

استحکام کششی کامپوزیت کربن-اپوکسی تقویت شده با سیم آلیاژ حافظه‌دار

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم هوایی شهید سلطانی، تهران، ایران

مسعود خزائی

* محمد کاظمی نصرآبادی

چکیده

در کامپوزیت‌های پیش‌رفته، برای ارتقای خواص مکانیکی در کاربردهای مختلف از مواد هوشمند نظیر آلیاژهای حافظه‌دار استفاده شده است. در این تحقیق از خاصیت سوپرالاستیسیتی آلیاژهای حافظه‌دار در ارتقای استحکام کششی کامپوزیت زمینه کامپوزیت تقویت شده با الیاف استفاده شده است و تأثیر درصد حجمی و ضخامت سیم آلیاژ حافظه‌دار بر کامپوزیت تقویت شده با الیاف تک جهته کربن تحت بارگذاری کششی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف تک جهته کربن با جایگذاری یک، سه و پنج سیم آلیاژ حافظه‌دار با ضخامت‌های متغیر 0.2 ، 0.3 و 0.4 میلی‌متر ساخته و مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. نتایج نشان داد وقتی نمونه‌ها تحت کشش قرار می‌گیرند، درصد قابل توجهی از بار کششی روی سیم منتقل می‌شود و با توجه به قابلیت تحمل کرنش بالا در آلیاژهای حافظه‌دار، استحکام نسبت به نمونه کامپوزیتی بدون سیم حافظه‌دار حدود ۷ برابر افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت پلیمری، آلیاژ حافظه‌دار، بارگذاری استاتیکی، استحکام کششی

Tensile strength of reinforced carbon-epoxy Composites with Shape Memory Alloy wires

M. Khazaie

Mechanical Engineering,Azad University south Tehran branch, Tehran, Iran.

M. Kazemi Nasrabadi

Department of Mechanical Engineering, Shahid Sattari aerospace University, Tehran, Iran

Abstract

In advanced composites , intelligent materials such as memory alloys have been used to improve the mechanical properties of various applications. In this study, the superelasticization property of the shape memory alloys has been used to improve the tensile strength of polymer - reinforced fiber composites. The effects of volumetric percent and thickness of memory alloy wire on the composite reinforced with unidirectional carbon fibers under tensile loading are investigated. For this purpose, composite specimens reinforced with unidirectional carbon fibers were constructed by placement of one, three, and five wires of memory alloy with thicknesses of 0.2 , 0.3 and 0.4 mm. The results showed that when the samples are stretched, a significant proportion of the tensile load is transferred to the wire, and due to the high strain tolerance in the shape memory alloys, the strength of this composite compared with the composite sample is increase about 7 times.

Keywords: polymer composites, shape memory alloys, static loading, tensile strength.

[۱] اعمال‌هایی مانند پیش‌کرنش، قطر سیم، درصد حجمی سیم، محل قرارگیری سیم در کامپوزیت و مقاومت بین لایه‌ای در ساخت مواد کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژهای حافظه‌دار نقش دارد [۲].

کامپوزیت‌های هیربیدی با آلیاژهای حافظه‌دار به عنوان نماینده‌ی نویدیخش دسته‌ی مواد هوشمند شناخته می‌شوند. تحقیقات دهه‌ی اخیر نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های تقویت شده با آلیاژهای حافظه‌دار خواص ارتقا یافته و جدید زیادی مانند خواص مکانیکی و حرارتی ارتقا یافته، کنترل ظاهر، مقاومت خستگی، میرا کردن ارتعاشات، خواص ضربه‌ای خوب و تابش اکوستیک دارند [۴]. تحقیقات روی طراحی کامپوزیت زمینه پلیمری حافظه‌دار تأثیر درصد حجمی، پرداخت سطحی [۵]، پیش‌کرنش ماده حافظه‌دار [۶] و فرآیند حفاظت ماتریس [۷] را نشان می‌دهد. مطالعات تاکنون روی همین این موارد به صورت همزمان نبوده است. به طور مثال پیش‌کرنش بالا زمانی کاربرد دارد که نیاز به توانایی بالا در بستن ترک باشد؛ اما تحقیقات نشان می‌دهد که پیش‌کرنش بالا رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت را ارتقا نمی‌دهد و کیفیت سطح و قابلیت فعلی سازی را هم کاهش می‌دهد [۸]. رمضان و همکاران در دانشگاه پوترا مالزی در سال ۲۰۱۲ [۹] مطالعه‌ای تحریبی روی پاسخ به ضربه‌ی سرعت بالا در لایه‌های کامپوزیتی انجام دادند. آزمایش‌ها

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار گروهی از مواد هوشمند می‌باشند که خواص متمايزی نسبت به سایر آلیاژها دارند. واکنش شدید این مواد نسبت به برخی از متغیرهای ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال متغیرهای مذکور به گونه‌ای است که می‌تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. وقتی یک آلیاژ معمولی تحت بار خارجی بیش از حد الاستیک قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد و این نوع تغییر شکل بعد از حذف بار باقی می‌ماند؛ اما آلیاژهای حافظه‌دار که شامل آلیاژهای دارای عناصری مانند نیکل، تیتانیوم، مس، روی، آلومنیوم و غیره می‌شوند، رفتار متفاوتی از خود ارائه می‌نمایند. در دمای پایین، یک نمونه حافظه‌دار می‌تواند تغییر شکل پلاستیک چند درصدی را تحمل کند و سپس به صورت کامل به شکل اولیه خود در دمای بالا برگردد. در فرآیند برگشت به شکل اولیه، آلیاژ می‌تواند نیروی زیادی تولید کند که این نیرو برای تحریک مفید می‌باشد [۱].

تنشی کششی ناشی از خاصیت حافظه‌داری مواد حافظه‌دار و همچنین قابلیت تحمل کرنش بالا ناشی از خاصیت سوپرالاستیسیتی در ارتقای عملکرد مقاومت ضربه‌ای در مواد کامپوزیتی بسیار مفید است

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: kazemi@ssau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۰۸

روی سازه‌ی ساندویچی بر پایه‌ی رزین اپوکسی الیاف کولار با لایه‌های متغیر آلومنیوم ۶۰۶۱ انجام شد. مطالعات عددی هم به منظور پیش‌بینی حد بالستیک و انرژی جذب شده و مقایسه با حالت تجربی انجام شد.

خلیلی و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۷] در مورد تأثیر بعضی متغیرهای مهم در پاسخ به ضربه‌ی سرعت پایین صفات کامپوزیت هیریدی جدار نازک با سیم حافظه‌دار (جاسازی شده) مطالعه کردند. سیم حافظه‌دار در بین لایه‌های کامپوزیت جاسازی شد. تأثیر سیم حافظه‌دار روی نیروی تماسی، پیچش، تنش و کرنش درون صفحه‌ای سازه بررسی شد. نتایج حاکی از این است که متغیرهای فیزیکی مانند درصد حجمی سیم حافظه‌دار، جهت‌گیری الیاف در کامپوزیت، جرم و سرعت ضربه زننده و نسبت طول به ضخامت صفحه مهم‌ترین متغیرها برای مقاومت ضربه در طراحی سازه بر این اساس می‌باشد.

ووکون و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۸] طی پژوهشی روی سیم‌های حافظه‌دار آن‌ها را به سطح کرنش متغیر در دماهای متغیر رساندند تا به اطلاعاتی در مورد بهینه‌سازی رفتار عمل آوری در کامپوزیت‌های حافظه‌دار دست یابند. سیم NiTiCu پیش کرنش شده در معرض دمای ۴۱۳ K قرار گرفت. آزمایش کشش تا سطح کرنش ۸٪ و دمای ۴۱۳K انجام شد. سیم‌ها پس از باربرداری مقدار جزئی کرنش بازیابی نشان دادند. کرنش برگشت‌پذیر با افزایش دما کاهش می‌یابد اما با افزایش سطح کرنش افزوده می‌شود.

زانگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۹] روی خواص ارتعاشات کامپوزیت حافظه‌دار مطالعه کردند. در ابتدا صفات چند لایه‌ی کامپوزیتی حاوی سیم حافظه‌دار تکمحوره ساخته شدند. با اندازه‌گیری مود ارتعاشی تیر گیردار، تأثیر جاگیری سیم حافظه‌دار و دما در خواص ارتعاشی مشخص شد. سپس صفات کامپوزیتی با سیم حافظه‌دار باقیمانده (دو محوره) ساخته شد. نتیجه این بود که با افزایش درصد حجمی سیم حافظه‌دار، قابلیت تنظیم سفتی ارتقا یافت.

شمماموتو و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۱۱] وقتی ایده‌ی کامپوزیت حافظه‌دار هنوز کاملاً خام بود، به فکر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار به منظور کنترل و ارتقای مقاومت ماده افتادند. آنها نشان دادند که استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در کامپوزیت باعث کاهش تنش نوک ترک می‌شود و مقدار K_{IC} (چقرمگی شکست) با افزایش پیش کرنش افزوده می‌شود.

ارغون و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۲] پژوهشی روی خواص کششی، میراکنندگی و ضربه‌ای کامپوزیت حافظه‌دار انجام دادند. نتایج حاصل از تحقیقات آنان نشان داد که ظرفیت میرایی یک کامپوزیت حافظه‌دار تابعی ترکیبی از دمای آزمایش و تنش پسمند در الیاف که ناشی از پیش کرنش و چرخه گرمایی هستند می‌باشد و اعمال پیش کرنش در حالت آستنتی در دمای اتفاق منجر به افزایش ظرفیت میراکنندگی می‌شود. همچنین استفاده از سیم‌های حافظه‌دار باعث پخش آسیب واردہ روی ماتریس پلیمری کامپوزیت می‌شود که منجر به مقاومت بهتر در برابر بارهای شبه استاتیکی و ضربه‌ای می‌شود. شریف شورابی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۳] پژوهشی روی کامپوزیت کرین اپوکسی با سیم حافظه‌دار انجام دادند و نشان دادند که با افزایش سیم حافظه‌دار مدول برشی و ضربی پواسون افزایش می‌یابد.

مارولو و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۴] طی پژوهشی پاسخ کامپوزیت هیریدی هوشمند به ضربه سرعت پایین را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. با جایگذاری سیم حافظه‌دار در کامپوزیت، افزایش در مقاومت به ضربه و چکش خواری در کامپوزیت مشاهده شد. همچنین کامپوزیت هوشمند سختی بیشتر و سطح بالاتر انرژی جذب شده پیش از واماندگی دارد.

در پژوهشی که توسط ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۵] انجام شد، پاسخ ارتعاشی صفحه کامپوزیتی حافظه‌دار بررسی شد و نتایج حاکی از این بود که در کامپوزیت حافظه‌دار، ویزگی ارتعاشی در دمای پایین چندان مهم نیست اما در دمای‌های بالا کاملاً محسوس است که به دلیل استحصاله مارتزیتی است. فرکانس طبیعی کامپوزیت حافظه‌دار در دمای بالا دو برابر تیر کامپوزیتی معمولی است. در پژوهشی توسط شرفی و خلیلی در سال ۲۰۱۲ [۱۶] انرژی جذب شده کامپوزیت حافظه‌دار تحت ضربه سرعت پایین مورد مطالعه قرار گرفت. درصد حجمی سیم حافظه‌دار به عنوان متغیر در نظر گرفته شد و مقداری یک و دو سیم در کامپوزیت جایگذاری شد. نتایج حاکی از تأثیر چشمگیر حضور سیم در افزایش انرژی جذب شده است. یاماذا و همکاران [۱۷] اثر افزودن ذرات نیتینیول به ماتریس فلزی آلومنیوم را به صورت نظری بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که استحکام کامپوزیت فلزی ایجاد شده در اثر افزودن ذرات آلیاژ حافظه‌دار افزایش می‌یابد. ایشان تولید نتش‌های پسمند فشاری در زمینه را دلیل استحکام بخشی این ذرات معرفی نمودند.

موراساوا و همکاران [۱۸] خواص ترمومکانیکی و آسیب کامپوزیت تقویت شده با سیم‌های کوتاه و بلند آلیاژ حافظه‌دار را بررسی نمودند. ایشان به مقایسه تقویت کامپوزیت توسط سیم‌های بلند و کوتاه، با تغییر متغیر ضربی لاغری و کسر حجمی سیم‌ها پرداختند. آن‌ها دریافتند که میزان تنش فشاری تولید شده در زمینه با افزایش ضربی لاغری، آلیاژ حافظه‌دار افزایش پیدا می‌کند. همچنین برای ضربی لاغری بیش از ۲۵ سیم‌های کوتاه و بلند خواص مشابهی دارند. ژانگ و نی [۱۹] و [۲۰] رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیافی تقویت شده با سیم‌های آلیاژ‌های حافظه-دار را همراه با سیم‌های کوتاه و ذرات آلیاژ حافظه‌دار بررسی نمودند. نظریه آنها بر پایه‌ی تئوری هالپین-سای می‌باشد. ایشان دریافتند با افزودن ۳٪ آلیاژ حافظه‌دار به رزین مدول ذخیره‌سازی ۶ برابر بیشتر می‌شود و فرکانس طبیعی آن نیز ۱/۲۶ برابر افزایش پیدا می‌کند. اکبری و خلیلی [۲۱] رفتار کمانش پوسته کامپوزیتی تقویت شده با سیم حافظه‌دار را مورد بررسی قرار دادند. پازنیوال و همکاران [۲۲] تأثیر سیم کوتاه حافظه‌دار NiTi بر رفتار خمی کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی مورد بررسی قرار دادند.

همان‌طور که گفته شد محققان علاقه‌ی فراوانی به استفاده از مواد هوشمند به ویژه آلیاژ‌های حافظه‌دار در سازه‌های مهندسی جدید پیدا کردند و پیشرفت‌های زیادی هم حاصل شده است. نکته‌ای که در این پژوهش روی آن تمرکز می‌شود استفاده از مدول بسیار بالای آلیاژ حافظه‌دار در فاز آستنتیت (تا ۸۰ GPa) برای ارائه‌ی حالت بهینه‌ی کامپوزیت حافظه‌دار تحت بارگذاری استاتیکی کششی است. نکته‌ای که در این پژوهش برای اولین بار به آن پرداخته می‌شود بررسی همزمان تأثیر دو پارامتر تعداد سیم و قطر سیم است.



شکل ۲- نمایی از صفحه ساخته شده قبل از برش



شکل ۳- نمایی از نمونه‌های آزمایشگاهی آماده برای آزمایش



شکل ۴- نمایی از نمونه قرار گرفته شده در دستگاه

-۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از الیاف تک جهته کربن ساخت شرکت شیمی افسون برای ساخت کامپوزیت استفاده شده است. در ساخت کامپوزیت از رزین اپوکسی به عنوان فاز ماتریس استفاده شد. رزین مورد استفاده، EPON-828 ساخته‌ی کارخانه‌ی SHELL به همراه هاردنر ۱۰٪ می-باشد. سیم حافظه‌دار مورد استفاده در این پژوهش از نوع سیم (نیکل تیتانیوم) سوپرالاستیک ساخته‌ی کارخانه‌ی Highland Metals Inc آمریکا است. سیم در سه ضخامت 0.2 mm , 0.3 mm و 0.4 mm به کار گرفته شده است. دماهای استحالت فازی سیم مورد استفاده 18°C , 9°C و 5°C باشد که حاکی از این است که سیم حافظه‌دار مورد استفاده در دمای اتاق (25°C) در حالت آستینیتی کامل قرار دارد.

برای ساخت کامپوزیت، از روش لایه‌چینی دستی با ۶ لایه الیاف تک جهته کربن و همچنین رزین و هاردنر با درصد وزنی ماتریس ۵۵٪ استفاده شد. سیم‌های حافظه‌دار در بین لایه‌های سوم و چهارم با فاصله‌ی 5 mm نسبت به هم جایگذاری شدند. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش دستگاه آزمایش کشش تک محوره ساخت شرکت SANTAM مطابق با استاندارد ASTM-D3039 با سرعت فک 2 mm/min می‌باشد.

متغیرهای ضخامت سیم و تعداد سیم به عنوان متغیر این پژوهش برای بررسی تأثیر سیم حافظه‌دار بر بارکششی کامپوزیت در نظر گرفته شد. برای متغیر تعداد سیم مقادیر ۱، ۳ و ۵ در نظر گرفته شد. ابعاد نمونه برای قرارگیری در دستگاه آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM-D3039 برابر با $25 * 25 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شد. شکل ۱ فیکسچر ساخت نمونه و بستن سیم را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از فیکسچر ساخت و نحوه بستن سیم‌ها

شکل ۲ نمایی از صفحه ساخته شده قبل از برش، شکل ۳ نمایی از نمونه‌های آزمایشگاهی آماده برای آزمایش و شکل ۴ نحوه قرارگیری در فیکسچر دستگاه آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر نیروی بحرانی برای نمونه، مطابق رابطه‌ی $\sigma = \frac{F_n}{A}$ تنش حداکثر و مطابق رابطه هوك مدول الاستیسیته به دست می‌آیند که در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- تنش حداکثر و مدول الاستیسیته نمونه‌ی بدون سیم

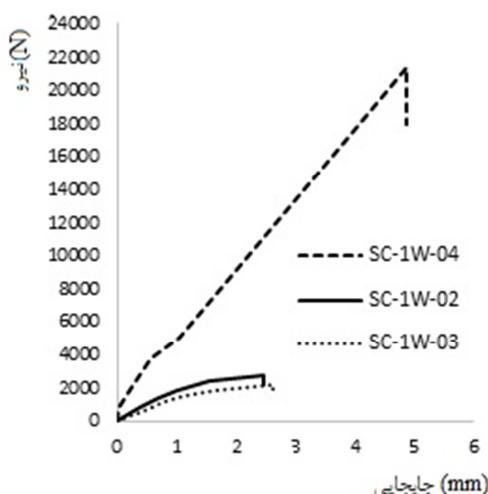
نمونه	تنش حد اکثر (N/mm ²)	مدول الاستیسیته (N/mm ²)
C-0W	74.36	3681.2

۲-۲- نتایج نمونه‌های با ۱ سیم حافظه‌دار

سه نمونه ۱ سیم با کدهای SC-1W-0.2 و SC-1W-0.3 تحت آزمون کشش قرار گرفتند. جدول ۴ مقادیر نیروی بحرانی نمونه‌ها تا رخ دادن شکست و همچنین مقدار کرنش وارد شده و شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نیروی بحرانی و مقدار کرنش وارد شده نمونه‌های با ۱ سیم

نمونه	نیروی شکست (N)	کرنش (%)
SC-1W-0.2	2613.4	2.19
SC-1W-0.3	2715.4	2.37
SC-1W-0.4	20887.4	4.66



شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمایش کشش نمونه‌های ۱ سیم

با توجه به مقادیر نیروی بحرانی برای نمونه‌ها، مقادیر تنش حداکثر و مدول الاستیسیته به دست می‌آیند که در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۱ نحوه‌ی کدگذاری نمونه‌های را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است جهت اطمینان از نتایج، برای هر حالت ۳ نمونه ساخته شد و نتیجه نهایی با میانگین گرفتن از نتایج بدست آمده برای سه نمونه محاسبه شد. بیشترین انحراف نتایج در حالت‌های ۵- گاهه ۴٪ بود که قابل پذیرش است.

جدول ۱- مشخصات و کدگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی برای آزمون کشش

شماره	نام نمونه	تعداد سیم	قطر سیم (mm)
۱	C-0W	-	-
۲	SC-1W-0.2	۱	۰/۲
۳	SC-1W-0.3	۱	۰/۳
۴	SC-1W-0.4	۱	۰/۴
۵	SC-3W-0.2	۳	۰/۲
۶	SC-3W-0.3	۳	۰/۳
۷	SC-3W-0.4	۳	۰/۴
۸	SC-5W-0.2	۵	۰/۲
۹	SC-5W-0.3	۵	۰/۳
۱۰	SC-5W-0.4	۵	۰/۴

- SC = Smart Composite •
- حرف W نشانه سیم است و عدد قبل آن حاکی از تعداد سیم در نمونه است.
- عدد بعد از W نشان‌دهنده قطر سیم است.

۳- نتایج آزمایش کشش

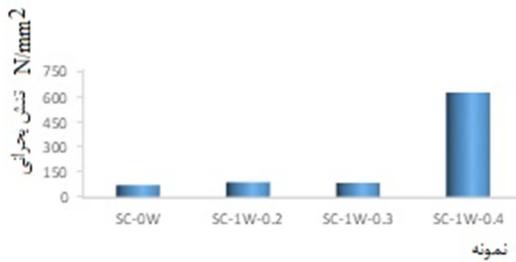
جايگذاري سيم آلياًز حافظه‌دار که در دماي معمولي اتفاق در فاز آستينيت قرار دارد، در نمونه کامپوزیتی هم اثر مثبت در خواص مکانيکي آن دارد و هم می‌تواند اثر منفی داشته باشد. اثر مثبت آن بالا رفتن مدول الاستیسیته نمونه به سبب مدول بالاي فاز آستينيت سیم حافظه‌دار و متعاقباً افزایش خواص مکانيکي می‌باشد، اما در بعضی آزمایش‌ها با جايگذاري سيم، گستگي در خواص مکانيکي در سطح قطعه به وجود می‌آيد و بى‌نظمي‌های در ساختار ماده پدیدار می‌شود که اين امر می‌تواند مانع ارتقاي عملکرد نمونه در برابر بارگذاري‌های مختلف شود.

۱-۳- نتیجه‌ی نمونه‌ی بدون سیم

در ابتدا، نمونه‌ی بدون سیم (نمونه‌ی شاهد) به منظور ملاک قرار دادن نتایج آن برای نتایج سایر نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. جدول ۲ مقادير نیروی بحرانی نمونه تا وقوع شکست و همچنین مقدار کرنش وارد شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نیروی بحرانی و حداکثر کرنش نمونه بدون سیم

نمونه	نیروی شکست (N)	کرنش (%)
C-0W	2231	2.62



شکل ۶- نمودار مقایسه تنش بحرانی نمونه‌های ۱ سیم با نمونه شاهد



شکل ۷- نمودار مقایسه کرنش حداکثر نمونه‌های ۱ سیم با نمونه شاهد

مطابق شکل ۷ جایگذاری سیمهای به ضخامت $\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$ میلی-متر، درصد کرنش پس از اعمال کشش اندکی کاهش یافته است که با توجه به خطاهایی که برای آزمایش در قسمت قبلی اشاره شد این مقدار تفاوت قابل چشم‌پوشی است؛ اما با جایگذاری سیم $\frac{1}{4}$ mm درصد کرنش تا $\frac{4}{5}$ افزایش یافته است که مقدار بالایی است. این نتیجه نشان می‌دهد که سیم $\frac{1}{4}$ mm وقتی در نمونه کامپوزیتی قرار می‌گیرد، نسبت به دو سیم دیگر توانایی بسیار بیشتری در تحمل بار وارد شده به قطعه دارد. هنگام بارگذاری کششی، حضور سیم باعث می‌شود که نیروی وارد بین فاز ماتریس کامپوزیت و سیم حافظه‌دار پخش شود.

۳-۳- نتایج نمونه‌های با ۳ سیم حافظه‌دار

سه نمونه ۳ سیم با کدهای SC-3W-0.2، SC-3W-0.3 و SC-3W-0.4 تحت آزمون کشش قرار گرفتند. جدول ۷ مقدار نیروی بحرانی نمونه‌ها تارخ دادن شکست و همچنین مقدار کرنش وارد شده و شکل ۸ نمودار نیرو-جایگایی مربوط به آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

جدول ۷- نیروی بحرانی و مقدار کرنش وارد شده نمونه‌های با ۳ سیم

نمونه	نیروی شکست (N)	کرنش (%)
SC-3W-0.2	2715.4	1.49
SC-3W-0.3	2715.4	1.42
SC-3W-0.4	19382.6	4.10

جدول ۵- تنش حداکثر و مدول الاستیسیته نمونه‌های با ۱ سیم

نمونه	تنش حداکثر (N/mm ²)	مدول الاستیسیته (N/mm ²)
SC-1W-0.2	90.74	4145.40
SC-1W-0.3	87.03	3670.09
SC-1W-0.4	621.6	13329.36

مطابق جدول ۵ مقادیر تنش حداکثر و مدول الاستیسیته برای نمونه‌های با سیم حافظه‌دار نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. این مقدار با تغییر ضخامت سیم متغیر است. مقادیر تنش حداکثر برای نمونه‌های SC-1W-0.2 و SC-1W-0.3 نزدیک به هم است که با توجه به مقدار خطای موجود می‌توان آن‌ها را برابر فرض کرد. عواملی مانند عدم یکنواختی ضخامت نمونه در طول آن و انحراف زاویه فک دستگاه می‌تواند باعث خطای آزمایش شود. همچنین شرایط ساخت کامپوزیت مانند دما و رطوبت کارگاه هم باعث اندکی خطا در آزمایش خواهد شد.

در این مرحله از آزمایش، مقادیر تنش حداکثر برای نمونه SC-1W-0.4 تفاوت قابل ملاحظه‌ای با دو نمونه دیگر دارد. این موضوع نشان می‌دهد که نمونه مقاومت بسیار بیشتری در برابر بارگذاری کششی نسبت به نمونه‌های دیگر دارد. برای آنکه نتایج ملموس‌تر باشد مقایسه‌ای بین تنش گسیختگی بین ۳ نمونه با سیم حافظه‌دار با ضخامت‌های مختلف با مختلف با نمونه شاهد انجام شده است که نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- میزان افزایش تنش بحرانی در سه نمونه با یک سیم حافظه دار نسبت به نمونه شاهد

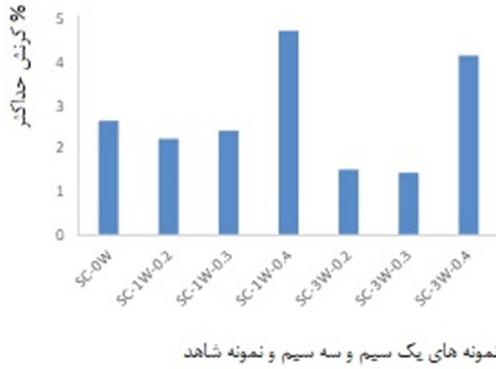
نمونه	درصد افزایش تنش بحرانی نسبت به نمونه شاهد (%)
SC-1W-0.2	22
SC-1W-0.3	17
SC-1W-0.4	735

مطابق جدول ۶، در نمونه‌ی با سیم به ضخامت $\frac{1}{4}$ میلی‌متر افزایش چشمگیر تنش بحرانی مشاهده می‌شود. جایگذاری سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک در نمونه کامپوزیتی سبب افزایش مقدار مدول الاستیسیته قطعه می‌شود که طبق قانون هوک افزایش مدول منجر به افزایش تنش خواهد شد؛ اما نتایج نشان می‌دهد که ضخامت سیم جایگذاری شده تأثیر بسیار مهمی در میزان افزایش خواص مکانیکی ماده دارد. در حالتی که سیم با ضخامت $\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}$ میلی‌متر جایگذاری شده افزایش خاصی در تنش بحرانی و مدول نمونه مشاهده نمی‌شود اما با جایگذاری سیم با ضخامت $\frac{1}{4}$ میلی‌متر مقدار تنش بحرانی تا ۷ برابر افزایش داشته است. این پدیده در نمودار شکل ۶ کاملاً مشخص شده است و همچنین شکل ۷ مقایسه بین کرنش حداکثر در نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

در حالت کامپوزیت با ۳ سیم حافظه‌دار هم مانند حالتی که از یک سیم استفاده شده بود، نمونه‌ای که در آن از سیم با ضخامت 0.4 میلی‌متر استفاده شده است، مقاومت کششی بسیار بیشتری از دو نمونه دیگر نشان داده است. این نتیجه حاکی از این موضوع است که سیم با ضخامت 0.4 میلی‌متر توانایی بسیار بالایی در تحمل بار کششی وارد بر کامپوزیت دارد و در نتیجه این تحمل بار پدیده ترک و رشد ترک و در نهایت گسیختگی در الیاف و ماتریس کامپوزیت دیرتر رخ می‌دهد و نمونه درصد کرنش بیشتری می‌تواند تحمل کند که در شکل ۹ به خوبی مشاهده می‌شود. در شکل ۹ مقایسه‌ای بین تنش بحرانی در نمونه‌های ۱ سیم و ۳ سیم و همچنین نمونه شاهد انجام شده است و همچنین در شکل ۱۰ مقادیر کرنش حداکثر مورد مقایسه قرار گرفته است.

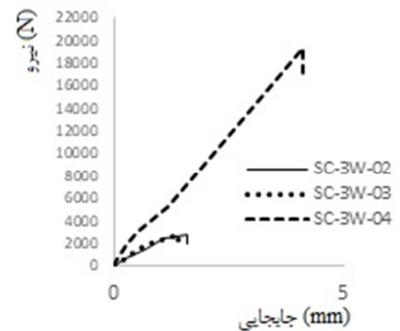


شکل ۹- نمودار تنش بحرانی در نمونه‌های ۱ و ۳ سیم و نمونه شاهد



شکل ۱۰- نمودار کرنش حداکثر در نمونه‌های ۱ و ۳ سیم و نمونه شاهد

۴-۳- نتایج نمونه‌های با ۵ سیم حافظه‌دار
سه نمونه ۵ سیم با کدهای SC-5W-0.2 و SC-5W-0.3 و SC-5W-0.4 تحت آزمون کشش قرار گرفتند. جدول ۱۰ مقادیر نیروی بحرانی نمونه‌ها را رخداد شکست و همچنین مقدار کرنش وارد شده و شکل ۱۱ نمودار نیرو-جایجاوی مربوط به آزمایش کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمودار نیرو-جایجاوی مربوط به آزمایش کشش نمونه‌های با ۳ سیم

با توجه به مقادیر نیروی بحرانی برای نمونه‌ها، مقادیر تنش حداکثر و مدول الاستیسیته به دست می‌آیند که در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸- تنش حداکثر و مدول الاستیسیته برای نمونه‌های با ۳ سیم

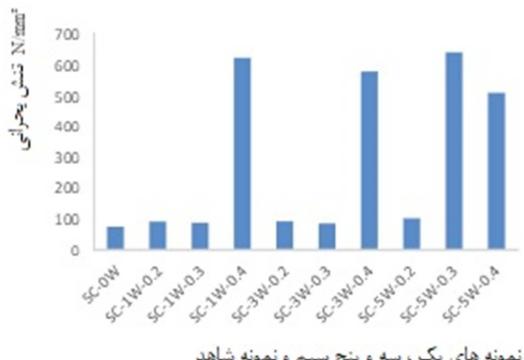
مدول الاستیسیته (N/mm ²)	تنش حداکثر (N/mm ²)	نمونه
6131.38	91.31	SC-3W-0.2
5942.11	84.57	SC-3W-0.3
13810.79	576.86	SC-3W-0.4

مطابق جدول ۸ مقادیر تنش حداکثر و مدول الاستیسیته برای نمونه‌های با ۳ سیم حافظه‌دار مانند نمونه‌های ۱ سیم نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. این مقدار با تغییر ضخامت سیم متغیر است. مقادیر تنش حداکثر برای نمونه‌های SC-3W-0.2 و SC-3W-0.3 نزدیک به هم است که با توجه به مقدار خطای موجود می‌توان آن‌ها را برای فرض کرد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که برای حالتی که از ۱ و ۳ سیم حافظه‌دار برای تقویت خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده می‌شود، ضخامت‌های پایین سیم توانایی تحمل بار کششی وارد به نمونه را ندارند و کامپوزیت‌هایی که در آن‌ها از ۱ و ۳ سیم با ضخامت پایین ($0.2 \text{ و } 0.3 \text{ میلی‌متر}$) استفاده می‌شود، مقاومت کششی بیشتری نسبت به کامپوزیت معمولی (نمونه شاهد) ندارند. این روند مورد اشاره در جدول ۹ در کامپوزیت تقویت شده با ۳ سیم حافظه‌دار با ضخامت‌های مختلف نسبت به نمونه کامپوزیتی ساده به خوبی قابل ملاحظه است.

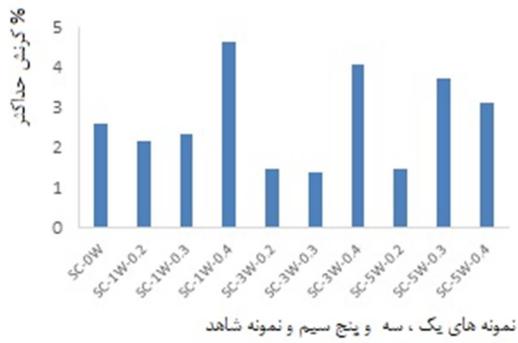
جدول ۹- میزان افزایش تنش بحرانی در سه نمونه با ۳ سیم حافظه‌دار نسبت به نمونه شاهد

نمونه	درصد افزایش تنش بحرانی (%)
SC-3W-0.2	22
SC-3W-0.3	13
SC-3W-0.4	675

همان‌گونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد جایگذاری سیم حافظه‌دار موجب بالا بردن مدول الاستیسیته و متعاقب آن خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی قطعه می‌شود؛ اما در بعضی موارد به دلیل غیر یکنواخت شدن خواص مکانیکی قطعه به خصوص صفحات کامپوزیتی در سطح آن می‌تواند اثر مثبت چندانی نداشته باشد. در اینجا در نمونه‌ای که از ۵ سیم حافظه‌دار استفاده می‌شود، در حالتی که ضخامت سیم 0.2 میلی‌متر است، گستینگی خواص مکانیکی باعث می‌شود استحکام کششی رشد قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد، اما در حالتی که ضخامت سیم $0.3 \text{ و } 0.4 \text{ میلی‌متر}$ استفاده می‌شود، در سطح نمونه یکنواختی ای به وجود می‌آید که منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ی استحکام کششی می‌شود. مشاهده می‌شود که تأثیر ضخامت و تعداد در عملکرد نمونه بسیار حساس است و فقط با افزایش 0.1 میلی‌متر ضخامت سیم نتیجه کاملاً متفاوتی به دست می‌آید. در شکل ۱۲ مقایسه‌ای بین تنش بحرانی در نمونه‌های ۱، ۳ و ۵ سیم و در شکل ۱۳ مقادیر کرنش حداکثر مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۲- تنش بحرانی در نمونه‌های کامپوزیتی با ۱، ۳ و ۵ سیم و نمونه شاهد

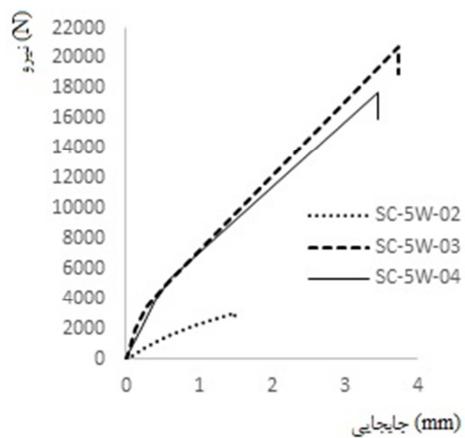


شکل ۱۳- کرنش حداکثر در نمونه‌های کامپوزیتی با ۱، ۳ و ۵ سیم حافظه‌دار و نمونه شاهد

در این قسمت مقایسه‌ای بین نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق پژوهشگرانی که روی بهینه‌سازی خواص استحکام کششی کامپوزیت مطالعه کرده‌اند، انجام شده است. از این رو نتایج پژوهش حاضر با نتایج فضل الهی و همکاران [۲۳]،

جدول ۱۰- نیروی بحرانی نمونه‌ها و مقدار کرنش وارد شده برای نمونه‌های با ۵ سیم حافظه‌دار

نمونه	نیروی شکست (N)	کرنش (%)
SC-5W-0.2	2978.3	1.52
SC-5W-0.3	20756	3.74
SC-5W-0.4	17765	3.15



شکل ۱۱- نمودار نیرو-جایجاوی مربوط به آزمایش کشش نمونه‌های با ۵ سیم

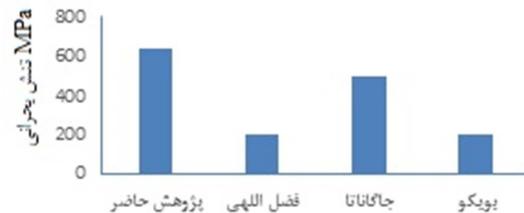
با توجه به مقادیر نیروی بحرانی برای نمونه‌ها، مقادیر تنش حداکثر و مدول الاستیسیته به دست می‌آیند که در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱- تنش حداکثر و مدول الاستیسیته برای نمونه‌های با ۵ سیم

نمونه	مدول الاستیسیته (N/mm²)	تنش حداکثر (N/mm²)
SC-5W-0.2	6673.40	101.30
SC-5W-0.3	17089.55	638.65
SC-5W-0.4	16101.47	507.60

طبق مقادیر جدول ۱۱، پس از جایگذاری ۵ سیم حافظه‌دار با ضخامت 0.2 میلی‌متر در کامپوزیت مانند حالت‌های ۱ و ۳ سیم مقدار کمی افزایش تنش بحرانی مشاهده می‌شود که دلیل این پدیده در بخش‌های قبل ذکر گردید؛ اما در حالتی که ۵ سیم با ضخامت 0.3 میلی‌متر در کامپوزیت جایگذاری شده است، برخلاف دو حالت قبلی که مقدار تنش بحرانی تقریباً مساوی با حالت 0.2 میلی‌متر بود، در اینجا افزایش چشمگیر تنش بحرانی رخ می‌دهد. در واقع، وقتی از ۵ سیم حافظه‌دار با ضخامت 0.3 میلی‌متر استفاده می‌شود، استحکام کششی کامپوزیت بسیار بالا می‌رود.

جاگاناتا و همکاران [۲۴] و ارغوان و همکاران [۱۳] مقایسه شده است که در شکل ۱۴ مشخص شده است.



شکل ۱۴- نتایج پژوهش حاضر و نتایج دیگران

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی خاصیت مکانیکی استحکام کششی کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه-کربن و با سیم آلیاژ حافظه‌دار جایگذاری شده پرداخته شده است. متغیرهای تحقیق تعداد سیم حافظه‌دار و ضخامت آن است که برای تعداد مقادیر ۱، ۳ و ۵ سیم و برای ضخامت مقادیر 0.2 ، 0.3 و 0.4 میلی‌متر در نظر گرفته شد. پس از ساخت، نمونه‌های آزمایشگاهی تحت آزمایش کشش قرار گرفتند تا مقادیر استحکام کششی آن‌ها مورد مقایسه قرار بگیرد. نتایج پژوهش به صورت زیر است:

۱- جایگذاری سیم حافظه‌دار در کامپوزیت باعث افزایش مدول الاستیسیته نمونه می‌شود که منجر به افزایش استحکام کششی می‌شود.

۲- در نمونه‌های با یک سیم حافظه‌دار جایگذاری شده، سیم‌های به قطر 0.2 و 0.3 میلی‌متر توانایی تحمل بار کششی وارد بر نمونه را ندارند و مقدار به دست آمده استحکام کششی برای این دو حالت تفاوت چندانی با حالت بدون سیم با نمونه شاهد ندارد؛ اما وقتی سیم به قطر 0.4 میلی‌متر در نمونه جایگذاری می‌شود مقدار استحکام کششی ۷ برابر می‌شود و مقدار زیادی از بار کششی وارد شده به سیم منتقل می‌شود و نمونه کرنش بیشتری تحمل می‌کند.

۳- در نمونه‌های با ۳ سیم حافظه‌دار جایگذاری شده هم مانند نمونه‌های ۱ سیم، سیم‌های به ضخامت 0.2 و 0.3 میلی‌متر نمی‌توانند تحمل بار کنند و مقدار استحکام کششی نمونه تفاوت چندانی با نمونه شاهد ندارد، اما سیم 0.4 میلی‌متر بار زیادی را تحمل می‌کند به طوری که استحکام کششی ۶ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد.

۴- در نمونه‌های با ۵ سیم حافظه‌دار جایگذاری شده، نمونه‌ای که ضخامت سیم 0.2 دارد مانند حالت‌های ۱ و ۳ سیم استحکام بالای ندارد. اما در این حالت جایگذاری سیم با ضخامت 0.3 میلی‌متر می‌تواند باعث بالا رفتن قابل ملاحظه استحکام کششی شود.

۵- در حالتی که از سیم حافظه‌دار به ضخامت 0.2 میلی‌متر استفاده شده است، با افزایش تعداد سیم استحکام کششی نمونه مقدار کمی افزوده می‌شود که علت این پدیده را می-

- توان افزایش مدول قطعه و غلبه کردن آن بر گسترشی وجود آمده دانست.
- ۶ در حالتی که از سیم حافظه‌دار به ضخامت 0.3 میلی‌متر استفاده شده است، تنها وقتی که تعداد ۵ سیم در نمونه جایگذاری می‌شود استحکام کششی دچار تغییر می‌شود و تغییر قابل ملاحظه‌ای تا ۶ برابر در استحکام کششی مشاهده می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Addington D.M., Schodek D.L., Smart Materials and New Technologies, Elsevier, 2005.
- [2] Khalili S. M. R., Shokuhfar A., Malekzadeh K., and Ashenai Ghasemi F., Low-velocity impact response of active thin-walled hybrid composite structures embedded with SMA wires, *Thin-Walled Structures* 45, No. 9, pp. 799-808, 2007.
- [3] Zhou Gang, and Peter Lloyd, Design, manufacture and evaluation of bending behaviour of composite beams embedded with SMA wires, *Composites Science and Technology* 69, No. 13 pp. 2034-2041, 2009.
- [4] Tsoi Kelly A., Jan Schrooten and Rudy Stalmans, Part I. Thermomechanical characteristics of shape memory alloys, *Materials Science and Engineering: A* 368, No. 1, pp. 286-298, 2004.
- [5] Jonnalagadda K., Kline G. E., and Sottos N. R., Local displacements and load transfer in shape memory alloy composites, *Experimental Mechanics* 37, No. 1, pp. 78-86, 1997.
- [6] Zheng Y. J., Jan Schrooten Kelly A. Tsoi, and Rudy Stalmans, Thermal response of glass fibre/epoxy composites with embedded TiNiCu alloy wires, *Materials Science and Engineering: A* 335, no. 1, pp. 157-163, 2002.
- [7] Vokoun D., Šittner P., and Stalmans R., Study of the effect of curing treatment in fabrication of SMA/polymer composites on deformational behavior of NiTi-5at.% Cu SMA wires." *Scripta materialia* 48, No. 5, pp. 623-627, 2003.
- [8] Zheng Y. J., Cui L. S., and Jan Schrooten, Basic design guidelines for SMA/epoxy smart composites, *Materials Science and Engineering: A* 390, No. 1, pp. 139-143, 2005
- [9] Ramadhan, A. A., AR Abu Talib, AS Mohd Rafie, and Zahari R., High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels, *Materials & Design* 43, pp. 307-321, 2013.
- [10] Zhang Run-xin, Qing-Qing Ni, Arata Masuda, Takahiko Yamamura, and Masuharu Iwamoto, Vibration characteristics of laminated composite plates with embedded shape memory alloys, *Composite structures* 74, No. 4, pp. 389-398, 2006.
- [11] Cantwell W. J., The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene, *Composites Science and Technology* 60, No. 7, pp. 1085-1094, 2000.
- [12] Raghavan J., Trevor Bartkiewicz, Shawna Boyko, Mike Kupriyanov, N. Rajapakse, and Ben Yu., Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering* 41, No. 3, pp. 214-222, 2010.
- [13] Sharifishourabi, G., Alebrahim R., Sharifi S., Ayob A., Zora Vrcelj, and M. Y. Yahya, Mechanical properties of potentially-smart carbon/epoxy composites with asymmetrically embedded shape memory wires, *Materials & Design* 59, pp. 486-493, 2014.
- [14] Meo Michele F. Marulo M. Guida, and Russo S., Shape memory alloy hybrid composites for improved impact properties for aeronautical applications, *Composite Structures* 95, pp. 756-766, 2013.
- [15] Zhang Run-xin, Qing-Qing Ni, Arata Masuda, Takahiko Yamamura, and Masuharu Iwamoto, Vibration characteristics of laminated composite plates with embedded shape memory alloys, *Composite structures* 74, No. 4, pp. 389-398, 2006.

- [16] Khalili S. M. R & Sharifi M., 1392, Effect of shape memory alloy wires on energy absorption of laminated composites in Tensile impact- Experimental study, کنفرانس دو سالانه دانشگاه علم و صنعت ایران، بین المللی مکانیک جامدات تجربی تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، بین المللی مکانیک جامدات تجربی دانشکده مهندسی مکانیک، http://www.civilica.com/Paper-WMECH02-WMECH02_161.html
- [17] Yamada Yoko, Minoru Taya, and Ryuzo Watanabe, Strengthening of metal matrix composite by shape memory effect, Materials Transactions, JIM 34, No. 3, pp. 254-260, 1993.
- [18] Murasawa Go, Keiichiro Tohgo, and Hitoshi Ishii, The effect of fiber volume fraction and aspect ratio on the creation of internal stress in the matrix and deformation for short-fiber shape memory alloy composite, Smart materials and structures 15, No. 1, p33, 2005.
- [19] Zhang Run-xin, Qing-Qing Ni, Toshiaki Natsuki, and Masaharu Iwamoto, Mechanical properties of composites filled with SMA particles and short fibers, Composite Structures 79, No. 1, pp. 90-96, 2007.
- [20] Qing-Qing Ni., Run-xin Zhang, Toshiaki Natsuki, and Masaharu Iwamoto, Stiffness and vibration characteristics of SMA/ER3 composites with shape memory alloy short fibers, Composite structures 79, No. 4, pp. 501-507, 2007.
- [21] Akbari T., and Khalili S. M. R., Numerical simulation of buckling behavior of thin walled composite shells with embedded shape memory alloy wires, Thin-Walled Structures 143, 106193, 2019.
- [22] Pazhanivel, K., G. B. Bhaskar, A. Elayaperumal, P. Anandan, and S. Arunachalam. Influence of Ni-Ti shape memory alloy short fibers on the flexural response of glass fiber reinforced polymeric composites, SN Applied Sciences 1, No. 7, pp. 789, 2019.
- [23] Elahi, AHM Fazole, Md Milon Hossain, Shahida Afrin, and Mubarak A. Khan, Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites, International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering, 26-27 December, Khulna, BANGLADESH, 2014.
- [24] Jagannatha T. D., and Harish G., Mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced epoxy hybrid polymer composites, International Journal Of Mechanical Engineering and Robotics Research 4, No. 2, pp. 131-137, 2015.