



مدل سازی مایکرومکانیک و بررسی تجربی خواص الاستیک کامپوزیت پلیمری تقویت شده با سیم‌های کوتاه حافظه‌دار

سید محمدرضا خلیلی^{۱*}، علی سعیدی^۲

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*smrkhalili2005@gmail.com، ۱۹۹۹۱۴۳۳۴۴، صندوق پستی تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: آبان ۹۳	آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی و فیزیکی خود، در سال‌های اخیر برای تقویت کامپوزیت‌های پلیمری در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مقاله مدل میکرومکانیک مبتنی بر روش اشلبی و مدل هالپین-سای برای پیش‌بینی خواص کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با سیم‌های کوتاه حافظه‌دار با جهت‌گیری تصادفی مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات تدریجی مدول الاستیک در سیم‌های حافظه‌دار در اثر تبدیل فاز مارتنزیتی در مدل مایکرومکانیک نمودی در نظر گرفته شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج سیم‌های کوتاه از جنس آلیاژ حافظه‌دار در داخل رزین اپوکسی جاسازی شده و کامپوزیت حاصل برای بررسی خواص الاستیک تحت آزمون کشش قرار گرفت. نتایج مایکرومکانیک با نتایج تجربی آزمایش کشش کامپوزیت و همچنین نتایج مقالات دیگر مقایسه شد. تاثیر کسر حجمی سیم‌های حافظه‌دار و همچنین ضریب لاغری و جهت‌گیری سیم‌ها بر روی مدول الاستیک کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در کسرهای حجمی کمتر از ۵٪، ضریب لاغری قابل قبول برای بهبود چشمگیر مدول الاستیک کامپوزیت در حدود ۲۵ می‌باشد، در حالی که در کسرهای حجمی بزرگتر از ۱۵٪، ضریب لاغری مناسب مقادیر بزرگتر از ۴۰ می‌باشد.
پذیرش: بهمن ۹۳	
کلیدواژگان:	
مایکرومکانیک	
آلیاژ حافظه‌دار	
سیم کوتاه، کامپوزیت	
خواص الاستیک	

Micromechanics modeling and experimental characterization of shape memory alloy short wires reinforced composites

Seyed Mohamad Reza Khalili*, Ali Saeedi

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*P.O.B. 1999143344, Tehran, Iran, smrkhalili2005@gmail.com

Keywords

Micromechanics
 Shape memory alloy
 composites
 short wire
 elastic properties

Abstract

Shape memory alloys (SMAs) due to their extraordinary physical and mechanical properties, recently are used to enhance the mechanical properties of composites. In the present paper micromechanics model based on Eshelby's equivalent inclusion and Halpin-Tsai model was used in order to predict the elastic properties of randomly oriented shape memory alloy short wires reinforced epoxy. The presented incremental micromechanics model considers the gradual changes in the elastic modulus of the SMA wires due to martensite phase transformation. Experimental tensile tests were applied to the shape memory alloy short wires/epoxy composites to investigate the accuracy of the model. The micromechanics results were in good agreement with the experimental results and also the previously reported results in the literature. The effect of shape memory alloy wires volume fraction as well as the aspect ratio of the wires was investigated on the elastic modulus of SMA/epoxy composites. Moreover the effect of orientation of SMA wires on the modulus of composites was studied. Micromechanics results showed that in SMA volume fractions lower than 5%, the minimum acceptable aspect ratio of wires is about 25, However for SMA volume fraction above 15%, aspects ratios above 40 are required in order to enhance the elastic modulus of the composites efficiently.

۱- مقدمه

تحقیقات انجام شده، اثرات آلیاژهای حافظه‌دار بر ویژگی‌های مختلفی مانند سفتی، استحکام، چقرمگی شکست، کاهش آسیب و غیره مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۵]. پاسخ مکانیکی سازه می‌تواند تنها به دلیل تغییر در

در سال‌های اخیر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در جهت بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی مختلف کامپوزیت‌ها رشد چشمگیری پیدا کرده است. در

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Khalili, S. M. R. and Saeedi, A., "Micromechanics modeling and experimental characterization of shape memory alloy short wires reinforced composites" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2015.

در این مقاله تاثیر افزودن سیم‌های کوتاه حافظه‌دار به رزین اپوکسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل مایکرومکانیک بر اساس روش ذره معادل اشلیبی و مدل موری-تاناکا و بر اساس تغییرات تدریجی خواص الاستیک با کسر حجمی مارتنزیت توسعه می‌یابد. نمونه‌های رزین اپوکسی دارای سیم‌های کوتاه حافظه‌دار ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته و در نهایت نتایج تجربی با نتایج مدل مایکرومکانیک مقایسه می‌شود.

۲- مدل مایکرومکانیک

مدل ارائه شده توسط ژو و همکاران [۱۶] برای مدل‌سازی کامپوزیت دارای سیم‌های تک جهته آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است. همچنین تغییرات تدریجی مدول الاستیک با کسر حجمی مارتنزیت در این مدل لحاظ نشده است. در این بخش پس از ارائه روابط ساختاری برای زمینه و آلیاژ حافظه‌دار، مدل مایکرومکانیک برای استفاده در کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های کوتاه حافظه‌دار با جهات تصادفی و همچنین در نظر گرفتن تغییرات تدریجی مدول الاستیک با کسر حجمی مارتنزیت ارائه می‌شود.

۲-۱- معادلات ساختاری

فرم نموی معادله ساختاری زمینه با فرض پلیمر به‌عنوان یک ماده همگن و دارای خواص مستقل از زمان، به‌صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود [۱۶].

$$d\sigma^M = L^M(d\varepsilon - d\varepsilon^p - \alpha^M dT) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $d\sigma^M$ نمو تنش، L^M تانسور الاستیک و α^M ضریب انبساط حرارتی زمینه می‌باشند. $d\varepsilon$ ، $d\varepsilon^p$ نیز به ترتیب نمو دما، کرنش کل و کرنش پلاستیک هستند. نمو کرنش پلاستیک به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\sigma_M = \sigma_y^M + K(\varepsilon_m^p)^n \quad (2)$$

K و n در رابطه (۲) پارامترهای ثابت مواد و σ_y^M تنش تسلیم ماده زمینه می‌باشد. برای آلیاژ حافظه‌دار نیز، معادله ساختاری به‌شکل رابطه (۳) نوشته می‌شود [۱۶].

$$\sigma_f = L_f(\varepsilon^f - \varepsilon^{Tr} - \varepsilon^{Tr}) \quad (3)$$

در رابطه (۳) σ_f تنش در سیم حافظه‌دار و L_f تانسور الاستیک آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد. ε^f ، ε^{Tr} نیز به ترتیب کرنش کل، کرنش حرارتی و کرنش تبدیل آلیاژ حافظه‌دار می‌باشند. کرنش تبدیل از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$\varepsilon^{Tr} = \Lambda \xi \quad (4)$$

که در آن Λ تابعی از کرنش تک محوره ماکزیمم و مقادیر تنش معادل و تنش d در آلیاژ حافظه‌دار بوده و ξ کسر حجمی مارتنزیت می‌باشد. رابطه کسر حجمی مارتنزیت با تنش و دما مطابق روابط (۵) و (۶) می‌باشد [۱۷].

$$\xi = \frac{1}{2} \{ \cos[a_M(T - M_f) + b_M \sigma] + 1 \} \quad (5)$$

برای تبدیل معکوس:

$$\xi = \frac{1}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A \sigma] + 1 \} \quad (6)$$

$$a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f}$$

$$a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s}$$

$$b_M = -\frac{a_M}{c_M}$$

$$b_A = -\frac{a_A}{c_A} \quad (7)$$

سفتی آلیاژهای حافظه‌دار داخل ماده و یا به خاطر تنش بازیابی آلیاژهای حافظه‌داری که به صورت پلاستیک تغییر طول داده‌اند، تغییر کند [۶]. آلیاژ حافظه‌دار می‌تواند با شکل‌های هندسی متفاوت مانند الیاف ممتد [۴]، پارچه بافته شده [۷]، وصله در جهت ضخامت [۸] و همچنین الیاف کوتاه [۹] در تقویت پلیمرها به کار گرفته شود.

یامادا^۱ و همکاران [۱۰] اثر افزودن ذرات نیتینول به ماتریس فلزی آلومینیوم را به صورت تئوری بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که استحکام کامپوزیت فلزی ایجاد شده در اثر افزودن ذرات آلیاژ حافظه‌دار افزایش می‌یابد. ایشان تولید تنش‌های پسماند فشاری در زمینه را دلیل استحکام بخشی این ذرات معرفی نمودند. مورا ساوا^۲ و همکاران [۱۱] خواص ترمومکانیکی و آسیب کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های کوتاه و بلند آلیاژ حافظه‌دار را بررسی نمودند. ایشان به مقایسه تقویت کامپوزیت توسط سیم‌های بلند و کوتاه، با تغییر پارامتر ضریب لاغری و کسر حجمی سیم‌ها پرداختند. آن‌ها دریافتند که میزان تنش فشاری تولید شده در زمینه با افزایش ضریب لاغری آلیاژ حافظه‌دار افزایش پیدا می‌کند. همچنین برای ضریب لاغری بیش از ۲۵، سیم‌های کوتاه و بلند خواص مشابهی دارند ژانگ^۳ و نی^۴ [۱۳، ۱۲] رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیافی تقویت شده با سیم‌های آلیاژهای حافظه‌دار را همراه با سیم‌های کوتاه و ذرات آلیاژ حافظه‌دار بررسی نمودند. تئوری آن‌ها بر پایه تئوری هالپین-سای^۵ می‌باشد. ایشان دریافتند با افزودن ۳/۵٪ آلیاژ حافظه‌دار به رزین مدول ذخیره سازی آن ۶ برابر بیشتر می‌شود و فرکانس طبیعی آن نیز ۱/۲۶ برابر افزایش پیدا می‌کند. روش‌های مایکرومکانیک نیز برای بررسی کامپوزیت‌های تقویت شده با سیم‌های کوتاه آلیاژ حافظه‌دار به کار گرفته شده‌اند. بوید^۶ و همکاران [۱۴] ارتباطات مایکرومکانیکی را بر پایه تئوری موری-تاناکا توسعه دادند تا بتوانند خواص موثر کامپوزیت‌ها با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار را پیش‌بینی نمایند، ایشان نحوه تأثیر تنش‌های طولی و جانبی هم‌دما، بارگذاری حرارتی فاقد تنش، خواص الیاف ترمو الاستیک ثابت و خواص الیاف ترمو الاستیک متغیر را بررسی کردند. وانگ^۷ و همکاران [۱۵] به توسعه روابط مایکرومکانیک برای سیم‌های کوتاه آلیاژ حافظه‌دار تک جهته تحت اثر میدان‌های دمایی پرداختند. در تحقیقات آن‌ها آلیاژ حافظه‌دار به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده است. ایشان دریافتند که دمای تبدیل برای کامپوزیت تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار، بیشتر از دمای تبدیل آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد و همچنین می‌توان کرنش‌های تبدیل کامپوزیت را بر اساس تغییر کسر حجمی سیم‌های حافظه‌دار و ضریب لاغری آن‌ها طراحی نمود. ژو و همکاران [۱۶] یک رابطه مایکرومکانیک سه فازی برای پیش‌بینی خواص کامپوزیت‌های تقویت شده با سیم‌های کوتاه حافظه‌دار ارائه نمودند. مدل ارائه شده توسط آن‌ها فازهای آستنیت و مارتنزیت آلیاژ حافظه‌دار را به‌صورت جداگانه در نظر گرفته، لیکن تغییر تدریجی خواص الاستیک با کسر حجمی مارتنزیت را مورد توجه قرار نمی‌دهد. ایشان نتیجه گرفتند که تنش پسماند فشاری ایجاد شده در زمینه در اثر سیکل بارگذاری و باربرداری، برای سیم‌های کوتاه حافظه‌دار با ضریب لاغری بیش از ۲۵، نزدیک به تنش پسماند ایجاد شده توسط سیم‌های بلند حافظه‌دار می‌باشد.

1. Yamada
2. Murasava
3. Zhang
4. Ni
5. Halpin-Tsai
6. Boyd
7. Wang

$$E_L = \frac{E_m(1 + 2\frac{L}{D}\eta_L c_f)}{1 - \eta_L c_f} \quad (18)$$

$$E_T = \frac{E_m(1 + 2\eta_T c_f)}{1 - \eta_T c_f}$$

$$\eta_L = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + 2\frac{L}{D}} \quad (19)$$

$$\eta_T = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + 2}$$

۳- بررسی تجربی

به منظور مقایسه و صحت سنجی مدل مایکرومکانیک، نمونه‌های کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با سیم‌های کوتاه حافظه‌دار که به صورت تصادفی قرار گرفته‌اند ساخته شد و مورد آزمایش کشش قرار گرفت. مراحل ساخت و آزمایش نمونه‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

۳-۱- مواد مورد استفاده

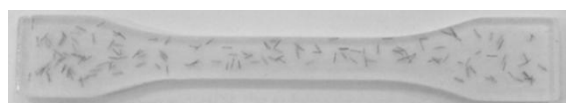
در این پژوهش از آلیاژ حافظه‌دار محصول شرکت G&H با خواص مکانیکی معرفی شده در جدول ۱ استفاده شده است. قطر و طول سیم‌های کوتاه استفاده شده به ترتیب ۰/۳ و ۳۵ میلی‌متر می‌باشد. رزین مورد استفاده نیز از نوع رزین اپوکسی ML506 ساخته شرکت مکر می‌باشد.

جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده در پژوهش حاضر [۱۹]

مقدار	مشخصه
۲۷/۷ گیگاپاسکال	مدول الاستیک فاز مارتنزیت
۷۰/۷ گیگاپاسکال	مدول الاستیک فاز استنیت
۰/۳	ضریب پواسون
۰/۰۶۷	حداکثر کرنش قابل بازیافت
۸Mpa/°C	C _M
۱۳/۸Mpa/°C	C _A
۹، ۱۸، ۳۴ و ۴۹ درجه سانتیگراد	دماهای تبدیل

۳-۲- ساخت و آزمایش نمونه

نمونه‌های کامپوزیت آلیاژ حافظه‌دار اپوکسی منطبق با استاندارد ASTM D638 و به روش قالب‌گیری ساخته شدند. جهت گیری سیم‌های حافظه‌دار در نمونه کاملاً به صورت اتفاقی بوده و درصد وزنی سیم‌های حافظه‌دار در نمونه‌ها ۲٪ می‌باشد. سه نمونه آزمون کشش دارای آلیاژ حافظه‌دار و سه نمونه رزین به عنوان نمونه شاهد برای آزمایش آماده شدند. نمونه ساخته شده به روش قالب‌گیری در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D638 بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. برای اندازه‌گیری دقیق‌تر کرنش‌ها از اکستنسومتر استفاده گردید. همچنین سرعت فک دستگاه برای آزمایش روی ۲ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد.



شکل ۱ نمونه کامپوزیت آلیاژ حافظه‌دار- اپوکسی آماده شده برای آزمون کشش

در این حالت نمو زمانی کسر حجمی مارتنزیت به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\xi = \frac{\partial \xi}{\partial T} \dot{T} + \frac{\partial \xi}{\partial \sigma} \dot{\sigma} \quad (8)$$

۲-۲- مدل مایکرومکانیک پلیمر تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار

مدل مایکرومکانیک برای پلیمر تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار، با استفاده از تئوری ذره معادل اشلیبی و با در نظر گرفتن معادلات ساختاری رزین و آلیاژ حافظه‌دار ساخته می‌گردد. نمو تنش در امتداد سیم در ماتریس با $\Delta \sigma^M$ نشان داده شده و به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\Delta \sigma^M = L^M \Delta \varepsilon^M \quad (9)$$

با در نظر گرفتن تنش و کرنش فاز تقویت کننده به صورت $\Delta \sigma_f$ و $\Delta \varepsilon_f$ و قسمت مختل شده^۱ آن‌ها به صورت $\Delta \sigma_f$ و $\Delta \varepsilon_f$ و همچنین با در نظر گرفتن کرنش ویژه^۲ $\Delta \varepsilon_f^*$ رابطه (۱۰) برقرار است.

$$\Delta \sigma^f = \Delta \sigma^M + \Delta \bar{\sigma} + \Delta \bar{\sigma}_f$$

$$= L^f (\Delta \varepsilon^M + \Delta \bar{\varepsilon} + \Delta \varepsilon_f + \Delta \varepsilon^p - \Delta \varepsilon_f^*)$$

$$= L^M (\Delta \varepsilon^M + \Delta \bar{\varepsilon} + \Delta \varepsilon_f + -\Delta \varepsilon_f^*) \quad (10)$$

قسمت‌های مختل شده تنش و کرنش فاز تقویت کننده را می‌توان با استفاده از تانسور اشلیبی S به صورت رابطه (۱۱) بیان نمود.

$$\Delta \varepsilon_f = S_f \Delta \varepsilon_f^* \quad (11)$$

$$\Delta \sigma_f = L^M (S_f - I) \Delta \varepsilon_f^*$$

در روابط (۱۱) $\Delta \varepsilon_f^*$ کرنش موثر برای فاز تقویت کننده و I تانسور مرتبه چهار می‌باشد. طبق تئوری اشلیبی، انتگرال تنش توزیع شده در کل دامنه باید صفر شود. بنابراین رابطه (۱۲):

$$\Delta \bar{\sigma} = -L^M c_f (S_f - I) \Delta \varepsilon_f^* \quad (12)$$

c_f کسر حجمی فاز تقویت کننده می‌باشد. با جایگذاری معادلات (۱۱) و (۱۲) در (۱۰) و ساده‌سازی رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\Delta \varepsilon_f^* = [L^M + (L^f - L^M)(S - c_f(S - I))]^{-1} \times [(L^M - L^f) \Delta \varepsilon^M + L^f (\Delta \varepsilon^{TT} - \Delta \varepsilon^p)] \quad (13)$$

در روابط فوق ε_f^* کرنش ویژه^۲ می‌باشد. پس از به دست آمدن کرنش ویژه از رابطه (۱۳)، مقادیر تنش در ماتریس و آلیاژ حافظه‌دار به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) به دست می‌آیند.

$$\Delta \sigma^M = \Delta \bar{\sigma}^M - L^M c_f \Delta \varepsilon_f^* (S - I) \quad (14)$$

$$\Delta \sigma^f = \Delta \bar{\sigma}^M + L^M \Delta \varepsilon_f^* (S - I) (1 - c_f) \quad (15)$$

همچنین کرنش ماکروسکوپی از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\Delta EPS = M^M \Delta \bar{\sigma}^M + c_f \Delta \varepsilon_f^* + \Delta \varepsilon^p \quad (16)$$

روابط ذکر شده مربوط به کامپوزیت با تقویت کننده تک جهته می‌باشد. جهت پیشبینی خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های کوتاه که جهت گیری تصادفی دارند، از مدل هالپین-سای کمک گرفته می‌شود. کسر حجمی مارتنزیت و مدول کششی الیاف تحت اثر بارگذاری مکانیکی و حرارتی، با استفاده از مدل اشلیبی محاسبه شده و مدول الاستیک کامپوزیت، مطابق رابطه هالپین-سای (رابطه ۱۷) به دست آورده می‌شود [۱۸].

$$E_c = \left(\frac{3}{8}\right) E_L + \left(\frac{5}{8}\right) E_T \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) روابط (۱۸) و (۱۹) برقرار است.

1. Perturbed part
2. Eigenstrain

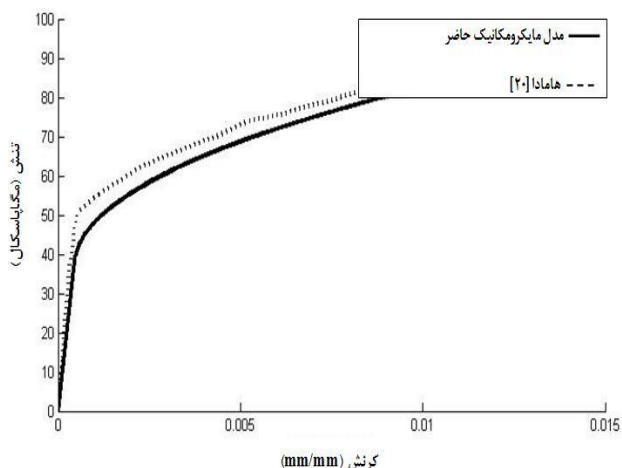
۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحنه‌سنجی نتایج

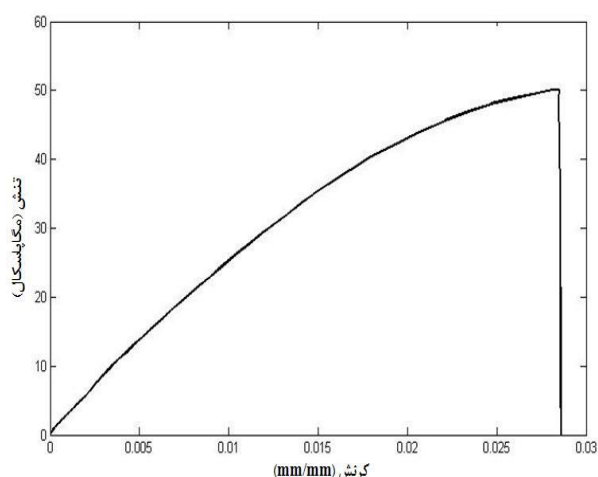
به‌منظور صحنه‌گذاری مدل میکرومکانیک، در حالت خاص که سیم‌های حافظه‌دار به صورت تک جهته در داخل پلیمر قرار گرفته‌اند، نتایج به دست آمده از مدل با نتایج به دست آمده از آزمایش توسط هامادا و همکاران [۱۷] بر روی نمودار تنش و کرنش آلومینیوم تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار در شکل ۲ مقایسه شده‌اند. خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار و زمینه آلومینیومی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ خواص مکانیکی زمینه آلومینیوم و سیم‌های حافظه‌دار [۲۰]

ماده	مشخصه	مقدار
آلیاژ حافظه‌دار	مدول الاستیک فاز مارتنزیت	۲۶/۳ گیگاپاسکال
	مدول الاستیک فاز استنیت	۶۷ گیگاپاسکال
	ضریب پواسون	۰/۴۳
	حداکثر کرنش قابل بازیافت C_M	۰/۰۶۷
آلومینیوم	C_A	۷/۱۱ Mpa/°C
	دماهای تبدیل	۰/۷، ۱/۵، ۴/۵ و ۵/۶ درجه سانتیگراد
	مدول الاستیک	۷۰ گیگاپاسکال
	ضریب پواسون	۰/۳
	تنش تسلیم	۳۵ مگاپاسکال
	ثوابت ماده	$K=445\text{MPa}$, $n=0.49$

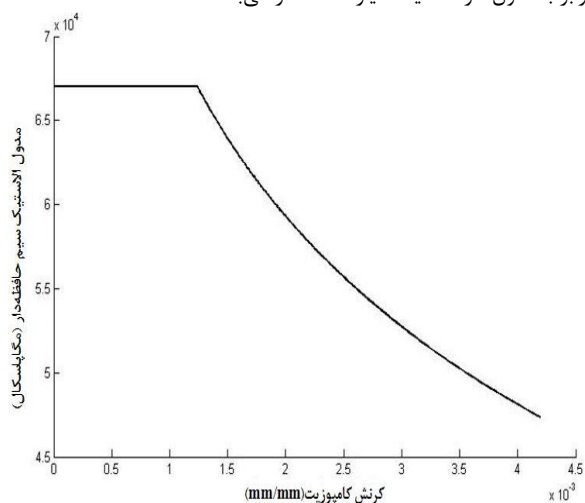


شکل ۲ مقایسه نتایج تنش و کرنش مدل میکرومکانیک حاضر و نتایج آزمایشگاهی در حالت سیم‌های حافظه‌دار تک جهته [۱۷]



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش برای نمونه تقویت شده توسط سیم‌های کوتاه حافظه‌دار با جهت‌گیری تصادفی

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که مدول الاستیک سیم‌ها در ابتدا برابر با مدول فاز استنیت آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد.



شکل ۴ تغییرات مدول الاستیسیته سیم‌های حافظه‌دار در حین کشش نمونه

با توجه به شکل ۲ نتایج مدل‌سازی شده در حالت قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار به صورت تک جهته دارای تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از آزمایش هستند و اختلاف بین مدول اندازه‌گیری شده در حدود ۱۰٪ می‌باشد. به منظور صحنه‌گذاری نتایج در حالت جهت‌گیری تصادفی سیم‌های حافظه‌دار، از نتایج به دست آمده توسط تست نمونه آزمایشگاهی در کار حاضر استفاده می‌گردد. نمودار تنش-کرنش آزمایش کشش نمونه اپوکسی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار در شکل ۳ نمایش داده شده است.

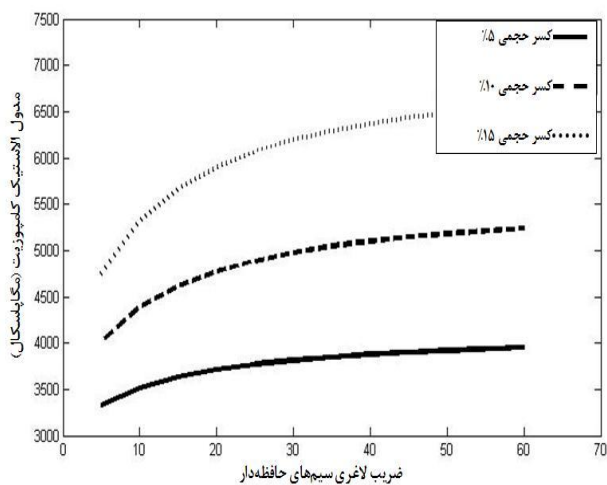
نتایج به دست آمده برای مدول الاستیسیته توسط روش تجربی و مدل میکرومکانیک در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ مشخص است که نتایج تطابق خوبی با یکدیگر دارند و اختلاف بین نتایج در این حالت کمتر از ۲٪ می‌باشد.

جدول ۳ مدول الاستیک کامپوزیت اپوکسی / آلیاژ حافظه‌دار

مدول الاستیسیته (آزمایش)	مدول الاستیسیته (میکرومکانیک)
۲۷۸۹ مگاپاسکال	۲۷۵۵ مگاپاسکال

مطابق معادله ساختاری ارائه شده برای آلیاژ حافظه‌دار، تنش وارد شده به سیم‌های حافظه‌دار در داخل کامپوزیت پلیمری باعث ایجاد تغییر فاز در سیم‌ها می‌شود. در اثر تغییر فاز، کسر حجمی مارتنزیت در سیم‌های حافظه‌دار تغییر کرده و مدول الاستیسیته سیم نیز تغییر می‌کند. شکل ۴ تغییرات مدول الاستیسیته برای سیم حافظه‌دار قرار گرفته در داخل زمینه پلیمری را نمایش می‌دهد.

ترتیب ۱۹٪، ۳۱٪ و ۳۸٪ برای نمونه‌های با کسر حجمی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ افزایش می‌یابد.

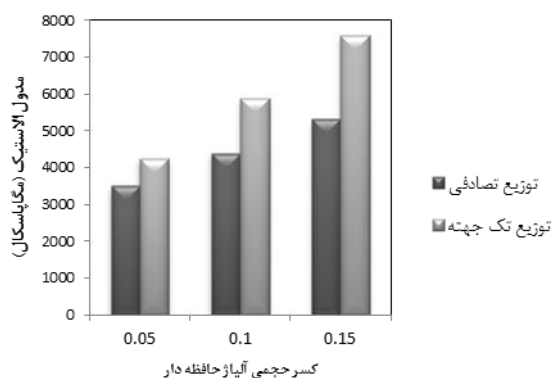


شکل ۶ نمودار تغییرات مدول الاستیسیته با ضریب لاغری سیم‌های حافظه‌دار

برای کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های کوتاه آلیاژ حافظه‌دار، حداقل ضریب لاغری برای فاز تقویت کننده در مرجع [۱۱] مقدار ۲۵ پیشنهاد شده است. با توجه به شکل ۶ واضح است که تغییرات مدول کامپوزیت برای ضریب لاغری‌های کمتر از ۲۵ چشمگیر بوده و بنابراین ضریب لاغری‌های قرار گرفته در این محدوده، برای ساخت کامپوزیت مناسب نمی‌باشند. همچنین برای کسرهای حجمی بزرگتر مانند کسر حجمی ۱۵٪، انتخاب ضریب لاغری‌های بزرگتر از ۴۰ مناسب می‌باشد.

۴-۴ اثر جهت‌گیری سیم‌های حافظه‌دار

همانگونه که در بخش ۲-۲ اشاره گردید، در این مقاله جهت‌گیری سیم‌های حافظه‌دار به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. برای بررسی تاثیر جهت‌گیری سیم‌های حافظه‌دار بر مدول الاستیک کامپوزیت، نتایج حالت جهت‌گیری تصادفی و حالت جهت‌گیری تک جهته سیم‌ها در راستای بارگذاری مقایسه می‌شوند. شکل ۷ مقایسه نتایج بین این دو حالت را نمایش می‌دهد.

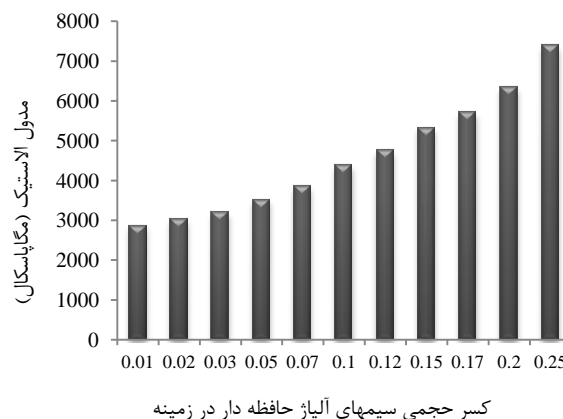


شکل ۷ مقایسه مدول الاستیسیته کامپوزیت در دو حالت جهت‌گیری تصادفی و جهت‌گیری تک جهته سیم‌های حافظه‌دار

با افزایش تنش به مقادیر بزرگتر از تنش بحرانی برای آلیاژ حافظه‌دار، تغییر فاز استتیت به مارتزیت شروع می‌شود. حاصل این تغییر فاز، تغییر مدول الاستیسیته در سیم‌های حافظه‌دار می‌باشد. این تغییر مدول در سیم‌ها، در مدول کامپوزیت تاثیر گذار می‌باشد.

۴-۲ تاثیر کسر حجمی آلیاژ حافظه‌دار

به منظور تعیین تاثیر کسر حجمی آلیاژ حافظه‌دار مدل مایکرومکانیک با درصد‌های وزنی مختلف اجرا و نتایج مدول الاستیسیته محاسبه می‌شود. کسر حجمی سیم‌های حافظه‌دار بین ۱ تا ۱۰ درصد انتخاب می‌شوند. نتایج مدول الاستیسیته برای نمونه‌های ذکر شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ مدول الاستیسیته کامپوزیت اپوکسی/آلیاژ حافظه‌دار بازای کسر حجمی مختلف تقویت کننده

همانگونه که از شکل ۵ مشخص است، افزایش کسر حجمی سیم‌های تقویت کننده، افزایش مدول الاستیسیته کامپوزیت را به همراه داشته و تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب کسر حجمی رفتاری غیر خطی دارد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر آلیاژ حافظه‌دار بر افزایش مدول در کسرهای حجمی بیش از ۱۰٪ بسیار چشمگیر است، به طوری که در درصد حجمی ۱۰٪ برای آلیاژ حافظه‌دار، مدول الاستیسیته به میزان ۵۴٪ افزایش پیدا کرده است. این میزان افزایش در درصد‌های حجمی بالاتر بیشتر می‌شود، به طوری که در درصد حجمی ۲۵٪ آلیاژ حافظه‌دار بیش از ۱۵۰٪ افزایش در مدول الاستیسیته مشاهده می‌شود.

۴-۳ تاثیر ضریب لاغری سیم حافظه‌دار

علاوه بر کسر حجمی، ضریب لاغری (نسبت طول به قطر) سیم‌های کوتاه حافظه‌دار نیز در مدول الاستیسیته کامپوزیت موثر است. در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کوتاه، هر چه ضریب لاغری بزرگتر باشد، کارایی الیاف در تقویت کامپوزیت بیشتر می‌شود. بررسی نقش ضریب لاغری سیم‌ها بر رفتار الاستیک کامپوزیت توسط مدل مایکرومکانیک انجام گرفت. شکل ۶ تغییرات مدول الاستیسیته کامپوزیت را با ضریب لاغری سیم‌های حافظه‌دار نمایش می‌دهد. سه کسر حجمی متفاوت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ برای مقایسه انتخاب شده‌اند.

همانگونه که از شکل ۶ مشخص است، افزایش ضریب لاغری سیم‌های حافظه‌دار تاثیر چشمگیری را بر مدول الاستیسیته کامپوزیت می‌گذارد. به طوری که با افزایش ضریب لاغری سیم‌ها از ۵ به ۶۰، مدول الاستیسیته به

- [10] Yamada, Y., Taya, M., & Watanabe, R. Strengthening of metal matrix composite by shape memory effect. *JIM, Materials Transactions*, 34(3), 1993, pp. 254-260.
- [11] Murasawa, G. Tohgo, K. and Ishii, H., "The effect of fiber volume fraction and aspect ratio on the creation of internal stress in the matrix and deformation for short-fiber shape memory alloy composite", *Smart materials and structures*, Vol. 15, Vol. 1, doi. doi:10.1088/0964-1726/15/1/032, 2006
- [12] Zhang, R. X. Ni, Q. Q. Natsuki, T. and Iwamoto, M., "Mechanical properties of composites filled with SMA particles and short fibers", *Composite Structures*, Vol. 79, No. 1, pp.90-96, 2007.
- [13] Ni, Q. Q. Zhang, R. X. Natsuki, T. and Iwamoto, M., "Stiffness and vibration characteristics of SMA/ER3 composites with shape memory alloy short fibers", *Composite structures*, Vol. 79, No. 4, pp. 501-507, 2007.
- [14] Boyd, J. G. and Lagoudas, D. C., "Thermomechanical response of shape memory composites", *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 5, No. 3, pp. 333-346, 1994.
- [15] Wang, J. and Shen, Y. P., "Micromechanics of composites reinforced in the aligned SMA short fibers in uniform thermal fields", *Smart materials and structures*, Vol. 9, No. 1, doi. 10.1088/0964-1726/9/1/307, 2000.
- [16] Zhu, Y. and Dui, G., "Effect of fiber shape on mechanical behavior of composite with elastoplastic matrix and SMA reinforcement", *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Vol.2, No. 5, pp. 454-459, 2009.
- [17] Leo, D. J., "engineering analysis of smart materials systems", John Wiley & Sons, Inc. 2007
- [18] Tucker III, C. L. and Liang, E., "Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites: review and evaluation", *Composites science and technology*, Vol. 59, No. 5, pp. 655-671, 1999.
- [19] G&H Orthodontics Company, <http://www.gwire.com>
- [20] Hamada, K. Lee, J. H. Mizuuchi, K. Taya, M. and Inoue, K., "Thermomechanical behavior of TiNi shape memory alloy fiber reinforced 6061 aluminum matrix composite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.29, No. 13, pp. 1127-1135, 1998.

با توجه به شکل ۷ مشخص است که تاثیر جهت‌گیری سیم‌های حافظه‌دار در کسرهای حجمی بزرگتر، بیشتر است. در کسر حجمی ۰/۰۵ سیم‌های حافظه‌دار، اختلاف دو حالت ۲۱٪ است، در حالی که این اختلاف در کسر حجمی ۰/۱۵ به میزان ۴۳٪ می‌رسد. جهت افزایش مدول کامپوزیت، در حالی که نیرو تنها در یک جهت به نمونه وارد شود، حالت ایده‌آل، توزیع‌سیم‌های حافظه‌دار به صورت تک‌جهته می‌باشد. در عین حال توزیع سیم‌های حافظه‌دار در جهت تصادفی علاوه بر سهولت در ساخت کامپوزیت، در حالتی که امتداد نیرو تنها در یک جهت خاص نباشد و به عبارتی نیرو به صورت چند جهته وارد شود یک مزیت به حساب می‌آید. چرا که در این حالت از ایجاد خواص ضعیف در جهت عمود بر سیم‌ها در حالت جهت‌گیری تک جهته جلوگیری خواهد شد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله روش میکرومکانیک برای پیشبینی خواص کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با سیم‌های کوتاه حافظه‌دار با جهت‌گیری تصادفی توسعه داده شد. ویژگی مهم روش ارائه شده نسبت به مدل‌های پیشین تغییرات تدریجی خواص آلیاژ حافظه‌دار بین فاز مارتنزیت و آستنیت و همچنین قابلیت استفاده برای مدل‌سازی کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های کوتاه در جهات تصادفی می‌باشد. برای صحت سنجی نتایج در حالت خاص قرار گیری سیم‌ها به صورت تک‌جهته از نتایج مقالات پیشین استفاده گردید. همچنین برای صحت سنجی در حالت قرار گیری سیم‌ها به صورت تصادفی، نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه اپوکسی و سیم‌های کوتاه حافظه‌دار ساخته و آزمایش گردید. نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشی دارای تطابق خوبی هستند. پارامترهای مختلف از قبیل کسر حجمی سیم‌های حافظه‌دار و ضریب لاغری آنها بر روی خواص الاستیک کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای بیشترین حالت اثر گذاری سیم حافظه‌دار، ضریب لاغری سیم‌ها باید متناسب با کسر حجمی انتخاب شود، به طوری‌که که برای کسر حجمی ۱۵٪ سیم‌های حافظه‌دار ضریب لاغری بیش از ۴۰ مناسب است.

۶- مراجع

- [1] Shimamoto, A. Ohkawara, H. and Nogata, F., "Enhancement of mechanical strength by shape memory effect in TiNi fiber-reinforced composites", *Engineering fracture mechanics*, Vol. 71, No. 4, pp. 737-746, 2004.
- [2] Ogisu, T. Shimanuki, M. Kiyoshima, S. and Takeda, N., "A basic study of CFRP laminates with embedded prestrained SMA foils for aircraft structures", *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol.16, No. 2, pp. 175-185, 2005.
- [3] Zhang, R. X. Ni, Q. Q. Masuda, A. Yamamura, T. and Iwamoto, M., "Vibration characteristics of laminated composite plates with embedded shape memory alloys", *Composite structures*, Vol. 74, No. 4, pp. 389-398, 2006.
- [4] Khalili, S. M. R. Shokuhfar, A. Ghasemi, F. A. and Malekzadeh, K., "Dynamic response of smart hybrid composite plate subjected to low-velocity impact", *Journal of Composite Materials*, Vol.41, No. 19, pp. 2347-2370, 2007.
- [5] Angioni, S. L. Meo, M. and Foreman, A., "Impact damage resistance and damage suppression properties of shape memory alloys in hybrid composites—a review", *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 1, doi. 10.1088/0964-1726/20/1/013001, 2011.
- [6] Rogers, C. A. Liang, C. and Jia, J., "Behavior of shape memory alloy reinforced composite plates, Part 1: model formulation and control concepts. In *Proceedings of the 30th Structures*", *Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 3-5, 1989.
- [7] Masuda, A. Ni, Q. Q. Sone, A. Zhang, R. X. and Yamamura, T., "Preliminary characterization and modeling of SMA-based textile composites", In *Smart Structures and Materials*, July, pp. 94-102, 2004.
- [8] Lau, K. T. Ling, H. Y. and Zhou, L. M., "Low velocity impact on shape memory alloy stitched composite plates", *Smart materials and structures*, Vol. 13, No. 2, pp. 364, 2004.
- [9] Lei, H. Wang, Z. Zhou, B. Tong, L. and Wang, X., "Simulation and analysis of shape memory alloy fiber reinforced composite based on cohesive zone model", *Materials & Design*, Vol. 40, pp. 138-147, 2012.