



بررسی تجربی اثر افزودن سیم آلیاژ حافظه‌دار بر رفتار ضربه‌ی سرعت پایین کامپوزیت‌های چندلایه الیاف / فلز در دماهای مختلف

محمد رضا فضل الله پور¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}، حامد آقامحمدی³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

* تهران، کد پستی 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 98/11/04	کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز یکی از پرمصرف‌ترین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری ترکیبی در صنایع هوایی و سازه‌های دریایی هستند که با اتصال بین لایه‌های فلزی به لایه‌های کامپوزیتی ساخته می‌شوند. تلفیق خواص مواد فلزی و کامپوزیتی مهم‌ترین دلیل در استفاده از این کامپوزیت‌ها می‌باشد. با توجه به کاربرد این نوع از کامپوزیت‌ها در شرایط دمایی مختلف، در تحقیق حاضر، رفتار ضربه‌ای سرعت پایین چارپی کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز هوشمند تحت دماهای 45 - 25 + و 90+ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت.
پذیرش: 99/10/03	کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز هوشمند از دو لایه آلومینیوم 6061-T6 و چهار لایه رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه ساخته شدند که سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نیز با صفر و 5 درصد پیش‌کرنش در لایه‌ی میانی آنها قرار گرفتند. متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه، شامل اثرات تعداد و پیش‌کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و همچنین اثر دما بر میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های مذکور بود. نتایج نشان داد که وجود 2 سیم آلیاژ حافظه‌دار، در دماهای 45 - 25 + و 90+ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب سبب افزایش 20، 14 و 8 درصد جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار شده است.
کلیدواژگان	
چندلایه الیاف / فلز	
آلیاژ حافظه‌دار	
رفتار ضربه‌ای	
پیش‌کرنش	
شرایط دمایی مختلف	

Experimental investigation of the effect of shape memory alloy wire embedding on the low-velocity impact behavior of fiber metal laminates composites at different temperatures

Mohammadreza Fazlollah-Poor, Reza Eslami-Farsani*, Hamed Aghamohammadi

1- Faculty of the Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Fiber Metal Laminates (FMLs)
Shape memory alloy (SMA)
Pre-strain, Impact behavior
Different temperature condition

Abstract

Fiber metal laminates (FMLs) are one of the most widely used hybrid polymeric composites in the aerospace and marine industries that are fabricated using the bonding between the metallic and polymeric layers. The combination of the advantages of both metals and composites is the main reason for the usage of the FMLs. Due to the application of FMLs under different temperature conditions, in the present study, the Charpy impact behavior of smart FMLs in comparison to fiber metal laminate was investigated at temperatures of -45, +25 and 90 °C. FML samples were made of two layers of 6061-T6 aluminum alloy and four layers of glass fiber-reinforced epoxy (GFRE), which shape memory alloy (SMA) wires by zero and 5% pre-strain were placed in the middle layers. The investigated parameters in this study were the number of SMA wires, the pre-strain effect of SMA wires, and also the effect of temperature on the energy absorption values of the FMLs. The results showed that the presence of two SMA wires at temperatures of -45, +25 and + 90 °C respectively caused the increment in the energy absorption by 14, 20 and 8%, compared to the without SMA wire samples.

Please cite this article using:

Fazlollah-Poor, M.R. Eslami-Farsani, R. and Aghamohammadi, H., "Experimental investigation of the effect of shape memory alloy wire embedding on the low-velocity impact behavior of fiber metal laminates composites at different temperatures", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1057-1063, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به عنوان یکی از سازه‌های مهندسی سبک، در صنایع مختلف گسترش یافته است. این کامپوزیت‌ها از لحاظ خواص گرمایی به دو دسته‌ی گرمانرم و گرماسخت طبقه‌بندی می‌شوند. کامپوزیت‌های گرماسخت با داشتن خواص مکانیکی بهتر نسبت به کامپوزیت‌های گرمانرم، به عنوان یکی از پرمصرفترین کامپوزیت‌ها در صنایع هوایی و دریایی شناخته شده‌اند. با این وجود، کامپوزیت‌های گرماسخت دارای معایبی از جمله مقاومت کم در برابر ضربه هستند. بنابراین، در دهه‌ی هفتاد محققان دانشگاه صنعتی دلف¹ با اتصال لایه‌های کامپوزیتی به لایه‌های فلزی موفق به ساخت کامپوزیت‌های چند لایه الیاف/ فلز² شدند [1].

خواص منحصر به فرد کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز مانند مقاومت به ضربه‌ی خوب، مقاومت به خستگی بالا و مقاومت در برابر آتش نسبت به کامپوزیت‌ها و فلزات، باعث شده است که این مواد به عنوان بدنه‌ی هواپیما مورد استفاده قرار گیرند. از طرف دیگر، با توجه به گزارشات تخریب 71 هواپیمای بوئینگ³ 747، حدود 90 مورد از تعمیرات ناشی از اثر برخورد یا ضربه‌ی اجسام خارجی بوده است. این برخوردها شامل برخورد پرندگان، اصابت تگرگ، افتادن بار و ابزار روی بدنه و دیگر آسیب‌های حاصل از ضربه‌ی سرعت پایین بوده‌اند [2-4].

استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار⁴ یکی از راهکارهای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری می‌باشد. در سال 1988، راجرز و همکارانش [6]، در دانشگاه ویرجینیا⁵ از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار برای افزایش خواص مکانیکی استفاده کردند. امروزه این آلیاژها به صورت تسمه، سیم و ورق به منظور کاهش شدت آسیب، افزایش خودترمیمی و همچنین افزایش خواص مکانیکی درون کامپوزیت‌های مختلف قرار می‌گیرند [3-8]. افزودن آلیاژهای حافظه‌دار درون کامپوزیت‌ها، به دو روش متفاوت خاصیت فعال و انرژی کرنشی⁶ انجام می‌شود. در روش خاصیت فعال، مکانیزم تقویت‌کنندگی ناشی از کسر حجمی و مدول ذاتی آلیاژ حافظه‌دار است که بدون اعمال پیش کرنش درون کامپوزیت قرار می‌گیرد. در روش انرژی کرنشی، قبل از جایگذاری آلیاژ حافظه‌دار درون کامپوزیت، این آلیاژ تحت - کرنش اولیه قرار می‌گیرد [9-12].

اسلامی-فارسانی و همکاران [5]، به بررسی مقاومت به ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز حاوی 2، 4 و 8 سیم آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. با توجه به نتایج حاصل از این آزمون، پیش‌کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، سبب افزایش میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز هوشمند، نسبت به کامپوزیت بدون سیم شد که بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به نمونه‌ی حاوی 8 سیم آلیاژ حافظه‌دار (بدون پیش‌کرنش) است.

از طرفی دیگر، وجود آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش‌کرنش درون لایه‌های کامپوزیت، در مکانیزم تخریب تاثیرگذار است. نتایج مطالعه‌ی دن و همکارانش [13]، نشان داد که با افزایش کسر حجمی سیم آلیاژ حافظه‌دار

(بدون پیش‌کرنش) به دلیل اثر جدایی بین سیم و کامپوزیت⁷، آسیب‌های بین لایه‌ای افزایش می‌یابند.

رضانی و همکاران [14]، به بررسی اثر افزودن و تاثیر میزان پیش‌کرنش سیم آلیاژ حافظه‌دار بر مقاومت به ضربه‌ی سرعت پایین کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که تعبیه سیم آلیاژ حافظه‌دار باعث سفتی ظاهری ناحیه تماس می‌شود. همچنین با افزایش پیش‌کرنش و ایجاد تنش پس‌ماند، نرخ انتقال انرژی از جسم ضربه زنده به داخل کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز با آهنگ کندتری صورت می‌پذیرد که این مکانیزم سبب کاهش جذب انرژی در قسمت کامپوزیتی می‌شود.

عصفوری و همکاران [3]، به بررسی اثر زاویه الیاف، میزان پیش‌کرنش و محل قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، بر میزان جذب انرژی کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که بیشترین میزان جذب انرژی زمانی ایجاد می‌شود که حداکثر میزان پیش‌کرنش اعمال شود. از طرفی دیگر، زمانی که کمترین فاصله بین سیم و ضربه زنده ایجاد شود، جذب انرژی افزایش می‌یابد.

کریملو و همکاران [15]، به بررسی تاثیر محل قرارگیری و میزان پیش-کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر خواص کماتشی کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز پرداختند. نتایج حاصل از این آزمون نشان داد که با افزایش پیش‌کرنش سیم‌ها، به علت افزایش تنش پسماند در پیش‌کرنش‌های بالاتر، میزان نیروی بحرانی کماتش افزایش می‌یابد. همچنین قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در لایه‌های دورتر از تار خنثی باعث افزایش حد تحمل بار کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز می‌شود.

با توجه به تحقیقات انجام شده، در صورت تعبیه‌ی سیم آلیاژ حافظه‌دار درون کامپوزیت، افزایش و کاهش خواص مکانیکی ناشی از رقابت دو عامل گسستگی و افزایش مدول الاستیک است. به بیان دیگر، جدایی بین فصل مشترک کامپوزیت و سیم باعث ایجاد تمرکز تنش در منطقه‌ی جدا شده و کاهش خواص مکانیکی می‌شود که این تخریب در اثر اعمال بیش از حد پیش‌کرنش و اعمال حرارت ایجاد خواهد شد [16-21].

کین و همکاران [18]، به بررسی برگشت‌پذیری سیم آلیاژ حافظه‌دار پیش‌کرنش شده در اثر افزایش دما پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که افزایش دما تا بالاتر از پایان آستنیت، سبب ایجاد تنش بازایی در سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار دارای پیش‌کرنش می‌شود. بنابراین، هنگامی که تنش خارجی اعمال شده کمتر از تنش بازایی باشد، تنش فشاری ایجاد شده سبب جدایی بین سیم و کامپوزیت می‌شود. در نتیجه، تغییرات دمایی در خواص مکانیکی و فصل مشترک کامپوزیت و سیم آلیاژ حافظه‌دار تاثیر بسزایی دارد [22, 19].

کنگ و همکاران [23]، به بررسی اثر میزان سطح انرژی و مقایسه سطح آسیب نمونه‌های کامپوزیتی (اپوکسی/الیاف شیشه) با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار در دماهای منفی (-10 و -40 درجه سانتی‌گراد) و دمای محیط پرداختند. نتایج نشان داد که با توجه به دمای آزمایش، میزان تخریب برای کامپوزیت‌های با و بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار متفاوت است و در نمونه‌های دارای سیم، تغییر دما اثر کمتری بر میزان منطقه‌ی آسیب دیده دارد. همچنین در دماهای محیط و -10 درجه سانتی‌گراد، آسیب نمونه‌های دارای

¹ Delft
² Fiber Metal Laminate (FML)
³ Boeing
⁴ Shape Memory Alloy (SMA)
⁵ Virginia
⁶ Pre-strain

⁷ Debonding

Table 1 The transformation temperatures of the Ni-Ti SMA wire [5]

پایان مارتنزیت (M _f)	شروع مارتنزیت (M _s)	پایان آستنیت (A _f)	شروع آستنیت (A _s)
-65 °C	-42.61 °C	19.71 °C	5.35 °C

2-2- ساخت کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز هوشمند

2-2-1- اصلاح سطحی آلومینیوم

به منظور ایجاد چسبندگی بین ورق آلومینیوم و کامپوزیت زمینه پلیمری، عملیات اصلاح سطحی شیمیایی⁵ روی ورق‌های آلومینیوم انجام شد. ابتدا سطح آلومینیوم با پنبه‌ی آغشته به استون کاملاً عاری از گرد و غبار و چربی شد. سپس ورق‌های آلومینیوم 6061 به مدت 1 ساعت در محلول دی‌کرومات سدیم و اسید سولفوریک غوطه‌ور شده و در نهایت نمونه‌ها در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند [26].

2-2-2- لایه‌گذاری کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز هوشمند

پس از اصلاح سطحی آلومینیوم، برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی چندلایه الیاف / فلز، سطح آلومینیوم با رزین اپوکسی کاملاً آغشته شد و با لایه‌گذاری چهار لایه کامپوزیت اپوکسی / الیاف شیشه، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار (با و بدون اعمال پیش‌کرنش) در میان این لایه‌ها قرار گرفتند. به منظور اعمال پیش‌کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار از پیچ‌های تعبیه شده در کناره‌های فیکسچر استفاده شد که سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تحت تنش کششی قرار گرفتند. شکل 1 تصویر شماتیک نمونه‌ی چندلایه الیاف / فلز را نشان می‌دهد. پس از اتمام فرآیند لایه‌گذاری، برای رسیدن به حداکثر خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت، نمونه‌ها جهت پخت به مدت 7 روز تحت فشار در دمای محیط قرار گرفتند. پس از اتمام زمان پخت و چسبندگی کامل، نمونه‌ها طبق استاندارد ISO179-1، با ابعاد 70 × 10 میلیمتر مربع به وسیله‌ی واترجت برشکاری شدند. شکل 2 نشان‌دهنده فصل‌مشترک آلومینیوم / کامپوزیت پلیمری می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، یک چسبندگی قوی بین لایه‌ها وجود دارد

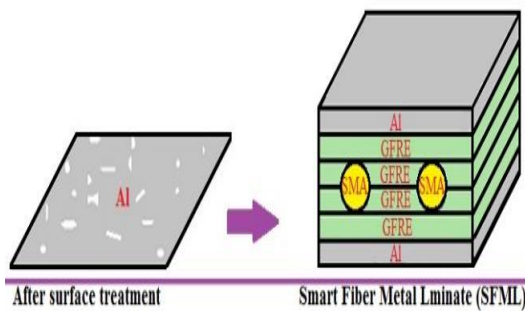


Fig. 1 The schematic image of smart FML samples

شکل 1 تصویر شماتیکی از نمونه‌ی کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز هوشمند

سیم، بیشتر از نمونه‌های بدون سیم است که این موضوع بر اثر تقویت-کنندگی سیم آلیاژ حافظه‌دار دلالت می‌کند.

پژنیول و همکاران [24]، به بررسی مقاومت به ضربه‌ی کامپوزیت اپوکسی / الیاف شیشه دارای تسمه آلیاژ حافظه‌دار (با 2، 4 و 6 درصد وزنی، جایگذاری شده در 75 درصد ضخامت)، در دماهای 30، 60 و 90 درجه - سانتی‌گراد پرداختند. نتایج حاکی از آن است که در نمونه‌های بدون تسمه آلیاژ حافظه‌دار، با افزایش دما میزان آسیب‌دیدگی سطح بیشتر می‌شود. اما، در نمونه‌های دارای تسمه، میزان آسیب، متغیر می‌باشد و وابسته به درصد وزنی تسمه آلیاژ حافظه‌دار است.

صالحی خوجین و همکاران [25]، به بررسی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های اپوکسی / الیاف شیشه و همچنین اپوکسی / الیاف کولار در 4 دمای مختلف پرداختند. با توجه به نتایج گزارش شده توسط آن‌ها، رشد ترک با دما رابطه‌ی معکوس دارد، به عبارتی با کاهش دما رشد ترک افزایش می‌یابد، اما با افزایش دما (تا +120 درجه‌ی سانتی‌گراد) رشد ترک روند نزولی را نشان می‌دهد. همچنین بیان شده است که جذب انرژی در هر دو کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه و کولار وابسته به میزان انرژی ضربه و دما است.

با توجه به کاربرد کامپوزیت‌های چندلایه الیاف / فلز در بدنه‌ی هواپیماهای مسافربری و تجاری و همچنین استفاده از آلیاژ حافظه‌دار برای بهبود خواص مکانیکی، یکی از موارد قابل اهمیت در هنگام پرواز، بررسی رفتار ضربه‌ای سرعت پایین این کامپوزیت‌ها در برابر برخورد اجسام خارجی در دماهای مختلف است که تاکنون تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اثر افزودن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر جذب انرژی کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز است. در ادامه تحقیقات قبلی صورت‌گرفته، در این مطالعه، به تاثیر شرایط دمایی مختلف بر روی خواص ضربه کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز شامل سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار پرداخته می‌شود.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

در پژوهش حاضر، به منظور ساخت هسته‌ی کامپوزیت‌های چندلایه الیاف / فلز از رزین اپوکسی LY5052 همراه با عامل سخت‌کننده¹ LY5052 (با نسبت 100 به 38) استفاده شده است. همچنین از چهار لایه الیاف شیشه نوع E با بافت حصیری (400 گرمی) به عنوان تقویت کننده‌ی هسته‌ی کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز و از ورق آلومینیوم آلیاژ 6061 (با عملیات حرارتی T6) با ضخامت 0.5 میلی‌متر (ساخت شرکت آلکوا⁴) به عنوان پوسته‌ی کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز استفاده شد. از طرفی دیگر، به منظور هوشمند کردن کامپوزیت چندلایه الیاف / فلز از آلیاژ سوپرالاستیک نیکل-تیتانیوم² (ساخت شرکت هایلند متالز³، آمریکا) با قطر 0.4 میلی‌متر استفاده شد. جدول 1، دمای تغییرات فازی این آلیاژ را نشان می‌دهد.

جدول 1 دمای انتقال فازی در سیم آلیاژ حافظه‌دار نیکل - تیتانیوم [5]

¹ Hardener
² ALCOA
³ Nitinol
⁴ Highland metals company

⁵ Forest Product Laboratory

Table 2 Specimen's code

کد	نمونه‌ها
0W	SMA بدون سیم FML
1W	SMA با یک سیم FML
2W	SMA با دو سیم FML
1W5	FML با 1 سیم SMA و 5 درصد پیش‌کرنش
2W5	FML با 2 سیم SMA و 5 درصد پیش‌کرنش

* حرف W نشان‌دهنده‌ی سیم (wire) است.

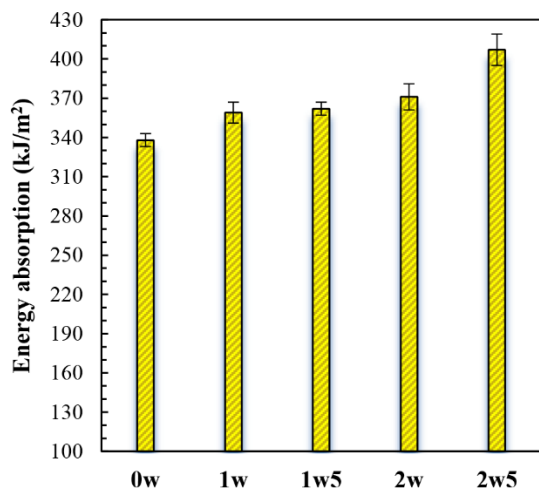


Fig. 3 Impact test results of FML samples at -45 °C

شکل 3 نتایج آزمون ضربه کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز در دمای 45- درجه سانتی-گراد

جذب انرژی در نمونه‌ی 1W5 (362 کیلوژول بر مترمربع) نسبت به نمونه‌ی 1W (359 کیلوژول بر مترمربع) تغییرات کمی را نشان می‌دهد. می‌توان بیان نمود که در کسر حجمی پایین‌تر سیم‌های الیاف حافظه‌دار، تنش فشاری ایجاد شده ناشی از اعمال پیش‌کرنش مشابه با تنش فشاری ایجاد شده حاصل از کاهش دماست و برابری این دو عامل سبب تغییرات کم در میزان جذب انرژی شده است.

یکی از عوامل اصلی کاهش خواص مکانیکی در کامپوزیت‌های تقویت شده با سیم الیاف حافظه‌دار، جدایی بین سیم و کامپوزیت در اثر تغییرات دما و پیش‌کرنش است که این عامل سبب ایجاد تمرکز تنش برای شروع ترک می‌شود. بنابراین، می‌توان بیان کرد که با قرارگیری نمونه‌های کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز هوشمند در دمای 45- درجه سانتی‌گراد، تنش فشاری حاصل از رزین اپوکسی سبب کاهش اثر جدایی بین سیم و کامپوزیت می‌شود. شکل 4، تغییرات نوع شکست در نمونه‌های 1W، 2W، 1W5 و 2W5 را پس از آزمون ضربه چارپی در دمای 45- درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش جذب انرژی در هر دو نمونه‌ی 1W و 2W5، به دلیل رخ دادن پدیده تورق است (شکل 4-الف و د). به عبارت دیگر، وجود سیم‌های الیاف حافظه‌دار و همچنین افزایش پیش-کرنش سبب افزایش تقویت‌کنندگی هسته‌ی کامپوزیت و ایجاد تنش فشاری در محور عرضی می‌شود. از طرفی دیگر، کاهش دما، افزایش چسبندگی و سفتی در هر دو محور عرضی و طولی را به همراه دارد. بنابراین تلفیق این دو

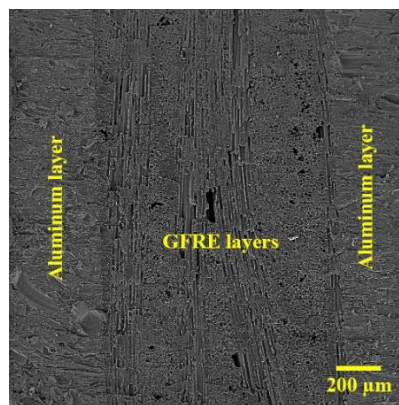


Fig. 2 The SEM image of aluminum /polymer composite layers

شکل 2 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک آلومینیوم/ لایه‌های کامپوزیت پلیمری

در این پژوهش، برای بررسی میزان جذب انرژی کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز هوشمند تحت شرایط دمایی مختلف، از آزمون ضربه چارپی استفاده شد. بدین منظور برای بررسی رفتار ضربه‌ای هر نمونه، از دستگاه 200 ژول (شرکت سنتام) مستقر در آزمایشگاه مرکز تحقیقات مواد و سازه‌های پیشرفته و هوشمند دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی استفاده شد. کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز با و بدون سیم الیاف حافظه‌دار، پس از قرارگیری در دماهای 45-، 25+ و 90+ درجه سانتی‌گراد (به مدت 5 دقیقه) تحت آزمون ضربه چارپی قرار گرفتند. جدول 2، نحوه‌ی کدگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

3- نتایج و بحث

شکل 3، میزان جذب انرژی انواع کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز را پس از آزمون ضربه چارپی در دمای 45- درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همانطور در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سیم‌های الیاف حافظه‌دار، میزان جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون سیم الیاف حافظه‌دار افزایش یافته است. خواص ذاتی سیم الیاف حافظه‌دار و افزایش سفتی کامپوزیت در اثر وجود سیم الیاف حافظه‌دار (با و بدون پیش‌کرنش)، مهمترین عوامل تاثیرگذار در جذب انرژی هستند [27]. همانطور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، میزان جذب انرژی در نمونه‌ی 2W (371 کیلوژول بر مترمربع) نسبت به نمونه‌ی 1W (359 کیلوژول بر مترمربع) بیشتر است. بنابراین، در مقایسه با نمونه‌های بدون سیم (0W)، مدول ذاتی سیم الیاف حافظه‌دار و همچنین افزایش سفتی اجزا در دمای مذکور عامل اصلی جذب انرژی در نمونه‌های کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز هوشمند است. در دماهای پایین، قفل مکانیکی و افزایش سفتی رزین اپوکسی مهم‌ترین عوامل افزایش چسبندگی و به تبع آن افزایش مقاومت به ضربه نمونه‌ها هستند.

همانطور که در جدول 1 مشخص است، سیم‌های الیاف حافظه‌دار استفاده شده در این مطالعه، در دمای محیط دارای فاز آستنیت هستند. اما با تغییر دما از 25+ تا 45- درجه سانتی‌گراد تغییر فاز از فاز آستنیت با مدول الاستیک بالا به فاز مارتنزیت با مدول الاستیک پایین‌تر ایجاد می‌شود که این دلیلی برای افزایش جذب انرژی در نمونه‌های دارای سیم الیاف حافظه‌دار نسبت به نمونه‌های بدون سیم الیاف حافظه‌دار است. مطابق با شکل 2، میزان جدول 2 کد نمونه‌ها

است که وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار به دلیل داشتن خاصیت سوپرالاستیکی و همچنین افزایش سفتی کامپوزیت ناشی از مدول ذاتی سیم، سبب افزایش جذب انرژی در نمونه‌های حاوی سیم نسبت به نمونه‌های بدون سیم شده است. با اعمال پیش‌کرنش در نمونه‌ی حاوی یک سیم نیز میزان جذب انرژی (344 کیلوژول بر مترمربع) نسبت به نمونه‌ی یک سیم بدون پیش‌کرنش (323 کیلوژول بر مترمربع) افزایش یافته است. از طرفی دیگر، با اعمال پیش‌کرنش در نمونه‌ی دو سیم میزان جذب انرژی تغییرات کمی را نشان می‌دهد. می‌توان بیان نمود، عامل جدایی بین سیم و کامپوزیت و یا تفاوت مکانیزم تخریب در میزان جذب انرژی بسیار تاثیرگذار است. چراکه در نمونه‌ی 2W تورق و در نمونه‌ی 2W5 اثر جدایی بین سیم و کامپوزیت عوامل اصلی جذب انرژی هستند.

از طرفی دیگر، با افزایش تعداد سیم آلیاژ حافظه‌دار، اثر تقویت‌کنندگی ناشی از خواص ذاتی سیم است که سبب افزایش جذب انرژی نمونه‌ی 2W (371 کیلوژول بر مترمربع) نسبت به نمونه‌ی 1W (359 کیلوژول بر مترمربع) و همچنین افزایش جذب انرژی در نمونه‌ی 1W نسبت به 0W (315 کیلوژول بر مترمربع) شده است. از طرفی دیگر، با اعمال پیش‌کرنش، تنش فشاری ایجاد شده در محور عرضی سبب مستحکم‌تر شدن محور عمود بر ضربه‌زننده می‌شود که این عامل سبب افزایش جذب انرژی در نمونه‌ی 1W5 (344 کیلوژول بر مترمربع) نسبت به نمونه‌ی 1W شده است. می‌توان بیان نمود، ترک ایجاد شده در راستای ضربه‌زننده مستلزم تنش کششی برای رشد است. بنابراین، تنش فشاری ایجاد شده ناشی از اعمال پیش‌کرنش مانع از رشد ترک خواهد شد.

به طور کلی، در نمونه‌هایی که انرژی ضربه صرف تغییرات داخلی آلیاژ حافظه‌دار و سبب کاهش نرخ انتقال انرژی در لایه‌های دورتر شود، انرژی کمتری توسط کامپوزیت جذب می‌شود. به عبارت دیگر، جذب پالس‌های اولیه‌ی ضربه‌زننده توسط آلیاژ حافظه‌دار، سبب می‌شود که موج‌های بعدی پالس با تناوب و انرژی کمتری انتقال یابند و تلف شوند که به تبع آن، میزان تخریب در لایه‌های کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز کاهش می‌یابد. بنابراین میزان تخریب زمانی افزایش می‌یابد که ضربه‌ی وارد شده از ضربه‌زننده، توسط کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز جذب شود و اثر تقویت‌کنندگی، فقط ناشی از خواص ذاتی کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز باشد.

شکل 6، میزان جذب انرژی برای نمونه‌های 0W، 1W، 1W5، 2W و همچنین 2W5 را پس از آزمون ضربه چارپی در دمای +90 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود، وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار سبب افزایش جذب انرژی نمونه‌های حاوی سیم آلیاژ حافظه‌دار نسبت به نمونه‌های بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار شده است. می‌توان بیان کرد با افزایش دما، کاهش استحکام و افزایش نرمی اجزا عامل اصلی جذب انرژی است. از طرفی میزان جذب انرژی در نمونه‌های 1W5 (314 کیلوژول بر مترمربع) و 2W5 (315 کیلوژول بر مترمربع)، تغییرات کمی را میزان جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون پیش‌کرنش نشان می‌دهند. می‌توان بیان نمود، با افزایش دما و عبور از دمای پایان آستنیت، تمایل به برگشت‌پذیری آلیاژ حافظه‌دار سبب فعال شدن خاصیت تغییر به حالت اولیه یا قبل از اعمال پیش‌کرنش می‌شود

عامل سبب می‌شود که ترک برای رشد در هسته‌ی کامپوزیت نیاز به انرژی بیشتری داشته باشد و این عامل سبب تغییر مود شکست از هسته‌ی کامپوزیت به فصل مشترک کامپوزیت و آلومینیوم خواهد شد.

شکل 5، میزان جذب انرژی برای نمونه‌های 0W، 1W، 1W5، 2W و 2W5 را پس از آزمون ضربه در دمای +25 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

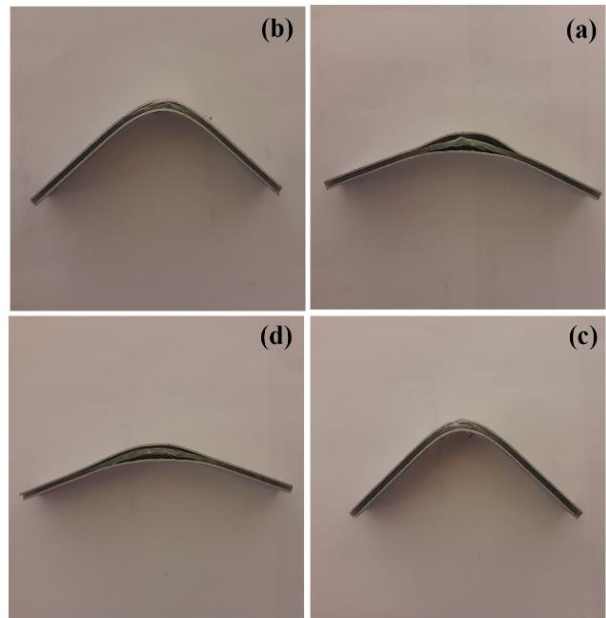


Fig. 4 The fracture mechanism in, a) 1W, b) 1W5, c) 2W, d) 2W5 samples after impact test at -45 °C

شکل 4 مکانیزم شکست در نمونه‌ی، الف) 1W، ب) 1W5، ج) 2W، د) 2W5 پس از آزمون ضربه در دمای -45 درجه سانتی‌گراد

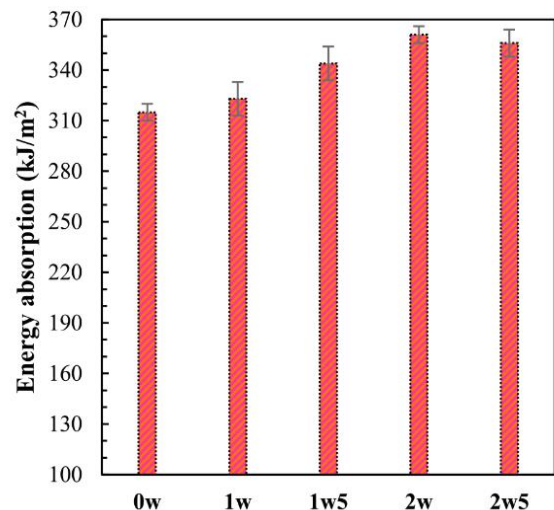


Fig. 5 Impact test results of FML samples at +25 °C.

شکل 5 نتایج آزمون ضربه کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز در دمای +25 درجه سانتی‌گراد.

همانطور که مشاهده می‌شود، میزان جذب انرژی در نمونه‌های دارای سیم آلیاژ حافظه‌دار نسبت به نمونه‌ی بدون سیم افزایش یافته است. بدیهی

همانطور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌ی آزمون شده در دمای پایین، مکانیزم تخریب ناشی از عامل تورق و شکست الیاف شیشه است (شکل 7- الف و ب)، اما با افزایش دما تا +90 درجه سانتی‌گراد تغییر شکل پلاستیک اجزا عامل اصلی تخریب و جذب انرژی در کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز است (شکل 7- ج و د).

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر دماهای مختلف، تعداد سیم و میزان پیش‌کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر رفتار ضربه‌ای سرعت پایین کامپوزیت‌های چندلایه الیاف/ فلز تحت آزمون ضربه چارپی پرداخته شد. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

1- در دمای -45 درجه سانتی‌گراد، دو عامل قفل مکانیکی چسبندگی بین سیم آلیاژ حافظه‌دار و کامپوزیت سبب افزایش 20 درصدی جذب انرژی در نمونه‌ی حاوی دو سیم آلیاژ حافظه‌دار با پیش‌کرنش نسبت به نمونه‌ی بدون سیم شد.

2- نتایج نشان داد که در دمای +25 درجه سانتی‌گراد وجود آلیاژ حافظه‌دار سبب افزایش سفتی کامپوزیت شده و در اثر وجود دو سیم آلیاژ حافظه‌دار بیشترین میزان جذب انرژی (361 کیلوژول بر مترمربع) مشاهده شد که این عامل ناشی از مدول ذاتی و خاصیت سوپرلاستیک سیم آلیاژ حافظه‌دار بود. از طرفی دیگر، جدایی بین سیم و کامپوزیت و همچنین تورق دو عامل تاثیرگذار در جذب انرژی نمونه‌های حاوی سیم آلیاژ حافظه‌دار (با و بدون پیش‌کرنش) در دمای +25 درجه سانتی‌گراد بودند.

3- در دمای +90 درجه سانتی‌گراد، میزان جذب انرژی در نمونه‌های حاوی 1 و 2 سیم آلیاژ حافظه‌دار نسبت به نمونه‌ی بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار به ترتیب 4 و 8 درصد افزایش یافته است که این عامل ناشی از افزایش انتقال نیرو از کامپوزیت به تقویت‌کننده بود. از طرفی دیگر، با افزایش پیش‌کرنش در نمونه‌ی حاوی 2 سیم آلیاژ حافظه‌دار میزان جذب انرژی نسبت به 2 سیم همان بدون پیش‌کرنش کاهش یافت، زیرا با افزایش دما، کاهش استحکام فصل مشترک بین سیم و کامپوزیت مهمترین عامل کاهش جذب انرژی هستند که در نمونه‌های 1 و 2 سیم آلیاژ حافظه‌دار میزان جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون پیش‌کرنش تغییرات چندانی را نشان ندادند.

5- مراجع

- [1] Kaw, A.K., "Mechanics of composite materials," CRC press, pp. 20-100, 2005.
- [2] Vlot, A. and Gunnink, J.W. eds., "Fiber metal laminates: an introduction," Springer Science & Business Medi, pp. 100-200, 2011.
- [3] Osfour, M., Rahmani, O. and Zamani, M.R., "An Experimental investigation on Nitinol shape memory alloy reinforced GLAREs against Charpy low velocity impact," In Persian, Vol. , No. 3 pp. 403-414, 2018.
- [4] Chai, G.B. and Manikandan, P., "Low velocity impact response of fibre-metal laminates-A review," Composite Structures, Vol. 107, pp. 363-381, 2014.
- [5] Eslami-Farsani, R. and Khazaie, M., "Effect of shape memory alloy wires on high-velocity impact response of basalt fiber metal laminates," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 37, No. 5, pp. 300-309, 2018.
- [6] Wei, Z.G., Sandstrom, R. and Miyazaki, S., "Shape memory materials and hybrid composites for smart systems: Part II

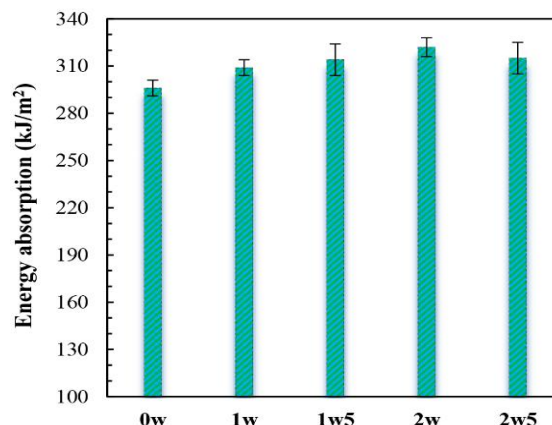


Fig. 6 Impact test results of FML samples at +90 °C.

شکل 6 نتایج آزمون ضربه کامپوزیت چندلایه الیاف/ فلز در دمای +90 درجه سانتی‌گراد.

[19-22]. بنابراین، در اثر افزایش دما و کاهش استحکام مرزی (بین کامپوزیت و سیم) و همچنین تمایل برگشت‌پذیری سیم آلیاژ حافظه‌دار، جدایی بین سیم و کامپوزیت ایجاد شده می‌شود که این عامل به شدت بر خواص مکانیکی و ایجاد ترک تنش تاثیرگذار است.

یکی از عوامل افزایش جذب انرژی، انتقال نیرو از کامپوزیت به تقویت‌کننده است. بنابراین، با رسیدن به نقطه‌ی نرمی کامپوزیت، مکانیزم انتقال بار افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش تقویت‌کننده نیروی بیشتری صرف انتقال بار می‌شود. بنابراین، میزان جذب انرژی در نمونه‌ی 2W (322 کیلوژول بر مترمربع) نسبت به نمونه‌ی 1W (309 کیلوژول بر مترمربع) و در نمونه‌ی 1W نسبت به نمونه‌ی 0W (296 کیلوژول بر مترمربع) بیشتر است که این عامل ناشی از افزایش سفتی کامپوزیت در اثر وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار است. شکل 7، نوع تخریب در نمونه‌های حاوی سیم آلیاژ حافظه‌دار در دماهای -45 و +90 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

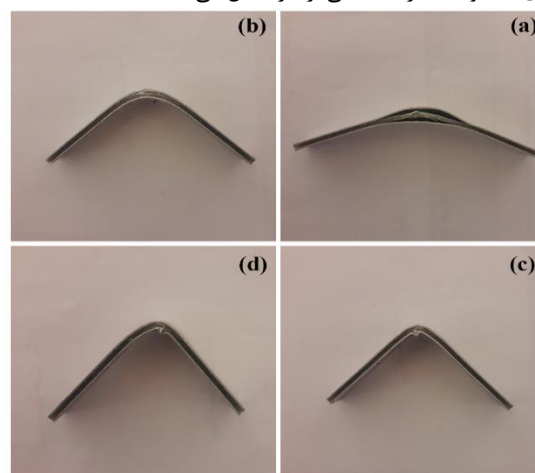


Fig. 7 The fracture mechanism in a) 1W, b) 2W (samples after impact test at -45 °C), e) 1W and f) 2W (samples after impact test at +90 °C) شکل 7 مکانیزم شکست در نمونه‌های الف) 1W، ب) 2W (پس از آزمون ضربه در دمای -45 درجه سانتی‌گراد)، ج) 1W و د) 2W (پس از آزمون ضربه در دمای +90 درجه سانتی‌گراد)

- of Kevlar/fiberglass composite laminates,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 37, No. 7-8, pp. 593-602, 2006.
- [26] Aghamohammadi, H., Abbandanak, S.N.H., Eslami-Farsani, R. and Siadati, S.H., “Effects of various aluminum surface treatments on the basalt fiber metal laminates interlaminar adhesion,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 84, pp. 184-193, 2018.
- [27] Cohades, A. and Michaud, V., “Shape memory alloys in fibre-reinforced polymer composites,” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 66-81, 2018.
- Shape-memory hybrid composites,” *Journal of Materials Science*, Vol. 33, No. 15, pp. 3763-3783, 1998.
- [7] Cortes, P., Cantwell, W.J., Kuang, K.S.C. and Quek, S.T., “The morphing properties of a smart fiber metal laminate,” *Polymer Composites*, Vol. 29, No. 11, pp. 1263-1268, 2008.
- [8] Cortes, P., Cantwell, W.J. and Kuang, K.S., “The fracture properties of a smart fiber metal laminate,” *Polymer composites*, Vol. 28, No. 4, pp. 534-544, 2007.
- [9] Khalili, S.M.R. and Saeedi, A., “Static and vibration properties of randomly oriented shape memory alloy short wires reinforced epoxy resin,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 35, No. 14, pp. 1104-1114, 2016.
- [10] Saeedi, A. and Shokrieh, M.M., “Effect of shape memory alloy wires on the enhancement of fracture behavior of epoxy polymer,” *Polymer Testing*, Vol. 64, pp. 221-228, 2017.
- [11] Taheri-Behrooz, F., Taheri, F. and Hosseinzadeh, R., “Characterization of a shape memory alloy hybrid composite plate subject to static loading,” *Materials & Design*, Vol. 32, No. 5, pp. 2923-2933, 2011.
- [12] Shimamoto, A., Ohkawara, H. and Nogata, F., “Enhancement of mechanical strength by shape memory effect in TiNi fiber-reinforced composites,” *Engineering fracture mechanics*, Vol. 71, No. 4-6, pp. 737-746, 2004.
- [13] Xu, L.D., Shi, M.F., Sun, X.Y., Wang, Z.Q. and Yang, B., “Mechanical Properties and Interlaminar Fracture Toughness of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Composites Embedded with Shape Memory Alloy Wires,” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 20, No. 3, pp. 1700646, (2018).
- [14] Ramezani Parsa, A., Eslami-Farsani, R., “Influence of pre strain shape memory alloy wire on impact properties of smart fibers metal composite,” *Modares Mechanical Engineering*, In Persian, Vol. 17, No. 4, pp. 322-330, 2017.
- [15] Mohaseb Karimlou, M., Eslami-Farsani, R., “Influence of pre-strain and position of shape memory alloy wire on buckling properties of smart fibers metal composite,” *Modares Mechanical Engineering*, In Persian, Vol. 17, No. 11, pp. 429-436, 2018.
- [16] Li, H., Liu, J., Wang, Z., Yu, Z., Liu, Y. and Sun, M., “The low velocity impact response of shape memory alloy hybrid polymer composites,” *Polymers*, Vol. 10, No. 9, pp. 1026, 2018.
- [17] Khalili, S.M.R. and Saeedi, A., “Experimental investigation on the debonding strength in shape memory alloy wire reinforced polymers,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 24, No. 6, pp. 490-495, 2017.
- [18] Lau, K.T., Chan, A.W.L., Shi, S.Q. and Zhou, L.M., “Debond induced by strain recovery of an embedded NiTi wire at a NiTi/epoxy interface: micro-scale observation,” *Materials & design*, Vol. 23, No. 3, pp. 265-270, 2002.
- [19] Taheri-Behrooz, F. and Kiani, A., “Simulation of thermo-mechanical behavior of glass-epoxy composites containing shape memory alloy under static loading,” *Journal of Science and Technology of Composites*, In Persian, Vol. 3, No. 2, pp. 111-122, 2016.
- [20] Poon, C.K., Lau, K.T. and Zhou, L.M., “Design of pull-out stresses for prestrained SMA wire/polymer hybrid composites,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 25-31, 2005.
- [21] Lei, H., Wang, Z., Zhou, B., Tong, L. and Wang, X., “Simulation and analysis of shape memory alloy fiber reinforced composite based on cohesive zone model,” *Materials & Design*, Vol. 40, No. 5, pp. 138-147, 2012.
- [22] Poon, C.K., Lau, K.T. and Zhou, L.M., “Design of pull-out stresses for prestrained SMA wire/polymer hybrid composites,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 25-31, 2005.
- [23] Kang, K.W. and Kim, J.K., “Effect of shape memory alloy on impact damage behavior and residual properties of glass/epoxy laminates under low temperature,” *Composite Structures*, Vol. 88, No. 3, pp. 455-460, 2009.
- [24] Pazhanivel, K., Bhaskar, G.B., Elayaperumal, A., Anandan, P. and Arunachalam, S., “Influence of SMA reinforcement on the impact resistance of GFRP composite laminates under different temperatures,” *Bulletin of Materials Science*, Vol. 39, No. 3, pp. 889-899, 2016.
- [25] Salehi-Khojin, A., Bashirzadeh, R., Mahinfalah, M. and Nakhaei-Jazar, R., “The role of temperature on impact properties