای الیاف حافظه‌دار در محرک حافظه‌دار و تعیین فرضیات مسأله

برای تحلیل تئوری محرک حافظه‌دار باید ابتدا میزان تنش بازگشتی ناشی از افزایش دما در الیاف حافظه‌دار محاسبه شود. بدین منظور یک تنش و دمای اولیه برای الیاف در نظر گرفته می‌شود، با توجه به اینکه جاسازی الیاف در دمای محیط (کمتر از دمای مارتنزیت) صورت می‌گیرد و افزایش دما از همین دما آغاز می‌شود و پایین‌تر از دمای مارتنزیت هیچ تنشی بر الیاف وارد نمی‌شود، می‌توان تنش اولیه $\sigma_0 = 0$ و دمای شروع را دمای مارتنزیت در نظر گرفت $T_0 = A_s$.

در این قسمت برای به دست آوردن مقادیر تنش بازگشتی در الیاف حافظه‌دار بر حسب دما از روش حل معادلات دیفرانسیل رانگ-کوتا-مرتبه چهارم استفاده شده است. برای به دست آوردن تنش بازگشتی فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند.

کرنش اولیه در دمای مارتنزیت به الیاف حافظه‌دار وارد شده و سپس در سطح خارجی تیر جاسازی شده است.

۱. با توجه به سطح تماس ناچیز بین الیاف و تیر، همچنین تولید حرارت در سیم با استفاده از جریان الکتریسیته، برای ساده‌سازی و با وجود کاهش نیروی اتصال در دماهای بالا می‌توان از اثرات دمایی بر روی تیر الاستومری صرف‌نظر نمود.

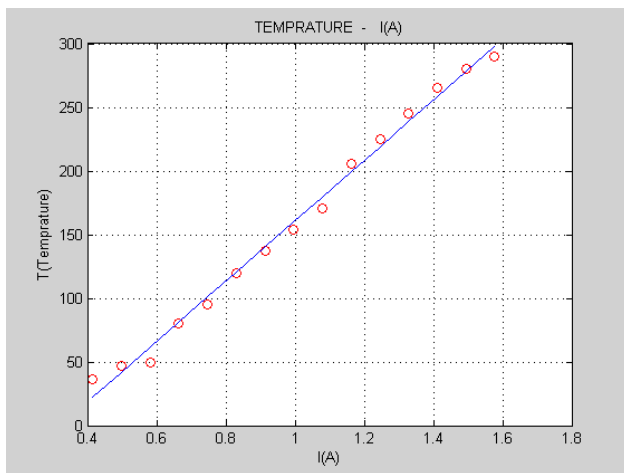
۲. با توجه به اینکه تیر دارای کرنش محوری کمی است می‌توان الیاف حافظه‌دار را در حالت دوسرگیردار فرض کرد. بنابراین تغییرات کرنش محوری الیاف در حین تغییر شکل صرف‌نظر شده و رابطه تنش بازگشتی به صورت معادله (۹) در نظر گرفته می‌شود:

جدول ۱: مشخصات سیم‌های حافظه‌دار [۱۷]

مشخصات	واحد	اندازه
قطر	μm	۲۵۰
مساحت سطح مقطع	μm^2	۴۹
مقاومت الکتریکی	Ω/m	۲۰
دمای شروع استنتیت	$^{\circ}\text{C}$	۶۸
دمای پایان استنتیت	$^{\circ}\text{C}$	۷۸
دمای شروع مارتنزیت	$^{\circ}\text{C}$	۵۲
دمای پایان مارتنزیت	$^{\circ}\text{C}$	۲۵۰
چگالی	Kg/m^3	۶۴۵۰
مدول الاستیسیته مارتنزیت	GPa	۲۸
مدول الاستیسیته استنتیت	GPa	۷۵

به صورت داخلی، در سیم‌های حافظه‌دار می‌باشد. برای انجام آزمون از یک دستگاه ترموکوپل بسیار دقیق و حساس استفاده شده است. سنسور دستگاه به یک نقطه از سیم حافظه‌دار متصل شده است. طبیعی است قبل از انجام آزمون، دمای نشان داده شده توسط دستگاه، دمای محیط می‌باشد. سیم حافظه‌دار به یک منبع تغذیه DC متصل می‌شود و جریان الکتریکی از آن عبور داده می‌شود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در هر جریان یک دمای خاص به دست می‌آید. می‌توان نتایج به دست آمده را در یک دیاگرام دما-جریان رسم نمود. با توجه به پراکندگی نتایج می‌توان از یک منحنی خطی درجه ۱ برای تقریب استفاده نمود. در اینصورت می‌توان منحنی دما-جریان را برای سیم با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر به دست آورد. منحنی مطابق شکل ۴ خواهد بود. در اینصورت ضریب m به صورت زیر به دست می‌آید.

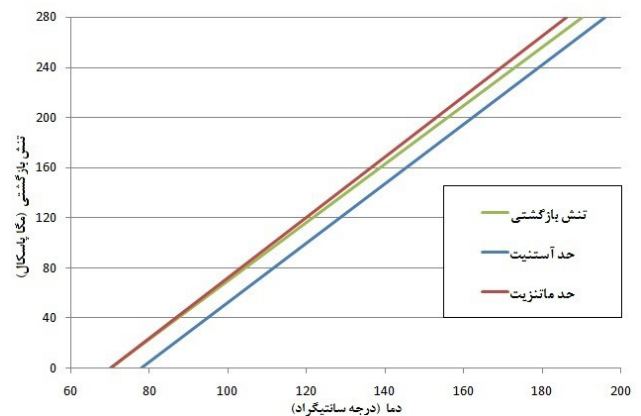
$$T = m \times I, \quad m = 236.9198$$



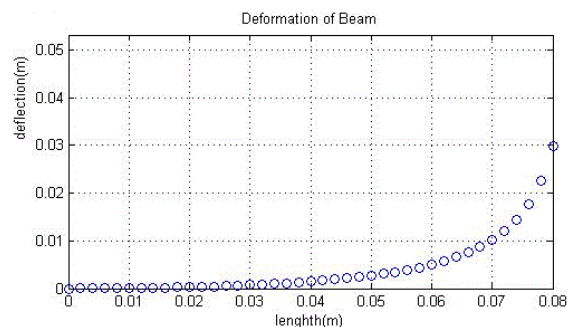
شکل ۴: منحنی دما بر حسب جریان الکتریکی

مزایای روش گرم کردن به کمک جریان الکتریسیته عبارتند از:

۱. گرمایش به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه عامل ایجاد حرارت جریان الکتریکی در سیم می‌باشد طبیعی است در تمام سیم با توجه به جریان یکنواخت الکتریسیته، دما یکسان باشد.
۲. با کنترل جریان عبوری از سیم می‌توان دما را در هر لحظه کنترل نمود که در شکل ۴ نشان داده شده است.
۳. در این روش افزایش دمای سیم بسیار سریع خواهد بود. با توجه به اینکه جریان عبوری از سیم را به صورت دلخواه می‌توان تغییر داد به محض تغییر جریان عبوری دما به سرعت در سیم افزایش می‌یابد.
۴. افزایش دما فقط در سیم است. در این روش، دما به صورت داخلی در سیم افزایش می‌یابد، با توجه به سطح تماس ناچیز بین سیم و زمینه، انتقال حرارت از سیم به تیر قابل صرف نظر است. در نتیجه کرنشی حاصل از تغییر دما در تیر به وجود نمی‌آید.



شکل ۲: منحنی تنش بازگشتی بر حسب دما (در محدوده فاز آستنتیت کامل و فاز مارتنزیت کامل)



شکل ۳: محاسبه خیز تیر حافظه‌دار به روش تئوری

۳- بررسی تجربی

۳-۱- تعیین منحنی دما- جریان برای الیاف حافظه‌دار

با توجه به مقاومت الکتریکی بالای الیاف حافظه‌دار جریان الکتریکی سبب گرمایش سیم می‌شود. می‌توان گفت در این روش تولید حرارت

۳-۲- اعمال کشش اولیه به الیاف حافظه‌دار

برای به وجود آوردن تنش بازگشتی ابتدا در الیاف حافظه‌دار یک کرنش اولیه اعمال می‌شود. در این پژوهش این کرنش به وسیله یک مکانیزم پیچ و مهره به سیم تحمیل شده است. جایگذاری سیم حافظه‌دار در زمینه باید به صورت افقی باشد، نمی‌توان از دستگاه‌های کشش عمودی استفاده نمود. علاوه بر آن با توجه به قطر ناچیز سیم، گیره‌های دستگاه‌های کشش قادر به گیردار کردن انتهای سیم نیستند و انتهای سیم از داخل گیره دستگاه سر می‌خورد. به دفعات آزمون‌های کشش بر روی سیم انجام شد که با توجه به مشکل گفته‌شده نتیجه مطلوبی از آن حاصل نشد. علاوه بر آن بعد از کشیدن سیم لازم بود سیم در یک قالب قرار گیرد و عملیات قالب‌گیری و شکل‌دهی ماده الاستومر انجام پذیرد، در صورت استفاده از دستگاه کشش امکان قالب‌گیری همزمان ماده الاستومر تحت کشش وجود نداشت، زیرا حمل قالب و ادامه عملیات قالب‌گیری با مشکل مواجه می‌شد. بنابراین در نهایت بهترین حالت برای اعمال کرنش به سیم حافظه‌دار، استفاده از یک سامانه پیچ و مهره متصل به قالب، در نظر گرفته شد.

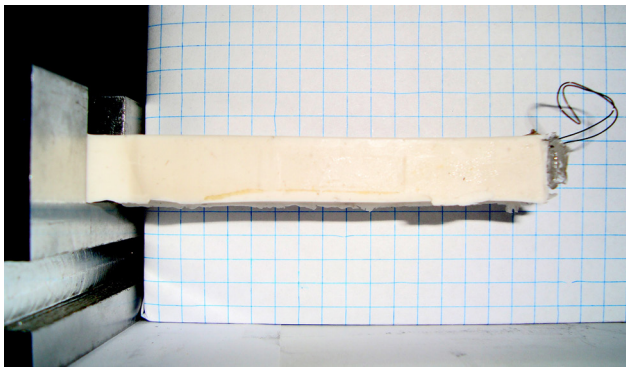
۳-۳- تعیین مدول الاستیسیته ماده الاستومر

الاستومر استفاده‌شده با پایه سیلیکونی از شرکت مکسل تهیه شده است. مشخصه ویژه این الاستومر شکل‌گیری در دمای محیط و مدول الاستیسیته نسبتاً پایین آن است. الاستومر ماکسل آر تی وی جی ۲۳ با یک سخت‌کننده ۱۳ درصد در آزمایشگاه پلیمر ترکیب شده و سپس درون قالب چوبی ریخته شده است. شکل‌گیری نهایی رزین بعد از ۲۴ ساعت کامل شد. به منظور تعیین مدول الاستیسیته ماده الاستومر قالب‌های دمبلی‌شکل تهیه شد و بر روی نمونه‌ای از ماده الاستومر تهیه‌شده بدون الیاف آزمون کشش انجام و از نتایج حاصل از آزمون کشش، مدول الاستیسیته $E=37 \text{ MPa}$ به دست آمده است. تعداد نمونه‌های تحت آزمون ۵ عدد بوده است. طبق استاندارد شرکت سازنده دستگاه ۵ نمونه الاستومر با شکل دمبل در آزمایشگاه ساخته و سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه خواص فیزیکی تحت کشش قرار داده شده است.

۳-۴- نتایج تجربی

الیاف حافظه‌دار، با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ خریداری شده از شرکت دینالوی^۴، در قالب چوبی تهیه شده با مکانیزم پیچ و مهره جاسازی و در حالت پیش کشش قرار داده شده‌اند. سپس رزین در داخل قالب ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شده است. بعد از شکل‌گیری رزین با توجه به جاسازی سیم از پیش درون قالب یک محرک حافظه‌دار تهیه شده است. این محرک حافظه‌دار این قابلیت را

دارد که با اعمال ولتاژ به سیم‌های حافظه‌دار تغییر شکل داده و خیز ایجاد کند (شکل ۵).



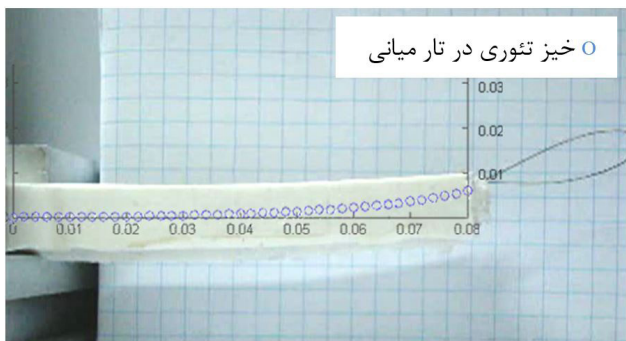
شکل ۵: نمای جانبی از تیر حافظه‌دار

۴- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

در ادامه نتایج تئوری و تجربی حاصل از آزمایش با یکدیگر مقایسه شده است. آزمون مرتبط برای ۳ جریان مختلف با شرایط مشابه تکرار شده است و نتایج حاصل برای هر نمونه با محاسبات تئوری مقایسه شده است. در هر سه نمونه سیم‌ها درون تیر کاملاً گیردار شده‌اند و نمی‌توانند آزادانه حرکت کنند.

شکل‌های ۶ تا ۸ مرتبط با نتایج تغییر شکل تیرهای حافظه‌دار پس از اعمال جریان الکتریکی ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میلی‌آمپر است. افزایش دمای مرتبط با اعمال جریان‌های فوق به ترتیب ۱۴۲، ۱۶۶ و ۱۸۵ درجه سانتیگراد در سیم‌های حافظه‌دار بوده است. گفتنی است جاسازی سیم‌های حافظه‌دار در سطح خارجی تیر با فاصله ۵ میلی‌متر از لبه‌های کناری تیر بوده است. همچنین در این تصاویر نتایج حاصل از مدل محاسباتی برای مقایسه با نتایج تجربی ارائه شده است.

در نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۶ تا ۸ همانطور که مشاهده می‌شود در نقاط نزدیک تکیه‌گاه تطابق خوبی بین نتایج تجربی و محاسبات تئوری وجود دارد. اما در نقاط دور از تکیه‌گاه بدلیل استفاده از روابط تئوری و تقریب‌های در نظر گرفته شده، اختلافی نسبی بین نتایج تئوری و تجربی مشاهده می‌شود.



شکل ۶: مقایسه خیز ایجاد شده محرک حافظه‌دار (بر حسب متر) در اثر اعمال دمای ۱۴۲ درجه سانتیگراد به سیم حافظه‌دار با نتایج تئوری

- 2 MAXEAL RTV G23
- 3 Hardner
- 4 DYNALLOY

بین سیم و تیر می‌شود که مرتبط با کم شدن نیروی اتصال و چسبندگی بین الیاف (سیم) و زمینه (الاستومر) است. نتایج اندازه‌گیری آزمایش‌های مرتبه دوم گرمایش هر نمونه (سیم) برای مرتبه دوم تا همان دما گرم شود) بعد از سرد کردن نمونه مرتبه اول صورت پذیرفته است. با توجه به کاهش اتصال بین سیم و تیر مرتبط با مرحله اول گرمایش، بدیهی است که سیم پس از گرم شدن مجدد تا حدی درون تیر حرکت کند بدون اینکه بتواند نقاط اطراف خود از تیر الاستومر را جابجا نماید. این عامل سبب کاهش نسبی خیز تیر در آزمون‌های بعدی خواهد شد. به دلیل حرکت سیم در داخل تیر الاستومر خیز انتهای تیر نزدیک به صفر بوده است. راه حل مورد نظر برای حل این مشکل به نحوه‌ی اتصال و گیردار کردن انتهای سیم حافظه‌دار به ماده الاستومر است، تا در طول آزمون تجربی و در حین گرم کردن سیم حافظه‌دار، از سر خوردن سیم در طول تیر جلوگیری شود.

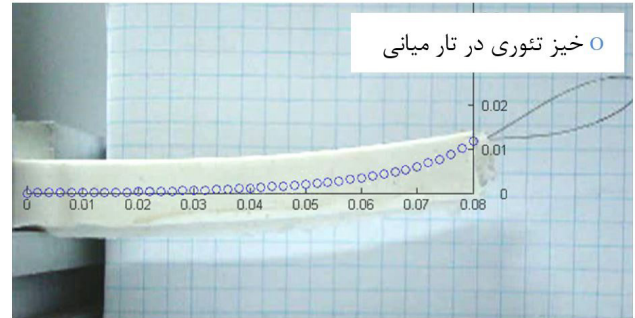
۲. در صورتیکه سیم حافظه‌دار بیش از حد مجاز (در این مورد دمای ذوب ماده الاستومر) گرم شود، ذرات بین سیم و ماده الاستومر کاملاً ذوب شده و اتصال بین سیم و تیر از بین می‌رود. در ادامه آزمون‌های تجربی دما بالا نشان داد که در صورت بالا بردن دمای الیاف تا حد ذوب ماده الاستومر، هیچگونه خیزی پس از گرم کردن مجدد سیم در تیر حاصل نمی‌شود. در این مورد نیز می‌توان انتهای سیم حافظه‌دار را به تیر الاستومر گیردار نمود و یا از مواد منعطف با نقطه ذوب بالاتر استفاده نمود.

۳. در طول آزمون‌های تجربی همواره نتایج مربوط به مرتبه اول، گرم کردن سیم برای اولین بار تا دمای مورد نظر ثبت شده است (بیشترین نیروی اتصال بین الیاف و زمینه در این شرایط برقرار است).

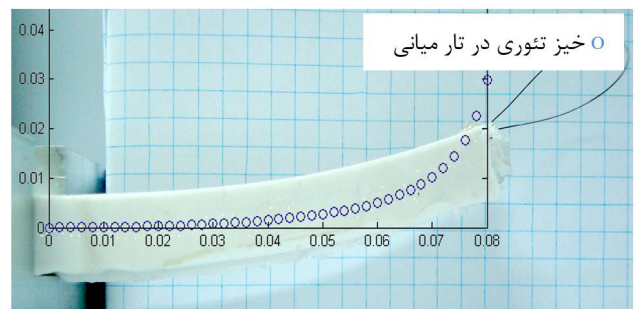
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن یک تیر یکنواخت یک‌سرگیردار به بررسی یک محرک حافظه‌دار پرداخته شده است.

تغییر شکل تئوری و تجربی محرک در اثر دمای ایجاد شده در سیم حافظه‌دار با سرعت قابل ملاحظه‌ای انجام پذیرفت و نتایج در سه دمای ۱۴۲، ۱۶۶ و ۱۸۵ سانتیگراد ثبت شد. در تمام دماهای گفته شده در نقاط نزدیک تکیه‌گاه تطابق خوبی بین آزمون تجربی و محاسبات تئوری وجود دارد. اما در نقاط دور از تکیه‌گاه به دلیل استفاده از روابط تئوری و خلاصه‌سازی، اختلاف نسبی بین نتایج تئوری و تجربی مشاهده می‌شود. درصد خطای خیز انتهای تیر بین حل تئوری و نتایج تجربی در نمونه گرم شده برای الاستومر استفاده شده در دمای پایین کمتر است و هرچقدر دما در سیم حافظه‌دار افزوده شود درصد خطا نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷: مقایسه خیز ایجاد شده محرک حافظه‌دار (بر حسب متر) در اثر اعمال دمای ۱۶۶ درجه سانتیگراد به سیم حافظه‌دار با نتایج تئوری



شکل ۸: مقایسه خیز ایجاد شده محرک حافظه‌دار (بر حسب متر) در اثر اعمال دمای ۱۸۵ درجه سانتیگراد به سیم حافظه‌دار با نتایج تئوری

دلیل استفاده از سه نمونه با دمای مختلف در سیم حافظه‌دار، مشاهده و بررسی تغییر شکل تیر با دما است. با افزایش ۳۰ درصدی دمای نمونه سوم نسبت به نمونه اول خیز تیر ۲۰۰ درصد افزوده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد خیز تیر نسبت غیرخطی با دمای سیم دارد که مرتبط با تغییرات فاز در دماهای مختلف است.

نکته قابل توجه بعدی این است که میزان خطای خیز انتهای تیر با افزایش دما بین حل تئوری و نتایج تجربی در نمونه اول کمتر می‌باشد و هرچقدر دما در سیم حافظه‌دار بالا می‌رود درصد خطا نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند ذوب شدن ماده الاستومر در اطراف الیاف حافظه‌دار و کاهش چسبندگی سطحی بین الیاف و ماده الاستومر در دماهای بالاتر باشد. این امر سبب می‌شود در دمای بالا تمام نیروی بازگشتی توسط الیاف به تیر انتقال نیابد.

۵- تکرارپذیری آزمایش

هر کدام از آزمایش‌های سیکل گرمایش ۳ بار برای هر یک از ۳ دمای ۱۴۲، ۱۶۶ و ۱۸۵ درجه سانتیگراد تکرار و به ثبت رسیده‌اند، نتایج حاصل به شرح زیر است:

۱. نتایج اندازه‌گیری خیز تیر در مرتبه اول گرمایش (برای اولین بار سیم تا دمای مورد نظر گرم شود) به نتایج تئوری نزدیک‌تر است. از آنجایی که در حین آزمون اول سیم تا حد زیادی گرم می‌شود این عامل سبب گرم شدن نقاط اطراف سیم از ماده الاستومر خواهد شد. این امر سبب کم شدن چسبندگی

- [8] Rodrigue.H, Binayak.W, 2014. "Cross-shape twisting structure using sma-based smart soft composite" *International journal of precision engineering*, 1,no2,153-156.
- [9] Roh.j, Kim.j, 2003. "Adaptability of hybrid smart composite plate under low velocity impact", *Composites* , Part B, 34, 117–125.
- [10] Meo.M, Marulo.F, Guida. M , Russo. S, 2013. "shape memory alloy hybrid composites for improved impact properties for aeronautical application" *Compos,Struct*, 95 , 756–766.
- [11] Kurmar.R.S, Ray.M.C, 2012. "Active constrained layer damping of smart laminated composite sandwich plates using 1-3 piezoelectric composites", *Int. j. mech. mster, des*, 8,197-218.
- [12] Jung. B. S, Kong. J. P, Li. N. X, Kim. Y. M, Kim. M.S, Ahn.S.H, Cho. M, 2012. "Numerical Simulation and Verification of a Curved Morphing Composite Structure with Embedded Shape Memory Alloy Wire Actuators," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 24, No 1, 89-98.
- [13] Ryu. J. H, Jung. B. S, Kim, M. S, Kong. J. P, Cho, M. H,Ahn. S. H, 2011. "Numerical Simulation of Hybrid Composite Shape- Memory Alloy Wire-Embedded Structures," *J. Intell. Mater: Syst. Struct.*, 22, No 17, 1941-1948.
- [14] Ni.D.R, Ma.Z, 2014. "Shape Memory Alloy-Reinforced Metal-Matrix Composites:A Review", *Acta Metall. Sin*, 27(5), 739–761.
- [15] Abdullah.J, Majid.L, Romli.I, Gaikwad.S, 2015. "Active control of strain in a composite plate using shape memory alloy actuators" , *Int. J. Mech. Mater. Des* , 11,25–39.
- [16] Wang. Z, Hang. G, Wang.Y, Li. J, Du. W, 2008. "Embedded SMA Wire Actuated Biomimetic Fin: a Module for Biomimetic Underwater Propulsion", *Smart Mater. Struct*, 17, No 2, Paper No. 025039.
- [17] Dynalloy, Inc., "FLEXINOL® Actuator Wire Technical and Design Data", <http://www.dynalloy.com/TechData Wire .php.html>

این موضوع می‌تواند مرتبط با محدودیت تحمل دمای بالا توسط زمینه الاستومری مورد استفاده باشد.

نتایج حاصل از آزمون تجربی گویای این است که با کنترل جریان ورودی به سیم‌های حافظه‌دار می‌توان تغییر شکل سازه را کنترل نمود. به دلیل مقاومت الکتریکی بالای سیم‌های حافظه‌دار دمای ایجاد شده در آن نسبت مستقیم با جریان ورودی دارد. بنابراین با افزایش جریان ورودی، دمای سیم افزایش می‌یابد این امر سبب افزایش تنش بازگشتی و در نهایت خیز بیشتر در تیر خواهد شد. با افزایش دمای ۳۰ درصدی الیاف حافظه‌دار تا دمای ۱۸۵ درجه سانتیگراد نسبت به الیاف گرم‌شده تا دمای ۱۴۲ درجه سانتیگراد، خیز تیر ۲۰۰ درصد افزوده می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و تحلیل‌های تئوری می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ترکیب زمینه الاستومر با الیاف حافظه‌دار به منظور ایجاد تغییر شکل‌های خمشی بزرگ در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با اعمال جریان الکتریسیته ایده مناسبی است.

۷- مراجع

- [1] Tanaka.K, 1986. "thermomechanical sketch of shape memory effect: one dimensional tensile behavior", *Res. Mech* , 18,251–63.
- [2] Liang.C, Rogers.C, 1997. "One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials", *J.Intel.Mat.Syst.Str*, 8, 285-302.
- [3] Baz.A, Chen.T ,2000. "Shape control of NITINOL-reinforced composite beams", *composite*, 31, part B, 631-642.
- [4] Ghasemi.M, Tabandeh.N, 2001. "A three-dimensional shape memory alloy/elastomer actuator", *composite*, 32, part B,441-449.
- [5] Lee. H.J, Lee. J.J, Huh. J.S, 1999. "A simulation study on the thermal buckling behavior of laminated composite shells with embedded shape memory alloy (SMA) wires", *Composites*, 47,463–469.
- [6] Marfia.S, 2005. "Micro-macro analysis of shape memory alloy composites", *International Journal of Solids and Structures*, 42, 3677-3699.
- [7] Zhang.Y, Zhao.Y, 2007. "A discussion on modeling shape memory alloy embedded in a composite laminate as axial force and elastic foundation", *Material and Design*, 28,1016-1020.

