



## مطالعه تجربی تأثیر سیکل سرمایشی و اصلاح سطحی فلز بر خواص خمشی کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم - اپوکسی / الیاف بازالت

مهدی عبدالهی آذغان<sup>1</sup>، فردین اصغری آرپاتپه<sup>1</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>2\*</sup>

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

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

\* تهران، صندوق پستی 19991-43344، eslami@kntu.ac.ir

### کلیدواژگان

کامپوزیت لایه‌ای الیاف - فلز  
سیکل سرمایشی  
الیاف بازالت  
اصلاح سطحی  
خواص خمشی

### چکیده

در تحقیق حاضر، تأثیر سیکل سرمایشی بر خواص خمشی کامپوزیت لایه‌ای الیاف - فلز مورد مطالعه قرار گرفت. کامپوزیت لایه‌ای الیاف - فلز از دو لایه آلومینیوم 2024-T3 و یک لایه کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد. به منظور افزایش چسبندگی بین ورق آلومینیومی و کامپوزیت پلیمری، اصلاح سطحی آلومینیوم به روش‌های مکانیکی (سنباده‌زنی)، شیمیایی (حکاک) و الکتروشیمیایی (آندایز) انجام پذیرفت. هر سیکل سرمایشی در مدت زمان 4 دقیقه بین دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  انجام شد. خواص خمشی نمونه‌ها بعد از 15 و 30 سیکل سرمایشی مورد ارزیابی قرار گرفت و با خواص خمشی نمونه‌های بدون سیکل سرمایشی مقایسه شد. با افزایش تعداد سیکل سرمایشی، در نمونه‌های با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش آندایز، خواص خمشی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش یافت ولی برای نمونه‌های با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش حکاک، خواص خمشی رفتار کاهشی را نشان داد. در نمونه با اصلاح سطحی سناده‌زنی، مدول و انرژی شکست ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت، ولی استحکام خمشی سیر نزولی داشت. بررسی میکروسکوپی نیز نشان داد علت کاهش خواص خمشی برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاک شده و کاهش استحکام خمشی برای نمونه با آلومینیوم سناده‌زنی زده شده بعد از سیکل سرمایشی، تغییر مکانیزم شکست از شکست کامپوزیت به جدایش بین لایه‌های کامپوزیت است، در حالی که برای کامپوزیت‌های با آلومینیوم آندایز شده، این مکانیزم، شکست کامپوزیت بوده که با انجام سیکل سرمایشی تغییری نکرد.

## Experimental study of the effect of cryogenic cycling and metal surface treatment on flexural properties of aluminum- epoxy/basalt fibers laminate composite

Mehdi Abdollahi Azghan, Fardin Asghari Arpatappah, Reza Eslami-Farsani\*

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

\* P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Fiber-metal laminate  
Cryogenic cycling  
Basalt fibers  
Surface treatment  
Flexural properties

### Abstract

In this article, the effect of cryogenic cycling on flexural properties of fiber metal laminate (FML) has been investigated. This laminates were composed by two aluminum 2024-T3 plates and an epoxy matrix composite ply formed by four layers of basalt fibers by hand lay-up technique. Various surface treatments include mechanical (grinding), chemical (etching) and electrochemical (anodizing) were used for improving the adhesion between polymer composite layer and aluminum sheet. Each cryogenic cycle was carried out in 4 min and temperature range was between  $40^{\circ}\text{C}$  and  $25^{\circ}\text{C}$ . Flexural properties were evaluated on samples after 15 and 30 cycles and compared to non-exposed samples. While the cryogenic cycling decreased the flexural strength of the FML with etched aluminum, increasing at first, and then decreasing after a while was observed in the FML with anodized aluminum. About samples that the FML with grinded aluminum, both of flexural modulus and fracture energy increased at first and then decreased; while the flexural strength decreased continuously. Evaluation of optical microscope showed that the reason of decreasing in flexural properties about samples with etched aluminum and also decreasing in flexural strength for samples with grinded aluminum after cycles is changing in mechanism of failure from failure of composite to separation between layers of FML; while about FMLs with anodized aluminum, the only observed mechanism was failure of composite and it has not changed.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:  
M. Abdollahi Azghan, F. Asghari Arpatappah, R. Eslami-Farsani, Experimental study of the effect of cryogenic cycling and metal surface treatment on flexural properties of aluminum- epoxy/basalt fibers laminate composite, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-24, 2017 (in Persian)

## 1- مقدمه

کامپوزیت‌های هیبریدی الیاف- فلز<sup>1</sup> (FML) از ترکیب الیاف‌های فلزی و کامپوزیت‌ها ساخته می‌شوند. انواع FML در ابتدا به منظور ساخت مواد با وزن پایین برای جایگزینی الیاف‌های آلومینیومی در سازه‌های فضایی توسعه یافتند. مقاومت به ضربه بالا، شرایط تعمیر آسان فلزات و مقاومت در برابر خستگی بالا، چگالی پایین و سفتی زیاد کامپوزیت‌ها باعث شده است تا با ترکیب لایه‌های فلزی و کامپوزیتی موادی با خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب ایجاد شوند. در ساخت کامپوزیت‌های الیاف- فلز، الیاف‌های آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و فولاد به عنوان لایه فلزی در FML مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلومینیوم‌های الیافی به دلیل خواص مکانیکی خوب از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام خوب و ارزان بودن، استفاده بیشتری نسبت به الیاف‌های تیتانیوم، منیزیم و فولاد دارند. آلومینیوم‌های 2024 و 7075 از جمله الیاف‌های آلومینیوم پر مصرف در FML هستند [۲،۱].

زمانی که کامپوزیت‌ها در محیط مرطوب قرار می‌گیرند، رطوبت به داخل زمینه نفوذ کرده و باعث تورق در کامپوزیت می‌شود. در کامپوزیت‌های الیاف- فلز به دلیل وجود لایه‌های فلزی در اطراف کامپوزیت میزان جذب رطوبت نسبت به کامپوزیت‌های پلیمری کمتر می‌باشد. بوتلوو و همکاران میزان جذب رطوبت در نمونه‌های FML و کامپوزیت پلیمری با زمینه اپوکسی حاوی الیاف کربن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در یک زمان مشخص، میزان جذب رطوبت در کامپوزیت پلیمری هفت برابر بیشتر از کامپوزیت الیاف- فلز بود [3].

الیاف بازالت از نظر استحکام کششی، بین الیاف شیشه تجاری مرسوم (نوع E) و الیاف شیشه با استحکام بالا (نوع S) قرار دارد و از نظر مدول کششی کمی بیشتر از الیاف شیشه نوع S می‌باشد. با توجه به این که مقاومت حرارتی الیاف بازالت سه برابر بیشتر از پنبه نسوز است، می‌توان در تمام کاربردهای عایقی، الیاف بازالت را جایگزین پنبه نسوز کرد. با توجه به برتری اقتصادی الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه نوع S، این الیاف می‌تواند جایگزین الیاف شیشه در کامپوزیت‌های الیافی باشد. ضریب انتقال حرارتی الیاف بازالت در حدود 0.031-0.038 W/m.K می‌باشد، در حالی که برای اپوکسی، ضریب انتقال حرارت در حدود 0.17 W/m.k است. بنابراین با افزودن الیاف

بازالت به اپوکسی، ضریب انتقال حرارت کامپوزیت حاوی الیاف بازالت کاهش می‌یابد [۴،۵].

در کامپوزیت‌های FML، چسبندگی بین اجزای کامپوزیت تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی دارد. هر چه میزان چسبندگی بین لایه کامپوزیتی و ورق فلزی بیشتر باشد، میزان خواص مکانیکی افزایش پیدا می‌کند [6]. استفاده از ترموپلاست‌ها مانند پلی اتر ایمید<sup>2</sup> به عنوان چسب بین کامپوزیت و فلز چسبندگی خوبی را ارائه می‌کند، ولی باعث کاهش چقرمگی و استحکام خمشی کامپوزیت FML می‌شود. عملیات مکانیکی به منظور حذف لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم انجام می‌گیرد و باعث ایجاد یک سطح زبر با اندازه تخلخل‌های ماکرو می‌شود. عملیات شیمیایی به منظور چربی‌زدایی و حذف لایه اکسیدی ضعیفی که روی سطح آلومینیوم قرار دارد، انجام می‌پذیرد و عملیات الکتروشیمیایی، یک لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌کند که شامل میزان زیادی از تخلخل در مقیاس میکرو است. چربی‌زدایی، حذف لایه اکسیدی و ایجاد سطح زبر، افزایش قفل مکانیکی و انتقال بهتر بار را به همراه دارد [۷،۸].

در مواد کامپوزیتی، سیکل حرارتی می‌تواند با دو عامل رقابتی بر روی خواص مکانیکی تأثیر بگذارد: 1) افزایش اتصالات عرضی که در اثر فرایند پخت ثانویه انجام می‌گیرد. 2) ایجاد تنش پسماند فشاری و جدایش بین اجزای کامپوزیت که به علت تفاوت در ضریب انبساط/ انقباض حرارتی رخ می‌دهد [9]. فرایند پخت ثانویه در دماهای بالا اتفاق می‌افتد که با افزایش چگالی اتصالات عرضی باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود [10]. تنش پسماند فشاری در اثر تغییر دمای ناگهانی ایجاد می‌گردد که منجر بهبود چسبندگی بین اجزای کامپوزیت می‌شود [11].

سورندرا و همکاران [12] خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف شیشه را در دمای محیط و نیتروژن مایع (-196°C) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با انجام آزمایش در دمای پایین به علت افزایش چسبندگی بین رزین و الیاف، خواص مکانیکی افزایش پیدا می‌کند.

مهدوی [9] تأثیر سیکل حرارتی بر روی استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت‌های ترموست را مورد مطالعه قرار داد. نتایج آزمایش نشان داد با افزایش تعداد سیکل حرارتی بین دمای 196°C و 180°C، استحکام برشی لایه‌های ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش پیدا می‌کند.

کاستا و همکاران [13]، تأثیر سیکل حرارتی بر روی خواص

<sup>2</sup> Polyetherimide<sup>1</sup> Fiber Metal Laminate

## 2- بخش تجربی

### 2-1- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی اپون<sup>1</sup> 828 همراه با هاردنر پلی آمینی<sup>2</sup> تتا<sup>3</sup> به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. طبق استاندارد ASTM D445 در دمای 25 °C، گرانروی این رزین 110-150 پواز و چگالی آن 1/16 g/ml می‌باشد [16]. پارچه الیاف بازالت با نوع بافت اطلس (BAS 350.1270.A) از شرکت بازالتکس<sup>4</sup> کشور بلژیک به عنوان تقویت‌کننده تهیه گردید که چگالی سطحی آن 400 g/m<sup>2</sup> و ضخامت آن 0/19 mm می‌باشد. آلومینیوم 2024-T3 به عنوان لایه فلزی با ضخامت 0/5 mm نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

### 2-2- اصلاح سطحی آلومینیوم 2024-T3

اصلاح سطحی آلومینیوم به منظور افزایش میزان تخلخل سطح آلومینیوم انجام شده است. افزایش تخلخل باعث افزایش چسبندگی بین ورق آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری می‌شود. در این مقاله از روش‌های اصلاح مکانیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی استفاده شده است.

### 2-2-1- اصلاح مکانیکی

ابتدا سطح ورق آلومینیومی با استون روغن‌زدایی شد. سپس اصلاح مکانیکی در جهت طولی با سنباده 100 و در جهت عرضی با سنباده 240 انجام گرفت. بعد از این مرحله، به منظور حذف براده‌های سطح آلومینیوم، از پارچه‌های بدون پرز استفاده شد.

### 2-2-2- اصلاح شیمیایی

در روش اصلاح شیمیایی (حکاکی)، بعد از پاک کردن سطح ورق‌های آلومینیومی توسط استون، این ورق‌ها در محلول 5 درصد وزنی هیدروکسید سدیم در دمای 50 °C به مدت 2 دقیقه قرار گرفتند، سپس از استون به منظور حذف لکه‌های سیاه رنگ سطح آلومینیوم استفاده شد.

### 2-2-3- اصلاح الکتروشیمیایی سطح آلومینیوم

در روش اصلاح الکتروشیمیایی (آندایز کردن)، ابتدا ورق‌های آلومینیومی به منظور حذف لایه اکسیدی ضعیف و خراش‌های

مکانیکی کامپوزیت الیاف- فلز حاوی الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی به منظور چسبندگی بهتر بین کامپوزیت پلیمری و فلز از ماده ترموپلاستیک استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که سیکل حرارتی تأثیر زیادی روی ریزساختار و خواص مکانیکی ندارد.

اسلامی فارسانی و همکاران [14]، تأثیر سیکل حرارتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف کربن و الیاف بازالت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش سیکل حرارتی، سختی سطح و مقاومت به ضربه کامپوزیت کاهش می‌یابد. البته این کاهش سختی سطح برای کامپوزیتی هیبریدی حاوی الیاف بازالت و کربن نسبت به کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن یا الیاف بازالت کمتر بوده و پایداری حرارتی بیشتری نسبت به آن‌ها نشان می‌دهد. کاهش در جذب انرژی در سیکل حرارتی در کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی الیاف کربن و بازالت نسبت به کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن یا بازالت بیشتر بود.

خلیلی و همکاران [15] تغییر رفتار کششی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف بازالت را تحت سیکل‌های حرارتی مختلف مطالعه کردند. نتایج نشان داد با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی، استحکام کششی نهایی و مدول کششی در هر دو کامپوزیت حاوی الیاف بازالت و کربن کاهش می‌یابد، ولی میزان کاهش این خواص در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن بیشتر است.

با توجه به تحقیقات انجام شده قبلی (که به آن‌ها اشاره شد)، رویکرد اصلی در تحقیق حاضر، بررسی تأثیر تعداد سیکل سرمایشی بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 و کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت می‌باشد که لایه‌های فلزی آن به روش‌های مکانیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی اصلاح سطحی شده است. تاکنون تحقیقات بسیار کمی در رابطه با تأثیر اصلاح سطحی فلز و سیکل سرمایش در حوزه کامپوزیت‌های الیاف- فلز انجام شده است. مزیت تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین تعیین تأثیر اصلاح سطحی قبل و بعد از سیکل‌های سرمایشی مختلف بر رفتار خمشی کامپوزیت الیاف- فلز می‌باشد که این امر نقش تعیین‌کننده‌ای را در استفاده از این کامپوزیت‌ها در کاربردهای صنعتی ایفا می‌کند. علاوه بر این، شناسایی مکانیزم‌های تأثیرگذار بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های FML بعد از اصلاح سطحی و سیکل سرمایش یکی دیگر از مزیت‌های تحقیق حاضر می‌باشد.

<sup>1</sup> Epon

<sup>2</sup> Polyamine Hardener

<sup>3</sup> TETA (EPIKURE 3234)

<sup>4</sup> Basaltex

رسانده شد. به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری دقیق دمای نمونه‌ها از ترموکوپل مدل USB-4718 شرکت Advantech استفاده شد. در تحقیق حاضر، تعداد 15 و 30 سیکل سرمایشی روی نمونه‌ها انجام شد. برای انجام سیکل سرمایشی از آن به منظور تسریع در نرخ گرمایش و محفظه حاوی نیتروژن مایع استفاده شد.

## 2-5- بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها

به منظور بررسی فصل مشترک و سطوح شکست کامپوزیت‌های الیاف- فلز و نوع مکانیزم شکست از میکروسکوپ نوری میجی تکنو<sup>1</sup> مدل IM 7200 با بزرگنمایی 100 استفاده شد. همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> (SEM) مدل وگا تسکن<sup>3</sup> به منظور مطالعه سطح آلومینیوم‌های اصلاح سطحی شده و مشخص کردن علت تفاوت در نوع مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت با آلومینیوم سنباده زده شده، حکاکی شده و آندایز شده، بکار گرفته شد.

## 2-6- آزمون مکانیکی

به منظور انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای، دستگاه خمش هانسفیلد<sup>4</sup> مدل H25KS بکار رفت. در این آزمون خمش، طبق استاندارد ASTM D790 [17]، نمونه‌ها با ابعاد  $150 \times 25 \text{ mm}^2$  تحت بارگذاری با نرخ کرنش  $3 \text{ mm/min}$  قرار گرفتند و نمودار نیروی خمشی بر حسب جابجایی محوری توسط دستگاه رسم شد که از آن برای تحلیل خواص خمشی استفاده شد. حداقل تکرار انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای برای هر گروه از نمونه‌ها، 3 بار بود که داده‌های گزارش شده میانگین آزمون‌های انجام شده است.

## 3- نتایج و بحث

### 3-1- بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌ها

#### 3-1-1- استحکام خمشی

شکل 2، تغییرات استحکام خمشی را براساس تغییر نوع اصلاح سطحی و افزایش تعداد سیکل سرمایشی نشان می‌دهد. در مقایسه نمونه‌های بدون سیکل سرمایشی، کامپوزیت‌هایی که سطح آن‌ها به روش آندایز اصلاح سطحی شده‌اند نسبت به روش‌های دیگر استحکام خمشی بیشتری از خود نشان داده‌اند.

احتمالی روی ورق‌ها در محلول  $1/5$  درصد وزنی هیدروکسید سدیم در دمای  $60^\circ\text{C}$  به مدت 30 ثانیه قرار گرفتند. سپس بلافاصله به منظور دی‌اکساید کردن سطح، نمونه به مدت 5 دقیقه در محلول آبی حاوی چند قطره اسید نیتریک 66 درصد وزنی غوطه‌ور شد. بعد از آماده سازی ورق آلومینیوم، نمونه در محلول 5 درصد وزنی در دمای  $40^\circ\text{C}$  با ولتاژ ثابت  $31 \text{ V}$  به مدت 40 دقیقه تحت فرایند آندایز قرار گرفت.

## 2-3- ساخت نمونه‌ها

به منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیت الیاف- فلز، ابتدا رزین و هاردنر به توصیه شرکت سازنده با نسبت وزنی 100 به 10 با یکدیگر مخلوط شده و به مدت 5 دقیقه هم زده شدند، سپس مخلوط بدست آمده به عنوان زمینه به روش لایه گذاری دستی مورد استفاده قرار گرفت. در ساخت نمونه‌ها، 4 لایه پارچه الیاف بازالت با نسبت حجمی رزین به الیاف (35 به 65) به کار گرفته شد و سپس کامپوزیت پلیمری بدست آمده با ضخامت میانگین  $0/8 \text{ mm}$  بین دو لایه آلومینیوم 2024-T3 که ضخامت هر کدام از لایه‌ها  $0/5 \text{ mm}$  می‌باشد، قرار گرفت. به منظور پخت نهایی نمونه‌ها، کامپوزیت‌های بدست آمده با ابعاد  $25 \times 2/5 \times 1/8 \text{ mm}^3$  در قالب طراحی شده برای ساخت کامپوزیت الیاف- فلز در دمای  $25^\circ\text{C}$  به مدت 18 ساعت قرار گرفتند. شکل 1 شماتیکی از قالب طراحی شده برای ساخت نمونه‌های آزمون خمش کامپوزیت الیاف- فلز می‌باشد. به منظور پخت نهایی و دستیابی به حداکثر میزان استحکام در نمونه‌ها، مرحله سیکل سرمایشی حدود یک ماه بعد از مرحله ساخت انجام گرفت.

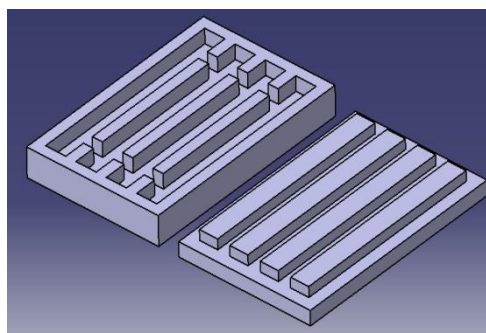


Fig. 1 Schematic of designed mold for making of FML.

شکل 1 شماتیکی قالب طراحی شده برای ساخت کامپوزیت الیاف- فلز

## 2-4- سیکل سرمایشی نمونه‌ها

در انجام سیکل سرمایشی، ابتدا نمونه‌ها از دمای اتاق با نرخ سرمایش  $0/6^\circ\text{C/s}$  به دمای  $-45^\circ\text{C}$  رسیدند و سپس بلافاصله دما از دمای  $-45^\circ\text{C}$  با نرخ گرمایش  $0/6^\circ\text{C/s}$  به دمای  $25^\circ\text{C}$

<sup>1</sup> Meiji Techno

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>3</sup> VEGA\TESCAN-LMU

<sup>4</sup> Hounsfield

می‌دهد. عامل اول آن‌که، تفاوت در ضریب انبساط حرارتی اجزای کامپوزیت می‌تواند باعث ایجاد کرنش پسماند شده و با افزایش سیکل سرمایشی سبب جدایش بین اجزای کامپوزیت شود. این جدایش اجزای کامپوزیت می‌تواند کاهش خواص خمشی را به دنبال داشته باشد [18]. عامل دوم، زمانی است که سیکل سرمایش به دمای منفی می‌رسد. به دلیل تفاوت در انقباض اجزای کامپوزیت علاوه بر افزایش مقاومت در برابر جدایش، افزایش قفل مکانیکی بین الیاف با پلیمر و کامپوزیت پلیمری با آلومینیوم روی می‌دهد که این موضوع سبب افزایش خواص خمشی کامپوزیت می‌شود. در تعداد سیکل‌های پایین، عامل قفل مکانیکی بر اثر تضعیف شوک حرارتی غلبه می‌کند و باعث افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود؛ ولی با افزایش تعداد سیکل سرمایشی، اثر تضعیف شوک حرارتی بر قفل مکانیکی غلبه کرده و باعث جدایش اجزای کامپوزیت می‌شود [۱۹،۲۰].

در نمونه‌های با آلومینیوم سنباده زده شده با این‌که قفل مکانیکی بین پلیمر و الیاف، خواص مدولی و جذب انرژی شکست را افزایش می‌دهد، ولی به علت کم بودن میزان تخلخل در سطح آلومینیوم سنباده زده شده، میزان استحکام خمشی بعد از تعداد 15 سیکل سرمایشی کاهش می‌یابد. در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده نیز تغییر در مکانیزم شکست بعد از 15 سیکل حرارتی باعث کاهش استحکام خمشی می‌شود.

### 3-1-2- مدول خمشی

همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، برای نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده، مدول خمشی، بعد از 15 سیکل سرمایش از 55/1 GPa به 56/3 GPa افزایش پیدا می‌کند و سپس با رسیدن سیکل سرمایش به تعداد 30 سیکل به 50.3 GPa کاهش می‌یابد. در نمونه‌های با آلومینیوم سنباده زده شده مدول خمشی، در 15 سیکل حرارتی 50/8 GPa می‌باشد که نسبت به نمونه بدون سیکل (50/5 GPa) افزایش کمی نشان می‌دهد و بعد از 30 سیکل سرمایش به 46/9 GPa کاهش می‌یابد. ولی برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده، مدول خمشی با اعمال سیکل سرمایشی کاملاً سیر نزولی داشته و بعد از 30 سیکل سرمایش نسبت به نمونه بدون سیکل در حدود 20 درصد کاهش می‌یابد.

مدول خمشی کامپوزیت‌های با آلومینیوم آندایز شده در تمامی سیکل‌های حرارتی نسبت به دو نوع نمونه دیگر (سنباده زده و حکاکی شده)، بیشتر است.

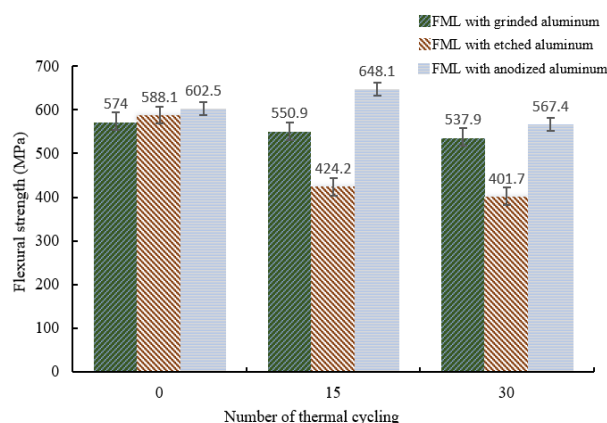


Fig. 2 The effect of cryogenic cycling on the flexural strength of FML.

شکل 2 تأثیر سیکل سرمایشی بر استحکام خمشی کامپوزیت الیاف - فلز

در نمونه‌های بدون سیکل سرمایشی، استحکام خمشی کامپوزیت با آلومینیوم آندایز شده در حدود 602/5 MPa است که نسبت به کامپوزیت با آلومینیوم حکاکی شده (588/1 MPa) 2/5 درصد و نسبت به کامپوزیت با آلومینیوم سنباده زده شده (574 MPa)، 5 درصد بیشتر می‌باشد. علت این تفاوت در میزان تخلخل ایجاد شده روی ورق آلومینیومی بعد از انجام اصلاح سطحی می‌باشد.

در کامپوزیت‌های با آلومینیوم سنباده زده شده و همچنین حکاکی شده، با اعمال سیکل سرمایشی و افزایش تعداد آن، استحکام خمشی کاهش می‌یابد. بعد از 15 و 30 سیکل سرمایش، استحکام خمشی در کامپوزیت‌های با آلومینیوم سنباده زده شده از 574 MPa (برای حالت بدون سیکل سرمایشی)، به ترتیب به 550/9 MPa و 537/9 MPa و در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده، از 588/1 MPa، به ترتیب به 401/7 MPa و 424/2 MPa کاهش پیدا می‌کند. در حالی‌که برای کامپوزیت با آلومینیوم آندایز شده، با اعمال تعداد 15 سیکل سرمایش، استحکام خمشی ابتدا از 602/5 MPa به 648/1 MPa افزایش یافته و سپس با افزایش تعداد سیکل سرمایش به 30 سیکل، در حدود 35 MPa نسبت به نمونه بدون سیکل کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش استحکام خمشی بعد از 30 سیکل سرمایشی نسبت به حالت بدون سیکل مربوط به نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده می‌باشد که در حدود 46/5 درصد کاهش پیدا کرده است و کمترین کاهش مربوط به نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده با 7/5 درصد کاهش می‌باشد.

با توجه به پایین بودن دمای سیکل سرمایشی احتمال پخت ثانویه در پلیمر و تغییر خواص مکانیکی در آن وجود ندارد. در حالت کلی سیکل سرمایشی در دماهای پایین به وسیله دو عامل، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های FML را تحت تأثیر قرار

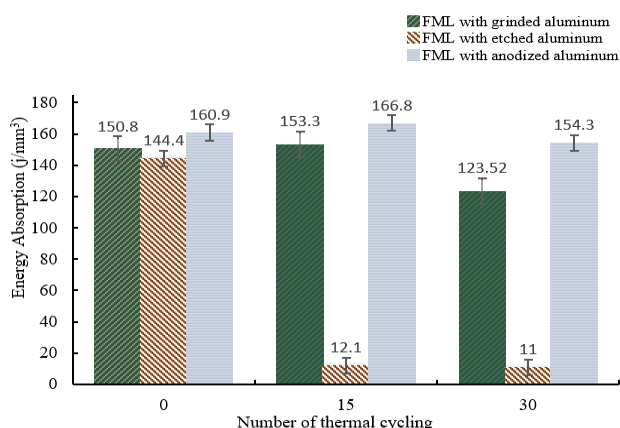


Fig. 4 The effect of cryogenic cycling on the energy absorption behavior of FML

شکل 4 تأثیر سیکل سرمایشی بر رفتار جذب انرژی کامپوزیت الیاف - فلز

در حالی که برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده، نمودار جذب انرژی نزولی بوده و میزان جذب انرژی بعد از تعداد 30 سیکل سرمایش برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده با کاهش 93 درصدی از  $144/4 \text{ J/mm}^3$  به  $11 \text{ J/mm}^3$  می‌رسد.

دلیل کاهش سریع جذب انرژی برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده تغییر مکانیزم شکست و جدایش سریع لایه‌های کامپوزیت از هم می‌باشد. این تغییر مکانیزم برای نمونه‌های با آلومینیوم سنباده زده شده نیز در 30 سیکل سرمایشی قابل رویت می‌باشد. در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده، به علت ضعیف شدن چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم، جدایش بین اجزای کامپوزیت بر قفل مکانیکی غلبه کرده و خواص خمشی را کاهش می‌دهد.

### 3-2- بررسی فصل مشترک کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم

به منظور بررسی تفاوت چسبندگی کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم در اصلاح سطحی‌های مختلف آلومینیوم از میکروسکوپ نوری استفاده شد. شکل 5 تفاوت چسبندگی کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم با اصلاح سطحی مختلف را بعد از 30 سیکل سرمایش نشان می‌دهد. میزان قفل‌شوندگی مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و لایه آلومینیومی در نمونه با آلومینیوم آندایز شده (شکل 5-ج) بیشتر از نمونه با آلومینیوم حکاکی شده (شکل 5-ب) و سنباده زده شده (شکل 5-الف) می‌باشد. هر چه میزان چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم بیشتر باشد، قفل مکانیکی بین لایه‌های کامپوزیت‌های FML بیشتر بوده و خواص مکانیکی افزایش پیدا می‌کند. به همین علت با توجه به نمودار شکل 2، میزان استحکام خمشی در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده بیشتر از نمونه‌های دیگر است.

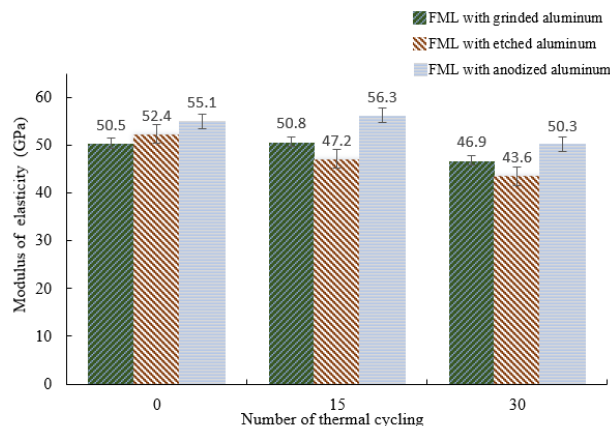


Fig. 3 The effect of cryogenic cycling on the modulus strength of FML

شکل 3 تأثیر سیکل سرمایشی بر مدول خمشی کامپوزیت الیاف - فلز

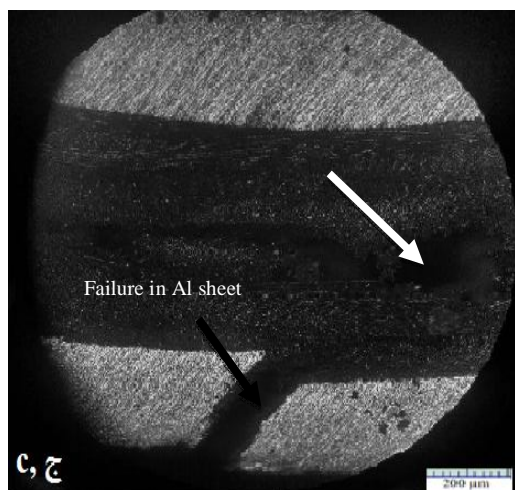
شیب تغییرات مدول خمشی برای نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده و سنباده زده شده در بازه 15 تا 30 سیکل سرمایشی نسبت به بازه بدون سیکل سرمایشی تا 15 سیکل حرارتی بیشتر می‌باشد. در حالت کلی نیز مدول خمشی با افزایش سیکل سرمایشی حساسیت کمتری نسبت به استحکام خمشی از خود نشان می‌دهد و با نرخ کمتری تغییر می‌کند. همان‌طور که اشاره شد، در تعداد 15 سیکل حرارتی تفاوت در ضریب انقباض حرارتی باعث افزایش قفل مکانیکی شده و منجر به افزایش مدول خمشی در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده و سنباده زده شده می‌شود، ولی در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده به علت غلبه عامل تضعیف سیکل حرارتی بر افزایش قفل مکانیکی، مدول خمشی کاهش می‌یابد.

### 3-1-3- انرژی شکست

میزان انرژی شکست را می‌توان با محاسبه سطح زیر منحنی تنش - کرنش بدست آورد. با توجه به شکل 4، در تمامی سیکل‌های حرارتی، میزان جذب انرژی نمونه با آلومینیوم آندایز شده نسبت به نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده و سنباده زده شده بیشتر است. جذب انرژی نیز رفتاری مانند مدول خمشی از خود نشان می‌دهد و برای نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده بعد از تعداد 15 سیکل سرمایش انرژی شکست از  $160/9 \text{ J/mm}^3$  به  $166/8 \text{ J/mm}^3$  افزایش می‌یابد. سپس با افزایش تعداد سیکل سرمایش به 30 سیکل در حدود  $6/6 \text{ J/mm}^3$  نسبت به نمونه بدون سیکل کاهش نشان می‌دهد. انرژی شکست نمونه با آلومینیوم سنباده زده شده ابتدا با اعمال 15 سیکل سرمایش از  $150/8 \text{ J/mm}^3$  به  $153/3 \text{ J/mm}^3$  افزایش یافته و سپس در 30 سیکل سرمایش به  $123/5 \text{ J/mm}^3$  کاهش می‌یابد.

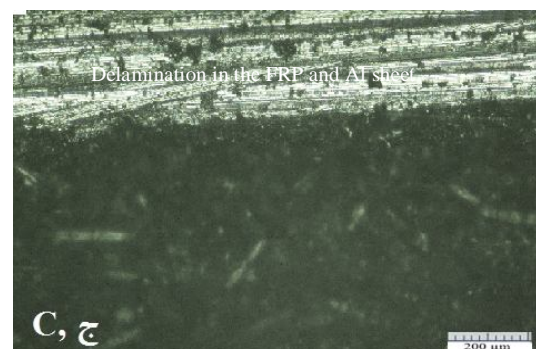
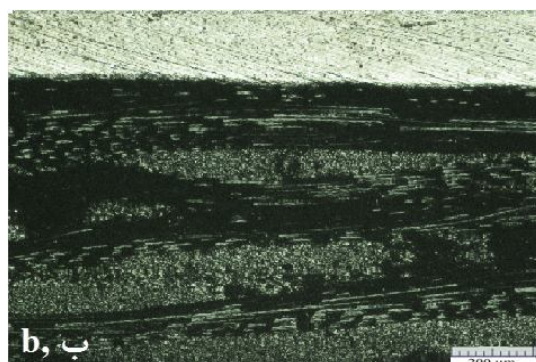


شکست، به جدایش بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم تغییر می کند (فلش در شکل های 6- الف و 6- ب).



**Fig. 6** Optical microscopy images of cross-section of FML cryogenic cycled (30 cryogenic cycling) after flexural test, a) FML with grinded aluminium b) FML with etched aluminium c) FML with anodizing aluminium

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع کامپوزیت الیاف- فلز سیکل داده شده (30 سیکل سرمایشی) بعد از آزمون خمش، الف) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم سنباده زده شده، ب) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم حکاکی شده، ج) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم آندایز شده



**Fig. 5** Optical microscopy images of cross-section of FML (30 cryogenic cycling) before flexural test, a) FML with grinded aluminum, b) FML with etched aluminum, c) FML with anodized aluminum

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع کامپوزیت الیاف- فلز سیکل داده شده (30 سیکل سرمایشی) قبل از آزمون خمش، الف) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم سنباده زده شده، ب) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم حکاکی شده، ج) کامپوزیت الیاف- فلز با آلومینیوم آندایز شده

### 3-3- بررسی سطوح شکست

شکل 6 تصاویر میکروسکوپی از سطح جانبی نمونه های با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش های مختلف را بعد از آزمون خمش سه نقطه ای با تعداد 30 سیکل سرمایشی نشان می دهد. در نمونه های بدون سیکل در هر سه نوع اصلاح سطحی آلومینیوم، ابتدا آلومینیوم شکسته شده، سپس لایه های کامپوزیت پلیمری شروع به شکست می کنند ولی با افزایش تعداد سیکل سرمایشی با توجه به شکل های 6- الف و 6- ب که به ترتیب مکانیزم شکست در نمونه های با آلومینیوم سنباده زده شده و حکاکی شده را نشان می دهد، در هر دو نمونه، مکانیزم

میزان تخلخل کمتری نسبت به دو نمونه دیگر دارد.

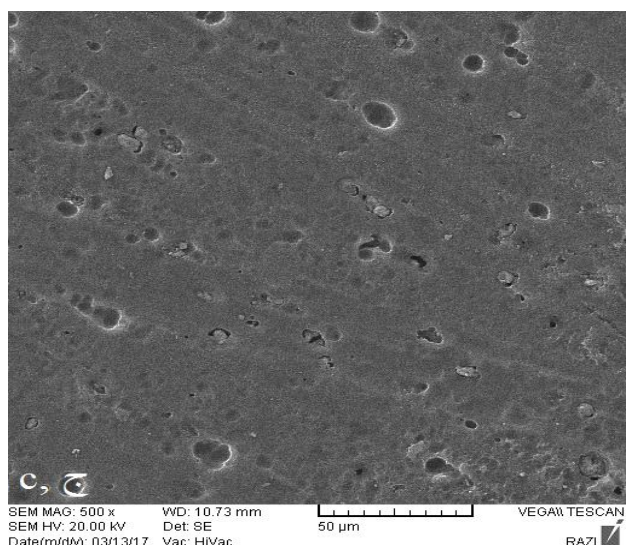
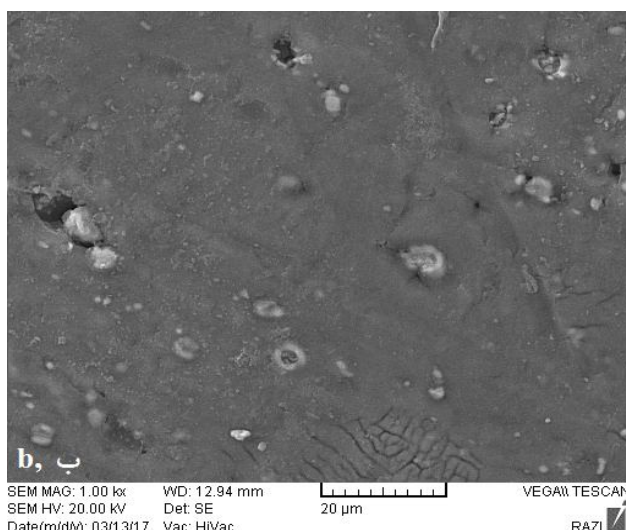
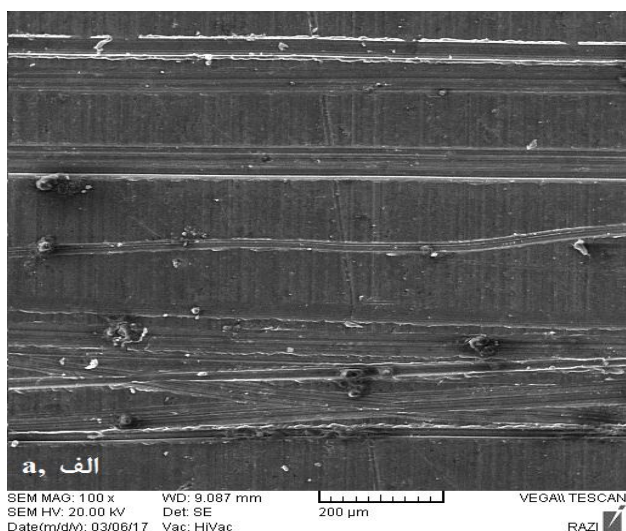


Fig. 7 SEM images of a) grinded aluminium surface, b) etched aluminium surface, c) anodized aluminium surface.

شکل 7 تصاویر میکروسکوپی از الف) سطح آلومینیوم سنباده زده شده، ب) سطح آلومینیوم حکاکی شده، ج) سطح آلومینیوم آندایز شده.

بنابراین با اعمال سیکل سرمایشی به علت تفاوت در ضریب انبساط حرارتی بین اجزای کامپوزیت، قدرت چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم کمتر شده و باعث ضعیف شدن قفل مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم می‌شود. در نتیجه با افزایش تعداد سیکل سرمایشی میزان تحمل در برابر بار اعمالی کمتر شده و استحکام خمشی کامپوزیت کاهش پیدا می‌کند؛ علاوه بر این کامپوزیت دچار شکست زودرس نیز می‌شود. با توجه به شکل 4، کاهش سریع جذب انرژی در نمونه با تعداد 15 سیکل سرمایشی نسبت به نمونه بدون سیکل در کامپوزیت با آلومینیوم حکاکی شده و در نمونه با تعداد 30 سیکل سرمایشی نسبت به نمونه با تعداد 15 سیکل سرمایشی در کامپوزیت با آلومینیوم سنباده زده شده به دلیل جدایش زودرس و عدم توانایی نمونه برای تحمل کرنش زیاد می‌باشد. البته جدایش در نمونه‌های با آلومینیوم سنباده زده شده نسبت به نمونه با آلومینیوم حکاکی شده کمتر است. با توجه به شکل 6-ج، مکانیزم شکست در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده با تعداد 30 سیکل سرمایشی نسبت به نمونه‌های بدون سیکل سرمایشی تغییر نکرده است و ابتدا شکست از آلومینیوم شروع شده (فلش سیاه در شکل 6-ج) و سپس لایه‌های کامپوزیت پلیمری شروع به جدایش می‌کنند (فلش سفید شکل 6-ج). بنابراین قفل مکانیکی خوب بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم در کامپوزیت با آلومینیوم آندایز شده از جدایش بین اجزای کامپوزیت جلوگیری کرده و باعث پایداری استحکام خمشی و انرژی شکست می‌شود.

#### 3-4- بررسی سطح آلومینیوم‌های عملیات سطحی شده

به منظور بررسی علت تغییر مکانیزم در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده و سنباده زده شده، تصاویر میکروسکوپ SEM از سطح آلومینیوم‌های اصلاح سطحی شده، گرفته شد (شکل 7). انجام عملیات سطحی باعث افزایش میزان تخلخل در سطح آلومینیوم می‌شود. منظور از تخلخل، تمام منافذی است که پلیمر می‌تواند نفوذ کند. در نمونه‌ها میزان تخلخل در آلومینیوم آندایز شده (شکل 7-ج) نسبت به آلومینیوم حکاکی شده (شکل 7-ب) در یک سطح مشخص بیشتر می‌باشد و هر یک از تخلخل‌ها نیز عمق بیشتری دارند، به همین علت میزان استحکام و مدول خمشی در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده نسبت به نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده بیشتر می‌باشد. آلومینیوم سنباده زده شده (شکل 7-الف) با توجه به این‌که در بزرگمایی کمتری نسبت به دو آلومینیوم دیگر عکس گرفته شده است،



علت کم بودن میزان تخلخل سطح آلومینیوم، استحکام خمشی کاهش پیدا می‌کند. افزایش تعداد سیکل سرمایشی به 30 سیکل باعث کاهش استحکام خمشی در همه نمونه‌ها می‌شود.

- سیکل سرمایشی در نمونه با آلومینیوم حکاکی شده باعث افت شدید جذب انرژی می‌شود، به طوری که بعد از تعداد 30 سیکل سرمایشی، 93 درصد نسبت به نمونه بدون سیکل کاهش نشان می‌دهد. در نمونه با آلومینیوم سنباده زده شده نیز به دلیل تغییر مکانیزم در تعداد 30 سیکل سرمایشی، جذب انرژی 18 درصد کاهش پیدا می‌کند، ولی در نمونه با آلومینیوم آندایز شده به دلیل پایداری حرارتی بالا، جذب انرژی فقط 4 درصد کاهش می‌یابد.

- در حالت کلی سیکل سرمایشی باعث فعال شدن دو مکانیزم مقابل هم می‌شود. به همین علت ممکن است باعث کاهش یا افزایش خواص خمشی شود. اختلاف انقباض حرارتی در دمای پایین باعث بهبود خواص خمشی می‌شود و در مقابل آن اختلاف ضریب انبساط حرارتی به دلیل ایجاد کرنش پسماند باعث جدایش اجزای کامپوزیت می‌گردد.

- در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده و سنباده زده شده بعد از سیکل سرمایشی، تغییر مکانیزم شکست از شکست آلومینیوم به جدایش آلومینیوم و لایه کامپوزیت پلیمری دیده می‌شود که علت آن ضعیف بودن قفل مکانیکی بین اجزای کامپوزیت است؛ ولی در نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده به دلیل نفوذ بیشتر پلیمر به تخلخل‌های زیاد سطح آلومینیوم، پایداری حرارتی نمونه حاصل شده و لذا تغییر مکانیزم شکست دیده نمی‌شود.

- در سیکل‌های حرارتی، فصل مشترک نقش تعیین کننده‌ای را به منظور حفظ خواص خمشی ایفا می‌کند. هر چه میزان چسبندگی بین اجزای کامپوزیت بیشتر باشد، کمتر تحت تأثیر سیکل سرمایشی قرار می‌گیرد.

## 5- مراجع

- [1] R. Alderliesten, C. Rans, R. Benedictus, The applicability of magnesium based Fibre Metal Laminates in aerospace structures, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 14, pp. 2983-2993, 2008.
- [2] G. B. Chai, P. Manikandan, Low velocity impact response of fibre-metal laminates—A review, *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 363-381, 2014.
- [3] E. Botelho, L. Pardini, M. Rezende, Hygrothermal effects on damping behavior of metal/glass fiber/epoxy hybrid composites, *Materials Science*

بنابراین استحکام و مدول خمشی کمتری نسبت به هر دو نمونه در مرحله بدون سیکل سرمایشی از خود نشان می‌دهد. در حالت کلی هر چه میزان تخلخل در سطح آلومینیوم بیشتر باشد، نفوذ پلیمر به سطح آلومینیوم بیشتر شده و قفل مکانیکی بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم افزایش پیدا می‌کند. افزایش قفل مکانیکی عاملی برای افزایش استحکام و مدول خمشی می‌باشد.

در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده بعد از انجام اصلاح سطحی به روش شیمیایی، لایه سیاه رنگ ناپایداری شامل ذرات اکسیدی، ترکیبات بین فلزی و اکسید سیلیسیم روی آلومینیوم تشکیل می‌شود که در محیط‌های قلیایی نامحلول هستند. در اثر اعمال سیکل سرمایشی، این لایه اکسیدی ناپایدار باعث تضعیف چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و سطح آلومینیوم می‌شود [21]. تضعیف چسبندگی عاملی برای تغییر مکانیزم شکست از شکست آلومینیوم به جدایش بین کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم می‌باشد. این جدایش باعث افت شدید در جذب انرژی شکست شده و استحکام خمشی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

نمونه با آلومینیوم سنباده زده شده، با توجه به کم بودن میزان تخلخل، بعد از 30 سیکل سرمایشی افت زیادی را در جذب انرژی از خود نشان می‌دهد که علت آن جدایش بین لایه کامپوزیت پلیمری و آلومینیوم بعد از تحمل بار زیاد می‌باشد.

## 4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر سیکل‌های سرمایشی مختلف بر کامپوزیت الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 و کامپوزیت پلیمری زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت مورد بررسی قرار گرفت که در آن، سطح آلومینیوم به روش‌های مکانیکی (سنباده)، شیمیایی (حکاکی) و الکتروشیمیایی (آندایز) اصلاح سطحی شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- استحکام خمشی نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده در تمامی سیکل‌های حرارتی نسبت به دو نمونه با آلومینیوم حکاکی شده و سنباده زده شده بیشتر است. بعد از تعداد 15 سیکل سرمایشی، استحکام خمشی نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده به علت بهبود قفل مکانیکی در کامپوزیت پلیمری افزایش پیدا می‌کند، ولی در نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی شده، لایه اکسیدی تشکیل شده بر روی سطح آلومینیوم حکاکی شده به دلیل ناپایداری حرارتی باعث کاهش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم شده و در نتیجه خواص خمشی را کاهش می‌دهد. در نمونه‌های با آلومینیوم سنباده زده شده به

- nitrogen Temperature, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, No. 9, pp. 937-944, 2008.
- [13] A. A. da Costa, D. F. da Silva, D. N. Travessa, E. C. Botelho, The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber-metal laminates, *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 434-440, 2012.
- [14] R. Eslami-Farsani, S. M. Reza Khalili, M. Najafi, Effect of thermal cycling on hardness and impact properties of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 36, No. 7, pp. 684-698, 2013.
- [15] S. M. R. Khalili, M. Najafi, R. Eslami-Farsani, Effect of Thermal Cycling on the Tensile Behavior of Polymer Composites Reinforced by Basalt and Carbon Fibers, *Mechanics of Composite Materials*, pp. 1-10, 2017.
- [16] E. Resin, 828 Data Sheet, *Shell Chemical Co., sc*, Vol. 60, 2005.
- [17] Standard Test Methods for Flexural Properties of Un-reinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, *Annual Book of ASTM Standard*, 08. 01, D 790 – 00, 2000.
- [18] G. Meriç, I. E. Ruyter, Effect of thermal cycling on composites reinforced with two differently sized silica-glass fibers, *dental materials*, Vol. 23, No. 9, pp. 1157-1163, 2007.
- [19] B. Ray, Thermal shock on interfacial adhesion of thermally conditioned glass fiber/epoxy composites, *Materials Letters*, Vol. 58, No. 16, pp. 2175-2177, 2004.
- [20] S. Kalia, S.-Y. Fu, *Polymers at cryogenic temperatures*: Springer, 2013.
- [21] D. Losic, A. Santos, *Nanoporous Alumina*, pp. 65-67, Springer, 2015.
- and Engineering :A, Vol. 399, No. 1, pp. 190-198, 2005.
- [4] K. Singha, A short review on basalt fiber, *International Journal of Textile Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 19-28, 2012.
- [5] T. Deák, T. Czigány, Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: a comparison, *Textile Research Journal*, Vol. 79, No. 7, pp. 645-651, 2009.
- [6] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, O. Çoban, A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [7] W.-X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, Galvanic corrosion-resistant carbon fiber metal laminates, in *Proceeding of The 16th International Conference on Composite Materials*, Kyoto, Japan, July 8-13, 2007.
- [8] H. F. A. Marzuki, M. Mohamad, E. Ubaidillah, E. Ahmadhilmi, M. N. a. Nordin, Z. Abidin, M. Fadzlee, N. Roslani, Y. M. Junos, S. Omar, Effect of Anodizing on Strength of Carbon-Fibre Aluminium-Laminated Composites, *Advanced Materials Research*, Vol. 748, pp. 216-221, 2013.
- [9] S. Mahdavi, *Thermal Cycling of Out-Of-Autoclave Thermosetting Composite Materials*, Thesis, Concordia University, 2017.
- [10] T. H. Ko, T. S. Ma, Effect of post-curing on the mechanical properties of carbonized phenolic resins, *Polymer composites*, Vol. 19, No. 4, pp. 456-462, 1998.
- [11] B. Ray, Effects of thermal and cryogenic conditionings on mechanical behavior of thermally shocked glass fiber-epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24, No. 7, pp. 713-717, 2005.
- [12] M. Surendra Kumar, N. Sharma, B. Ray, Mechanical behavior of glass/epoxy composites at liquid