

## بهبود هدایت حرارتی پارچه‌های پنبه‌ای با استفاده از روکش‌های کامپوزیتی حاوی گرافین، نانو لوله کربنی چند دیواره یا ذرات ریز نیتريد بور

مترجم: عباس حاجی پور

### چکیده

گرافین، نانو لوله کربنی چند دیواره (MWCNT) و ذرات ریز نیتريد بور (BN) به طور جداگانه با یک رزین بر روی پارچه پنبه‌ای بکار برده شد و تاثیر روکش‌های کامپوزیت نازک بر روی خاصیت هدایت حرارتی، نفوذپذیری هوا، ترشوندگی و ظاهر رنگی پارچه پنبه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. وجود پرکننده‌ها در لایه روکش، هدایت حرارتی پارچه پنبه‌ای روکش شده را افزایش داد. در محتوای روکش مشابه، افزایش در هدایت حرارتی پارچه، به صورت، گرافین < BN < MWCNT، و در محدوده ۱۳۲٪ تا ۸۴۲٪ بود (نسبت به پارچه پنبه‌ای خالص). روکش منجر به ۷۳٪، ۶۹٪ و ۶۴٪ کاهش در نفوذ پذیری هوا، به ترتیب برای ۵۰ درصد وزنی گرافین، BN و MWCNTs شد. پارچه‌های عمل شده با گرافین و MWCNT، ظاهری سیاه رنگ داشتند، اما روکش تقریباً تاثیری بر آبدوستی پارچه نداشت. روکش BN، سطح پارچه پنبه‌ای را همراه با تغییری کوچک در رنگ پارچه، آبگریز کرد.

### مقدمه

انتقال حرارت، برای بسیاری از منسوجات از قبیل محصولات ورزشی، لباس کار، کفش‌ها، لباس خواب و بهداشت و درمان، ضروری می‌باشد. این چنین فرآیند در مواد لیفی، پیچیده و اغلب شامل سه روش اصلی (رسانایی، همرفتی و تابشی) می‌باشد که رسانایی حرارتی از دوتای دیگر مهم‌تر می‌باشد. هنگامی که پارچه در تماس نزدیک با پوست می‌باشد، عرق و رطوبت را جذب می‌کند و تبخیر رطوبت مایع از پارچه به کاهش حرارت کمک می‌کند. برای البسه تابستانی، انتقال سریع حرارت، برای کاهش حرارت بسیار مهم می‌باشد. پارچه‌ای که رسانایی حرارتی بالایی دارد و توانایی بالایی در جذب عرق و رطوبت دارد و ساختار بازی برای افزایش همرفتی دارد، بسیار مطلوب می‌باشد.

عمده البسه تابستانی، به دلیل خواصی از قبیل نرمی، راحتی و جذب رسوب بسیار بالای پنبه، از الیاف پنبه‌ای ساخته می‌شوند. با این حال، پنبه هدایت حرارتی کمتری (۰/۰۶۵-۰/۰۲۶ W/mK) نسبت به الیاف سنتتزی و دیگر الیاف طبیعی دارد، که انتقال حرارت موثر آن را محدود می‌کند. تلاش‌های قبلی جهت بهبود هدایت حرارتی پارچه‌های پنبه‌ای، بر تنظیم ضخامت پارچه، دانسیته فضایی، ضریب تخلخل و ساختار بافت متمرکز شده است. استفاده از تکنیک روکش دهی جهت بهبود هدایت حرارتی پارچه‌ها، توجه کمی را به خود جلب کرده است. از نظر ساختاری، پارچه، ماتریس متخلخل نازک، حاوی بافت الیاف با هوای حبس شده در داخل فضای خلل و فرج می‌باشد. روکش دهی یک پارچه با مواد دیگر، باید هدایت گرمایی و هدایت حرارتی پارچه را با توجه به هدایت حرارتی مواد روکش، تحت تاثیر قرار دهد. روکش همچنین می‌تواند، جذب عرق و رطوبت را نیز تحت تاثیر قرار دهد.

سطح آبدوست اجازه می‌دهد عرق به سرعت به ماتریس پارچه نفوذ کند و کاهش حرارت را افزایش می‌دهد. با این حال، روکش دهی آبگریز پارچه می‌تواند سبب تجمع عرق و چسبیدن پارچه به بدون شود، که متأسفانه منجر به عدم راحتی و افزایش بیشتر دما سطح پوست می‌شود. بعلاوه، رنگ یکی از فاکتورهای مهم و موثر بر حرارت تحت شرایط معین می‌شود. می‌دانیم که پارچه تیره، حرارت خورشید بیشتری تحت نور خورشید نسبت به نمونه روشن جذب می‌کند. جهت تغییر هدایت حرارتی پارچه از طریق روش روکش دهی، بررسی تاثیر روکش بر روی ترشوندگی و رنگ مهم می‌باشد.

اخیراً گزارش شده است که نانو مواد کربنی، از قبیل نانو لوله‌های کربنی (CNTs) و گرافین، هدایت حرارتی عالی دارند. نانو لوله‌های کربنی تک دیواره (SWCNTs)، هدایت حرارتی ۳۵۰۰ W/mK در دمای اتاق دارند. هدایت حرارتی نانو لوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs)، در حدود ۳۰۰۰ W/mK ارزیابی شده است. اخیراً گزارش شده است که گرافین، یک لایه تکی از گرافین، هدایت حرارتی بالاتری دارد. در دمای اتاق، هدایت حرارتی گرافین تک لایه، ۵۳۰۰ W/mK می‌باشد.

نیتريد بور (BN) ماده رسانای حرارتی دیگری می‌باشد که به عنوان پرکننده جهت ایجاد چسب‌ها، خمیرها و گریس‌های حرارتی رسانا، به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. BN در دو شکل بلوری، سه (c-BN)، ساختار مولکولی الماس مانند دارد و سخت و زبر می‌باشد، در حالی که نیتريد بور شش وجهی (h-BN)، مشابه گرافیت می‌باشد و ساختار مسطح دارد و بنابراین، نرم و لغزنده می‌باشد. هدایت حرارتی صفحه‌ای بالا در حدود ۳۰۰-۶۰۰ W/mK دارد.

در این پژوهش، ما دریافتیم که، هنگامی که یک رزین حاوی



### تهیه محلول‌های روکش‌دهی

محلول‌های روکش بوسیله دیسپرس کردن پرکننده‌ها در محلول حاوی ۴ درصد وزنی رزین Co. Ltd. و ۱/۲ درصد وزنی ۳-(N,N-دی متیل میریستیل آمین)-پروپان سولفونات و سپس سونیکیت محلول برای مدت ۲ ساعت با استفاده از دستگاه Ultrasonics FXP 8M تهیه شدند. محتوای پرکننده‌ها در محلول روکش، ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ و ۴/۰ وزنی قرار داده شدند. محتوای بیش از ۴/۰ وزنی از پرکننده منجر به افزایش قابل توجه ویسکوزیته می‌شد، که تشکیل روکش یکنواخت بر روی پارچه دشوار بود. پس از روکش‌دهی، محتوای جامد مربوطه پرکننده‌ها در لایه روکش، به ترتیب ۱۱/۱، ۲۰/۰، ۳۳/۳ و ۵۰/۰ بود. بارگذاری روکش اندازه‌گیری شد که در محدوده باریک ۱/۳۳-۱/۱۴ بود و بارگذاری پرکننده قابل توجه بود که برای ۳ پرکننده (شکل ۱) مشابه بود.

### روش روکش‌دهی

محلول‌های روکش‌دهی به صورت ساده بر روی پارچه‌های پنبه‌ای بوسیله تکنیک غوطه‌وری-پد-پخت بکار برده شدند. در ابتدا نمونه به محلول روکش‌دهی وارد شد و سپس توسط دستگاه پدکننده Atlas پد شد تا محلول اضافی حذف شود. برداشت تر ۱۰۰٪ بوسیله تنظیم فشار پدکننده تنظیم شد. پارچه خشک شد و در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد برای مدت ۱۰ دقیقه در آن تهویه‌دار، پخت شد. سرانجام، پارچه با آب گرم و سرد به صورت جداگانه شسته شد تا مواد شیمیایی تثبیت نشده، حذف شود.

### بررسی‌ها

جهت ارزیابی هدایت حرارتی، سیستم طراحی شده نشان داده شده در شکل ۲ بکار برده شد. به منبع گرمای استوانه‌ای مدور (۱۰۰ میلی‌متر قطر در ۱۶۰ میلی‌متر طول) که سه جهت آن پوشانده شده بود، اجازه داده شده تا تنها یک وجه آن با نمونه‌های پارچه برای انتقال حرارت تماس داشته باشد. پروب ترموکوپل با خطای اندازه‌گیری دمای  $\pm 0.5$  بر روی دیواره بیرونی سیلندر قرار داده شد که در تماس با پارچه بود. طول آزمایش، منبع گرما تا دمای ۵۰ درجه سانتیگراد بوسیله تغذیه آب با دمای ثابت در سیلندر حرارت‌دهی شد و سپس اجازه داده شد تا به صورت طبیعی سرد شود. پارچه با استفاده از تا زدن گوشه‌های پارچه به دور گوشه سیلندر و قرار دادن نمد عایق کاری (پشم شیشه) بین سیلندر و دیواره عایق کاری، در تماس خوب با وجه بدون روکش قرار داده شد. روند سرد شدن برای سطح بدون روکش (بدون پارچه) و سطح پوشیده شده با نمونه پارچه، ثبت شد. سپس، هدایت حرارتی با استفاده از قانون سرد شدن نیوتن، محاسبه شد.

دوربین IR (بررسی کننده گرمای IEC) نیز جهت ثبت تغییرات دما تمام سطح پارچه مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر حرارتی ثبت شده، با استفاده از نرم‌افزار مادون قرمز ImagePro II 4.0.6 Mikron، پردازش

بر روی پارچه‌های پنبه‌ای بکار برده شود، روکش کامپوزیتی نازک منجر به افزایش ۱۵۱٪ هدایت حرارتی می‌شود، درحالی‌که ترشوندگی و نفوذپذیری هوا به مقدار کمی تاثیر می‌پذیرند. حتی افزایش بیشتر در هدایت حرارتی می‌تواند، هنگامی که گرافین یا BN به عنوان پرکننده مورد استفاده قرار می‌گیرند، بدست آورده شوند. در این مقاله، ما تاثیرات این سه روکش کامپوزیتی را بر روی خواص انتقال حرارت، نفوذپذیری هوا، ترشوندگی سطحی و ظاهر رنگی پارچه‌های پنبه‌ای گزارش می‌کنیم.

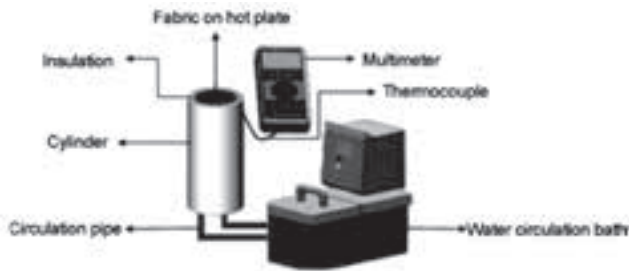
### بخش تجربی

#### مواد

پارچه‌های پنبه‌ای با بافت ساده (۱۵۵ gsm)، هم رنگ‌ریزی نشده و هم رنگ‌ریزی شده در سه رنگ (زرد، قرمز و آبی)، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. پارچه‌های پنبه‌ای با استفاده از فرآیند استاندارد سفیدگری شدند تا ناخالصی‌ها و مواد اضافی ذاتی از پارچه پنبه‌ای حذف شوند. نسخه سفیدگری، به صورت ۲۰۰ میلی لیتر  $H_2O_2$  (۳۵٪)، ۶۵ گرم NaOH، ۴۰ گرم عامل ترکننده و ۱۲ گرم تثبیت‌کننده حل شده در ۳۰ لیتر آب بود و پارچه ۶ متر در ۹۰ سانتی‌متری در محلول در ماشین KIER در بسته غوطه‌ور شد. محلول در دستگاه با یک پمپ جریان برای مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، به جریان در آورده شد. سپس پارچه به طور کامل با آب ۵۰ درجه سانتیگرادی برای مدت ۲۰ دقیقه برای ۳ بار آبکشی شد تا هر گونه مواد شیمیایی و ناخالصی حذف شود.

pH بررسی شد تا از حذف کامل مواد شیمیایی از پارچه اطمینان حاصل شود. نهایتاً تمام پارچه‌های رنگ‌ریزی شده قبل از رنگ‌ریزی، تحت فرآیندهای شستشو و سفیدگری مشابه قرار گرفتند. MWCNTs با قطر  $50 \pm 10$  نانومتر و طول تقریبی ۲۰-۱۰ میکرومتر، با استفاده از دیسپرس کردن آنها (۲ گرم) در  $HNO_3$  ۳ مولار (۲۰۰ میلی لیتر) خالص‌سازی شدند و سپس مخلوط برای مدت ۱۲ ساعت رفلاکس شد. دیسپرسیون حاصل، رقیق و فیلتر شد. مواد جامد فیلتر شده، در مخلوط غلیظ  $HNO_3$  و  $H_2SO_4$  (۱۲۰ میلی لیتر، نسبت حجمی ۱:۳) برای مدت ۲ ساعت اولتراسونیک شدند و سپس شستشو کامل با آب دی‌یونیزه تا pH خنثی انجام شد.

ذرات BN (بلوری شش وجهی، ۱ میکرومتر، از Sigma Aldrich) و گرافین، همانطور که تهیه شد، مورد استفاده قرار گرفت. رزین بر پایه اپی کلرو هیدرین Hercosett XC (غلظت ۱۲/۵٪) از Hercules Chemicals، استرالیا تهیه شد. ۳-(N,N-دی متیل میریستیل آمین)-پروپان سولفونات،  $H_2O_2$ ، NaOH، محلول آمونیوم (درجه آزمایشگاهی ۲۸٪) و اسید اولئیک (۹۰٪) از Sigma Aldrich خریداری شدند. پایدارکننده پروکسید و عامل ترکننده از Avocet dye and Chemical Co. Ltd. تهیه شدند.



شکل ۲. شماتیک سیستم طراحی شده برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی پارچه

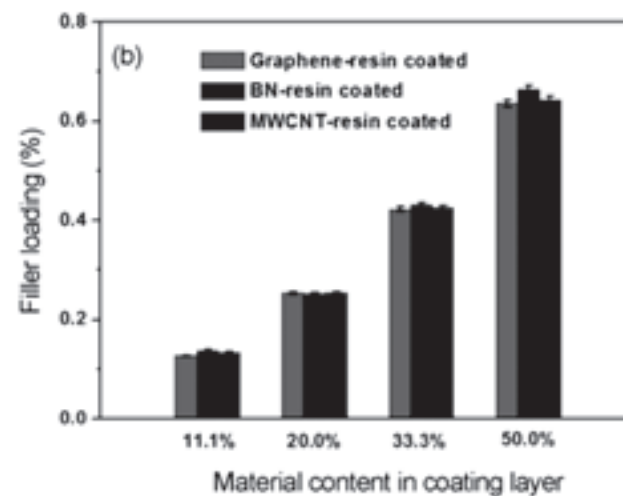
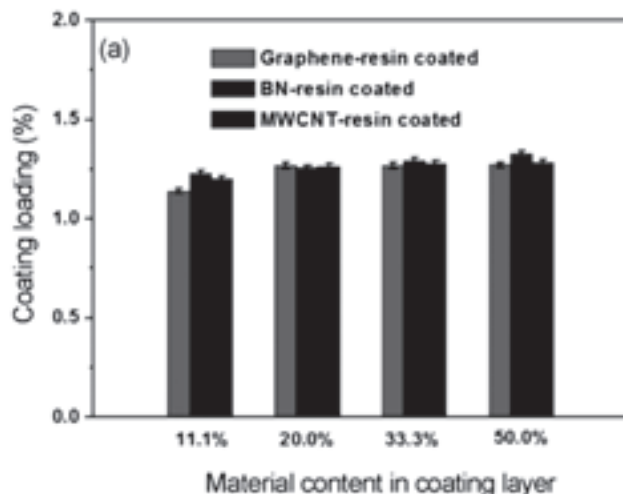
روشنی Zeiss Supra 55 VP (SEM) بررسی شد. نفوذپذیری هوا با یک تست‌کننده نفوذپذیری هوا (Textest AG, Zurich, III FX 3300، سوئیس) اندازه‌گیری شد. از روش آزمایش استاندارد بین‌المللی EN-ISO 9237 استفاده شد. فشار هوا در ۲۰۰ پاسکال تنظیم شد و برای تمام آزمایشات، ثابت نگه داشته شد. مساحت سطح آزمایش ۲۰ سانتی‌متر مربع بود و ۵ آزمایش برای هر نمونه جهت بدست آوردن متوسط، انجام شد. زاویه‌های تماس آب پارچه‌ها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس CAM 101 (KSV Instruments Ltd، فنلاند) اندازه‌گیری شدند. سختی خمشی پارچه بوسیله رابطه  $F=0.1(C^3)W$  محاسبه شد، بطوری‌که  $F$ ، سختی خمشی می‌باشد،  $C$  طول خمش در واحد سانتی‌متر می‌باشد،  $W$  وزن در واحد گرم بر متر مربع می‌باشد. این آزمایش بر طبق استاندارد انگلیسی BS 3356-1990 انجام شد. اسپکتروفتومتر Datacolor 600 با استفاده از منبع نور استاندارد D65 و مشاهده کننده ۱۰ درجه جهت ارزیابی اختلاف رنگ پارچه رنگ‌رزی شده روکش شده با روکش‌های مختلف رسانای حرارتی استفاده شد.

### نتایج

شکل ۳، تصاویر SEM مواد پرکننده مورد استفاده در این پژوهش و مورفولوژی سطحی لیف پنبه پس از عملیات روکش دهی را نشان می‌دهد. مورفولوژی لیفی MWCNTs را می‌توان به وضوح در شکل (a) مشاهده کرد. برای پارچه روکش شده با لایه کامپوزیت رزینی ۵۰٪ MWCNT، پوشش یکنواخت MWCNTs بر روی سطح لیف مشاهده می‌شود (شکل (b) ۳). BN، یک شکل ذره‌ای نایکنواخت نشان داد (شکل (c) ۳). هنگامیکه کامپوزیت حاوی BN بر روی لیف پنبه روکش شد، سطح لیف به صورت زیر مشاهده شد (شکل (d) ۳). شکل (e) ۳، ساختار گرافن را نشان می‌دهد. در مقایسه با لیف روکش شده با BN و MWCNT، لیف روکش شده با گرافین، صاف‌تر بودند و هیچ ساختار صفحه‌ای مانند بر روی سطح روکش مشاهده نشد (شکل (f) ۳). هدایت حرارتی پارچه بر اساس قانون سرد شدن نیوتن ارزیابی شد:

$$\frac{1}{C}Q = T = \frac{dQ}{dt}R \quad (1)$$

بطوری‌که،  $C(J/K)$  ظرفیت حرارتی سیستم می‌باشد،  $Q(J)$  مقدار گرما



شکل ۱. بارگذاری روکش (a) و بارگذاری پرکننده (b) برای پارچه‌هایی با محتوای جامد مختلف پرکننده‌ها در لایه‌های روکش

شدند. می‌دانیم که دوربین IR، دما را بر اساس تابش IR ساطع شده از جسم و قابلیت انتشار آن اندازه‌گیری می‌کند. قابلیت انتشار تمام نمونه‌ها، بوسیله تنظیم قابلیت حرارتی دوربین کالیبره شد تا دمای اندازه‌گیری شده، مشابه آنچه که با استفاده از ترموکوپل استاندارد اندازه‌گیری شده، شود. به منظور ثبت فرآیند گرمادهی، ویدئو دمانگاری IR، فوراً پس از آنکه پارچه در تماس با سیلندر از قبیل گرم شده در دمای تنظیم شده ۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد، ثبت شد. برای یک فرآیند سرد شدن، پارچه در ابتدا برای مدت ۱۰ دقیقه با منبع گرما (۵۰ درجه سانتیگراد) حرارت‌دهی شد و ویدئو دمانگاری IR فوراً هنگامی که منبع از پارچه حذف شد، ثبت شد. فاصله بین هر فرم، یک در هر سه ثانیه قرار داده شد. تمام ارزیابی‌ها در محیط کنترل شده (۲۰ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۶۵٪) انجام شدند. تمام نمونه‌ها در محیط مشابه برای مدت ۲۴ ساعت، قبل از آزمایش قرار داده شدند. خطای اندازه‌گیری دما دوربین IR،  $\pm 0.5$  بود.

مورفولوژی‌های سطح لیف، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی



برای بدون روکش و سیستم‌های با پوشش پارچه‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. نقاط خط‌ها، ثابت‌های سرد شدن سیستم‌ها می‌باشند. بر طبق رابطه‌های (۳) و (۴)، مقاومت حرارتی و هدایت حرارتی نمونه‌های پارچه‌ای محاسبه شدند. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

برای پارچه روکش شده فقط با رزین و بدون هر گونه پرکننده، هدایت حرارتی  $0.005 \pm 0.047$  W/mK بود، که ۵۲٪ بیشتر از پارچه پنبه‌ای عمل نشده بود. هنگامیکه لایه روکش دهی حاوی ۱/۱٪ زونی پرکننده بود، هدایت حرارتی به طور مشهودی افزایش یافت.

برای گرافین، BN و MWCNT، هدایت حرارتی پارچه روکش شده تا  $0.008 \pm 0.007$ ،  $0.007 \pm 0.074$  و  $0.007 \pm 0.072$  W/mK تغییر یافت، که نشان‌دهنده به ترتیب ۱۵۲٪، ۱۳۹٪ و ۱۳۲٪ بهبود بود. در میان این سه نوع پرکننده، گرافین بهترین بهبود را در میان هدایت حرارتی نشان داد. مقدار بیشتر گرافین، یعنی ۲۰/۰، ۳۳/۳ و ۵۰٪ wt، در لایه روکش دهی، هدایت حرارتی پارچه را تا  $0.001 \pm 0.10$ ،  $0.001 \pm 0.14$  و  $0.001 \pm 0.15$  W/mK افزایش داد، که نشان‌دهنده به ترتیب ۲۳۵٪، ۳۵۸٪ و ۸۴۲٪ بهبود می‌باشد.

شکل ۶ منحنی‌های دما-زمان پارچه‌های پنبه‌ای در طول فرآیند گرمادهی را نشان می‌دهد. در دمای منبع گرمای کنترل شده ۵۰ درجه سانتیگراد، سطح پارچه عمل نشده به حداکثر دمای ۴۶/۷ درجه سانتیگراد در مدت ۴/۵ ثانیه دست یافت. برای پارچه‌های روکش شده با این ۳ کامپوزیت رسانای حرارتی، سطح در دمای پایین‌تر در شرایط تست مشابه باقی ماند. این نتیجه ناشی از اتلاف موثر گرما از لایه روکش شده می‌باشد، که به تأخیر سرد شدن تابشی اشاره دارد. بیشترین اختلاف در دمای تعادلی سطحی بین پارچه روکش شده و شاهد، ۲/۶ درجه سانتیگراد می‌باشد، مربوط به روکش دهی گرافین ۵۰٪ wt می‌باشد (شکل ۶ (a)). برای پارچه روکش شده با BN، اختلاف در دمای تعادلی سطحی در محدوده ۲/۴-۰/۹ بود، در حالیکه برای پارچه روکش شده با MWCNT، اختلاف در محدوده ۲/۰-۰/۹ بود. این نتایج نشان می‌دهد که گرافین، اتلاف گرمایی بهتری نسبت به دو پرکننده دیگر ایجاد کرده است.

دمای تعادلی پارچه‌های روکش شده در طول سرد کردن نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۷). در هنگام آزمایش، تمام نمونه‌های روکش شده برای مدت ۱۰ دقیقه گرم شدند و سپس نمونه تا دمای تعادلی حداکثر گرم شد و سپس به صورت عادی در شرایط محیطی کنترل شده سرد شد. پس از ۲۴/۵ دقیقه سرد شدن، دمای حداقل اندازه‌گیری شد. برای پارچه روکش نشده، دمای تعادلی ۳۰/۴ درجه سانتیگراد بود. پارچه‌های روکش شده، رفتار سرد شدن خوب نشان دادند و در دمای تعادلی پایین‌تر از پارچه شاهد باقی ماندند. با افزایش مقدار پرکننده در لایه روکش دهی، دمای تعادلی سرد کردن کاهش یافت. کمترین دمای تعادلی اندازه‌گیری شده ۲۷/۹ درجه سانتیگراد بود، که ناشی از روکش با ۵۰٪ wt گرافین بود. با این حال، برای روکش BN و MWCNT با

می‌باشد،  $T(K)$  دمای سیستم می‌باشد،  $dQ/dt$  مقدار گرمای عبور کرده از سیستم در واحد زمان،  $R(K/W)$  مقاومت حرارتی سیستم می‌باشد. رابطه (۱) می‌تواند منظم شود و به شکل زیر انتگرال‌گیری شود:

$$(T - T_{amb}) = (T_0 - T_{amb})e^{-t/(RC)} \quad (2)$$

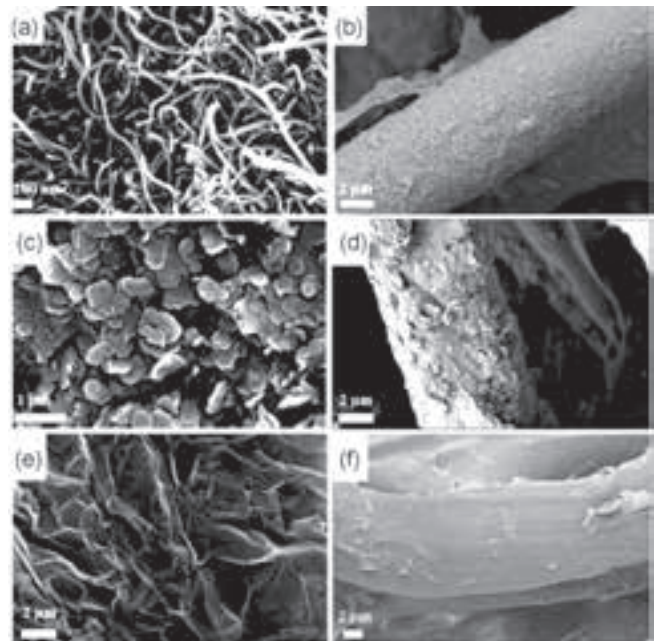
بطوری که  $T(K)$  دمای سیستم در زمان  $t$  می‌باشد،  $T_0(K)$  دمای اولیه سیستم می‌باشد،  $T_{amb}(K)$  دمای محیط می‌باشد و  $t(s)$  زمان سرد شدن می‌باشد. با رسم منحنی  $\ln[(T_0 - T_{amb})/(T - T_{amb})]$  بر حسب زمان، ثابت سرد شدن  $K=1/RC$  می‌تواند بوسیله برازش خطی منحنی تعیین شود. سپس مقاومت حرارتی پارچه ( $R_c$ ) به صورت اختلاف بین مقاومت حرارتی پارچه و محیط اطراف ( $R$ ) و مقاومت حرارتی تنها محیط اطراف ( $R_0$ ) تعیین می‌شود:

$$R_f = R - R_0 = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{K} - \frac{1}{K_0} \right) \quad (3)$$

در اینجا،  $K_0$  ثابت سرد شدن سیستم بدون پارچه می‌باشد. با دانستن مقاومت حرارتی و همچنین مساحت سطح نمونه پارچه  $S(m^2)$  و ضخامت پارچه  $d(m)$ ، هدایت گرمایی پارچه  $\lambda(W/mK)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

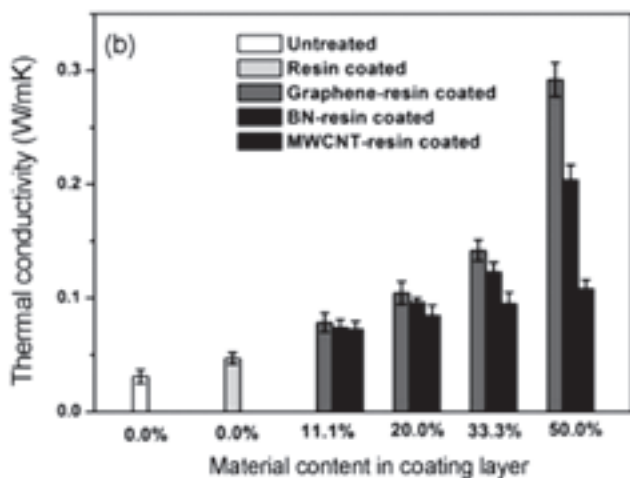
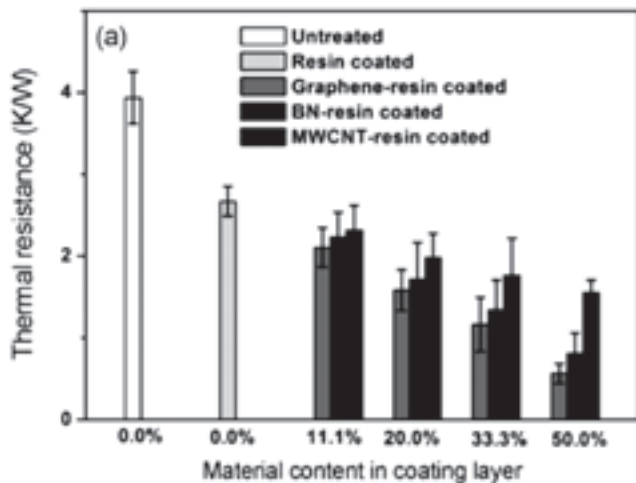
$$\lambda = \frac{1}{R} \times \frac{d}{S} \quad (4)$$

خط‌های  $\ln[(T - T_{amb})/(T_0 - T_{amb})]$  رسم شده بر حسب زمان سرد شدن



شکل ۳. تصاویر SEM پرکننده‌ها و الیاف روکش شده مربوطه: (a,b) MWCNT، BN (c,d) و گرافین (e,f)

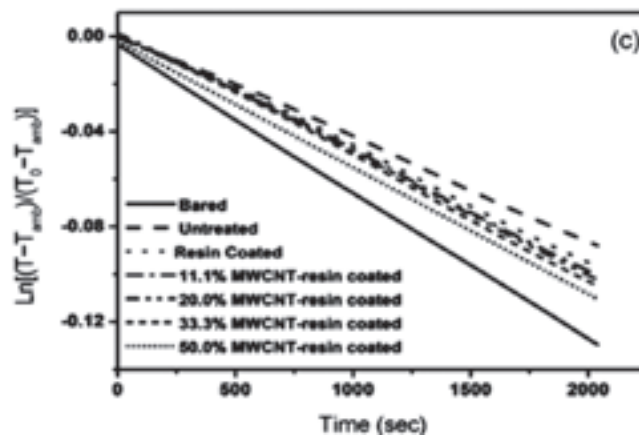
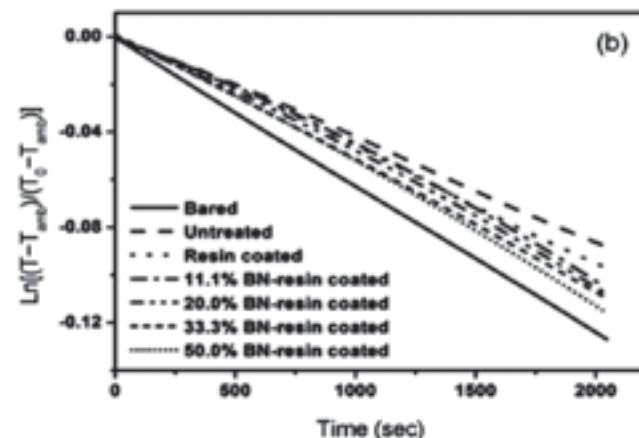
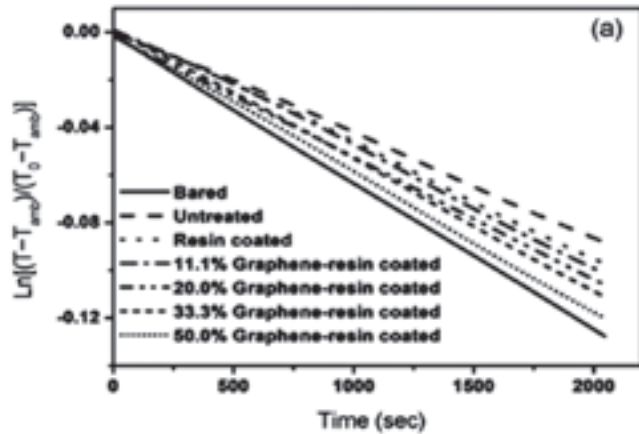




شکل ۵. مقاومت و هدایت حرارتی محاسبه شده پارچه ها

است. برای پارچه روکش شده با رزین تنها، نفوذپذیری هوا تا ۵۱۵ mm/s کاهش یافت. هنگامی که لایه روکش حاوی نانوذرات هدایت حرارتی بود، نفوذپذیری هوا بیشتر کاهش یافت. برای روکش های ۱۱/۵ wt %، ۲۰/۸ wt % و ۳۳/۳ wt %، نفوذپذیری هوا تا ۱۴/۱۵ ± ۱۸۰/۶، ۲۰/۲/۸ ± ۶/۵ و ۲۱/۴۵ ± mm/s کاهش در ۲۳۸ برای به ترتیب گرافین، BN و MWCNT کاهش یافت. کاهش در نفوذپذیری هوا، بدین دلیل بود که مواد روکش دهی تا حدی خلل و فرج و منافذ موجود در پارچه را مسدود کرده بود.

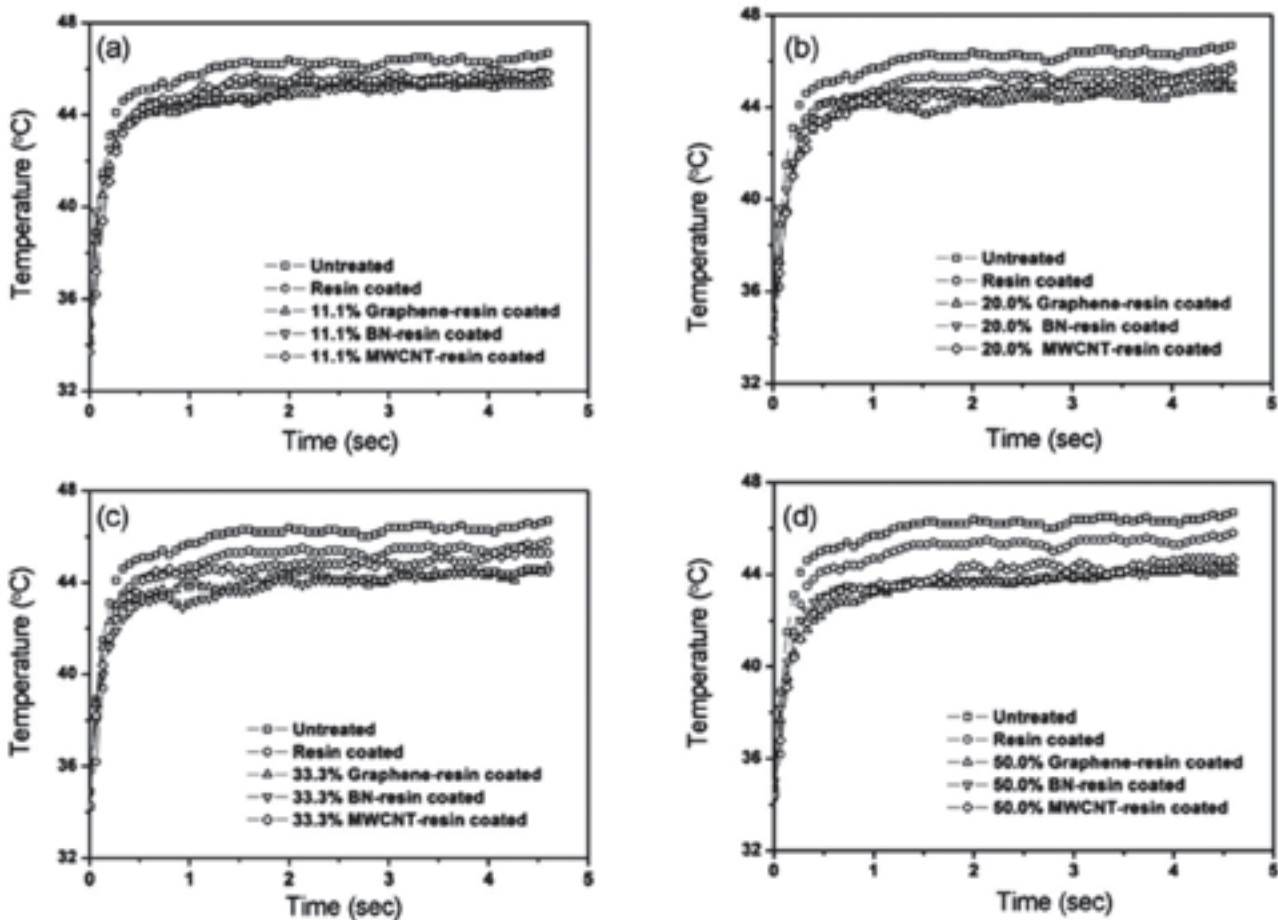
شکل ۹ فرآیند پخش شدن قطره آب بر روی پارچه های پنبه ای را نشان می دهد. به دلیل زیاد بودن گروه های هیدروکسیل سطحی، پارچه پنبه ای اولیه، آبدوست می باشد و به طور کامل بوسیله آب در کمتر از ۱۳۲ میلی ثانیه تر شد. هنگامیکه پارچه پنبه ای با تنها رزین عمل شد، پارچه با زاویه تماس ۱۱۰ درجه در زمان ۰ ثانیه کمتر آب دوست شد و بیش از ۱ ثانیه طول کشید تا قطره آب به طور کامل پخش شود. حضور MWCNT و گرافین در لایه روکش رزین، آب دوستی در مقایسه با روکش تنها رزین، افزایش یافت. برای حالت های ۱۷/۱ wt % و ۳۰/۰ wt %، بیش از ۱۹۸ میلی ثانیه زمان صرف شد تا قطره آب به طور کامل



شکل ۴. منحنی  $\ln[(T-T_{amb})/(T_0-T_{amb})]$  بر حسب زمان برای سیستم بدون روکش پارچه ای و سیستم پوشیده شده با پارچه های روکش داده شده

مقدار مشابه، دمای تعادلی به ترتیب ۲۸/۴ درجه سانتیگراد و ۲۹/۴ درجه سانتیگراد بود.

مواد لیفی، از الیاف و هوای محبوس تشکیل می شود و بنابراین هدایت حرارتی آن از هر دوی این فاکتورها تاثیر می پذیرد. مقدار هوای محبوس، تاثیر زیادی بر روی هدایت حرارتی پارچه دارد. بنابراین، نفوذپذیری هوا پارچه های روکش شده اندازه گیری شد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، نفوذپذیری هوا برای پارچه روکش نشده، ۶۶۵ mm/s بوده



شکل ۶. منحنی های دما بر حسب زمان در طول فرایند حرارت دهی پارچه ها

صرف نظر از فام اصلی، تغییر زیادی در رنگ اصلی پارچه نشان دادند. حضور MWCNT در روکش، حتی هنگامیکه محتوای آن کمتر از ۱۱/۱ wt% بود، رنگ قرمز را به کبود، آبی مایل به ارغوانی روشن را به آبی تیره تغییر داد. تیرگی رنگ با افزایش محتوای MWCNT افزایش یافت و روکش دهی سبب تیره شدن شدید گردید (شکل (b) و (c) ۱۲). برای رنگ زرد، تغییر در مقایسه با دو رنگ دیگر بیشتر بود. این بیشتر بودن تغییر بدین دلیل است که برآقیت رنگ زرد در مقایسه با دو رنگ دیگر بیشتر می باشد و ماده بکار رفته به عنوان روکش، مشکمی می باشد که فام را به مقدار بیشتری تغییر می دهد (شکل (a) ۱۲). گرافین در لایه روکش دهی سبب تغییر بیشتر رنگ پارچه به خاکستری در مقایسه با سیاه شد (شکل ۱۲).

#### بحث

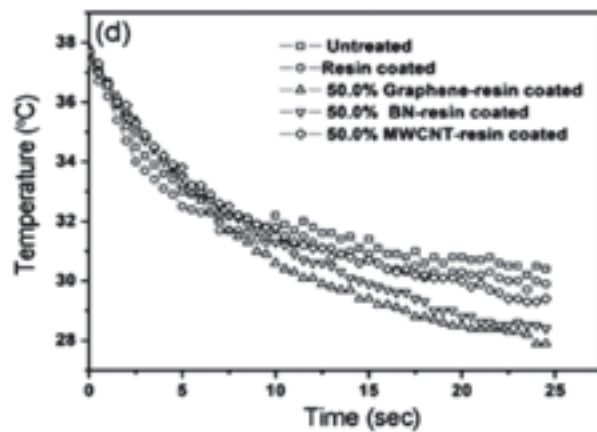
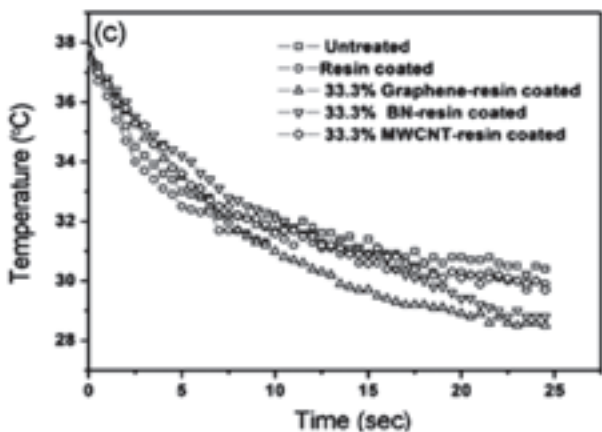
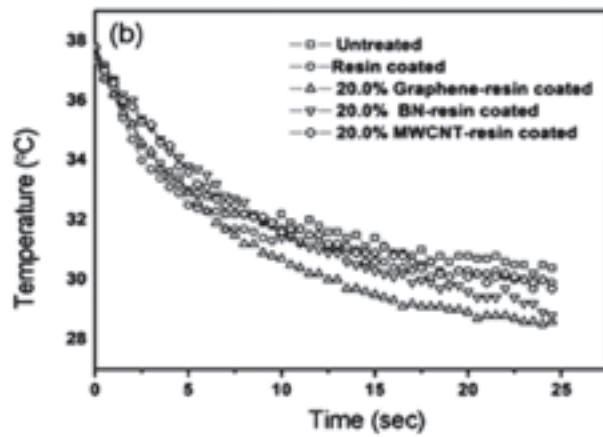
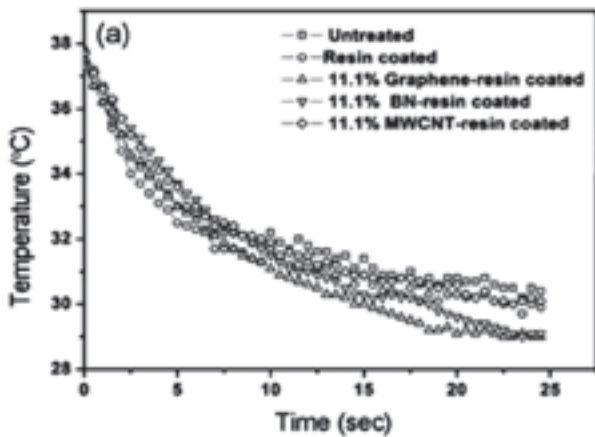
برای پارچه، هدایت حرارتی ( $\lambda$ ) می تواند مطابق با تاثیر ماتریس لیف، لایه روکش و هوای محبوس و بر طبق محاسبات برای سیستم کامپوزیتی، ارزیابی شود:

$$\lambda = \lambda_m \times V_m + \lambda_c \times V_c + \lambda_a \times V_a \quad (5)$$

پخش شود. هنگامیکه محتوای گرافین و MWCNT تا ۵۰/۰ wt% افزایش یافت، آب دوستی به مقدار قابل توجهی افزایش یافت و آب دوستی مشابه با پارچه عمل نشده حاصل نمود. از طرف دیگر، تمام پارچه های روکش شده با BN، آبگریز شد و بیش از ۷ ثانیه طول کشید تا قطره آب به طور کامل بر روی این سطوح پارچه ها پخش شود.

سختی خمشی پارچه، معیاری از زیردست و نرمی پارچه می باشد. شکل ۱۰، افزایش سختی با افزایش محتوای پرکننده را نشان می دهد. پارچه روکش شده با BN، افزایش سختی ۲۸۵٪ در محتوای ۵۰/۰ wt% در لایه روکش و ۱۵۲٪ در ۱۱/۱ wt% نشان داد. در مقایسه، گرافین و MWCNT تاثیر کمتری بر روی سختی خمشی نشان داد.

جهت مطالعه تاثیر روکش ها بر روی ظاهر پارچه های رنگ شده، پارچه های پنبه ای رنگرزی شده در رنگ های زرد، آبی یا قرمز، در معرض عملیات روکش دهی قرار داده شدند و تغییر رنگ پس از روکش دهی اندازه گیری شد و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تصاویر دیجیتال نیز برای نشان دادن اختلاف بصری (شکل ۱۲) تهیه شدند. برای روکش BN، فام اصلی (زرد، قرمز و آبی)، به مقدار کمی تغییر یافت. شدید اصلی رنگ باز هم در پارچه روکش شده مشاهده شد. با این حال برای روکش های گرافین و MWCNT، تصاویر دیجیتال و نتایج طیفی،



شکل ۷. منحنی‌های دما بر حسب زمان، هنگام سرد کردن پارچه‌ها

بطوریکه  $\phi$  غلظت حجمی پرکننده می‌باشد. بنابراین،  $\lambda$  می‌تواند به شکل زیر بازنویسی شود:

$$\lambda = \lambda_m \times (1 - \phi) + [\lambda_r \times (1 - \phi) + \lambda_g \times \phi] \times V_c + \lambda_a \times (\phi - V_c) \quad (10)$$

برای روکش رزینی خالص،  $\phi$  صفر می‌باشد. بهبود در هدایت حرارتی به

$$V_m + V_c + V_a = 1 \quad (6)$$

بطوری که  $V$ ، کسر حجمی می‌باشد و زیرنویس‌های  $m$ ،  $c$  و  $a$  به ترتیب نشان‌دهنده ماتریس پارچه، لایه روکش و هوا می‌باشند. برای پارچه روکش نشده، تخلخل  $\phi$ ، معادل  $V_a$  می‌باشد و بنابراین  $V_m = 1 - \phi$  می‌باشد. بنابراین، هدایت حرارتی آن ( $\lambda_0$ ) به شکل زیر می‌باشد:

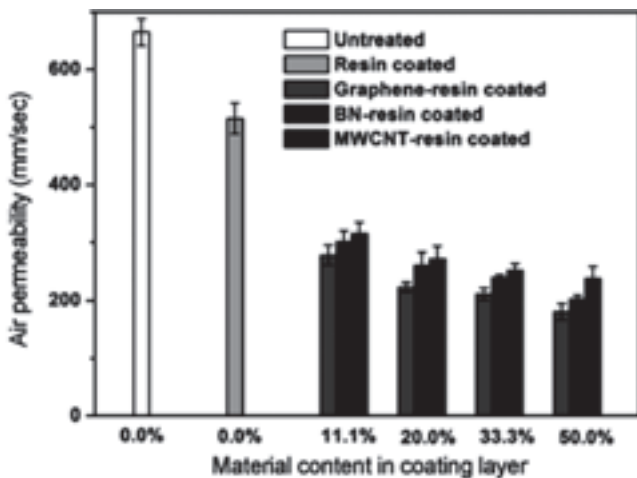
$$\lambda_0 = \lambda_m \times (1 - \phi) + \lambda_a \times \phi \quad (7)$$

در اینجا فرض شده است که روکش حجم فضایی پارچه را تغییر نمی‌دهد. کل هدایت حرارتی پارچه روکش شده ( $\lambda$ ) به شکل زیر می‌باشد:

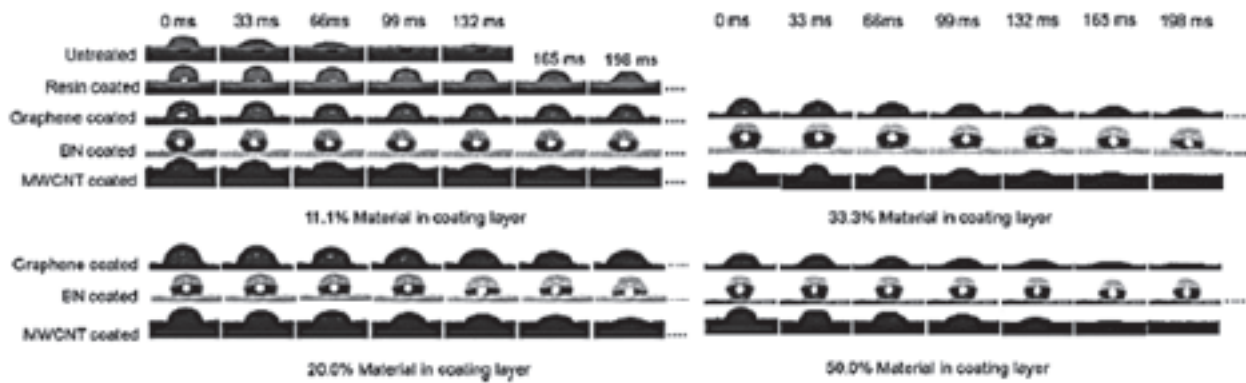
$$\lambda = \lambda_m + (1 - \phi) + \lambda_r \times V_c + \lambda_g \times (\phi - V_c) \quad (8)$$

از آنجا که لایه روکش حاوی رزین و مواد پرکننده می‌باشد، هدایت حرارتی آن می‌تواند به روشی مانند زیر محاسبه شود:

$$\lambda_r = \lambda_r \times (1 - \phi) + \lambda_a \times \phi \quad (9)$$



شکل ۸. نفوذپذیری هوای نمونه‌های پارچه‌ای



شکل ۹. ارزیابی فرآیند پخش شدن قطره آب بر روی پارچه‌ها

دلیل عملیات پرکننده به شکل زیر می باشد:

$$P\% = \frac{\lambda_m \times (1 - \phi) + [\lambda_r \times (1 - \phi) + \lambda_n \times \phi] \times V_c + \lambda_n \times (\phi - V_c)}{\lambda_m \times (1 - \phi) + \lambda_r \times V_c + \lambda_n \times (\phi - V_c)} \times 100\% \quad (11)$$

که می تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$P\% = 1 + \frac{(\lambda_n - \lambda_r) \phi V_c}{\lambda_m - (\lambda_m - \lambda_n) \phi + (\lambda_r - \lambda_n) \times V_c} \times 100\% \quad (12)$$

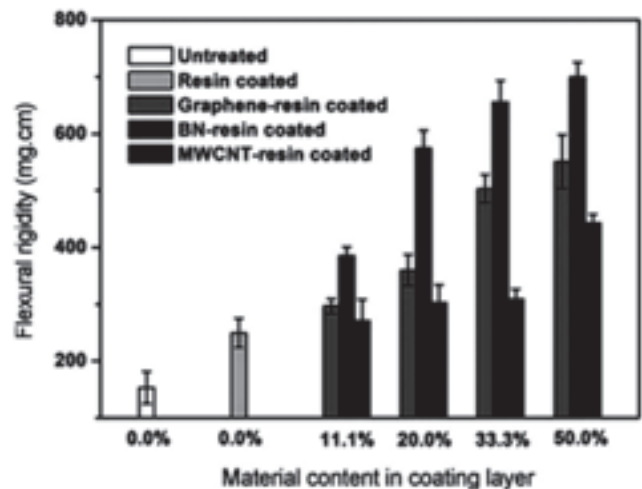
کاهش نفوذپذیری هوای پارچه (یعنی تخلخل  $\phi$ ) با افزایش مقدار پرکننده مشاهده شد. این کاهش، بر طبق رابطه (۱۲) هدایت حرارتی را بیشتر بهبود می دهد. گرافین بیشترین هدایت حرارتی را در میان این ۳ نوع پرکننده دارد، و بنابراین هدایت حرارتی بالاتر (از رابطه (۱۲)) نسبت به دیگر پرکننده‌ها، اگر نفوذپذیری هوای پارچه روکش شده مشابه باشد، دارد. بعلاوه، روکش حاوی گرافین سبب کاهش نسبتاً زیاد نفوذپذیری هوا در مقایسه با BN و MWCNTs شد. بنابراین، گرافین بیشترین بهبود را در هدایت حرارتی پارچه نشان داد.

باید متذکر شد که MWCNT، بهبودی کمتری در مقایسه با BN در هدایت حرارتی حاصل نمود. با توجه به اینکه یک MWCNT، هدایت حرارتی بیش از چند هزار W/mK دارد، این نتیجه غیر منطقی به نظر می رسد. این نتایج توسط دیگر محققان نیز گزارش شده است که هدایت حرارتی مجموعه‌ها، Mat یا کامپوزیت‌های پلیمری CNT به مقدار قابل توجهی در مقایسه با مقادیر پیش بینی شده تئوری کمتر (کمتر از چند W/mK در دمای اتاق) می باشد. هدایت حرارتی کم پیش بینی نشده، به دلیل اتصال داخلی ضعیف بین CNT ها می باشد. اتصال داخلی از طریق نیروهای واندروالس، به مقدار قابل توجهی، انتقال فوتون در نقاط متصل شده را محدود می کند و بنابراین هدایت حرارتی کاهش می یابد.

#### نتیجه گیری

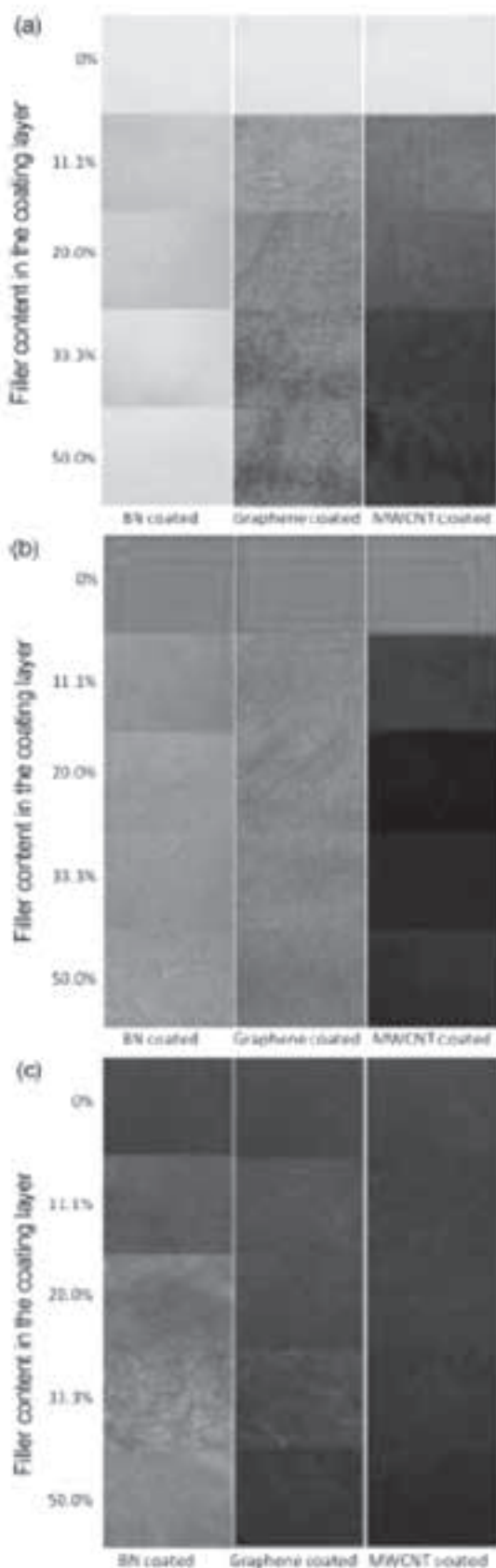
سه پرکننده حرارتی گرافین، MWCNT و پودر BN، جهت تشکیل روکش‌های کامپوزیتی بر روی پارچه‌ها مورد استفاده قرار گرفت تا هدایت حرارتی بهبود یابد. بررسی ما نشان داد که پارچه روکش شده با گرافین، بیشترین بهبود را در هدایت حرارتی پارچه نشان می دهد. روکش کامپوزیتی BN، موثرتر از MWCNT

رابطه (۱۲) نشان می دهد که بهبود در هدایت حرارتی پارچه روکش شده، عموماً متأثر از هدایت حرارتی پرکننده در لایه روکش ( $\phi$ ) و تخلخل پارچه ( $\phi$ ) می باشد. افزایش  $\lambda_n$  و  $\phi$ ، هر دو سبب بهبود هدایت حرارتی می شوند. با افزایش مقدار پرکننده در لایه روکش، هدایت حرارتی کامپوزیت افزایش می یابد، که بر طبق مشاهدات آزمایش ما خوب می باشد. این روند برای هر سه نوع پرکننده بکار برده می شود.

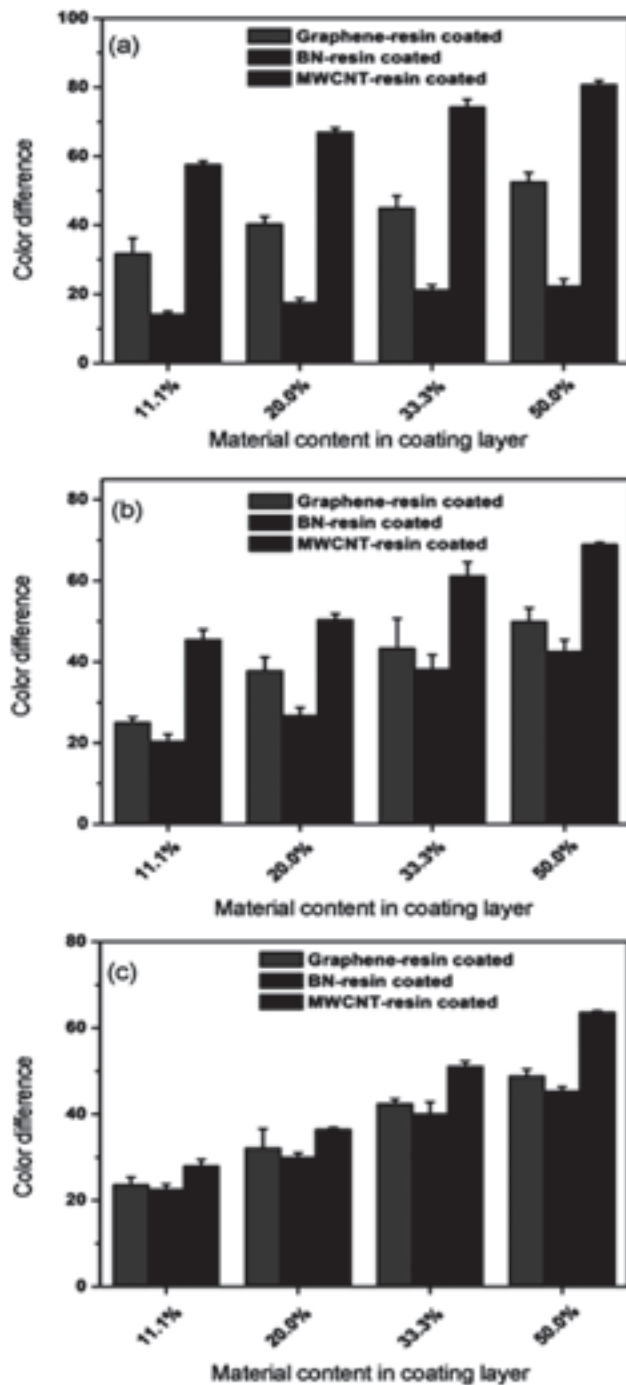


شکل ۱۰. سختی خمشی پارچه‌ها





شکل ۱۲. تصاویر دیجیتالی نشان دهنده اختلاف رنگی قبل و بعد از عملیات روکش دهی برای پارچه‌های (a) زرد، (b) قرمز و (c) آبی



شکل ۱۱. اختلاف رنگی قبل و بعد از عملیات روکش دهی برای پارچه‌های (a) زرد، (b) قرمز و (c) آبی

بود. روکش گرافین و MWCNT، خاصیت آب دوستی آن را حفظ می‌کنند، در حالیکه روکش BN، پارچه را به سطح آبگریز تغییر می‌دهد. روکش کامپوزیتی MWCNT، نسبت به گرافین و BN در زیر دست پارچه و نفوذپذیری هوا مزیت دارد. روکش کامپوزیتی BN، رنگ پارچه را سمت رنگ‌های روشن‌تر یا سفیدتر تغییر می‌دهد، در حالیکه MWCNT، رنگ تیره‌تر یا سیاه‌تر حاصل می‌کند و گرافین پارچه را خاکستری می‌کند.