

## Improvement in Ablation and Thermal Properties of Ultra-lightweight Silicone/Cork Composites Insulator Using Novolac Aerogel

Majid Haghiri Madadi, Ahmad Reza Bahramian\*, and Hamidreza Hadizade Raeisi

Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-114, Tehran, Iran

Received: 22 April 2017, accepted: 30 December 2017

### ABSTRACT

**Hypothesis:** Thermal insulating materials are essential in optimization of energy consumption and to reduce heat and energy loss. Lightweight thermal insulator materials can reduce weight/density and improve the performance of final product. One of the ways to approach lightweight thermal insulator is to develop porous polymeric nanocomposites with low density and good thermal insulation properties. Cork is a cellulosic material with microcells that are widely used in lightweight thermal insulating applications. Porous structure in cellulosic cork allows it to be chosen as an adequate thermal insulator, especially in aerospace applications. Since cork has low density and very low thermal conductivity, many research works are conducted to reduce its thermal conductivity and improving its thermal stability.

**Methods:** In order to improve the thermal insulation performance and ablation of silicone/cork composite, a novolac aerogel nanostructure was used. Novolac aerogel had a nanoporous structure with very low density, thermal conductivity and thermal diffusivity. The presence of novolac aerogel in the microcell structure of cork and filling its porous spaces led to higher density of the cork, eliminated the air thermal convection process in its microcells, and it therefore decreased the thermal conductivity and thermal diffusivity of the composites, significantly.

**Finding:** The mechanism of heat transfer elimination of novolac aerogel by convection could decrease the thermal conductivity and thermal diffusivity of silicone/cork composites by 39% and 45%, respectively, due to pore size reduction. Also, the aerogel could increase thermal stability and thermal resistance and the residual char with adequate thermal stability. Moreover, a resole/graphene oxide coating layer on the composites surface could significantly improve the composites thermal ablation. Under these conditions, the back surface temperature of composite in the presence of aerogel nanostructure decreased by 55%.

#### Keywords:

ultra-lightweight insulator,  
cork,  
ablative insulator,  
thermal conductivity,  
novolac aerogel

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [abahramian@modares.ac.ir](mailto:abahramian@modares.ac.ir)

#### Please cite this article using:

Haghiri Madadi M., Bahramian A.R., and Hadizade Raeisi H.R., Improvement in Ablation and Thermal Properties of Ultra-lightweight Silicone/Cork Composites Insulator Using Novolac Aerogel, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **30**, 517-529, 2018.

## بهبود خواص گرمایی و فداشوندگی عایق‌های فراسبک کامپوزیتی سیلیکون-چوب‌پنبه با استفاده از ابروژل نووالاک

مجید حقیرمددی، احمدرضا بهرامیان\*، حمیدرضا هادی‌زاده رئیسی

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۱۱۵

دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۹

### چکیده

عایق‌های گرمایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اتلاف گرمایی در خور توجه هستند. استفاده از عایق‌های سبک سبب کاهش وزن و بهبود کارایی محصول نهایی می‌شود. یکی از رویکردها برای دستیابی به عایق سبک، ساخت نانوکامپوزیت‌هایی با چگالی کم و خواص عایقی مناسب است. چوب‌پنبه، ماده‌ای سلولوزی با سلول‌های میکرونی است که کاربرد گسترده‌ای در عایق‌های گرمایی سبک دارد. به دلیل وجود ساختار متخلخل در چوب‌پنبه، این ماده به‌عنوان یکی از بهترین عایق‌های گرمایی استفاده می‌شود که چگالی و رسانندگی گرمایی کمی دارد. تلاش‌های بسیاری برای کاهش هرچند ناچیز رسانندگی گرمایی آن انجام شده است. در این پژوهش، برای بهبود عملکرد گرمایی و فداشوندگی کامپوزیت سیلیکون-چوب‌پنبه، از ابروژل نووالاک با ساختار متخلخل سلول‌باز نانومتری و چگالی، رسانندگی گرمایی و نفوذ گرمایی بسیار کم استفاده شده است. وجود ابروژل نووالاک در حفره‌های میکرونی چوب‌پنبه و پرکردن آن‌ها، سبب افزایش نسبی چگالی کامپوزیت، حذف انتقال گرمای جابه‌جایی هوا در سلول‌های چوب‌پنبه، کاهش چشمگیر رسانندگی گرمایی و نفوذ گرمایی چوب‌پنبه می‌شود. رسانندگی گرمایی بسیار کم ابروژل، دستیابی به کامپوزیتی با رسانندگی گرمایی و چگالی کم را ممکن ساخته است، به طوری که وجود ابروژل در کامپوزیت سیلیکون-چوب‌پنبه سبب کاهش ۳۹٪ رسانندگی گرمایی و ۴۵٪ نفوذ گرمایی کامپوزیت نسبت به کامپوزیت بدون ابروژل شده است. با وجود ابروژل، پایداری گرمایی و مقاومت گرمایی کامپوزیت افزایش و پایداری زغال تشکیل شده بهبود یافته است. همچنین، وجود ابروژل در حفره‌های چوب‌پنبه و اعمال پوشش نهایی رزول-گرافن اکسید روی سطح نمونه، سبب بهبود رفتار فداشوندگی کامپوزیت سیلیکون-چوب‌پنبه-ابروژل و کاهش ۵۵٪ دمای پست کامپوزیت فداشونده نسبت به نمونه بدون ابروژل شد.

### واژه‌های کلیدی

عایق فراسبک،

چوب‌پنبه،

عایق فداشونده،

رسانندگی گرمایی،

ابروژل نووالاک

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

[abahramian@modares.ac.ir](mailto:abahramian@modares.ac.ir)

## مقدمه

چوب‌پنبه ماده‌ای طبیعی، تجدیدپذیر و پایدار بوده و از بافت یکنواختی از سلول‌های با دیواره نازک تشکیل شده است [۱]. ساختار دیواره چوب‌پنبه به شکل سلول‌بسته و شبیه لانه زنبور [۲] و مواد شیمیایی تشکیل‌دهنده دیواره آن سابرین (۶۰-۳۰٪)، لیگنین (۲۲-۱۹٪)، پلی‌ساکارید (۲۰-۱۲٪) و مواد فرار (۲۰-۹٪) است [۳]. از مهم‌ترین ویژگی‌های گرمایی چوب‌پنبه، می‌توان به رسانندگی گرمایی کم ( $0.45-0.40 \text{ W/mK}$ )، چگالی جذب انرژی زیاد، ضریب انبساط گرمایی کم ( $1/K \times 10^{-5}$ )، چگالی کم ( $1.7-1.4 \text{ g/cm}^3$ ) و مقاومت به آتش اشاره کرد [۴-۶]. برای افزایش خواص مکانیکی، گرمایی و فداشوندگی چوب‌پنبه، می‌توان از بسترهای پلیمری استفاده کرد [۵، ۷، ۸]. بهبود چوب‌پنبه به کمک بسترهای پلیمری سبب تغییرات چشمگیری در خواص مکانیکی و گرمایی و استفاده در کاربردهای ویژه (مانند هوافضا) شده است [۹]. Sen و همکاران [۶] نشان دادند، چوب‌پنبه تا دمای  $200^\circ\text{C}$  پایدار است و ساختار دیواره‌ها سالم می‌ماند. اما، پس از این دما، بسته به شار گرمایی، دما و مدت گرمادهی، کاهش ضخامت دیواره‌ها، تخریب و تغییر خواص چوب‌پنبه مشاهده می‌شود. در پژوهش دیگری، Fernandes و همکاران [۹] اثر وجود چوب‌پنبه در بستر پلیمری را بررسی کردند. در این پژوهش، افزودن ۵۰٪ پودر چوب‌پنبه به بستر PE و PP موجب بهبود مقاومت به آتش و خواص مکانیکی هر دو کامپوزیت شده است. همچنین، وجود چوب‌پنبه در این کامپوزیت سبب کاهش سرعت تخریب کامپوزیت شده و با افزایش دمای تخریب، همانند تأخیرانداز شعله عمل کرده است. در پژوهش دیگری، وجود چوب‌پنبه سبب بهبود خواص مکانیکی، ضربه‌پذیری و گرمایی اپوکسی شده است [۱۰، ۱۱]. Bachar و همکاران [۱۲] با استفاده از چوب‌پنبه توانستند خواص گرمایی مصالح ساختمانی را به‌طور شایان توجهی بهبود داده و با کاهش ۲۹٪ چگالی، وزن محصول نهایی را کاهش دهند. همچنین در پژوهش دیگری، کاهش اندازه پودر چوب‌پنبه و توزیع مناسب آن سبب کاهش شایان توجه رسانندگی گرمایی شده است [۱۳]. بنابراین انتظار می‌رود، با کاهش اندازه حفره‌های چوب‌پنبه، رسانندگی گرمایی نیز کاهش یابد.

Gul و همکاران در دو پژوهش مشابه [۱۴، ۱۵] اثر چوب‌پنبه را بر خواص مکانیکی و گرمایی لاستیک EPDM با هدف یافتن جایگزین مناسبی برای پرکننده آزبست بررسی کردند. وجود ۲۰٪ چوب‌پنبه در لاستیک EPDM موجب افزایش استحکام کششی و سختی شده و چگالی کامپوزیت ۳۹٪ کاهش یافته است. وجود چوب‌پنبه در بستر سبب زغال‌گذاری و کاهش مقدار تخریب شده و به‌عنوان عایق فداشونده، نقش ایفا کرده است.

ایروژل‌ها دسته‌ای از مواد متخلخل سلول‌باز هستند که خواص منحصر به فردی از جمله چگالی بسیار کم، تخلخل بیش از ۸۰٪، حفره‌های نانومتری، مساحت سطح زیاد، رسانندگی گرمایی بسیار کم و پایداری شیمیایی و گرمایی زیادی دارند [۱۶، ۱۷]. ایروژل‌ها به دلیل خواص و ساختار منحصر به فرد گفته شده، کاربردهای زیادی در عایق‌های گرمایی و صوتی، سپرهای گرمایی، ژاکت‌های ابرعایق و کاربردهای الکترونیکی دارند [۱۸، ۱۹]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های محدودی برای بهبود خواص عایقی چوب‌پنبه به‌وسیله ساختارهای متخلخل نانومتر انجام شده است. هدف این پژوهش‌ها، دستیابی به کمترین چگالی و کاهش رسانندگی گرمایی بوده و خواص فداشوندگی کامپوزیت بررسی نشده است. وجود ایروژل سیلیکایی در چوب‌پنبه سبب کاهش رسانندگی گرمایی از  $0.99 \text{ W/mK}$  به  $0.85 \text{ W/mK}$  و بهبود خواص مکانیکی آن شده است [۲۰]. با توجه به کم‌بودن رسانندگی گرمایی چوب‌پنبه در میان مواد عایق گرمایی، کاهش رسانندگی گرمایی گزارش شده برای وجود ایروژل در چوب‌پنبه، شایان توجه است. Ximenes و همکاران [۲۱] با بررسی هم‌زمان ساختارهای متخلخل مختلف نشان دادند، وجود چوب‌پنبه سبب کاهش رسانندگی گرمایی نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل کاهش سهم انتقال گرمای رسانایی شده است.

بنابراین چالش اصلی، دستیابی به سامانه‌ای با کمترین چگالی و بهترین خواص عایقی است. با توجه به سازوکارهای رسانندگی گرمایی و جابه‌جایی در سلول‌های میکرومتر چوب‌پنبه و کم‌بودن رسانندگی گرمایی به علت ساختار متخلخل چوب‌پنبه، انتظار می‌رود، با کاهش اندازه سلول‌ها یا پرکردن سلول‌های میکرومتری با مواد متخلخل نانومتری، کاهش چشمگیری در رسانندگی گرمایی و سهم سازوکار جابه‌جایی انتقال گرما در سلول چوب‌پنبه مشاهده شود. همچنین، با توجه به ساختار شیمیایی حلقوی [۲۲] و حفره‌های نانومتری نوالاک [۲۳، ۲۴] انتظار می‌رود، وجود ایروژل نوالاک در سلول‌های چوب‌پنبه سبب پایداری گرمایی و بهبود خواص گرمایی عایق گرمایی چوب‌پنبه شود. بر این اساس، در پژوهش پیش‌رو، برای کاهش رسانندگی گرمایی چوب‌پنبه از ایروژل نوالاک استفاده شد. ابتدا، ایروژلی با حفره‌های نانومتری و کمترین مقدار رسانایی و نفوذ گرمایی انتخاب شد. سپس، با وجود ایروژل در سلول‌های چوب‌پنبه، رسانندگی گرمایی جابه‌جایی حذف و دستیابی به کامپوزیتی با رسانندگی گرمایی و نفوذ گرمایی کمتر از چوب‌پنبه خالص فراهم شد. در واقع، ایروژل با رسانندگی گرمایی کم جایگزین هوای موجود در سلول چوب‌پنبه شده و ضمن کاهش چگالی سامانه، سبب بهبود خواص عایقی و فداشوندگی چوب‌پنبه شد. همچنین، خواص گرمایی

برای ساخت ژل نووالاک، ابتدا محلول‌هایی با غلظت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ وزنی (که به ترتیب N10، N15، N20، N25 و N30 نام‌گذاری شدند) از حل کردن مقدار مشخص وزنی پودر نووالاک در مقدار مشخصی حلال ۲-پروپانول با استفاده از همزن مغناطیسی تهیه شدند. محلول‌های ساخته شده درون قالب ریخته و در اتوکلاو قرار داده شدند. اتوکلاو پس از بسته‌شدن، به مدت ۵ min در دمای ۱۲۰°C و فشار ۱۵ bar قرار گرفت. برای خشک کردن ساختار تشکیل شده، ابتدا به مدت ۲۴ h در دمای محیط، سپس ۲۴ h در دمای ۹۰°C، ۲۴ h در دمای ۱۲۰°C و ۴ h در دمای ۱۴۰°C قرار گرفت تا تمام حلال‌های موجود در ساختار خارج شود و ایروزل به دست آید. برای ساخت نانوکامپوزیت چوب‌پنبه-ایروزل با رزین سیلیکون به عنوان بستر، ابتدا مقدار مناسبی رزین سیلیکون، بنزوئیل پراکسید، پودر چوب‌پنبه و ایروزل با توجه به **جدول ۱** وزن شدند. نقش رزین سیلیکون در نمونه‌ها، به عنوان حامل و نگه‌دارنده اجزا در کنار یکدیگر است. سپس، ایروزل به حالت پودر همراه با چوب‌پنبه به ظرف محتوی رزین سیلیکون و بنزوئیل پراکسید اضافه شد و ترکیب تا ترشدگی کامل پرکننده‌ها روی همزن مغناطیسی قرار گرفت تا ذرات ایروزل در بستر رزین وارد حفره‌های چوب‌پنبه شود. سپس، مخلوط درون قالب ریخته شد و به مدت ۵ h در دمای محیط در فشار ۰/۷ MPa قرار گرفت تا کامپوزیت ساخته شود.

برای بهبود رفتار فداشوندگی کامپوزیت چوب‌پنبه-ایروزل و کاهش اثر مخرب فشار هوای ناشی از جریان گرمایی بر ساختار متخلخل، روی نمونه‌های استفاده شده در آزمون شعله پوشش نازکی از رزول-گرافن اکسید اعمال شد. این پوشش پیوسته و نازک از

جدول ۱- ترکیب درصد وزنی مواد در کامپوزیت چوب‌پنبه-ایروزل نووالاک.

کد نمونه	نوع ایروزل	مقدار (%wt)		
		سیلیکون	چوب‌پنبه	ایروزل
C0	-	۶۰	۴۰	۰
CA10-5	N10	۶۰	۳۵	۵
CA10-10	N10	۶۰	۳۰	۱۰
CA10-15	N10	۶۰	۲۵	۱۵
CA10-20	N10	۶۰	۲۰	۲۰
CA15-5	N15	۶۰	۳۵	۵
CA15-10	N15	۶۰	۳۰	۱۰
CA15-15	N15	۶۰	۲۵	۱۵
CA15-20	N15	۶۰	۲۰	۲۰

کامپوزیت چوب‌پنبه-ایروزل به عنوان عایق فداشونده در مجاورت پوشش نازک رزول-گرافن اکسید بررسی شد. وجود ایروزل در چوب‌پنبه سبب استحکام مکانیکی دیواره‌های چوب‌پنبه و کاهش دمای پشت نمونه‌های فداشونده شد.

## تجربی

### مواد

در این پژوهش، از رزین فنولی نوع نووالاک با نام تجاری IP 502 ساخت شرکت رزیتان ایران دارای ۸٪ وزنی هگزامتیلن دی‌آمین، برای ساخت ژل استفاده شد. رزین سیلیکون از شرکت پیشرو مبتکر پیوند با عامل پخت محیطی بنزوئیل پراکسید با نسبت ۵٪ وزنی تهیه شد. چوب‌پنبه لازم برای ساخت نانوکامپوزیت از شرکت ثابت کرک تهران خریداری شد. گرافیت استفاده شده ساخت شرکت Roth آلمان بود. برای سنتز گرافن اکسید، از سدیم نیترات و پتاسیم پرمنگنات ساخت شرکت قطران ایران استفاده شد. ۲-پروپانول، سولفوریک اسید، هیدروکلریک اسید و هیدروژن پراکسید از شرکت دکتر مجللی ایران تهیه شد. رزول استفاده شده در ساخت پوشش فداشونده از شرکت رزیتان ایران با کد Resole IL 800-2 تهیه شد.

### دستگاه‌ها

در این پژوهش، میکروسکوپ الکترونی پوششی مدل MIRA ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک، تخلخل‌سنج جیوه‌ای مدل Prosimeter Pascal 440 ساخت شرکت Thermo Finnigan ایتالیا، طیف‌سنج زیرقرمز Perkin Elmer مدل 10.03.06 ساخت آمریکا و دستگاه پراش پرتو X مدل Philips X'pert ساخت هلند به کار گرفته شد.

### روش‌ها

#### ساخت نمونه‌ها

برای دستیابی به نمونه نهایی (عایق فراسبک)، ساخت و ارزیابی نمونه‌ها در سه مرحله انجام شد. ابتدا، برای انتخاب ایروزل با کمترین مقدار رسانندگی گرمایی، نمونه‌های ایروزل مختلف بررسی شدند. ایروزل با کمترین مقدار رسانندگی گرمایی برای کاهش رسانندگی گرمایی عایق و حذف جابه‌جایی هوای درون سلول‌های چوب‌پنبه استفاده شد. در نهایت، برای بهبود رفتار فداشوندگی و عدم تخریب ساختار متخلخل نمونه‌ها، پوشش رزول-گرافن اکسید استفاده شد.

گرافن اکسید و گرافن اکسید-رزول به کار گرفته شد. برای تعیین رسانایی و نفوذ گرمایی، از دستگاه صفحه داغ ساخته شده توسط پژوهشگران دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد که جزئیات مربوط به کالیبره کردن دستگاه و ابعاد نمونه‌ها در مرجع ۳۰ آمده است. به طور کلی، نمونه میان دو صفحه سرد و گرم قرار گرفته و جریان آب مشخص در صفحه سرد وارد می‌شود. آب، گرمای حاصل از انتقال گرمای رسانایی را جذب می‌کند و از دستگاه خارج می‌شود و این فرایند تا ثابت ماندن دمای صفحه‌های سرد و گرم و آب وارد شده به دستگاه، ادامه می‌یابد. مبنای محاسبه رسانندگی گرمایی، استفاده از داده‌های حالت پایدار صفحه داغ و روش فوریه است. برای بررسی رفتار فداشوندگی، نمونه روی صفحه گرافیتی قرار می‌گیرد که وسط آن خالی است. سپس، شار گرمایی  $15000 \text{ W/m}^2$  با شعله‌ای به طول  $5 \text{ cm}$  در فاصله  $8 \text{ mm}$ ، به نمونه‌ها اعمال شده و دمای پشت نمونه‌ها ثبت می‌شود. نکات و شرایط مربوط به این آزمون در مرجع ۳۱ آمده است.

## نتایج و بحث

### شناسایی ساختار شیمیایی

برای درک بهتر اجزای مولکولی و گروه‌های عاملی تشکیل‌دهنده چوب‌پنبه و گرافن اکسید، از آزمون طیف‌سنجی زیرقرمز استفاده شد. شکل ۱-الف نتایج مربوط به شناسایی ساختار شیمیایی پودر چوب‌پنبه را نشان می‌دهد. پیک‌های مشاهده شده به ترتیب در  $2850$ ،  $2926$ ،  $1749$ ،  $1635$ ،  $1607$ ،  $1513 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی O-H، nCH، زنجیرهای آلیفاتیک سوبرین، nCO، گروه‌های استر سوبرین، گروه‌های RICH=CHR2 سوبرین و nC=C آروماتیک‌های لیگنین است. گروه‌های گفته شده، مواد شاخص تشکیل‌دهنده ساختار چوب‌پنبه هستند [۳].

برای بهبود رفتار فداشوندگی عایق چوب‌پنبه-ایروزل، لایه نازکی از پوشش نانوکامپوزیت  $0.5\%$  وزنی گرافن اکسید در رزین رزول روی نمونه‌های کامپوزیتی اعمال شد. به منظور اطمینان از سنتز گرافن اکسید، طیف‌سنجی FTIR برای تشخیص گروه‌های عاملی نانوصفحه انجام شد که در شکل ۱-ب نشان داده شده است. پیک‌های  $1050$ ،  $1380$ ،  $1680$ ،  $3470 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های اپوکسی (C-O-C)، C-O، گروه‌های کتونی (C=O) و گروه‌های C-OH است. براساس چهار پیک گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار، اکسایش گرافیت و تشکیل شیمیایی گرافن اکسید مشخص می‌شود.

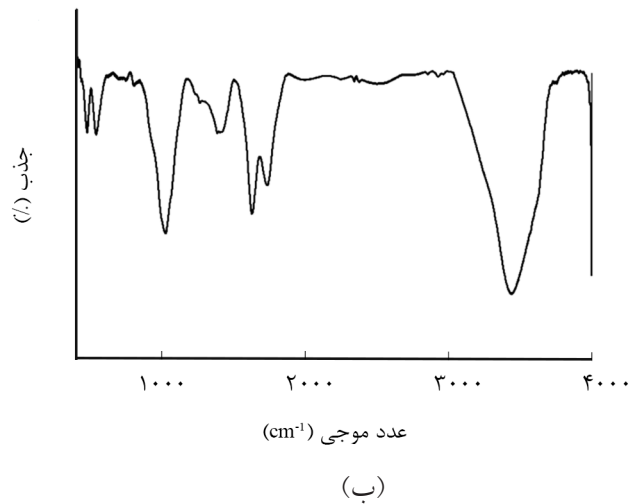
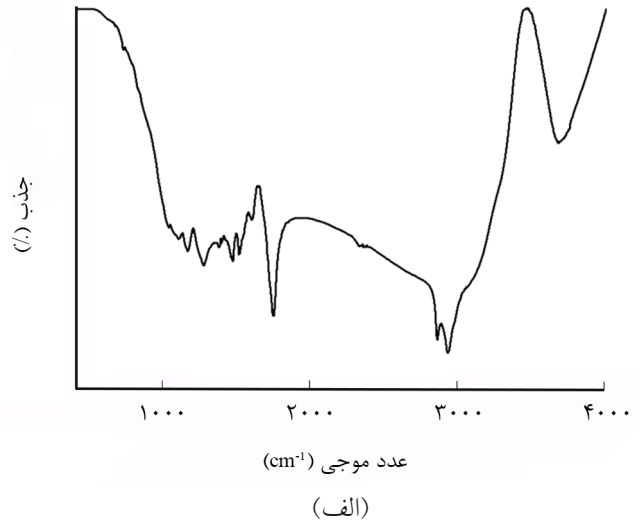
نفوذ جریان گاز داغ داخل حفره‌های کامپوزیت متخلخل و تخریب ساختار آن جلوگیری می‌کند. گرافن اکسید از گرافیت خالص با روش Hummers بهبودیافته سنتز [۲۵، ۲۶] و در ساخت پوشش رزول-گرافن اکسید استفاده شد. براساس پژوهش‌های پیشین، گرافن اکسید برای بهبود خواص گرمایی و مکانیکی بسیاری از کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [۲۷، ۲۸] و وجود گرافن اکسید در بستر رزول سبب بهبود خواص فداشوندگی کامپوزیت شده است [۲۹]. برای ساخت گرافن اکسید، ابتدا  $5 \text{ g}$  پودر گرافیت در  $120 \text{ mL}$  سولفوریک اسید غلیظ پخش و دمای مخلوط به دمای  $0^\circ\text{C}$  رسانده شد.  $2/5 \text{ g}$  سدیم نیترات و  $15 \text{ g}$  پتاسیم پرمنگنات به آرامی به آن اضافه شد. سپس، مخلوط به مدت  $8 \text{ h}$  در دمای  $35^\circ\text{C}$  با همزن مغناطیسی همزده شد. در مرحله بعد،  $600 \text{ mL}$  آب مقطر برای رقیق کردن و سپس  $20 \text{ mL}$  هیدروژن پراکسید برای اختتام واکنش به مخلوط اضافه شد. برای خروج نمک‌ها و مواد اضافی، از هفت مرحله شست‌وشو با محلول آبی  $0.1 \text{ mol/L}$  هیدروکلریک اسید و پنج مرحله آب مقطر به همراه مرکزگریزی در هر مرحله استفاده شد. برای تعلیق گرافن اکسید در آب از همگن‌ساز فراصوت با توان  $300 \text{ W}$  به مدت  $30 \text{ min}$  استفاده شد.

برای آماده‌سازی پوشش رزول-گرافن اکسید،  $0.5\%$  وزنی گرافن اکسید در رزین رزول پخش شد. ابتدا، مقدار مناسبی از تعلیق گرافن اکسید-آب با استفاده از همزن مغناطیسی در رزین رزول پخش و سپس روی کامپوزیت‌های چوب‌پنبه-ایروزل اعمال شد. نمونه‌ها در شرایط محیطی قرار گرفتند تا آب درون ساختار خارج شود. سپس، نمونه‌ها برای پخت رزین رزول به مدت یک روز در دمای  $70^\circ\text{C}$  درون گرم‌خانه قرار گرفتند. در نهایت، سطح در معرض شعله نمونه‌ها در آزمون شعله کامپوزیت چوب‌پنبه-ایروزل در بستر سیلیکون که به‌عنوان حامل است با لایه نازکی از رزول-گرافن اکسید پوشش داده شد.

### آزمون‌ها

چگالی ظاهری نمونه‌ها با اندازه‌گیری وزن و حجم نمونه استوانه‌ای تعیین شد. همچنین، برای بررسی ریزساختار چوب‌پنبه، ایروزل نوآلاک و نانوکامپوزیت چوب‌پنبه-ایروزل-سیلیکون، از میکروسکوپ الکترونی پوششی استفاده شد. اندازه و توزیع اندازه تخلخل در نمونه‌ها با دستگاه تخلخل‌سنج در فشار  $0.1 \text{ MPa}$  تا  $440 \text{ MPa}$  انجام شد. طیف‌سنج زیرقرمز برای اطمینان از تشکیل گرافن اکسید و شناسایی ساختار چوب‌پنبه مصرفی و دستگاه پراش پرتو X برای شناسایی ساختار بلوری و وضعیت صفحه‌ها در گرافیت،

چوب‌پنبه می‌تواند سبب کاهش سهم رسانندگی گرمایی جابه‌جایی در عایق و بهبود چشمگیر خواص عایق گرمایی چوب‌پنبه شود. بدین منظور، ساختارهای مختلفی از ایزول نووالاک با درصد تخلخل و اندازه حفره‌های متفاوت ساخته و ارزیابی شد تا با انتخاب ساختاری با کمترین رسانندگی گرمایی و استفاده از آن، خواص عایقی چوب‌پنبه بهبود یابد. برای بررسی اثر غلظت رزین نووالاک بر اندازه و



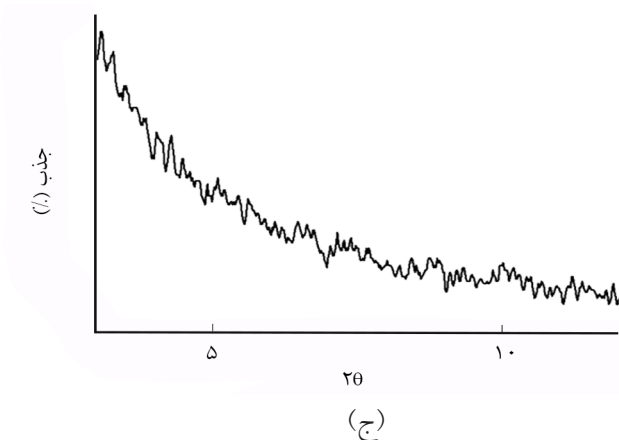
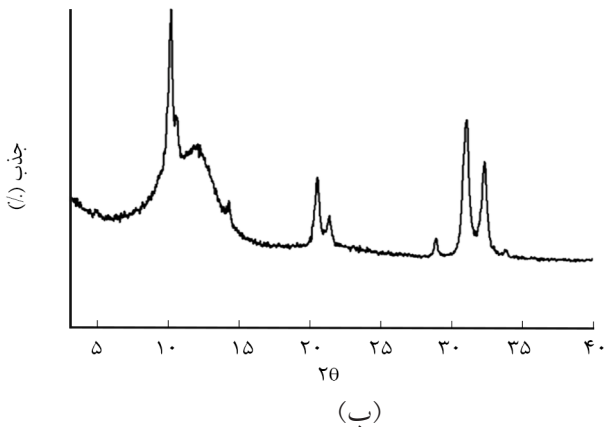
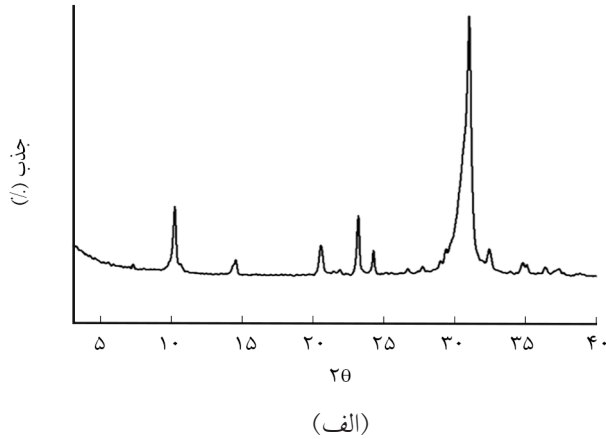
شکل ۱- طیف‌های FTIR: (الف) پودر چوب‌پنبه و (ب) گرافن اکسید.

#### بررسی شکل‌شناسی

برای بررسی تغییرات نظم ساختاری گرافیت، گرافن اکسید و گرافن اکسید-رزول از آزمون پراش پرتو X استفاده شد که نتایج آن در **شکل ۲** نشان داده شده است. پیک اصلی گرافیت در  $2\theta$  برابر  $31^\circ$  است و پس از اکسایش گرافیت به  $2\theta$  برابر  $10/17^\circ$  انتقال یافت که نشان‌دهنده افزایش فاصله صفحه‌ها و تشکیل گرافن اکسید است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک مربوط به  $2\theta$  برابر  $10/17^\circ$  گرافن اکسید در ترکیب گرافن اکسید-رزول حذف شده است که نشان‌دهنده بازشدن کامل لایه‌های گرافن اکسید و توزیع یکنواخت آن در بستر است.

#### بررسی خواص ایزول‌های نووالاک

به نظر می‌رسد، استفاده از ساختارهای متخلخل نانومتری در حفره‌های



شکل ۲- الگوهای پراش پرتو X: (الف) گرافیت، (ب) گرافن اکسید و (ج) گرافن اکسید-رزول.

توزیع حفره‌های ایزوژل، آزمون تخلخل سنج جیوه‌ای نمونه‌های سنتز شده، انجام شد. شکل ۳ نتایج آزمون تخلخل سنج جیوه‌ای را برای نمونه‌های ایزوژل نووالاک نشان می‌دهد. با افزایش غلظت رزین نووالاک در محلول اولیه، ساختار ایزوژل فشرده شده و تخلخل محصول نهایی کاهش یافته است. افزایش سهم ماده جامد در ایزوژل، دلیل اصلی این تغییرات است. یعنی با افزایش سهم ماده جامد، اندازه سلول‌ها کوچک‌تر و توزیع کمتر شده است. با توجه به اندازه حفره‌های میکرونی چوب‌پنبه و اندازه حفره‌های نانومتری ایزوژل، وجود ایزوژل درون سلول‌های چوب‌پنبه امکان‌پذیر است. بنابراین، انتخاب ساختار ایزوژل در محدوده بررسی شده منطقی است.

رسانندگی گرمایی و نفوذ گرمایی از مهم‌ترین خواص عایق گرمایی است. رسانندگی گرمایی مؤثر با استفاده از صفحه داغ براساس قانون فوریه محاسبه شد که در معادله (۱) آمده است [۳۱]:

$$k_{\text{eff}} = \frac{\dot{Q}l}{A\Delta T} \quad (1)$$

در این معادله،  $k_{\text{eff}}$  رسانندگی گرمایی مؤثر در شرایط محیط،  $\dot{Q}$  شار گرمایی عبوری از نمونه،  $l$  ضخامت نمونه،  $A$  سطح مقطع نمونه و  $\Delta T$  اختلاف دمای دو طرف نمونه است. شار عبوری از نمونه‌ها با اندازه‌گیری شار گرمایی آب به وسیله اختلاف دمای آب ورودی و خروجی از سامانه، از معادله (۲) محاسبه شد:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_c - T_{in}) \quad (2)$$

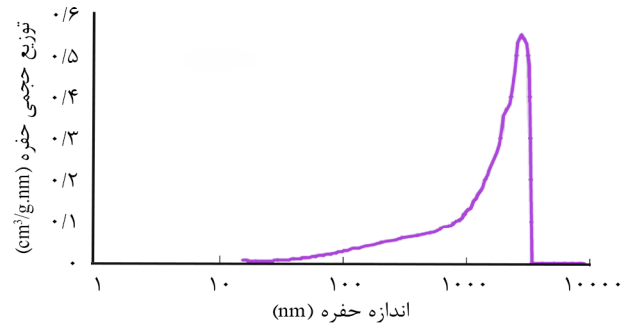
در این معادله،  $\dot{Q}$  شار گرمایی،  $\dot{m}$  سرعت جرمی و  $C_p$  ظرفیت گرمایی آب است. جمع‌شدگی ایزوژل از معیار درصد جمع‌شدگی خطی از معادله (۲) محاسبه شد و نتایج مربوط به نمونه‌های ایزوژل در جدول ۲ آمده است:

$$L_{\text{sh}} = \frac{d_i - d_f}{d_i} \quad (3)$$

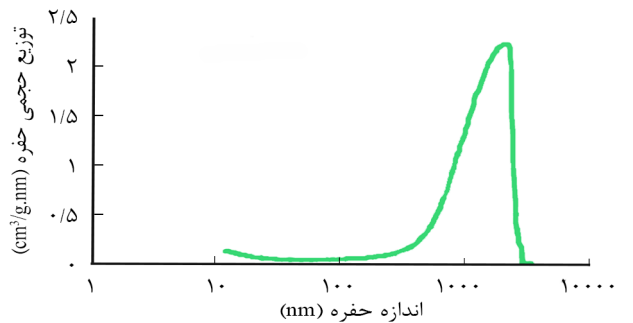
در این معادله،  $d_i$  و  $d_f$  به ترتیب قطر پیش و پس از خشک‌کردن است. چگالی ایزوژل از روش اندازه‌گیری وزن و حجم نمونه استوانه‌ای شکل محاسبه شد. همچنین، برای محاسبه درصد تخلخل نمونه‌های ایزوژل از معادله (۲) استفاده شد و نتایج آن در جدول ۲ آمده است:

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_f}\right) \times 100 \quad (4)$$

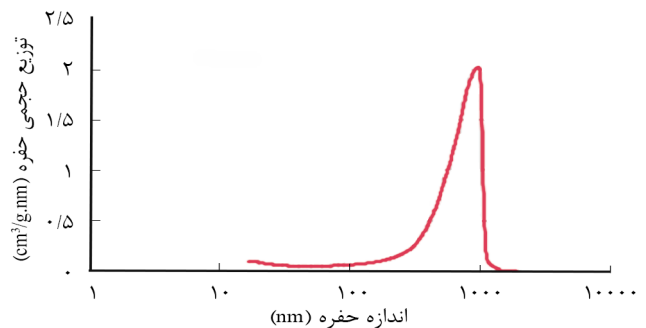
در این معادله،  $\phi$  درصد تخلخل،  $\rho_f$  و  $\rho_a$  به ترتیب چگالی ظاهری و واقعی است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص گرمایی و مقدار



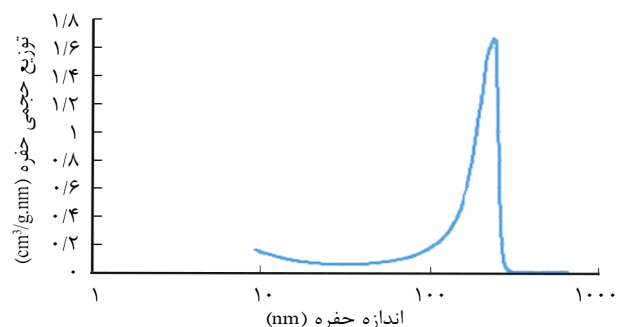
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳- اندازه و توزیع اندازه نمونه‌های: (الف) N10، (ب) N15، (ج) N20 و (د) N25.

جدول ۲- خواص فیزیکی و گرمایی ابروژل‌های نوالاک.

کد نمونه	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	رسانندگی گرمایی (W/m.K)	نفوذ گرمایی (×۱۰ <sup>-۶</sup> m <sup>2</sup> /s)	جمع‌شدگی خطی (%)	تخلخل (%)
N10	۰/۰۹ ± ۱۱٪	۰/۰۱۷	۱/۷۸۵	۱۰/۳	۹۲/۲
N15	۰/۱۴ ± ۷٪	۰/۰۲۳	۱/۶۱۵	۱۰/۵	۸۸/۱
N20	۰/۲ ± ۵٪	۰/۰۳۸	۱/۸۸۰	۹/۷	۸۳/۰
N25	۰/۲۸ ± ۴٪	۰/۰۵۲	۱/۸۸۵	۱۷/۳	۷۶/۹
N30	۰/۳۴ ± ۳٪	۰/۰۶۵	۱/۹۲۵	۱۶/۹	۷۲/۰

جمع‌شدگی نمونه‌های ابروژل با غلظت‌های مختلف رزین در جدول ۲ آمده است. با افزایش غلظت رزین در محلول اولیه، چگالی، رسانندگی گرمایی و درصد جمع‌شدگی ابروژل نوالاک افزایش و تخلخل آن کاهش می‌یابد. همچنین، نفوذ گرمایی افزایش یافته است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، محدوده چگالی محصولات به‌دست آمده بسیار کم است که تطابق خوبی با مقادیر چگالی گزارش شده در مقالات برای ابروژل‌های آلی دارد. با افزایش غلظت رزین، چگالی افزایش یافته است. افزایش غلظت رزین موجب افزایش سهم ماده جامد در ابروژل و کاهش اندازه حفره‌های ژل طی فرایند پلیمرشدن سل-ژل می‌شود. در حقیقت، جمع‌شدگی خطی نمونه‌ها در کنار افزایش جرم ژل، موجب افزایش چگالی ابروژل با افزایش غلظت رزین شده است.

با بررسی نتایج مربوط به رسانندگی و نفوذ گرمایی در جدول ۲ می‌توان گفت، چگالی ابروژل و اندازه حفره‌ها اثر بسزایی بر خواص گرمایی دارد. افزایش غلظت رزین، از یک سو موجب افزایش چگالی و از سوی دیگر موجب کاهش اندازه حفره‌های ابروژل می‌شود. افزایش چگالی سبب افزایش انتقال گرما به‌کمک این سازوکار از فاز جامد و کاهش انتقال گرما به‌کمک سازوکار رسانش از فاز گازی و تابش می‌شود. از سوی دیگر، کاهش اندازه حفره‌های ابروژل با افزایش غلظت رزین، به کاهش انتقال گرما به‌کمک سازوکار رسانش از فاز گاز منجر می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده و روند کلی افزایش انتقال گرما با افزایش غلظت رزین، می‌توان نتیجه گرفت، در ابروژل‌ها، انتقال گرما به‌طور عمده به‌کمک سازوکار رسانش از فاز جامد انجام می‌شود، بنابراین، می‌توان انتقال گرما به‌کمک رسانش از فاز جامد را به‌عنوان سازوکار غالب انتقال گرما معرفی کرد. کاهش و سپس افزایش نفوذ گرمایی را می‌توان غلبه اثر چگالی بر رسانندگی گرمایی پس از N15 بیان کرد.

با توجه به اندازه حفره‌ها، چگالی، رسانندگی و نفوذ گرمایی، ابروژل‌های با کد N10 و N15 به‌عنوان پرکننده حفره‌های میکرونی

#### ارزیابی خواص و ساختار نانو کامپوزیت چوب‌پنبه-ابروژل

پس از ساخت کامپوزیت‌های چوب‌پنبه-ابروژل، چگالی، رسانندگی و نفوذ گرمایی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که در **جدول ۳** آمده است. چگالی کامپوزیت با افزایش درصد ابروژل، روند صعودی داشته است. سلول‌های بسته و توخالی چوب‌پنبه، نقش بسزایی در کم‌بودن چگالی چوب‌پنبه دارند. ورود نانو ساختارهای ابروژل به سلول‌های چوب‌پنبه، موجب افزایش چگالی کامپوزیت می‌شود. چگالی کامپوزیت‌های دارای ابروژل ۱۰٪ نسبت به ۱۵٪، به دلیل کوچک‌بودن ساختار و پرکردن حفره‌های چوب‌پنبه، بیشتر است.

جدول ۳- خواص فیزیکی و گرمایی کامپوزیت چوب‌پنبه-ابروژل-سیلیکون.

کد نمونه	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	رسانندگی گرمایی (W/m.K)	نفوذ گرمایی (×۱۰ <sup>-۶</sup> m <sup>2</sup> /s)
CA0	۰/۴۴	۰/۰۷۹۸	۱/۴۵
CA10-5	۰/۴۶	۰/۰۴۹۳	۰/۸۹
CA10-10	۰/۵۲۲	۰/۰۵۳۳	۰/۸۶۷
CA10-15	۰/۵۳۴	۰/۰۴۸۸	۰/۸
CA10-20	۰/۵۳۵	۰/۰۶۸۹	۱/۱۶
CA15-5	۰/۴۴۱	۰/۰۶۱۵	۱/۱۵
CA15-10	۰/۴۷۹	۰/۰۵۳	۰/۹۴
CA15-15	۰/۵۱۴	۰/۰۵۹۸	۱/۰۱
CA15-20	۰/۴۹۲	۰/۰۵۵	۱/۰۱۷

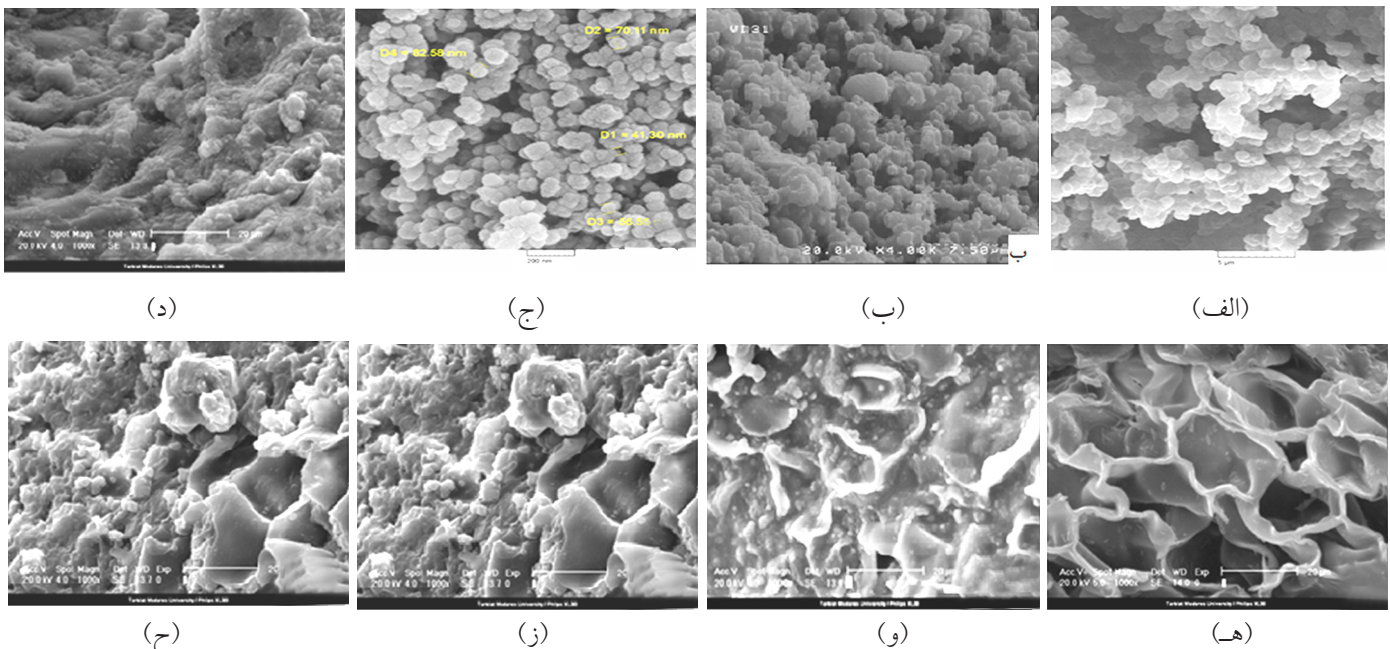


برای بررسی ساختار ایروزل، پودر چوب‌پنبه و نانوکامپوزیت‌ها، از آزمون SEM استفاده شد که در **شکل ۴** نتایج آزمون نشان داده شده است. با توجه به **شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج**، افزایش غلظت موجب کاهش اندازه حفره‌ها شده است و نتایج مربوط به چگالی و تخلخل، این تغییرات را تأیید می‌کنند. در **شکل ۴-د**، حفره‌های بسته و دیواره‌های چوب‌پنبه دیده می‌شود. اندازه حفره‌های چوب‌پنبه، بزرگ‌تر از ساختار ایروزل است.

با افزودن ساختار ایروزل به کامپوزیت، حفره‌های میکرونی چوب‌پنبه به‌خوبی به‌وسیله ایروزل پر می‌شوند. پرشدگی سلول‌ها می‌تواند به دلیل ترکندگی رزین سیلیکون و ورود نانوساختار ایروزل به داخل حفره‌های میکرونی چوب‌پنبه باشد. در شکل‌های ۴-ه تا ۴-ج ساختار کامپوزیت‌های مختلف و پرشدن حفره‌های چوب‌پنبه و تغییرات دیواره سلول نشان داده شده است. با افزایش مقدار ایروزل، پرشدگی حفره‌ها بیشتر شده که در تصاویر SEM به‌خوبی مشاهده می‌شود. اندازه سلول‌ها نسبت به چوب‌پنبه خالص کوچک‌تر شده‌اند که ناشی از فرایند تولید و ورود ایروزل به ساختار است. حد فاصل بین ساختار ایروزل و حفره‌های چوب‌پنبه، به‌وسیله سیلیکون پوشانده شده است که به‌خوبی در شکل‌های ۴-ه تا ۴-ح مشاهده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، هر دو ساختار متخلخل به‌وسیله سیلیکون خیس شده و سیلیکون به‌عنوان حامل و نگه‌دارنده دو ساختار متخلخل عمل کرده است. با بررسی هم‌زمان تصاویر SEM با نتایج مربوط به رسانندگی

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، افزودن مقدار کمی ایروزل به کامپوزیت چوب‌پنبه-سیلیکون، رسانندگی و نفوذ گرمایی را کاهش و خواص عایقی را بهبود می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، در ایروزل، انتقال گرما به‌طور عمده به‌کمک سازوکار رسانش از فاز جامد انجام می‌شود و با توجه به تحلیل چگالی کامپوزیت، وجود ایروزل در داخل سلول‌ها، سبب می‌شود، جامد ایروزل جایگزین هوای موجود در حفره‌های چوب‌پنبه شود. بدین ترتیب، سازوکار انتقال گرمای جابه‌جایی کاهش می‌یابد و انتقال گرما به‌کمک رسانش فاز جامد انجام می‌شود. بنابراین، کامپوزیت‌های با ایروزل‌های N10 و N15 با این سازوکار توانسته‌اند به‌طور مؤثری رسانندگی و نفوذ گرمایی را کاهش دهند. از میان کامپوزیت‌های مزبور، نمونه CA 10-15، رسانندگی و نفوذ گرمایی را به ترتیب ۳۹٪ و ۴۵٪ نسبت به عایق چوب‌پنبه بدون ایروزل کاهش داده است. همچنین، نمونه CA 15-10، با کاهش ۳۴٪ رسانندگی گرمایی و ۳۵٪ نفوذ گرمایی، موجب بهبود خواص عایقی کامپوزیت شده است.

با مقایسه رسانندگی گرمایی نمونه بدون ایروزل (CA0) با سایر نمونه‌ها، افزایش چگالی، کاهش شایان توجه رسانندگی و نفوذ گرمایی در تمام نمونه‌های دارای ایروزل مشاهده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، رسانندگی گرمایی چوب‌پنبه به رسانایی در بخش جامد ماده و انتقال گرما با سازوکار جابه‌جایی در حفره‌ها وابسته است. با پرکردن حفره‌های بزرگ چوب‌پنبه با ایروزل، رسانندگی گرمایی کاهش یافته است.



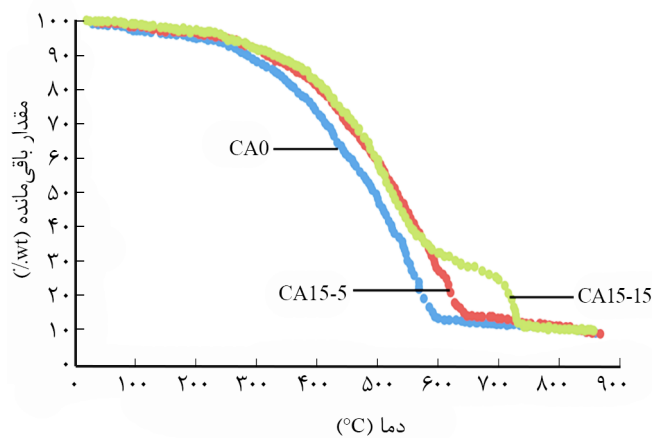
شکل ۴- تصاویر SEM ایروزل‌های نوآلاک: (الف) N10، (ب) N15، (ج) N20، (د) چوب‌پنبه و نمونه‌های کامپوزیتی (ه) CA10-5، (و) CA10-20، (ز) CA15-5 و (ح) CA15-20.

با افزودن ایروژل به کامپوزیت چوب‌پنبه، پایداری گرمایی (دمای شروع تخریب) و مقاومت گرمایی (شیب منحنی در بیشترین کاهش جرم) افزایش یافته است. همچنین، زغال نهایی با افزوده شدن ایروژل، پایداری تر است. برای بررسی فداشوندگی کامپوزیت‌های تهیه شده، از شعله‌ای با شار گرمایی  $15000 \text{ W/m}$  استفاده شد. نمونه‌ها در فاصله  $8 \text{ mm}$  از نوک شعله قرار داده و دمای پشت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تغییرات دمای پشت نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. وجود پوشش گرافن اکسید-رزول سبب کاهش شیب تغییرات دما و شکسته نشدن دیواره‌های چوب‌پنبه بر اثر فشار هوای شعله شده است. در حقیقت، وجود پوشش، سبب طولانی شدن زمان تخریب و کاهش سرعت تخریب کامپوزیت ایروژل شده است. همچنین، وجود پوشش گرافن اکسید-رزول سبب حفاظت ساختار متخلخل از فشار هوای حاصل از آزمون شده است.

در نمونه‌های دارای پوشش گرافن اکسید-رزول، با افزایش مقدار ایروژل در کامپوزیت، رفتار فداشوندگی بهبود یافته است. به طوری که با افزایش درصد ایروژل، شیب افزایش دمای پشت نمونه کاهش می‌یابد و در زمان‌های برابر، دمای پشت نمونه مقدار کمتری دارد. در حقیقت، وجود ایروژل نوالاک در کامپوزیت، سبب کاهش رسانندگی و نفوذ گرمایی و در نتیجه کم شدن  $66\%$  دمای پشت نمونه‌ها شده است.

ریزساختار زغال‌های باقی‌مانده از آزمون فداشوندگی با آزمون SEM بررسی و در شکل ۷ نشان داده شده است. نمونه CA15-15 پس از آزمون فداشوندگی در شکل ۷-الف نشان داده شده است. چوب‌پنبه حین فداشدن، لایه محافظی بر سطح خود به وجود می‌آورد. لایه زغال تشکیل شده، موجب محدود شدن شار گرمایی به سازه اصلی می‌شود. حفظ شدن ساختار سلول چوب‌پنبه به دلیل وجود ایروژل در حفره‌هاست و موجب بهبود پایداری گرمایی آن شده است. همان‌طور که گفته شد، وجود پوشش گرافن اکسید-رزول باعث بهبود عملکرد نمونه‌ها شده است. تصاویر SEM نمونه CA0 در شکل ۷ ب و ۷-ج نشان داده شده است. لایه پیوسته گرافن اکسید بر سطح چوب‌پنبه به عنوان محافظ در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود. در شکل ۷-ج به علت نبود ایروژل، دیواره چوب‌پنبه تمایل به پاره شدن پیدا کرده است. همچنین، ضخامت دیواره‌ها کاهش پیدا کرده یا دچار آسیب شده است. البته به علت وجود پوشش گرافن اکسید-رزول، بخشی از سلول‌ها آسیب ندیده‌اند و موجب بهبود خواص فداشوندگی کامپوزیت شده است.

شکل‌های ۷-د و ۷-ه اثر پوشش گرافن اکسید را بر ریزساختار کامپوزیت CA15-5 نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۷-د، پوشش اعمال شده، به عنوان لایه محافظ عمل کرده و نانوکامپوزیت را در

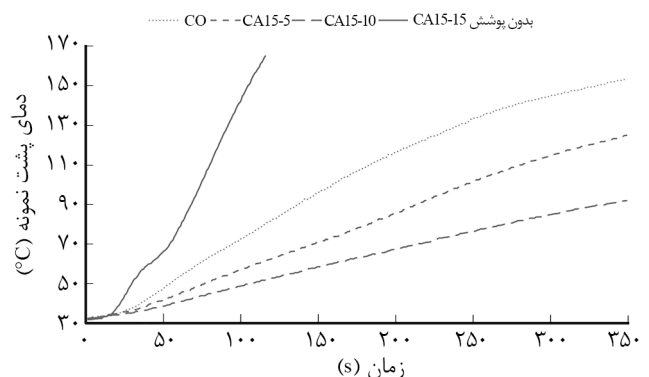


شکل ۵- دمانگاشت‌های گرمائزسنجی نمونه‌های CA0، CA15-5 و CA15-15.

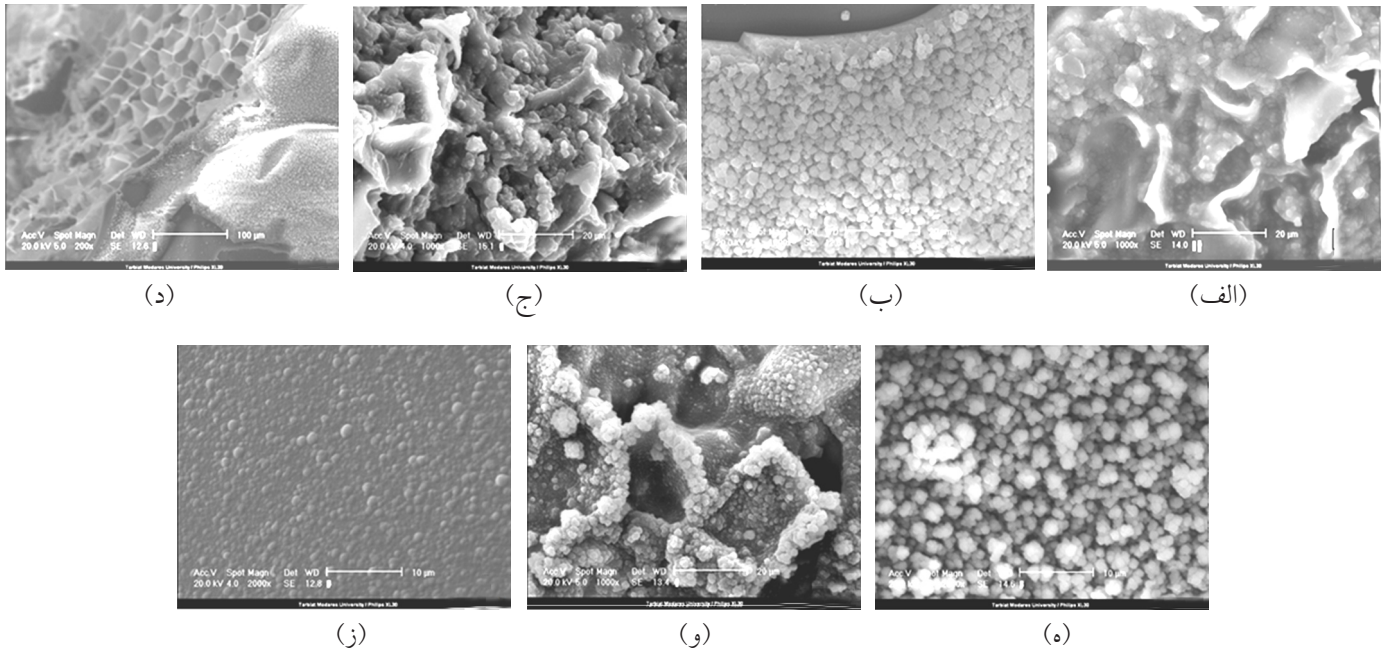
گرمایی و نفوذ گرمایی نمونه‌های چوب‌پنبه-ایروژل، فرضیه مربوط به اثر وجود ساختار نانومتری ایروژل درون حفره‌های میکرومتری چوب‌پنبه و ارتباط آن با کاهش شایان توجه رسانندگی و نفوذ گرمایی تأیید می‌شود.

#### پایداری گرمایی و فداشوندگی عایق چوب‌پنبه-ایروژل

برای ارزیابی پایداری گرمایی و اتلاف وزن نانوکامپوزیت‌ها و اثر افزودن ایروژل بر آن، از آزمون گرمائزسنجی استفاده شد. با این آزمون اثر دما بر ساختار و تغییرات جرم مشخص می‌شود و امکان شناسایی دماهایی وجود دارد که فرایندهای شیمیایی اصلی در آن‌ها اتفاق می‌افتد. این آزمون روی سه نمونه انجام شد که عبارت از نمونه بدون ایروژل و نانوکامپوزیت‌های دارای ۵ و  $15\%$  وزنی ایروژل با ساختار  $15\%$  بودند (نمونه‌های CA0، CA15-5، CA15-15). نتایج این آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار دما-زمان تغییرات دمای پشت نمونه در آزمون فداشوندگی.



شکل ۷- تصاویر SEM پس از آزمون شعله برای نمونه: (الف) CA15-15 بدون پوشش و کامپوزیت‌های همراه با پوشش رزول-گرافن اکسید (ب) و (ج) CA0، (د) و (ه) CA15-5 و (و) و (ز) CA15-10.

بهبود عایق گرمایی فراسبک سیلیکون-چوب‌پنبه ارائه شده است. وجود ساختار نانومتری ایروزل در سلول‌های میکرومتری چوب‌پنبه سبب حذف انتقال گرمای جابه‌جایی هوا، جایگزینی ایروزل با رسانندگی گرمایی کم به جای هوا و کاهش چشمگیر رسانندگی گرمایی کامپوزیت سیلیکون-چوب‌پنبه شده است. ایروزل‌های دارای ۱۰ و ۱۵٪ وزنی جامد در سل، کمترین چگالی، رسانندگی و نفوذ گرمایی را دارند و برای بهبود خواص عایقی کامپوزیت استفاده شدند. افزودن ایروزل به کامپوزیت سبب افزایش چگالی شد. ولی، رسانندگی و نفوذ گرمایی به‌طور چشمگیری کاهش یافت. افزودن ۱۵٪ وزنی از ایروزل موجب کاهش ۳۹٪ و ۴۵٪ رسانندگی و نفوذ گرمایی کامپوزیت نسبت به کامپوزیت سیلیکون-چوب‌پنبه بدون ایروزل شد. برای بهبود خواص فداشوندگی کامپوزیت، پوشش رزول-گرافن اکسید بر سطح نمونه‌ها اعمال شد. نتایج نشان داد، وجود ایروزل و پوشش گرافن اکسید-رزول سبب بهبود خواص فداشوندگی و کاهش دما و شیب نمودار دما-زمان عایق‌های برپایه سیلیکون-چوب‌پنبه شده است.

برابر شعله محافظت کرده است. از طرفی در شکل ۷-ه، وجود ایروزل درون تخلخل‌های چوب‌پنبه مشاهده می‌شود که سبب حفظ شکل و ساختار سلول‌های چوب‌پنبه شده و تخریب دیواره‌های آن به تعویق افتاده است. افزایش درصد ایروزل در کامپوزیت، در شکل‌های ۷-و و ۷-ز نشان داده شده است. به علت افزایش درصد ایروزل، حفره‌های بیشتری از چوب‌پنبه با ایروزل پر شده‌اند. در شکل ۷-ز، پرشدگی و حفظ ساختار چوب‌پنبه به‌وسیله ایروزل مشهود است. با توجه به شکل‌شناسی مشاهده شده، خواص فداشوندگی به‌خوبی توجیه می‌شود. با در نظر گرفتن نتایج مربوط به آزمون SEM و فداشوندگی عایق چوب‌پنبه-ایروزل دارای پوشش رزول-گرافن اکسید می‌توان گفت، وجود پوشش رزول-گرافن اکسید در کنار کامپوزیت چوب‌پنبه-ایروزل توانسته است، رفتار فداشوندگی کامپوزیت را برای مدت طولانی‌تری با سازوکار ممانعت از شکسته شدن حفره‌ها، حفظ و تقویت کند.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از ایروزل نووالاک، روش جدیدی برای

## مراجع

1. Castro O., Silva J., Devezas T., Silva A., and Gil L., Cork Agglomerates as an Ideal Core Material in Lightweight Structure, *Mater. Desig.*, **31**, 425-432, 2010.
2. Pintor A.M.A., Ferreora C.I.A., Pereira J.C., Correia P., Silva S.P., Vilar J.P., Betelho C.M.S., and Boaventura R.A.R., Use of Cork Powder and Granules for the Adsorption of Pollutants: A Review, *Water Res.*, **46**, 2310-2318, 2012.
3. Fernandes E.M., Correlo V.M., Mano J.F., and Reis R.L., Polyethylene-based Cork-Polymer Composites: Processing Parameters and Properties, *Compos. Part B-Eng.*, **66**, 210-223, 2014.
4. Silva S.P., Sabino M.A., Fernandes E.M., Correlo V.M., Boesel L.F., and Reis R.I., Cork: Properties, Capabilities and Application, *Int. Mater. Rev.*, **50**, 345-365, 2005.
5. Gil L., New Cork-Based Materials and Application, *Materials*, **8**, 625-637, 2015.
6. Sen A., Miranda I., and Pereira H., Temperature-Induced Structure and Chemical in Cork from Quercus Cerris, *In. Crop. Prod.*, **37**, 508-513, 2012.
7. Silva J.M., Devezas T., Silva A., Gil L., Nunes C., and Franco N., Exploring the Use of Cork Based Composites for Aerospace Application, *Mater. Sci.*, **636**, 260-263, 2010.
8. Silva J.M., Gamboa P.V., Nunes C., Paulo L., and Franco N., Cork: Is It a Good Material for Aerospace Structure, *52nd AIAA/ASME/AHS, Structural Dynamics and Materials Conference*, Denver, Colorado, 2159, 4-7 April, 2011.
9. Fernandes E.M., Correlo V.M., Chagas J.A.M., Mano J.F., and Reis R.L., Properties of New Cork-Polymer Composites: Advantages and Drawbacks as Compared with Commercially Available Fiberboard Materials, *Compos. Struct.*, **93**, 3120-3129, 2011.
10. Silva J.M., Devezas T., Silva A., Gil L., Nunes C., and Franco N., Exploring the Use of Cork Based Composites for Aerospace Application, *Mater. Sci.*, **636**, 260-263, 2010.
11. Barbosa A.Q., Silva L.F.M., Abenojar J., Real J.C., Paiva R.M.M., and Ochsner A., Kinetic Analysis and Characterization of an Epoxy/Cork Adhesive, *Thermoch. Acta*, **604**, 52-60, 2015.
12. Bachar M., Azzouz L., Rabehi M., and Mezghiche B., Characterization of Stabilized Earth Concrete and the Effect of Incorporation of Aggregates of Cork on Its Thermo-Mechanical Properties: Experimental Study and Modeling, *Construct. Build. Mater.*, **74**, 259-267, 2015.
13. Silva J.J.C., Pereira J.P.B., and Sirgado J., Improving Rammed Earth Wall Thermal Performance With Added Expanded Granulated Cork, *Arch. Sci. Rev.*, 314-323, **58**, 2015.
14. Gul J., Saleemi A.R., Mirza S., Feroze S., and Mansha M., Thermal and Mechanical Characteristics of Cork Filled Insulation for Aerospace Application, *Plast. Rubber Compos.*, **39**, 28-32, 2010.
15. Gul J. and Mirza S., Effect of Cork Loading on Mechanical and Thermal Properties of Silica-Ethylene-Propylene-Diene Monomer Composites, *Eng. Mater.*, **510**, 277-283, 2012.
16. Qarebagh Noparvar A., Roghani Mamagani H., and Salami Kalajahi M., Organic/Inorganic Nanohybrids of Novolac Phenolic Resin and Carbon: High Carbon Yields by Using Carbon Nanotube Aerogel and Resin Incorporation into Aerogel Network, *Microp. Mesop. Mater.*, **224**, 58-67, 2016.
17. Biener J., Stadermann M., Suss M., Worsley M.A., Biener M.M., Rose K.A., and Baumann T.F., Advanced Carbon Aerogels for Energy Application, *Energ. Environ. Sci.*, **4**, 656-667, 2011.
18. Cuce E., Cuce P.M., Wood C.J., and Riffat S.B., Toward Aerogel Based Thermal Superinsulation in Buildings: A Comprehensive Review, *Renew. Sustain. Energ. Rev.*, **34**, 273-299, 2014.
19. Thapliyal P.C. and Singh K., Aerogel as Promising Thermal Insulating Material: An Overview, *Materials*, 2014, DOI: org/10.1155/2014/127049.
20. Julio M.F., Soares A., Ilharco L.M., Colen I.F., and Brito J., Aerogel-Based Renders with Lightweight Aggregates: Correlation Between Molecular/Pore Structure and Performance, *Construct. Build. Mater.*, **124**, 485-495, 2016.
21. Ximenes S., Silva A., Soares A., Colen I.F., and Brito J., Parametric Analysis to Study the Influence of Aerogel-based Renders Components on Thermal and Mechanical Performance, *Materials*, **9**, 336-355, 2016.
22. Naseri I., Kazemi A., Bahramian A.R., and Kashani M.R., Polymerization of Phenol Formaldehyde in Solvent Saturated Vapor and Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Novolac Aerogel Product, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **26**, 427-435, 2013.
23. Kazemi A., Naseri I., and Bahramian A.R., Thermal Protection

- Performance of Carbon Aerogels Filled With Magnesium Chloride Hexahydrate as a Phase Change Material, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **26**, 525-535, 2013.
24. Seraji M.M., Seifi A., and Bahramian A.R., Thermal and Mechanical Properties of Novolac-Silica Hybrid Aerogels Prepared by Sol-Gel Polymerization in Solvent Saturated Vapor Atmosphere, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **28**, 161-169, 2015.
25. Hummers W.S. and Offeman R.E., Preparation of Grapheme Oxide, *Am. Chem. Sci.*, **80**, 1339-1339, 1958.
26. Goi K., Song H., Chen X., Du X., and Zhong L., Graphene Oxide as an Antishrinkage Additive for Resorcinol-Formaldehyde Composite Aerogel, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, 11603-11608, 2014.
27. Kim J., Yim B., Kim J., and Kim J., the Effect of Functionalized Graphene Nanosheets on the Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Composites for Anisotropic Conductive Adhesives (ACAs), *Micrielec. Reliab.*, **52**, 595-602, 2012.
28. Monti M., Rallini M., Puglia D., Peponi L., Torre L., and Kenny J.M., Morphology and Electrical Properties of Grapheme-Epoxy Nanocomposites Obtained by Different Solvent Assisted Processing Methods, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **46**, 166-172, 2013.
29. Zhu Y., Murali S., Cai W., Li X., Suk J. W., Potts J.R., and Ruoff R.S., Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties and Applications, *Adv. Mater.*, **22**, 3906-3924, 2010.
30. Kazemi A., Naseri I., Nasiri M., and Bahramian A.R., Effect of  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  Phase Change Material on Thermal Insulation Performance of Carbon Aerogel, *Energ. Stora.*, **9**, 59-68, 2017.
31. Haddad N., McWilliams H., and Wagoner P., NASA Engineering Design Challenges: Thermal Protection Systems, EP-2008-09-122-MSFC, National Aeronautics and Space Administration (NASA), USA, 2007.