



مطالعه کمانش استاتیکی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار به روش تجربی

سید محمدرضا خلیلی^{1,2*}، طیبه اکبری³

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

2- استاد مدعو، دانشکده مکانیک کاربردی، انستیتو تکنولوژی هند، دهلی نو

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

* تهران، صندوق پستی 1999143344، smrkhalili2017@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش به مطالعه کمانش استاتیکی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار به صورت تجربی پرداخته شده است. سازه کامپوزیتی مورد نظر از جنس کربن اپوکسی می‌باشد که بصورت چهار لایه به روش رشته‌پیچی با دو لایه چینی مختلف $+55^\circ/-55^\circ/\text{SMA}/+55^\circ/-55^\circ$ و $+75^\circ/-75^\circ/\text{SMA}/+75^\circ/-75^\circ$ ساخته شده است، سیم‌های حافظه‌دار از نوع سوپرالاستیک انتخاب شده‌اند که در لایه میانی در دو حالت، با پیش کرنش 5% و بدون پیش کرنش چیده شده‌اند. کلیه آزمون‌های کمانش استاتیکی بر روی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی توسط دستگاه یونیورسال 2.5 تنی، تحت فشار محوری با نرخ بارگذاری 0.1mm/min انجام شده است. در آزمون کمانش نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با سیم‌های سوپرالاستیک و نمونه‌های بدون سیم، دو نوع شرایط مرزی بررسی شده‌است؛ یکی تکیه‌گاه دو سر گیردار و دیگری تکیه‌گاه دو سر مفصل. همچنین جهت استخراج خواص مکانیکی پوسته کامپوزیتی آزمون‌های استاندارد متعددی شامل آزمون کشش رزین، آزمون کشش مکانیکی حلقه نول، آزمون کشش نمونه‌های استاندارد کامپوزیتی تک جهت و آزمون کشش سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک انجام شده است. نتایج آزمون‌های کمانش نشان می‌دهند وجود سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک باعث افزایش ظرفیت تحمل بار بحرانی کمانش در پوسته کامپوزیتی می‌گردد. از سویی دیگر در لایه چینی با زاویه 75 درجه نسبت به 55 درجه، سازه کامپوزیتی بار کمانشی بیشتری تحمل می‌کند. همچنین در شرایط مرزی دو سر مفصل بار بحرانی کمانش بزرگتر از حالتی است که شرایط مرزی پوسته بصورت دو سر گیردار باشد.

تاریخ دریافت: 96/2/7

تاریخ پذیرش: 96/4/10

کلیدواژگان:

کمانش استاتیکی
پوسته استوانه‌ای
آلیاژهای حافظه‌دار
سوپرالاستیک
کربن اپوکسی

An investigation on the static buckling behavior of laminated cylindrical composite shells with embedded SMA wires by experiment

Seyed Mohammad Reza Khalili^{1,2*}, Tayebe Akbari³

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology-Dehli, New Dehli, India

3- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1999143344, Tehran, Iran, smrkhalili2017@gmail.com

Keywords

Static Buckling
Cylindrical Shells
Shape Memory Alloys
Superelastic
Carbon Epoxy

Abstract

In the present work static buckling behavior of laminated cylindrical composite shells were investigated experimentally. The laminated composite shells were fabricated from carbon-epoxy composite by filament winding process. The stacking sequences were $+55^\circ/-55^\circ/\text{SMA}/+55^\circ/-55^\circ$ and $+75^\circ/-75^\circ/\text{SMA}/+75^\circ/-75^\circ$. The superelastic SMA wires placed between plies 2 and 3 of the four layers laminate. Shape memory alloy wires were used in the middle of the composite in two cases, without pre-strain and with 5% pre-strain. All of buckling test were performed using 2.5 ton universal test machine with crosshead speed of about 0.1 mm/min. The buckling tests were arranged with two kinds of boundary conditions, simply supported- simply supported and clamped-clamped boundary conditions. Several tests were done to achieve the mechanical properties of composite shells, like standard tensile test of the resin samples, mechanical tensile test of the nol ring, tensile test of the unidirectional composite samples and the tensile test of the superelastic shape memory alloy wire. The experimental buckling analyses of the cylindrical composite shells with embedded superelastic SMA wires show that the critical buckling load increased by using the SMA wires. Also, in the laminated composite with stacking sequences $+75^\circ/-75^\circ/\text{SMA}/+75^\circ/-75^\circ$, the buckling load of shells was increased. In addition the buckling capability of composite shells in the simply supported- simply supported boundary condition is greater than the clamped-clamped boundary condition.

Please cite this article using:

Khalili, S.M.R. and Akbari, T., "An investigation on the static buckling behavior of laminated cylindrical composite shells with embedded SMA wires by experiment", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 551-564, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

راجرز و همکاران [5] خواص ورق‌های کامپوزیتی لایه‌ای را با استفاده از سیم‌های حافظه‌دار بهبود دادند. آنها از دو مفهوم کنترل فعال خواص و کنترل فعال انرژی کرنشی برای کنترل سازه سود جستند. در تحقیق آنها آنالیز خطی ورق کامپوزیتی لایه‌ای متقارن با سیم‌های حافظه‌دار در شرایط مرزی ساده با استفاده از روش ریلی ریتز صورت گرفته است. آنها ارتعاشات آزاد، کمانش، خیز و کنترل آکوستیکی سازه‌ای را با استخراج روابطی بر اساس قانون مخلوط‌ها بررسی نمودند. سپس دریافتند که استفاده مناسب در حدود 10 درصد از سیم‌های حافظه‌دار می‌تواند منجر به کاهش 80% خیز ناشی از خمش، افزایش 50% فرکانس طبیعی و افزایش 50% بار کمانش سازه شود.

استاکوویچ و همکاران [5-6] فرکانس طبیعی و کمانش ورق‌های کامپوزیتی حافظه‌دار را با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول و به روش اجزا محدود مورد بررسی قرار دادند. المان‌های در نظر گرفته شده توسط آنها دارای 5 درجه آزادی یعنی جابجایی در سه راستا و دو درجه آزادی چرخش بود. نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ حافظه‌دار تاثیر بزرگی بر روی افزایش فرکانس طبیعی اول سازه و دمای بحرانی کمانش دارد.

لی و همکاران [7-8] شبیه‌سازی عددی رفتار کمانش حرارتی پوسته‌های کامپوزیتی با سیم‌های حافظه‌دار را توسط نرم‌افزار اباکوس انجام دادند. آنها برای شبیه‌سازی رفتار ترمومکانیکی سیم حافظه‌دار معادله بنیادین SMA را بصورت زیر برنامه نوشتند و به مدلسازی آباکوس ارتباط دادند. تحلیل کمانش حرارتی پوسته کامپوزیتی حافظه‌دار نشان داد که دمای بحرانی کمانش سازه با استفاده از نیروی بازیابی عملگر حافظه‌دار افزایش و تغییر شکل کمانش حرارتی کاهش می‌یابد.

روو و همکاران [9] پس کمانش حرارتی پوسته کامپوزیتی هیبرید کربن اپوکسی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق برای مدلسازی SMA از معادلات ساختاری برینسون و برای مدلسازی پوسته کامپوزیتی از فرمول بندی اجزا محدود غیرخطی بر اساس تئوری تغییر شکل چند لایه⁶ استفاده شده و رابطه کرنش-جابجایی برای در نظر گرفتن جابجایی‌های خارج از صفحه بزرگ که در اثر بار حرارتی اعمال می‌شوند، بصورت معادلات غیرخطی ون کارمن نوشته شده است. آنها نتیجه گرفتند که تنش‌های بازیابی ناشی از سیم‌های حافظه‌دار سفتی سازه را افزایش داده و مانع از ناپایداری آن در اثر پس کمانش می‌شود.

پاندا و سینگ [10] کمانش و پس کمانش پوسته کامپوزیتی کربن اپوکسی نازک کروی تقویت‌شده با SMA را تحت میدان حرارتی یکنواخت مورد بررسی قرار دادند. وجود دو عامل هندسه کروی که غیر خطی است و معادلات غیرخطی حاکم بر SMA ماهیت مسئله را غیر خطی کرده است. روش حل آنها استفاده از معادلات گرین لاگرانژ بر اساس تئوری مرتبه بالای برشی⁷ بود. در نهایت مشاهده گردید که افزایش انحنا و ضخامت پوسته، دمای بحرانی کمانش را کاهش و افزایش کسر حجمی SMA دماهای بحرانی کمانش و پس کمانش را افزایش می‌دهد، همچنین دمای کمانش و پس کمانش به تغییرات پیش کرنش وابسته نیست.

تامسون و لافلن [11] پس کمانش حرارتی ورق کامپوزیتی چند لایه کربن اپوکسی تقویت‌شده با سیم‌های حافظه‌دار را مورد بررسی قرار دادند. آنها با اعمال فشار خارجی دو برابر بار بحرانی کمانش حرارتی به ورق

سازه‌های کامپوزیتی چند لایه بدلیل سفتی و نسبت استحکام به وزن بالای خود، کاربردهای فراوانی در مهندسی دارند. با این وجود موضوع مقاومت آنها در برابر کمانش در سال‌های زیادی مورد توجه محققین قرار گرفته است، زیرا بار بحرانی کمانش در آنها کمتر از استحکام فشاری سازه است. کمانش در اثر بارهای فشاری که توسط دو عامل؛ یکی بارگذاری خارجی و دیگری بار حرارتی ایجاد می‌شود رخ می‌دهد. اخیراً برای بالا بردن مقاومت سازه در برابر کمانش از آلیاژهای حافظه‌دار¹ (SMA) استفاده می‌شود. زیرا این مواد رفتار حسگر و عملگر از خود نشان می‌دهند. مهمترین مزیت آلیاژهای حافظه‌دار نسبت به سایر مواد توانایی بالای آنها در ماکزیمم کرنش بازیابی است (میزان کرنشی که در اثر بارگذاری و باربرداری در ماده حافظه‌دار باقی می‌ماند و با اعمال حرارت حذف می‌شود. این کرنش یکی از ویژگی‌های مواد حافظه‌دار است)، بنابراین در کنترل کمانش مناسب می‌باشند [1].

آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل خواص منحصر به فرد خود در سازه‌های مکانیکی به شکل‌های مختلفی مانند الیاف، ورق و وصله² استفاده می‌شوند. خاصیت سیم‌های حافظه‌دار در بازیابی کرنش منجر به کنترل تغییر شکل در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با این آلیاژها می‌شود. از این ویژگی آلیاژهای حافظه‌دار بویژه در زمینه پایداری سازه‌ها استفاده می‌شود؛ بطوریکه تنش‌های بازیابی ناشی از این آلیاژها منجر به کاهش بارهای فشاری و در نتیجه مقاومت سازه در برابر کمانش و پس کمانش می‌گردد [2].

از سیم‌های حافظه‌دار به دو صورت می‌توان بعنوان عملگر در کنترل سازه‌های کامپوزیتی استفاده نمود. روش اول روش کنترل فعال خواص³ می‌باشد که در آن سیم حافظه‌دار بدون کرنش اولیه در سازه قرار داده می‌شود و فقط از تغییر سفتی سیم حافظه‌دار در دمای بالا استفاده می‌گردد. روش دوم کنترل فعال انرژی کرنشی⁴ نامیده می‌شود که در آن از خاصیت تنش‌های بازیابی⁵ استفاده می‌شود. به این صورت که در ابتدا در سیم‌های حافظه‌دار کرنش اولیه ایجاد شده و سپس در سازه بکار برده می‌شود. بنابراین در دماهای بالا بعلا وجود قیود، در سازه تنش‌های بازیابی کششی ایجاد می‌کند [3].

سفتی سازه اثر زیادی بر روی رفتار مکانیکی آن دارد و همواره ارتقای این پارامتر مورد توجه محققین بوده است. سفتی یک عامل مهم برای بررسی استحکام کششی یا خمشی، فرکانس طبیعی، مقاومت به ضربه و استحکام خستگی و شکست می‌باشد. سفتی بصورت مقاومت ماده به تغییر شکل الاستیک تعریف می‌شود. در مواد آیزوتروپیک سفتی تنها بصورت یک عدد که ضریب الاستیسیته نامیده می‌شود بیان می‌گردد. اما در پوسته‌های کامپوزیتی سفتی بصورت یک ماتریس تعریف می‌شود. سفتی به دو گروه سفتی ذاتی و اکتسابی تقسیم می‌شود. سفتی ذاتی میزان سفتی است که ماده بعد از روند ساخت در خود دارد. سفتی اکتسابی میزان سفتی است که سازه در حین کار مانند اثرات تنش حرارتی، پیش کرنش و اثرات محیطی بدست می‌آورد. سفت کنندگی آلیاژ حافظه‌دار از نوع دوم می‌باشد [4].

¹ Shape memory alloys (SMA)

² Patch

³ Active property tuning

⁴ Active strain energy tuning

⁵ Recovery stress

⁶ Layerwise

⁷ High order shear deformation theory (HSDT)

اعمال یک بار مکانیکی بزرگ به ماده در فاز آستنیت می‌باشد. نتیجه چنین بارگذاری می‌تواند تشکیل فاز مارتنزیت غیر دوقلویی یا جهت یافته³ کامل از فاز آستنیت باشد. اگر دمای ماده، بالاتر از دمای پایان آستنیت⁴ باشد، به محض باربرداری، مجدداً یک بازیابی شکل کامل به فاز آستنیت دیده می‌شود. این رفتار ماده، اثر سوپرالاستیک نامیده می‌شود. مسیر بارگذاری که اثر سوپرالاستیک را نشان می‌دهد، در شکل 1 نشان داده شده‌است. دماهای انتقال فاز شامل دمای پایان مارتنزیت M_f ، دمای آغاز مارتنزیت M_s ، دمای آغاز آستنیت A_s و دمای پایان آستنیت A_f می‌باشند. همچنین سطوح تنش که انتقال مارتنزیتی شروع شده و پایان می‌یابد، به ترتیب با σ^{Ms} و σ^{Mf} نشان داده شده و به طور مشابه، هنگامی که از ماده حافظه‌دار، باربرداری می‌شود، سطوح تنشی که در آن انتقال معکوس به فاز آستنیت آغاز شده و پایان می‌یابد نیز به ترتیب با σ^{As} و σ^{Af} نمایش داده شده‌است.

در شکل 2 نمودار تنش- کرنش رفتار سوپرالاستیک آلیاژ حافظه‌دار نمایش داده شده‌است. اگر ماده در فاز آستنیت و در دمایی بالاتر از A_s و پایین تر از A_f آزمایش شود، بازیابی شکل بطور کامل مشاهده می‌شود.

3- بخش تجربی

در بخش تجربی مواد و روش‌های ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی و نمونه‌های استاندارد جهت استخراج خواص مکانیکی شرح داده شده‌اند.

3-1- مواد

در این پژوهش از رزین سه جزئی معادل LY 556، سخت کننده HY 917 و شتاب دهنده DY 70 به ترتیب با نسبت وزنی 100، 90 و 0.5 در ساخت پوسته کامپوزیتی استفاده شده‌است. همچنین الیاف کربن بکار برده شده از نوع T300 با Yield 12K است که همگی از محصولات شرکت پیشرو مبتکر پیوند PMP می‌باشند. دلیل استفاده از این رزین زمان ژله‌ای شدن بالا، ویسکوزیته بالا و نیز کاربرد فراوان آن در صنایع نظامی می‌باشد. سیم‌های حافظه‌دار مورد استفاده از نوع سوپرالاستیک است که در دمای محیط در فاز آستنیت خود قرار دارد. این سیم محصول شرکت G&H آلمان می‌باشد.

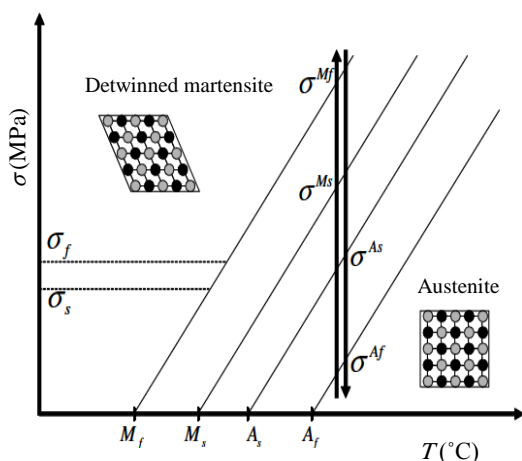


Fig. 1 Loading path of the superelastic SMA [1]

شکل 1 مسیر بارگذاری آلیاژ حافظه‌دار سوپرالاستیک [1]

کامپوزیتی مشاهده نمودند که استفاده از کنترل‌هایی با کسر حجمی کوچکی از SMA می‌تواند جابجایی‌های خارج از صفحه ناشی از پس‌کمانش را کاهش دهد.

خلیلی و همکاران [12] یک حل اجزا محدود جدید در قالب فرمولاسیون متحدالشکل کرر¹ برای تحلیل دینامیکی ورق کامپوزیتی هیبرید تقویت شده با SMA را با در نظر گرفتن تغییر فاز و اثرات غیرخطی ماده در هر نقطه از ورق ارائه نمودند. روش کرر¹ تئوری‌های بسیاری را در فرم متحد می‌آورد بطوریکه تفاوت آنها در مرتبه بسط متغیرها در راستای ضخامت ورق می‌باشد. در این تحقیق اثر سیم حافظه‌دار بر اتلاف انرژی ناشی از ارتعاشات اجباری بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش نسبت طول به ضخامت و ضریب تناسب ورق، ضریب اتلاف انرژی سازه کاهش می‌یابد.

خلیلی و سعیدی [13] به مدلسازی میکرومکانیک و بررسی تجربی خواص الاستیک کامپوزیت پلیمری تقویت شده با سیم‌های کوتاه حافظه‌دار پرداختند. آن‌ها تاثیر کسر حجمی سیم‌های حافظه‌دار، ضریب لاغری و جهت گیری سیم‌ها را بر روی مدول الاستیک کامپوزیت مورد بررسی قرار دادند. رحیمی بافرایی و اختراعی طوسی [14] به تحلیل فرکانسی تیر کامپوزیتی آلیاژ حافظه‌دار روی بستر الاستیک پاسترناک با استفاده از چهار نظریه حاکم بر تیر شامل اویلر-برنولی، رایلی، برشی و تیموشینکو پرداختند. آنها تاثیر ضرایب بستر الاستیک پاسترناک، تعداد الیاف حافظه‌دار، نسبت ضخامت به طول تیر، حد کرنش قابل بازیابی و نسبت طول به پهنای تیر بر روی فرکانس طبیعی در دمایی بالاتر از دمای پایان آستنیت را تعیین نمودند.

در تحقیقات انجام شده در زمینه کمانش سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار عمدتاً از روش‌های عددی استفاده شده‌است و تعداد محدودی از پژوهش‌ها به بررسی تجربی این موضوع پرداخته‌اند [15-16]. در تحقیق حاضر به بررسی تجربی کمانش پوسته استوانه‌ای تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار پرداخته می‌شود. آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده دارای رفتار سوپرالاستیک می‌باشد. این آلیاژها در دمای محیط در فاز آستنیت (فاز سفت خود) قرار دارند و اگر در همین دما تحت بارگذاری قرار گیرند، در تنش‌هایی بالاتر از تنش بحرانی، بدون تغییر دما، تغییر فاز داده و وارد فاز مارتنزیت (فاز نرم خود) می‌شوند. در واقع در این تحقیق سیم سوپرالاستیک بدون پیش کرنش در فاز آستنیت خود و با اعمال پیش کرنش 5% در فاز مارتنزیت خود قرار می‌گیرد و اثر سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک بر رفتار کمانشی پوسته کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در این پژوهش اثر میزان پیش‌کرنش، اثر لایه‌چینی کامپوزیت و اثر شرایط مرزی در رفتار کمانشی پوسته کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار بررسی می‌گردد.

2- معرفی رفتار سوپرالاستیک آلیاژ حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار با توجه به دما و شرایط کاری دارای دو فاز مختلف هستند که هر کدام دارای ساختار کریستالی و خواص متفاوت می‌باشند. یکی فاز دما بالا که آستنیت نامیده می‌شود و دیگری فاز دما پایین که به آن مارتنزیت می‌گویند. تغییر شکل از یک فاز به فاز دیگر توسط انتشار آنها انجام نمی‌شود بلکه توسط فرایند اعوجاج برشی شبکه‌ها² صورت می‌گیرد. دو مشخصه اصلی رفتاری آلیاژهای حافظه‌دار در طی بارگذاری، اثر حافظه‌داری و اثر سوپرالاستیک می‌باشد. در اثر حافظه‌داری، اعمال حرارت منجر به تغییر فاز آلیاژ حافظه‌دار می‌گردد. در حالیکه در اثر سوپرالاستیک انتقال فاز، ناشی از

¹ CUF

² Shear lattice distortion

³ Detwinned martensite

⁴ Austenite finish (A_f)

3-2-2- ساخت نمونه استاندارد رزین برای آزمون کشش

قالب تهیه شده جهت ساخت نمونه‌های استاندارد از جنس سیلیکونی³ می‌باشد. ابعاد نمونه مطابق استاندارد ASTM D638 در نظر گرفته شده است [17]. پس از آماده سازی رزین و پر کردن قالب، نمونه‌ها مطابق سیکل دمایی در نظر گرفته شده برای پخت نمونه‌های استوانه‌ای کامپوزیتی پخت می‌گردند.

جدول 1 مشخصات هندسی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی

Table 1 Geometric characteristics of cylindrical composite shell

پارامتر	مقدار
طول	200 mm
قطر داخلی	20 mm
ضخامت پوسته	1 mm
قطر سیم	0.3 mm
تعداد سیم	4 عدد

لازم به ذکر است که سیلیکون مورد استفاده در قالب گیری می‌بایست مخصوص رزین گرم باشد، زیرا در غیر اینصورت هنگام پخت در کوره حباب‌های فراوانی در نمونه ایجاد می‌شود. شکل 5 قالب و نمونه‌های آزمون استاندارد کشش را نشان می‌دهد.

3-2-3- ساخت نمونه‌های استاندارد کامپوزیتی تک جهت برای آزمون کشش برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی 0 و 90 درجه جهت آزمون کشش از استاندارد ASTM D3039 [18] استفاده شده است. همچنین برای ساخت نمونه کامپوزیتی 45 درجه از استاندارد ASTM D 3518 [19] استفاده شده است. طول نمونه تک جهته‌ی صفر درجه 250mm، عرض آن 15mm و ضخامت نمونه 2 تا 3 میلیمتر می‌باشد و در نمونه تک جهته‌ی 90 درجه طول 175mm، عرض آن 25mm و ضخامت نمونه 2 تا 3 میلیمتر می‌باشد. ابعاد نمونه 45 درجه نیز 175 و 25 میلیمتر می‌باشد.



Fig. 3 Mandrel and fixtures used in the manufacturing process

شکل 3 مندرل و فیکسچر مورد استفاده در فرایند ساخت

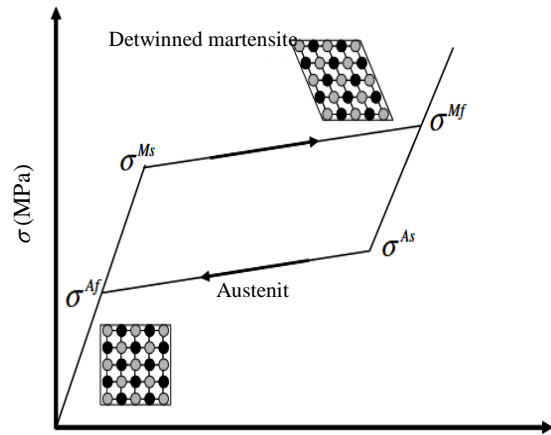


Fig. 2 Stress-strain behavior of the superelastic SMA [1]

شکل 2 رفتار تنش - کرنش آلیاژ حافظه‌دار سوپراستتیک [1]

3-2-2- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در این پژوهش شامل: پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی دارای سیم حافظه‌دار، پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی بدون سیم، نمونه استاندارد آزمون کشش جهت استخراج خواص رزین، نمونه استاندارد نول جهت استخراج استحکام نهایی کامپوزیت، نمونه‌های استاندارد تک جهته‌ی 0، 90 و 45 درجه جهت استخراج مدول‌های الاستیسیته در جهت‌های 1 و 2 و مدول برشی کامپوزیت می‌باشند.

3-2-1- ساخت پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی

برای آماده سازی رزین ابتدا درصد وزنی مناسب از آن به همراه سخت کننده و شتاب دهنده ترکیب شده و حداکثر به مدت 5 دقیقه بروش دستی هم زده شدند. سپس نمونه‌های کامپوزیتی استوانه‌ای با دستگاه رشته‌پیچی¹ با ابعاد تعیین شده در جدول 1 ساخته شدند.

پیچش پوسته‌های کامپوزیتی بگونه‌ای انجام شده است که سیم‌های حافظه‌دار دقیقاً در لایه میانی نمونه قرار گرفته‌اند. سیم‌های حافظه‌دار به کمک فیکسچرهای تعبیه شده در دو سر مندرل² در فواصل مساوی از یکدیگر چیده شده‌اند. همچنین در بعضی نمونه‌ها پیش کرنش لازم توسط این دو فیکسچر به سیم‌ها اعمال شده است. شکل 3 مندرل و فیکسچر را نشان می‌دهد. در شکل 4 نیز فرایند پیچش پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار مشاهده می‌شود. پس از تکمیل فرایند پیچش، نمونه‌های آماده شده به مدت 2 ساعت در کوره با دمای 120 درجه قرار داده شدند تا فرایند پخت آنها کامل گردد.

برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای بدون سیم مانند نمونه‌های دارای سیم حافظه‌دار از روش رشته‌پیچی استفاده شده است. پوسته‌های کامپوزیتی بصورت 4 لایه با لایه‌چینی $[+55^{\circ}/-55^{\circ}/+55^{\circ}/-55^{\circ}]$ و $[+75^{\circ}/-75^{\circ}/+75^{\circ}/-75^{\circ}]$ 175° ساخته شده و به مدت 2 ساعت در کوره با دمای 120 درجه سانتیگراد پخت شده‌اند.

¹ Filament winding

² Mandrel

³ Siltech (RTV2508)

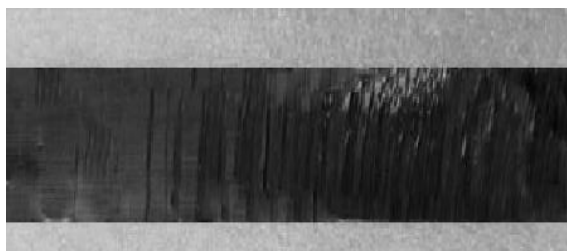


Fig. 7 The 90° unidirectional tensile specimen

شکل 7 نمونه کشش 90 درجه



Fig. 4 Filament winding process of the cylindrical composite shell with embedded shape memory alloy wires

شکل 4 فرایند پیچش پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار

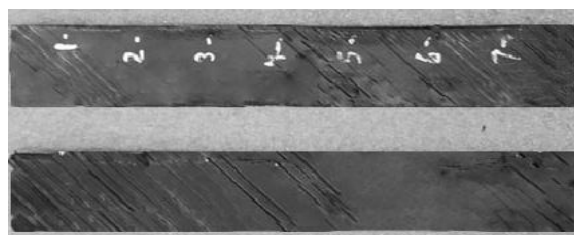


Fig. 8 The $\pm 45^\circ$ laminated samples of the tensile test

شکل 8 نمونه کشش 45 درجه

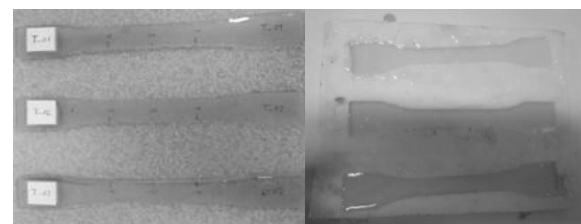


Fig. 5 Silicone molds and samples for the standard tensile test

شکل 5 قالب سیلیکونی و نمونه‌های آزمون استاندارد کشش

4- آزمون‌ها

در این پژوهش آزمون‌های مختلفی بر روی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده انجام گرفته است. این آزمون‌ها به دو دسته کلی آزمون‌های کشش بر روی نمونه‌های استاندارد جهت استخراج خواص مکانیکی کامپوزیت و سیم حافظه‌دار و آزمون کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقسیم می‌شوند.

4-1- آزمون کشش رزین

آزمون کشش توسط دستگاه یونیورسال 2.5 تن انجام شده است. در این آزمون سرعت بارگذاری مطابق استاندارد معادل 2mm/min در نظر گرفته شده است. همچنین برای اندازه‌گیری تغییر طول نمونه‌ها از اکستنسیومتر استفاده شده است.

شکل‌های 10 و 11 به ترتیب آزمون کشش رزین و نمودار تنش-کرنش حاصل از آن را نشان می‌دهند. همچنین در جدول 2 خواص مکانیکی رزین LY 556 ارائه شده است.



Fig. 9 Filament winding process of the nol rings

شکل 9 فرایند پیچش حلقه نول

در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی تک جهت برای آزمون کشش که جهت محاسبه خواص کامپوزیت بکار می‌رود نیز از روش رشته‌پیچی استفاده شده است. تا شبیه سازی کاملی از فرایند ساخت پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای حاصل شود. زیرا تنها در این روش است که میزان کشش در الیاف کربن و میزان آغشته سازی نخ به رزین می‌تواند مشابه پوسته‌های کامپوزیتی باشد. در شکل‌های 6، 7 و 8 نمونه‌های تک جهت استاندارد 0 درجه، 90 درجه و 45 درجه به ترتیب نشان داده شده‌اند.

3-2-4- ساخت نمونه استاندارد حلقه نول¹ جهت آزمون کشش

آزمون حلقه نول یک روش موثر جهت بدست آوردن خواصی چون استحکام و مدول کششی، استحکام و مدول خمشی، استحکام فشاری و استحکام خستگی می‌باشد. در این تحقیق تنها از آزمون کشش حلقه نول جهت استخراج استحکام نهایی کامپوزیت استفاده شده است. این نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM STP617 با قطر داخلی 146 mm، عرض 6 mm و ضخامت 3 mm ساخته شدند [20]. حلقه‌های نول با استفاده از دستگاه رشته‌پیچی با شرایطی مشابه پیچش نمونه‌های استوانه‌ای پیچیده شده‌اند. شکل 9 فرایند پیچش حلقه نول را نشان می‌دهد.

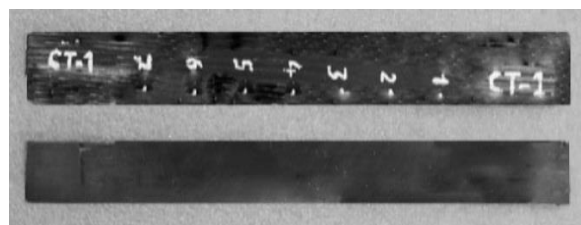


Fig. 6 The 0° unidirectional tensile specimen

شکل 6 نمونه کشش صفر درجه

¹ Naval ordnance laboratory (NoI)

شکل 13 نمودار تنش-کرنش نمونه کامپوزیتی صفر درجه و شکل 14 نمودار تنش-کرنش نمونه کامپوزیتی 45 درجه را تحت کشش نشان می‌دهد. مدول برشی از رابطه (1) محاسبه می‌شود [21]

$$G_{12} = \frac{\sigma_{xx}}{2(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی فوق G_{12} مدول برشی در صفحه 1-2، σ_{xx} تنش در جهت بارگذاری، ε_{xx} کرنش در جهت بارگذاری و ε_{yy} کرنش در جهت عمود بر بارگذاری می‌باشد.

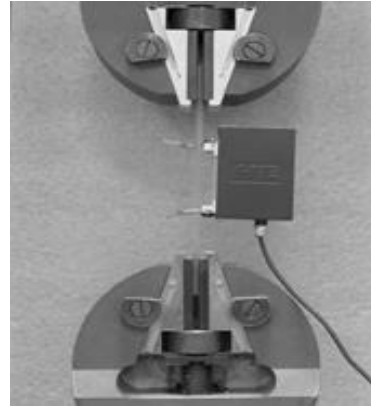


Fig. 10 Tensile test of the resin samples

شکل 10 آزمون کشش نمونه‌های رزین

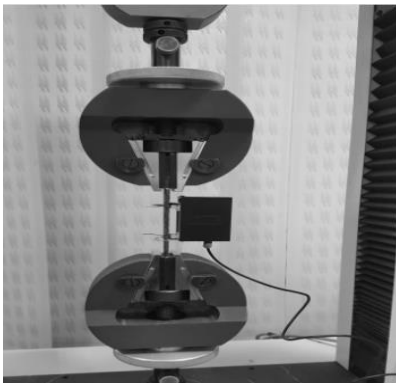


Fig. 12 Tensile test of the unidirectional samples

شکل 12 آزمون کشش نمونه‌های استاندارد تک جهته

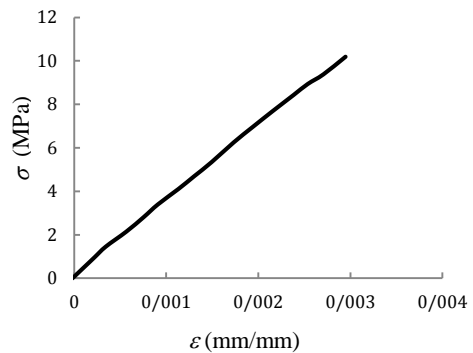


Fig. 11 Stress-strain curve for LY-556 resin

شکل 11 نمودار تنش-کرنش رزین LY-556

جدول 2 خواص مکانیکی رزین LY 556

Table 2 Mechanical properties of LY-556 resin

مقدار	پارامتر
10.2Mp	استحکام نهایی
3.37GPa	مدول الاستیسیته

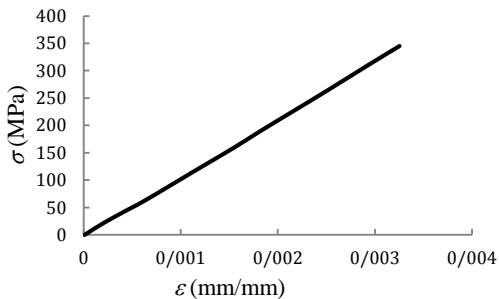


Fig. 13 Stress-strain curve of the 0° unidirectional tensile specimen

شکل 13 نمودار تنش-کرنش نمونه کامپوزیتی صفر درجه

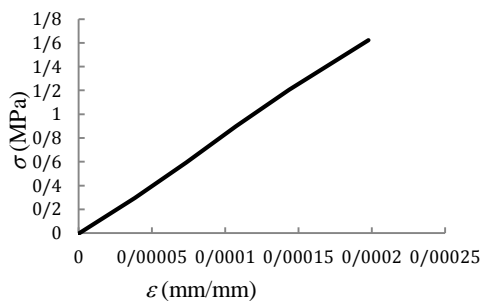


Fig. 14 Stress-strain curve of the ±45° laminated samples of the tensile test

شکل 14 نمودار تنش-کرنش نمونه کامپوزیتی 45 درجه

4-2- آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیتی تک جهته

برای آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیتی تک جهته از دستگاه یونیورسال 2.5 تنی با نرخ بارگذاری 2mm/min استفاده شده‌است. شکل 12 این آزمون را نشان می‌دهد. آزمون کشش بر روی هر سه نمونه تک جهته، صفر، 90 و 45 درجه با سه بار تکرار انجام شده‌است.

آزمون کشش نمونه صفر درجه جهت استخراج مدول الاستیسیته در جهت 1 (E_{11})، آزمون کشش نمونه 90 درجه جهت استخراج مدول الاستیسیته در جهت 2 (E_{22}) و آزمون کشش نمونه 45 درجه جهت استخراج مدول برشی G_{12} طراحی شده‌اند. با توجه به اینکه از کامپوزیت 90 درجه در آزمون کشش خروجی مناسبی بدست نیامد، مدول الاستیسیته در جهت 2 برابر مدول رزین در نظر گرفته شده‌است.

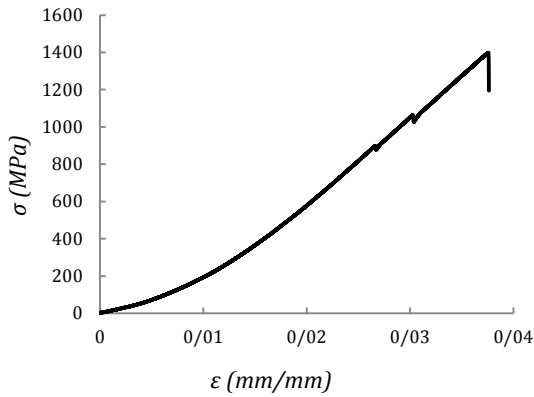


Fig. 17 Stress-strain curve of the Nol ring

شکل 17 نمودار تنش-کرنش حلقه نول

جدول 3 خواص مکانیکی کامپوزیت کربن اپوکسی

Table 3 Mechanical properties of the carbon-epoxy resin

مقدار	پارامتر
104 (GPa)	مدول الاستیسیته در جهت 1، E_{11}
3.37(GPa)	مدول الاستیسیته در جهت 2، E_{22}
4.2 (GPa)	مدول برشی G_{12}
1398 (MPa)	استحکام نهایی S_{ut}

4-4- آزمون کشش سیم حافظه‌دار

هدف از این آزمون یافتن مدول‌های الاستیسیته سیم حافظه‌دار در دو فاز آسنیت و مارتنزیت می‌باشد. این آزمون مطابق استاندارد ASTM F2516 انجام شده‌است [23]. شکل 18 آزمون کشش سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک و شکل 19 نمودار تنش-کرنش آن را نشان می‌دهد. در جدول 4 خواص مکانیکی سیم حافظه‌دار ارائه شده‌است.



Fig. 18 Tensile test of the superelastic shape memory alloy

شکل 18 آزمون کشش سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک

3-4- آزمون کشش حلقه نول

در این آزمون دو صفحه فولادی به شکل حرف انگلیسی D داخل حلقه قرار داده شده و بار مطابق شکل 15 اعمال می‌گردد. همچنین سطوح تماس روغنکاری شده‌اند. استحکام نهایی S_{ut} ، مدول الاستیسیته E و کرنش ϵ از روابط (2) تا (4) بدست می‌آیند.

$$S_{ut} = \frac{P}{2bt} \quad (2)$$

$$E = \frac{P}{2bt\epsilon} \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{2x}{\pi D} \quad (4)$$

در روابط بالا، P حداکثر نیروی اعمالی توسط دستگاه، b عرض حلقه نول، t ضخامت حلقه نول، D قطر داخلی حلقه نول و x میزان جابجایی فک‌های دستگاه پس از شکست حلقه می‌باشد [22]. شکل 16 آزمون کشش مکانیکی حلقه نول و شکل 17 نمودار تنش-کرنش آن را در آزمون کشش نشان می‌دهد. از این آزمون تنها استحکام نهایی کامپوزیت استخراج می‌گردد. در جدول 3 خواص کامپوزیت کربن T300- اپوکسی LY 556 ارائه شده‌است.

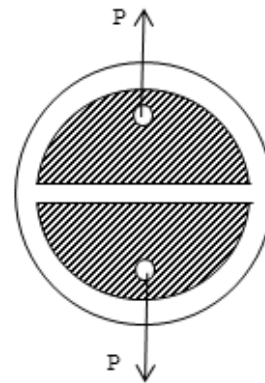


Fig. 15 Schematic of the Nol ring tensile test

شکل 15 شماتیک آزمون کشش مکانیکی حلقه نول



Fig. 16 Mechanical tensile test of the Nol ring

شکل 16 آزمون کشش مکانیکی حلقه نول

صورت است که CS³ بیانگر پوسته کامپوزیتی بدون سیم و SECS⁴ نشان دهنده پوسته کامپوزیتی تقویت شده با سیم حافظه‌دار می‌باشد.

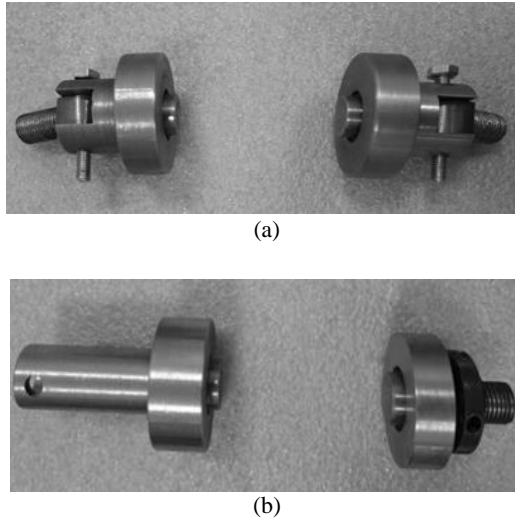


Fig. 20 a) Simply supported- Simply supported boundary conditions, b) Clamped-Clamped boundary conditions

شکل 20 (a) تکیه‌گاه دو سر مفصل (b) تکیه‌گاه دو سر گیردار

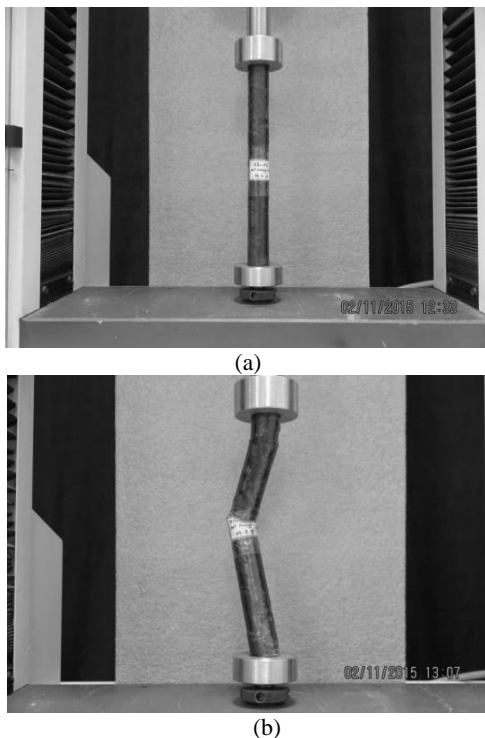


Fig. 21 Cylindrical composite shell without SMA, a) before buckling, b) after buckling

شکل 21 پوسته کامپوزیتی بدون سیم (a) قبل از آزمون کمانش (b) بعد از آزمون کمانش

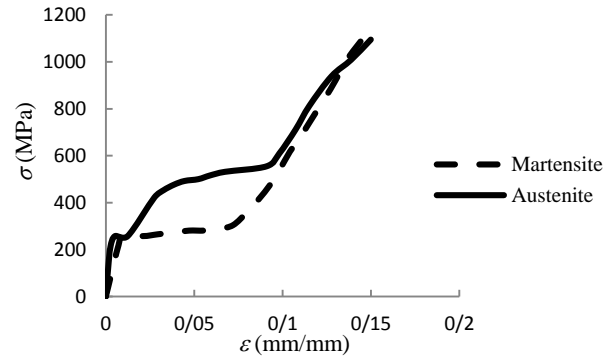


Fig. 19 Stress-strain curve of the superelastic SMA wire

شکل 19 نمودار تنش- کرنش سیم حافظه‌دار سوپر الاستیک

جدول 4 خواص مکانیکی سیم حافظه‌دار سوپر الاستیک

Table 4 Mechanical properties of the superelastic SMA wire

پارامتر	مقدار (GPa)
مدول الاستیسیته در فاز آستنیت E_a	70.7
مدول الاستیسیته در فاز مارتنزیت E_m	27.4

4-5- آزمون کمانش پوسته کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار

آزمون کمانش استاتیکی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار و پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی بدون آلیاژ حافظه‌دار توسط دستگاه یونیورسال 2.5 تنی، تحت فشار محوری انجام می‌شود. سرعت بارگذاری در کلیه آزمایشات 0.1mm/min می‌باشد تا آزمون بصورت استاتیکی انجام گیرد. در آزمون‌های انجام شده اثر موارد زیر بر پدیده کمانش پوسته کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار بررسی شده‌اند.

1- میزان پیش کرنش در سیم‌های حافظه‌دار

2- لایه‌چینی کامپوزیت

3- شرایط تکیه‌گاهی

در کلیه آزمون‌ها، نمودار نیرو بر حسب کاهش طول¹ استوانه کامپوزیتی که توسط لودسل² دستگاه اندازه‌گیری شده است ارائه شده است. نیروی بحرانی کمانش در جایی رخ می‌دهد که نمودار نیرو-جابجایی محوری پس از یک رفتار خطی و پایدار، بطور ناگهانی تغییر کند. بیشترین نیرویی که پوسته کامپوزیتی در بارگذاری فشاری محوری بصورت استاتیکی تحمل می‌نماید را بار بحرانی کمانش می‌نامند و با Pcr نشان می‌دهند.

شکل 20 تکیه‌گاه مفصل و تکیه‌گاه گیردار پوسته استوانه‌ای در آزمون کمانش را نشان می‌دهد. در شکل‌های 21 و 22 به ترتیب پوسته کامپوزیتی بدون سیم و پوسته کامپوزیتی دارای سیم حافظه‌دار، قبل و بعد از آزمون کمانش مشاهده می‌شوند. کدگذاری انجام شده بر روی پوسته‌ها به این

³ Cylindrical shell

⁴ Super elastic cylindrical shell

¹ End shortening

² Load Cell

سیم افزایش یافته است. همچنین شیب ناحیه خطی در نمونه بدون سیم و نمونه دارای سیم سوپرالاستیک برابر است.

با مقایسه شکل‌های 23 و 24 مشاهده می‌شود که بار بحرانی کمانش در پوسته تقویت‌شده با 4 سیم سوپرالاستیک و بدون پیش‌کرنش نسبت به پوسته دارای 4 سیم سوپرالاستیک و پیش‌کرنش 5% افزایش 22% داشته است، در مجموع نتیجه می‌شود که تقویت پوسته کامپوزیتی با سیم‌های سوپرالاستیک باعث افزایش بار بحرانی کمانش سازه می‌شود. اما اعمال پیش‌کرنش از اثر مثبت تقویت سیم‌های سوپرالاستیک به میزان 22% می‌کاهد.

دلیل این امر آن است که با اعمال پیش‌کرنش، با وجودی که سیم‌های حافظه‌دار تحت کشش هستند اما کل سازه تحت فشار قرار می‌گیرد (زیرا در فرایند ساخت پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار، پس از پیچیدن دولایه از کامپوزیت، سیم‌ها در لایه میانی چیده شده و توسط یک فیکسچر کشیده می‌شوند یا اصطلاحاً پیش‌کرنش داده می‌شوند، سپس دولایه دیگر از کامپوزیت توسط دستگاه فیلامنت و ایندینگ بر روی مندرل پیچیده می‌شود. سیم‌ها تا زمانی که پروسه پخت کامپوزیت تکمیل گردد توسط فیکسچر نگه داشته می‌شوند و این کشش در آنها باقی می‌ماند. در نهایت با جدا کردن نمونه کامپوزیتی از روی قالب، کشش موجود در سیم‌ها توسط سازه کامپوزیتی تحمل می‌شود، یعنی کامپوزیت نقش نگهدارنده سیم را ایفا می‌کند. بنابراین سیم‌های حافظه‌دار تحت کشش و پوسته تحت فشار قرار می‌گیرد)، در نتیجه ظرفیت تحمل بار کمانش در سازه تا حدودی کاهش می‌یابد.

همچنین در دو شکل 23 و 24 اثر پس‌کمانش در پوسته کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار در مقایسه با پوسته بدون تقویت‌کننده مشاهده می‌شود. به این معنی که نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[+55/-55/+55/-55]$ [55] دارای سیم حافظه‌دار، نسبت به نمونه بدون سیم، پس از وقوع کمانش، همچنان قادر به تحمل بار می‌باشد.

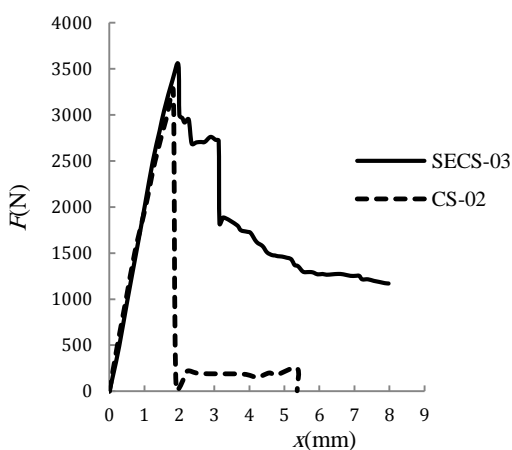
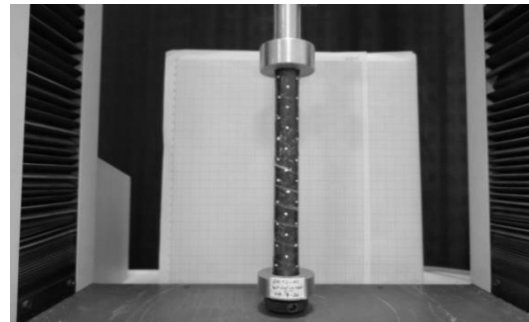
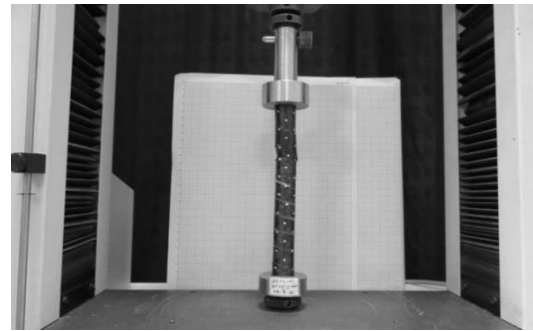


Fig. 23 Force-end shortening diagram of the $[+55/-55/+55/-55]$ laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and 5% pre-strained (SECS-03) in compare with the laminated cylindrical composite shell without SMA (CS-02), C-C boundary conditions

شکل 23 نمودار نیرو-جابجایی پوسته کامپوزیتی با لایه چینی $[+55/-55/+55/-55]$ تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 5% (SECS-03) در مقایسه با پوسته کامپوزیتی بدون سیم (CS-02) در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار



(a)



(b)

Fig. 22 Cylindrical composite shell with embedded SMA wires, a) before buckling , b) after buckling

شکل 22 پوسته کامپوزیتی دارای سیم سوپرالاستیک (a) قبل از آزمون کمانش (b) بعد از آزمون کمانش

5- نتایج و بحث

در این بخش به بحث و بررسی نتایج آزمون کمانش پوسته کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار پرداخته می‌شود.

در شکل 23 نمودار نیرو بر حسب کاهش طول پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای SECS-03 با لایه چینی $[+55/-55/+55/-55]$ تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک با 5% پیش‌کرنش در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار (C-C) نشان داده شده‌است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در نمونه SECS-03 بار بحرانی کمانش به میزان 7% نسبت به نمونه بدون سیم افزایش یافته است. همچنین شیب ناحیه خطی در پوسته بدون سیم با پوسته دارای سیم سوپرالاستیک برابر است.

در شکل 23 که بیانگر نمودار نیرو بر حسب جابجایی است، تا قبل از کمانش (محدوده پایداری سازه) می‌توان شیب خط را معیاری از سفتی سازه دانست. برای بیان علت روی هم افتادن دو نمودار، اگر کل سازه بصورت دو بخش کامپوزیت و تقویت‌کننده که همان سیم‌های حافظه‌دار است فرض شود، با توجه به ناچیز بودن کسر حجمی سیم‌ها در مقایسه با کسر حجمی کامپوزیت، طبق قانون مخلوط‌ها سفتی کل سازه تغییر چندانی نمی‌کند.

شکل 24 نمودار نیرو بر حسب کاهش طول پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای SECS-04 با لایه چینی $[+55/-55/+55/-55]$ تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار از نوع سوپرالاستیک و بدون پیش‌کرنش را در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل 24 مشاهده می‌شود در نمونه SECS-04 با تعبیه 4 سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک در پوسته کامپوزیتی با لایه چینی 55 درجه و بدون پیش‌کرنش بار بحرانی کمانش به میزان 31% نسبت به نمونه بدون

تر می‌شود. این امر موجب افزایش استحکام سازه در برابر بار فشاری می‌گردد. این موضوع در مرجع [24] نیز نتیجه گیری شده است.

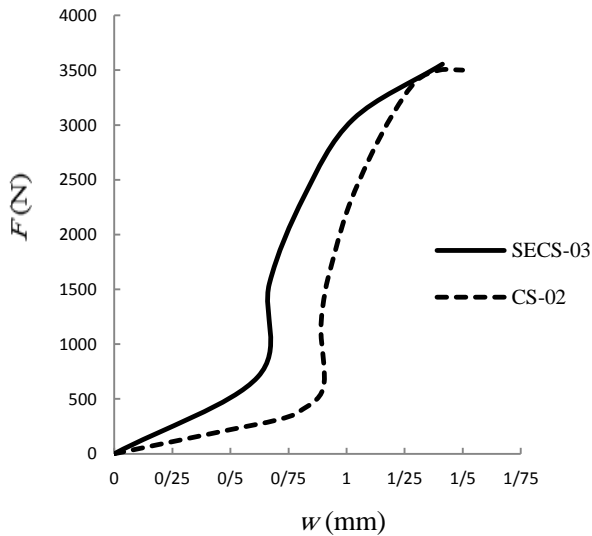


Fig. 25 Force-lateral displacement of the [+55/-55/+55/-55] laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and 5% pre-strained (SECS-03) in compare with the laminated cylindrical composite shell without SMA (CS-02), C-C boundary conditions

شکل 25 نمودار نیرو-جابجایی عرضی پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی [+55/-55/+55/-55] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 5% (SECS-03) در مقایسه با پوسته کامپوزیتی بدون سیم (CS-02) در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار

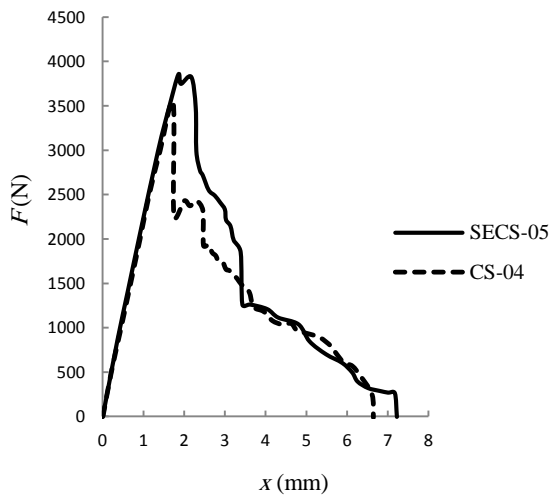


Fig. 26 Force-end shortening diagram of the [+75/-75/+75/-75] laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and 5% pre-strained (SECS-05) in compare with the laminated cylindrical composite shell without SMA (CS-04), C-C boundary conditions

شکل 26 نمودار نیرو-جابجایی پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 5% (SECS-05) در مقایسه با پوسته کامپوزیتی بدون سیم (CS-04) در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار

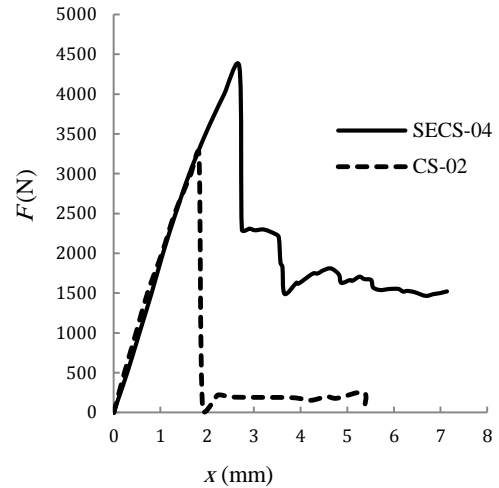


Fig. 24 Force-end shortening diagram of the [+55/-55/+55/-55] laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and no pre-strain (SECS-04) in compare with the laminated cylindrical composite shell without SMA (CS-02), C-C boundary conditions

شکل 24 نمودار نیرو-جابجایی پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی [+55/-55/+55/-55] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار بدون پیش‌کرنش (SECS-04) در مقایسه با پوسته کامپوزیتی بدون سیم (CS-02) در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار

شکل 25 نمودار نیرو-جابجایی عرضی پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی [+55/-55/+55/-55] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 5% در مقایسه با پوسته کامپوزیتی بدون سیم را نشان می‌دهد. از مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی عرضی، مشاهده می‌شود که وجود سیم‌های حافظه‌دار منجر به کاهش جابجایی عرضی نمونه‌های کامپوزیتی در ناحیه پس کمانش می‌شود. بدلیل اینکه سیم‌های حافظه‌دار باعث ایجاد رفتاری غیر ترد در پوسته شده است، بطوریکه برابند خواص پوسته متشکل از سیم‌های حافظه‌دار، مانع از شکست ناگهانی سازه در لحظه رسیدن نیرو به بار بحرانی کمانش می‌گردد و پس از کمانش سازه همچنان قادر به تحمل بار می‌باشد.

شکل 26 نمودار نیرو بر حسب کاهش طول پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای SECS-05 با لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار از نوع سوپرالاستیک با پیش‌کرنش 5% را در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در نمونه SECS-05 بار بحرانی کمانش به میزان 8% نسبت به نمونه بدون سیم با لایه‌چینی 75 درجه افزایش یافته است. همچنین شیب ناحیه خطی در پوسته بدون سیم و پوسته دارای سیم سوپرالاستیک برابر است.

در شکل 27 نمودار نیرو بر حسب کاهش طول پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای تقویت‌شده با آلایز حافظه‌دار در دو لایه‌چینی [+55/-55/+55/-55] و [+75/-75/+75/-75] درجه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی 75 درجه بار بحرانی کمانش 8% نسبت به پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی 55 درجه بیشتر است. زیرا با تغییر زاویه الیاف، الگوی بافت کامپوزیت تغییر می‌کند. هر چه زاویه پیچش به 90 درجه نزدیک تر باشد، بافت پارچه کامپوزیت متراکم تر یا اصطلاحاً ریز بافت

گشتاورهای ناشی از بار فشاری در یک سازه کامپوزیتی با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل و دو سر گیردار را نشان می‌دهد استفاده شده است.

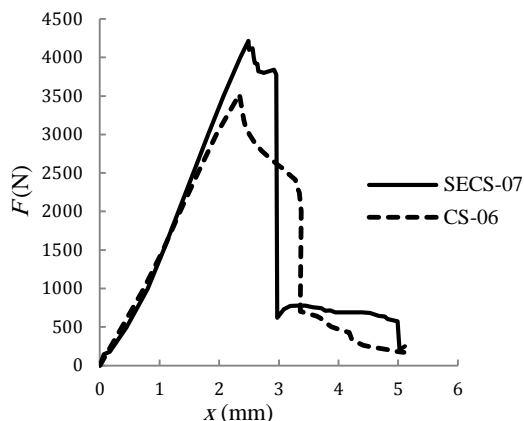


Fig. 28 Force-end shortening diagram of the [+75/-75/+75/-75] laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and 5% pre-strained (SECS-07) in compare with the laminated cylindrical composite shell without SMA (CS-06), SS-SS boundary conditions
شکل 28 نمودار نیرو-جابجایی پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 5% (SECS-07) در مقایسه با پوسته کامپوزیتی بدون سیم (CS-06) در شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل

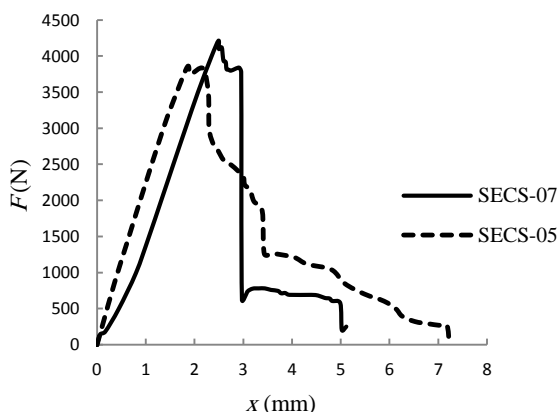


Fig. 29 Force-end shortening diagram of the [+75/-75/+75/-75] laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and 5% pre-strained with C-C boundary conditions (SECS-05) in compare with the SS-SS boundary conditions (SECS-07)
شکل 29 نمودار نیرو-جابجایی پوسته کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار با لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] در دو شرایط مرزی دو سر گیردار (SECS-05) و دو سر مفصل (SECS-07)

همانطور که در شکل 30 مشخص است A در حالت بدون سیم و B در حالت دارای سیم حافظه‌دار است. A-1 و B-1 تنش و A-2 و B-2 ممان ناشی از بار فشاری اعمالی است. در حالی که در حالت دارای سیم حافظه‌دار B-3 و B-4 نیز اضافه می‌شود. B-4 نیروی ناشی از اعمال پیش‌کرنش است که بصورت نیروی کششی در SMA توزیع می‌شود و B-3 تنش فشاری است که در کامپوزیت در اثر نگهداشتن کشش سیم اعمال می‌شود. مادامی که توزیع تنش ناشی از B-3 و B-4 یک ممان ساعتگرد تولید کند، بار بحرانی

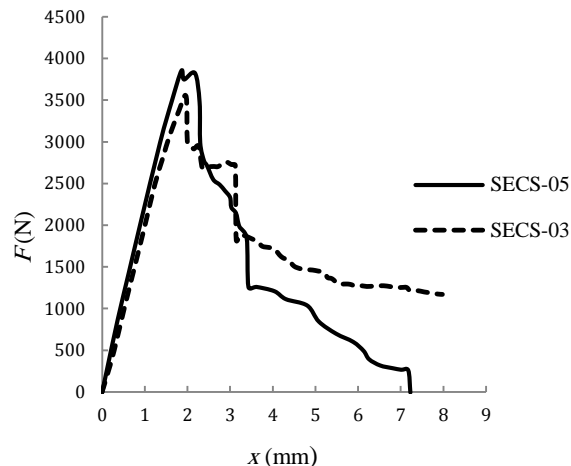


Fig. 27 Force-end shortening diagram of the [+55/-55/+55/-55] laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and 5% pre-strained (SECS-03) in compare with the [+75/-75/+75/-75] laminated cylindrical composite shell with 4 embedded SMA wires and 5% pre-strained (SECS-05), C-C boundary conditions

شکل 27 نمودار نیرو-جابجایی پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی [+55/-55/+55/-55] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 5% (SECS-03) در مقایسه با پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار با پیش‌کرنش 5% (SECS-05) در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار

در شکل 28 نمودار نیرو بر حسب کاهش طول پوسته کامپوزیتی SECS-07 با لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] تقویت‌شده با 4 سیم حافظه‌دار از نوع سوپر الاستیک با پیش‌کرنش 5% را در مقایسه با پوسته کامپوزیتی CS-06 با لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] و بدون سیم در آزمون کمانش با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل (SS-SS) نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود ظرفیت کمانش پوسته کامپوزیتی دارای 4 سیم حافظه‌دار در مقایسه با پوسته بدون سیم 20% افزایش یافته است. همچنین شیب نمودار نیرو-جابجایی به دلیل ماهیت تکیه‌گاه مفصل خطی نمی‌باشد. در شکل 29 پوسته‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار در دو شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار SECS-05 و دو سر مفصل SECS-07 در لایه‌چینی [+75/-75/+75/-75] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در ناحیه پایداری، نمودار نیرو-جابجایی طولی نمونه‌های کامپوزیتی با یکدیگر موازی است. با توجه به اینکه این نمودار از آزمون‌های تجربی بدست آمده است، و در تحقیقات آزمایشگاهی، ایجاد شرایط ایده‌آل و تئوریک تقریباً غیرممکن است، هنگام اعمال بار محوری، تا قرار گرفتن تکیه‌گاه‌های مفصلی در جریان نیرو، نمونه اندکی از شرایط پایداری خارج شده است، لذا نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده، تا زمانیکه تکیه‌گاه‌ها در امتداد طول نمونه قرار گیرند، روندی منحنی‌وار و غیر خطی دارد، که این موضوع در ابتدای منحنی SECS-07 مشخص است. ولی با ادامه بارگذاری، نمودار رفتار خطی پیدا کرده و شیب آن به موازات نمونه تحت شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار تغییر می‌کند.

همچنین در شکل 29 مشاهده می‌شود که بار بحرانی کمانش در شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل 9% بیشتر از شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار است. برای تفسیر این موضوع از شکل‌های 30 و 31 که به ترتیب توزیع تنش و

توضیحات داده شده در حالت تکیه‌گاه دو سر مفصل و با توجه به شکل 31، گشتاور ناشی از نیروی فشاری اعمالی به کامپوزیت بصورت پادساعتگرد می‌باشد، در حالی که گشتاور ناشی از نیروی کششی SMA و نیروی فشاری ناحیه‌ای از کامپوزیت که سیم حافظه‌دار را نگه داشته است بصورت ساعتگرد می‌باشد. بنابراین اثر این ناحیه بر روی بار بحرانی کمانش منفی می‌باشد. از سوی دیگر در ناحیه B توزیع تنش و ممان‌های موجود کاملاً مشابه با شرایط مرزی دوسر مفصل اتفاق می‌افتد و اثر آن بر روی بار بحرانی کمانش مثبت است. بنابراین در نواحی I و I' سازه در مقابل کمانش ضعیف‌تر شده و در نواحی II و II' مقاومت سازه در برابر کمانش بیشتر شده است و در مجموع وجود سیم حافظه‌دار اثر کمتری بر بهبود بار بحرانی کمانش در مقایسه با شرایط مرزی دو سر مفصل دارد [8].

6- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر آلیاژ حافظه‌دار سوپرالاستیک در رفتار کمانشی پوسته کامپوزیتی از جنس کربن اپوکسی از نظر تجربی مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای این پژوهش عبارت بودند از: میزان پیش‌کرنش در سیم‌های حافظه‌دار، لایه‌چینی کامپوزیت و شرایط تکیه‌گاهی در آزمون. در ادامه نتایج حاصل شده ذکر می‌گردد.

- 1- وجود پیش‌کرنش باعث اعمال فشار به سازه می‌گردد. در نتیجه در نمونه‌های دارای پیش‌کرنش، ظرفیت تحمل بار کمانش کمتر از نمونه‌هایی است که میزان پیش‌کرنش در آن‌ها صفر می‌باشد.
- 2- در لایه‌چینی کامپوزیت به روش رشته‌پیچی هر چه زاویه پیچش الیاف به سمت 90 درجه متمایل باشد، به دلیل تراکم بافت الیاف چیده شده نسبت به زوایای کمتر، ظرفیت تحمل بار کمانشی در سازه بیشتر است. بنابراین در لایه‌چینی $[+75/-75/+75/-75]$ ظرفیت تحمل بار بحرانی کمانش بیشتر از $[+55/-55/+55/-55]$ است.
- 3- وجود سیم‌های حافظه‌دار سوپرالاستیک باعث بهبود رفتار سازه کامپوزیتی در ناحیه پس‌کمانش گردیده است. دلیل این امر قابلیت سیم‌های حافظه‌دار سوپرالاستیک در جذب انرژی کرنشی می‌باشد.
- 4- در آزمون کمانش نمونه‌های کامپوزیتی دارای پیش‌کرنش، در شرایط مرزی دو سر مفصل، بار بحرانی کمانش بیشتر از حالتی است که شرایط تکیه‌گاهی بصورت دو سر گیردار باشد.

7- مراجع

- [1] Lee, H. J., Lee, J. J. and Huh, J. S., "A Simulation Study on the Thermal Buckling Behavior of Laminated Composite Shells With Embedded Shape Memory Alloy(SMA) Wires," International Journal of Composite Structures, Vol. 47, pp. 463-469, 1999.
- [2] Asadi, H., Kiani, Y., Shakeri, M. and Eslami, M. R., "Exact Solution for Nonlinear Thermal Stability of Hybrid Laminated Composite Timoshenko Beams Reinforced with SMA Fibers," International Journal of Composite Structures, Vol. 108, pp. 811-822, 2014.
- [3] Rogers, C.A., Liang, C. and Lia, J., "Structural Modification of Simply Supported Laminated Plates Using Embedded Shape Memory Alloy Fibers," International Journal of Computer and Structures, Vol. 38, pp. 569-580, 1991.
- [4] Khalili, S.M.R., Shokuhfar, A., Ashenai Ghasemi, F. and Malekzadeh, K., "Dynamic Response of Smart Hybrid Composite Plate Subjected to Low-Velocity Impact," Journal of Composite Material, Vol. 41, pp. 2347-2370, 2007.
- [5] Ostachowicz, W., Krawczuk, M. and Zak, A., "Natural Frequencies of a Multilayer Composite Plate with Shape Memory Alloy Wires,"

کمانش زیاد می‌شود تا تعادل برقرار گردد. (اگر توزیع تنش فشاری B-3 را بصورت یک نیروی متمرکز فشاری که از نظر مقداری، برابر با نیروی کششی موجود در سیم و خلاف جهت آن است فرض کنیم، که موقعیت آن در سمت راست نیروی کششی است گشتاور تولیدی ساعتگرد می‌باشد.) [8]

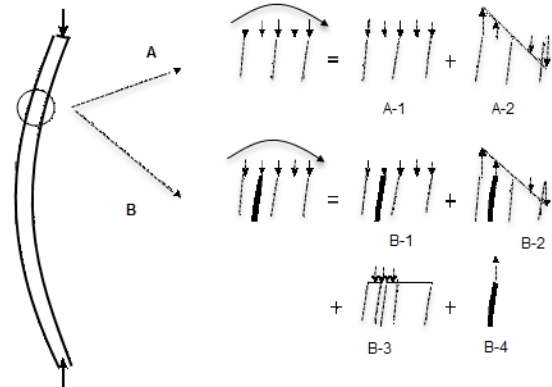


Fig. 30 Schematic stress diagram of the SS-SS boundary condition [8]
 شکل 30 توزیع تنش‌های اعمالی به پوسته کامپوزیتی در شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل [8]

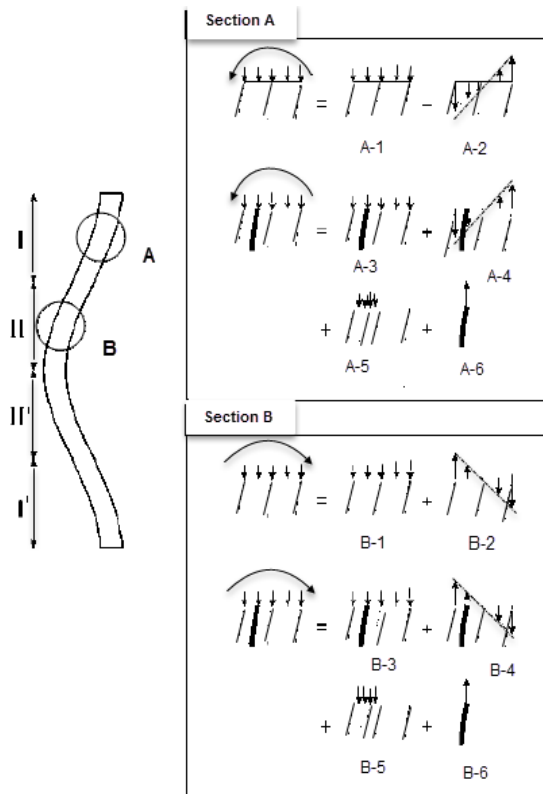


Fig. 31 Schematic stress diagram of the C-C boundary condition [8]

شکل 31 توزیع تنش‌های اعمالی به پوسته کامپوزیتی در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار [8]

مطابق شکل 31 برای شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار دو ناحیه توزیع تنش و گشتاور متفاوت، شامل A و B در نظر گرفته شده است. طبق

- Journal of Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 32, pp. 71-83, 1999.
- [6] Ostachowicz, W., Krawczuk, M. and Zak, A., "Dynamics and Buckling of a Multilayer Composite Plate with SMA Wires," International Journal of Composite Structures, Vol. 48, pp. 163-167, 2000.
- [7] Lee, H. J., Lee, J. J. and Huh, J. S., "A Simulation Study on the Thermal Buckling Behavior of Laminated Composite Shells with Embedded Shape Memory Alloy (SMA) Wires," International Journal of Composite Structures, Vol. 47, pp. 463-469, 1999.
- [8] Lee, H. J. and Lee, J. J., "A Numerical Analysis of the Buckling and Post Buckling Behavior of Laminated Composite Shells with Embedded Shape Memory Alloy Wire Actuators," Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 9, pp. 780-787, 2000.
- [9] Roh, J. H., Oh, I. K., Yang, S. M. and Han, J. H., "Thermal Post Buckling Analysis of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Shell Panels," Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 13, pp. 1337-1344, 2004.
- [10] Panda, S.K. and Singh, B.N., "Thermal Post Buckling Analysis of Laminated Composite Spherical Shell Panel Embedded with Shape Memory Alloy Fibers Using Non-Linear Finite Element Method," Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 224, part C, pp. 757-769, 2009.
- [11] Thompson, S. P. and Loughlan, J., "Enhancing the Post Buckling Response of a Composite Panel Structure Utilising Shape Memory Alloy Actuators, a Smart Structural Concept," International Journal of Composite Structures, Vol. 51, pp. 21-36, 2001.
- [12] Khalili, S.M.R., Botshekanan Dehkordi, M. and Carrera, E., "A Nonlinear Finite Element Model Using a Unified Formulation for Dynamic Analysis of Multilayer Composite Plate Embedded with SMA Wires," International Journal of Composite Structures, Vol. 106, pp. 635-645, 2013.
- [13] Khalili, SMR and Saedi, A., "Micromechanics Modeling and Experimental Characterization of Shape Memory Alloy Short Wires Reinforced," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2016. (in Persian)
- [14] Rahimi Bafarani, I. and Ekhteraei Toosi, H., "Frequency Analysis of SMA Composite Beam Resting on Pasternak Elastic Foundation Using Four Engineering Beam," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 73-84, 2017. (in Persian)
- [15] Thompson, S.P. and Loughlan, J., "Adaptive Post Buckling Response of Carbon Fiber Composite Plates Employing SMA Actuators," International Journal of Composite Structures, Vol. 38, pp. 667-678, 1997.
- [16] Thompson, S.P. and Loughlan, J., "The Control of the Post Buckling Response in Thin Composite Plates Using Smart Technology," Journal of Thin-Walled Structures, Vol. 36, pp. 231-263, 2000.
- [17] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, 08.01, D 638, 2014.
- [18] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 15.03, D 3039, 2014.
- [19] Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 45° Laminate, Annual Book of ASTM Standard, 15.03, D 3518, 2013.
- [20] Failure Analysis of the Split-D Test Method, Annual Book of ASTM Standard, STP 617, 1977.
- [21] Hndgkinsun, I. M., "Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites," Wood head publishing limited, Cambridge, pp.100-103, 2000.
- [22] yusefzadeh, M., Taghavian, S. H., Shokri, A. R. and Eskandarijam, J., "Filament Winding, It's Development, Manufacture, Applications and Design," Translated in Persian, First ed., Arna Publishing Company, Tehran, pp. 262-268, 2014.
- [23] Standard Test Method for Tension Testing of Nickel-Titanium Superelastic Materials, Annual Book of ASTM Standard, 13.02, F 2516, 2014.
- [24] Lim, K., Li, X and Guan, Z., "Optimal Design of Advanced Grid Stiffened Composite Cylindrical Shell," Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 330, pp. 681-686, 2013.

