

## علمی - پژوهشی

## بررسی اثر نانو رس بر رفتار حرارتی و مقاومت اشتعال

## نانوکامپوزیت فنولیک - کربن

مهدی مندعلی<sup>۳</sup>

گروه هوافضا، دانشکده فنی مهندسی، واحد  
علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،  
تهران، ایران

حسین مهدوی مقدم<sup>۲</sup>

دانشکده هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین  
طوسی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹)

محمد مجتبی جوادی<sup>۱</sup>

گروه هوافضا، دانشکده فنی مهندسی، واحد  
علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،  
تهران، ایران

## چکیده

سیلیکات‌های لایه‌ای (رس) به دلیل ساختار در ابعاد نانو در بهبود خواص حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. در مقاله حاضر، ابتدا نانو رس بر پایه مونت‌موریلونیت اصلاح‌شده به میزان ۲/۵ و ۷/۵ درصد وزنی به روش اختلاط مذاب در زمینه رزین فنولیک توزیع شد. سپس پارچه کربنی بر پایه پلی‌اکریلونیتریل با مخلوط رزین و نانو رس آغشته شده و کامپوزیت کربن - فنولیک به روش لایه‌گذاری دستی و پخت در اتوکلاو به دمای ۱۶۰ °C به مدت ۴ ساعت ساخته شد تا اثر نانو رس بر ساختار کریستالی و خواص حرارتی آن بررسی شود. فاصله کریستالی صفحات رس با تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) تعیین شد و تجزیه و تحلیل توزیع نانو رس در زمینه فنولیک توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شد. از آزمون گرماسنج مخروطی برای ارزیابی اشتعال‌پذیری نانوکامپوزیت‌ها استفاده شد و اثر نانو رس بر استحکام کششی و برشی بین لایه‌های نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که فاصله کریستالی نانو رس در رزین تا دو برابر افزایش می‌یابد. افزودن نانو رس تا ۲/۵ درصد وزنی سبب افزایش زمان وقوع آفرزش تا دو برابر و کاهش نرخ رهایش گرما تا ۳۶٪ شد که بیانگر تأثیر بسزای نانو رس در تأخیر شروع اشتعال، بهبود مقاومت به اشتعال و دیرسوزی کامپوزیت کربن - فنولیک است. همچنین نتایج نشان داد که افزودن نانو رس اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر استحکام کششی و استحکام برشی نانوکامپوزیت کربن - فنولیک ندارد.

واژه‌های کلیدی: سیلیکات‌های لایه‌ای، نانوکامپوزیت کربن-فنولیک، رفتار حرارتی

## The Investigation of the Nano-Clay Effects on Thermal Behavior and Ignition Resistance of the Phenolic-Carbon Nanocomposite

M. M. Javadi<sup>3</sup>

Department of Aerospace,  
Faculty of Engineering, Science and  
Research Branch, Islamic Azad  
University, Tehran, Iran

H. Mahdavi Moghadam<sup>2</sup>

Faculty of Aerospace Engineering,  
K. N. Toosi University of  
Technology, Tehran, Iran

M. Mandali<sup>1</sup>

Department of Aerospace,  
Faculty of Engineering, Science  
and Research Branch, Islamic  
Azad University, Tehran, Iran

(Received: 09/January /2021 ; Accepted:18/January /2021)

## ABSTRACT

The layered silicates (clay) are being extensively used to improve the thermal properties of polymer-based composites, because of their nano structure. In this study, the modified Montmorillonite-based nano-clay with 2.5 and 7.5 weight percentages were distributed by a melt-mixing method in a phenolic matrix and a poly acrylonitrile-based carbon cloth was used as the reinforcement. The composite was prepared by a manual layout method and cured in an autoclave at 160 °C for 4 hours and the effects of nano-clay loading with 2.5 and 7.5 weight percentages on the crystalline structure and the thermal and mechanical properties of the carbon-polymer-layered silicate nanocomposites were investigated. The silicate galleries spacing of the layered silicate platelets were determined from XRD patterns. The dispersion of the clay layers in the resin was analyzed by TEM studies. The cone calorimetric tests were used to evaluate the flame-retardancy properties of the nanocomposites and the effects of tensile strength and short beam strength were investigated. The results showed that the d-spacing of nanocomposites is doubled due to 2.5 wt. % nano-clay loading. Also, the heat release rate (HRR) is decreased up to 36% by adding the layered silicates. The tensile strength and shear strength of nanocomposites are not influenced considerably by adding the nano-clay.

**Keywords:** Layered Silicate, Carbon-Phenolic Nanocomposites Thermal Behavior.

۱ - دانشجوی دکتری: mmjavadi@gmail.com

۲ - استادیار (نویسنده پاسخگو): mahdavy@kntu.ac.ir

۳ - استادیار: mondali@srbiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

کاهش خواص مکانیکی لنت ترمز جلوگیری شود ۲/۵ درصد وزنی است [۹].

از مهم‌ترین دلایل انتخاب آن ساختار لایه‌ای، فاصله کریستالی زیاد (۹/۶ تا ۴۰ آنگستروم) و وجود نیروی بین‌مولکولی ضعیف بین صفحات هشت‌وجهی آلومینا و صفحات چهاروجهی سیلیکا در آن می‌باشد که مناسب برای نفوذ زنجیره‌های پلیمری خواهد بود. برای افزایش فاصله بین صفحات منفرد و نیز تغییر خواص سطحی هر صفحه منفرد از حالت آب‌دوستی به آب‌گریزی اصلاح سطحی مونت‌موریلونیت با مواد فعال‌کننده سطح مانند آلکیل آمونیم صورت می‌گیرد، بدین ترتیب که کاتیون‌های آلی، انرژی سطحی کانی رس معدنی را پایین آورده و سبب ترکردن آنها با زمینه پلیمری می‌شود [۱۰-۱۲].

در حال حاضر چهار روش اصلی ذیل برای ساخت نانو کامپوزیت‌های پلیمری به کار می‌رود:

- ۱) روش سنتز قالب درجا<sup>۳</sup> (فناوری سل-ژل<sup>۴</sup>)
- ۲) روش درج بین‌لایه‌ای<sup>۵</sup> پلیمر از محلول
- ۳) پلیمریزاسیون بین‌لایه‌ای درجا<sup>۶</sup>
- ۴) روش درج بین‌لایه‌ای پلیمر با ویسکوزیته پایین یا اختلاط مذاب

در مقایسه بین روش‌های فوق، روش درج بین‌لایه‌ای مذاب به دلیل عدم استفاده از مواد گران قیمت، قابلیت استفاده برای اغلب پلیمر و بخصوص پلیمرها با دمای ذوب پایین، فرایندی با پارامترهای قابل کنترل و قابلیت انجام در مقیاس صنعتی، روشی مناسب دیگری برای ساخت کامپوزیت‌های پلیمری-سیلیکات لایه‌ای به نظر می‌رسد که در این پروژه از این روش استفاده می‌شود [۱۳-۱۵]. طی توزیع نانو رس در زمینه پلیمری سه ساختار طبق شکل ۱ به صورت ذیل پدید می‌آید:

- ۱) ساختار فازهای جدا<sup>۷</sup>

کامپوزیت‌های بر پایه فنولیک از مهم‌ترین مواد مهندسی می‌باشند که با توجه به خواص ویژه نظیر فداشوندگی عالی، دوام ساختاری و پایداری حرارتی در کاربردهای عایق دما بالا مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳]. امروزه جهت بهبود خواص حرارتی آن استفاده از نانومواد نظیر نانو رس، نانو الیاف کربن، نانولوله کربن و ترکیب سیلیکونی پلی‌هدرال اولیگومریک سیاسسکوکسان (POSS)<sup>۱</sup> گسترش یافته است. البته استفاده از مواد رسی بر پایه مونت‌موریلونیت<sup>۲</sup> با فرمول عمومی  $(2Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O)$  به عنوان افزودنی جهت بهبود خواص حرارتی در کامپوزیت کربن/ فنولیک اهمیت یافته‌اند [۴ و ۵]. تحقیقات اولیه نشان داده است که نانورس‌ها قابلیت افزایش پایداری حرارتی پلیمرها را دارند که برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ برای کامپوزیت‌های پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA)/ مونت‌موریلونیت اثبات شد. به طوری که افت حرارتی در حدود  $50^\circ C$  برای کامپوزیت با ۱۰٪ وزنی PMMA (۹۰٪ وزنی پرکننده) گزارش شده است. طی یک بررسی دیگر، افزایش مقاومت حرارتی تا  $140^\circ C$  با اضافه شدن ۱۰٪ وزنی رس به زمینه پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) حاصل شده و افزایش مقاومت حرارتی تا  $50^\circ C$  برای کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن (PE)/ رس بین‌لایه‌ای نیز گزارش شده‌اند [۶]. نادری و همکارانش اثر مواد نانو رس را بر کامپوزیت رزین فنولیک و الیاف شیشه نمدی بررسی کردند و نتایج نشان می‌دهد که ذرات نانو رس در رزول نسبت به نووالاک بهتر پخش می‌شود [۷]. همچنین بهرامیان و همکارانش نیز اثر مواد نانو رس را بر کامپوزیت رزین فنولیک و پارچه آزیست مورد بررسی قرار داده‌اند و دریافته‌اند که افزودن نانو رس سبب عملکرد عایقی بهتر کامپوزیت می‌شود [۸].

لطفی و همکارانش نشان دادند که مقدار بهینه نانو رس در رزین فنولیک برای اینکه از کلوخه شدن نانو رس و عدم توزیع یکنواخت آن در بستر رزین فنولیک و همچنین

<sup>3</sup> in situ template synthesis

<sup>4</sup> Sol-gel

<sup>5</sup> intercalation

<sup>6</sup> in situ intercalative

<sup>7</sup> phase separated structure

<sup>1</sup> polyhedral oligomeric silsesquioxane

<sup>2</sup> Montmorillonite

T700 بررسی کرده است. وی نشان داد که افزودن ۵٪ نانو رس به رزین موجب کاهش حداکثر نرخ رهائش گرما (HRR) از  $111 \text{ kW/m}^2$  به  $86 \text{ kW/m}^2$  (با اختلاف ۲۲٪) می‌شود [۱۹].

در فعالیت‌های گذشته توسط سایر پژوهشگران، اثر نانورس بر کامپوزیت کربن - فنولیک با تقویت‌کننده الیاف شیشه نمدی [۷] یا تقویت‌کننده آزیست [۸] یا تقویت‌کننده الیاف کربن از نوع رایون [۱۸] بررسی شده است. درحالی‌که علی‌رغم کاربرد کامپوزیت کربن - فنولیک با تقویت‌کننده الیاف کربن از نوع پلی‌اکریلونیتریل، در قطعاتی از نازل موتور سوخت جامد، اثر نانو رس بر خواص این نوع کامپوزیت گزارش نشده است لذا نوآوری و هدف مقاله حاضر، بررسی اثر نانو رس بر مقاومت به اکسیداسیون و فرسایش و خواص مکانیکی کامپوزیت کربن - فنولیک با تقویت‌کننده پارچه کربن بر پایه پلی‌اکریلونیتریل است. بدین ترتیب در این مقاله نانو رس به میزان ۲/۵ و ۷/۵ درصد وزنی به روش اختلاط مذاب بر رزین فنولیک افزوده شده و قطعات به روش لایه‌گذاری دستی و پخت در اتوکلاو ساخته می‌شوند.

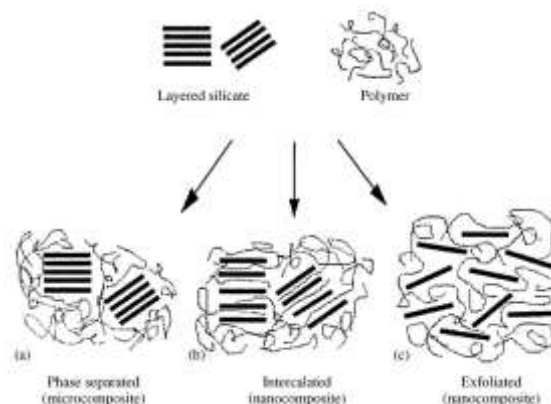
## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پروژه از رزین فنولیک با نوع رزول با نام تجاری IL800/2 ساخت شرکت رزیتان ایران با مقدار جامد  $75 \pm 3$  درصد، لزجت ۸۰۰-۶۰۰ mpa.s و چگالی  $1.2 \pm 0.02 \text{ gr/cm}^3$  در دمای  $20^\circ\text{C}$  استفاده شد. پارچه کربنی بر پایه پلی‌اکریلونیتریل از نوع 6K, 2x2 twill weave با ضخامت ۰/۴۳ mm و وزن در سطح  $370 \text{ g/m}^2$  از شرکت فایبر گلاست استفاده شد. رس مونت‌موریلونیت با نام تجاری کلوزست [(HE)2MT] 30B ساخت شرکت سوئرن کلی پروداکت با فاصله صفحات بلوری ( $d_{100}$ ) برابر ۱۸/۵ آنگستروم مورد استفاده قرار گرفت و برای رقیق کردن رزین و شستشوی محصول از اتانول (اتیل الکل) صنعتی ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) با خلوص ۹۸٪ استفاده شد.

در حدود ۳۰ گرم از رزین حاوی حلال برداشته شده و پس از توزین دقیق، در خشک‌کن در دمای  $75^\circ\text{C}$  به مدت ۴ ساعت قرار داده شد تا پس از توزین مجدد، درصد حلال آن به دست آید. با احتساب مقدار حلال، برای هر

(۲) ساختار بین لایه‌ای<sup>۱</sup>

(۳) ساختار ورقه ورقه‌ای<sup>۲</sup> یا لایه لایه‌ای<sup>۳</sup> [۱۱]



شکل (۱): ساختارهای نانو کامپوزیت رسی [۱۱]

ساختار ورقه ورقه‌ای با لایه‌های کاملاً جدا شده از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است زیرا برهم‌کنش لایه‌های رس و پلیمر را به حداکثر رسانده و تغییرات بسیار مشهودی را در خواص فیزیکی - مکانیکی پلیمر ایجاد می‌کند. در واقع مورفولوژی واقعی کامپوزیت‌های پلیمر- نانو خاک رس ترکیبی از سه مورفولوژی ایده‌آل است [۱۶].

هر چند تایت و همکارانش [۱۷] نشان دادند که افزودن تا ۲٪ وزنی نانو لوله کربن به کامپوزیت فنولیک / کربن بر پایه رایون موجب کاهش فرسایش آن از ۲۶٪ به ۲۳٪ خواهد شد اما کو نشان داد که افزودن ۲/۵٪ و ۵٪ وزنی نانو رس اثر مهمی بر مقاوم حرارتی کامپوزیت فنولیک / کربن بر پایه رایون ندارد ولی افزودن ۷/۵٪ وزنی نانو رس سبب بهبود مقاومت به فداشوندگی تا ۱۴٪ می‌شود. همچنین کو نتیجه گرفت که در کامپوزیت فنولیک / کربن بر پایه رایون، افزودن ۵٪ نانو رس سبب افزایش ۲۴٪ زمان آفرزش<sup>۴</sup>، کاهش ۲۵٪ بیشینه نرخ رهائش گرما (HRR)<sup>۵</sup> و کاهش ۲۸٪ متوسط نرخ رهائش گرما در آزمون گرماسنج مخروطی خواهد شد [۱۸]. از طرفی دیگر آسارو اثر افزودن مقدار ۵٪ وزنی نانو رس بر رزین فنولیک از نوع رزول را بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت بر پایه الیاف کربن از نوع

<sup>1</sup> intercalated

<sup>2</sup> exfoliated

<sup>3</sup> delaminated

<sup>4</sup> Ignition

<sup>5</sup> Heat Release Rate

شکل ۲ نشان داده شده است. استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت کربن - فنولیک طبق روش A استاندارد ASTM D790 با نرخ کرنش  $0.1 \text{ mm/mm/min}$  انجام شد. همچنین استحکام برشی بین لایه‌ای (ILSS) نمونه‌های کامپوزیت کربن - فنولیک بر اساس استاندارد ASTM D2344 با نرخ جابجایی  $1/0 \text{ mm/min}$  صورت گرفت. برای انجام آزمون‌های استحکام کششی و برشی از دستگاه یونیورسال سنتام مدل STM-20 استفاده شد.



شکل (۲): تجهیزات آزمون گرماسنج مخروطی

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۳ الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه نانو رس اولیه و نمونه نانو رس در رزین و جدول ۲ نتایج زاویه پراش و فاصله صفحات کریستالی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در الگوی پراش اشعه ایکس ملاحظه می‌شود، با افزودن نانو رس در کامپوزیت، پیک انعکاسی اساسی (d100) به سمت زوایای پایین تری منتقل شده و به شدت کاهش می‌یابد. نمونه با  $2/5\%$  نانو رس با ساختار ورقه ورقه‌ای در رزین توزیع شده است، به طوری که الگوی پراش اشعه ایکس از حالت کریستالی خارج شده و در شدت‌های کم، فاصله صفحات کریستالی برابر  $51/72$  آنگستروم را نشان می‌دهد. در نمونه حاوی  $7/5\%$  نانو رس که هر دو توزیع ورقه ورقه‌ای و بین لایه‌ای ملاحظه می‌شود، البته فاصله صفحات در نمونه حاوی  $7/5\%$  در حد  $32/64$  آنگستروم می‌باشد. بدین ترتیب استفاده از میزان نانورس کمتر، موجب توزیع بهتر نانورس

ترکیب، مقدار  $1200$  گرم رزین وزن شده و با توجه به جدول ۱ مقدار نانو رس لازم به آن اضافه می‌شود. ابتدا مقدار رس لازم در خشک‌کن به دمای  $120^\circ\text{C}$  به مدت یک ساعت خشک شد تا رطوبت آن خارج شود. الکل با مقدار حدود  $10$  برابر وزن رس به آن اضافه شده و به مدت  $2$  ساعت با دور  $700 \text{ rpm}$  همزده شد تا سوسپانسیون یکنواختی از الکل و رس حاصل شود. از طرفی دیگر مخلوط رزین و الکل به مدت  $2$  ساعت با دور  $345 \text{ rpm}$  همزده شد، سپس سوسپانسیون رس بر آن اضافه گردید. مخلوط نهایی به مدت  $72$  ساعت در دور  $345 \text{ rpm}$  همگن گردید. مخلوط رزین و نانو رس بر پارچه کربنی آغشته شده و به مدت  $48$  ساعت در محیط آزاد با دمای حدود  $25^\circ\text{C}$  خشک شد. سپس ساخت قطعه به روش لایه‌گذاری دستی انجام شد و عملیات پخت در اتوکلاو با دمای  $160^\circ\text{C}$  به مدت  $4$  ساعت انجام شد.

جدول (۱): ترکیب مواد اولیه

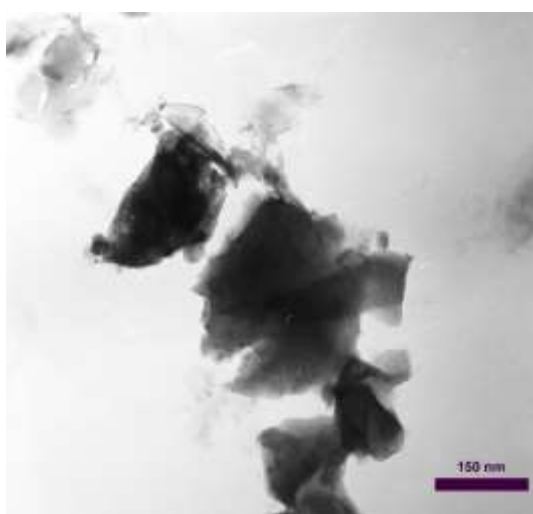
کد نمونه	درصد وزنی نانو رس	درصد وزنی رزین	درصد وزنی پارچه کربنی
بدون نانو رس	۰	۴۵	۵۵
نانو رس $2/5\%$	$2/5$	$42/5$	۵۵
نانو رس $7/5\%$	$7/5$	$37/5$	۵۵

برای تعیین فاصله کریستالی صفحات رس در مخلوط نانو رس با رزین از دستگاه پراش اشعه ایکس فلیپس مدل PW1800 استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل تصویری نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) فلیپس مدل Cm120 با ولتاژ شتابی برابر  $100 \text{ kV}$  استفاده شد. چگالی نانوکامپوزیت‌ها به روش ارشمیدس و بر اساس استاندارد ASTM D792 [۲۰] به دست آمد. برای ارزیابی اشتعال پذیری نانوکامپوزیت‌ها، آزمون گرماسنج مخروطی طبق استاندارد ISO 5660-1 [۲۱] با تابش حرارت  $50 \text{ kW/m}^2$  بر نمونه‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت با ابعاد  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  و ضخامت  $1 \text{ cm}$  انجام گرفت. نمایی از تجهیزات آزمون گرماسنج مخروطی در

رس تأثیر بسیاری بر نرخ رهایش گرما و در نتیجه دیرسوزی نمونه‌ها دارد، به طوری که نمونه حاوی ۲/۵ درصد نانو رس بهترین نتیجه دیرسوزی را داشته و نتیجه نمونه حاوی ۷/۵ درصد نانو رس بهتر از نمونه فاقد نانو رس است. با افزودن ۲/۵٪ نانو رس، زمان وقوع افروزش از ۱۴۴ به ۲۹۸ ثانیه افزایش یافته و حداکثر نرخ رهایش گرما تا ۳۶٪ کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد نانو رس موجب افزایش پیوند مولکولی رزین شده و دیرسوزی آن را بهبود داده است [۸ و ۱۶].

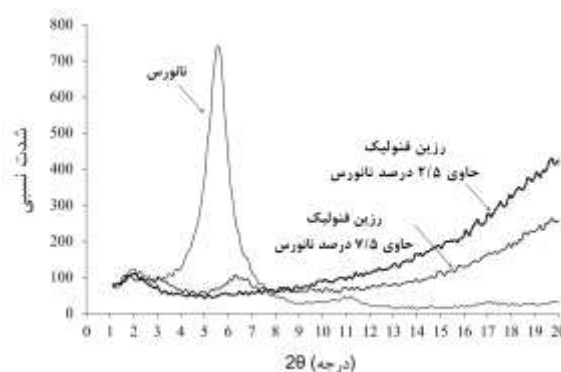


شکل (۴): تصویر TEM رزین حاوی ۲/۵ درصد نانو رس



شکل (۵): تصویر TEM رزین حاوی ۷/۵ درصد نانو رس

در زمینه فنولیک شده و ساختار ورقه ورقه حاصل می‌شود ولی با افزایش مقدار نانو رس، توزیع آن در زمینه فنولیک دشوارتر شده و ضمن کاهش فاصله صفحات کریستالی رس، توزیع بین‌لایه‌ای حاصل می‌شود.



شکل (۳): الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌ها

جدول (۲): زاویه پراش و فاصله صفحات کریستالی نمونه‌ها

شرح نمونه	زاویه پراش $2\theta$ (°)	فاصله صفحات (d100) Å	کاهش زاویه $\Delta 2\theta$ (°)	افزایش فاصله $\Delta d100$ (Å)
نانو رس اولیه	۵/۵۶	۱۸/۴۳	-	-
رزین با ۲/۵٪ نانو رس	۱/۹۸	۵۱/۷۲	-۳/۵۸	۳۳/۲۹
رزین با ۷/۵٪ نانو رس	۳/۱۴	۳۲/۶۴	-۲/۴۲	۱۴/۰۲

در شکل‌های ۵ و ۶، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) رزین حاوی ۲/۵ درصد و ۷/۵ درصد نانو رس نمایش داده شده است. خطوط مشکی بیانگر لایه‌های رس و ابرهای خاکستری نمایشگر زمینه فنولیک می‌باشد. تصاویر TEM نشان‌دهنده توزیع ورقه ورقه‌ای و بین‌لایه‌ای در رزین حاوی ۲/۵ درصد نانو رس و توزیع بین‌لایه‌ای در رزین حاوی ۷/۵ درصد رس است.

چگالی نمونه‌های کامپوزیتی طبق جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزودن نانو رس چگالی نمونه تا حد چند صدم گرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد.

شکل ۶ نمودار نرخ رهایش گرما برای نمونه‌ها و جدول ۴ زمان وقوع افروزش و حداکثر نرخ رهایش گرما را نشان می‌دهد. پس از آزمون گرماسنج مخروطی، نمونه‌ها دچار سوزش شده و زغال کربن از آن باقی ماند. با توجه به نتایج آزمون گرماسنج مخروطی، ملاحظه می‌شود که افزودن نانو

جدول (۳) نتایج چگالی نمونه‌ها

نمونه	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )

می‌شود که خواص مکانیکی افزایش نمی‌یابد. با توجه به اینکه در کامپوزیت کربن - فنولیک استحکام مکانیکی اساساً بر مبنای تقویت‌کننده کربن است و وابستگی کمتری به زمینه فنولیک دارد، لذا افزودن نانو رس بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر استحکام کششی و استحکام برشی بین لایه‌های اثر زیادی ندارد، حتی وجود نانورس در کامپوزیت کربن - فنولیک می‌تواند فضای باز بیشتری را در آن ایجاد کند که موجب کاهش جزئی خواص مکانیکی آن شود [۱۹].

**جدول (۵):** خواص مکانیکی کامپوزیت با افزودن نانو رس

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	استحکام برشی بین لایه‌های (ILSS) (MPa)
بدون نانو رس	۱۴۲/۴	۲۳/۸۲
نانو رس ۲/۵٪	۱۳۵/۲	۲۴/۳۵
نانو رس ۷/۵٪	۱۱۵/۵	۲۲/۷۲

#### ۴- نتیجه‌گیری

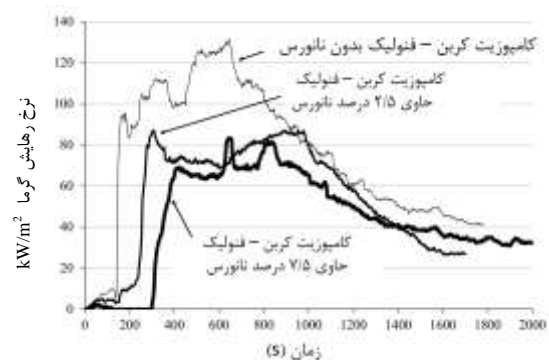
در مقاله حاضر، کامپوزیت با زمینه فنولیک و تقویت‌کننده پارچه کربن از نوع پلی اکریلونیتریل به روش لایه‌گذاری دستی و پخت در اتوکلاو ساخته شده و اثر نانو رس بر ساختار کریستالی و خواص حرارتی و مکانیکی آن بررسی شده است. نانورس به میزان ۲/۵ و ۷/۵ درصد وزنی به روش اختلاط مذاب در زمینه رزین فنولیک توزیع شده بود.

نتایج الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نشان داد که فاصله صفحات کریستالی در نمونه ۲/۵ و ۷/۵ درصد وزنی از ۱۸/۴۳ آنگستروم به ۵۱/۷۲ و ۳۲/۶۴ آنگستروم افزایش یافته است. نانو رس با مقدار ۲/۵ درصد وزنی در رزین، توزیع ورقه ورقه‌ای و بین‌لایه‌ای داشته و با ۷/۵ درصد وزنی از ساختار بین‌لایه‌ای برخوردار است، بدین ترتیب استفاده از میزان نانورس کمتر، ساختار ورقه ورقه‌ای حاصل شده و با افزایش مقدار نانو رس، ضمن کاهش فاصله صفحات کریستالی رس، توزیع بین‌لایه‌ای حاصل می‌شود.

نتایج آزمون گرماسنج مخروطی نشان داد که افزودن ۲/۵٪ نانو رس سبب افزایش زمان وقوع آفرزش از ۱۴۴ به ۲۹۸ ثانیه می‌گردد، در نتیجه شروع اشتعال را به تأخیر می‌اندازد همچنین طبق نتایج آزمون گرماسنج مخروطی، با افزودن ۲/۵ درصد وزنی نانو رس در کامپوزیت کربن-

کامپوزیت کربن - فنولیک بدون نانو رس	۱/۴۲۵
کامپوزیت کربن - فنولیک ۲/۵٪ نانو رس	۱/۴۶۲
کامپوزیت کربن - فنولیک ۷/۵٪ نانو رس	۱/۴۸۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود تجزیه حرارتی نانو کامپوزیت‌های پلیمری تا حدودی به محدوده زمان بالاتری منتقل می‌شود که نشانه بهبود پایداری حرارتی است. حضور کانی‌های رس توسط چندین عامل، سبب پایداری حرارتی نانو کامپوزیت‌ها می‌شود: اولاً انرژی بیشتری برای برش زنجیره موردنیاز خواهد بود، ثانیاً ذرات رس با نسبت منظر بالا نفوذ محصولات فرار تجزیه را به تأخیر انداخته و سبب کاهش نفوذپذیری می‌شوند [۶ و ۲۲].



**شکل (۶):** نمودار نرخ رهائش گرما برای نمونه‌ها

**جدول (۴):** زمان وقوع آفرزش و حداکثر نرخ رهائش گرما

نمونه	زمان وقوع آفرزش (s)	حداکثر نرخ رهائش گرما (kW/m²)
کامپوزیت کربن - فنولیک بدون نانو رس	۱۴۴	۱۳۱/۷۸
کامپوزیت کربن - فنولیک حاوی ۲/۵ درصد نانو رس	۲۹۸	۸۳/۴۵
کامپوزیت کربن - فنولیک حاوی ۷/۵ درصد نانو رس	۱۵۲	۸۷/۰۳

در جدول ۵ نتایج استحکام کششی و استحکام برشی بین لایه‌ای آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استحکام کششی کامپوزیت کربن - فنولیک با افزودن نانو رس به کامپوزیت تا حدی کاهش می‌یابد و استحکام برشی بین لایه‌ای با افزودن ۲/۵ درصد نانو رس افزایش جزئی دارد که با افزایش نانو رس تا ۷/۵ درصد، استحکام برشی نیز به صورت جزئی کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از توزیع نامناسب و تجمع نانو رس در نمونه با ۷/۵ درصد وزنی باشد. علیرغم نتایج حرارتی مناسب با افزودن نانو رس، ملاحظه

- nanocomposite”, Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran, pp., 2019 (in Persian).
10. Pavlidou, S. and Papaspyrides, C. “A review on polymer-layered silicate nanocomposites”, *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 33, pp. 1119-1198, 2008.
  11. Kiliaris, P. and Papaspyrides, C. “Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: an overview of flame retardancy,” *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 35, pp. 902-958, 2010.
  12. Senthilkumar, K., Siva, I., Karthikeyan, S., Pulikkalparambil, H., Parameswaranpillai, J., Sanjay, M. “Mechanical, Structural, Thermal and Tribological Properties of Nanoclay Based Phenolic Composites,” in *Phenolic Polymers Based Composite Materials*, ed: Springer, 2020, pp. 123-138.
  13. Malwela, T. and Ray, S. S. “Unique morphology of dispersed clay particles in a polymer nanocomposite,” *Polymer*, Vol. 52, pp. 1297-1301, 2011.
  14. Ray, S. S. and Okamoto, M. “Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing,” *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 28, pp. 1539-1641, 2003.
  15. Jafari Nejad, S., Abolghasemi, H., Ahmadi, S. J., and Ghorbanian, S. “Mechanical Properties of PP/Clay Nanocomposites Prepared by Melt Blending,” *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, Vol. 30, pp. 61-67, 2011 (in Persian).
  16. Nuhiji, B., Attard, D., Thorogood, G., Hanley, T., Magniez, K., and Fox, B. “The effect of alternate heating rates during cure on the structure-property relationships of epoxy/MMT clay nanocomposites,” *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 71, pp.1761-1768, 2011.
  17. Tate, J., Gaikwad, S., Theodoropoulou, N., Trevino, E., and Koo, J. “Carbon/phenolic nanocomposites as advanced thermal protection material in aerospace applications,” *J. Compos.*, 2013.
  18. Koo, J. H., Pilato, L. A., and Wissler, G. E. “Polymer nanostructured materials for propulsion systems,” *J. Spacecraft Rockets*, Vol. 44, pp. 1250-1262, 2007.
  19. Asaro, L., Villanueva, S., Alvarez, V., Manfredi, L., and Rodríguez, E. “Fire performance of composites made from carbon/phenolic prepregs with nanoclays,” *J. Compos. Mater.*, Vol. 51, pp. 3515-3524, 2017.
  20. ASTM D792, “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement,” ed, 2008.
  21. ISO 5660-1, “Reaction-to-Fire Tests Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate, Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method),” ed, 2002.
  22. Ke, Y. and Stroeve, P. “Polymer-layered silicate and silica nanocomposites,” Elsevier, 2005.
- فنولیک، حداکثر نرخ رهایش گرما تا ۳۶٪ کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد نانو رس موجب افزایش پیوند مولکولی رزین شده و دیرسوزی آن را بهبود داده است. در نتیجه افزایش نانو رس سبب بهبود مقاومت به اشتعال نانو کامپوزیت پلیمری می‌شود.
- نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که افزودن نانو رس به میزان ۲/۵ و ۷/۵ درصد وزنی بر کامپوزیت کربن - فنولیک اثر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر استحکام کششی و استحکام برشی بین لایه‌ای ندارد و حتی ممکن است به دلیل تجمع نانو رس در نمونه ۷/۵ درصد وزنی موجب کاهش استحکام کششی شود.

## ۵- مراجع

1. Min Ho Choi, I. J. C. “Mechanical and Thermal Properties of Phenolic Resin Layered Silicate Nanocomposites Synthesized by Melt Intercalation”, *J. Appl Polm. Sci.*, Vol. 90, pp. 2316–2321, 2003.
2. Natali, M., Kenny, J., and Torre, L. “Phenolic matrix nanocomposites based on commercial grade resols: Synthesis and characterization”, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 70, pp. 571-577, 2010.
3. Rao, G. R., Srikanth, I., and Reddy, K. L. “Effect of organo-modified montmorillonite nanoclay on mechanical, thermal and ablation behavior of carbon fiber/phenolic resin composites”, *Defence Technol.*, 2020, In Press.
4. Koo, J. “Fundamentals, Properties, and Applications of Polymer Nanocomposites”, Cambridge University Press, 2016.
5. Baldissera, A. F. and Ferreira, C. A. “Clay-Based Conducting Polymer Nanocomposites, in *Conducting Polymer Hybrids*”, ed: Springer, 2017, pp. 143-163.
6. Ajayan, P. M., Schadler, L. S., and Braun P. V. “Nanocomposite science and technology”, John Wiley & Sons, 2006.
7. Naderi, G., Beheshty, M., and Baba Mohammadi M. “Effect of Composition and Type of Phenolic Resin on Mechanical Properties and Morphology of Phenolic Nanocomposites”, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 22, pp. 421-428, 2010.
8. Bahramian, A. R. and Kokabi, M. “Ablation mechanism of polymer layered silicate nanocomposite heat shield”, *J. hazard. mater.*, vol. 166, pp. 445-454, 2009.
9. Lotfi, M., S. Kasiriha, H., and Shafiee, M. “Improvement of Mechanical properties of car brake pads with phenolic/Nano clay

