



تأثیر شرایط محیط سرمایشی بر خواص خمشی کامپوزیت لایه‌های آلومینیوم- اپوکسی / الیاف بازالت و الیاف شیشه

فردین اصغری آرپاتپه¹، مهدی عبدالهی آذغان¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}

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

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

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

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/07/21

پذیرش: 98/05/12

چکیده

در این پژوهش، تأثیر لایه‌چینی الیاف و سیکل سرمایش بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های لایه‌های الیاف- فلز (FML) حاوی الیاف شیشه و بازالت مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های FML متشکل از دو ورق آلومینیوم 2024-T3 و لایه‌ی میانی کامپوزیت زمینه اپوکسی با 4 لایه الیاف بازالت و شیشه در 5 حالت لایه‌چینی مختلف به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. به منظور افزایش چسبندگی بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، اصلاح سطحی آلومینیوم با روش الکتروشیمیایی (آندایز) صورت گرفت. هر سیکل دمایی در مدت زمان 3.5 دقیقه بین دمای 25 °C و 100 °C- انجام شد. خواص خمشی نمونه‌ها بعد از 40 سیکل سرمایش مورد ارزیابی قرار گرفت و با نمونه‌های بدون سیکل مقایسه شدند. به منظور مشخصه‌یابی مکانیزم شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و نوری استفاده شد. با توجه به نتایج، در نمونه‌های بدون سیکل دمایی، بیشترین و کمترین استحکام و مدول خمشی به ترتیب مربوط به کامپوزیت FML حاوی الیاف بازالت و حاوی الیاف شیشه (به علت خواص مکانیکی پایین‌تر الیاف شیشه نسبت به الیاف بازالت) بود. بعد از انجام سیکل سرمایش، بیشترین تغییرات استحکام و مدول خمشی به ترتیب با 6 و 4.9 درصد افزایش مربوط به نمونه حاوی الیاف بازالت و کم‌ترین آن‌ها با 2.5 و 1.6 درصد مربوط به نمونه حاوی الیاف شیشه می‌باشد. علت افزایش خواص خمشی، غلبه مکانیزم تنش فشاری (که باعث بهبود چسبندگی بین اجزای کامپوزیت می‌شود) بر جدایش بین اجزای کامپوزیت است.

کلیدواژگان:

کامپوزیت لایه‌های الیاف- فلز
سیکل سرمایش
الیاف بازالت
لایه‌چینی الیاف
خواص خمشی

Effect of Cryogenic Environmental Condition upon Flexural Properties of Aluminum- Epoxy/ Basalt Fibers- Glass Fibers Laminates

Fardin Asghari Arpatappéh, Mehdi Abdollahi Azghán, Reza Eslami-Farsani*

Faculty of 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 laminate
Cryogenic cycling
Basalt fibers
Fibers arrangement
Flexural properties

Abstract

In this study, the effect of stacking sequence and cryogenic cycles on the flexural behavior of fiber metal laminates (FMLs) including glass and basalt fibers were investigated. The FMLs were composed of two aluminum 2024-T3 sheets as metal layers and epoxy matrix composite as the polymeric layers. The polymer composites consisted of 4 layers of basalt and glass fibers. These composites were prepared in 5 different laminates sequence by hand lay-up method. To improve the adhesion strength between aluminum and polymer composite layers, the surface of aluminum sheets was treated by electrochemical treatment (anodizing). Each cycle was carried out for 3.5 min between -100 and 25 °C. The FMLs were cycled for 40 times and their flexural performance was evaluated before and after cryogenic cycle. To characterize the failure mechanism of specimens, the scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy were used. Results of flexural tests indicated that the flexural strength and modulus values for FML samples with basalt fibers (BFML) were higher than those of FML samples with glass fibers (GFML). This phenomenon can be attributed to the weak mechanical properties of glass fibers in comparison to basalt fibers. After cryogenic cycles, the highest changes in the flexural properties was for BFML samples, while the lowest changing was for GFML samples. In fact, the increase percentages in flexural strength and modulus of BFML samples were respectively about 6% and 4.9%. On other hand, in the case of GFML, the increase percentages in flexural strength and flexural modulus were respectively 2.5% and 1.6%. In fact, when the hybrid FMLs were subjected by cryogenic cycles, due to the overcoming of the pressure stress mechanism on delamination between composite components, an enhancement in flexural behavior is observed

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Asghari Arpatappéh, F. Abdollahi Azghán, M. and Eslami Farsani, R., "Effect of Cryogenic Environmental Condition upon Flexural Properties of Aluminum- Epoxy/ Basalt Fibers- Glass Fibers Laminates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 541-548, 2020.

1- مقدمه

کامپوزیت‌ها یکی از موادی هستند که برای کاهش وزن قطعات (که قبلاً به طور عمده از فلزات ساخته می‌شدند)، مورد توجه قرار گرفتند. امروزه از این مواد در صنایع مختلف مانند صنایع هوافضا، نظامی، ساختمان‌سازی، حمل و نقل و غیره استفاده می‌شود. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری پرمصرف‌ترین مواد کامپوزیتی هستند که نسبت به دیگر کامپوزیت‌ها از مزایایی نظیر سادگی فرآیند تولید و کم هزینه بودن برخوردارند [1، 2].

کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز (FML¹)، ساختارهای کامپوزیتی هیبریدی بر پایه ورق‌های نازک از الیاف‌های فلزی (الیاف‌های آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و فولاد) و کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف هستند [3]. خواصی مانند استحکام برشی و مقاومت به ضربه بالا و تعمیر آسان از مزیت‌های فلزات به شمار می‌آید؛ در حالی که کامپوزیت‌های پلیمری دارای خواص مقاومت به خستگی عالی و استحکام و سفتی بالا می‌باشند. مقاومت به خستگی پایین و خوردگی کم در میان الیاف‌های مورد استفاده در FML و استحکام برشی، مقاومت به ضربه و تعمیرپذیری پایین کامپوزیت‌ها آن مزایا را کمرنگ می‌کند. بر این اساس، کامپوزیت‌های FML به منظور ترکیب خواص مکانیکی مواد فلزی و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری توسعه یافتند [4].

در میان انواع الیاف‌های مختلف مورد استفاده در FML، آلومینیوم‌های الیافی به دلیل خواص مکانیکی خوب از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام مناسب، چگالی پایین و ارزان بودن، استفاده بیش‌تری نسبت به دیگر الیاف‌ها دارند [5، 6].

در طول چند دهه اخیر استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی به دلیل بهبود خواص آن‌ها نسبت به کامپوزیت‌های حاوی یک تقویت‌کننده، بیشتر شده است. به عنوان مثال، الیاف کربن به دلیل خواص مکانیکی بالا، مقاومت حرارتی خوب و چگالی پایین به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها در قسمت‌های مختلف صنعت کاربرد فراوانی دارند؛ اما تردی این الیاف حساسیت بیشتری را در هنگام اعمال تنش ایجاد می‌کند. علاوه بر این، هزینه بالای الیاف کربن باعث مقرون به صرفه نبودن کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن می‌شود. یکی از راه‌های بهبود خاصیت انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه تولیدی کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن ترکیب این الیاف با الیاف شیشه کم هزینه می‌باشد [7].

با توجه به حساسیت پلیمرها به مناطق با رطوبت بالا، زمانی که کامپوزیت‌ها در محیط مرطوب قرار می‌گیرند، رطوبت به داخل زمینه نفوذ کرده و باعث تورق در کامپوزیت می‌شود. در کامپوزیت‌های FML به دلیل وجود لایه‌های فلزی در اطراف کامپوزیت میزان جذب رطوبت نسبت به کامپوزیت‌های پلیمری کمتر می‌باشد. بوتلوو² و همکاران، میزان جذب رطوبت در نمونه‌های FML و کامپوزیت پلیمری با زمینه اپوکسی حاوی الیاف کربن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند که در یک زمان مشخص، میزان جذب رطوبت در کامپوزیت پلیمری هفت برابر بیش‌تر از کامپوزیت FML بود [8].

عدم چسبندگی مناسب بین ورق فلز و لایه کامپوزیتی، باعث افت خواص کامپوزیت‌های FML می‌شود. از این رو همواره در تقویت خواص مکانیکی و فیزیکی این کامپوزیت‌ها باید به فصل مشترک میان لایه کامپوزیتی و ورق فلزی و برهمکنش‌های موجود در این منطقه توجه ویژه‌ای داشت [6]. استفاده از ترموپلاست‌ها مانند پلی اتر ایمید³ به عنوان چسب، افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق فلزی را به دنبال دارد ولی باعث کاهش چقرمگی و استحکام خستگی کامپوزیت FML می‌شود [9]. عملیات مکانیکی به منظور

حذف لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم انجام می‌گیرد و باعث ایجاد یک سطح زبر با اندازه تخلخل‌های ماکرو می‌شود که بعد از چند دقیقه لایه اکسیدی دوباره تشکیل 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 [10، 5].

در مواد کامپوزیتی، سیکل دمایی می‌تواند با عواملی مانند افزایش اتصالات عرضی پلیمر [5]، ایجاد تنش پسماند فشاری و جدایش بین اجزای کامپوزیت روی خواص مکانیکی تأثیر بگذارد [11]. اگر بعد از پخت اولیه پلیمر، نمونه کامپوزیتی تحت تأثیر دماهای نسبتاً بالا قرار گیرد، پخت ثانویه اتفاق خواهد افتاد که با افزایش چگالی اتصالات عرضی در پلیمر باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود. در اثر تغییر دمای ناگهانی در دماهای پایین، تنش پسماند فشاری ایجاد می‌شود که بهبود چسبندگی بین اجزای کامپوزیت را به همراه دارد. همچنین جدایش بین اجزای کامپوزیت در اثر تفاوت در ضریب انبساط/انقباض حرارتی اجزای تشکیل دهنده رخ می‌دهد [12].

عبداللهی و همکاران [5] تأثیر سیکل حرارتی و اصلاح سطحی آلومینیوم روی خواص خمشی کامپوزیت‌های FML را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند، سیکل حرارتی، استحکام خمشی FML با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش شیمیایی (حکاکی شده) را کاهش می‌دهد. در حالی که برای FML با آلومینیوم اصلاح سطحی شده به روش الکتروشیمیایی (آندایز شده)، استحکام خمشی در اثر سیکل حرارتی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. آن‌ها علت این افزایش را بهبود اتصالات عرضی پلیمر گزارش کردند.

کاستا⁴ و همکاران [13]، تأثیر سیکل حرارتی بر خواص کششی و برشی کامپوزیت‌های FML را مورد بررسی قرار دادند. همچنین به منظور افزایش چسبندگی بین ورق‌های آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری از دو لایه پلیمر ترموپلاست استفاده کردند. سپس نمونه‌ها را تحت سیکل حرارتی بین دماهای 50 °C- تا 80 °C با تعداد 1000 و 2000 سیکل قرار دادند. نتایج، تغییر زیادی در خواص کششی و برشی نسبت به نمونه بدون سیکل نشان ندادند.

سورندرا و همکاران [14] 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 در اثر تنش فشاری، خواص مکانیکی افزایش پیدا می‌کند.

خلیلی و همکاران [15] تغییرات رفتار کششی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف کربن و بازالت را تحت سیکل‌های حرارتی مختلف قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی، استحکام کششی نهایی و مدول کششی در هر دو کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف بازالت و کربن کاهش می‌یابد، ولی میزان کاهش این خواص در کامپوزیت حاوی الیاف کربن بیشتر است.

مهدوی [11] تأثیر سیکل حرارتی بر استحکام برشی بین لایه‌های 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 لایه‌ها ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش پیدا می‌کند.

³ Polyetherimide⁴ Costa¹ Fiber Metal Laminate² Botelho

نمونه‌ها زوده شود. در این مرحله، سطح فلز، اکسید شده و به رنگ مشکی در آمد. به منظور از بین بردن ماده تشکیل شده در سطح و دی اکساید کردن، نمونه‌ها در محلول HNO_3 در دمای اتاق قرار داده شدند. بعد از مراحل آماده سازی اولیه و به منظور اصلاح سطحی، نمونه‌ها در محلول اسید کرومیک آندایز شدند و در نهایت با استون، تمیز و خشک شدند.

3-2- چیدمان الیاف بازالت و شیشه در ساختار FML

به منظور بررسی تأثیر چیدمان بر خواص خمشی کامپوزیت‌های FML، چهار لایه از الیاف بازالت و شیشه با چیدمان‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. در جدول 1، چیدمان الیاف بازالت و شیشه، کد نمونه و درصد وزنی اجزای سازنده FML آمده است.

4-2- ساخت نمونه‌ها

به منظور ساخت نمونه‌های FML، ابتدا رزین و هاردنر با نسبت وزنی 100 به 10 (به توصیه شرکت سازنده) با یکدیگر مخلوط شده و به مدت 5 دقیقه هم زده شدند. سپس مخلوط بدست آمده به عنوان زمینه همراه با 4 لایه الیاف بازالت و شیشه در 5 نوع چیدمان متفاوت با روش لایه‌گذاری دستی برای ساخت کامپوزیت استفاده شدند. کامپوزیت پلیمری حاصل با ضخامت میانگین 0.8 mm، پیش از پخت، بین دو لایه آلومینیوم 2024-T3 (با ضخامت هر کدام 0.5 mm)، قرار داده شد. در نهایت نیز به منظور پخت نهایی، نمونه‌های FML حاصل در دمای $25^\circ C$ به مدت 18 ساعت قرار گرفتند.

5-2- سیکل سرمایش نمونه‌ها

جهت سیکل سرمایش، ابتدا نمونه‌ها از دمای اتاق با نرخ سرمایش $1.68^\circ C/s$ در بخار نیتروژن مایع تا دمای $100^\circ C$ رسیدند و سپس بلافاصله از این دما با نرخ تقریبی $1.68^\circ C/s$ در آون به دمای محیط رسانده شدند و این سیکل سرمایشی 40 بار تکرار شد. به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری دمای نمونه‌ها از ترموکوپل مدل USB-4718 شرکت ادونتیج⁵ استفاده شد.

6-2- آزمایش مکانیکی

به منظور انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای، دستگاه خمش هانسفیلد⁶ مدل H25KS بکار رفت. در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، طبق استاندارد ASTM D790 [18]، نمونه‌ها با ابعاد $150 \times 25 \text{ mm}^2$ و در فاصله 32 میلی‌متری بین دو تکیه‌گاه تحت بارگذاری با نرخ بارگذاری 3 mm/min قرار گرفتند و نمودار

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

2- بخش تجربی

1-2- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی اپون¹ 828 همراه با هاردنر پلی آمینی² تا³ به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. طبق استاندارد ASTM D445، در دمای $25^\circ C$ ، گران‌روی این رزین 110-150 پواز و چگالی آن 1.16 g/ml می‌باشد [16]. این رزین، بعد از عمل پخت، خواص مکانیکی، چسبندگی و مقاومت شیمیایی خوبی از خود نشان می‌دهد و دمای تخریب این رزین بعد از پخت به $120^\circ C$ می‌رسد [17]. الیاف شیشه نوع E، با چگالی سطحی 200 g/m^2 به صورت پارچه با جنس ساتن⁴ ریزبافت محصول شرکت لینتکس⁵ چین به عنوان تقویت کننده استفاده شد. همچنین پارچه الیاف بازالت (با اسم تجاری BAS 350.1270.A) با چگالی سطحی 400 g/m^2 از شرکت بازالتکس⁶ کشور بلژیک نیز به عنوان تقویت کننده و آلومینیوم 2024-T3 به عنوان لایه‌های فلزی با ضخامت 0.5 mm مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- اصلاح سطحی آلومینیوم 2024-T3

اصلاح الکتروشیمیایی آلومینیوم به منظور افزایش میزان تخلخل سطح آلومینیوم و به دنبال آن، افزایش چسبندگی بین ورق آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری انجام شد. برای این منظور، سطح این لایه‌های فلزی توسط استون شست‌وشو داده شد تا چربی‌های موجود در سطح آلومینیوم از بین رود. بعد از این مرحله، ورق‌ها در محلول NaOH حکاکی شد تا ناخالصی‌های سطح آلومینیوم نیز از بین برود. بلافاصله پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از محلول قلیایی، سطح آن‌ها توسط آب مقطر اسپری شد تا محلول باقی مانده روی سطح

جدول 1 مشخصات کامپوزیت‌های FML ساخته شده با چیدمان‌های مختلف

Table 1 Specification of FMLs with different stacking sequence

کد نمونه	چیدمان*	آلومینیوم 2024-T3	رزین Epon 828	الیاف بازالت	الیاف شیشه
BBBB	Al/B/B/B/Al	63	12	25	0
BGGB	Al/B/G/G/B/Al	63	14	13	10
BGBG	Al/B/G/B/G/Al	63	14	13	10
BBGG	Al/B/B/G/G/Al	63	14	13	10
GGGG	Al/G/G/G/G/Al	63	16	0	21

*Al: ورق آلومینیوم، B: الیاف بازالت، G: الیاف شیشه

⁵ Lintex

⁶ Basaltex

⁷ Advantech

⁸ Hounsfield

¹ Epon

² Polyamine Hardener

³ TETA (EPIKURE 3234)

⁴ Satin

برابر است. با توجه به شکل 2 و این نکته که مقدار مدول به قسمت خطی نمودار تنش- کرنش وابسته است، لذا در کسر حجمی یکسان الیاف شیشه و بازالت، مدول خمشی با تغییر چیدمان الیاف تغییر زیادی نخواهد کرد.

نیروی خمشی بر حسب جابجایی محوری توسط دستگاه رسم شد که از آن برای تحلیل خواص خمشی استفاده شد. حداقل تکرار انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای هر گروه از نمونه‌ها 3 بار بود که داده‌های گزارش شده میانگین آزمایش‌های انجام شده است.

2-8- بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها

به منظور بررسی فصل مشترک و سطوح شکست کامپوزیت‌های FML و نوع مکانیزم شکست از میکروسکوپ نوری میجی تکنو¹ مدل IM 7200 با بزرگنمایی 100 استفاده شد. همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM²) مدل وگا تسکن³ به منظور مطالعه سطح آلومینیوم‌های اصلاح سطحی شده و مشخص کردن علت تفاوت در نوع مکانیزم‌های شکست در انواع نمونه‌های FML بکار گرفته شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی سطح آلومینیوم‌های عملیات سطحی شده

به منظور بررسی تأثیر عملیات سطحی از میکروسکوپ SEM استفاده شد. شکل 1، تأثیر عملیات سطحی مختلف بر میزان تخلخل روی ورق آلومینیومی را نشان می‌دهد. شکل 1-الف، سطح آلومینیوم بعد از مرحله حکاکی توسط NaOH و شکل 1-ب، سطح آلومینیوم بعد از آندایز را نشان می‌دهند. میزان تخلخل در آلومینیوم آندایز شده (شکل 1-ب) نسبت به آلومینیوم حکاکی شده (شکل 1-الف) در یک سطح مشخص بیشتر می‌باشد. همچنین هم هر یک از تخلخل‌ها نیز عمق بیشتری دارند. بنابراین نمونه‌های با آلومینیوم آندایز شده نسبت به دو نمونه دیگر تخلخل بیشتری را بر روی سطح آلومینیوم ایجاد می‌کند که این باعث افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و ورق آلومینیوم شده و انتقال بار بهتر صورت می‌گیرد. در نتیجه خواص مکانیکی بهبود پیدا خواهد کرد.

3-2- تأثیر چیدمان الیاف مختلف بر خواص خمشی FML

نمودار استحکام و مدول خمشی قبل و بعد از سیکل سرمایش برای نمونه‌های FML با چیدمان‌های مختلف الیاف بازالت و شیشه به ترتیب در شکل‌های 2 و 3 و خلاصه نتایج آن‌ها در جدول 2 نشان داده شده است.

به علت خواص خمشی و تروندگی بالای الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه [19, 20]، استحکام و مدول خمشی کامپوزیت FML حاوی 4 لایه الیاف بازالت (BBBB) به ترتیب 687.5 MPa و 68.1 GPa می‌باشد که نسبت به کامپوزیت FML حاوی 4 لایه الیاف شیشه (GGGG)، به ترتیب 16 و 10 درصد بیشتر است. در نمونه‌هایی که درصد وزنی الیاف شیشه و بازالت در آن‌ها یکسان است، استحکام خمشی نمونه BBGG، 649.5 MPa و در نمونه‌های BGGG و BGGG به ترتیب 633.1 MPa و 621.4 MPa می‌باشند. بنابراین استحکام خمشی نمونه BBGG به ترتیب نسبت به نمونه‌های BGGG و BGGG، 2.5 و 4.3 درصد بیشتر است. در این حالت نیز با توجه به این که در آزمایش خمش، لایه‌های زیرین بیشتر تحت کشش بار اعمالی قرار می‌گیرند، لذا استحکام خمشی در نمونه‌هایی که الیاف بازالت نزدیک لایه‌های زیرین قرار داشته باشد، بیشتر خواهد بود. مدول خمشی نمونه BBGG، 63.6 GPa - باشد که تقریباً با نمونه‌های BGGG (63.3 GPa) و BGGG (63.2 GPa)

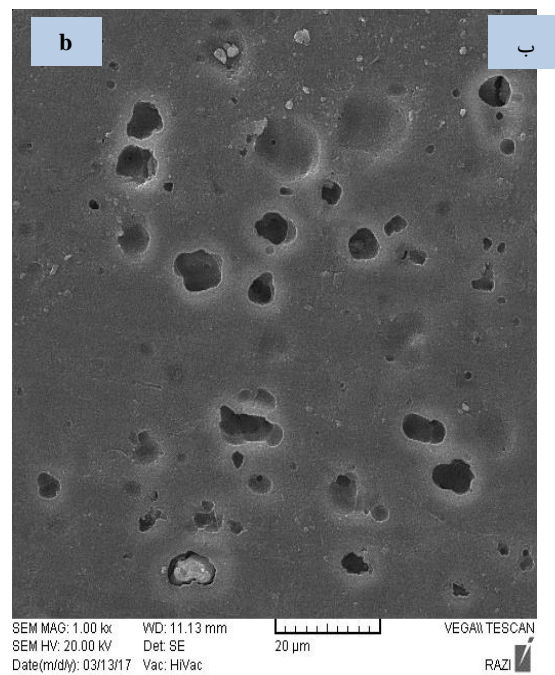
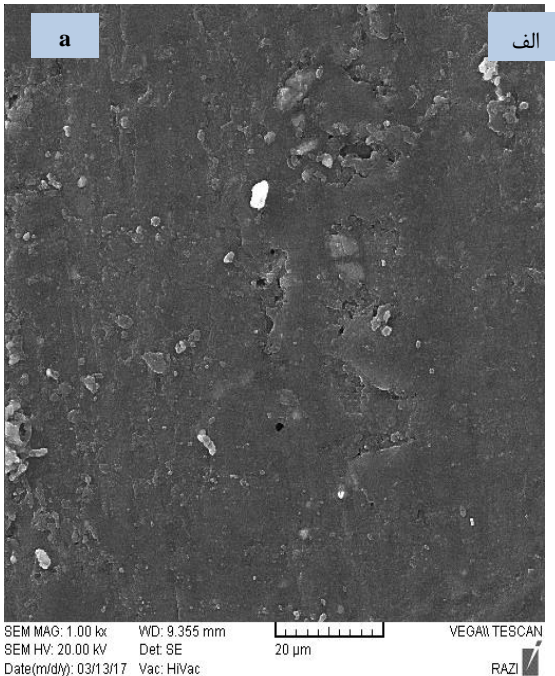


Fig. 1 SEM images of (a) etched aluminium surface, (b) anodized aluminium surface.

شکل 1 تصاویر SEM از، الف) آلومینیوم حکاکی شده، ب) آلومینیوم آندایز شده.

³ VEGA\\TESCAN-LMU

¹ Meiji Techno

² Scanning Electron Microscope

کامپوزیت GGGG، جدایش بین الیاف شیشه با آلومینیوم (فلش سفید در شکل 4-ب) باعث شکست زودرس کامپوزیت می‌شود که علت آن ترشوندگی [21] و چسبندگی مناسب اپوکسی و فلزات [22] با الیاف بازالت در مقایسه با الیاف شیشه می‌باشد.

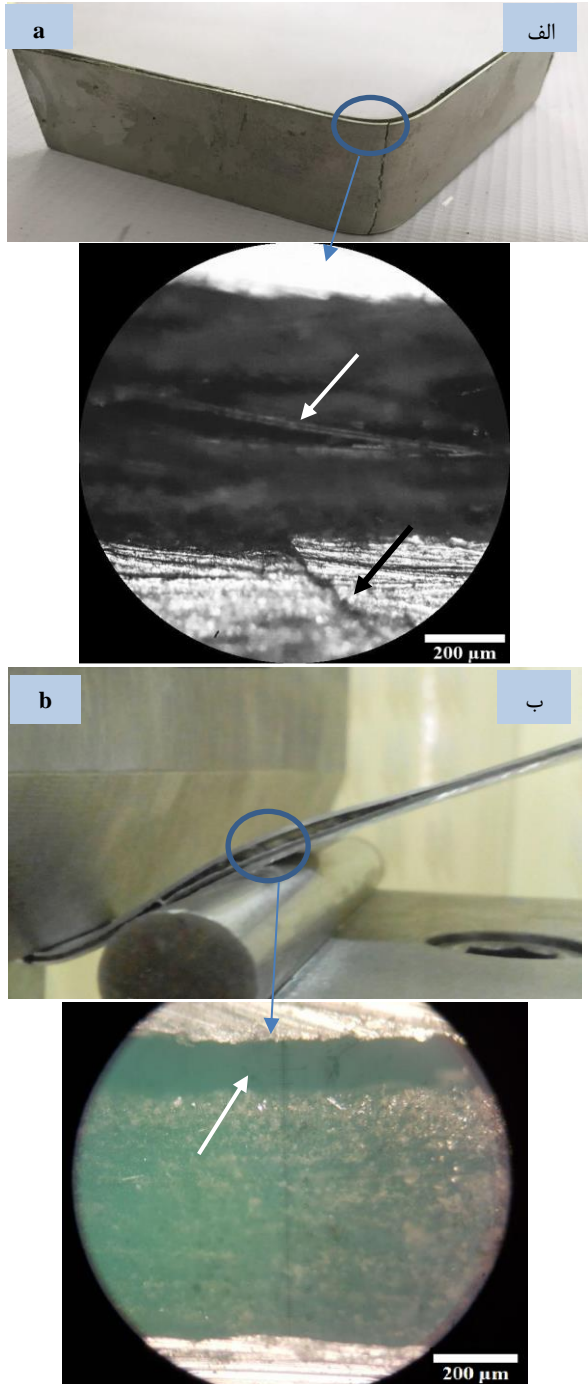


Fig. 4 Different types of failure modes of failed flexural FML specimens, a) aluminium breakage and delamination of fibres layers, b) the delamination of the glass fibres layer and aluminium sheet. شکل 4 حالت‌های مختلف شکست کامپوزیت FML تحت بارگذاری خمشی، الف) شکست آلومینیوم و جدایش الیاف در BBBB، ب) جدایش موضعی بین الیاف شیشه و آلومینیوم در GGGG.

جدول 2 نتایج حاصل از خمش سه نقطه‌ای FMLs

Table 2 Results of three- point bending test of FMLs

انحراف	مدول	انحراف	استحکام	نمونه‌ها
مدول	خمشی (GPa)	معیار استحکام	خمشی (MPa)	
±3.1	61.0	±35.2	593.7	GGGG
±3.2	62.0 (+1.6%)*	±30.7	609.3 (+2.5%)*	GGGG ^C
±3.8	63.4	±30.4	633.1	BGBG
±2.9	65.4 (+3%)*	±40.2	652.6 (+2.9%)*	BGBG ^C
±3.4	63.7	±32.9	649.5	BBGG
±2.7	66.6 (+4.3%)*	±31.3	681.1 (+4.6%)*	BBGG ^C
±2.5	63.3	±28.6	621.4	BGGB
±2.9	64.8 (+2.3%)*	±33.4	642.9 (+3.3%)*	BGGB ^C
±3.3	68.1	±40.2	687.6	BBBB
±3	71.6 (+4.9%)*	±25.8	731.5 (+6%)*	BBBB ^C

^C نمونه‌های FML سیکل داده شده

* درصد افزایش خواص خمشی نسبت به نمونه‌های بدون سیکل

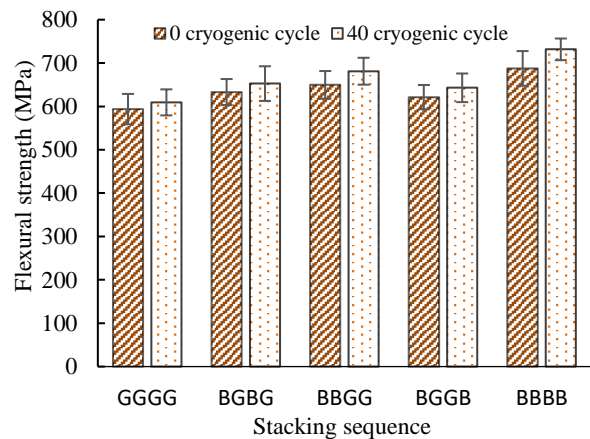


Fig. 2 The effect of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the flexural strength of FMLs.

شکل 2 تأثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر استحکام خمشی FMLs.

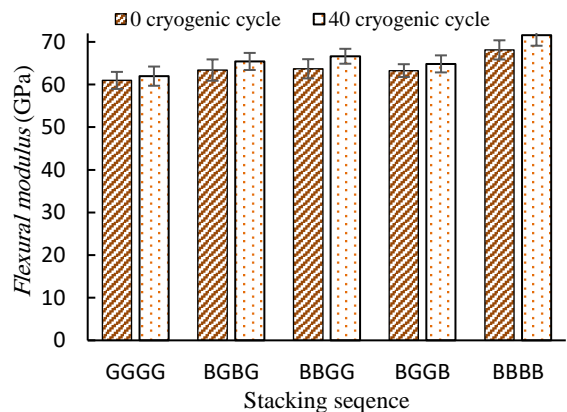


Fig. 3 The effect of stacking sequence of fibers and thermal cycling on the flexural modulus of FMLs.

شکل 3 تأثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر مدول خمشی FMLs.

3-3- بررسی سطوح شکست با چیدمان الیاف مختلف تحت آزمایش خمش
 شکل 4 تفاوت در مکانیزم شکست کامپوزیت‌های GGGG و BBBB را نشان می‌دهد. در شکل 4-الف، ابتدا آلومینیوم شکسته شده (فلش سیاه)، سپس لایه‌های الیاف شروع به جدایش می‌کنند (فلش سفید). در حالی که در

3-4- بررسی فصل مشترک پلیمر و الیاف تقویت کننده

به منظور بررسی فصل مشترک پلیمر و الیاف، سطح مقطع کامپوزیت پلیمری بین دو ورق آلومینیوم در شکل 5 مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های 5-الف و 5-ب، به ترتیب سطح کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و بازالت را نشان می‌دهند. همان‌طور که نشان داده شده است، میزان چسبندگی پلیمر و الیاف بازالت نسبت به پلیمر و الیاف شیشه بیشتر می‌باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از سایزینگ مناسب‌تر الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه و در نتیجه میزان ترشوندگی بیشتر الیاف بازالت باشد که سبب می‌شود انتقال بار بهتری نیز صورت پذیرد. این موضوع به همراه خواص مکانیکی بالاتر الیاف بازالت باعث افزایش خواص خمشی کامپوزیت پلیمری و در نتیجه کامپوزیت FML در حالت استفاده از الیاف بازالت در مقایسه با الیاف شیشه می‌شود. همچنین چسبندگی بالای الیاف بازالت به مواد فلزی در مقایسه با الیاف شیشه [22] نیز استحکام خمشی بالای FML حاوی الیاف بازالت را به دنبال دارد.

3-5- مکانیزم شکست در کامپوزیت‌های FML حاوی الیاف مختلف در آزمایش خمش

به منظور بررسی مکانیزم شکست در کامپوزیت پلیمری بین دو ورق آلومینیوم از میکروسکوپ SEM استفاده شد (شکل 6). همان‌طور که در شکل 6-الف نشان داده شده است، میزان مکانیزم غالب در شکست کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف شیشه، شکست ترد الیاف همراه با جدایش بین الیاف و زمینه می‌باشد. ولی مکانیزم غالب شکست کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف بازالت، خروج الیاف از زمینه می‌باشد (شکل 6-ب) که این اتفاق باعث افزایش خواص خمشی از جمله انرژی شکست می‌شود. علاوه بر این چسبندگی بهتر الیاف بازالت به زمینه پلیمری نسبت به الیاف شیشه بعد از انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای نیز قابل مشاهده است. در حالت کلی استفاده از الیاف بازالت به جای الیاف شیشه باعث تغییر در مکانیزم شکست کامپوزیت پلیمری شده و با مکانیزم خروج الیاف از زمینه باعث افزایش خواص خمشی می‌شود [23].

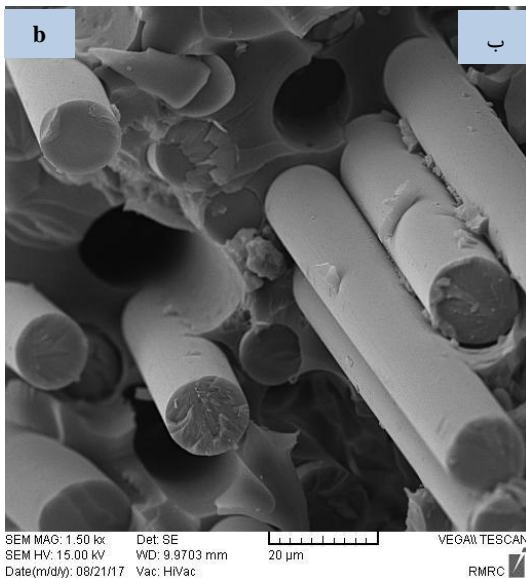
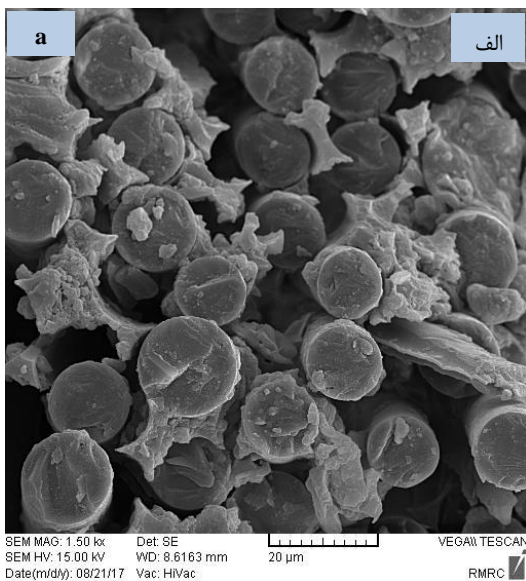


Fig. 6 SEM images of the fracture surfaces polymer composite containing of a) glass fibers, b) basalt fibers.

شکل 6 تصاویر SEM سطح شکست کامپوزیت پلیمری حاوی، الف) الیاف شیشه، ب) الیاف بازالت.

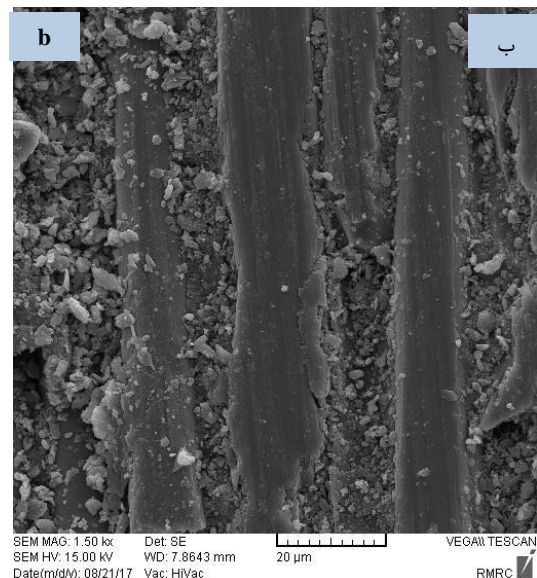
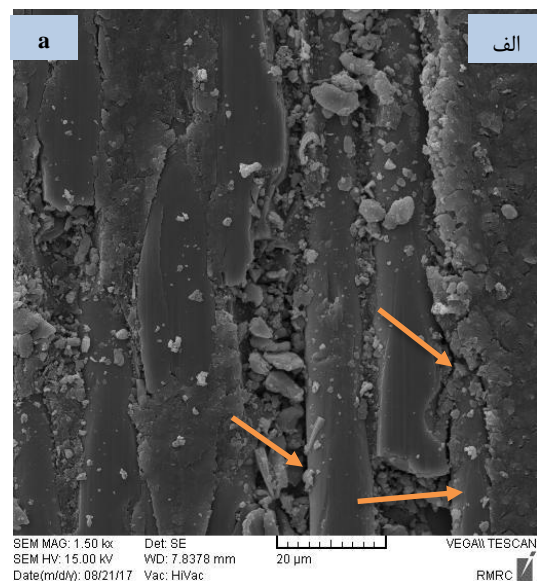


Fig. 5 SEM images of polymer composite containing of a) glass fibers, b) basalt fibers.

شکل 5 تصاویر SEM از کامپوزیت پلیمری حاوی، الف) الیاف شیشه، ب) الیاف بازالت.

اما در نمونه FML حاوی الیاف شیشه (شکل 7-ب) می‌توان به وضوح دید که ترشوندگی به صورت مطلوب نبوده و حالت کلوخه‌ای شدن اپوکسی بر سطح الیاف روی داده است. به عبارت دیگر، پیوند بین الیاف شیشه و پلیمر اپوکسی ضعیف بوده و مطلوب نیست.

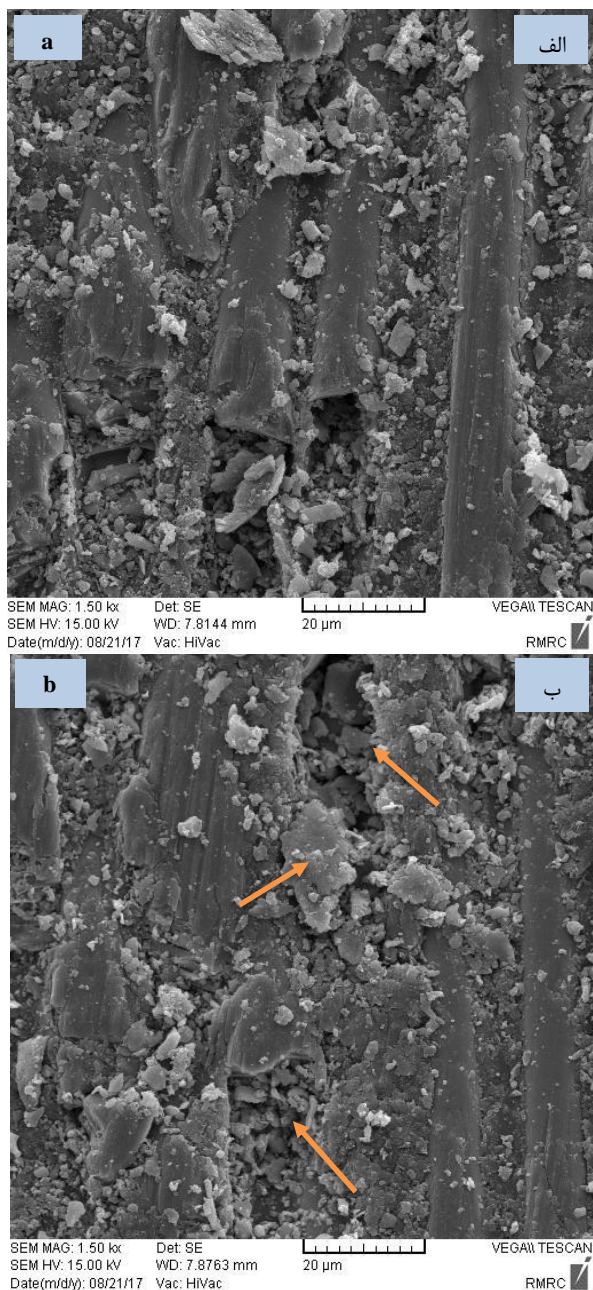


Fig. 7 SEM images of cross-section of FML containing of a) basalt fibers, b) glass fibers.

شکل 7 تصویر SEM از سطح مقطع نمونه FML شامل، الف) الیاف بازالت، ب) الیاف شیشه.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر چیدمان مختلف الیاف و سیکل سرمایش بر کامپوزیت الیاف- فلز شامل ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 (اصلاح سطحی شده به روش آندایز) و کامپوزیت پلیمری زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت و شیشه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

3-6- تأثیر سیکل سرمایش بر خواص خمشی کامپوزیت FML با الیاف هیبریدی

شکل 2 تأثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر استحکام خمشی نمونه‌های FML را نشان می‌دهد. بعد از اعمال سیکل سرمایش، در نمونه‌های FML با چیدمان‌های مختلف الیاف بازالت و شیشه، استحکام خمشی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش بهبود یافته است. در حالت کلی، سیکل سرمایش با دو مکانیزم ایجاد تنش پسماند فشاری و جدایش بین اجزای کامپوزیت روی خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد. در این مطالعه تنش پسماند فشاری بر جدایش بین اجزای کامپوزیت غلبه کرده و باعث افزایش خواص خمشی شده است. استحکام خمشی نمونه BBBB بعد از سیکل سرمایش، 731.53 MPa می‌باشد که در مقایسه با نوع مشابه بدون سیکل (687.56 MPa) حدود 6 درصد افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که استحکام خمشی نمونه GGGG بعد از سیکل سرمایشی، 609.28 MPa می‌باشد که در مقایسه با نوع مشابه بدون سیکل (593.73 MPa) حدود 2.5 درصد افزایش پیدا کرده است.

بالا بودن درصد بهبود استحکام خمشی نمونه BBBB نسبت به نمونه GGGG بعد از اعمال سیکل سرمایش به دلیل پایداری حرارتی پایین الیاف شیشه نسبت به الیاف بازالت است. در بین چیدمان‌های هیبریدی، بیش‌ترین بهبود در استحکام خمشی مربوط به نمونه با چیدمان BBGG می‌باشد که در حالت سیکل داده شده نسبت به حالت بدون سیکل نزدیک 5 درصد و 681.11 به 649.54 MPa می‌باشد. در حالی که درصد بهبود استحکام خمشی بعد از اعمال سیکل سرمایشی برای هر دو نمونه FML با چیدمان‌های BGBG و BBGG، 3 درصد می‌باشد. با توجه به این‌که لایه‌های زیرین کامپوزیت (که در آزمایش خمش متحمل بار کششی می‌شوند) وقتی از جنس الیاف بازالت باشند، رفتار خمشی بهتری را نشان می‌دهند؛ به همین خاطر نمونه BBGG بعد از سیکل سرمایش درصد بهبود بالاتری نسبت به نمونه‌های BBGG و BGBG دارا می‌باشد.

شکل 3 تأثیر چیدمان الیاف و سیکل سرمایش بر مدول خمشی نمونه‌های FML را نشان می‌دهد. بعد از اعمال سیکل سرمایش، نتایج نشان داد که درصد بهبود مدول خمشی در FML حاوی الیاف بازالت بیش‌تر از نمونه حاوی الیاف شیشه است. مدول خمشی نمونه تقویت شده با الیاف بازالت 71.59 GPa می‌باشد که نسبت به نوع مشابه بدون سیکل (68.12 GPa)، 5 درصد بهبود و مدول خمشی در نمونه تقویت شده با الیاف شیشه 61.96 GPa می‌باشد که نسبت به نوع مشابه بدون سیکل (60.96 GPa)، 1.6 درصد بهبود را نشان می‌دهند. در نمونه‌های هیبریدی FML با لایه‌های متحمل بار کششی از جنس الیاف بازالت و لایه‌های متحمل بار فشاری از جنس الیاف شیشه، با اعمال سیکل سرمایشی، درصد بهبود افزایش یافته است. برای مثال در نمونه با چیدمان BBGG بهبود مدول نسبت به حالت بدون سیکل بیش از 4 درصد می‌باشد، در حالی که درصد بهبود مدول خمشی برای نمونه‌های با چیدمان BBGG و BGBG نسبت به حالت بدون سیکل به ترتیب برابر 3 و 2 درصد است.

3-7- تأثیر سیکل سرمایش بر ریزساختار FML

شکل 7-الف، ریزساختار نمونه BBBB و شکل 7-ب، ریزساختار نمونه GGGG را بعد از اعمال 40 سیکل سرمایش در محدوده دمایی 100-25 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. در نمونه FML تقویت شده با الیاف بازالت (شکل 7-الف)، ترشوندگی الیاف بازالت با رزین اپوکسی به صورت مطلوب بوده و پیوند بین الیاف بازالت و زمینه بدون کلوخه شدن اپوکسی انجام گرفته است.

- [7] Subagia, I. A., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S. and Shon, H. K., "Effect of Stacking Sequence on the Flexural Properties of Hybrid Composites Reinforced with Carbon and Basalt Fibers", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 251-258, 2014.
- [8] Botelho, E., Pardini, L. and Rezende, M., "Hygrothermal Effects on Damping Behavior of Metal/Glass Fiber/Epoxy Hybrid Composites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 399, No. 1, pp. 190-198, 2005.
- [9] Marzuki, H. F. A., Mohamad, M., Ubaidillah, E., Ahmadhlimi, E., Nordin, M. N. a., Abidin, Z., Fadzlee, M., Roslani, N., Junos, Y. M. and Omar, S., "Effect of Anodizing on Strength of Carbon-Fibre Aluminium-Laminated Composites", In *Proceeding of Trans Tech Publ*, pp. 216-221.
- [10] 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.
- [11] Mahdavi, S., "Thermal Cycling of out-of-Autoclave Thermosetting Composite Materials", Thesis, Concordia University, 2017.
- [12] Abdollahi Azghan, M., Arpatapeh, F. A. and Eslami-Farsani, R., "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.
- [13] da Costa, A. A., da Silva, D. F., Travessa, D. N. and Botelho, E. C., "The Effect of Thermal Cycles on the Mechanical Properties of Fiber-Metal Laminates", *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 434-440, 2012.
- [14] Surendra Kumar, M., Sharma, N. and Ray, B., "Mechanical Behavior of Glass/Epoxy Composites at Liquid Nitrogen Temperature", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, No. 9, pp. 937-944, 2008.
- [15] Khalili, S. M. R., Najafi, M. and Eslami-Farsani, R., "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] Testing, A. S. f. and Materials, "Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)", *ASTM International*, 2009.
- [17] Resin, E., "828 Data Sheet", *Shell Chemical Co., sc*, Vol. 60, 2005.
- [18] 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.
- [19] Lopresto, V., Leone, C. and De Iorio, I., "Mechanical Characterisation of Basalt Fibre Reinforced Plastic", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 717-723, 2011.
- [20] Amuthakannan, P., Manikandan, V. and Uthayakumar, M., "Mechanical Properties of Basalt and Glass Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composites", *Journal of Advanced Microscopy Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 44-49, 2014.
- [21] Singha, K., "A Short Review on Basalt Fiber", *International Journal of Textile Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 19-28, 2012.
- [22] Jamshaid, H. and Mishra, R., "A Green Material from Rock: Basalt Fiber-a Review", *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 107, No. 7, pp. 923-937, 2016.
- [23] Najafi, M., Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., "Hybridization Effect of Basalt and Carbon Fibers on IMPact and Flexural Properties of Phenolic Composites", *Iranian Polymer Journal*, Vol. 23, No. 10, pp. 767-773, 2014.

1- اصلاح سطحی آلومینیوم به روش آندایز باعث افزایش تخلخل روی سطح آلومینیوم می‌شود و نفوذ پلیمر داخل این تخلخل‌ها را به دنبال دارد. این اتفاق باعث افزایش قفل مکانیکی شده و انتقال بار بهتر صورت می‌گیرد که در نتیجه خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد.

2- در حالت بدون سیکل سرمایش، نمونه FML حاوی الیاف بازالت با دارا بودن استحکام و مدول خمشی به ترتیب 687.5 MPa و 68.12 GPa، بیش‌ترین خواص خمشی را در مقایسه با نمونه FML حاوی الیاف شیشه و نمونه‌های FML هیبریدی الیاف شیشه و بازالت دارد. به طوری‌که استحکام و مدول خمشی نمونه حاوی الیاف بازالت به ترتیب 15 و 11 درصد بیش‌تر از استحکام و مدول خمشی نمونه حاوی الیاف شیشه می‌باشد. در مورد نمونه‌های FML با الیاف هیبریدی، بهترین عملکرد از لحاظ استحکام و مدول خمشی مربوط به نمونه‌ای است که دو لایه از الیاف بازالت در قسمت پایینی نمونه و دو لایه از الیاف شیشه در قسمت بالایی نمونه قرار گرفته باشد. استحکام و مدول خمشی این FML به ترتیب 9 و 4 درصد بیش‌تر از نمونه حاوی الیاف شیشه است.

3- بعد از اعمال سیکل سرمایش مشابه با حالت بدون سیکل، خواص خمشی نمونه FML حاوی الیاف بازالت در مقایسه با نمونه‌های FML حاوی الیاف شیشه و هیبریدی الیاف شیشه و بازالت، بالاتر است. همچنین در نمونه FML حاوی الیاف بازالت پس از اعمال سیکل حرارتی، استحکام خمشی 6 درصد بیش‌تر از نمونه مشابه اما بدون سیکل حرارتی است. مدول خمشی نمونه FML حاوی الیاف بازالت بعد از اعمال سیکل سرمایشی نیز به مقدار 5 درصد بیش‌تر از نمونه FML حاوی الیاف بازالت بدون سیکل می‌باشد. این افزایش ناشی از اعمال سیکل برای نمونه‌های حاوی الیاف شیشه نیز با درصد افزایش کمتر صادق است.

4- در کامپوزیت‌های FML با الیاف هیبریدی بعد از سیکل سرمایش، در مواردی که لایه‌های متحمل بار کششی از جنس الیاف بازالت و لایه‌های متحمل بار فشاری از جنس الیاف شیشه باشند، بهبود خواص خمشی نسبت به سایر چیدمان‌ها بیشتر است.

5- مراجع

- [1] Hosseini Abbandanak S.N., Siadati S.M.H., and Eslami-Farsani R., "Graphene Surface Treatment Effects on Mechanical Behavior of Basalt Fibers Epoxy Composites", In *Persian, Iran. J. Polym. Sci. Technol*, Vol 31, pp. 155-170, 2018.
- [2] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites Under Tensile and Flexural Loadings", In *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.
- [3] Sadighi, M., Alderliesten, R. and Benedictus, R., "IMPact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review", *International Journal of IMPact Engineering*, Vol. 49, pp. 77-90, 2012.
- [4] Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö. and Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods", *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [5] Abdollahi Azghan, M. and Eslami-Farsani, R., "Experimental Investigation of Effect of Thermal Cycling and Metal Surface Treatment on Flexural Properties Laminate Composite of Aluminium-Epoxy/Basalt Fibers", *Moadres Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 369-376, 2017.
- [6] Aghamohammadi, H. Hosseini-Abbandanak, S. N. Eslami-Farsani, R. and Siadati, S. M. H., "Effect of Various Surface Treatment Methods on the Flexural Properties of Fiber Metal Laminates", In *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, 2018.