

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

مسعود خزائی

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

محمد کاظمی نصرآبادی*

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

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 سوپرلاستیسیتی آلیاژهای حافظه‌دار در ارتقای استحکام کششی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف استفاده شده است و تأثیر درصد حجمی و ضخامت سیم آلیاژ حافظه‌دار بر کامپوزیت تقویت شده با الیاف تک جهت کربن تحت بارگذاری کششی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف تک جهت کربن با جایگذاری یک، سه و پنج سیم آلیاژ حافظه‌دار با ضخامت‌های متغیر ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ 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 superelasticity 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.

[۲]. عامل‌هایی 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 [۳].

کامپوزیت‌های هیبریدی با آلیاژهای حافظه‌دار به عنوان نماینده‌ی نویدبخش 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 همه‌ی 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 فعال‌سازی را هم کاهش می‌دهد [۸]. رمضان و همکاران در دانشگاه پوترا مالزی در سال ۲۰۱۲ [۹] مطالعه‌ای تجربی روی پاسخ ضربه‌ی سرعت بالا در لایه‌های کامپوزیتی انجام دادند. آزمایش‌ها

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار گروهی از مواد هوشمند می‌باشند که خواص متمایزی 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، آلومینیوم 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].

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

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

مارولو و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۴] طی پژوهشی پاسخ کامپوزیت هیبرید 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 چکش‌خواری در کامپوزیت مشاهده شد. همچنین کامپوزیت هوشمند سختی بیشتر و سطح بالاتر انرژی جذب‌شده 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، ویژگی ارتعاشی در دمای پایین چندان مهم نیست اما در دماهای بالا کاملاً محسوس است که به دلیل استحاله مارتنزیتی 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 شده‌ی کامپوزیت حافظه‌دار تحت ضربه سرعت پایین مورد مطالعه قرار گرفت. درصد حجمی سیم حافظه‌دار به عنوان متغیر در نظر گرفته شد و مقادیر یک و دو سیم در کامپوزیت جایگذاری شد. نتایج حاکی از تأثیر چشمگیر حضور سیم در افزایش انرژی جذب شده است.

یامادا و همکاران [۱۷] اثر افزودن ذرات نیتینول به ماتریس فلزی آلومینیوم 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 تنش‌های پسماند 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 ضریب لاغری و کسر حجمی سیم‌ها پرداختند. آن‌ها دریافتند که میزان تنش فشاری تولید شده در زمینه با افزایش ضریب لاغری، آلیاژ حافظه‌دار افزایش پیدا می‌کند. همچنین برای ضریب لاغری بیش از ۲۵ سیم‌های کوتاه و بلند خواص مشابهی دارند. ژانگ و نی [۱۹] و [۲۰] رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیافی تقویت‌شده با سیم‌های آلیاژهای حافظه‌دار را همراه با سیم‌های کوتاه و ذرات آلیاژ حافظه‌دار بررسی نمودند. نظریه آنها بر پایه تئوری هالپین-سای می‌باشد. ایشان دریافتند با افزودن ۳٪ آلیاژ حافظه‌دار به رزین مدول ذخیره‌سازی آن ۶ برابر بیشتر می‌شود و فرکانس طبیعی آن نیز ۱/۲۶ برابر افزایش پیدا می‌کند. اکبری و خلیلی [۲۱] رفتار کماتش پوسته کامپوزیتی تقویت شده با سیم حافظه دار را مورد بررسی قرار دادند. پائینوال و همکاران [۲۲] تأثیر سیم کوتاه حافظه دار NiTi بر رفتار خمشی 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 کرده‌اند 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 آستنیت (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.

روی سازه‌ی ساندویچی بر پایه‌ی رزین اپوکسی الیاف کولار با لایه‌های متغیر آلومینیوم 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 [۲] در مورد تأثیر بعضی متغیرهای مهم در پاسخ به ضربه‌ی سرعت پایین صفحات کامپوزیت هیبریدی 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 زنده و نسبت طول به ضخامت صفحه مهم‌ترین متغیرها برای مقاومت ضربه در طراحی سازه بر این اساس می‌باشد.

ووکون و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۷] طی پژوهشی روی سیم‌های حافظه‌دار آن‌ها را به سطح کرنش متغیر در دماهای متغیر رساندند تا به اطلاعاتی در مورد بهینه‌سازی رفتار عمل‌آوری 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 ۴۱۳ K انجام شد. سیم‌ها پس از باربرداری مقدار جزئی کرنش بازمی‌ماندند. کرنش برگشت‌پذیر با افزایش دما کاهش می‌یابد اما با افزایش سطح کرنش افزوده می‌شود.

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۱۰] روی خواص ارتعاشات کامپوزیت حافظه‌دار مطالعه کردند. در ابتدا صفحات چند لایه‌ی کامپوزیتی حاوی سیم حافظه‌دار تک‌محوره ساخته شدند. با اندازه‌گیری مواد ارتعاشی تیر گیردار، تأثیر جاگیری سیم حافظه‌دار و دما در خواص ارتعاشی مشخص شد. سپس صفحات کامپوزیتی با سیم حافظه‌دار بافته شده (دو محوره) ساخته شد. نتیجه این بود که با افزایش درصد حجمی سیم حافظه‌دار، قابلیت تنظیم سفتی ارتقا یافت.

شیماموتو 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 تمرکز تنش نوک ترک می‌شود و مقدار K_{Ic} (چقرمگی شکست) با افزایش پیش‌کرنش افزوده می‌شود.

ارغوان و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۲] پژوهشی روی خواص کششی، میراکنندگی و ضربه‌ای کامپوزیت حافظه دار انجام دادند. نتایج حاصل از تحقیقات آنان نشان داد که ظرفیت میرایی یک کامپوزیت حافظه‌دار تابعی ترکیبی از دمای آزمایش و تنش پسماند در الیاف که ناشی از پیش‌کرنش و چرخه گرمایی هستند می‌باشد و اعمال پیش‌کرنش در حالت آستنیتی در دمای اتاق منجر به افزایش ظرفیت میراکنندگی می‌شود. همچنین استفاده از سیم‌های حافظه‌دار باعث پخش آسیب وارده 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 کربن اپوکسی با سیم حافظه‌دار انجام دادند و نشان دادند که با افزایش سیم حافظه‌دار مدول برشی و ضریب پواسون افزایش می‌یابد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از الیاف تک جهت 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 NiTi (نیکل تیتانیوم) سوپرالاستیک ساخته‌ی کارخانه‌ی Highland Metals Inc آمریکا است. سیم در سه ضخامت ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ mm به کار گرفته شده است. دماهای استحاله فازی سیم مورد استفاده 18°C ، 9°C و -5°C می‌باشد که حاکی از این است که سیم حافظه-دار مورد استفاده در دمای اتاق (25°C) در حالت آستنیتی کامل قرار دارد.

برای ساخت کامپوزیت، از روش لایه‌چینی دستی با ۶ لایه الیاف تک جهت کربن و همچنین رزین و هاردنر با درصد وزنی ماتریس ۵۵٪ استفاده شد. سیم‌های حافظه‌دار در بین لایه‌های سوم و چهارم با فاصله‌ی ۵mm 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 ۲ mm/min می‌باشد.

متغیرهای ضخامت سیم و تعداد سیم به عنوان متغیر این پژوهش برای بررسی تأثیر سیم حافظه‌دار بر بارکشی 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 $2.5 \text{ cm} * 25$ در نظر گرفته شد. شکل ۱ فیکسچر ساخت نمونه و بستن سیم را نشان می‌دهد.



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



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 نحوه‌ی 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 هوک مدول الاستیسیته به دست می‌آیند که در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- تنش حداکثر و مدول الاستیسیته نمونه‌ی بدون سیم

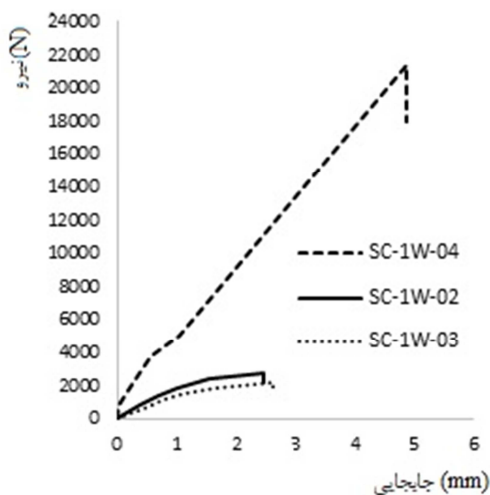
نمونه	تنش حد اکثر (N/mm ²)	مدول الاستیسیته (N/mm ²)
C-0W	74.36	3681.2

۲-۲- نتایج نمونه‌های با ۱ سیم حافظه‌دار

سه نمونه ۱ سیم با کدهای SC-1W-0.2، SC-1W-0.3 و SC-1W-0.4 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 نمونه‌ها 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 ده-گانه 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.

۲-۳ نتایج آزمایش کشش

جایگذاری سیم آلیاژ حافظه‌دار که در دمای معمولی اتاق در فاز آستنیت قرار دارد، در نمونه کامپوزیتی هم اثر مثبت در خواص مکانیکی آن دارد و هم می‌تواند اثر منفی داشته باشد. اثر مثبت آن بالا رفتن مدول الاستیسیته نمونه به سبب مدول بالای فاز آستنیت سیم حافظه‌دار و متعاقباً افزایش خواص مکانیکی می‌باشد، اما در بعضی آزمایش‌ها با جایگذاری سیم، گسستگی در خواص مکانیکی در سطح قطعه به وجود می‌آید و بی‌نظمی‌هایی در ساختار ماده پدیدار می‌شود که این امر می‌تواند مانع ارتقای عملکرد نمونه در برابر بارگذاری‌های مختلف شود.

۳-۱- 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 مقادیر 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 ۰/۲ و ۰/۳ 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 ۰/۴ mm درصد کرنش تا ۴/۵٪ افزایش یافته است که مقدار بالایی است. این نتیجه نشان می‌دهد که سیم ۰/۴ 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 وارده 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 مقادیر نیروی بحرانی نمونه‌ها تا رخ دادن شکست و همچنین مقدار کرنش وارد شده و شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی 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 نمونه‌ی 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.

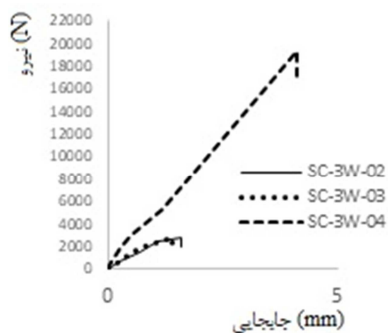
در این مرحله از آزمایش، مقادیر تنش حداکثر برای نمونه‌ی SC-1W-0.4 تفاوت قابل ملاحظه‌ای با دو نمونه دیگر دارد. این موضوع نشان می‌دهد که نمونه مقاومت بسیار بیشتری در برابر بارگذاری کششی نسبت به نمونه‌های دیگر دارد. برای آنکه نتایج ملموس‌تر باشد مقایسه‌ای بین تنش گسیختگی بین ۳ نمونه با سیم حافظه‌دار با ضخامت‌های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

جدول ۶ - میزان افزایش تنش بحرانی در سه نمونه با یک سیم حافظه‌دار 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

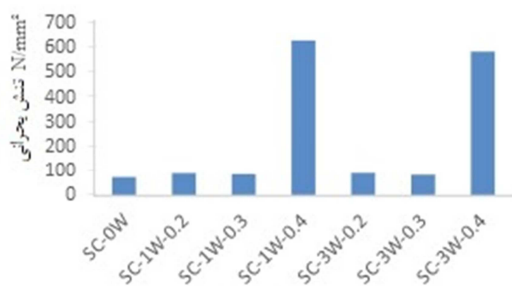
مطابق جدول ۶، در نمونه‌ی با سیم به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر افزایش چشمگیر تنش بحرانی مشاهده می‌شود. جایگذاری سیم حافظه‌دار سوپرالاستیک در نمونه کامپوزیتی سبب افزایش مقدار مدول الاستیسیته قطعه می‌شود که طبق قانون هوک افزایش مدول منجر به افزایش تنش خواهد شد؛ اما نتایج نشان می‌دهد که ضخامت سیم جایگذاری شده تأثیر بسیار مهمی در میزان افزایش خواص مکانیکی ماده دارد. در حالتی که سیم با ضخامت ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌متر جایگذاری شده افزایش خاصی در تنش بحرانی و مدول نمونه مشاهده نمی‌شود اما با جایگذاری سیم با ضخامت ۰/۴ 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 ۰/۴ 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 ۰/۴ میلی‌متر توانایی بسیار بالایی در تحمل بار کششی وارده 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.



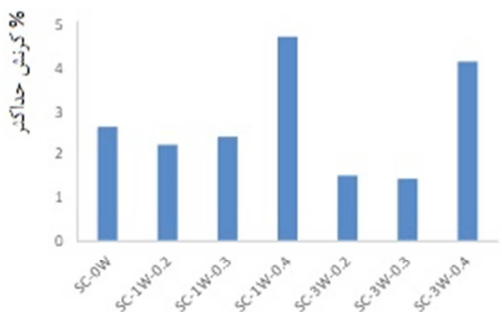
شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمایش کشش نمونه‌های با ۳ سیم

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



نمونه‌های یک سیم و سه سیم و نمونه شاهد

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



نمونه‌های یک سیم و سه 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، SC-5W-0.3 و SC-5W-0.4 تحت آزمون کشش قرار گرفتند. جدول ۱۰ مقادیر نیروی بحرانی نمونه‌ها تا رخ دادن شکست و همچنین مقدار کرنش وارد شده و شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

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

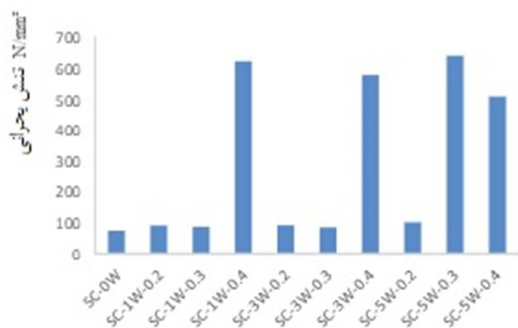
مدول الاستیسیته (N/mm ²)	تنش حداکثر (N/mm ²)	نمونه
6131.38	91.31	SC-3W-0.2
5942.11	84.57	SC-3W-0.3
13810.79	576.86	SC-3W-0.4

مطابق جدول ۸ مقادیر تنش حداکثر و مدول الاستیسیته برای نمونه‌های با ۳ سیم حافظه‌دار مانند نمونه‌های ۱ سیم نسبت به نمونه‌ی 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 برابر 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 وارده به نمونه را ندارند و کامپوزیت‌هایی که در آن‌ها از ۱ و ۳ سیم با ضخامت پایین (۰/۲ و ۰/۳ 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

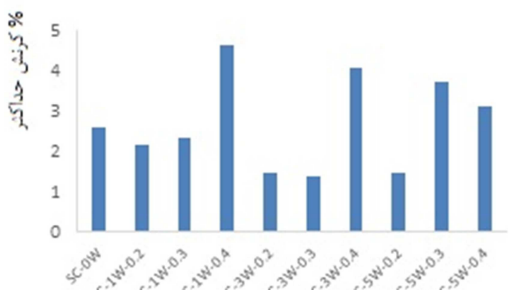
درصد افزایش تنش بحرانی نسبت به نمونه شاهد (%)	نمونه
22	SC-3W-0.2
13	SC-3W-0.3
675	SC-3W-0.4

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 ۰/۲ میلی‌متر است، گسستگی خواص مکانیکی باعث می‌شود استحکام کششی رشد قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد، اما در حالتی که ضخامت سیم ۰/۳ و ۰/۴ میلی‌متر استفاده می‌شود، در سطح نمونه یکنواختی‌ای به وجود می‌آید که منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای استحکام کششی می‌شود. مشاهده می‌شود که تأثیر ضخامت و تعداد در عملکرد نمونه بسیار حساس است و فقط با افزایش ۰/۱ میلی‌متری 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.



نمونه های یک ، سه و پنج سیم و نمونه شاهد

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



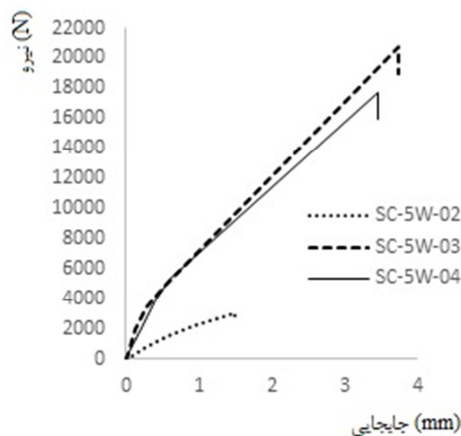
نمونه های یک ، سه و پنج سیم و نمونه شاهد

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 فضل‌الهی و همکاران [۲۳]،

جدول ۱۰- نیروی بحرانی نمونه‌ها و مقدار کرنش وارد شده برای نمونه- های 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-جایجایی 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	تنش حداکثر (N/mm ²)	مدول الاستیسیته (N/mm ²)
SC-5W-0.2	101.30	6673.40
SC-5W-0.3	638.65	17089.55
SC-5W-0.4	507.60	16101.47

طبق مقادیر جدول ۱۱، پس از جایگذاری ۵ سیم حافظه‌دار با ضخامت ۰/۲ 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 ۰/۳ میلی‌متر در کامپوزیت جایگذاری شده است، بر خلاف دو حالت قبلی که مقدار تنش بحرانی تقریباً مساوی با حالت ۰/۲ میلی‌متر بود، در اینجا افزایش چشمگیر تنش بحرانی رخ می‌دهد. در واقع، وقتی از ۵ سیم حافظه‌دار با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر استفاده می‌شود، استحکام کششی کامپوزیت بسیار بالا می‌رود.

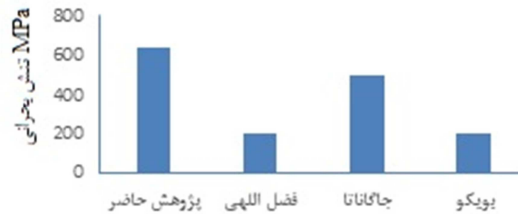
توان افزایش مدول قطعه و غلبه کردن آن بر گسستگی بوجود آمده دانست.

۶- در حالتی که از سیم حافظه‌دار به ضخامت ۰/۳ 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.

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 الیاز 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 ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ 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 ۰/۲ و ۰/۳ 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 یا نمونه شاهد ندارد؛ اما وقتی سیم به قطر ۰/۴ 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 ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌متر نمی‌تواند تحمل بار کنند و مقدار استحکام کششی نمونه تفاوت چندانی با نمونه شاهد ندارد، اما سیم ۰/۴ 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 ۰/۲ دارد مانند حالت‌های ۱ و ۳ سیم استحکام بالایی ندارد. اما در این حالت جایگذاری سیم با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر می‌تواند باعث بالا رفتن قابل ملاحظه استحکام کششی شود.
- ۵- در حالتی که از سیم حافظه‌دار به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر استفاده شده است، با افزایش تعداد سیم استحکام کششی نمونه مقدار کمی افزوده می‌شود که علت این پدیده را می‌

- [16] Khalili S. M. R & Sharafi M., 1392, Effect of shape memory alloy wires on energy absorption of laminated composites in Tensile impact- Experimental study, کنفرانس دو سالانه تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، بین‌المللی مکانیک جامدات تجربی مهندسی مکانیک، دانشکده، 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 Fazle, 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.