

نانوکامپوزیت‌ها و عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی آن‌ها

مهدی صالحی‌راد^{*}، لیلا احمدیان علم، مریم کردانی

گروه شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران

چکیده

کامپوزیت‌های پلیمری مختلفی که جهت تهیه بردهای مدار چاپی، مواد بین سطحی حرارتی و نیز به عنوان پایه یا نگهدارنده تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، توانایی انتقال حرارت بسیار پایینی دارند. از این‌رو عامل فوق کاربرد این دسته از مواد در زمینه‌های یاد شده را محدود نموده است. یکی از روش‌های مورد توجه جهت تقویت خواص هدایت حرارتی پلیمرها، استفاده از پرکننده‌های در مقیاس نانو است. عواملی نظیر اندازه، شکل، جهت‌گیری و برهم‌کنش پرکننده نانو با ماتریس پلیمر در میزان تأثیرگذاری پرکننده‌ها بر خواص پلیمر نقش به‌سزایی دارند. این مقاله به معرفی این عوامل و بررسی چگونگی تأثیر آن‌ها بر رفتار هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها پرداخته است.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت، پرکننده، هدایت حرارتی.

ایمیل نویسنده مسئول : salehiradmehdi@gmail.com

۱-مقدمه

اگرچه در طراحی بسیاری از مدارهای قدرت از تقویت‌کننده‌هایی استفاده می‌شود که از بازده حرارتی نسبتاً خوبی برخوردار هستند. با این وجود، مقدار توان تلف شده در اجزای الکتریکی سبب گرم شدن بیش از حد و رسیدن دما به حد غیر مجاز شده است. از این‌رو برای سهولت تبادل حرارتی قطعه مورد نظر با محیط، تمهیداتی اندیشیده شده است که از آن جمله می‌توان به کاربرد مواد با قابلیت هدایت حرارتی بالا و در عین حال عایق الکتریکی اشاره نمود. امروزه علی‌رغم هدایت حرارتی کم مواد پلیمری (جدول ۱)، از این دسته از مواد به طور گسترده در صنایع مدرن و پیشرفته الکترونیکی استفاده می‌شود.

جدول ۱. هدایت حرارتی برخی از مواد پلیمری [۱].

نوع ماده	هدایت حرارتی در دمای ۲۵°C (W/mK)
Low density polyethylene (LDPE)	۰/۳
High density polyethylene (HDPE)	۰/۴۴
Polypolypropylene (PP)	۰/۱۱
Polystyrene (PS)	۰/۱۴
Polymethylmethacrylate (PMMA)	۰/۲۱
Nylon-6 (PA6)	۰/۲۵
Nylon-6.6 (PA66)	۰/۲۶

از این‌رو اضافه نمودن پرکننده‌های نانو در ساختار پلیمرهای عایق حرارتی به عنوان روشی مرسوم جهت بهبود خواص الکتریکی، مکانیکی و حرارتی معرفی شده است. از جمله این پرکننده‌های هادی حرارت می‌توان به گرافیت [۲،۳]، نیتريد بور [۴،۵]، نانولوله‌های کربن [۷،۸]، فلزات و اکسیدهای فلزی [۹،۱۰] و ... اشاره نمود.

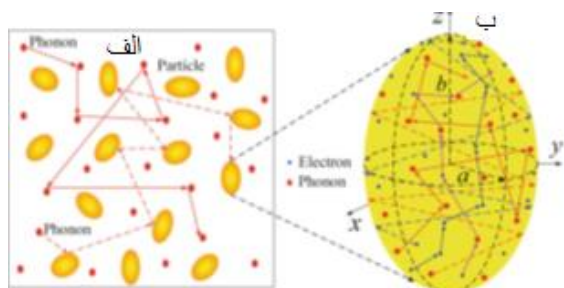
۲- فناوری نانو و نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها عموماً به ماتریس‌های حاوی پرکننده نانو اطلاق می‌شود. مواد نانوکامپوزیتی محدوده بین شیشه‌های معدنی و پلیمرهای آلی را پوشش می‌دهند [۱۰]. با توجه به اینکه مقیاس نانو هر ماده‌ای خواص بسیار متفاوتی نسبت به مقیاس میکرو یا ماکرو آن ماده دارد؛ مدت زمان طولانی است که از پرکننده‌های نانو با هدف افزایش عملکرد

metallic solids	Aluminum Nitride (AlN)	۳۱۹-۵۵۰
	Beryllium Oxide (BeO)	۳۷۰
	Copper Oxide (CuO)	۷۹/۵
	Silicon Carbide (SiC)	۱۴۸
	Silicon Oxide (SiO ₂)	۱/۴
	Titania (TiO ₂)	۸/۴
	Zinc Oxide (ZnO)	۲۹
	Boron Nitride (h-BN)	~۳۰۰
	Boron Nitride	~۴۶-۹۶۰
	Nanotubes (BNNTs)	۱۷۰۰-۲۰۰۰
	Boron Nitride Nanoribbons (BNNRs)	

چندین مکانیسم برای توضیح چگونگی هدایت حرارت و یا به عبارتی انتقال انرژی گرمایی در درون یک جسم جامد وجود دارد. حامل‌های مختلفی نظیر الکترون‌ها، فونون‌ها (ارتعاشات اتمی) یا فوتون‌ها برای انتقال انرژی گرمایی در جسم جامد در نظر گرفته می‌شوند. در مواد غیرفلزی، انتقال فونون به عنوان مکانیسم اصلی در انتقال حرارت و در فلزات، گرما تقریباً به‌طور کامل به کمک الکترون‌ها هدایت می‌گردد (شکل ۱). در آلیاژها و نیمه‌رساناها، هر دو مکانیسم در انتقال انرژی گرمایی نقش به سزا خواهند داشت [۱۳].

به طور کلی، میزان هدایت حرارتی به میزان پراکنش فونون‌ها بستگی دارد. در واقع، مقاومت حرارتی ناشی از انواع مختلفی از فرآیندهای پراکنش فونون‌ها مانند پراکنش فونون-فونون، پراکنش در مرزها، پراکنش از نقاط نقص ساختاری و... خواهد بود. جهت به حداکثر رساندن هدایت حرارتی، فرایندهای پراکنش فونون باید به حداقل مقدار خود برسند [۱۴].



شکل ۱. نحوه پراکنش حامل‌های انرژی در بستر فلزی (الف) و بستر غیر فلزی (ب) [۱۴].

۲-۲- عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی نانوکامپوزیت‌ها

افزایش هدایت حرارتی نانوکامپوزیت‌ها به متغیرهای زیادی بستگی دارد که سبب بروز ویژگی‌های مختلف در این مواد می‌گردد. در ذیل به این موارد اشاره شده است [۱۵]. در جدول ۳، هدایت حرارتی انواع مختلفی از نانوکامپوزیت‌ها بر اساس نوع

ماتریس‌های مختلف استفاده می‌شود و تعداد آن‌ها روز به روز در حال افزایش است؛ همان‌طور که ماتریس‌های مورد استفاده و برهم‌کنش آن‌ها با پرکننده‌های سنتی گسترش یافته است [۱۱]. این تغییر در خواص مواد به تغییر کمی نسبت سطح و حجم اتم (مساحت سطح بالا) مرتبط است. واردکردن چنین نانوذراتی در ماتریس مواد پلیمری شناخته شده و قدیمی، ویژگی‌ها و قابلیت‌های جدیدی به آن‌ها خواهد داد.

امروزه با گسترش علم مواد نوین و به‌خصوص پیشرفت نانوکامپوزیت‌ها، ایده‌های زیادی برای تولید موادی با خواص هدایت حرارتی جدید به‌وجود آمده است. وجود مواد با هدایت حرارتی بالا جهت خارج سازی گرمای تولید شده در قطعه بسیار حائز اهمیت است، زیرا در نتیجه حضور این مواد دمای عملکرد سیستم افزایش نیافته و از ایجاد نقایص الکتریکی ناشی از دمای بالا جلوگیری می‌گردد.

۲-۱- هدایت حرارتی در نانوکامپوزیت‌ها

در حقیقت، مواد جامد غیرفلزی برای اینکه بتوانند به عنوان ماده با هدایت حرارتی بالا در نظر گرفته شوند بایستی دارای ویژگی‌هایی نظیر جرم اتمی پایین، برهم‌کنش‌های قوی، ساختار کریستالی ساده و ناهمبستگی کم در ارتعاشات مولکولی باشند. از آن‌جایی که پلیمرها دارای ویژگی‌های فوق نیستند، از این‌رو از هدایت حرارتی پایینی در محدوده W/mK ۰/۱-۰/۶ برخوردار هستند. جهت تحقق این هدف، فناوری نانو دسترسی به ایجاد قطعات و تجهیزات مختلف الکترونیکی با خواص هدایت حرارتی بالا را فراهم کرده است. هدایت حرارتی انواع جامدات فلزی، غیرفلزی و کربنی قابل کاربرد در ماتریس‌های پلیمری در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۲].

جدول ۲. هدایت حرارتی برخی از پرکننده‌های نانو [۱۲].

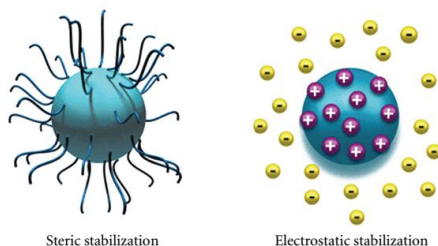
هدایت حرارتی (W/mK)		نوع ماده
Carbon	Single Wall Nanotubes	۲۰۰۰-۶۰۰۰
	Multi Wall Nanotubes	~۳۰۰۰
	Carbon (Amorphous)	۱/۵۹
	Carbon (Diamond)	۹۰۰-۲۳۲۰
	Carbon (Graphite)	۱۱۹-۲۰۰۰
	Graphene	~۳۰۰۰
	Fullerene (C60-single crystal)	۰/۴
Metallic solids	Aluminum	۲۳۷
	Copper	۳۹۸
	Gold	۳۱۵
	Iron	۸۰
	Nickel	۹۱
	Silver	۴۲۴
Non-	Alumina (Al ₂ O ₃)	۳۱-۴۱

۲-۲-۱- اندازه و شکل ذرات پرکننده

در مطالعات صورت گرفته توسط محققین به تأثیر شکل پرکننده، تجمع ذرات و حداصل بین پرکننده و ماتریس پلیمری بر روی مقدار ضریب هدایت حرارتی اشاره شده است [۱۳، ۱۴، ۱۷]. نتایج به دست آمده از این مطالعات حاکی از این است که در حضور درصدهای وزنی بالای پرکننده کامپوزیت حاوی میکروذرات، هدایت حرارتی بالاتری در مقایسه با پرکننده نانو از خود نشان می‌دهند که دلیل این امر را می‌توان به پراکنش بیشتر فونون از سطح نانوذرات با مساحت سطح بیشتر نسبت داد [۱۳، ۱۴]. در مطالعات دیگری، برای نانوکامپوزیت‌های حاوی پرکننده‌های صفحه‌ای شکل در مقایسه با پرکننده‌های کروی شکل ضریب هدایت حرارتی بالاتری مشاهده شد؛ تفاوت در هدایت حرارتی مشاهده شده بین نانوکامپوزیت‌های حاوی ذرات کروی و صفحه‌ای را می‌توان به شکل ذرات نسبت داد. در مورد ذرات صفحه‌مانند، به دلیل نسبت ابعاد بالاتر، میانگین فاصله کمتری بین ذرات وجود دارد که این امر می‌تواند دلیلی بر انتقال بیشتر گرمایی موثر باشد. علاوه بر آن، نسبت ابعاد بالا باعث تشکیل شبکه‌های هادی حرارت با آستانه نفوذ کم شده و نقش مخرب مقاومت گرمایی بین سطحی بر هدایت حرارت را کاهش می‌دهد [۱۸].

۲-۲-۲- اصلاح سطح پرکننده

مطالعه اثر اصلاح سطح پرکننده، توسط تعدادی از محققان به منظور بررسی برهم‌کنش بهتر بین ماتریس پلیمر و پرکننده و هم‌چنین بررسی تأثیر آن بر ضریب هدایت حرارتی مطالعه شده است [۱۹-۲۲]. به‌طور کلی، اصلاح سطح پرکننده سبب افزایش پایداری آن در حال محلول (پیش از افزودن به ماتریس پلیمری) و نیز در بستر پلیمر خواهد شد، زیرا اصلاح سطح مانع از تجمع ذرات می‌گردد؛ البته، به‌شرطی که نوع اصلاح کننده درست انتخاب شده و سبب افزایش امتزاج‌پذیری پرکننده با ماتریس گردد. پایداری به معنای عدم تجمع ذرات در یک سرعت معنی‌دار است. عموماً، سرعت تجمع از طریق فرکانس برخورد و احتمال به هم چسبیدگی در حین برخورد، تعیین می‌شود. در این رابطه دو رویکرد وجود دارد (شکل ۲)، (۱) پایداری الکترواستاتیک و (۲) پایداری فضایی.



Steric stabilization

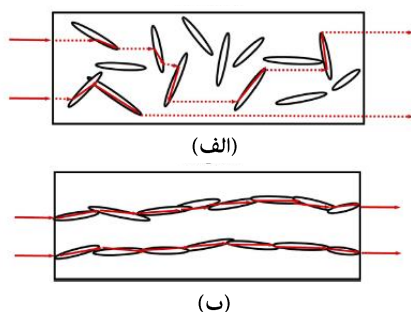
Electrostatic stabilization

شکل ۲. انواع پایداری کلوتیدی نانوذرات [۲۱].

ماتریس پلیمری، نوع پرکننده و میزان بارگذاری آن در سیستم آورده شده است [۱۶].

جدول ۳. هدایت حرارتی برخی از نانوکامپوزیت‌های مطالعه شده [۱۶].

پرکننده	ماتریس پلیمر	مقدار پرکننده	هدایت حرارتی (W/mK)
Mercapto-functionalized AlN	Epoxy	۶۵ vol%	~۶
Graphene	Epoxy	vol% = ۲۵ و GNP's vol% = ۲۵ CNTs	۷/۳۰
Graphene-multilayer graphene nanocomposite	Thermal grease	۲ vol%	۱۴
Noncovalently functionalized graphene flakes	Epoxy	۱۰ wt%	۱/۵۳
Silica-coated multi-walled carbon nanotubes	Epoxy	۱ wt%	۰/۲۴۰
Py-PGMA-graphene nanosheets	Epoxy	۴ phr	۱/۹۱
Graphene	Epoxy	۱۲ wt%	۰/۷۳
Micro-SiC	Epoxy	۶۳ wt%	۲/۸
Benzenetricarboxylic acid grafted MWCNT	Epoxy	۵ vol%	۰/۹۶
BNNTs	PVA	۱۰ wt%	۰/۵۴
Micro and nanosized BN	Polyimide	۳۰ wt%	۱/۲
h-BN	Polyimide	۳۰ vol% و ۶۰ vol%	~۳ و ۷
Graphite nanoplatelet	Epoxy	۱۰ wt%	~۲
AlN + h-BN	Polyimide	vol% h-BN=۲۱ و vol% AlN=۴۹	۹/۳
BNNTs	PMMA	۱۰ wt% و ۲۴ wt%	۰/۵۱ و ۳/۱۶
BNNTs	PVF	۱۰ wt%	۰/۴۵
BNNTs	PVA	۳ wt%	۰/۳
Si3N4	Polystyrene	۴۰ wt%	۳
DWCNT	Epoxy	۰/۶ vol%	۰/۲۵۲
BNNSs	polysiloxane	۵ vol%	۰/۱۳
h-BN microplatelets	PVA	۵/۹ vol%	۳/۹۲



شکل ۴. شماتیک پراکنش پرکننده‌ها در نانوکامپوزیت به صورت (الف) تصادفی و (ب) هم‌تراز شده. (فلش‌ها، مسیرهای هدایت حرارتی را نشان می‌دهند) [۱۶].

جهت‌گیری مناسب پرکننده‌ها به‌طور موثری بر روی هدایت حرارتی و سایر خواص کامپوزیت نهایی تأثیرگذار خواهد بود. این امر به‌ویژه برای پرکننده‌های آنیزوتروپی غیرکروی نظیر کربن نانوتیوب (یک بعدی)، گرافیت/گرافن و نیتريد بور هشت وجهی (دو بعدی) بسیار حائز اهمیت خواهد بود [۳۱]. معایبی که در مورد هدایت حرارتی پرکننده‌های یک بعدی مطرح است، در پرکننده‌های دو بعدی مطرح نیست که دلیل آن هم به هدایت حرارتی فوق‌العاده این نانو مواد دویعدی به دلیل نسبت مساحت سطح به حجم بالا در طول صفحه آن‌ها بر می‌گردد. نکته‌ای که در این‌جا بایستی به آن اشاره نمود، جهت‌گیری مناسب این نانوصفحات در ماتریس پلیمر است، چرا که پرکننده‌های صفحه‌ای نظیر نانوصفحات نیتريد بور هشت وجهی (h-BN) خاصیت آنیزوتروپی دارند. بدین معنا که وقتی صفحات به صورت عمود بر محور C منظم شوند، هدایت حرارتی آن چندین برابر بیشتر از زمانی است که صفحات موازی با محور C باشند. بنابراین تهیه نانوکامپوزیت حاوی پرکننده با جهت‌گیری مشخص به ویژه در مورد پرکننده‌های صفحه‌ای، به نحوی که نانوصفحات به صورت افقی یا عمودی در ماتریس پلیمر قرار گرفته باشند سبب می‌گردد تا هدایت حرارتی نانوکامپوزیت حاصله به نحو بسیار موثری افزایش یابد. بر پایه تحقیقات انجام گرفته، روش‌های متعددی در این زمینه و برای پرکننده‌های مختلف دویعدی گزارش شده است که در ادامه به ذکر آن‌ها پرداخته خواهد شد.

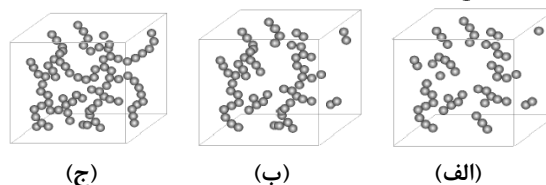
۲-۵-۲- میدان مغناطیسی

جهت‌دهی مغناطیس پرکننده‌های نانو با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی از جمله روش‌هایی است که توسط محققین برای جهت‌دهی مناسب پرکننده در ماتریس پلیمر استفاده شده است [۱۰، ۳۲]. در این روش، پرکننده‌های نانو فاقد خاصیت مغناطیس با یک نانو ذره فلزی سوپرمغناطیس نظیر نانوذرات اکسید آهن پوشش داده می‌شوند. در این رویکرد از نانوذرات اکسید آهن پاسخگو به میدان مغناطیسی به‌منظور جهت‌دهی مشخص پرکننده در یک راستای مشخص که به واسطه اعمال میدان مغناطیسی در ماتریس پلیمر صورت می‌پذیرد، استفاده می‌شود [۳۳، ۳۴] (شکل ۵).

با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعات در نتیجه استفاده از عوامل اصلاح سطح آلی و حاوی گروه عاملی و به تبع آن برهم‌کنش بهتر پرکننده و ماتریس پلیمر، پراکنش و توزیع یکنواختی از پرکننده‌ها در ماتریس پلیمر و همچنین بهبود قابل توجهی در ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های پلیمری مشاهده شد [۲۳-۲۵]. در واقع مقاومت گرمایی در فصل مشترک بین ماتریس و پرکننده کاهش یافته و در نتیجه‌ی آن، هدایت حرارتی و سایر خواص کامپوزیت نهایی از جمله خواص مکانیکی آن نیز افزایش خواهد یافت [۲۶، ۲۷]. به بیان دیگر، به نظر می‌رسد زمانی که پرکننده‌ها عامل‌دار می‌شوند، مقاومت گرمایی بین سطحی و نیز پخش فونون کاهش می‌یابد.

۲-۳-۲- غلظت پرکننده

بررسی‌های انجام شده در راستای مطالعه تأثیر مقدار پرکننده بر بهبود ضریب هدایت حرارتی پلیمرها نشان داد که هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها به طور مشخص با افزایش درصد وزنی پرکننده در ماتریس پلیمری، افزایش می‌یابد [۲۸-۳۰]. البته لازم به ذکر است که با افزایش مقدار پرکننده به شرط عدم ایجاد تجمع ذرات در ماتریس پلیمری چنین بهبودی مشهود خواهد بود؛ که دست‌یابی به هدف موردنظر خود در گرو اصلاح پرکننده با عوامل اصلاح‌کننده مناسب و استفاده از روش‌هایی نظیر فراصوت به منظور پراکنش بهتر ذرات در ماتریس پلیمر است. البته باید توجه داشت که با وجود مطالب ذکر شده، دست‌یابی به هدایت حرارتی بیشینه به‌طور کلی زمانی به‌دست خواهد آمد که مسیرهای لازم جهت هدایت حرارت موجود باشد. با توجه به شکل ۳ الف، در غلظت پایین از پرکننده، هنوز دسترسی نانوذرات به هم رخ نداده است. قسمت ۳ ب نشان می‌دهد که قرارگیری نانوذرات در کنار یکدیگر و برقراری مسیرهای ذکر شده در این غلظت از پرکننده آغاز شده است. در واقع، این غلظت به عنوان غلظت بحرانی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، با افزایش غلظت از غلظت بحرانی، خوشه‌های شبکه در هم نفوذ کرده تشکیل می‌گردد که به یکدیگر متصل اند ۳ ج.

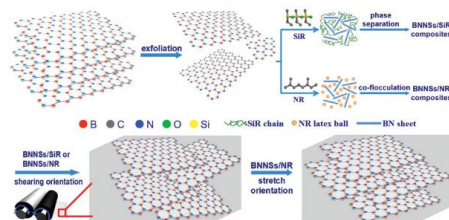


شکل ۳. تأثیر غلظت پرکننده بر نحوه ایجاد مسیرهای هدایت حرارت. (الف) بدون نفوذ؛ (ب) غلظت بحرانی نفوذ؛ (ج) تشکیل خوشه‌های شبکه در هم نفوذ کرده [۳۰].

۲-۴-۲- جهت‌گیری پرکننده نانو در بستر پلیمری

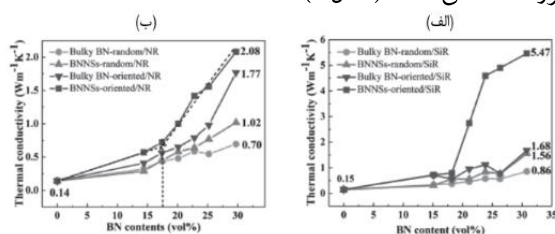
دو نوع پیکربندی اصلی برای پرکننده در نانوکامپوزیت‌ها تعریف می‌گردد که شامل پراکنش‌های هم‌تراز شده و تصادفی ذرات است (شکل ۴). هدایت حرارتی برای نانوکامپوزیت حاوی پرکننده با پراکنش تصادفی به عنوان "ایزوتروپیک" و با پراکنش هم‌تراز شده با نام "آنیزوتروپیک" بیان می‌گردند [۱۶].

استفاده می‌شود. در مطالعه‌ای از روش برش نوسانی از طریق آسیاب رولی دوتایی برای جهت دهی نانوصفات نیتريد بور در نانوکامپوزیت‌های بر پایه لاستیک سیلیکونی (SiR) و لاستیک طبیعی (NR) استفاده شد [۳۸] (شکل ۷).



شکل ۷. فرآیند تهیه نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوصفات جهت‌دهی شده با استفاده از اعمال تنش [۳۸].

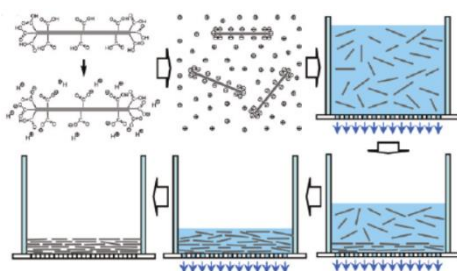
نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش هدایت حرارتی برای نمونه‌های حاوی نانوصفات نیتريد بور جهت یافته بیشتر از زمانی است که جهت‌گیری نانوصفات مزبور در نانوکامپوزیت به صورت تصادفی است (شکل ۸).



شکل ۸. مقادیر هدایت حرارتی نانوکامپوزیت‌های (الف) BN/SiR و (ب) BN/NR با درصد‌های مختلف از نیتريد بور [۳۸].

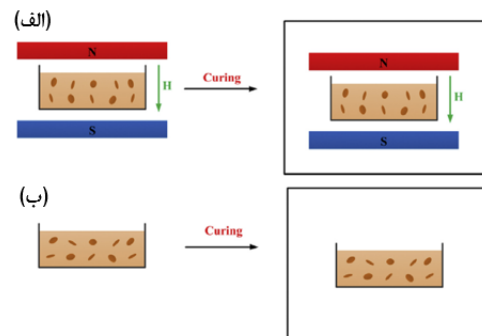
۲-۲-۸-فیلتراسیون در خلأ

در رویکرد دیگری از روش فیلتراسیون در خلأ، به منظور دستیابی به یک آرایه با هدایت حرارتی بالا از صفات گرافن چند لایه عامل‌دار شده استفاده شد (شکل ۹) [۴۰].



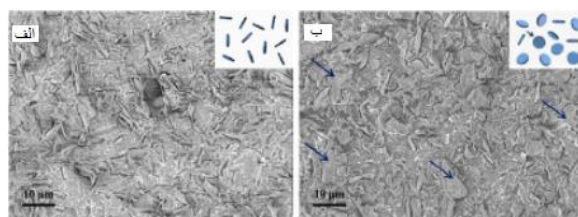
شکل ۹. نمایش شماتیک نحوه جهت‌گیری صفات گرافن چند لایه عامل‌دار شده [۴۰].

در نتیجه استفاده از این تکنیک و اعمال خلأ، صفات گرافن در راستای کاغذ جهت‌گیری کرده و در پایان فیلتراسیون، یک ساختار کیک مانند از صفات گرافن عامل‌دار شده جهت‌دار شده با دانسیته $1/6 \text{ g cm}^{-3}$ ، قطر تقریبی 32 mm و ضخامت تا $1/5 \text{ mm}$ تشکیل شد (شکل ۱۰)



شکل ۵. تهیه نانوکامپوزیت‌های بر پایه اپوکسی حاوی نیتريد بور (الف) جهت یافته با میدان مغناطیسی و (ب) غیرجهت یافته [۳۳].

در مطالعات صورت گرفته بر روی نقش جهت‌گیری پرکننده در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوصفات نیتريد بور پوشش داده شده با نانوذرات اکسید آهن، برای نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی نانوصفات نیتريد بور هم تراز شده هدایت حرارتی بالا و ضریب انبساط حرارتی (CTE) کمی در راستای مسیر جهت‌گیری نانوصفات نیتريد بور و در حضور میزان کم این پرکننده مشاهده شد.



شکل ۶. تصاویر SEM مربوط به برش عرضی از نانوکامپوزیت حاوی $20 \text{ wt\%}$ از نانوصفات نیتريد بور (الف) جهت‌دهی شده تحت اعمال میدان مغناطیسی؛ (ب) با آرایش تصادفی. فلش‌ها، جهت‌گیری صفات (عمودی و افقی) را نشان می‌دهند. تصاویر الحاقی به صورت شماتیک، نشان دهنده پرکننده‌های جهت یافته می‌باشند [۳۴].

علاوه بر این، فرآیندپذیری و خواص دی‌الکتریک و مکانیکی عالی رزین اپوکسی در این نانوکامپوزیت نیز حفظ گردید [۳۴]. جهت‌گیری صفات نانوصفات نیتريد بور در تصاویر SEM شکل ۶ به خوبی مشاهده می‌شود. در حقیقت با استفاده از میدان مغناطیسی می‌توان به تنوعی از ساختارها تحت شرایط بهینه شده دست یافت.

۲-۲-۶-استفاده از پرکننده‌های جهت‌دهی شده

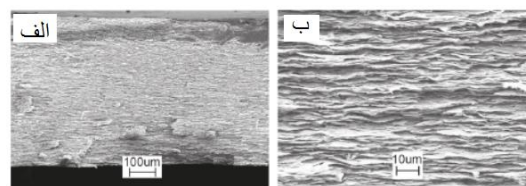
در این روش با استفاده از تکنیک‌های نظیر لایه نشانی بخار شیمیایی حرارتی آرایه‌هایی از نانولوله‌های کربنی (CNT) با جهت‌گیری عمودی و ضخامتی مشخص را می‌توان تهیه نمود و سپس از پرکننده فوق به منظور تهیه نانوکامپوزیت‌های حاوی پرکننده‌های جهت‌گیری شده استفاده نمود [۳۵].

۲-۲-۷-اعمال تنش برشی یا نوسانی

در این رویکرد از تکنیک‌هایی نظیر مخلوط‌کن و هم‌زن مکانیکی [۳۶]، اکسترودر [۳۷]، آسیاب رولی دوتایی [۳۸]، دکتر بلید [۳۹] و ... برای آرایش و جهت‌دهی پرکننده‌ها در یک جهت مشخص

conductivity of carbon nanotubes and graphene in epoxy nanofluids and nanocomposites. *Nanoscale Research Letters* 6: 610-616, 2011.

7. AM, Marconnet; N, Yamamoto; MA, Panzer; BL, Wardle; KE, Goodson; Thermal Conduction in Aligned Carbon Nanotube-Polymer Nanocomposites with High Packing Density. *ACS Nano* 5: 4818-4825, 2011.
8. X, Huang; P, Jiang; L, Xie; Ferroelectric polymer/silver nanocomposites with high dielectric constant and high thermal conductivity. *Applied Physics Letters* 95: 242-901, 2009.
9. AM, Abyzov; SV, Kidalov; FM, Shakhov; High thermal conductivity composites consisting of diamond filler with tungsten coating and copper (silver) matrix. *Journal of Materials Science* 46: 1424- 1438, 2011.
10. HB, Cho; M, Mitsuhashi; T, Nakayama; S, Tanaka; T, Suzuki; H, Suematsu; W, Jiang; Y, Tokoi; SW, Lee; YH, Park; K, Niihara; Thermal anisotropy of epoxy resin-based nano-hybrid films containing BN nanosheets under a rotating superconducting magnetic field. *Materials Chemistry and Physics* 139: 355-359, 2013.
11. WJ, Cantwell; J, Morton; The impact resistance of composite materials-A review. *Composites* 22: 347-362, 1991.
12. JJ, Taha-Tijerina; Multifunctional nanofluids with 2D nanosheets for thermal management and tribological applications. PhD Thesis, Rice University, Houston, Texas, October 2013.
13. Z, Han; JW, Wood; H, Herman; C, Zhang; GC Stevens; Thermal properties of composites filled with different fillers, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2008, 497-501.
14. R, Kochetov; Thermal and electrical properties of nanocomposites, including material processing. M.Sc thesis, Saint-Petersburg State Electrotechnical University 'LETU', Russia, 2012.
15. IA, Tsekmes; R, Kochetov; PHF, Morshuis; JJ, Smit; Thermal conductivity of polymeric composites: a review. 2013 *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Bologna, Italy, June 30-July 4, 2013, 678-681.
16. BH, Xie; X, Huang; G, Zhang; High thermal conductive polyvinyl alcohol composites with hexagonal boron nitride microplatelets as fillers. *Composites Science and Technology* 85: 98-103, 2013.
17. R, Kochetov; Thermal and electrical properties of nanocomposites, including material processing. PhD dissertation, Delft University of Technology, 2012.
18. W, Evans; R, Prasher; J, Fish; P, Meakin; P, Phelan; P, Keblinski; Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51: 1431-1438, 2008.
19. PC, Irwin; Y, Cao; A, Bansal; LS, Schadler; Thermal and mechanical properties of polyimide nanocomposites, *IEEE*



شکل ۱۰. تصاویر SEM از برش عرضی در (الف) بزرگنمایی کمتر و (ب) بزرگنمایی بیشتر [۴۰].

در نهایت، با توجه به نتایج حاصل از هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های حاوی پرکننده اصلاح شده که در بستر پلیمری به خوبی هم‌تراز شده‌اند، به دلیل تشکیل مسیرهای انتقال انرژی گرمایی، هدایت حرارتی بالاتری از خود نشان دادند.

۳- نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد روزافزون مواد پلیمری در تهیه قطعات الکترونیکی، جهت افزایش کارایی و طول عمر بالایی قطعات الکترونیکی با پایه یا روکش پلیمری، از پرکننده‌های عایق با هدایت حرارتی بالا به منظور تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شود. مطالعات انجام شده در راستای بررسی رفتار هدایت حرارتی در نمونه‌های نانوکامپوزیت حاکی از این است که صرف نظر از نوع پرکننده استفاده شده عواملی نظیر شکل و اندازه پرکننده، میزان پرکننده، اصلاح سطح پرکننده و چگونگی جهت‌گیری پرکننده در ماتریس پلیمر نقش مؤثری بر رفتار هدایت حرارتی نمونه‌های نانوکامپوزیت خواهد داشت. در حقیقت پیش‌بینی می‌شود که به علت برهم‌کنش و جهت‌گیری مؤثر پرکننده در ماتریس پلیمر در نتیجه ایجاد مسیرهای پیوسته انتقال حرارت توسط پرکننده در ماتریس پلیمر، انتقال و پراکنده‌سازی شار حرارتی بیشتری در قطعات الکترونیک مشاهده گردد.

۵. منابع

1. C, T'Joel; Y, Park; Q, Wang; A, Sommers; X, Han; A, Jacobi; A review on polymer heat exchangers for HVAC&R. *international journal of refrigeration* 32: 763-779, 2009.
2. G, Junwei; L, Nan; T, Lidong; L, Zhaoyuan; Zh, Qiuyu; High thermal conductivity graphite nanoplatelet/UHMWPE nanocomposites. *RSC Advances* 5: 36334-36339, 2015.
3. M, Thompson Pettes; H, Ji; RS, Ruoff; L, Shi; Thermal Transport in Three-Dimensional Foam Architectures of Few-Layer Graphene and Ultrathin Graphite. *Nano Letter* 12: 2959-2964, 2012.
4. WL, Song; P, Wang; L, Cao; A, Anderson; MJ, Meziani; AJ, Farr; YP, Sun; Polymer/boron nitride nanocomposite materials for superior thermal transport performance. *Angewandte Chemie International Edition* 51: 6498-6501, 2012.
5. Z, Hongli; L, Yuanyuan; F, Zhiqiang; X, Jiajun; C, Fangyu; W, Jiayu; P, Colin; Y, Bao; H, Liangbing; Highly Thermally Conductive Papers with Percolative Layered Boron Nitride Nanosheets. *ACS Nano* 8: 3606-3613, 2014.
6. M, Martin-Gallego; R, Verdejo; M, Khayet; J, Maria Ortiz de Zarate; M, Essalhi; M, Angel Lopez-Manchado; Thermal



32. H, Cho; Y, Tokoi; S, Tanaka; H, Suematsu; T, Suzuki; W, Jiang; K, Niihara; T, Nakayama; Modification of BN nanosheets and their thermal conducting properties in nanocomposite film with polysiloxane according to the orientation of BN. *Composites Science and Technology* 71, 1046-1052, 2011.
33. C, Yuan; B, Xie; M, Huang; R, Wu; X, Luo; Thermal conductivity enhancement of platelets aligned composites with volume fraction from 10% to 20%. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 94: 20-28, 2016.
34. C, Yuan; B, Duan; L, Li; B, Xie; M, Huang; X, Luo; Thermal conductivity of polymer-based composites with magnetic aligned hexagonal boron nitride platelets. *ACS Applied Materials and Interfaces* 7, 13000-13006, 2015.
35. W, Lin; K, Moon; CP, Wong; A combined process of in situ functionalization and microwave treatment to achieve ultrasmall thermal expansion of aligned carbon nanotube-polymer nanocomposites: toward applications as thermal interface materials. *Advanced Materials* 21: 2421-2424, 2009.
36. CA, Cooper; D, Ravich; D, Lips; J, Mayer; H, D.I Wagner; Distribution and alignment of carbon nanotubes and nanofibrils in a polymer matrix. *Composites Science and Technology* 62: 1105-1112, 2002.
37. R, Haggemueller; HH, Gommans; AG, Rinzler; JE, Fischer; KI, Winey; Aligned single-wall carbon nanotubes in composites by meltprocessing methods. *Chemical Physics Letters* 330: 219-225, 2000.
38. Z, Kuang; Y, Chen; Y, Lu; L, Liu; S, Hu; S, Wen; Y, Mao; L, Zhang; Fabrication of highly oriented hexagonal boron nitride nanosheet/elastomer nanocomposites with high thermal conductivity. *Small* 11: 1655-1659, 2015.
39. L, Lanticse; Y, Tanabe; K, Matsui; Y, Kaburagi; K, Suda; M, Hoteida; M, Endo; E, Yasuda; Shear-induced preferential alignment of carbon nanotubes resulted in anisotropic electrical conductivity of polymer composites. *Carbon* 44: 3078-3086, 2006.
40. LM, Veca; MJ, Meziani; W, Wang; X, Wang; FS, Lu; PY, Zhang; Y, Lin; R, Fee; JW, Connell; YP, Sun; Carbon nanosheets for polymeric nanocomposites with high thermal conductivity. *Advanced Materials* 21: 2088-2092, 2009
- Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Albuquerque, New Mexico, USA, 2003, 120-123.
20. YS, Xu; DDL, Chung; Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments. *Composites Interfaces* 7: 243-256, 2000.
21. W, Yu; H, Xie; A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms. *Journal of Nanomaterials* 2012: 1-17, 2012.
22. M, Saha; P, Tambe; SP, P. Kubade; G, Manivasagam; MA, Xavier; V, Umashankar; Effect of non-ionic surfactant assisted modification of hexagonal boron nitride nanoplatelets on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites. *Composite Interfaces* 22: 611-627, 2015.
23. K, Sato; H, Horibe; T, Shirai; Y, Hotta; H, Nakano; H, Nagai; K, Mitsuishi; K, Watari; Thermally conductive composite films of hexagonal boron nitride and polyimide with affinity-enhanced interfaces. *Journal of Materials Chemistry* 20: 2749-2752, 2010.
24. J, Yu; X, Huang; C, Wu; X, Wu; G, Wang; P, Jiang; Interfacial modification of boron nitride nanoplatelets for epoxy composites with improved thermal properties. *Polymer* 53: 471-480, 2012.
25. SH, Hwang; D, Kang; R, Ruoff; HS, Shin; YB, Park; Poly(vinyl alcohol) reinforced and toughened with poly-(dopamine)-treated graphene oxide, and its use for humidity sensing. *ACS Nano* 8: 6739-6747, 2014.
26. X, Huang; T, Iizuka; P, Jiang; Y, Ohki; T, Tanaka; Role of interface on the thermal conductivity of highly filled dielectric epoxy/AlN composites. *The Journal of Physical Chemistry C* 116: 13629-13639, 2012.
27. D, Lee; SH, Song; J, Hwang; SH, Jin; KH, Park; BH, Kim; SH, Hong; S, Jeon; Enhanced mechanical properties of epoxy nanocomposites by mixing noncovalently functionalized boron nitride nanoflakes. *Small* 9: 2602-2610, 2013.
28. SH, Song; KH, Park; BH, Kim; YW, Choi; GH, Jun; DJ, Lee; BS, Kong; KW, Paik; S, Jeon; Enhanced thermal conductivity of epoxy graphene composites by using non-oxidized graphene flakes with non-covalent functionalization. *Advanced Materials* 25: 732-737, 2013.
29. Z, Lin; A, Mcnamara; Y, Lin; K, Moon; C, Wong; Exfoliated hexagonal boron nitride-based polymer nanocomposite with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation. *Composites Science and Technology* 90: 123-128, 2014.
30. H, Zhu; Y, Li; Z, Fang; J, Xu; F, Cao; J, Wan; C, Preston; B, Yang; L, Hu; Highly thermally conductive papers with percolative layered boron nitride nanosheets. *ACS Nano* 2: 3606-3613, 2014.
31. Z, Lin; Y, Liu; K, Moon; C, Wong; Enhanced thermal transport of hexagonal boron nitride filled polymer composite by magnetic field-assisted alignment. *Electronic Components & Technology Conference*, 2013, 1692-1696.