



شبیه‌سازی رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت شیشه اپوکسی شامل آلیاژ حافظه‌دار تحت بارگذاری استاتیکی

فتح‌اله طاهری بهروز^{۱*}، علی کیانی^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴، taheri@iust.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
آلیاژهای حافظه‌دار نوعی خاص از مواد حافظه‌دار هستند که با افزایش دما می‌توانند تغییر شکل‌های بزرگ را بازیابی کرده و به شکل اولیه خود بازگردند. در این مطالعه شبیه‌سازی عددی رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با آلیاژهای حافظه‌دار تحت بارگذاری استاتیکی و تک محوره، انجام شده است. با قرار دادن سیم‌های حافظه‌دار درون کامپوزیت اولیه، رفتار میکرومکانیکی کامپوزیت به صورت یک منحنی دوخطی مشاهده می‌شود که علت آن تبدیل فاز درون سیم‌های حافظه‌دار و غیرخطی بودن رفتار کامپوزیت اولیه می‌باشد. پس از شبیه‌سازی به منظور صحت‌سنجی، از نتایج آزمایشگاهی موجود در مرور ادبیات استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی مدل، اثر عوامل مختلف مانند: مقدار پیش‌ کرنش سیم‌ها، اثر دمای بارگذاری و شرایط سطح تماس میان سیم‌های حافظه‌دار و ماتریس اپوکسی بررسی شده است. همچنین یک روش تئوری برای محاسبه کرنش فشاری و کششی موجود در کامپوزیت و سیم‌ها، پس از رهاسازی سیم‌های پیش‌کشیده ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در نظر گرفتن چسبندگی سطحی ضعیف میان سیم حافظه‌دار و ماتریس زمینه باعث نزدیکی نتایج شبیه‌سازی شده به نتایج آزمایشگاهی نسبت به حالت چسبندگی بین‌سطحی کامل، شد. افزودن پیش‌کرنش به سیم‌های حافظه‌دار باعث ایجاد تنش فشاری اولیه درون کامپوزیت شده و مقدار آن با افزایش دما بیشتر نیز می‌شود اما این پدیده، جدایش بین‌سطحی میان سیم‌های حافظه‌دار و ماتریس را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین در طراحی کامپوزیت‌های تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار، باید برای مقادیر پیش‌کرنش اعمال شده به سیم‌های حافظه‌دار و دمای کاری کامپوزیت، مقادیر بهینه‌ای انتخاب شود.	دریافت: ۹۴/۱۲/۹ پذیرش: ۹۵/۲/۴ کلیدواژگان: آلیاژ حافظه‌دار کامپوزیت پیش‌کرنش چسبندگی سطحی ضعیف

Simulation of thermo-mechanical behavior of glass-epoxy composites containing shape memory alloy under static loading

Fathollah Taheri-Behrooz*, Ali Kiani

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, taheri@iust.ac.ir

Keywords

Shape Memory Alloy
Composite
Pre-strain
Weak interface bonding

Abstract

Shape Memory Alloys (SMAs) are a type of Shape Memory Materials (SMMs) which can recover large deformation and return to their primary shape by rising temperature. In this study, numerical simulation of thermo mechanical behavior of composites reinforced with shape memory alloys under static uniaxial loading was conducted. By inserting SMA wires inside the host composite the macro mechanical behavior of hybrid composite changed to a bilinear curve which is due to the phase transformation of SMA wires and nonlinear behavior of host composite. Simulated results are compared with available data in the literature. Validated model is used to evaluate the effect of various parameters as, wires pre-strain, temperature, interface conditions between SMA wires and Epoxy matrix on hybrid composite behavior. Also a theoretical method was developed to calculate the compressive and tensile strain induced in host composites and wires, after releasing of SMA wires. According to the results obtained, considering weak interface between SMAs wires and matrix improved simulation results rather than perfect bonding assumption. Pre-strained SMA wires would cause initial compressive stress in the host composite and its value will increased by increasing service temperature, however, it will increased interface separation of SMA and host materials, too. Therefore, in design of Shape memory alloys hybrid composites, optimum amount of applied pre-strain on SMA wires and working temperature should be selected.

Please cite this article using:

Taheri-Behrooz, F. and Kiani, A., "Simulation of thermo-mechanical behavior of glass-epoxy composites containing shape memory alloy under static loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 111-122, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

۱- مقدمه

با گسترش روش‌ها و فرآیندهای ساخت، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار به عنوان یک نماینده از سازه‌های هوشمند یا کامپوزیت‌های هوشمند مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. در سالهای اخیر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار^۱ به دلیل داشتن خواص ویژه‌ی آن‌ها از جمله اثرحافظه شکل^۲، سوپرااستیسیته^۳ و قابلیت میرایی بالا در سازه‌های هوشمند و حسگرها افزایش یافته است. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار نوعی از این سازه‌های هوشمند هستند که به طور کلی دارای استحکام، سفتی، انرژی شکست و فرکانس طبیعی بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های تقویت‌شده می‌باشند [۱-۴]. بنابراین این سازه‌های تقویت‌شده برای استفاده در کاربردهایی مثل هوافضا، پزشکی و مهندسی عمران مناسب می‌باشند.

در طی بارگذاری ماکرومکانیکی، رفتار تنش - کرنش این کامپوزیت‌ها به صورت یک منحنی دوخطی^۴ می‌باشد که به دلیل تبدیل فازی است که در سیم‌های حافظه‌دار رخ می‌دهد. استفاده از خاصیت بازیابی شکل سیم‌های حافظه‌دار می‌تواند منجر به کاهش ترک خوردگی زمینه در سازه‌های کامپوزیتی و همچنین کاهش تمرکز تنش در نوک ترک‌ها شود. اعمال پیش‌کرنش^۵ به سیم‌ها و استفاده از خاصیت اثر حافظه‌ی شکل در دمای بالا می‌تواند باعث نیروی بازیابی قابل توجهی روی کامپوزیت شود، باید توجه داشت اعمال مقادیر پیش‌کرنش بالا، باعث جدایش بین سطحی میان زمینه و سیم حافظه‌دار نشود [۵]. بنابراین این ضروری است که بر روی رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با سیم‌های حافظه‌دار پیش‌کشیده با و همچنین جدایش بین سطحی میان سیم حافظه‌دار و ماتریس زمینه طی بارگذاری کامپوزیت، بیشتر تحقیق شود.

محققین بسیاری بر روی رفتار مکانیکی ماکروسکوپی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با سیم حافظه‌دار تحت شرایط آزمایشی مختلف تحقیق نمودند و به طور کلی دریافتند که استفاده از سیم‌های حافظه‌دار باعث بهبود استحکام، سفتی و انرژی شکست کامپوزیت اولیه می‌شود [۶-۸].

شیماماتو و دیگران [۶] به بررسی خاصیت اثرحافظه‌شکل در دماهای متفاوت، برای سیم‌های همراه با پیش‌کرنش، بر روی مقدار تمرکز تنش در نوک ترک پرداختند. آن‌ها در مطالعه‌شان از دو روش گرمادهی مستقیم و غیرمستقیم استفاده نمودند و دریافتند که روش گرمادهی با جریان مستقیم به دلیل ایجاد نیروی بازیابی بیشتر باعث کاهش بیشتری در تمرکز تنش می‌شود. تایا و دیگران [۷] با جاسازی سیم‌های حافظه‌دار پیش‌کشیده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و ارائه یک مدل تئوری، تنش تسلیم را برای این کامپوزیت‌ها محاسبه کردند. بر طبق نتایج به‌دست آمده، برای مقادیر بین صفر تا ۲ درصد پیش‌کرنش، تنش تسلیم کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد و برای مقادیر بین ۲ تا ۳ درصد پیش‌کرنش کاهش یافته یا ثابت می‌ماند. رغوان و دیگران [۸] قابلیت سیم‌های حافظه‌دار برای بهبود خواص میرایی، کشش و ضربه در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده را بررسی نموده و دریافتند که با افزایش مقدار پیش‌کرنش سیم‌ها، قابلیت میرایی غیرفعال^۶ در کامپوزیت بهبود یافته و به طور کلی باعث بهبود چقرمگی زمینه پلیمر ترموست می‌شود.

لی و دیگران [۹] روی اثر اضافه نمودن الیاف کوتاه حافظه‌دار بر روی رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت‌ها مطالعه نمودند و مشاهده نمودند که افزایش درصد حجمی سیم‌ها باعث افزایش مدول یانگ شده و کاهش درصد حجمی آن باعث کاهش آرام در تنش تسلیم و مدول کامپوزیت می‌شود.

لی و همکاران [۱۰] بر روی رفتار مکانیکی ماکروسکوپی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف حافظه‌دار همراه با در نظر گرفتن چسبندگی ضعیف بین سطحی تحقیق نمودند و مشاهده نمودند که این کامپوزیت‌ها از خود یک رفتار دوخطی نشان می‌دهند که به دلیل تبدیل فاز مارتنزیتی درون سیم‌ها می‌باشد. بر طبق نتایج آن‌ها کرنش شکست ۰/۱ درصد کاهش و استحکام نهایی ۳/۴ درصد افزایش می‌یابد. البته این افزایش استحکام به‌وسیله چسبندگی بین سطحی ضعیف محدود می‌شود.

همچنین محققین بسیاری بر روی اثر خواص بین سطحی میان سیم‌حافظه‌دار و ماتریس زمینه تحقیق نمودند و دریافتند که افزایش خواص کامپوزیت‌ها با جدایش بین سطحی محدود می‌شود و این جدایش به عوامل بسیاری نظیر مقدار پیش‌کرنش اعمال‌شده به سیم‌ها، دمای کاری سیم‌های حافظه‌دار، بهبود سطحی صورت گرفته بر روی سیم‌های حافظه‌دار و غیره بستگی دارد [۱۱]. لائو و همکاران [۱۲] با انجام دادن آزمایش بیرون کشیدن سیم حافظه‌دار و استفاده از یک روش برهم‌نهی ساده، به بررسی خواص بین سطحی ماتریس و سیم حافظه‌دار پرداخته و اثر تغییر دما را بر روی این خواص بررسی نمودند. آن‌ها در مطالعه‌شان دریافتند که افزایش دما و افزایش نیروی بازیابی شده، باعث افزایش تنش بحرانی جدایش در سازه کامپوزیتی می‌شود. مطابق با نتایج آن‌ها افزایش دما علاوه بر افزایش تنش جدایش، مقدار جابجایی مورد نیاز برای جدایش افزایش یافته است و این نشان‌دهنده‌ی بهبود خواص چسبندگی بین سطحی با افزایش دماست.

وانگ و همکاران [۱۳] به صورت تحلیلی به بررسی تنش تبدیل فاز برای سیم حافظه‌دار در حال بیرون کشیده شدن از ماتریس الاستیک پرداختند و با استفاده از مدل تحلیل برشی^۷ به بررسی توزیع تنش در طی بیرون کشیدن سیم پرداختند. خلیلی و همکاران [۱۴] با در نظر گرفتن یک عنصر حجمی نماینده^۸ به صورت استوانه‌ای به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت مرکب با سیم حافظه‌دار کوتاه و بلند با در نظر گرفتن چسبندگی بین سطحی پرداختند. آن‌ها پس از به‌دست آوردن خواص بین سطحی، با شبیه‌سازی صورت گرفته، خواص الاستیک کامپوزیت مرکب را مانند مدول الاستیک محوری، عرضی و نسبت پواسون را بررسی نمودند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، زاویه‌دار کردن سیم حافظه‌دار به اندازه‌ی ۱۵ درجه باعث ۹ درصد کاهش در مدول محوری و ۱۰ درصد افزایش در مدول عرضی شده است. هو و همکاران [۱۵] یک مدل تحلیلی برای بررسی تنش مورد نیاز برای بیرون کشیدن یک سیم حافظه‌دار از درون زمینه الاستیک ارائه نمودند. بر اساس مطالعه انجام شده تنش محوری برای بیرون کشیدن سیم حافظه‌دار از ماتریس الاستیک به طور قابل توجهی از بیرون کشیدن یک سیم الاستیک کمتر است که این به دلیل تبدیل انجام شده درون سیم حافظه‌دار است.

کوشچ و همکاران [۱۶] با استفاده از مدل المان بین سطحی به بررسی جدایش بین سطحی میان سیم حافظه‌دار و کامپوزیت زمینه پرداختند. شروع و گسترش ترک بین لایه‌ای را برای یک سیم تنها و چند سیم حافظه‌دار مجاور یکدیگر بررسی نموده و و با نتایج مدل مکانیک شکست خطی مقایسه نمودند. مطابق با بررسی صورت گرفته جدایش بین سطحی موضعی باعث

1. Shape Memory Alloy
2. Shape Memory Effect
3. Super Elasticity
4. Bilinear
5. Pre-Strain
6. Passive Damping

7. Shear - Lag model

8. Representative Volume Element (RVE)

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)\varepsilon - E(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_S - \Omega(\xi_0)\xi_{S0} + \theta(T - T_0) \quad (2)$$

اندیس صفر اشاره به حالت اولیه دارد. حروف E ، Ω و θ به ترتیب نشان دهنده‌ی مدول الاستیک، تانسور تبدیل فاز و تانسور ترموالاستیک (ضریب انبساط حرارتی ماده حافظه‌دار^۱) هستند. در این مدل مدول کلی به صورت تابعی خطی از مدول آستنیت و مارتنزیت فرض شده که به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$E(\xi) = E_S^a + (E_S^m - E_S^a)\xi \quad (3)$$

با توجه به $E(\xi)$ ، مدول‌های دیگر تابعی خطی از ξ خواهند بود که به صورت روابط (۴) و (۵) هستند.

$$\Omega(\xi) = -\varepsilon_L E(\xi) \quad (4)$$

$$\theta(\xi) = E(\xi)(\alpha_a + (\alpha_m - \alpha_a)\xi) \quad (5)$$

که α_m و α_a به ترتیب ضرایب انبساط حرارتی آستنیت و مارتنزیت هستند.

با توجه به روابط گفته شده باید ξ مشخص شود. قوانین تکامل ξ برای تبدیل‌های آستنیت به مارتنزیت و برعکس به صورت زیر هستند.

برای تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت در حالت $T \geq M_S$:

$$\sigma_f^{cr} + C_M(T - M_S) < \sigma < \sigma_s^{cr} + C_M(T - M_S) \quad (6)$$

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{S0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \{ \sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_S) \} \right] + \frac{1 + \xi_{S0}}{2} \quad (7)$$

و برای حالت $T < M_S$ و $\sigma_f^{cr} < \sigma < \sigma_s^{cr}$:

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{S0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \{ \sigma - \sigma_f^{cr} \} \right] + \frac{1 + \xi_{S0}}{2} \quad (8)$$

برای تغییر فاز از مارتنزیت به آستنیت در حالت $T > A_S$:

$$C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s) \quad (9)$$

$$\xi_s = \frac{\xi_{S0}}{2} \left\{ \cos \left[a_A(T - A_S) - \frac{\sigma}{C_A} \right] + 1 \right\} \quad (10)$$

در روابط بالا C_M و C_A ثوابت مادی برای بیان ارتباط بین تنش‌های بحرانی تبدیل و دما هستند و M_S ، M_f ، A_S ، A_f به ترتیب دماهای شروع و پایان تبدیل‌های مارتنزیت و آستنیت هستند.

۲-۲- مدول مؤثر کامپوزیت

با جاسازی سیم‌های حافظه‌دار درون کامپوزیت خواص مکانیکی آن مثل سفتی، استحکام و غیره تغییر می‌کنند. مدول مؤثر را می‌توان از طریق قانون ترکیب^۲ محاسبه نمود. برای استفاده از این قانون باید توجه داشت که رابطه‌ی رابطه‌ی تنش کرنش ترکیبات باید خطی باشد. در این تحقیق نیز، این قانون در قسمت خطی ابتدای نمودار تنش کرنش آلیاژ حافظه‌دار و قسمت خطی تبدیل فاز استفاده شده است. بر طبق این قانون می‌توان نوشت.

$$E_{SMAHC} = E_S V_S + E_m V_m + E_c V_c \quad (11)$$

در این رابطه E_S مربوط به مدول سیم‌های حافظه‌دار و E_c مربوط به مدول کامپوزیت و E_m مربوط به مدول ماتریس بین سیم‌هاست. قابل ذکر است که از آنجایی که یک لایه سیم حافظه‌دار به همراه ماتریس اطراف آن در میان لایه‌های پیش آغشته^۳ قرار گرفته است درصد حجمی ماتریس نیز محاسبه شده و در روابط گنجانده شده است. در محاسبه مدول تئوری صفحه

توزیع مجدد تنش و کاهش قابل توجهی در حداکثر تنش در اطراف سیم حافظه‌دار شده و این باعث جلوگیری از ایجاد جدایش بین سطحی در نزدیک‌ترین سیم حافظه‌دار می‌شود. مطابق با نتایج صورت گرفته ضریب تمرکز تنش و نرخ رهاسازی انرژی کرنشی به برهم‌کنش میان سیم‌ها و چیدمان سیم‌ها نسبت به یکدیگر حساس می‌باشند.

دیوود و همکاران [۱۷] اتصال بین سیم‌های حافظه‌دار با پلیمر تقویت‌شده با الیاف کربن را بررسی نمودند. مطابق با نتایج به‌دست آمده دو مکانیزم متفاوت برای جدایش بین سطحی وجود دارد. مکانیزم اول جدایش کامل قبل از تبدیل فاز مارتنزیتی و مکانیزم دیگر جدایش بعد از تبدیل فاز مارتنزیتی. استحکام برشی بین به نوع مکانیزم بسیار وابسته بوده و در جدایش با مکانیزم دوم مقدار آن افزایش می‌یابد. به طور مشابه پائنده و همکاران [۱۸-۱۹] دریافتند که هنگامی که تبدیل فاز رخ ندهد نرخ جدایش بین سطحی سریعتر از حالتی است که تبدیل فاز مارتنزیتی رخ دهد. البته نرخ جدایش به نرخ جابه‌جایی و همچنین تغییر طول در طی تبدیل فاز وابسته می‌باشد. همچنین آن‌ها دریافتند که تنش اعمالی برای جدایش بسیار به مدول الاستیک سیم مورد استفاده وابسته می‌باشد. طاهری و دیگران [۱] به بررسی رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار پیش‌کشیده، تحت بارگذاری استاتیک پرداختند. آن‌ها دریافتند که قرار دادن سیم‌های دمای بالا درون ماده باعث بهبود سفتی و استحکام کلی ماده میزبان می‌شود.

در این تحقیق مدل‌سازی المان محدود صفحه‌ی کامپوزیتی تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار تحت بارگذاری استاتیکی با در نظر گرفتن چسبندگی بین سطحی ضعیف شبیه‌سازی شده است و اثر پارامترهای مختلف از قبیل پیش‌کرنش سیم‌ها، دمای فعال‌سازی و جدایش بین سطحی بر روی رفتار کلی بررسی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در قسمت اول به بررسی کارهای انجام شده در این زمینه پرداخته شده است. در قسمت دوم به مدل‌های تئوری استفاده شده و مشخصه‌سازی خواص مواد استفاده شده پرداخته شده است. در قسمت سوم به نحوه مدل‌سازی و همچنین ارائه نتایج مدل‌سازی اجزا محدود و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود پرداخته شده است و در نهایت اثر عوامل مختلف بررسی شده است. در قسمت چهارم بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدلهای تئوری و مشخصه‌سازی مواد

۲-۱- مدل تئوری سیم حافظه‌دار

تا کنون مدل‌های تئوری زیادی برای پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار ارائه شده‌اند که هر کدام دارای ویژگی‌هایی می‌باشند. از جمله مدل‌های یک بعدی می‌توان به مدل لیانگ و راجرز [۲۰]، تاناکا [۲۱]، ایوشین و پنش [۲۲]، برینسون [۲۳] اشاره نمود و از جمله مدل‌های سه‌بعدی می‌توان به مدل‌های بوید و لاگوداس [۲۴-۲۵]، آریکیو و تیلور [۲۶] اشاره نمود. در این مطالعه از مدل یک‌بعدی برینسون استفاده شده است.

در این مدل متغیر داخلی درصد حجمی مارتنزیت برای اولین بار به مؤلفه‌های ناشی از دما و تنش تجزیه شد. ξ_T درصد حجمی مارتنزیت ناشی از دما است که منجر به مارتنزیت چند واریانته می‌شود و ξ_S ناشی از تنش می‌باشد که منجر به مارتنزیت تک واریانته می‌شود. بر طبق این معادله ساختاری محاسبه درصد مارتنزیت و تنش به صورت زیر است.

$$\xi = \xi_T + \xi_S \quad (1)$$

1. Thermal coefficient of expansion for SMA material
2. Rule Of Mixture
3. Prepreg

بر اساس نتایج آزمایش کشش استحکام کامپوزیت در دمای محیط (۲۶°C) برابر با ۵۴۲ مگاپاسکال و برای دمای بالا (۱۰۰-۹۰) برابر با ۵۲۵ مگاپاسکال می‌باشد.

۲-۳-۲- آلیاژ حافظه‌دار

آلیاژ حافظه‌دار دارای دو فاز اصلی مارتنزیت و آستنیت می‌باشد که فاز مارتنزیت در دمای پایین و سطح تنش بالا پایدار است ولی فاز آستنیت در دمای بالا و سطح تنش پایین پایدار است. این آلیاژها می‌توانند در اثر سرد شدن و همچنین در اثر وارد شدن یک تنش مکانیکی در دمای بالا از فاز آستنیت به فاز مارتنزیت تبدیل شوند. اگر به این آلیاژ در حالی که در فاز مارتنزیت دوقلو می‌باشد تنش مکانیکی مشخصی وارد شود به مارتنزیت غیر دوقلو تبدیل می‌شود. در این فاز اگر آلیاژ باربرداری شود مقداری کرنش پسماند برای آن باقی می‌ماند. حال اگر آنرا تا دمای مشخصی گرم کنیم قادر به بازیابی این کرنش پسماند و بازگشتن به شکل اولیه خود در دمای بالا می‌باشد که به این پدیده اثر حافظه‌شکلی می‌گویند. در این کار برای مدل‌سازی آلیاژ حافظه‌دار از مدل غیرخطی موجود در کتابخانه‌ی نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی رفتار سوپرالاستیسیته و رفتار اثر حافظه‌ی شکل در دمای بالا و پایین می‌باشد. شبیه‌سازی رفتار سوپرالاستیسیته نرم‌افزار بر اساس مدل ۳ بعدی آریکیو [۲۸] می‌باشد.

در شبیه‌سازی اثر حافظه‌شکلی اگر دمای کاری بزرگتر از دمای کامل آستنیت قرار داده شود، رفتار سوپرالاستیسیته شبیه‌سازی خواهد شد. شبیه‌سازی پدیده‌ی اثر حافظه‌ی شکل آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار انسیس ۲ بر اساس مدل ۳ بعدی زواین و همکاران [۲۹-۳۱] می‌باشد.

ثوابت مادی استفاده شده برای شبیه‌سازی خاصیت اثر حافظه شکل $T_0, R, \beta, \bar{\epsilon}_L, E_m, E_a$ می‌باشند که به ترتیب مدول الاستیک فاز آستنیت، مدول الاستیک فاز مارتنزیت، حداکثر کرنش تبدیل فاز، ضریب بزرگنمایی تنش، محدوده‌ی الاستیک، دمای مرجع که در آن هیچ مارتنزیت دوقلویی مشاهده نشود، ضریب سخت‌شوندگی در طی تبدیل فاز و ضریب پواسون فاز آستنیت می‌باشند. مقادیر استفاده شده برای ثوابت مادی استفاده شده در بالا، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ خواص آلیاژ حافظه‌دار [۳۲،۱]

$T_0(k)$	R (MPa)	β (MPa)/°C	$\bar{\epsilon}_L$ (%)	E_m (GPa)	E_a (GPa)
۳۲۵/۱۵	۱۶۰	۱۳/۶۵	۶/۷۵	۲۸	۸۰
T_{mf} (°C)	T_{ms} (°C)	T_{af} (°C)	T_{as} (°C)	ϑ	h (MPa)
۴۲	۵۲	۸۴	۶۹	۰/۳۳	۵۰۰
σ_f^u (MPa)	ϵ_{max}^f	C_A	C_M	σ_f^{cr} (MPa)	σ_s^{cr} (MPa)
۱۰۶۰	۰/۰۹۱۵	۱۳/۵	۸/۴۴	۱۹۱/۱	۲۳۲/۰۵

با استفاده از خواص داده شده ابتدا رفتار ترمومکانیکی سیم‌های حافظه‌دار جداگانه شبیه‌سازی شده که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد مدل استفاده شده و نتایج به‌دست آمده از آن همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

هیبرید، مدول رزین در هر دو دما برابر با ۲ گیگاپاسکال [۱] در نظر گرفته شده است. با جایگذاری رابطه (۳) در رابطه (۱۱) رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید. با توجه به رابطه مدول مؤثر، استحکام نهایی قطعه را می‌توان از معادله (۱۳) به‌دست آورد.

$$E_{SMAHC} = V_S(E_S^a + (E_S^m - E_S^a)\xi) + E_m V_m + E_c V_c \quad (12)$$

$$\sigma_{SMAHC}^u = V_S \sigma_S^u(\epsilon_{max}^s) + V_{comp} \sigma_{comp}^u(\epsilon_{max}^{comp}) \quad (13)$$

که در این رابطه σ_S^u و σ_c^u استحکام نهایی سیم SMA و کامپوزیت تقویت شده می‌باشند.

۳-۲- مشخصه‌سازی مواد

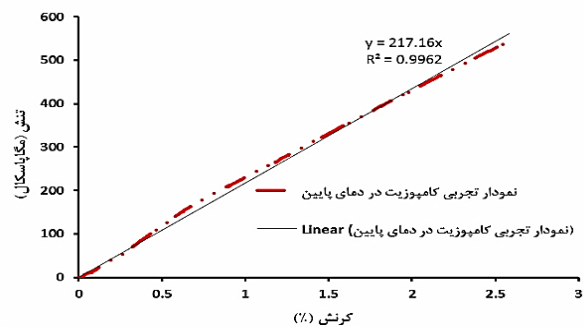
۳-۲-۱- کامپوزیت زمینه

کامپوزیت زمینه از اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه بافته شده می‌باشد که خواص آن در دمای محیط و دمای بالا در جدول ۱ آورده شده است.

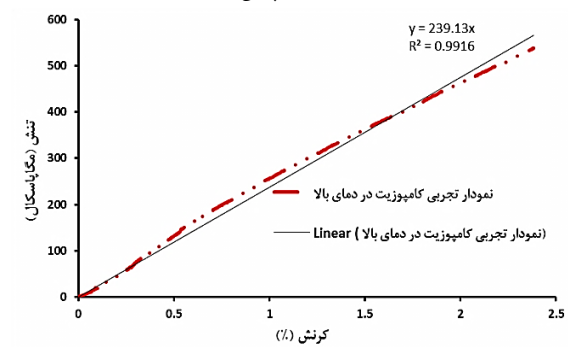
جدول ۱ خواص کامپوزیت بافته شده (۰/۹۰) در دمای پایین و بالا [۲۷]

$G_{xz} = G_{yz}$ (GPa)	G_{xy} (GPa)	$\nu_{xz} = \nu_{yz}$	ν_{xy}	E_{33} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)
۲/۵۷	۴/۲	۰/۳	۰/۱۳۸	۵/۱۴	۲۱/۷	۲۱/۷
۲/۵۷	۴/۲	۰/۳	۰/۱۳۸	۵/۱۴	۲۳/۹	۲۳/۹

ابتدا بر روی نتایج آزمایشگاهی یک برازش منحنی انجام شده و سپس از خواص مکانیکی به‌دست آمده برای شبیه‌سازی استفاده شد. رفتار تنش-کرنش کامپوزیت و برازش منحنی انجام شده برای هر دو دما در شکل ۱ نشان داده شده است.



الف. دمای پایین



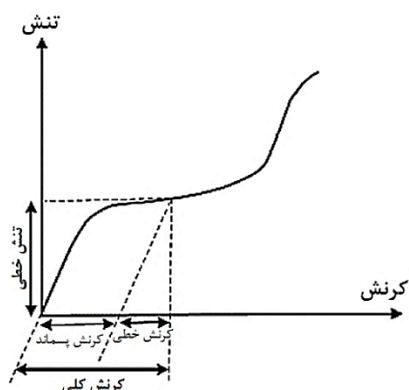
ب. دمای بالا

شکل ۱ رفتار تنش-کرنش کامپوزیت بافته‌شده الف. دما پایین، ب. دمای بالا

1. Auricchio
2. Ansys 15.0

می‌شود ($\bar{\epsilon}_{rec}$) و مقداری از آن درون سیم‌ها باقی می‌ماند ($\bar{\epsilon}_f$). بنابراین می‌توان نوشت:

$$\bar{\epsilon}_{lin} = \bar{\epsilon}_{rec} + \bar{\epsilon}_f \quad (15)$$



شکل ۳ منحنی شماتیک تنش - کرنش درون یک سیم حافظه‌دار [۳۳]

با توجه به اینکه اتصال میان سیم‌های حافظه‌دار و ماتریس کامپوزیت کامل در نظر گرفته شده است، بنابراین تمامی کرنش بازیابی شده باید درون کامپوزیت القاء شود در نتیجه می‌توان گفت:

$$\bar{\epsilon}_{rec} = \|\epsilon_c\| \quad (16)$$

که $\|\epsilon_c\|$ اندازه‌ی کرنش فشاری القاء شده درون کامپوزیت است. با قراردادن رابطه‌ی (۱۶) درون رابطه‌ی (۱۵)، کرنش خطی سیم‌های حافظه‌دار به صورت رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$\bar{\epsilon}_{lin} = \bar{\epsilon}_c + \bar{\epsilon}_f \quad (17)$$

با توجه به اینکه اتصال میان سیم‌های حافظه‌دار و ماتریس کامپوزیت کامل در نظر گرفته شده است، می‌توان یک نیروی عمل و عکس‌العمل میان سیم حافظه‌دار و ماتریس اطراف آن در نظر گرفت. کرنش خطی درون سیم حافظه‌دار به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود.

$$\bar{\epsilon}_f = \sigma_{lin} / E_s = f / A_s E_s \quad (18)$$

که در این رابطه A_s سطح مقطع آلیاژ حافظه‌دار و E_s مدول الاستیک سیم حافظه‌دار می‌باشد. با توجه به خطی در نظر گرفتن رفتار کامپوزیت در جهت طولی و عرضی می‌توان نوشت:

$$\bar{\epsilon}_c = \sigma / E_c = f / A_c E_c \quad (19)$$

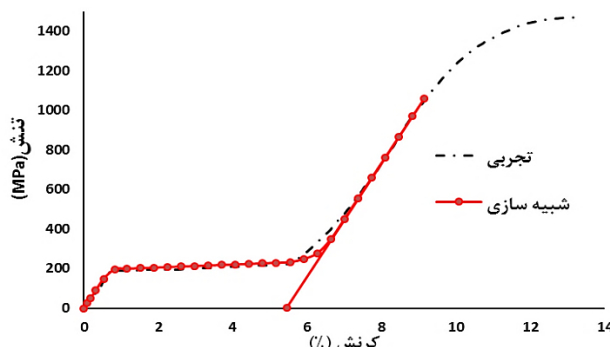
در این رابطه A_c سطح مقطع کامپوزیت و E_c مدول الاستیک کامپوزیت در جهت طولی است. در این صورت می‌توان مدول کامپوزیت را به صورت رابطه (۲۰) محاسبه نمود.

$$E_c = V_{PC} E_{PC} + V_m E_m \quad (20)$$

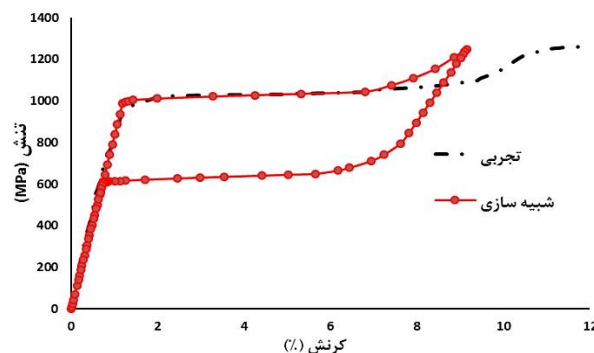
که V_m درصد حجمی ماتریس اطراف سیم‌های حافظه‌دار و V_{PC} درصد حجمی کامپوزیت پیش‌آغشته‌ی اولیه است. با جایگذاری روابط (۱۸) و (۱۹) درون رابطه (۱۷) می‌توان نیروی f را محاسبه نمود.

$$\bar{\epsilon}_{lin} = f / A_c E_c + f / A_s E_s \quad (21)$$

با استفاده از معادله (۲۱) نیروی f محاسبه می‌شود. با استفاده از معادلات (۱۸) و (۱۹) تنش و کرنش فشاری ایجاد شده درون کامپوزیت و همچنین تنش و کرنش کششی باقیمانده درون سیم‌های حافظه‌دار را محاسبه نمود. مقادیر محاسبه شده برای سیم حافظه‌دار و کامپوزیت در جدول ۳ ارائه شده‌اند.



الف. اثر حافظه‌شکلی سیم‌های حافظه‌دار در دمای پایین



ب. اثر حافظه شکل در دمای بیشتر از دمای آستنیتی شدن

شکل ۲ رفتار ترمومکانیکی آلیاژ حافظه‌دار الف. دمای پایین ب. دمای بالا

همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد نتایج عددی و آزمایشگاهی همخوانی خیلی خوبی دارند.

۲-۴- محاسبه تنش فشاری اولیه در کامپوزیت

با توجه به اینکه در آزمایش صورت گرفته توسط طاهری و همکاران ابتدا به سیم‌های حافظه‌دار ۴ درصد پیش کرنش اعمال شده است و سپس درون کامپوزیت قرار گرفته‌اند، پس از پخت کامپوزیت و رها نمودن سیم‌های کشیده شده از چارچوب، درون کامپوزیت یک تنش فشاری القاء می‌شود که مقدار این تنش فشاری با افزایش درصد حجمی سیم‌ها و همچنین با افزایش مقدار پیش کرنش اولیه افزایش می‌یابد. در ادامه برای محاسبه مقدار این تنش فشاری یک مدل تئوری ارائه شده است. این تئوری با فرض کامل در نظر گرفتن اتصال سیم‌ها با ماتریس زمینه ارائه شده است. این فرض با واقعیت در تداخل نیست زیرا برای پیش کرنش اعمال شده، پس از رها نمودن سیم‌های حافظه‌دار هیچ‌گونه جدایشی میان سیم و ماتریس زمینه رخ نمی‌دهد.

کرنش کلی درون سیم‌های حافظه‌دار شامل دو قسمت کرنش خطی ($\bar{\epsilon}_{lin}$) و کرنش تبدیل فاز است. با باربرداری یک سیم پیش کشیده‌ی حافظه‌دار قسمت خطی آن بازیابی می‌شود اما قسمت تبدیل فاز آن به صورت یک کرنش پس‌ماند ($\bar{\epsilon}_{res}$) درون سیم باقی می‌ماند (شکل ۳).

بنابراین کرنش کلی درون سیم‌های حافظه‌دار به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$\epsilon_{total} = \bar{\epsilon}_{lin} + \bar{\epsilon}_{res} \quad (14)$$

پس از قراردادن سیم‌های حافظه‌دار درون کامپوزیت و رهاسازی آن‌ها از قاب اولیه، کامپوزیت از بازیابی کامل کرنش خطی سیم‌های حافظه‌دار جلوگیری می‌کند. بنابراین مقداری از کرنش خطی سیم‌های حافظه‌دار بازیابی

جدول ۳ مقدار تنش و کرنش درون سیم‌های حافظه‌دار و کامپوزیت پس از رهاسازی سیم‌های حافظه‌دار

سیم حافظه‌دار	دما	E_c (GPa)	E_s (GPa)	F (N)	$\bar{\epsilon}_{lin}$	$\bar{\epsilon}_f$ (%)	$\bar{\epsilon}_c$ (%)	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)
سیم ۴٪	محیط	۱۸/۴۹۳	۲۸	۳۶۰/۳۱	۰/۰۰۷۵۰	۰/۷۰۵۵	۰/۰۴۴۵	-۸/۱۳	۱۹۷/۵۴
	بالا	۲۰/۴۲۸	۵۳/۷۸	۱۶۹۲/۸۲	۰/۰۱۹۱۵	۱/۷۲۵۷	۰/۱۸۹۳	-۳۸/۶۷	۹۲۸/۰۸
سیم ۷٪	محیط	۱۸/۴۳۳	۲۸	۶۰۱/۵۴	۰/۰۰۷۵۰	۰/۶۷۳۰	۰/۰۷۷۰	-۱۴/۰۵	۱۸۸/۴۵
	بالا	۲۰/۳۶۸	۵۳/۷۸	۲۷۴۲/۳۷	۰/۰۱۹۱۵	۱/۵۹۷۵	۰/۳۱۷۵	-۶۴/۶۶	۸۵۹/۱۴
سیم ۱۰٪	محیط	۱۸/۳۷۳	۲۸	۸۱۸/۹۳	۰/۰۰۷۵۰	۰/۶۴۱۴	۰/۱۰۸۶	-۱۹/۸۳	۱۷۹/۵۹
	سیم	۲۰/۳۰۸	۵۳/۷۸	۳۶۲۸/۵۷	۰/۰۱۹۱۵	۱/۴۷۹۶	۰/۴۳۵۴	-۸۸/۴۱	۷۹۵/۷۴

برای مدل دو خطی تحت حالت مود ترکیبی شکست، جدایش سطوح المان به هر دو جزء جهش جابجایی^۴ نرمال و مماسی وابسته است. برای در نظر گرفتن سهم هر مود در جدایش یک جهش جابجایی بدون بعد تحت عنوان λ در نظر گرفته شده است که به صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\delta_n^c}{\delta_n^c}\right)^2 + \beta^2 \left(\frac{\delta_t^c}{\delta_t^c}\right)^2} \quad (22)$$

در این رابطه β ثابت بدون بعدی است که اختلاف وزن‌های مربوط به جهش جابجایی نرمال و مماسی را در نظر می‌گیرد. در این حالت روابط میان کشش سطحی نرمال و مماسی با جهش‌های جابجایی در راستاهای نرمال و مماسی به صورت روابط (۲۳) و (۲۴) تعریف می‌شود.

$$T_n = K_n \delta_n (1 - D_m) \quad (23)$$

$$T_t = K_t \delta_t (1 - D_m) \quad (24)$$

که پارامتر آسیب D_m به صورت رابطه (۲۵) تعریف می‌شود.

$$D_m = \begin{cases} 0 & \lambda^{max} \leq \lambda_{cr} \\ \min(1, d_m) & \lambda^{max} > \lambda_{cr} \end{cases} \quad (25)$$

پارامترهای نامبرده شده در معادله (۲۵) با روابط (۲۶) تا (۲۸) تعریف می‌شوند.

$$\lambda_{cr} = \frac{\delta_n^*}{\delta_n^c} = \beta \frac{\delta_t^*}{\delta_t^c} \quad (26)$$

$$d_m = \eta \left(\frac{\lambda^{max} - \lambda_{cr}}{\lambda^{max}} \right) \quad (27)$$

$$\eta = \frac{\delta_n^c}{\delta_n^c - \delta_n^*} = \frac{\delta_t^c}{\delta_t^c - \delta_t^*} \quad (28)$$

در این روابط λ^{max} برابر با حداکثر مقدار λ در طی تاریخچه‌ی بارگذاری است.

۳- مدل‌سازی

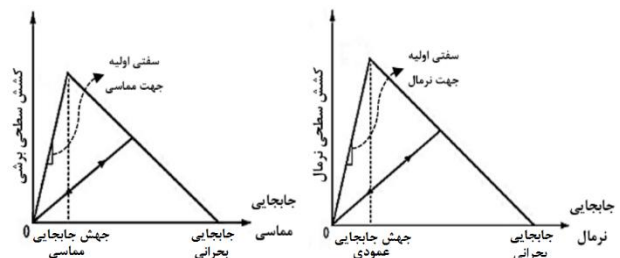
در این قسمت ابتدا به اعتبار سنجی استفاده از مدل جدایش سطحی پرداخته شده و سپس به شبیه‌سازی آزمایش انجام شده توسط طاهری پرداخته و اثر عوامل مختلف ذکر شده در بالا پرداخته می‌شود.

با توجه به مقادیر به‌دست آمده، با افزایش درصد حجمی سیم‌های حافظه‌دار مقدار تنش فشاری درون کامپوزیت افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه با افزایش دما سیم حافظه‌دار وارد فاز آستنیت می‌شود و مدول آن از ۲۸ به ۸۰ گیگاپاسکال می‌رسد، مقدار تنش فشاری درون کامپوزیت حدوداً ۴/۵ برابر می‌شود و این تنش فشاری در بارگذاری‌های بعدی کامپوزیت باعث بهبود عملکرد کامپوزیت می‌شود.

در تئوری ارائه شده برای ساده شدن محاسبات و تطابق با آزمایش، فرض اتصال کامل میان سیم و ماتریس زمینه در نظر گرفته شد. اما از آنجایی که با بارگذاری ثانویه جدایش بین سطحی میان سیم و ماتریس زمینه رخ می‌دهد در شبیه‌سازی صورت گرفته جدایش بین سطحی بر اساس مدل المان ناحیه‌ی چسبیده صورت گرفته است.

۲-۵- تئوری جدایش بین سطحی

مدل ناحیه‌ی چسبیده به دو صورت المان بین سطحی^۱ و المان تماسی^۲ مدل‌سازی می‌شود. در این تحقیق به منظور داشتن قابلیت باربرداری و بارگذاری مجدد از مدل المان چسبیده بین سطحی دوخطی^۳ ارائه شده توسط کریس فیلد و همکاران [۳۴] استفاده شده است. این مدل دو خطی دارای سه حالت غالب نوع I و II و نوع ترکیبی می‌باشد، که در این تحقیق همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، از مود ترکیبی برای برای شبیه‌سازی استفاده شده است. در حالیکه در ثابت K_n و K_t به ترتیب سختی اولیه‌ی چسبندگی سطحی نرمال و مماسی هستند و T_n و T_t کشش سطحی نرمال و مماسی هستند. اندیس‌های 'n'، 't' و 'c' به ترتیب نشان‌دهنده‌ی جهت نرمال، جهت مماسی و مقدار بحرانی می‌باشند.



الف. جهت نرمال

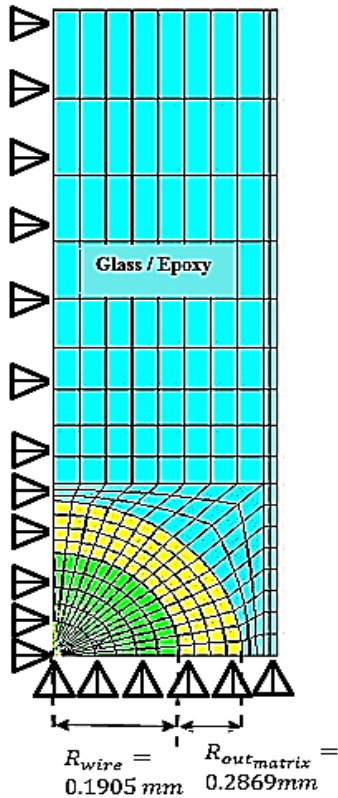
ب. جهت مماسی

1. Interphase Element
2. Contact Element
3. Bilinear

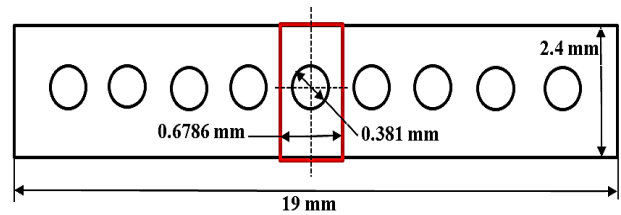
4. Displacement jump

۳-۱- مدل اجزا محدود

در این قسمت یک مدل‌سازی ۳ بعدی از کامپوزیت تقویت شده ارائه شده است. صفحه‌ی کامپوزیتی تقویت شده دارای سطح مقطع مستطیلی با ابعاد ۲۲۰×۱۹×۲/۴ میلی‌متر (ضخامت، عرض، طول) می‌باشد. در آزمایش صورت گرفته توسط طاهری از ۲۸ سیم حافظه‌دار طولی با فاصله‌ی یکسان برای تقویت کامپوزیت استفاده شده است. برای شبیه‌سازی از یک المان حجمی نماینده (RVE) استفاده شده است. المان حجمی در نظر گرفته شده و همچنین ابعاد سطح مقطع نمونه و اجزاء آن در شکل ۵ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی سیم‌های حافظه‌دار و رزین بین شان به صورت یک لایه کامپوزیت با ضخامت قطر سیم‌ها در نظر گرفته شده است. در این صورت ۰/۱۵۸۷۵ درصد حجم کل نمونه ماتریس و سیم خواهد بود.



شکل ۶ توزیع المان در سطح مقطع نمونه



شکل ۵ سطح مقطع نمونه و ابعاد آن

اگر فرض شود سطح مقطع نمونه به صورت شکل ۵ باشد، با توجه به اینکه به جز دو سیم کناری شرایط دیگر سیم‌ها با یکدیگر یکسان است می‌توان یک عنصر حجمی نماینده به صورت بالا در نظر گرفت.

برای مدل‌سازی سیم‌های حافظه‌دار از استوانه‌های توپر و طولی تک جهت در راستای بارگذاری استفاده شده است. با توجه به تقارن المان حجمی نماینده یک چهارم آن شبیه‌سازی شده است و ابعاد آن برابر با ۱۱۰×۰/۳۳۹۳×۱/۲ میلی‌متر مدل‌سازی شده است. لازم به ذکر است طول نمونه آزمایش شده توسط طاهری و همکاران ۲۲۰ میلی‌متر بوده است که به دلیل شرایط تقارن و متناسب بودن ابعاد المان حجمی نماینده، نیمی از آن مدل‌سازی شده است.

در شبیه‌سازی انجام شده برای کامپوزیت تقویت‌شده با ۷٪ درصد سیم حافظه‌دار، یک سیم حافظه‌دار با شعاع ۰/۱۹۰۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و سپس برای ۸/۸۷۵٪ پلیمر زمینه یک استوانه‌ی توخالی با شعاع خارجی ۰/۲۸۶۹ میلی‌متر و شعاع داخلی سیم حافظه‌دار در اطراف آن در نظر گرفته شده است.

۳-۱-۱- شرایط مرزی و شبکه بندی

با توجه به آزمایش انجام گرفته کامپوزیت و زمینه اپوکسی در راستای طولی ثابت شده‌اند اما برای اینکه میان سیم حافظه‌دار و زمینه اپوکسی جدایش رخ دهد، شرایط مرزی طولی برای سیم حافظه‌دار مقید نشده است. با توجه به اینکه یک چهارم نمونه مدل‌سازی شده است صفحات برش خورده در راستای عمود بر صفحه بسته شده‌اند. توزیع المان‌ها و شرایط مرزی در سطح مقطع در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

برای اینکه محاسبات دقت لازم را داشته باشد باید سائز المان‌ها حداقل بوده و برای جلوگیری از خطای محاسباتی اندازه المان‌ها نباید بیش از اندازه کوچک باشد. محیط نیم‌دایره‌ی سیم حافظه‌دار به ۱۶ قسمت مساوی تقسیم گردیده و ضخامت کامپوزیت نیز به ۱۰ قسمت نامساوی تقسیم شده است.

البته از آنجایی که المان ناحیه‌ی چسبیده به اندازه‌ی المان‌ها حساسیت دارد ضلع طولی نمونه در راستای کشش در ۳ حالت مختلف به ۱۱۰، ۲۲۰ و ۴۴۰ المان مختلف تقسیم بندی شد که با توجه به دقت جواب‌ها و همگرایی حل در تمامی مدل‌سازی‌ها از ۲۲۰ المان استفاده شده است. این ۳ تعداد المان ذکر شده برای آنالیز حساسیت مش صورت گرفته استفاده شده‌اند، همچنین برای انجام آنالیز حساسیت محیط سیم حافظه‌دار به ۱۲، ۱۶ و ۱۸ قسمت مساوی نیز تقسیم و در نهایت ۱۶ قسمت مساوی به عنوان اندازه المان بهینه انتخاب شد.

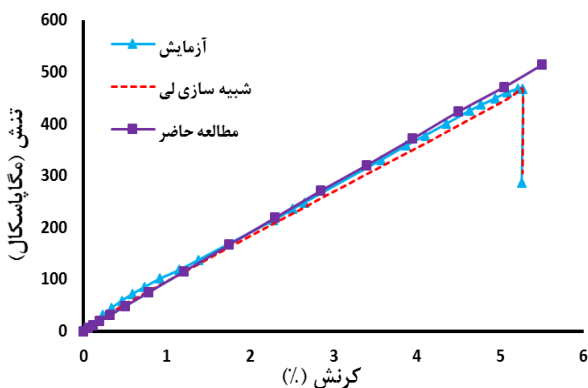
۳-۱-۲- خواص مدل ناحیه چسبیده

با توجه به اینکه آزمایش بیرون کشیدن سیم حافظه‌دار از کامپوزیت انجام نشده است برای به دست آوردن خواص مدل ناحیه‌ی چسبیده ابتدا خواص داده شده در مقاله لی [۱۰] استفاده شد سپس مقادیر آن‌ها به تدریج اصلاح شد تا نزدیک‌ترین جواب‌ها با نتایج آزمایش کشش انجام شده توسط طاهری به دست آید. مقادیر استفاده شده برای ثابت مدل ناحیه چسبیده برای هر دو دمای محیط و دمای بالا در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

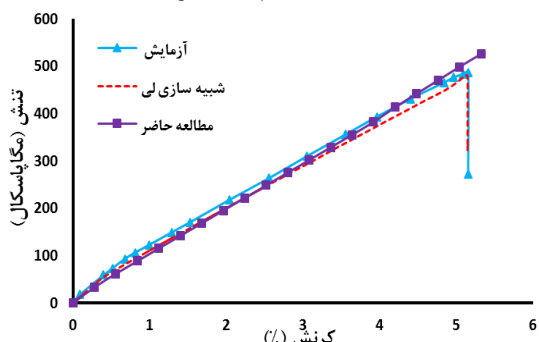
جدول ۴ ثابت مدل ناحیه چسبیده در حالت تماسی و چسبیده سطحی

شبیه‌سازی	$K_t = K_n$ (MPa/mm)	δ_n^c (mm)	T_n^{max} (MPa)	δ_t^c (mm)	T_t^{max} (MPa)
دمای محیط	۸۰۰۰	۰/۱۶۶۷	۲۰	۰/۱۶۶۷	۲۰
دمای بالا	۱۸۰۰۰	۰/۰۲۷	۱۰۰	۰/۰۲۷	۱۰۰

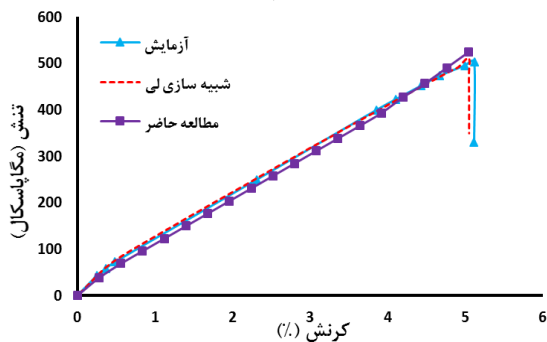
لازم به ذکر است که با افزایش دما، مقدار تنش مورد نیاز برای انجام جدایش افزایش چشم‌گیری می‌یابد، همچنین جابجایی مورد نیاز برای



الف. یک سیم حافظه‌دار

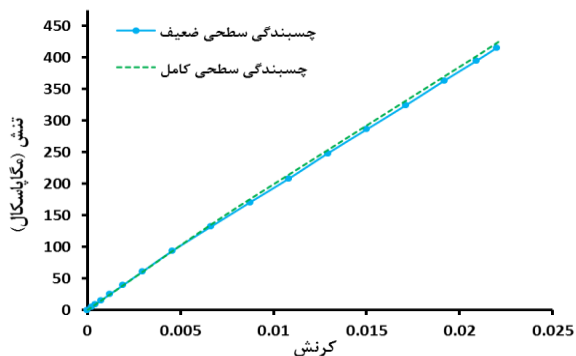


ب. سه سیم حافظه‌دار



پ. پنج سیم حافظه‌دار

شکل ۷ مقایسه‌ی منحنی تنش متوسط بر حسب کرنش برای درصد‌های مختلف سیم حافظه‌دار، الف: یک سیم (۰/۲۲٪ درصد حجمی)، ب: سه سیم (۰/۱۶۵٪ درصد حجمی)، پ: پنج سیم (۱/۰۸٪ درصد حجمی)



شکل ۸ تنش متوسط - کرنش مهندسی در حالت بدون پیش‌کرنش در دمای محیط

جدایش نیز افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت با افزایش دما، خواص چسبندگی بین سطحی بهبود قابل توجهی خواهد داشت [۱۲]. لذا مقادیر ثابت برای دمای بالا نسبت به دمای پایین در جدول ۴ افزایش قابل توجهی داشته‌اند.

۳-۲- اعتبار سنجی جدایش بین‌سطحی

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده ابتدا نتایج به‌دست آمده از آزمایش کشش تک محوره و شبیه‌سازی انجام شده توسط لی [۱۰] استفاده شده است. در این تحقیق لی و همکاران پس از انجام تست کشش بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار (برای سه درصد حجمی مختلف از آلیاژ حافظه‌دار)، با استفاده از مدل ناحیه چسبندگی (با استفاده از المان تماسی) به شبیه‌سازی نتایج آزمایش پرداخته‌اند.

در این کار تست کشش تک محوره برای کامپوزیت دارای سه درصد مختلف سیم حافظه‌دار با مقادیر ۰/۲۲، ۰/۶۵ و ۱/۰۸ درصد انجام شده است. ابعاد قطعه کامپوزیتی برابر با ۲۰×۲۶×۳/۵ میلی‌متر بوده و قطر سیم‌های حافظه‌دار برابر با ۰/۵ میلی‌متر بوده است. ثوابت استفاده شده برای شبیه‌سازی کار انجام شده توسط لی در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۵ ثوابت مدل ناحیه چسبندگی در مدل تماسی و چسبندگی سطحی [۱۰] و [۱۷]

مدل استفاده شده شبیه‌سازی	$K_t = K_n$ (MPa/mm)	δ_n^c (mm)	T_n^{max} (MPa)	δ_f (mm)	T_f^{max} (MPa)
لی (المان تماسی)	-----	۰/۰۲۷	۱۳۵	۰/۰۲۷	۱۳۵
شبیه‌سازی مدل المان چسبندگی	۸۰۰۰ [۱۷]	۰/۰۲۸	۱۲۰	۰/۰۲۸	۱۲۰

از آنجایی که هدف اعتبارسنجی شبیه‌سازی بود، تسلیم نهایی در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است. نتایج به‌دست آمده برای سه درصد مختلف سیم حافظه‌دار در شکل ۷ ارائه شده‌اند.

همانطور که از شکل ۷ پیداست شبیه‌سازی صورت گرفته دارای دقت خوبی بوده و حداکثر خطا نسبت به آزمایش برابر با ۵/۰۹ درصد برای حالت تک سیم حافظه‌دار می‌باشد. برای حالت‌های ۳ و ۵ سیم حافظه‌دار حداکثر خطا برابر با ۴/۶۸ و ۳/۴۶ درصد بوده است.

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی

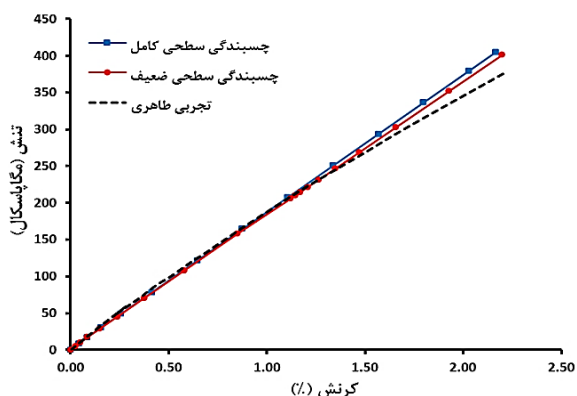
۳-۳-۱- کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های بدون پیش‌کرنش در دمای محیط در این حالت از سیم‌های بدون پیش‌کرنش در دمای محیط برای تقویت کامپوزیت زمینه استفاده شده است. در این حالت به دلیل تبدیل مارتنزیتی که درون سیم‌های حافظه‌دار رخ می‌دهد منحنی به صورت یک منحنی دوخطی خواهد بود. در شکل ۸ منحنی تنش متوسط بر حسب کرنش مهندسی برای حالت بدون پیش‌کرنش در دمای محیط نشان داده شده است. در این حالت از آنجایی که سیم حافظه‌دار وارد ناحیه‌ی تبدیل فاز شده است، و مدول الاستیک آن‌ها به مقدار ناچیزی تقلیل پیدا می‌کند، لذا ناحیه‌ی مربوط به جدایش بین سطحی بسیار کوچک بوده و به همین دلیل با افزایش تنش اختلاف شبیه‌سازی و آزمایش ثابت باقی مانده است تا در نهایت کامپوزیت تسلیم شده است. همچنین شیب منحنی در کرنش ۰/۰۰۵ کاهش پیدا کرده است که این بدلیل تبدیل فاز درون سیم‌های حافظه‌دار بوده است.

در شکل ۱۰ با فاصله گرفتن از ابتدای قطعه به سمت میانه‌ی قطعه، توزیع تنش درون سیم حافظه‌دار به صورت شکل‌های (الف) تا (ت) تغییر می‌کند. بر این اساس چون تمرکز تنش در دو انتهای قطعه بیشتر است جدایش از المان‌های ابتدایی شروع می‌شود (حالت الف) ولی در میانه قطعه (حالت ت) هیچ جدایشی در المان بین‌سطحی رخ نداده است.

۳-۳-۲- کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار، دارای ۴٪ پیش‌کرنش

در دمای پایین

در این حالت از سیم‌های دارای ۴ درصد پیش‌کرنش برای تقویت کامپوزیت استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در این حالت با نتایج به‌دست آمده از آزمایش انجام شده توسط طاهری و همکاران [۱] مقایسه شده‌اند و نتایج آزمایش دقت نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۱۱ حداکثر خطای بین شبیه‌سازی در حالت‌های بدون در نظر گرفتن مدل ناحیه‌ی چسبندگی و با در نظر گرفتن آن برابر با ۵/۸۵ و ۴/۹ درصد می‌باشد.



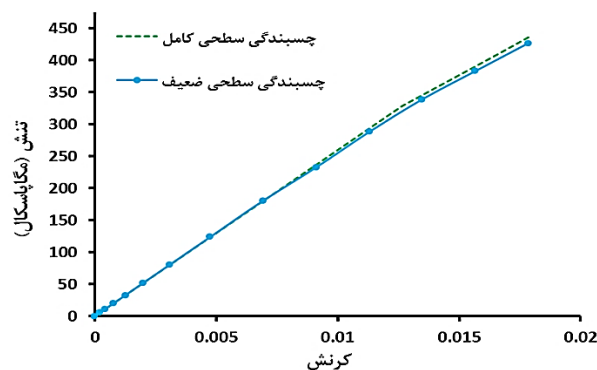
شکل ۱۱ تنش متوسط - کرنش برای کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های پیش‌کشیده در دمای پایین

مطابق با شکل ۱۱ منحنی تقریباً به صورت خط می‌باشد زیرا سیم حافظه‌دار در کل زمان بارگذاری در حالت تبدیل فاز است و مدول آن ثابت و خیلی کوچک می‌باشد. همچنین دلیل اینکه منحنی به‌دست آمده از آزمایش به صورت یک منحنی دوخطی می‌باشد نیز این است که طبق شکل ۱، رفتار کامپوزیت کاملاً به صورت خطی نمی‌باشد و از آنجایی که اغلب نمونه (۸۵٪) کامپوزیت می‌باشد در رفتار غالب آن باعث دوخطی شدن نمودار می‌شود. در شکل ۱۲ منحنی تنش - جابجایی طولی (z) در برخی از المان‌های سیم حافظه‌دار که دچار جدایش شده‌اند و تنش درون آن‌ها افت کرده است، نشان داده شده است.

قسمت ابتدایی منحنی‌های شکل ۱۲ مربوط به اعمال ۴ درصد پیش‌کرنش می‌باشد. سپس با رهاکردن سیم‌های حافظه‌دار و اعمال یک کرنش فشاری درون ماتریس و کامپوزیت اطراف سیم، تنش درون سیم‌های حافظه‌دار کمی آفت نموده و با بارگذاری ثانویه دوباره، تنش درون سیم‌های حافظه‌دار افزایش یافته است تا جدایش رخ داده و باعث آفت ناگهانی تنش در سیم‌های حافظه‌دار شده است. در شکل ۱۲ حالت (الف) در انتهای نمونه در نظر گرفته شده و چون در لبه‌ی انتهایی به دلیل شرایط مرزی تمرکز تنش وجود دارد این ناحیه زودتر از نواحی دیگر دچار جدایش می‌شود. به ترتیب برای نمودارهای (ب)، (پ) و (ت) در راستای طولی نمونه و به سمت مرکز نمونه، توزیع تنش سیم حافظه‌دار ترسیم شده است.

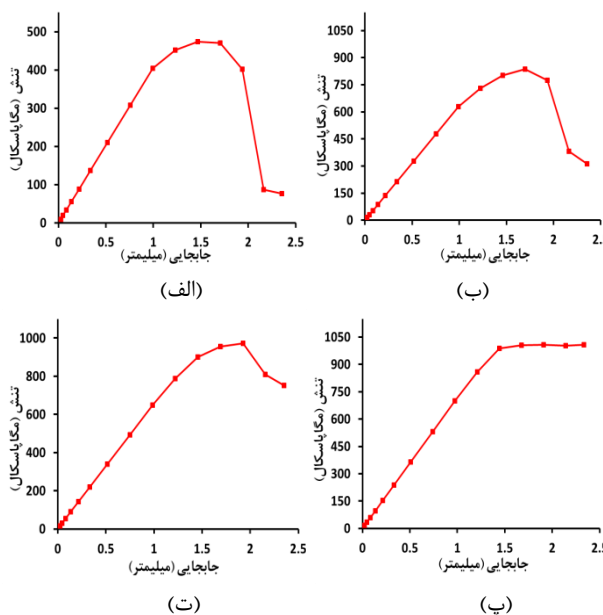
۳-۳-۲- کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های بدون پیش‌کرنش در دمای بالا

در این حالت از سیم‌های بدون پیش‌کرنش در دمای بالا برای تقویت کامپوزیت زمینه استفاده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت با در نظر گرفتن اتصال بین سطحی ضعیف، منحنی تنش - کرنش آن پایین‌تر از حالت اتصال سطحی کامل است. در شکل ۹ تنش متوسط - کرنش مهندسی در حالت بدون پیش‌کرنش در دمای بالا نشان داده شده است.



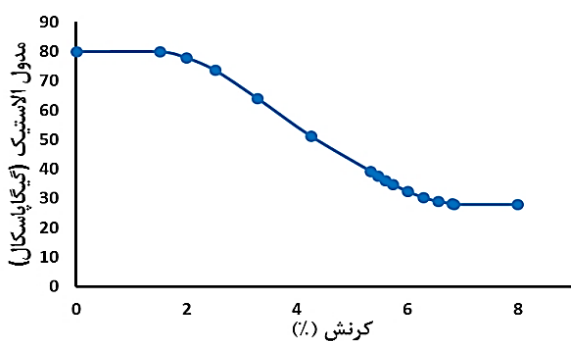
شکل ۹ تنش متوسط - کرنش مهندسی در حالت بدون پیش‌کرنش در دمای بالا

در این حالت با توجه به اینکه خواص المان بین لایه‌ای (تنش جدایش) بزرگتر از حالت دما پایین است اولین جدایش‌ها در تنش حدود ۱ درصد کرنش (کرنش شروع تبدیل فاز ۱/۳۳ درصد) رخ داده است، سپس با افزایش بار جدایش افزایش یافته و مدول ماده کاهش است، پس از آن با ورود به ناحیه‌ی تبدیل فاز سیم حافظه‌دار جدایش رشد نکرده است و در نتیجه شیب منحنی (مدول متوسط کامپوزیت) ثابت باقی مانده است. همچنین ورود سیم حافظه‌دار به ناحیه‌ی تبدیل فاز باعث توقف جدایش بین سطحی می‌شود. در شکل ۱۰ منحنی تنش - جابجایی طولی (z) در برخی از المان‌های سیم حافظه‌دار که دچار جدایش شده‌اند و تنش درون آن‌ها افت کرده است، نشان داده شده است.



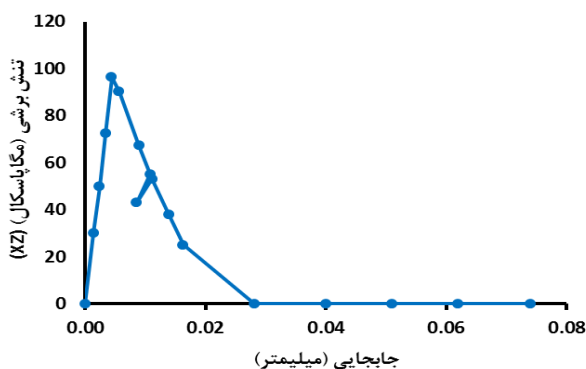
شکل ۱۰ منحنی تنش - جابجایی طولی درون سیم حافظه‌دار برای المان‌های دچار جدایش شده در حالت دما بالا (۱۰۰ درجه سلسیوس)

اعمال ۴ درصد کرنش، مدول سیم‌های حافظه‌دار به مقدار ۵۳/۷۸ گیگاپاسکال می‌رسد. شکل ۱۴ نحوه تغییرات مدول سیم حافظه‌دار را بر حسب معادله ۷ نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ تغییرات مدول سیم‌های حافظه‌دار بر حسب درصد کرنش

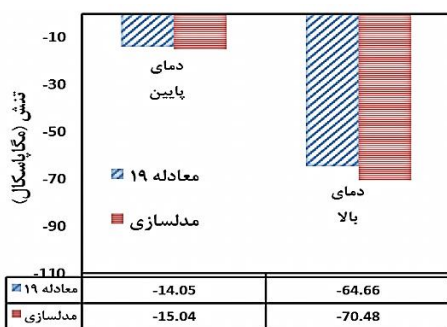
با رسیدن تنش بین سطحی به مقدار کافی جدایش میان سطوح المان ناحیه‌ی چسبیده شروع می‌شود. در شکل ۱۵ منحنی تنش برشی بر حسب جایجایی برای یک المان بین لایه‌های نشان داده شده است.



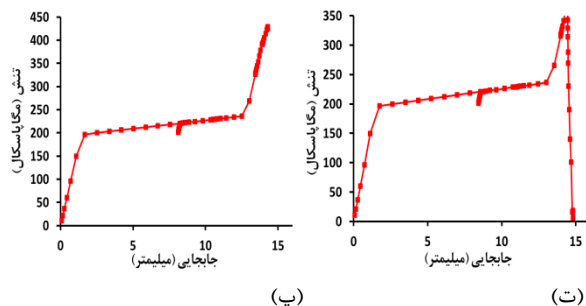
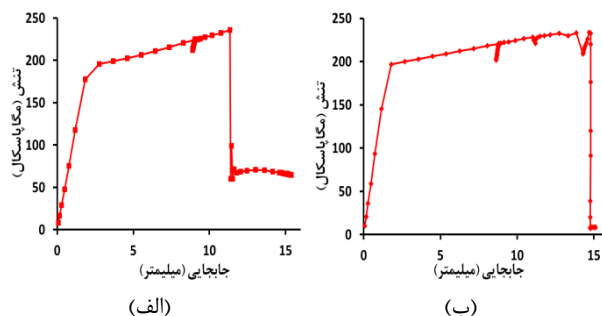
شکل ۱۵ تاریخچه‌ی تنش برشی در المان ناحیه‌ی چسبیده

۳-۳-۵- تنش فشاری درون کامپوزیت

همانطور که قبلاً ذکر شد قرار دادن سیم‌های حافظه‌دار پیش‌کشیده درون کامپوزیت و سپس رها نمودن آن‌ها، باعث اعمال یک تنش فشاری درون کامپوزیت اولیه می‌شود. مقدار این تنش فشاری با استفاده از تئوری ارائه شده و همچنین شبیه‌سازی صورت گرفته شده محاسبه شده است. شکل ۱۶ مقادیر این تنش‌های پسماند را برای دو حالت دما پایین و دما بالا درون کامپوزیت نشان می‌دهد.



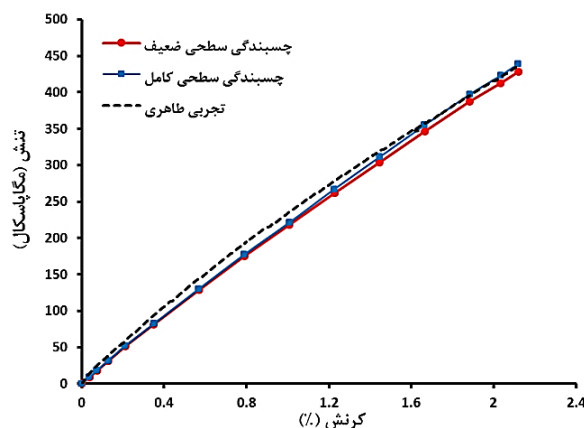
شکل ۱۶ تنش فشاری موجود در کامپوزیت پس از رها سازی سیم‌ها



شکل ۱۲ منحنی تنش - جایجایی طولی درون سیم حافظه‌دار دارای ۴ درصد پیش‌کرنش، برای المان‌های دچار جدایش شده در حالت دمای محیط

۳-۳-۴- کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار، دارای ۴٪ پیش‌کرنش در دمای بالا

در این حالت نیز از سیم‌های دارای ۴ درصد پیش‌کرنش در دمای بالا برای تقویت کامپوزیت استفاده شده است. در این حالت بر خلاف حالت دمای پایین منحنی به صورت یک منحنی دوخطی می‌باشد. زیرا در حالت دما پایین طبق جدول ۳ پس از رها سازی سیم‌ها حدود ۰/۰۷ درصد کرنش باقی‌مانده شده بود که مقدار کوچکی می‌باشد، اما در حالت دما بالا این مقدار حدود ۰/۳۲ درصد می‌باشد. بنابراین پس از بارگذاری از آنجایی که مدول سیم‌های دارای ۴ درصد پیش‌کرنش برابر با ۵۳/۷۸ گیگاپاسکال می‌باشد و پس از ورود به ناحیه‌ی تبدیل فاز مدول آن به حدود ۱ گیگاپاسکال آفت می‌کند بنابراین منحنی تنش متوسط - کرنش به صورت یک منحنی دوخطی خواهد شد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳ تنش متوسط - کرنش برای کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های پیش‌کشیده در دمای بالا

از آنجایی که با افزایش بار سیم حافظه‌دار از فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود، مدول آن کاهش می‌یابد، بنابراین همانطور که ذکر شد پس از

سازه‌ها به مقدار افزایش دما و دمای فعال‌سازی سیم‌های حافظه‌دار بسیار توجه نمود.

۴. با اعمال پیش‌کرنش به سیم‌های حافظه‌دار طول ناحیه‌ی جدایش بین سطحی افزایش خواهد یافت، ضمن اینکه باعث کاهش در مدول کلی سازه نیز می‌شود. بنابراین بسیار مهم است که مقدار پیش‌کرنش نیز با دقت انتخاب شود.

۵. مقادیر تنش فشاری پسماند درون کامپوزیت در دمای پایین نسبت به حالت دما بالا بسیار کوچک می‌باشد. همچنین پیش‌کرنش باعث ورود سیم حافظه‌دار به ناحیه‌ی تبدیل فاز شده و در نتیجه باعث افت مدول کلی کامپوزیت می‌شود. در حالت دما بالا استفاده از سیم‌های دارای پیش‌کرنش، باعث ایجاد تنش فشاری قابل‌توجهی درون کامپوزیت می‌شود، اما بدلیل ورود سیم‌ها به ناحیه‌ی تبدیل فاز مارتنزیتی سفتی کلی کامپوزیت کاهش می‌یابد. علاوه بر آن مقدار تنش بالای درون سیم‌ها باعث جدایش بین سطحی بیشتری می‌شود. بنابراین باید در انتخاب مقدار پیش‌کرنش اعمالی به سیم‌های حافظه‌دار دقت نمود.

۶. با توجه به حالات بررسی شده بهترین حالت استفاده از سیم‌های بدون پیش‌کرنش در وضعیت دمای بالا می‌باشد، زیرا در این حالت، مدول کلی کامپوزیت اولیه بدلیل مدول بالای فاز آستنیت افزایش چشم‌گیری می‌نماید. ضمن اینکه رفتار کلی کامپوزیت تا حدود کرنش ۱/۶ درصد، خطی خواهد بود. حتی اگر بارگذاری تا حدی باشد که سیم‌های حافظه‌دار وارد ناحیه‌ی تبدیل فاز گردند، پس از باربرداری به نقطه‌ی اولیه خود باز خواهند گشت.

۵- فهرست علائم

E_S	مدول سیم حافظه‌دار
E_C	مدول کامپوزیت
E_m	مدول ماتریس زمینه
E_{SMAHC}	مدول مؤثر کامپوزیت تقویت شده با سیم حافظه‌دار
ϵ_{total}	کرنش کلی درون سیم‌های حافظه‌دار در اثر بارگذاری
T	کشش سطحی
T_0	دمای مرجع
ϵ_L	حداکثر کرنش تبدیل فاز
h	ضریب بزرگنمایی تنش
R	محدوده الاستیک
زیر نویس‌ها	
res	پسماند
rec	بازیابی شده
lin	قسمت خطی
f	سیم‌های حافظه‌دار
m	معادل
n	جهت نرمال
t	جهت برشی
c	مقادیر بحرانی

با توجه به مطالب گفته شده می‌توان دریافت که مقدار این تنش فشاری با افزودن درصد حجمی سیم‌های حافظه‌دار افزایش می‌یابد و با کاهش آن مقدار تنش فشاری کاهش می‌یابد. باید به این نکته توجه داشت که افزایش بیش از حد درصد سیم‌های حافظه‌دار باعث جدایش زود هنگام میان سیم و ماتریس زمینه می‌شود، بنابراین باید مقدار بهینه‌ای برای انتخاب درصد حجمی سیم‌های حافظه‌دار انتخاب نمود.

با توجه به مطالب گفته شده در بالا، حسن استفاده از سیم‌های پیش‌کشیده در این می‌باشد که پس از اینکه کامپوزیت دچار ترک‌خوردگی ماتریسی شد و سفتی آن کاهش یافت می‌توان با افزایش دمای سیم‌های پیش‌کشیده یک تنش فشاری بر روی کامپوزیت اعمال نمود و باعث کاهش تمرکز تنش در نوک ترک‌ها شده و از پیشروی آن‌ها جلوگیری نمود. علاوه بر این با افزایش مقدار پیش‌کرنش اولیه سیم‌ها می‌توان مقدار این تنش فشاری را افزایش داده و باعث بهبود وضعیت سازه‌ای کامپوزیت شد. اما انتخاب میزان مناسب پیش‌کرنش در سیم‌های حافظه‌دار اهمیت داشته و در صورت نامناسب بودن، در باربرداری و بارگذاری بعدی اثر تقویت‌کنندگی نخواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تقویت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری با سیم‌های حافظه‌دار را بررسی نموده و اثر سیم‌ها بر روی رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت بررسی شد. علاوه بر این اثر پارامترهای مختلف مثل جدایش بین سطحی میان سیم‌های حافظه‌دار و ماتریس زمینه، دمای کاری نمونه، مقدار پیش‌کرنش اولیه سیم‌ها بررسی شد. در ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشی موجود در مرور ادبیات صحت شبیه‌سازی انجام گرفته ارزیابی و سپس اثر پارامترهای مختلف بررسی شد. همچنین یک مدل تئوری با فرض چسبندگی سطحی کامل میان سیم حافظه‌دار و ماتریس زمینه ارائه و به وسیله آن مقدار تنش فشاری ناشی از رهاسازی سیم‌های حافظه‌دار محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. رفتار کامپوزیت‌های تقویت شده با سیم‌های بدون پیش‌کرنش در هر دو دمای محیط و بالا به صورت یک منحنی دوخطی می‌باشد، که علت آن رخ‌دادن تبدیل مارتنزیتی درون سیم‌های حافظه‌دار می‌باشد.
۲. در نظر گرفتن چسبندگی سطحی ضعیف میان سیم حافظه‌دار و ماتریس زمینه باعث بهبود شبیه‌سازی نسبت به حالت چسبندگی بین‌سطحی کامل، شد. اما از آنجایی که سیم‌های حافظه‌دار درصد کمی از نمونه را شامل می‌گردند، جدایش قسمتی از آن‌ها در پاسخ تنش - کرنش کلی کامپوزیت تأثیر چندانی نمی‌گذارد و در نظر گرفتن جدایش بین لایه‌ای در محاسبات، هزینه محاسباتی را چندین برابر می‌کنند. با توجه به دقت قابل قبول نتایج حالت چسبندگی بین سطحی کامل، می‌توان برای طراحی اولیه‌ی این قطعات از فرض چسبندگی سطحی کامل با ضریب اطمینان مناسب استفاده نمود.
۳. با افزایش تنش تبدیل فاز درون سیم‌های حافظه‌دار به دلیل افزایش دما، مقدار جدایش بین‌سطحی حدود سه برابر نسبت به حالت دما پایین افزایش یافت، بنابراین با توجه به تغییرات نسبتاً بزرگ در تنش سیم‌ها پس از فعال‌سازی باید در طراحی این

- intelligent material systems and structures, Vol. 4, No. 2, pp. 229-242, 1996.
- [24] Boyd, J. G. and Lagoudas, D. C., "A Thermodynamical Constitutive Model for Shape Memory Materials," Part I, the monolithic shape memory alloy, International Journal of Plasticity, Vol. 12, No. 6, pp. 805-842, 1996.
- [25] Boyd, J. G. and Lagoudas, D. C., "A Thermodynamical Constitutive Model for Shape Memory Materials," Part II, the SMA composite material, International Journal of Plasticity, Vol. 12, No. 7, pp. 843-873, 1996.
- [26] Auricchio, F. and Taylor, R. L., "Shape-Memory Alloys: Modelling And Numerical Simulations Of The Finite-Strain Superelastic Behavior," Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 143, No. 1, pp. 175-194, 1997.
- [27] Tomblin, J. McKenna, J. Ng, Y. and Raju, K. S., "Advanced General Aviation Transport Experiments," 2001.
- [28] Auricchio, F., "A Robust Integration-Algorithm for a Finite-Strain Shape-Memory-Alloy Superelastic Model," International Journal of plasticity, Vol. 17, No. 7, pp. 971-990, 2001.
- [29] Auricchio, F. Taylor, R. L. and Lubliner, J., "Shape Memory Alloys: Macromodelling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior," Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 146, No. 3, pp. 281-312, 1997.
- [30] Souza, A. C. Mamiya, E. N. and Zouain, N., "Three-Dimensional Model for Solids Undergoing Stress-Induced Phase Transformations," European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol. 17, No. 5, pp. 789-806, 1998.
- [31] Auricchio, F. and Petrini, L., "Improvements and Algorithmical Considerations on a Recent Three-Dimensional Model Describing Stress-Induced Solid Phase Transformations," International Journal for numerical methods in engineering, Vol. 55, No. 11, pp. 1255-1284, 2002.
- [32] Boulevard, B., "Memry Corp, High Temperature Shape Memory Nitinol Alloy," <http://www.memry.com/products-services/melting/nitinol-alloys>, available in 10, March 2012
- [33] Liang, C and Rogers, C. A., "One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials," Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 1, No. 2, pp. 207-234, 1990.
- [34] Alfano, G. and Crisfield, M., "Finite Element Interface Models for the Delamination Analysis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues," International journal for numerical methods in engineering, Vol. 50, pp. 1701-1736, 2001.
- [1] Taheri-Behrooz, F. Taheri, F. and Hosseinzadeh, R., "Characterization of a Shape Memory Alloy Hybrid Composite Plate Subject to Static Loading," Materials and Design, Vol. 32, No. 5, pp. 2923-2933, 2011.
- [2] Aurrekoetxea, J. Zurbitu, J. De Mendibil, I. O. Agirregomezkorta, A. Sánchez-Soto, M. and Sarrionandia, M., "Effect of Superelastic Shape Memory Alloy Wires on the Impact Behavior of Carbon Fiber Reinforced in Situ Polymerized Poly(Butylene Terephthalate) Composites," Materials Letters, Vol. 65, No. 5, pp. 863-865, 2011.
- [3] Cho, H. K. and Rhee, J., "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.
- [4] 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.
- [5] Lau, K. T. Chan, A. W. L. Shi, S. Q. and Zhou, L. M., "Debond Induced by Strain Recovery of an Embedded NiTi Wire at a NiTi/epoxy Interface: Micro-Scale Observation," Materials and Design, Vol. 23, No. 3, pp. 265-270, 2002.
- [6] 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. 18, pp. 737-746, 2004.
- [7] Lee, J. K. and Taya, M., "Strengthening Mechanism of Shape Memory Alloy Reinforced Metal Matrix Composite," Scripta Materialia, Vol. 51, No. 5, pp. 443-447, 2004.
- [8] Raghavan, J. Bartkiewicz, T. Boyko, S. Kupriyanov, M. Rajapakse, N. and Yu, B., "Damping, Tensile, and Impact Properties of Superelastic Shape Memory Alloy (SMA) Fiber-Reinforced Polymer Composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 41, No. 3, pp. 214-222, 2010.
- [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 and Design, Vol. 40, pp. 138-147, 2012.
- [10] Lei, H. Wang, Z. Tong, L. Zhou, B. and Fu, J., "Experimental and Numerical Investigation on the Macroscopic Mechanical Behavior of Shape Memory Alloy Hybrid Composite with Weak Interface," Composite Structures, Vol. 101, pp. 301-312, 2013.
- [11] Antico, F. Zavattieri, P. Jr, L. H. Mance, A. Rodgers, W. and Okonski, D., "Adhesion of Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Wires to Thermoplastic Materials: Theory and Experiments," Smart Materials and Structures, Vol. 21, No. 3, pp. 035022, 2012.
- [12] Poon, C. K. Lau, K. T. and Zhou, L. M., "Design of Pull-Out Stresses for Prestrained SMA Wire/Polymer Hybrid Composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 36, pp. 25-31, 2005.
- [13] Wang, Y. Zhou, L. Wang, Z. Huang, H. and Ye, L., "Stress Distributions in Single Shape Memory Alloy Fiber Composites," Materials & Design, Vol. 32, pp. 3783-3789, 2011.
- [14] Khalili, S. M. R. Saeedi, A. and Fakhimi, E., "Evaluation of the Effective Mechanical Properties of Shape Memory Wires/Epoxy Composites Using Representative Volume Element," Journal of Composite Materials, p. 0021998315596453, 2015.
- [15] Wang, X. and Hu, G., "Stress Transfer for a SMA Fiber Pulled Out From an Elastic Matrix and Related Bridging Effect," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 36, pp. 1142-1151, 2005.
- [16] Kushch, V. Shmegeera, S. Brondsted, P. and Mishnaevsky, L., "Numerical Simulation of Progressive Debonding in Fiber Reinforced Composite Under Transverse Loading," International Journal of Engineering Science, Vol. 49, pp. 17-29, 2011.
- [17] Dawood, M. El-Tahan, M. and Zheng, B., "Bond Behavior of Superelastic Shape Memory Alloys to Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 77, pp. 238-247, 2015.
- [18] Payandeh, Y. Meraghni, F. Patoo, E. and Eberhardt, A., "Effect of Martensitic Transformation on the Debonding Propagation in Ni-Ti Shape Memory Wire Composite," Materials Science and Engineering: A, Vol. 518, pp. 35-40, 2009.
- [19] Payandeh, Y. Meraghni, F. Patoo, E. and Eberhardt, A., "Debonding Initiation in a NiTi Shape Memory Wire-Epoxy Matrix Composite. Influence of Martensitic Transformation," Materials & Design, Vol. 31, pp. 1077-1084, 2010.
- [20] Liang, C. and Rogers, C. A., "One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials," Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 1, No. 2, pp. 207-234, 1990.
- [21] Tanaka, K. Kobayashi, S. and Sato, Y., "Thermomechanics of Transformation Pseudoelasticity and Shape Memory Effect in Alloys," International Journal of Plasticity, Vol. 2, No. 1, pp. 59-72, 1986.
- [22] Ivshin, Y. and Thomas, J. P., "A Thermomechanical Model for a One Variant Shape Memory Material," Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 5, No. 4, pp. 455-473, 1994.
- [23] Brinson, L. C., "One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable," Journal of