مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 193-203

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر شرایط محیطی متفاوت بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی هیبریدشده با نانورس

مسلم نجفی[1]، رضا انصاری[2*]، ابوالفضل درویزه[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

*رشت، صندوق‌پستی 41635-3756، r_ansari@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 شهریور 1396
پذیرش: 20 آبان 1396
ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:
چندلایه‌های الیافی فلزی
پیرسازی برودتی
پیرسازی دمابالا
پیرسازی رطوبتی-حرارتی
نانورس

چکیده

در این مقاله اثر شرایط محیطی متفاوت بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی هیبریدشده با نانورس مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور ابتدا چندلایه‌های الیافی فلزی با استفاده از ورق‌های آلومینیوم، الیاف شیشه، رزین اپوکسی خالص و بهبودیافته با نانورس توسط روش لایه‌گذاری دستی تولید شدند. تأثیر انواع مختلف شرایط محیطی شامل پیرسازی برودتی (در دمای 196°C- در نیتروژن مایع)، پیرسازی دمابالا (در دمای 130°C در هوای خشک) و پیرسازی رطوبتی- حرارتی (در دمای 90°C در آب مقطر) بر خواص ضربه‌ای نمونه‌های ساخته شده با رزین اپوکسی خالص و بهبود یافته در سطوح مختلف با بهره‌گیری از طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. مدلی مناسب جهت پیش‌بینی تأثیر نوع پیرسازی و میزان نانوذرات بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها توسعه داده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که پیرسازی برودتی مؤثرترین نقش را در کاهش خواص ضربه‌ای نمونه‌ها دارد. در حالی که پیرسازی رطوبتی- حرارتی در بین فرآیندهای مختلف شرایط محیطی، کمترین اثر را در کاهش خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی داراست، همچنین بررسی نتایج تحلیل عوامل تأثیرگذار اصلی نشان داد که نقش مخرب فرایندهای مختلف پیرسازی در کاهش خواص ضربه‌ای مؤثرتر از نقش مثبت نانوذرات در بهبود خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی است.

Effect of Different Environmental Conditions on Impact Properties of FMLs Hybridized with Nanoclay

Moslem Najafi, Reza Ansari*, Abolfazl Darvizeh

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
*P.O.B. 3756-41635, Rasht, Iran, r_ansari@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 September 2017
Accepted 11 November 2017
Available Online 01 December 2017

Keywords:
Fiber metal laminates
Cryogenic aging
High-temperature aging
Hygrothermal aging
Nanoclay

ABSTRACT

In this paper, the effect of different environmental conditions on the impact properties of fiber metal laminates hybridized with nanoclay is studied. For this purpose, the fiber metal laminates were first laminated by aluminum alloy sheets, glass fiber, pure epoxy resin and modified resin with nanoclay using hand lay-up process. The influence of different types of environmental conditions including cryogenic aging (at temperature of –196 °C in LN_2), high-temperature aging (at temperature of 130°C in dry air), and hygrothermal aging (at temperature of 90 °C in distilled water) on the impact properties of the specimens made with pure epoxy resin and modified resin was investigated using response surface method in various levels. A suitable model was developed to predict the effect of aging type and nanoparticle content on the impact strength of specimens. The results obtained suggest that the cryogenic aging has a most effective role reduction of the impact properties of the specimens. While htgrothermal aging has a less effective role in decreasing the impact properties of fiber metal laminates. Additionally, the result of main effects analysis showed that the detrimental role of different types of aging in reducing the impact properties is more effective than the positive role of nanoparticles in improving the impact properties of fiber metal laminates.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر توسعه مواد پیشرفته در بسیاری از حوزه‌های مهندسی نظیر هوافضا، صنایع دریایی، اتومبیل‌سازی و لوازم ورزشی شتاب قابل‌توجهی یافته است. در این میان کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف به عنوان موادی شناخته‌شده در زمینه ساخت سازه‌های هوافضایی مطرح است. این کامپوزیت‌ها در مقایسه با مواد فلزی متداول دارای مزایای فراوانی مانند نسبت استحکام و سفتی به وزن بالا، خواص خستگی عالی و مقاومت به خوردگی بی‌نظیر هستند [1]. هواپیماها و سایر سازه‌های هوایی عموماً در

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Najafi, R. Ansari, A. Darvizeh, Effect of Different Environmental Conditions on Impact Properties of FMLs Hybridized with Nanoclay, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 193-203, 2018 (in Persian)

طیف گسترده‌ای از محیط‌ها اعم از شرایط سرد، گرم، خشک و مرطوب در بازه‌های زمانی بلندت مدت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از این‌رو حفظ خواص مواد مورد استفاده در ساخت این متحرک‌ها در طول عمر سرویس‌دهی آن‌ها در محیط‌های خشن امری ضروری است.

قرار گرفتن سازه‌های کامپوزیتی در معرض شرایط محیطی به صورت طولانی مدت منجر به بروز تغییراتی در خواص این مواد می‌شود که در اصطلاح پیرشدگی[1] نام دارد. پیرشدگی مواد ممکن است به ایجاد تغییرات ساختاری در اجزای حیاتی سازه‌های هوافضایی بیانجامد که به طور بالقوه اثرات فاجعه‌باری بر این سازه‌ها خواهد داشت؛ بنابراین مطالعه و درک فرایند پیرشدگی در مواد پیشرفته فضایی جهت انجام یک طراحی ایمن امری ضروری است.

متأسفانه با وجود مزایای متعدد مواد کامپوزیتی پایه پلیمری این مواد تا حد زیادی نسبت به انواع شرایط محیطی حساس بوده و در صورت مواجهه با این شرایط غالباً دچار کاهش خواص مکانیکی می‌شوند. همواره بررسی اثرات پیرسازی محیطی بر خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی از موضوعات مورد توجه محققان بوده است.

در هوانوردی تجهیزات سازه‌ای باید قابلیت تحمل بارگذاری‌های مکانیکی و تغییرات دمایی ناشی از تشعشعات خورشیدی و انتقال حرارت جابه‌جایی را بسته به مراحل مختلف پروازی داشته باشند. در پرواز با تغییر حالت از مادون صوت به مافوق صوت دمای سازه هواپیما از 50- تا 130 درجه سانتی‌گراد تغییر می‌یابد که این تغییر دما می‌تواند به ایجاد تنش‌های حرارتی و درنهایت وقوع پدیده خستگی حرارتی[2] منجر گردد [2].

سازه‌های فضایی (به عنوان مثال در مدارات پایینی زمین[3]) حین انجام یک مأموریت فضایی یک محیط با فشار بسیار پایین و دماهای مفرط را تجربه می‌کنند. از دیگر تهدیدات واقع شده به این سازه‌ها می‌توان به حملات اتمی، ذرات باردار، سنگ‌های بسیار ریز آسمانی و ضایعات ساخته شده به وسیله انسان اشاره کرد. به عنوان مثال مشخص شده است که اتم اکسیژن می‌تواند منجر به خوردگی سایشی شدیدی در مواد شود [3]، همچنین ضربات ناشی از برخورد ریزشهاب‌سنگ‌های آسمانی می‌تواند منجر به ایجاد حفره‌های موضعی، ترک‌خوردگی و شکستگی اجزای سازه‌ای شود [4].

در محیط‌های با درجه حرارت بالا در ابتدای امر زمینه پلیمری دچار زوال و تخریب می‌شود. قرار گرفتن رزین‌ها در معرض دمای بالا می‌تواند منجر به کاهش جرم، جمع‌شدگی[4]، ایجاد تخریب سطحی و ریزترک و نهایتاً کاهش خواص مکانیکی این مواد گردد. این مشکل در مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف حتی پیچیده‌تر نیز می‌شود؛ چرا که ترک‌خوردگی بیشتری در سطح مشترک الیاف/ زمینه ایجاد می‌شود. ریزترک‌های حرارتی (یا مکانیکی) بین‌لایه‌ای غالباً در زمینه چندلایه کامپوزیتی تشکیل می‌شود. این ترک‌ها سبب افزایش احتمال قرارگیری ماده تحت تأثیر محیط خواهند شد که به وقوع آسیب‌های وخیم‌تر و سریع‌تر در ماده کامپوزیتی می‌انجامد. پیرسازی حرارتی به تنهایی می‌تواند منجر به ایجاد تغییراتی در طبیعت فیزیکی ماده زمینه شود. زارنسکی و همکاران [5] در تحقیقات خود به وقوع تورق در ساختار چندلایه‌های کامپوزیتی در اثر دماهای بالا در نزدیکی سطح کامپوزیت پی بردند و تصریح نمودند که این پدیده حتی پیش از سوختن یا تخریب کامل رزین هم اتفاق می‌افتد. آن‌ها دلیل این پدیده را به ایجاد فشار داخلی به سبب وجود رطوبت در ساختار چندلایه نسبت دادند که پس از گرم شدن تبدیل به بخار شده و به بروز تورق بین لایه‌ای می‌انجامد.

از سوی دیگر سازه‌های فضایی در حال انجام مأموریت بیش از حالت توقف در معرض اثرات رطوبتی- حرارتی شدید ناشی از گاززدایی رطوبتی و سیکل‌های حرارتی قرار گیرند. هنگامی که رطوبت به مواد کامپوزیتی نفوذ می‌کند، در سطح مشترک الیاف و رزین، گرادیان‌های تنش در سطح ماکروسکوپی تشکیل می‌شوند. در حالی که لایه‌های سطحی با جذب آب بالاتر تنش‌های رطوبتی فشاری را توسعه می‌دهند، در پی آن لایه‌های درونی مجبور به تولید تنش‌های کششی در جهت حفظ تعادل حالت تنش در ماده برمی‌آیند [6]. این تنش‌های کششی می‌تواند منجر به ایجاد ریزترک در کامپوزیت پلیمری شده و در نواحی غنی از رزین به صورت موضعی مشاهده شود. ژوانگ و ویتمن [7] اثر رطوبت بر استحکام برشی سطح مشترکی چندلایه‌های کربن/ اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌ها در رطوبت نسبی 100% و دمای 23 درجه سانتی‌گراد و 75 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. نتایج حاکی از کاهش میزان استحکام برشی سطح مشترکی بر اثر جذب رطوبت بود. این محققان کاهش استحکام برشی سطح مشترکی در اثر قرار گرفتن در معرض رطوبت را به پلاستیزه شدن رطوبتی و متعاقب آن کاهش دمای انتقال شیشه‌ای شدن رزین نسبت دادند.

در زمینه عملکرد مکانیکی و نحوه توسعه تخریب در مواد کامپوزیتی به کار گرفته شده در دماهای سرد نیز تحقیقاتی انجام شده است. اسلام و همکاران [8] تأثیر پیرسازی برودتی بر خواص کششی، خمشی و برشی چندلایه‌های کربن/ اپوکسی و کولار/ اپوکسی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که خواص خمشی نسبت به خواص کششی بیشتر متأثر از تخریب ناحیه سطح مشترک الیاف/زمینه بوده‌اند. آن‌ها اشاره نمودند ازآنجایی‌که در تعیین خواص خمشی اساساً رفتار زمینه بسیار تعیین‌کننده است، اثرات زیان‌بار پیرسازی برودتی نیز در خواص خمشی نمود بیشتری دارد. پس از 6 ساعت قرارگیری در معرض نیتروژن مایع در دمای 196 °C-، مدول و استحکام خمشی برای چندلایه‌های کربن/ اپوکسی به ترتیب 3.7% و 3.5% کاهش یافت.

یکی از راهبردهای محافظت محیطی کامپوزیت‌های پایه پلیمری در صنایع هوافضا به کار بردن یک لایه پوششی محافظ در سطوح خارجی سازه است. البته با توجه به سایش تدریجی پوشش یا ایجاد و گسترش ترک و خراش در کاربردهای خشن، استفاده از این پوشش‌های محافظ نمی‌تواند به عنوان یک راه‌کار دائمی تلقی گردد.

ایده استفاده هم‌زمان از آلیاژهای آلومینیوم و لایه‌های کامپوزیتی در قالب یک ماده ترکیبی برای غلبه بر معایب دو ماده (خواص ضربه‌ای نسبتاً ضعیف و حساسیت بالای مواد کامپوزیتی به شرایط محیطی و خواص خستگی پایین آلیاژهای آلومینیوم) در دهه هفتاد میلادی به پیدایش نسل جدیدی از مواد پیشرفته تحت عنوان چندلایه‌های الیافی فلزی[5] منجر شد که دارای مزایای فراوانی نظیر استحکام خستگی عالی، مقاومت به ضربه بالا و مقاومت به خوردگی و رطوبت بالا بودند [10,9].

از ابتدا چندلایه‌های الیافی فلزی در ساخت سازه‌های اولیه هواپیما نظیر بدنه هواپیما و بال مورد استفاده قرار گرفتند. برای نمونه می‌توان به استفاده از گلار[6] در بدنه ایرباس 380 و بهره‌گیری از آرال[7] در قسمتی از بال هواپیمای

[1] Aging
[2] Thermal fatigue
[3] LEO
[4] Shrinkage

[5] FMLs (Fiber Metal Laminates)
[6] GLARE (Glass Reinforced Aluminium Laminate)
[7] ARALL (Aramid Reinforced Aluminium Laminate)

فوکر اف-27 و درب انبار حمل بار هواپیمای مکدانل داگلاس سی-17 اشاره نمود. در تمامی این حالات ساختار چندلایه‌های الیافی فلزی در معرض انواع شرایط محیطی قرار دارد. در فضای باز ممکن است تخریب مواد به چند شکل اتفاق بیافتد. اثرات الکترومغناطیسی، آتش، درجه حرارت‌های بالا، رعد و برق و تخلیه الکتریکی، ازن (تخریب شیمیایی)، اشعه ماوراءبنفش، فرسایش توسط باران، شن و ماسه، ضربات کم انرژی، جذب رطوبت و تماس با مایعات آلی مانند انواع سوخت، روغن‌ها و ضدیخ‌ها از شایع‌ترین این فرایندهاست که یک هواپیما حین سرویس‌دهی در طول زمان با آن‌ها مواجه است [11].

بسیاری از مطالعات پیشین بر مزایای اصلی چندلایه‌های الیافی فلزی نظیر مقاومت در برابر ضربه و همچنین تحمل خستگی متمرکز شده است. در حالی که با توجه به اهمیت فراوان موضوع دوام این چندلایه‌ها در مواجهه با شرایط محیطی تحقیقات اندکی در این زمینه موجود است.

در چندلایه‌های الیافی فلزی به سبب ساختار چندلایه عمدتاً تنها لایه آلومینیوم بیرونی در معرض محیط قرار دارد و لایه‌های کامپوزیتی تنها از طریق لبه‌های آزاد چندلایه و یا حفره‌های ایجاد شده روی سطح آن در معرض عوامل محیطی قرار می‌گیرند. با این حال رطوبت می‌تواند از طریق لایه‌های کامپوزیتی به درون ساختار نفوذ کند. تخریب حرارتی نیز به سبب قرار گرفتن در معرض درجه حرارت‌های بالا و پایین بسیار مهم است، زیرا در صورت وقوع کل چندلایه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تأثیر شرایط رطوبتی- حرارتی بر خواص کششی و فشاری کامپوزیت‌های کربن/ اپوکسی و چندلایه‌های الیافی فلزی کارال[1] توسط بوتلو و همکاران [12] انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده وقوع پدیده اشباع در دو دسته ماده یادشده بعد از شش هفته است. در کامپوزیت‌های کربن/ اپوکسی میزان استحکام کششی نسبت به حالت اولیه 14% کاهش را نشان می‌داد این در حالی است که این میزان در چندلایه‌های الیافی فلزی کارال کمتر از 4% نسبت به حالت اولیه گزارش شد. محققان دلیل این امر را به اثر محافظتی آلومینیوم در ساختار چندلایه نسبت دادند و بیان کردند رطوبت تنها از طریق لبه‌های آزاد می‌توانسته به ماده نفوذ کند. بررسی سایر نتایج مشخص کرد که استحکام فشاری کامپوزیت‌های کربن/ اپوکسی 8% و چندلایه‌های الیافی فلزی کارال 4% کاهش را نسبت به پیش از شرایط پیرسازی نشان می‌دهد.

علاوه‌بر ایجاد تغییرات عمده ساختاری در ارتباط با ارائه مواد نوین نظیر چندلایه‌های الیافی فلزی در سال‌های اخیر، تحقیقات در زمینه بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چندلایه‌ها توسط نانوتکنولوژی نیز جایگاه ویژه‌ای یافته و در حال حاضر نیز به سبب بهبود چشمگیر خواص پلیمرها در حال توسعه است [13]. مشخصه‌هایی نظیر افزایش مقاومت در برابر سایش و خراش، اثر ممانعتی در برابر گازها، بخار آب و حلال‌ها، افزایش مقاومت به فرسایش و پیرسازی حرارتی، کاهش انبساط حرارتی و تنش‌های داخلی، افزایش مقاومت در برابر پارگی، افزایش چقرمگی شکست و مدول الاستیک، بهبود چسبندگی به تعداد زیادی از بسترهای معدنی (نظیر شیشه و آلومینیوم)، عدم اثر نامطلوب بر سرعت پخت، بهبود پایداری حرارتی و هدایت حرارتی توسط این نانوذرات قابل‌دستیابی است [15,14].

از تحقیقات جذاب در زمینه بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مواد کامپوزیتی توسط فناوری نانو می‌توان به مطالعات گسترده در زمینه مواد پلیمری و چندلایه‌های کامپوزیتی هیبرید شده با نانورس اشاره نمود. هاک و همکاران [16] در تحقیقاتشان نشان دادند که با استفاده از میزان بسیار کمی نانورس افزایش قابل‌توجهی در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه رخ می‌دهد. نتایج نشان داد که استحکام برشی، استحکام خمشی و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی نانوذرات در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف شیشه/ اپوکسی به ترتیب 44%، 24% و 23% افزایش می‌یابد. علاوه‌بر این آن‌ها گزارش نمودند که دمای تجزیه حرارتی نانوکامپوزیت تقریباً 26 درجه سانتی‌گراد بالاتر از حالت بدون نانوذرات است. این بهبود در خواص نانوکامپوزیت‌های ساخته شده به افزایش استحکام فصل مشترک بین ماده زمینه پلیمری و نانورس نسبت داده شد.

حمیم و همکاران [17] خواص خمشی و چقرمگی شکست نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس را پس از جذب رطوبت ارزیابی نمودند و به این نتیجه رسیدند که به طور کلی خواص مورد مطالعه پس از جذب رطوبت در نانوکامپوزیت‌های رس/ اپوکسی کاهش کمتری در مقایسه با نمونه‌های اپوکسی خالص داشته است؛ بنابراین ذرات رس می‌تواند به شکل موفقیت‌آمیزی جهت تقویت مواد پلیمری به منظور کاهش شدت زوال خواص مکانیکی ناشی از جذب رطوبت مورد استفاده قرار گیرند.

کوجیما و همکاران در مطالعات بر رزین‌های پلی‌آمید نشان دادند که جذب آب این رزین پس از افزودن ذرات نانورس تا 40% کاهش می‌یابد [18].

پل و همکاران [19] در بررسی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه/ اپوکسی نشان دادند که چقرمگی شکست و استحکام کششی نانو کامپوزیت‌های شیشه/ اپوکسی حاوی 5% نانورس نسبت به حالت قبل از افزودن نانورس به ترتیب 10% و 7% افزایش می‌یابد.

حسینی و همکاران [20] تأثیر افزودن نانورس بر خواص خمشی و کششی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی نتایج نشان داد که بیشترین افزایش مدول و مقاومت خمشی به مقدار 9% و 11% در 3% وزنی نانورس به دست می‌آید، همچنین بیشترین افزایش مدول خمشی به مقدار 48% در 5% وزنی نانورس حاصل می‌شود.

اگرچه امروزه تأثیر بهبوددهندگی نانورس در ارتباط با برخی خواص مواد کامپوزیتی امری اثبات شده است، ولی استفاده از آن‌ها در ساختارهای پیشرفته‌تری نظیر چندلایه‌های الیافی فلزی به نسبت محدود است.

در یکی از مطالعات اخیر در زمینه چندلایه‌های الیافی فلزی هیبریدشده با نانورس، مسعودی و همکاران [21] اثر افزودن نانورس بر خواص بالستیکی چندلایه‌های الیافی فلزی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های بالستیک در سرعت‌های 205 و 225 متر بر ثانیه نشان داد که میزان جذب انرژی مخصوص در 4% وزنی نانورس ناچیز بوده است، اما در 7% و 10% وزنی نانورس این میزان جذب انرژی افزایش قابل‌توجهی می‌یابد.

نجفی و همکاران [22] تأثیر روش اختلاط نانورس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری و چندلایه‌های الیافی فلزی ساخته شده از آلیاژ 2024-T3 آلومینیوم و لایه‌های الیاف شیشه/ اپوکسی را بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده برتری روش اختلاط ترکیبی شامل استفاده از همزن مکانیکی، هموژنایزر مکانیکی سرعت‌بالا و هموژنایزر مافوق صوت نسبت به سایر روش‌های اختلاط بود، همچنین مشخص شد که افزودن مقادیر نانورس از 3% به 5% تأثیر مثبتی بر افزایش مدول خمشی هر دو نوع چندلایه دارد، در حالی که میزان این تأثیر مثبت بر استحکام خمشی و ضربه‌ای دو نوع چندلایه مورد مطالعه کمتر مشهود است.

در مقاله حاضر سعی شده است برای نخستین بار تأثیر انواع مختلف شرایط محیطی اعم از پیرسازی برودتی، دمابالا (حرارتی) و رطوبتی- حرارتی بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی هیبرید شده با نانورس مورد

[1] CARALL (Carbon Reinforced Aluminum Laminate)

بررسی قرار گیرد. در این پژوهش ابتدا چندلایه‌های الیافی فلزی توسط ورق‌های آلومینیوم و رزین اپوکسی خالص و بهبودیافته توسط نانورس از طریق روش لایه‌گذاری دستی و سپس کیسه خلاء ساخته شدند، سپس با استفاده از طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ، خواص ضربه‌ای و ریخت‌شناسی نمونه‌ها به ترتیب توسط آزمون ضربه چارپی و تحلیل میکروسکوپ الکترونی مورد ارزیابی قرار گرفت.

2- مواد و ساخت

2-1- مواد

ماده پلیمری مورد استفاده در این پژوهش رزین اپوکسی دوجزئی آرالدیت ام-ال 505[1] همراه با سخت‌کننده آچ-ای 13[2] است که از شرکت مواد مهندسی مکرر[3] کشور ایران خریداری گردید. مونتموریلونیت کا-10 به عنوان یک نانورس معدنی از شرکت سیگما آلدریچ[4] کشور ایالات متحده آمریکا تأمین شد. ترکیب شیمیایی نانورس حاصل از آزمایش XRF در جدول 1 آورده شده است.

پارچه بافت حصیری[5] شیشه نوع ای[6] با چگالی سطحی 200 گرم بر مترمربع به عنوان تقویت‌کننده از شرکت کولان[7] استرالیا خریداری و آلیاژ آلومینیوم 5083-H111 نیز از شرکت آلرو[8] رومانی تهیه شد.

2-2- اختلاط نانورس و رزین اپوکسی

با توجه انجام پژوهشی ویژه با موضوع نحوه اختلاط رزین اپوکسی و نانورس به منظور حصول بهترین خواص مکانیکی توسط نویسندگان مطالعه حاضر از بهترین روش تعیین شده جهت اختلاط رزین اپوکسی و نانورس به شرح زیر استفاده شد: 1- گرم کردن رزین در دمای 60 درجه سانتی‌گراد حمام روغن، 2- افزودن نانورس به رزین اپوکسی و اختلاط توسط همزن مکانیکی به مدت 5 ساعت، 3- همگن‌سازی مخلوط توسط همگن‌ساز سرعت‌بالای آیکا- تی 25 استانفن[9] کشور آلمان با سرعت 10000 دور بر دقیقه به مدت 30 دقیقه، 4- همگن‌سازی نهایی توسط یک دستگاه همگن‌ساز مافوق صوت هیلشر یوآی‌پی 1000 اچ‌دی[10] به مدت 30 دقیقه تحت تابش امواج مافوق صوت، 5- گاززدایی در آون خلاء برای مدت 30 دقیقه [22].

2-3- فرآیند ساخت مواد کامپوزیتی و چندلایه‌های الیافی فلزی

برای ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی از ورق‌های مربع شکل آلومینیوم با ابعاد 400 میلی‌متر□400 میلی‌متر استفاده شد. مراحل آماده‌سازی سطحی این ورق‌ها به شرح زیر انجام شد: 1- پرداخت مکانیکی توسط کاغذ سنباده،

جدول 1 ترکیب شیمیایی نانورس مونتموریلونیت کا-10 به‌دست‌آمده از آزمون XRF

Table 1 The chemical composition of K-10 montmorillonite nanoclay obtained from XRF analysis

ماده معدنی	مقدار (%)	ماده معدنی	مقدار (%)
SiO_2	50.95	CaO	1.97
Al_2O_3	19.60	Na_2O	0.98
Fe_2O_3	5.62	K_2O	0.86
MgO	3.29	Other	16.73

[1] Araldite ML-505
[2] HA-13
[3] Huntsman Advanced Materials Inc.
[4] Sigma-Aldrich Co.
[5] Plain weave
[6] E-Glass Fabric
[7] Colan Products Pty
[8] ALRO SA
[9] IKA T25 Ultra-Turrax, Stanfen
[10] UIP1000hd, Hielscher

2- چربی‌زدایی با استون، 3- حکاکی[11] شیمیایی توسط محلول 5% هیدروکسیدسدیم، 4- اسیدشویی توسط محلول متشکل از سولفات فریک و اسیدسولفوریک، 5- عملیات کروماته‌سازی توسط محلولی متشکل از CrO_3، $Na_2Cr_2O_7$ و NAF، 6- شستشو توسط آب [23].

با توجه به ضخامت 1 میلی‌متری آلیاژ آلومینیوم به کار رفته در این پژوهش و با در نظرگیری این نکته که طبق اصول طراحی چندلایه‌های الیافی فلزی استاندارد، ضخامت لایه کامپوزیتی نباید بیش از هر یک از لایه‌های فلزی باشد، برای ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی از چهار تک لایه کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی (مجموعاً دارای ضخامت 1 میلی‌متر) بین دو ورق آلومینیوم استفاده شد. به این منظور پس از اختلاط رزین اپوکسی خالص و اپوکسی غنی‌شده با عامل پخت، نمونه‌ها توسط روش لایه‌چینی دستی[12] تولید شده و سپس تحت عملیات مکش خلاء و فشار 400 کیلو پاسکال در دمای 100 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت در اتوکلاو قرار گرفتند [22].

2-4- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مقاله از عبارت FML برای نشان‌دادن چندلایه‌های الیافی فلزی استفاده شده است، همچنین میزان نانورس در قالب پیشوند پیش از نمونه‌های حاوی نانوذرات آورده شده است. نماد I به منظور بیان نوع آزمون مکانیکی یعنی آزمون ضربه تعیین شد، همچنین از نمادهای C، T، H و R به ترتیب برای نشان دادن فرآیند پیرسازی برودتی، دمابالا، رطوبتی- حرارتی و نمونه‌های مرجع (بدون فرایند پیرسازی) استفاده شد؛ بنابراین به عنوان مثال نمونه ضربه چندلایه الیافی فلزی حاوی 3% وزنی نانورس تحت عملیات پیرسازی دمابالا تحت عنوان 3wt.% nano-FML/IT کدگذاری شده است.

3- پیرسازی محیطی

برای ارزیابی اثر دمای پایین، بالا و شرایط رطوبتی- حرارتی بر خواص مکانیکی مواد مورد مطالعه در این پژوهش، نمونه‌های ساخته شده از چندلایه‌های الیافی فلزی به همراه هیبرید این مواد با نانورس در مرکز تحقیقات مواد و سازه‌های پیشرفته و هوشمند دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی تحت سه نوع فرایند پیرسازی مختلف قرار گرفتند. به این منظور تعداد مشخصی از نمونه‌ها تحت شرایط برودتی در دمای $-196°C$ در یک محفظه حاوی نیتروژن مایع به مدت 5 هفته قرار گرفتند. پیرسازی دمابالا توسط یک آون فن‌دار شرکت فن‌آزما گستر ساخت کشور ایران در دمای $130°C$ به مدت 5 هفته صورت گرفت. پیرسازی رطوبتی- حرارتی با غوطه‌ورسازی کامل نمونه‌ها در یک حمام حاوی آب مقطر در دمای $90°C$ و به مدت 5 هفته توسط یک محفظه شرایط محیطی ساخت شرکت فن‌آزما گستر کشور ایران (Model CM120E) انجام شد. در شکل 1 تجهیزات مورد استفاده جهت انجام آزمون‌های پیرسازی مختلف که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، قابل مشاهده است. به منظور تسریع در آزمون پیرسازی تمامی حالات پیرسازی اعمال‌شده بر نمونه‌ها در شرایطی شدیدتر از حالات واقعی که سازه‌های هوافضایی مرسوم در معرض آن قرار می‌گیرند، در نظر گرفته شد.

4- مشخصه‌سازی

4-1- آزمون ضربه چارپی

آزمون ضربه چارپی توسط یک ماشین آونگی تورسی شرکت

[11] Etch
[12] Hand lay-up process

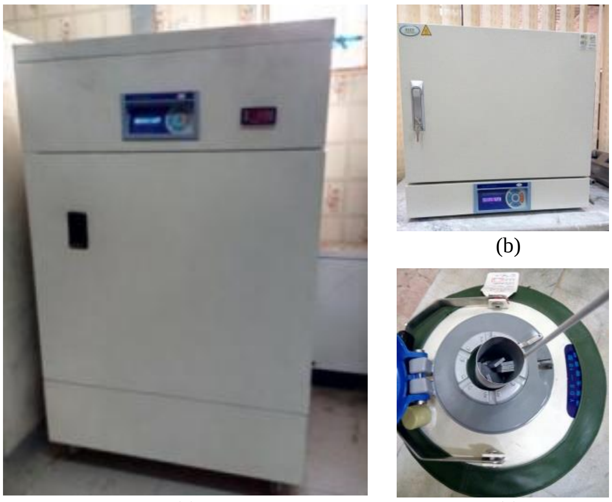

Fig. 1 a- Hygrothermal test chamber, b- Circulating air oven, c- LN_2 container

شکل 1 الف- محفظه آزمون رطوبتی- حرارتی، ب- آون مجهز به سیستم گردش هوا، پ- محفظه حاوی نیتروژن مایع

ام-اف-جی[1] کشور ژاپن و براساس ASTM D 6110 روی نمونه‌ها اعمال شد. دستگاه یادشده که مستقر در دانشگاه آزاد اسلامی تهران واحد علوم و تحقیقات است، مجهز به یک چکش چارپی با طول 750 میلی‌متر بوده که با سرعت 5.1 متر بر ثانیه به نمونه‌ها برخورد می‌کند. نمونه‌های آزمون چارپی دارای یک فاق V شکل با زاویه 45 درجه و عمق ریشه 2.54 میلی‌متر و ابعاد 70□12.7□3±1% میلی‌متر مکعب بودند (شکل 2). به منظور اطمینان از نتایج آزمون سه نمونه برای هر نوع ماده مورد آزمایش قرار گرفت.

4-2- ارزیابی پراش پرتو ایکس

الگوهای پراش پرتو ایکس از نانورس و نانوکامپوزیت‌های مورد استفاده در ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی با استفاده از یک دستگاه پانالیتیکال[2] ساخت کشور هلند مجهز به یک منبع تابش Cu Kα (طول‌موج: 1.5406 آنگستروم) استخراج شد. طیف پراش در دمای اتاق با سرعت اسکن 1.56 درجه بر دقیقه به دست آمد.

فاصله اساسی (d)[3] بین لایه‌های سیلیکاتی و میزان پراکندگی نانورس در ماده پلیمری با استفاده از قانون براگ و به شکل رابطه (1) محاسبه می‌شود.

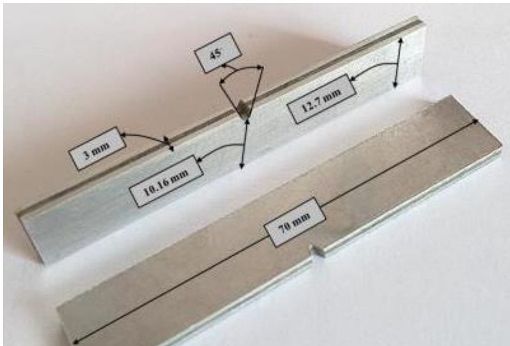

Fig. 2 Charpy impact test specimens made from FML

شکل 2 نمونه‌های آزمون ضربه چارپی ساخته شده از چندلایه الیافی فلزی

[1] Torsee, MFG. CO., Ltd.
[2] PANalytical X'Pert PRO MPD
[3] d-spacing

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

که در آن n یک عدد صحیح از طول‌موج، θ زاویه پراش (برحسب درجه) و λ طول‌موج پرتو تابشی است.

4-3- ارزیابی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی[4]

به منظور بررسی ریخت‌شناسی، کیفیت ساخت و شکل شکست در نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. به این ترتیب میکروگراف‌هایی از سطوح شکست (پس از آزمون ضربه) در بزرگ‌نمایی‌های مختلف با استفاده از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی وگا تی اسکن[5] ساخت جمهوری چک به دست آمد. پیش از انجام عملیات تصویربرداری به منظور جلوگیری از شارژ الکترون‌های جذب‌شده توسط نمونه، ابتدا سطح نمونه‌ها با یک لایه نازک طلا پوشش داده شد و سپس در ولتاژ 15 کیلوولت عملیات ثبت تصاویر انجام شد.

5- طراحی آزمایش‌ها[6] به روش رویه پاسخ[7]

در این پژوهش به سبب وجود ناهمگونی ساختاری در چندلایه‌های الیافی فلزی (فلز، رزین پلیمری و الیاف)، وجود فاز نانو (نانورس) در مجاورت فاز میکرو (الیاف) در زمینه پلیمری، پارچه مورد استفاده در ساخت چندلایه‌ها (دارای بافت حصیری و نه الیاف در یک راستا)، بروز تغییرات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی متفاوت ناشی از انواع مختلف پیرسازی و... استفاده از رهیافت‌های تحلیلی و حتی عددی عملاً بسیار پیچیده، زمان‌بر و پر هزینه خواهد بود. در این پژوهش بررسی اثر عوامل مختلف و برهم‌کنش آن‌ها بر خواص ضربه‌ای چندلایه الیافی فلزی توسط طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ و با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب[8] صورت گرفت. در این بخش از رگرسیون رویه پاسخ از نوع چندجمله‌ای درجه دوم برای تعیین اثر نانورس و شرایط محیطی متفاوت بر خواص ضربه‌ای چندلایه الیافی فلزی به عنوان پاسخ استفاده شده است.

جدول 2 نشان‌دهنده حالات مختلف آزمایش برای ارزیابی میزان تأثیر دو نوع متغیر ورودی یعنی نوع عملیات پیرسازی و درصد وزنی نانورس بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی مورد مطالعه در این پژوهش است. بدیهی است آزمایش‌های ترتیب داده شده صرفاً به بررسی اثر دو متغیر مذکور پرداخته و سایر متغیرها نظیر ضخامت لایه‌ها، جهت‌گیری الیاف و... از اهداف این پژوهش به شمار نمی‌آید. با توجه به انجام سه آزمون بر هر یک از گروه‌های نمایش داده شده در جدول 2، مجموعاً 48 آزمون روی نمونه‌ها انجام شد.

6- نتایج و بحث

6-1- تحلیل پراش پرتو ایکس

برای شناخت ویژگی‌های ساختاری نانورس/ اپوکسی به عنوان ماده زمینه مورد استفاده در ساخت چندلایه‌های الیافی فلزی مورد بررسی در این پژوهش، نانورس خالص و نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس توسط آزمون پراش پرتو ایکس مورد ارزیابی قرار گرفتند. اطلاعات حاصله از الگوهای پراش پرتو ایکس نانورس خالص نشان داده شده در شکل 3 حاکی از وجود یک قله پراش نوک‌تیز در زاویه جدایش 2θ=6.12° در فاصله بین لایه‌ای d_{001}=1.44 نانومتر است. در انتهای نمودار نیز یک قله با شدت پایین‌تر در 2θ=11.69°

[4] Scanning electron microscopic (SEM)
[5] VEGA, TESCAN
[6] Design of Experiment (DOE)
[7] Response surface methodology (RSM)
[8] Minitab

جدول 2 حالات مختلف آزمایش‌ها بر اساس متغیرهای ورودی و سطوح آن‌ها

Table 2 Different scenarios of experiments based on the input variables and their levels

کد نمونه	درصد وزنی نانورس (%)	عملیات پیرسازی
0 wt.% nano-FML/R	0	بدون پیرسازی (0)
1 wt.% nano-FML/R	1	بدون پیرسازی (0)
3 wt.% nano-FML/R	3	بدون پیرسازی (0)
5 wt.% nano-FML/R	5	بدون پیرسازی (0)
0 wt.% nano-FML/H	0	رطوبتی-حرارتی (1)
1 wt.% nano-FML/H	1	رطوبتی-حرارتی (1)
3 wt.% nano-FML/H	3	رطوبتی-حرارتی (1)
5 wt.% nano-FML/H	5	رطوبتی- حرارتی (1)
0 wt.% nano-FML/T	0	دمابالا (2)
1 wt.% nano-FML/T	1	دمابالا (2)
3 wt.% nano-FML/T	3	دمابالا (2)
5 wt.% nano-FML/T	5	دمابالا (2)
0 wt.% nano-FML/C	0	برودتی (3)
1 wt.% nano-FML/C	1	برودتی (3)
3 wt.% nano-FML/C	3	برودتی (3)
5 wt.% nano-FML/C	5	برودتی (3)

در فاصله بین لایه‌ای 0.76 نانومتر قابل‌رویت است.

در تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت‌های حاوی 5% نانورس یک قله پراش عریض در زاویه جدایش 2θ=5.52° در فاصله بین‌لایه‌ای d_{001}=1.60 نانومتر قابل مشاهده است. افزایش فاصله بین‌لایه‌ای نسبت به حالت نانورس خالص این اجازه را به مولکول‌های اپوکسی می‌دهد که بتوانند بین لایه‌های سیلیکاتی نانورس نفوذ کرده که این عمل جهت‌گیری مناسب‌تر اپوکسی در بین این لایه‌ها را با ایجاد یک ساختار منظم تکراری به همراه خواهد داشت [24]. البته وجود قله در نمودار پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت حاوی 5% نانورس نشان‌گر این امر است که نانوذرات بدون رسیدن به حالت ورقه‌ای کامل یک ساختار بین‌لایه‌ای[1] در زمینه اپوکسی تشکیل داده‌اند، همچنین تغییر مکان قله در مقایسه با نانورس خالص حاکی از ایجاد تغییرات ساختاری در شبکه پلیمری است. به عنوان یک قاعده کلی با توجه به افزایش لزجت در درصدهای بالاتر نانوذرات و احتمال بروز کلوخیدگی، فواصل بین‌لایه‌ای سیلیکاتی در درصدهای بالای نانورس کوچک‌تر از نمونه‌های حاوی درصدهای پایین‌تر نانورس است [25]. عدم وجود قله مربوط به ناحیه بلورین نانورس در الگوی پراش نمونه‌های حاوی 1% و 3% نانورس، نمایان‌گر مقادیر بهینه نانوذرات از نظر ملاحظات اختلاط در این دو نوع نانوکامپوزیت است. عموماً عدم وجود قله در الگوی پراش به عنوان نشانه‌ای از حالت ورقه‌ای شدن کامل نانورس ایجاد یک ساختار لایه‌لایه[2] در زمینه پلیمری و توزیع مناسب نانوذرات طی فرایند اختلاط محسوب می‌شود. با توجه به بالا بودن ضریب منظری لایه‌های نانورس حالت ورقه‌ای شدن کامل به ایجاد سطح تماس بیشتر بین زنجیره‌های پلیمر و لایه‌های نانورس منجر می‌شود که طبیعتاً بهبود قابل توجه خواص مکانیکی پلیمر را درپی خواهد داشت [26].

6-2- تحلیل واریانس و برآورد مدل

از نرم‌افزار مینی‌تب نسخه 17 به منظور یافتن بهترین مدل تشریح‌کننده

[1] Intercalated structure
[2] Exfoliated structure

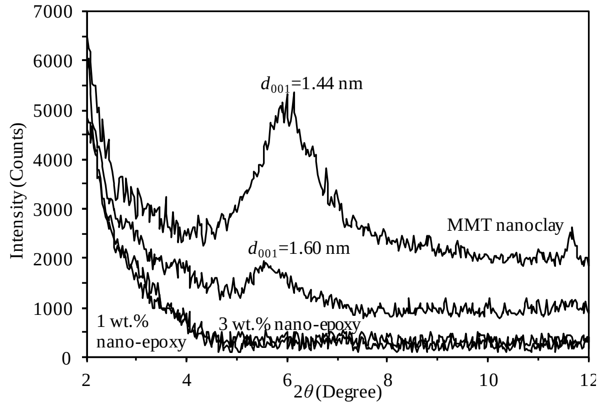

Fig. 3 X-ray pattern of pure nanoclay and nanoclay/epoxy nanocomposites

شکل 3 الگوی پرتو ایکس از نانورس خالص و نانوکامپوزیت‌های نانورس/ اپوکسی

خواص ضربه‌ای چندلایه الیافی فلزی مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شد.

رابطه (2) بر مبنای نتایج تجربی استحکام ضربه‌ای (IS) به عنوان تابعی از متغیرهای درصد وزنی نانورس (N) و عملیات پیرسازی (A) تخمین زده شده است. طبق جدول 2 مقادیر 0، 1، 3 و 5 به متغیر N و مقادیر 0، 1، 2 و 3 به متغیر A اختصاص می‌یابد.

$$IS = 773.40 - 44.00\,A + 14.14\,N + 4.16A^2 - 2.57N^2 + 1.68\,AN \quad (2)$$

در این بخش تصدیق مدل توسعه‌یافته توسط نمودار باقی‌مانده‌ها برای استحکام ضربه‌ای مطابق شکل‌های 4 و 5 انجام می‌شود. تفاوت مابین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده مقادیر باقی‌مانده نامیده می‌شود. شکل 4 نشان‌گر نمودار باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده است. این نمودار نشان می‌دهد که مقادیر باقی‌مانده به صورت تصادفی توزیع شده‌اند و از روند خاصی تبعیت نمی‌کنند که حاکی از برازش مناسب و متعادل واریانس و دقت بالای مدل برازش شده است؛ بنابراین شرط مستقل بودن مقادیر باقی‌مانده رعایت شده است.

شکل 5 نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها را برای استحکام ضربه‌ای نشان می‌دهد. از این نمودار برای بررسی فرض نرمال بودن داده‌ها استفاده می‌شود. قرارگیری تقریبی تمامی نقاط باقی‌مانده در دو سمت خط مستقیم و در مجاورت آن به عنوان نشانه‌ای از توزیع نرمال خطاها تلقی می‌گردد [27]. نرمال‌بودن توزیع مقادیر باقی‌مانده از ملزومات تحلیل واریانس است.

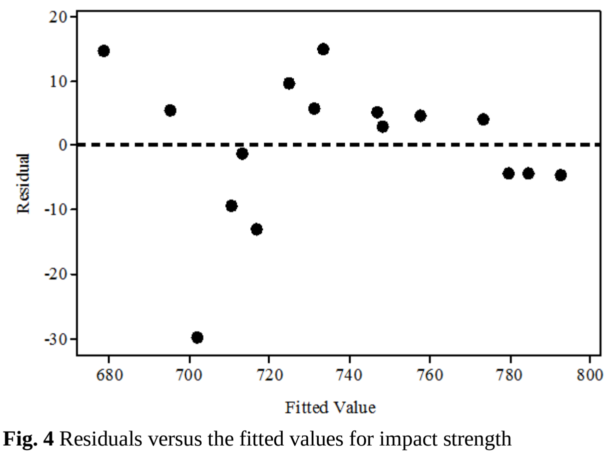

Fig. 4 Residuals versus the fitted values for impact strength

شکل 4 نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر مقادیر برازش شده برای استحکام ضربه‌ای

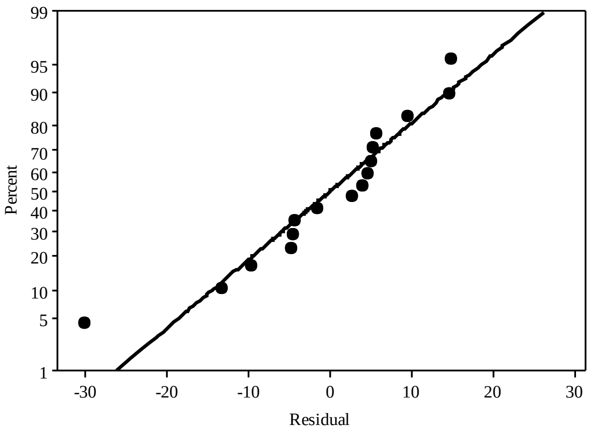

Fig. 5 Normal probability plot for impact strength

شکل 5 نمودار احتمال نرمال برای استحکام ضربه‌ای

6-3- خواص ضربه‌ای

نتایج آزمون ضربه چارپی بر چندلایه‌های الیافی فلزی قبل و بعد از انواع مختلف پیرسازی در جدول 3 آمده است. به منظور تعیین دقت مدل پیشنهادی در بخش قبل مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط آزمایش‌های تجربی نیز در قالب جدول 3 صورت گرفته است. بررسی مقادیر نمایان‌گر دقت مناسب مدل در تعیین خواص مکانیکی چندلایه‌های الیافی فلزی مورد مطالعه در این پژوهش است.

نتایج نشان می‌دهد که افزودن 1%، 3% و 5% نانورس پیش از انجام پیرسازی به ترتیب به بهبود ملایم 0.42% و 1.37% و کاهش ناچیز 0.25% در استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی منجر می‌شود. افزایش ناچیز در خواص ضربه‌ای را به احتمال زیاد می‌توان به حضور لایه‌های سیلیکاتی در سطح خارجی الیاف شیشه نسبت داد که به بهبود خواص سطح مشترکی الیاف/ رزین اپوکسی منجر شده است [28,29].

در حالت کلی اختلاط مناسب نانورس در رزین می‌تواند به پرشدگی حفرات ماده زمینه پلیمری بیانجامد که این امر به نوبه خود بهبود نسبی خواص را دربی خواهد داشت [22]. علت بهبود بیشتر خواص در حالت استفاده از 3% نانورس احتمالاً مربوط به اختلاط مناسب‌تر نانوذرات در این درصد وزنی است. استفاده از درصد بالای نانورس (در این مطالعه 5%)

جدول 3 مقایسه بین مقادیر استحکام ضربه‌ای پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده

Table 3 Comparison between predicted and measured impact values

اختلاف (%)	مقادیر پیش‌بینی شده (kJ/m^2)	مقادیر تجربی (kJ/m^2)	کد نمونه
0.51	773.40	777.38	0 wt.% nano-FML/IR
0.55	784.97	780.64	1 wt.% nano-FML/IR
0.59	792.69	788.01	3 wt.% nano-FML/IR
0.57	779.85	775.38	5 wt.% nano-FML/IR
2.03	733.56	748.46	0 wt.% nano-FML/IH
0.69	746.81	751.99	1 wt.% nano-FML/IH
0.38	755.11	752.24	3 wt.% nano-FML/IH
0.36	748.41	751.11	5 wt.% nano-FML/IH
4.48	702.04	671.95	0 wt.% nano-FML/IT
1.88	716.97	703.75	1 wt.% nano-FML/IT
0.79	731.41	737.18	3 wt.% nano-FML/IT
1.31	725.29	734.82	5 wt.% nano-FML/IT
2.15	678.84	693.44	0 wt.% nano-FML/IC
0.76	695.45	700.73	1 wt.% nano-FML/IC
0.20	713.25	711.80	3 wt.% nano-FML/IC
1.38	710.49	700.84	5 wt.% nano-FML/IC

می‌تواند احتمال ایجاد کلوخیدگی نانورس را افزایش داده که این امر می‌تواند به تردی ماده را تشدید نماید. این افزایش تردی می‌تواند به کاهش میزان بهبود دهندگی نانوذرات بر خواص مکانیکی ساختار کامپوزیتی منجر شود [30]. از سوی دیگر احتمالاً استفاده از 1% نانورس به برای بهبود خواص سطح مشترکی الیاف و زمینه یا پرکردن حفرات ماده پلیمری ناکافی بوده و استفاده از آن در آزمونی نسبتاً خشن نظیر چارپی چندان ملموس نبوده است.

برای ایجاد درک مناسب‌تر از نحوه اثر پیرسازی بر خواص ضربه‌ای مواد مورد مطالعه، مقادیر نرمال شده نمونه‌های پیرشده نسبت به نمونه‌های سالم در شکل 6 ارائه شده است. همان طور که از شکل 6 مشخص است در یک نگاه اولیه می‌توان چنین ابراز نمود که کلیه حالات پیرسازی اثر منفی قابل ملاحظه‌ای بر استحکام ضربه‌ای مواد مورد آزمایش داشته‌اند. هر چند به نظر می‌رسد این اثر منفی در نمونه‌های تحت پیرسازی برودتی و دمابالا چشمگیرتر بوده و چندلایه‌های الیافی فلزی به کار رفته در این پژوهش (چه در حالت خالص و چه بهبودیافته با نانورس) به میزان قابل قبولی نسبت به پیرسازی رطوبتی- حرارتی مقاوم هستند.

از بررسی نتایج مشاهده می‌شود که درمجموع اعمال انواع پیرسازی اثرات مخرب کمتری بر مقادیر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های حاوی نانورس داشته است. اثر مثبت افزودن نانورس را می‌توان در وهله اول به کاهش ضریب انبساط حرارتی اپوکسی و متعاقب آن کاهش انبساط و انقباض پلیمر حین مواجهه با شرایط دمابالا و برودتی منجر می‌شود [31,30].

کاهش انبساط یا انقباض پلیمر در ساختار یک کامپوزیت می‌تواند مقدار تنش‌های حرارتی ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین الیاف و رزین را کاهش داده و منجر به کاهش در احتمال بروز ترک‌خوردگی حرارتی شود [30].

همچنین نباید از تأثیر مثبت نانورس در فرآیند پخت رزین نیز چشم‌پوشی نمود. زین‌الدین و همکاران [32] در مطالعاتشان بر تأثیر انواع شرایط محیطی بر نانوکامپوزیت‌های الیاف شیشه/ اپوکسی/ نانورس، حفظ خواص مکانیکی کامپوزیت‌های حاوی نانورس تحت شرایط محیطی را به اثر کاتالیستی نانورس نسبت دادند. افزودن نانورس می‌تواند منجر به تسریع در فرایند پخت شده و تعداد پیوندهای عرضی میان زنجیره‌های پلیمر را افزایش دهد [32 ,33] که این امر به‌نوبه خود به کاهش یا تعویق اثرات مضر شرایط محیطی بر کامپوزیت می‌انجامد [34].

شکل 7 نمودار رویه پاسخ سه‌بعدی توسط رابطه (2) برای استحکام ضربه‌ای را نشان می‌دهد.

در این مطالعه از نمودار رویه پاسخ سه‌بعدی برای درک چگونگی تأثیر توأمان انواع پیرسازی و میزان نانورس بر استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی استفاده شده است.

همان‌طور که از نمودار پاسخ مشخص است هم نوع عملیات پیرسازی و هم درصد نانورس در مقدار استحکام ضربه‌ای مؤثر هستند. البته همان‌طور که از شکل 7 مشخص است تأثیر کاهنده انواع پیرسازی بر خواص ضربه‌ای بسیار فراتر از اثر مثبت افزودن نانورس درون ساختار چندلایه‌های الیافی فلزی مورد مطالعه است. عموماً جهت ارزیابی دقیق‌تر میزان اثر هر یک از عوامل ورودی، از نمودارهایی تحت عنوان عوامل تأثیرگذار اصلی، آن‌گونه که در شکل 8 نشان داده شده است، استفاده می‌شود.

همان طور که به روشنی در شکل 8 مشخص است افزایش درصد وزنی نانوذرات تا 3% تأثیر مثبت هرچند ملایمی بر استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی دارد. البته این تأثیر مثبت در چندلایه‌های قرار داده شده در

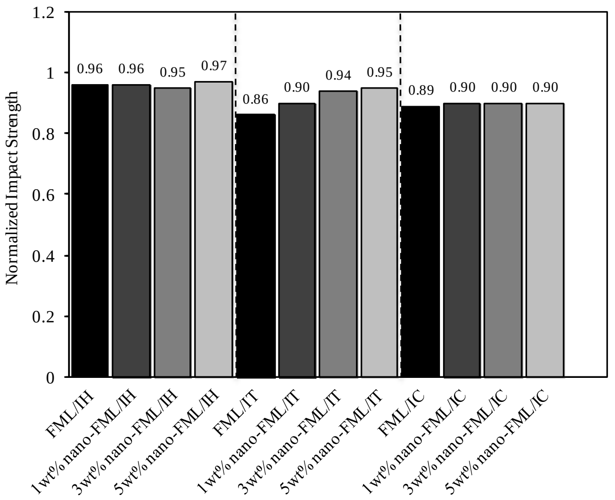

Fig. 6 Degradation of impact properties of FML specimens after exposure to different aging types

شکل 6 کاهش خواص ضربه‌ای نمونه‌های چندلایه‌های الیافی فلزی پس از اعمال انواع مختلف پیرسازی

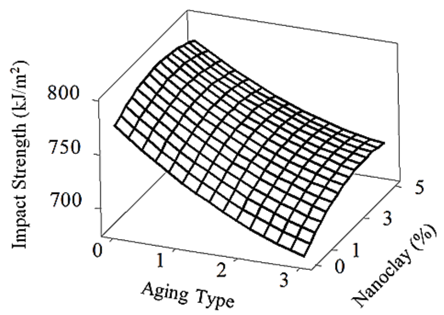

Fig. 7 3D response surface plot for impact strength values as a function of nanoclay percent and aging type

شکل 7 نمودار رویه پاسخ سه‌بعدی برای مقادیر استحکام ضربه‌ای به عنوان تابعی از درصد نانورس و نوع پیرسازی

معرض پیرسازی دمابالا محسوس‌تر است (شکل 8-d).

پیش از این نیز در جدول 3 و شکل 6 مشاهده شده که نانوذرات نتوانسته‌اند تأثیر چندانی در حفظ خواص ضربه‌ای چندلایه‌ها در حالت اعمال پیرسازی رطوبتی- حرارتی داشته باشند. این امر را می‌توان به ماهیت آب‌دوست نانورس نسبت داد که احتمالاً جذب آب به درون ساختار چندلایه را افزایش داده است [43]. البته ارتقای اندک استحکام ضربه‌ای با افزودن نانورس در حالت پیرسازی رطوبتی- حرارتی نشانگر این امر است که اثر مثبت نانورس در کاهش ضریب انبساط حرارتی رزین و همچنین بهبود فرایند پخت احتمالاً بر اثرات مضر آن (افزایش جذب آب) غلبه کرده است.

از بزرگ‌تر بودن قابل توجه مقدار تفاضل مابین حد پایین و بالای عامل پیرسازی نسبت به درصد وزنی نانورس می‌توان چنین نتیجه گرفت که کاهش خواص ضربه‌ای ناشی از پیرسازی را نمی‌توان به طور کامل توسط افزودن نانورس در ساختار این مواد بازیابی نمود. هر چند نمی‌توان از تأثیر مثبت این نانوذرات به خصوص در حفظ خواص ضربه‌ای چندلایه‌ها تحت شرایط پیرسازی دمابالا چشم‌پوشی نمود. از دیگر نکات قابل برداشت از شکل 8 تأثیرگذاری قابل‌توجه نانورس در درصد وزنی 3% نسبت به سایر مقادیر است. با توجه به شیب نمودارهای پیرسازی واقع شده در شکل 8 می‌توان گفت که پیرسازی برودتی دارای بیشترین اثر مخرب بر خواص ضربه‌ای و

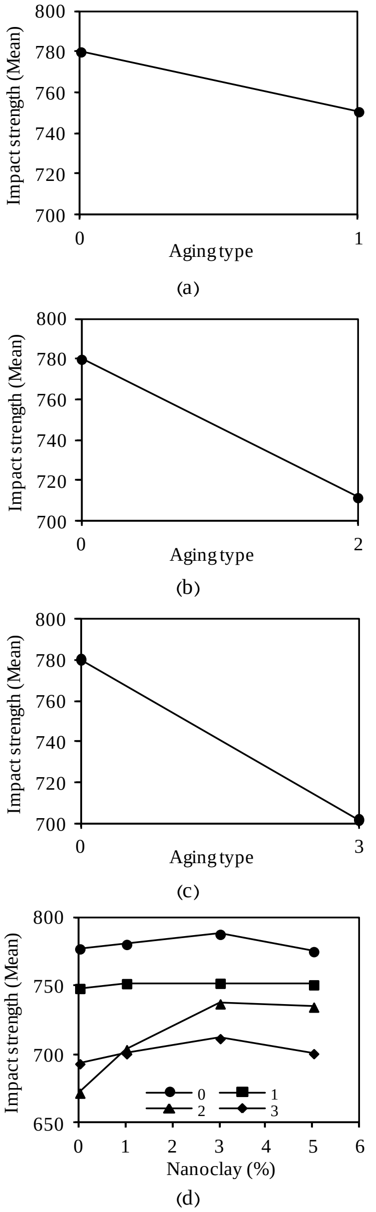

Fig. 8 Effect of different aging types on impact strength, a- hygrothermal aging, b- high-temperature aging, c- cryogenic aging, d- main effects interaction plot including nano-particles percent and different aging types

شکل 8 تأثیر انواع مختلف پیرسازی بر استحکام ضربه‌ای، الف- پیرسازی رطوبتی- حرارتی، ب- پیرسازی دمابالا، پ- پیرسازی برودتی، ت- نمودار اثر متقابل عوامل تأثیرگذار اصلی شامل درصد وزنی نانورس و انواع مختلف پیرسازی

پیرسازی رطوبتی- حرارتی کمترین تأثیر را بر کاهش این خواص دارد (شکل 8-c). نمودار ارائه شده در شکل 8-d نشان می‌دهد که چندلایه‌های الیافی فلزی به کار رفته در این پژوهش پیش از پیرسازی و همچنین در حالت پیرسازی رطوبتی- حرارتی نسبت به افزودن نانورس پاسخ محسوسی نشان نمی‌دهند، اما نمونه‌های حاوی نانورس در حالات پیرسازی برودتی و دمابالا تا حد نسبتاً قابل قبولی موفق به حفظ خواص ضربه‌ای خود می‌شوند.

6-4- ارزیابی حالت‌های شکست[1]

تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از ریزساختار نواحی شکست چندلایه‌های

[1] Failure modes

الیافی فلزی مختلف دارای اطلاعات سودمندی در ارتباط با چگونگی تأثیر پیرسازی و افزودن نانورس بر خواص مکانیکی این چندلایه‌هاست.

در شکل 9 تصویری از نحوه ایجاد شکست در نمونه‌های آزمون ضربه در یک مقیاس کلی، میکروسکوپی با بزرگ‌نمایی کم (8.3 برابر) و میکروسکوپی با بزرگ‌نمایی بالا (300 برابر) نشان داده شده است. در آزمون ضربه جدایش کامل (دوتکه شدن) در کلیه نمونه‌ها رخ داد. از دیگر نکات قابل توجه در بررسی اولیه نمونه‌ها عدم ایجاد تورق در مرز فلز و لایه کامپوزیتی نمونه‌ها در نقاطی کمی دورتر از ناحیه برخورد چکش است که طبیعتاً نمایان‌گر کیفیت مناسب ساخت نمونه‌هاست.

الگوهای عمومی حاکم بر شکست ناشی از ضربه در چندلایه‌های الیافی فلزی پیرسازی شده تحت شرایط رطوبتی- حرارتی که عمدتاً به صورت تغییر شکل پلاستیک ورق آلومینیومی، جدایش ورق فلزی از لایه کامپوزیتی، جدایش لایه‌های کامپوزیتی از یکدیگر و بیرون‌آمدگی الیاف[1] از زمینه در شکل 10 قابل مشاهده است. بررسی تصاویر میکروسکوپی حالت‌های شکست چندلایه‌های الیافی فلزی نمایان‌گر این امر است که فرآیند پیرسازی تأثیر به سزایی در نحوه شکست ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی دارند. با وجود یکسان بودن نسبی تصاویر نشان داده شده در شکل 10 با دقت مضاعف می‌توان به وجود تفاوت‌های اندکی در نحوه و میزان خرابی در این تصاویر پی برد. با توجه به نکته اشاره شده در بخش پیش در خصوص افزایش میزان جذب آب با افزودن درصد نانورس (به سبب آب‌دوستی) طبیعتاً باید انتظار داشت که میزان نرم‌شدگی ماده نیز با افزایش جذب آب افزایش یابد. از سویی دیگر بررسی دقیق تصاویر شکست گویای این امر است که حالت خرابی بیرون‌آمدگی الیاف به صورت نامنظم از زمینه پلیمری در چندلایه‌های الیافی فلزی حاوی نانورس نسبت به حالت خالص (شکل 10-a) اندکی بیشتر است. با توجه به این‌که حالت خرابی بیرون‌آمدگی الیاف به عنوان یکی از نشانه‌های شکست نرم[2] تلقی می‌شود و رخداد این نوع حالت خرابی نیازمند صرف انرژی بالاست، حفظ خواص ضربه‌ای چندلایه‌های حاوی نانورس تحت شرایط پیرسازی رطوبتی- حرارتی توجیه‌پذیر خواهد بود.

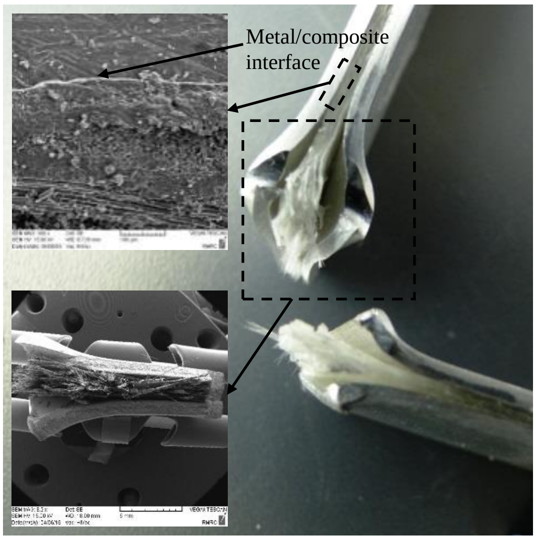

Fig. 9 Photographs taken from optical camera and SEM for impact test specimens

شکل 9 تصاویر تهیه‌شده توسط دوربین اپتیکال و میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه‌های آزمون ضربه

به همین ترتیب تصاویر میکروسکوپی از نواحی شکست نمونه‌های تحت پیرسازی دمابالا نیز در شکل 11 نشان داده شده است. کاهش تغییر شکل پلاستیک در ورق‌های آلومینیومی، سطح مقطع نسبتاً منظم شکست و کاهش حالت بیرون‌آمدگی الیاف به عنوان نشانه‌هایی از شکست ترد در شکل 11-a (نمونه عاری از نانورس) مشهود است. شکست الیاف در صفحه عمود بر محل بارگذاری ضربه‌ای نیز به صورت سطوح منظم الیاف با طول کوتاه در این تصویر نمایان است. ترک‌خوردگی وسیع ماده زمینه در سطوح خارجی و اکسیداسیون آن می‌تواند به عنوان عوامل اصلی کاهش خواص ضربه‌ای در چندلایه‌های عاری از نانورس تلقی شود. حالت شکست جدایش بین‌لایه‌ای در لایه‌های کامپوزیتی به شکل وسیع در نمونه‌های حاوی نانورس مشهود است.

از عوامل مهم بروز رفتار مناسب نمونه‌های حاوی نانورس در مقایسه با نمونه‌های خالص می‌توان به خاصیت ممانعتی[3] و بازدارندگی حرارتی[4] نانورس اشاره کرد که با دارا بودن ضریب منظری بالا در سطح نانوکامپوزیت به عنوان یک محافظ در مقابل اکسیداسیون حرارتی عمل کرده و رفتار حرارتی ماده را بهبود می‌بخشد [30]. تردشدگی حرارتی در رزین‌های اپوکسی عمدتاً به سبب خروج مواد فرار و بخارآب از رزین رخ می‌دهد. در نمونه‌های کامپوزیت عاری از نانورس تحت دمای بالا اکسیژن به راحتی می‌تواند از طریق سطح به عمق ماده نفوذ یابد و پدیده اکسیداسیون، تردی و به تبع آن کاهش خواص مکانیکی را رغم بزند.

در شکل 12 تصاویر مربوط به شکست نمونه‌های چندلایه پس از تحمل پیرسازی برودتی نشان داده شده است. در تمامی این تصاویر نشانه‌های روشن از شکست کاملاً ترد مشهود است. ترک‌خوردگی ماده زمینه، شکست ترد

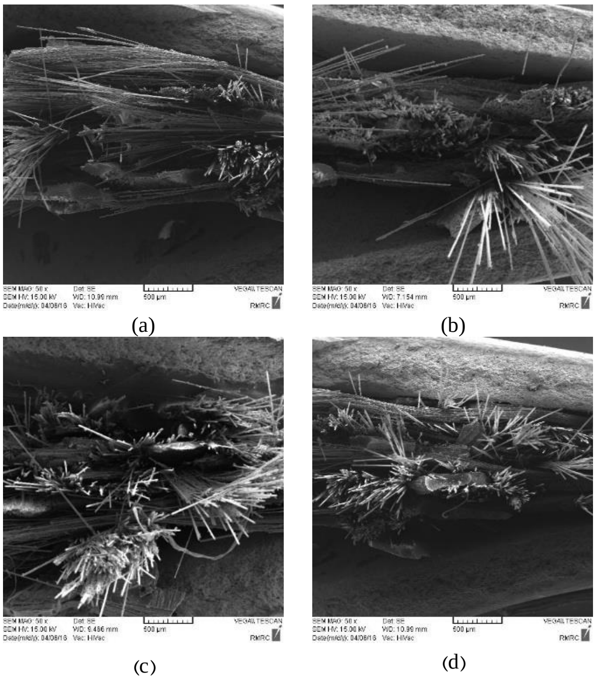

Fig. 10 SEM photographs for impact test specimens: (a) 0 wt.% nano-FML/IH (b) 1 wt.% nano-FML/IH, (c) 3 wt.% nano-FML/IH (d) 5 wt.% nano-FML/IH

شکل 10 تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه‌های آزمون ضربه،
الف- 0 wt.% nano-FML/IH، ب- 1 wt.% nano-FML/IH،
پ- 3 wt.% nano-FML/IH، ت- 5 wt.% nano-FML/IH

[1] Fiber pull-out
[2] Ductile fracture
[3] Barrier properties
[4] Thermal retardancy

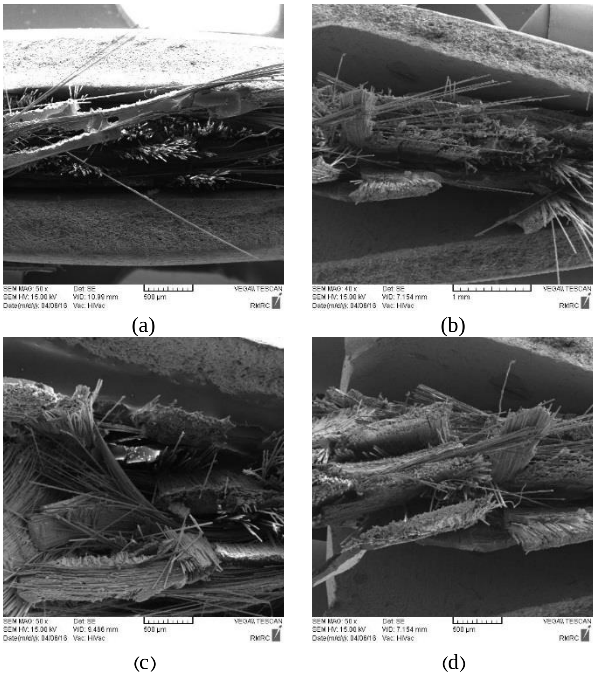

Fig. 11 SEM photographs for impact test specimens: a- 0 wt.% nano-FML/IT, b- 1 wt.% nano-FML/IT, c- 3 wt.% nano-FML/IT, d- 5 wt.% nano-FML/IT

شکل 11 تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه‌های آزمون ضربه:
الف- 0 wt.% nano-FML/IT، ب- 1 wt.% nano-FML/IT،
پ- 3 wt.% nano-FML/IT، ت- 5 wt.% nano-FML/IT

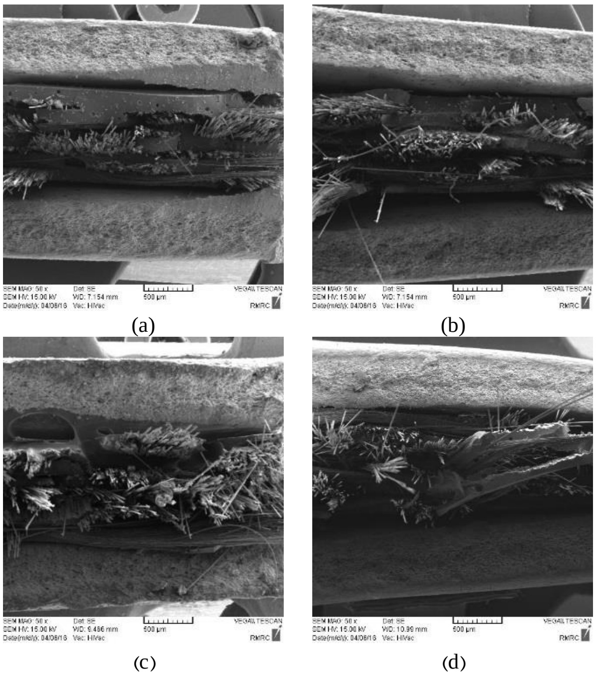

Fig. 12 SEM photographs for impact test specimens: a- 0 wt.% nano-FML/IC, b- 1 wt.% nano-FML/IC, c- 3 wt.% nano-FML/IC, d- 5 wt.% nano-FML/IC

شکل 12 تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه‌های آزمون ضربه،
الف- 0 wt.% nano-FML/IC، ب- 1 wt.% nano-FML/IC،
پ- 3 wt.% nano-FML/IC، ت- 5 wt.% nano-FML/IC

الیاف و سطوح منظم شکست که از ویژگی‌های شکست ترد محسوب می‌شود در کلیه نمونه‌های این گروه قابل مشاهده است. موارد یاد شده در نمونه‌های عاری از نانورس با وضوح بیشتری قابل رویت است. در این نمونه‌ها حداقل میزان بیرون‌آمدگی الیاف و جدایش بین‌لایه‌ای در لایه کامپوزیتی رخ داده و سطح شکست از حالات دیگر (نمونه‌های حاوی نانورس) بسیار منظم‌تر است (12-a).

از آن‌جایی که رزین مورد استفاده در این مطالعه از لحاظ ذاتی ترد محسوب می‌شود و پس از اعمال پیرسازی برودتی قابلیت تغییر شکل یافتن آن کاهش می‌یابد، می‌توان وقوع پدیده تردشدگی در ماده زمینه را به عنوان مهم‌ترین عامل کاهش خواص ضربه‌ای تلقی نمود. با فرض ساخت نمونه‌های با کیفیت از لحاظ اتصال مناسب الیاف به زمینه و استحکام مناسب بین‌لایه‌ای عموماً نمونه‌های کامپوزیتی که در برابر بارگذاری ضربه‌ای، حالات شکستی نظیر بیرون‌آمدگی الیاف و جدایش بین‌لایه‌ای از خود بروز می‌دهند، دارای استحکام ضربه‌ای مناسبی هستند؛ چرا که جهت غلبه بر اصطکاک بالا حین وقوع مکانیسم‌هایی نظیر خارج کردن الیاف از ماده زمینه و جدایش اتصال در ناحیه سطح مشترکی چندلایه، بخش زیادی از انرژی برخورد تلف می‌شود. با توجه به شکل 12 می‌توان مشاهده نمود که حالات شکست بیرون‌آمدگی الیاف و جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های حاوی نانورس به مراتب بیش از نمونه‌های ساخته شده با رزین خالص است؛ بنابراین روشن شد که ارتباط تنگاتنگی بین نحوه و نوع شکست رخ داده در نمونه‌ها با نتایج به دست آمده از آزمون ضربه وجود دارد.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر دو عامل شرایط محیطی و درصد وزنی نانورس بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی مورد بررسی واقع شد. چندلایه‌های الیافی فلزی توسط چهار لایه الیاف بافته‌شده الیاف/ رزین اپوکسی در میان دو ورق از آلیاژ 5083 آلومینیوم ساخته شدند، همچنین نانورس در سه درصد وزنی 1%، 3% و 5% به رزین اپوکسی خالص افزوده شد. نمونه‌ها پیش از انجام آزمون ضربه در معرض انواع مختلف شرایط محیطی شامل پیرسازی برودتی (در دمای 196°C− در نیتروژن مایع)، پیرسازی دمابالا (در دمای 130°C در هوای خشک) و پیرسازی رطوبتی- حرارتی (در دمای 90°C در آب مقطر) قرار گرفتند. طراحی آزمایش‌ها برای تعیین دقیق هر یک از عوامل یادشده بر خواص ضربه‌ای به روش رویه پاسخ صورت گرفت. در تحلیل واریانس مدلی تجربی منطبق با خروجی‌های آزمون ضربه ارائه شد. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عوامل مؤثر اصلی مشخص کرد که کلیه فرایندهای پیرسازی مورد بررسی در این پژوهش نقش مخربی بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی دارند. البته در این میان پیرسازی برودتی و رطوبتی- حرارتی به ترتیب بیشترین و کمترین آثار مخرب را بر میزان استحکام ضربه‌ای به خود اختصاص دادند. نتایج حاکی از تأثیر مثبت نانورس بر خواص ضربه‌ای چندلایه‌ها پیش و پس از اعمال انواع مختلف پیرسازی بود. البته این اثر بهبوددهنده در نمونه‌های پیرشده تحت شرایط رطوبتی- حرارتی و دمابالا به ترتیب دارای حداقل و حداکثر میزان تأثیر بود. درنهایت به منظور بررسی ریخت‌شناسی و حالت شکست نمونه‌ها، تصاویری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد. بررسی تصاویر میکروسکوپی گویای این امر است که حالت شکست بیرون‌آمدگی الیاف به عنوان نشانه‌ای از شکست نرم در نمونه‌های پیرشده تحت شرایط رطوبتی- حرارتی بیش از دو نوع فرایند پیرسازی دیگر است. این حالت شکست که غالباً با صرف انرژی زیاد در ساختار در کامپوزیت‌ها همراه است، می‌تواند دلیل مناسبی برای بالا بودن

خواص ضربه‌ای نمونه‌های پیرشده تحت شرایط رطوبتی- حرارتی نسبت به دو نوع فرایند پیرسازی دیگر قلمداد شود.

8- مراجع

[1] E. Poodts, D. Ghelli, T. Brugo, R. Panciroli, G. Minak, Experimental characterization of a fiber metal laminate for underwater applications, *Composite Structures*, Vol. 129, pp. 36-46, 2015.

[2] M. C. Lafarie-Frenot, S. Rouquie, N. Q. Hoa, V. Bellenger, Comparison of damage development in C/epoxy laminates during isothermal ageing or thermal cycling, *Composites: Part A*, Vol. 37, pp. 662-671, 2006.

[3] A. F. Whitaker, J. A. Burka, J. E. Coster, I. Dalius, S. A. Little, R. F. DeHaye, Protective coatings for atomic oxygen susceptible spacecraft materials-STS-41G results, *Proceedings of The Shuttle Environment and Operations II Conference*, Houston, USA, November 13-15, 1985.

[4] R. C. Tennyson, Composite Materials for Space, *SAMPE Journal*, Vol. 26, No. 2, pp. 7, 1990.

[5] G. J. Czarnecki, E. R. Ripberger, R. J. Meilunas, W. Milan, Thermal degradation of composites, *Proceedings of 52nd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Denver, Colorado, USA, 2011.

[6] C. E. Browning, The mechanisms of elevated temperature property losses in high performance structural epoxy resin matrix materials after exposures to high humidity environments, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 16-24, 1978.

[7] H. Zhuang, J. P. Wightman, The influence of surface properties on carbon fiber/epoxy matrix interfacial adhesion, *Adhesion*, Vol. 62, pp. 213-245, 1996.

[8] M. D. S Islam, E. Melendez-Soto, A. G. Castellanos, P. Prabhakar, Investigation of woven composites as potential cryogenic tank materials cryogenics, *Cryogenics*, Vol. 72, No. 1, pp. 82-89, 2015.

[9] L. B. Vogelesang, A. Vlot, Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures, *Material Process and Technology*, Vol. 103, No. 1, pp. 1-5, 2000.

[10] R. C. Alderliesten, R. Benedictus, Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures, *Aircraft*, Vol. 45, No. 4, pp. 1182-1189, 2008.

[11] E. C. Botelho, M. C. Rezende, L. C. Pardini, Hygrotermal effects evaluation using the iosipescu shear test for glare laminates, *the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 213, 2008.

[12] E. C. Botelho, R. S. Almeida, L. C. Pardini, M. C. Rezende, Influence of hygrothermal conditioning on the elastic properties of Carall laminates, *Applied Composite Materials*, Vol. 14, pp. 209-222, 2007.

[13] A. Usuki, Y. Kojima, M. Kawasumi, M. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, O. Kamigaito, Synthesis of nylon 6-clay hybrid, *Materials Research*, Vol. 8, pp. 1179-1184, 1993.

[14] T. Lan, T. Pinnavaia, Clay-reinforced epoxy nanocomposites, *Chemistry of Materials*, Vol. 6, pp. 2216-2219, 1994.

[15] M. Landowski, K. Imielińska, Degradation of GFRP marine laminates with nano particle modified coatings, *Advances in Materials Science*, Vol. 13, No. 2, pp. 36, 2013.

[16] A. Haque, M. Shamsuzzoha, F. Hussain, D. Dean, S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: Manufacturing, structures, thermal and mechanical properties, *Composite Materials*, Vol. 37, No. 10, pp. 1821-1837, 2003.

[17] S. U. Hamim, R. P. Singh, Effect of hygrothermal ageing on the mechanical properties of fluorinated and non–fluorinated clay–epoxy nanocomposites, *International Scholarly Research*, Vol. 2014, pp. 1-13, 2014.

[18] Y. Kojima, A. Usuki, M. Kwashmi, A. Okada, T. Kurauchi, O. Kamigalto, Sorption of water in nylon 6-clay hybrid, *Applied Polymer Science*, Vol. 49, pp. 259-264, 1993.

[19] M. H. Pol, Gh. H. Liaghat, E. Mehrabani Yeganeh, A. Afrouzian, Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015. (in Persian فارسی)

[20] S. A. V. Hoseini, M. H. Pol, Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nanoclay particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 103-108, 2014. (in Persian فارسی)

[21] A. Masoudi, G. H. Liaghat, M. H. Pol, Experimental investigation of effects of nanoclay on ballistic properties of GLARE, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 141-146, 2014. (in Persian فارسی)

[22] M. Najafi, R. Ansari, A. Darvizeh, experimental study of the influence of mixing method of nanoclay on mechanical properties of polymer composites and fiber metal laminates, *Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 7, No. 2, pp. 63-80, 2017. (in Persian فارسی)

[23] X. Sun, R. Li, K. C. Wong, K. A. R. Mitchell, Surface effects in chromate conversion coatings on 2024-T3 aluminum alloy, *Materials Science*, Vol. 36, pp. 3215-3220, 2001.

[24] V. A. Agubra, P. S. Owuor, M. V. Hosur, Influence of nanoclay dispersion methods on the mechanical behavior of E-glass/epoxy nanocomposites, *Nanomaterials*, Vol. 3, pp. 550-563, 2013.

[25] M. Najafi, R. Ansari, A. Darvizeh, Investigating the effects of surface treatment and nanoparticles addition on mechanical properties of fmls using the response surface methodology, *Mechanical Engineering-Tabriz University*, to appear. (in Persian فارسی)

[26] K. Kusmono, M. W. Wildan, Z. A. Mohd Ishak, Preparation and properties of clay-reinforced epoxy, *Polymer Science*, Vol. 2013, pp. 1-7, 2013.

[27] A. Majumder, A. Goyal, Enhanced production of exocellular glucansucrase from Leuconostoc dextranicum NRRL B1146 using response surface method, *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 9, pp. 3685-3691, 2008.

[28] C. L. Wei, M. Q. Zhang, M. Z. Rong, K. Friedrich, Tensile performance improvement of low nanoparticles filled-polypropylene composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1327-1340, 2002.

[29] L. B. Manfredi, H. De Santis, A. Vázquez, Influence of the addition of montmorillonite to the matrix of unidirectional glass fibre/epoxy composites on their mechanical and water absorption properties, *Composites: Part A*, Vol. 39, pp. 1726-1731, 2008.

[30] M. Najafi, A. Darvizeh, R. Ansari, Evaluation of impact strength of composites and fiber metal laminates hybridized with nanoclay after exposure to high temperature thermal shock, *Science and Technology of Composites*, to appear. (in Persian فارسی)

[31] A. Yasmin, J. J. Luo, J. L. Abot, I. M. Daniel, Mechanical and thermal behavior of clay/epoxy nanocomposites, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 14, pp. 2415-2422, 2006.

[32] S. Zainuddin, M. V. Hosur, Y. Zhou, A. Kumar, S. Jeelani, Durability study of neat/nanophased GFRP composites subjected to different environmental conditioning, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 3091-3099, 2010.

[33] F. H. Chowdhury, M. V. Hosur, S. Jeelani, Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 421, pp. 298-306, 2006.

[34] S. Zainuddin, M. V. Hosur, Y. Zhou, A. Kumar, S. Jeelani, Durability studies of montmorillonite clay filled epoxy composites under different environmental conditions, *Materials Science and Engineering*, Vol. 507, No. 1-2, pp. 117-123, 2009.

[35] J. M. Brown, D. Curliss, R. A. Vaia, Thermoset-layered silicate nanocomposites. Quaternary ammonium montmorillonite with primary diamine cured epoxies, *Chemistry of Materials*, Vol. 12, No. 11, pp. 3376-3384, 2000.