



## مروری بر انتقال حرارت در پوشش‌های نانوکامپوزیتی و مدل‌های ریاضی حاکم بر آن

علی‌اکبر عظمتی<sup>۱</sup>، بهزاد شیرکوند هداوند<sup>۲\*</sup>، حسین خراسانی‌زاده<sup>۳</sup>، قنبرعلی شیخ‌زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، کد پستی: ۸۷۳۱۷۵۱۱۶۷

۲- استادیار، گروه رزین و افزودنی‌ها، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، کد پستی: ۸۷۳۱۷۵۱۱۶۷

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۷ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۵/۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۲۷ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۵/۲/۲۸

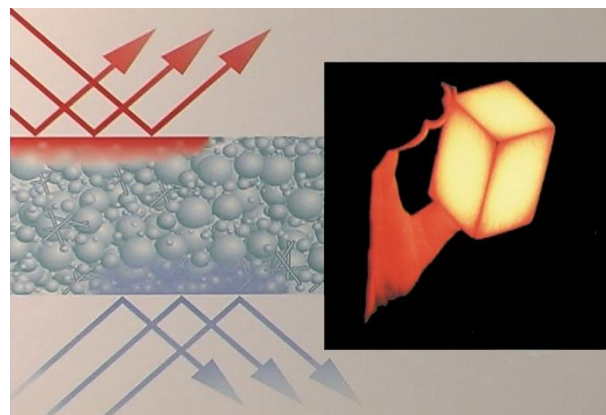
### چکیده

امروزه با توجه به کاهش منابع انرژی و ضرورت صرفه‌جویی در مصرف آن، استفاده از انواع پوشش‌های عایق حرارتی در ساختمان‌سازی و صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته است. پوشش‌های عایق حرارتی پلیمری، یک دسته از پوشش‌های عایق هستند که به دلیل استفاده از تقویت‌کننده‌های مناسب در بستر پلیمری می‌توانند دارای خواصی مانند رسانایی گرمایی پائین، مقاومت حرارتی بالا و ضریب جذب پایینی باشند. بهره‌برداری و اجرای آسان پوشش‌های عایق پلیمری از دیگر مزایای این پوشش‌ها می‌باشند که توجه به این پوشش‌ها را افزایش داده است. در صورتی که یکی از اجزای اضافه شده در این پوشش‌ها در مقیاس نانو باشد، پوشش‌های عایق حرارتی نانوکامپوزیتی تهیه خواهد شد. در این مقاله ابتدا به اختصار به پوشش‌های نانوکامپوزیتی با ضریب حرارتی کم اشاره خواهد شد و سپس به مدل‌های ریاضی حاکم بر قوانین انتقال حرارت در این پوشش‌ها پرداخته خواهد شد.

### واژه‌های کلیدی

پوشش، نانوکامپوزیت، پلیمر، هدایت حرارتی، محافظ حرارتی.

### چکیده تصویری





## A Review on Heat Transfer in Nanocomposite Coatings and Its Mathematical Models

A.A. Azemati<sup>1</sup>, B. Shirkavand Hadavand<sup>2\*</sup>, H. Khorasanizadeh<sup>1</sup>, G.A. Sheikhzadeh<sup>1</sup>

1- Department of Thermo Fluids, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, P. O. Box: 8731751167.

2- Department of Resin and Additives, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran, P. O. Box: 16765-654.

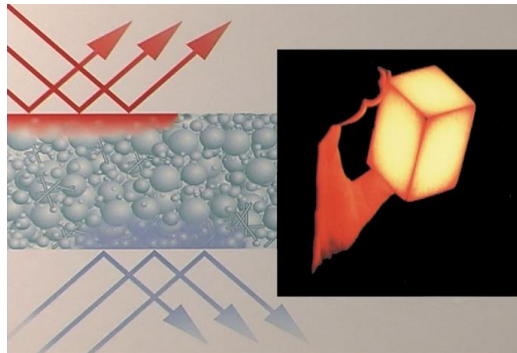
### Abstract

Due to the reduction of energy resources and the need for savings in consumption, thermal barrier coatings in construction and various industries have been considered. Polymeric thermal barrier coatings are a branch of insulation coatings which for use of suitable reinforcement in the polymeric matrix can contain properties such as low thermal conductivity, high thermal resistance and are low absorption coefficient. Operation and easy application of polymeric insulation coatings are other benefits that have increased the interest to these coatings. If one of the components in this composition was in nano scale, nanocomposite thermal insulation coatings will be prepared. In this article, we will briefly mention nanocomposite coatings for low thermal conductivity and heat transfer rules govern mathematical models of these coatings will be discussed.

### Keywords

Coatings, Nanocomposites, Polymer, Thermal conductivity, Thermal protection.

### Graphical abstract



#### فهرست علائم اختصاری

|  |             |   |                 |
|--|-------------|---|-----------------|
| فاصله آزاد فونون                         | $\Lambda$   | شار حرارتی (W/m)                                    | $q$             |
| دمای دبای                                | $\theta_D$  | گرادیان دما   | $\frac{dT}{dx}$ |
| ثابت پلانک                               | $a_o$       | ضخامت (m)   | $X$             |
| ثابت استفان                              | $h$         | دما (کلوین)   | $T$             |
| ضریب سلول واحد                           | $k_B$       | ضریب هدایت حرارتی ( $Wm^{-1}k^{-1}$ )               | $K$             |
| فاصله بین اتمی                           | $a$         | گرمای ویژه در فشار و حجم ثابت ( $kJhg^{-1}k^{-1}$ ) | $C_{p,v}$       |
| وزن اتمی متوسط                           | $\bar{M}$   | شتاب گرانشی ( $Ms^{-2}$ )                           | $G$             |
| حداقل مسافت آزاد میانگین فونون           | $A_{min}$   | ضریب انتقال حرارت جابه جایی ( $wm^{-2}k^{-1}$ )     | $H$             |
| ضریب گرانشین                             | $\gamma$    | فشار ( $Nm^{-2}$ )                                  | $P$             |
| ضریب پخش حرارتی ( $m^2s^{-1}$ )          | $\alpha$    | فاصله آزاد متوسط فونون                              | $L$             |
| ضریب انبساط حرارتی ( $k^{-1}$ )          | $\beta$     | سرعت متوسط فونون                                    | $Y$             |
| کسر حجمی نانوذرات                        | $\varphi$   | ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت                          | $k_c$           |
| گرانروی سینماتیکی ( $m^2s^{-1}$ )        | $\nu$       | ضریب هدایت حرارتی ذرات                              | $k_p$           |
| دمای بی بعد                              | $\theta$    | ضریب هدایت حرارتی شبکه                              | $k_m$           |
| تابع جریان ( $m^2s^{-1}$ )               | $\psi$      | مدول بالک   | $K$             |
| چگالی ( $kgm^{-3}$ )                     | $\rho$      | کسر حجمی ذرات                                       | $\phi_p$        |
| گرانروی دینامیکی ( $Nsm^{-2}$ )          | $\mu$       | کسر حجمی شبکه                                       | $\phi_m$        |
| گرانروی دینامیکی نانوسیال ( $Nsm^{-2}$ ) | $\mu_{eff}$ | سرعت صوت  | $v_m$           |

## ۱- مقدمه

تولید مواد جدید اغلب وابسته به تغییر در ساختار و یا اختلاط مواد با خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف با قابلیت امتزاج پذیری، می باشد. توجه به ذرات با ابعاد کوچکتر در حد نانو رویکردهای جدیدی را در زمینه های مختلف بوجود آورده است که یکی از شگفتی های قرن حاضر است. گسترش استفاده از نانو مواد برای بهبودیخی، اصلاح خواص و یا تولید محصولات جدید روز به روز رو به افزایش است و صنایع رنگ، پوشش و کامپوزیتی از آن مستثنی نیست [۱].

در چند دهه گذشته ساخت پوشش های نانو کامپوزیتی پلیمری با خواص مختلف به طور پیوسته مورد تحقیق و بررسی محققین قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده است که تعدادی از خواص پوشش های پلیمری ممکن است با اضافه کردن نانو مواد به طور قابل توجهی افزایش یابد. به عنوان مثال افزودن نانو ذرات اکسید فلزی به پوشش ممکن است باعث افزایش و یا کاهش در استحکام آن نسبت به پوشش اولیه شود. انتخاب نانو ذرات متناسب با نوع کاربردها و انتظاراتی که از پوشش ها داریم انتخاب می شوند [۲].

عدم انتقال حرارت توسط پوشش ها و کامپوزیت های پلیمری از دیرباز شناخته شده هستند. با توجه به شناخت فناوری نانو توجه به تهیه پوشش های پلیمری با استفاده از نانو ذرات مورد توجه قرار گرفته است و مطالعاتی بر روی نانو کامپوزیت ها و روابط حاکم بر هدایت حرارتی آنها شده است که در این مقاله به طور اجمال به بخش هایی از آن پرداخته خواهد شد.

## ۲- انتقال حرارت در پوشش های نانو کامپوزیتی

مطالعات بسیاری با اهداف مختلف در سال های اخیر بر روی پوشش های ممانعت کننده و انتقال دهنده حرارت صورت گرفته است محققین با استفاده از مواد پلیمری متداول در پوشش دهی نظیر رزین های اپوکسی، یورتانی، اکریلیکی و غیره و با استفاده از نانو ذرات مختلف به تحقیق و پژوهش پرداخته اند [۳-۵]. در این پژوهش ها مطالعاتی در زمینه انتخاب مواد برای پوشش های مانع حرارتی با ضریب هدایت حرارتی کم انجام گرفته است و توضیحاتی برای شناخت مواد انتخاب شده با ضریب هدایت حرارتی کم در دمای بالا و خواص پایداری ترمودینامیکی ارائه و با استفاده از تئوری های ضریب هدایت حرارتی پایین، انتخاب مواد بسط داده شده است [۶]. تحقیقاتی که بر روی پوشش های مانع حرارتی پیشرفته انجام شده است نشان می دهد که در طول دهه گذشته مواد معدنی (بیشتر اکسیدها) به عنوان مواد افزودنی برای پوشش مانع حرارتی جدید پیشنهاد شده است [۷].

ضریب هدایت حرارتی و خواص عایق های الکتریکی پوشش های نانو کامپوزیت های پایه اپوکسی شامل نانوذرات اکسید آلومینیم ( $Al_2O_3$ ) اصلاح شده و رزین اپوکسی نشان داد که ترکیب نانوذرات و اپوکسی به طور موثری سختی کامپوزیت های اپوکسی را بدون از بین بردن ضریب هدایت حرارتی و مقاومت کلی آنها نسبت به اپوکسی خالص و

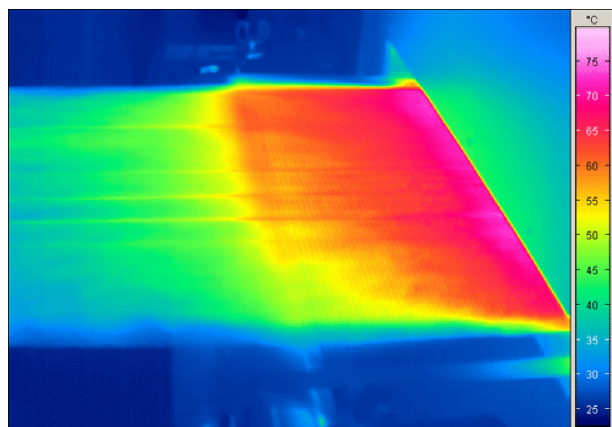
نانو کامپوزیت های اپوکسی پایه دی-گلیسید اتر بهبود می بخشد [۸]. همچنین مقایسه نتایج تجربی ضریب هدایت حرارتی نانو لوله های کربنی و گرافن در اپوکسی و نانو کامپوزیت ها با مدل تئوری، افزایش غیرعادی ضریب هدایت حرارتی نانو کامپوزیت ها را با نانو لوله های کربنی چند لایه نشان می دهد، که احتمالاً به علت ساختار لایه ای و مقاومت سطحی کم آنها می باشد [۹]. در پژوهشی دیگر ضریب هدایت حرارتی رزین های اپوکسی تقویت شده با نانو لوله های کربنی چند لایه با روکش اکسید منیزیم مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته شد. نتایج حاکی از افزایش ضریب هدایت حرارتی پوشش اپوکسی با افزایش نانو لوله های کربنی چند جداره پوشیده شده با روکش اکسید منیزیم بود و زمانی که مقدار نانو لوله های چند جداره کربنی پوشیده شده با روکش اکسید منیزیم به ۲٪ رسید مقدار ضریب هدایت حرارتی در مقایسه با پوشش اپوکسی خالص به ۸۹٪ افزایش پیدا کرد [۱۰].

نانو رس یکی دیگر از نانو ذراتی است که در پوشش های با ضریب حرارتی کم استفاده می شود. به عنوان مثال در تحقیقی که پوشش شفاف نانو کامپوزیتی که شامل یورتان آکریلات و نانو رس بود، خواص مانع حرارتی آن مورد مطالعه قرار گرفت [۱۱]. اثرات مقدار اضافه شدن نانو رس در خواص و شکل شناسی نانو کامپوزیت ها بررسی و مشخص شد که با افزودن مقدار مناسبی از نانو رس (حدود ۵٪ وزنی) درجه بالایی از ساختار پوسته ای و بین لایه ای با پراکندگی همگن نانو رس در شبکه را می توان بدست آورد. این پوشش بر روی شیشه اعمال شد و عملکرد مانع حرارتی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه ممانعت حرارتی تا ۷۲٪ بیشتر از شیشه بدون پوشش بود. شفافیت نوری خوب گزارش شد و عبور نور بیش از ۸۰٪ بدست آمده بود. به علاوه پایداری حرارتی و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت نیز بهبود یافته بود. در تحقیقی دیگر پایداری حرارتی، در نانو کامپوزیت های پلیمری شامل نانو رس مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته شد و مشاهده شد که همانند خواص مکانیکی و مانع حرارتی، پراکندگی همگن لایه های سیلیکات در شبکه پلیمری می تواند باعث کاهش بار حرارتی شود [۱۲].

توجه به گرافن در سال های اخیر در صنایع پوششی مورد توجه قرار گرفته است و پوشش های مختلفی با خواص جدید تهیه شده است [۱۳]. در یکی از این مطالعات خواص حرارتی گرافن و گرافن چند لایه و کاربرد آنها در موارد واسط حرارتی بررسی شده است. در این تحقیق مروری بر خواص حرارتی گرافن و گرافن چندلایه برای کنترل و مدیریت حرارتی گرافن در ابزارهای الکترونیکی پیشرفته انجام شده است. تحقیقات انجام شده نشان داد که افزودن مقدار بهینه از گرافن و گرافن چندلایه اصلاح شده به کامپوزیت های با شبکه های مختلف باعث ایجاد پیشرفت قابل ملاحظه ای در رسانایی حرارتی می شود (کسر کوچکتر با مساوی ۱۰ درصد حجمی) [۱۴].

یکی از روش های مطالعه بر روی پوشش های با ضریب هدایت حرارتی کم

دست یافتند و تطابق خوبی مشاهده نمودند [۱۶].



شکل ۱- نمونه‌ای از عکس حرارتی زیر قرمز [۱۷].

کولوکاتسا و همکارانش آزمایش تاثیر نور خورشید بر پوشش‌های پایه معدنی را انجام دادند و نشان دادند که استفاده از پوشش‌های پایه معدنی به بازده انرژی ساختمان‌ها کمک می‌کند. نتایج نشان داد که افزودن پودر کربنات کلسیم به آهک هیدراته می‌تواند به خوبی مثل رنگ‌های معدنی تشکیل شده از آهک شسته شده یا سیلیکات معدنی عمل کند و رفتاری شبیه پوشش‌های خنک داشته باشد که این باعث کاهش قابل توجه نیاز به سرمایه‌گذاری در اقلیم‌های گرم می‌شود [۱۸].

در مطالعات انتقال حرارت، مطالعاتی بر روی عوامل موثر بر ضخامت بهینه و اقتصادی بودن عایق‌های با ضریب هدایت حرارتی کم بر روی سطوح مختلف و با شکل‌های هندسی متفاوت صورت گرفته است، و روند بهینه‌سازی انتقال حرارت و روش آنالیز اقتصادی آنها نیز با هم مقایسه شده است [۱۹].

## ۲-۱- ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های پلیمرهای پر شده با نانوذرات

ضریب هدایت حرارتی پلیمرها از مهم‌ترین خواص حرارتی برای فرآوری و کاربردهای آن می‌باشد. معمولاً پوشش‌های پلیمری دارای ضریب هدایت حرارتی ذاتی بسیار کمتری نسبت به فلزات و مواد سرامیکی هستند، بنابراین عایق‌های حرارتی خوبی محسوب می‌شوند. پوشش‌های پلیمرهای تقویت‌شده با پرکننده‌های معدنی و غیرمعدنی، برای تولید کامپوزیت‌های پلیمری پیشرفته با کاربردهای عایق با ضریب هدایت حرارتی کم متداول‌تر می‌باشند [۲۰-۲۷].

برای حالت یک بعدی با حرکت مستقیم‌الخط گرما، انتقال حالت پایدار گرما در پوشش‌های پلیمری، توسط قانون فوریه (رابطه ۱) بیان می‌شود.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $q$  شار حرارتی،  $x$  ضخامت ماده، گرادیان دما و  $k$  ضریب

عکس‌برداری حرارتی زیر قرمز<sup>۱</sup> است (شکل ۱) که به بررسی میزان پخش حرارت در سطوح و اجسام می‌پردازد. موریرا و همکارانش با استفاده از عکس‌برداری حرارتی زیر قرمز افزایش مقاومت حرارتی نانو کامپوزیت‌های پلیمری را تخمین زدند. همچنین آنها افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانو کامپوزیت‌های پلیمری ترکیب شده از پلیمرهای گرماسخت و پر شده با نانو ذرات اکسید فلزی را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از یک دستگاه آزمایشی ساده دمای حالت یکنواخت را به وسیله دوربین زیر قرمز اندازه‌گیری کردند. همچنین نشان داده شد که حل تئوری برای تخمین افزایش هدایت حرارتی نانو کامپوزیت‌های پلیمری با داده‌های تجربی سازگاری خوبی دارد. آن‌ها به منظور تخمین میزان افزایش هدایت حرارتی از رزین‌های اپوکسی همراه با نانو ذرات آلومینیم استفاده نمودند. نتایج بدست آمده با داده‌های قبلی که مستقیماً از تجهیزات اندازه‌گیری جریان حرارتی بدست آمده بودند مقایسه و نشان داده شد که تخمین شدت گرمایی از هر دو روش قابل قبول می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که هدایت حرارتی نانو کامپوزیت‌ها خیلی پایین است و علیرغم مقادیر متفاوت نانو ذرات در نمونه‌ها تفاوت زیادی بین هدایت حرارتی آنها وجود ندارد [۱۵]. کناپ و همکارانش مطالعات تئوری و آزمایشگاهی انتقال حرارت را برای مواد جامد غیرهمگن از طریق فرمولاسیون کلی، انتگرال تبدیل و عکس‌برداری حرارتی زیر قرمز انجام دادند. آنها با استفاده از روش‌های تئوری و آزمایشگاهی به مطالعه خواص ترموفیزیکی و شبیه‌سازی انتقال حرارت چندبعدی در مواد غیرهمگن با استفاده از پوشش‌هایی با نانو ذرات اکسید آلومینیم پراکنده شده در یک شبکه پلیمری پرداختند. در ابتدا شبیه‌سازی حرارتی نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی ساده انجام شد و برای این منظور از فرمولاسیون انتقال حرارت هدایتی یک‌بعدی استفاده شد. اندازه‌گیری‌های دما با استفاده از عکس‌برداری حرارتی زیر قرمز انجام شد. این در شرایطی است که مسئله اصلی به وسیله یک راه حل تبدیل انتگرالی با خطای کنترل شده همراه با روش دیفرانسیلی فشرده حل شد و آنالیزهای معکوس از طریق استنتاج بایسن و به کارگیری روش مارکوف چین مونت کارلو صورت گرفت. سپس برای نشان دادن کاربرد روش‌های ارائه شده، آزمایشی چندبعدی را ترتیب دادند، که شامل یک مقاومت الکتریکی کوچک متصل به یک صفحه بود. این پیکربندی در واقع یک ابزار الکترونیک با تولید حرارت که بر روی یک ماده نانو کامپوزیت نصب شده است را شبیه‌سازی نمود. در واقع این وسیله به عنوان یک پخش‌کننده حرارت مدل شده به وسیله یک فرمول بندی دیفرانسیلی فشرده برای انتقال حرارت هدایتی دوبعدی عمل می‌نمود. همچنین آنها خواص ترموفیزیکی متفاوت در نانو کامپوزیت‌های ناهمگن را تخمین زدند و با استفاده از آنالیزهای حرارتی پخش‌کننده‌های گرما که از همین مواد ساخته شده است را انجام دادند. آنها با ترکیب انتگرال تبدیل، بسط بویانسی و عکس‌برداری حرارتی زیر قرمز، هم به تشخیص خواص ترموفیزیکی و هم تعیین فرمولاسیون چندبعدی در نانو کامپوزیت‌ها

<sup>1</sup> Infrared thermography

هدایت حرارتی می‌باشد. برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های پلیمری معمولاً از رابطه دبای<sup>۱</sup> (رابطه ۲) استفاده می‌گردد [۲۸].

$$\lambda = \frac{c_p \nu L}{3} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه بر واحد حجم،  $\nu$  سرعت متوسط فونون و  $L$  فاصله آزاد متوسط فونون می‌باشد [۲۹]. ضریب هدایت حرارتی تعدادی از پلیمرها در جدول ۱ و خواص حرارتی بعضی از مواد در جدول ۲ ارائه شده است [۳۰-۳۲].

۲-۲- مدل‌هایی برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی  
چندین مدل به وسیله تریت و وستون [۳۴]، ریدس و همکارانش [۳۵] بررسی و به جای مدل‌های قبلی پیشنهاد شدند، که از آنها برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های پلیمری و کامپوزیت‌های آنها استفاده می‌شود. چندین روش حالت ناپایدار، از جمله روش‌های سیم داغ، موج دمایی و روش‌های لیزر تابشی نیز بررسی و بسط داده شدند [۳۶]. از میان این روش‌ها، روش لیزر تابشی بطور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری نفوذ حرارتی استفاده می‌شود که یک روش نسبتاً سریع می‌باشد و برای نمونه‌های کوچک نیز قابل استفاده است [۳۸-۳۶]. روش کالریمتری پویا دیفرانسیلی<sup>۲</sup> (DSC) نیز ممکن است برای کاربردهای تغییرات دمایی مرحله‌ای یا نوسانی و آنالیز واکنش دینامیکی استفاده شود [۴۰، ۳۹].

<sup>1</sup> Deby

<sup>2</sup> Differential Scanning Calorimetry

جدول ۱- ضریب هدایت حرارتی تعدادی از پلیمرهای مورد استفاده در پوشش‌ها [۳۰-۳۲].

| ماده   | ضریب هدایت حرارتی در ۲۵°C (w/m.K) |
|--|-----------------------------------|
| پلی اتیلن با چگالی پائین (LDPE)                  | ۰/۳                               |
| پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE)                   | ۰/۴۴                              |
| پلی پروپیلن (PP)                                 | ۰/۱۱                              |
| پلی استایرن (PS)                                 | ۰/۱۴                              |
| پلی متیل متاکریلات (PMMA)                        | ۰/۲۱                              |
| نایلون-۶ (PA6)                                   | ۰/۲۵                              |
| نایلون-۶/۶ (PA66)                                | ۰/۲۶                              |
| پلی (اتیلن ترفتالات) (PET)                       | ۰/۱۵                              |
| پلی (بوتیلن ترفتالات) (PET)                      | ۰/۲۹                              |
| پلی کربنات (PC)                                  | ۰/۲                               |
| پلی (آکریلونیتریل-بوتادین-استایرن) کوپلیمر (ABS) | ۰/۳۳                              |
| پلی اتر اتر کتون (PEEK)                          | ۰/۲۵                              |
| پلی فنیلن سولفید (PPS)                           | ۰/۳                               |
| پلی سولفون (PSU)                                 | ۰/۲۲                              |
| پلی فنیل سولفون (PPSU)                           | ۰/۳۵                              |
| پلی وینیل کلراید (PVC)                           | ۰/۱۹                              |
| پلی وینیلیدن دی‌فلوراید (PVDF)                   | ۰/۱۹                              |
| پلی تترا فلورواتیلن (PTFE)                       | ۰/۲۷                              |
| پلی (اتیلن ونیل استات) (EVA)                     | ۰/۳۴                              |
| پلی آمید، (گرمانرم) (PI)                         | ۰/۱۱                              |
| پلی (دی متیل سیلوکسان) (PDMS)                    | ۰/۲۵                              |
| رزین اپوکسی                                      | ۰/۱۹                              |

جدول ۲: خواص حرارتی مواد مختلف [۳۳].

| مواد                                 | $C_p$<br>(J/kg.K) | $\alpha_1$<br>( $^{\circ}\text{C}$ )- $1 \times 10^{-6}$ ) | K<br>(w/m.K) | L<br>( $(\Omega.W/(K)^2 \times 10^{-8})$ ) |
|--------------------------------------|-------------------|--|--------------|--|
| <b>فلزات</b>                         |                   |  |              |  |
| آلومینیم                             | ۹۰۰               | ۲۳/۶   | ۲۴۷          | ۲/۲  |
| مس                                   | ۳۸۶               | ۱۷   | ۳۹۸          | ۲/۲۵                                       |
| طلا                                  | ۱۲۸               | ۱۴/۲   | ۳۱۵          | ۲/۵  |
| آهن                                  | ۴۴۸               | ۱۱/۸   | ۸۰           | ۲/۷۱                                       |
| نیکل                                 | ۴۴۳               | ۱۳/۳   | ۹۰           | ۲/۰۸                                       |
| نقره                                 | ۲۳۵               | ۱۹/۷   | ۴۲۸          | ۲/۱۳                                       |
| تنکستن                               | ۱۳۸               | ۴/۵  | ۱۷۸          | ۳/۲  |
| فولاد ۱۰۲۵                           | ۴۸۶               | ۱۲   | ۵۱/۹         | -  |
| فولاد ضدزنگ ۳۱۶                      | ۵۰۲               | ۱۶   | ۱۵/۹         | -  |
| برنج (70Cu-30Zn)                     | ۳۷۵               | ۲۰   | ۱۲۰          | -  |
| کوار (54Fe- 29 Ni- 17 Co)            | ۴۶۰               | ۵/۱  | ۱۷           | ۲/۸  |
| اینوار (64Fe- 36 Ni)                 | ۵۰۰               | ۱/۶  | ۱۰           | ۲/۷۵                                       |
| سوپر اینوار (63Fe- 32 Ni- 5 Co)      | ۵۰۰               | ۰/۷۲   | ۱۰           | ۲/۶۸                                       |
| <b>سرامیک‌ها</b>                     |                   |  |              |  |
| آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  | ۷۷۵               | ۷/۶  | ۳۹           | -  |
| منیزیا ( $\text{MgO}$ )              | ۹۴۰               | ۱۳/۵   | ۳۷/۷         | -  |
| اسپینل ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) | ۷۹۰               | ۷/۶  | ۱۵           | -  |
| سیلیس گداخته ( $\text{SiO}_2$ )      | ۷۴۰               | ۰/۴  | ۱/۴          | -  |
| سودا - اکسید کلسیم شیشه              | ۸۴۰               | ۹  | ۱/۷          | -  |
| بورو سیلیکات (پیرکس)                 | ۸۵۰               | ۳/۳  | ۱/۴          | -  |
| <b>پلیمرها</b>                       |                   |  |              |  |
| پلی اتیلن (چگالی بالا)               | ۱۸۵۰              | ۱۰۶-۱۹۸  | ۰/۴۶-۰/۵     | -  |
| پلی پروپیلن                          | ۱۹۲۵              | ۱۴۵-۱۸۰  | ۰/۱۲         | -  |
| پلی استایرن                          | ۱۱۷۰              | ۹۰-۱۵۰   | ۰/۱۳         | -  |
| پلی تترا فلورواتیلن (تفلون)          | ۱۰۵۰              | ۱۲۶-۲۱۶  | ۰/۲۵         | -  |
| فنل - فرمالدهید، فنولیک              | ۱۵۹۰-۱۷۶۰         | ۱۲۲  | ۰/۱۵         | -  |
| نایلون ۶/۶                           | ۱۶۷۰              | ۱۴۴  | ۰/۲۴         | -  |
| پلی سوپرن                            | -                 | ۲۲۰  | ۰/۱۴         | -  |

۲-۲-۱- مدل ضریب هدایت حرارتی در کامپوزیت‌ها

چندین مدل مختلف برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری مورد مطالعه قرار گرفته است که در این قسمت به آنها پرداخته خواهد شد [۴۴-۴۱]. دو مدل پایه برای حد بالا و پائین ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها وجود دارد که قانون مخلوط‌ها می‌باشد و اصطلاحاً مدل سری‌ها نامیده می‌شود. در مدل قانون مخلوط‌ها، که به مدل موازی ارجاع می‌گردد در هر مرحله به استقلال هدایت حرارت کلی کمک می‌کند و متناسب با کسر حجمی آن می‌باشد (رابطه ۳).

$$k_c = k_p \phi_p + k_m \phi_m \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $k_c$ ،  $k_p$  و  $k_m$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی از کامپوزیت، ذرات و شبکه می‌باشند و  $\phi_p$  و  $\phi_m$  به ترتیب کسر حجمی از ذرات و شبکه هستند.

ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها مطابق با مدل سری به وسیله رابطه ۴ پیش‌بینی شده است.

$$k_c = \frac{1}{(\phi_m + k_m) + (\phi_p + k_p)} \quad (4)$$

در یک مدل هندسی (رابطه هالپین-تاسای) متوسط ضریب هدایت حرارتی موثر از کامپوزیت برابر است با:

$$k_c = k_m^{\phi_m} + k_f^{\phi_f} \quad (5)$$

نیلسن و لوئیس رابطه هالپین-تاسای را اصلاح نموده [۴۵] و تاثیر شکل ذرات و جهت‌گیری آنها را در سیستم دوفازی مشخص کردند.

$$k_c = k_m \left[ \frac{1 + AB\phi_f}{1 - B\psi\phi_f} \right] \quad (6)$$

که:

$$B = \frac{\frac{k_f}{k_m} - 1}{\frac{k_f}{k_m} - A} \psi = 1 + \left( \frac{1 - \phi_{\max}}{\phi_{\max}} \right) \phi_f \quad (7)$$

مقادیر  $A$  و  $\phi_{\max}$  برای تعدادی از اشکال هندسی و جهت‌ها داده شده است [۴۶]. این مدل مناسب و سازگار با بیشتر داده‌های تجربی برای پوشش‌های کامپوزیتی بر پایه ذرات ایزوتروپیک و همچنین الیاف کوتاه

و پرک‌های<sup>۱</sup> با نسبت ابعاد محدود و به عنوان پرکننده تا حدود ۳۰٪ حجمی می‌باشد. ماکسول با استفاده از تئوری پتانسیل یک حل دقیق برای ضریب هدایت حرارتی با توزیع تصادفی و بدون تعادل (اثر متقابل) محدوده همگن در یک محیط همگن ارائه کرد (رابطه ۸).

$$k_c = k_m \left[ \frac{k_f + 2k_m + 2\phi_f(k_f - k_m)}{k_f + 2k_m - \phi_f(k_f - k_m)} \right] \quad (8)$$

مدل‌های تئوری دیگر تلاش کردند ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های نانوکامپوزیتی دو فازی را بیان کنند. تعدادی از این مدل‌ها توسط براگمن، باتچر، دلور، سی ون نان و همکارانش (به ترتیب رابطه‌های ۹ تا ۱۲) برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های کامپوزیتی نانو لوله کربنی ارائه شده‌اند [۴۷-۵۰].

$$k_c = \frac{k_m}{(1 - \phi_f)^3} \quad (9)$$

$$k_c = \frac{k_m}{(1 - \phi_f)} \quad (10)$$

$$k_c = \frac{k_m(1 + \phi_f)}{(1 - 2\phi_f)} \quad (11)$$

$$k_c = \frac{k_m \left[ 3 + \phi_f \left( \frac{k_f}{k_m} \right) \right]}{(3 - 2\phi_f)} \quad (12)$$

به منظور در نظر گرفتن نوسانات ضریب هدایت حرارتی در پوشش‌های کامپوزیتی، ژی و همکارانش فرضیه عبور انتقال حرارت را به منظور مدل کردن هدایت حرارتی در نواحی که فاصله بین ذرات کم می‌باشد را پیشنهاد دادند [۵۱]. ارزیابی ضریب هدایت حرارتی موثر پوشش‌های کامپوزیتی پلیمری باتوجه به قانون توزیع اندازه پرکننده‌ها به وسیله هالتسکو مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت [۵۲]. آنها یک مدل تجربی برای ضریب هدایت حرارتی موثر (ETC<sup>۲</sup>) از پوشش‌های کامپوزیتی پلیمری که شامل وابستگی توزیع و انتخاب اندازه پرکننده‌ها می‌باشد را تحت عنوان توزیع روسین-راملر ارائه کردند.

۲-۲-۲- بلورینگی و وابستگی دمایی

بلورینگی پلیمرها ضریب هدایت حرارتی‌شان را به شدت تحت تاثیر قرار

<sup>1</sup> Flake

<sup>2</sup> Effective thermal conductivity

الکترونیکی استفاده می‌شود، برای کاهش گرما، پوشش‌ها و کامپوزیت‌های با ضریب هدایت حرارتی بین ۳۰-۱ w/m.k مورد نیاز می‌باشد [۵۳]. ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های پلیمری و پلیمرها با افزودن پرکننده‌های رسانای حرارتی مانند گرافیت، کربن سیاه، الیاف کربن، سرامیک یا ذرات فلزی افزایش می‌یابد. ضریب هدایت حرارتی تعدادی از پرکننده‌های رسانای حرارتی در جدول ۳ نشان داده شده است [۵۴-۵۸].

### ۲-۳-۱- پرکننده‌های پایه کربنی

پرکننده‌های پایه کربنی به عنوان بهترین پرکننده که هم ضریب هدایت حرارتی بالا و هم وزن پائین دارند می‌باشد. گرافیت، الیاف کربن و کربن سیاه (دوده) به خوبی به عنوان پرکننده‌های پایه کربنی شناخته شده‌اند. گرافیت به عنوان بهترین پرکننده رسانا شناخته شده است زیرا دارای ضریب هدایت حرارتی خوب، قیمت ارزان و قابلیت پخش نسبتاً مناسب در شبکه پلیمری پوشش‌های پلیمری می‌باشد [۶۰، ۵۹].

می‌دهد، همچنین ضریب هدایت حرارتی از پلیمرها به عوامل زیادی از جمله ترکیبات شیمیایی، استحکام پیوند، نوع ساختار، وزن مولکولی گروه جانبی، توزیع تراکمی مولکولی، نوع و شدت از نقص یا خطاهای ساختاری، اندازه از مرتبه محدوده متوسط، وضعیت تولید و شرایط دمایی بستگی دارد. علاوه بر این به دلیل پخش فونون در سطح مشترک بین فاز بلوری و بی‌شکل<sup>۱</sup> و عوامل پیچیده در بلورینگی پلیمر، پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی بلورینگی معرفی شده دارای پیچیدگی‌هایی می‌باشد [۲۳، ۲۱].

### ۲-۳-۲- پرکننده‌ها برای کاهش ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های کامپوزیتی

در بعضی از کاربردها، نیاز به افزایش ضریب هدایت حرارتی در پوشش‌های کامپوزیتی است و در بعضی دیگر نیاز به کاهش ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. برای مثال، زمانی که از سیستم‌های برقی و

<sup>1</sup> Amorphous

جدول ۳- ضریب هدایت حرارتی تعدادی از پرکننده‌های رسانای حرارتی [۵۴-۵۸].

| مواد                                | ضریب هدایت حرارتی در ۲۵°C (w/m.k) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| گرافیت                              | ۱۰۰-۴۰۰ (روی سطح)                 |
| کربن سیاه                           | ۶-۱۷۴                             |
| نانو لوله‌های کربن                  | ۲۰۰۰-۶۰۰۰                         |
| الماس                               | ۲۰۰۰                              |
| الیاف کربن بر پایه پلی‌اکریلونیتریل | ۷۰-۸ (در طول محور)                |
| الیاف کربن بر پایه فیبر             | ۵۳۰-۱۱۰۰ (در طول محور)            |
| مس                                  | ۴۸۳                               |
| نقره                                | ۴۵۰                               |
| طلا                                 | ۳۴۵                               |
| آلومینیم                            | ۲۰۴                               |
| نیکل                                | ۱۵۸                               |
| نیترات بور                          | ۲۵۰-۳۰۰                           |
| نیترات آلومینیم                     | ۲۰۰                               |
| اکسید برلیم                         | ۲۶۰                               |
| اکسید آلومینیم                      | ۲۰-۲۹                             |

ضریب هدایت حرارتی پرکننده‌ها به عواملی از جمله خلوص پرکننده‌ها، بلورینگی، اندازه ذرات و روش اندازه‌گیری وابسته می‌باشد.



### ۲-۳-۲- پرکننده‌های فلزی

پرکردن یک پوشش پلیمری با ذرات فلزی ممکن است باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی و الکتریکی شود. به‌رحال با اضافه کردن ذرات فلزی در شبکه پلیمری، چگالی افزایش می‌یابد، درحالی‌که برای بعضی از کاربردها وزن سبک مورد نیاز می‌باشد. ذرات فلزی مانند پودرهای آلومینیم، نقره، مس و نیکل برای افزایش ضریب هدایت حرارتی استفاده شده است [۲۱]. همچنین قابلیت انتقال حرارت بالا برای کامپوزیت‌های پرشده با مقدار ذرات کم نیز مشاهده شده است. مدل آب‌گریز یک تخمین خوب از ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها برای تمام غلظت‌های پرکننده‌ها ارائه کرده است [۶۳-۶۱، ۲۱]. نتایج بدست آمده از پوشش‌های پلیمری شامل پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی آمید، پلی وینیل کلراید و رزین‌های اپوکسی پر شده با ذرات فلزی نشان دادند که عملکرد ضریب هدایت حرارتی آنها به ضریب هدایت حرارتی پرکننده‌های فلزی، اندازه و شکل ذرات، کسر حجمی و آرایش فضایی در شبکه پلیمری پوشش بستگی دارد. ضریب هدایت حرارتی از ماده اولیه پلیمر- پودر فلز، با قالب‌گیری تزریق پودری به‌وسیله کواسکی و همکارانش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت [۶۴]. مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی نشان داد که مدل لوئیس- نیلسن بهتر از مدل ماکسول ضریب هدایت حرارتی از مواد اولیه را پیش‌بینی می‌کند. اختلاف بین محاسبات (مدل ماکسول) و نتایج اندازه‌گیری شده حدود ۸۵-۱۵٪ می‌باشد و پیشنهاد شد که مدل ماکسول فقط برای ارزیابی اولیه ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های کامپوزیتی با درصد بالای پرکننده استفاده شود.

### ۲-۳-۳- پرکننده‌های معدنی در پوشش‌ها

پوشش‌های پلیمری تقویت‌شده با ترکیبات معدنی به‌صورت گسترده‌ای استفاده می‌شوند. با توجه به هدایت گرمایی بالای مواد فلزی و برخی مواد سرامیکی مثل نیتريد آلومینیم، نیتريد بور و اکسید برلیوم به‌عنوان پرکننده‌های رسانای حرارتی به دلیل هدایت حرارتی و مقاومت الکتریکی بالای آنها باعث شده تا به آنها توجه بیشتری شود [۶۵]. ضریب هدایت حرارتی از کامپوزیت‌ها با پرکننده سرامیکی تحت تاثیر چگالی کلی پرکننده‌ها، اندازه ذرات و توزیع اندازه، رفتار سطح و روش‌های اختلاط می‌باشد [۶۸-۶۶، ۶۱، ۴۳]. تئوری‌ها و مدل‌های زیادی برای پیشگویی ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های کامپوزیتی پلیمری مورد بحث قرار گرفتند، که می‌توان به تئوری متوسط موثر، مدل آکاری و نیلسن اشاره کرد و از آنها برای پیش‌گویی ضریب هدایت حرارتی ذرات سرامیکی

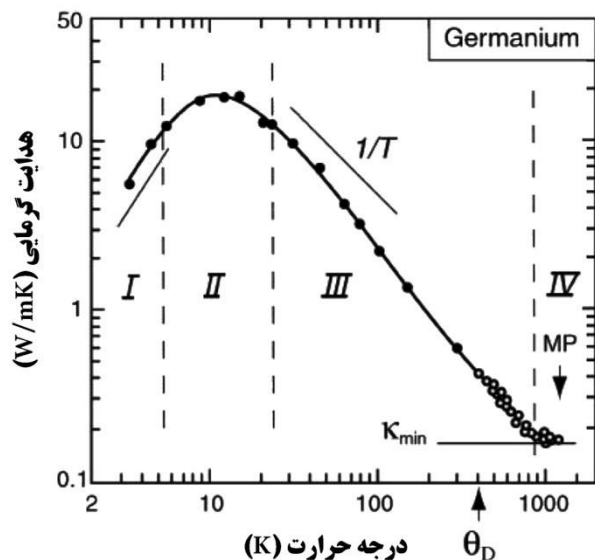
پرکننده در پوشش‌های پلیمری استفاده کرد [۶۹].

### ۳- روابط حاکم بر انتقال حرارت در پوشش‌های پلیمری

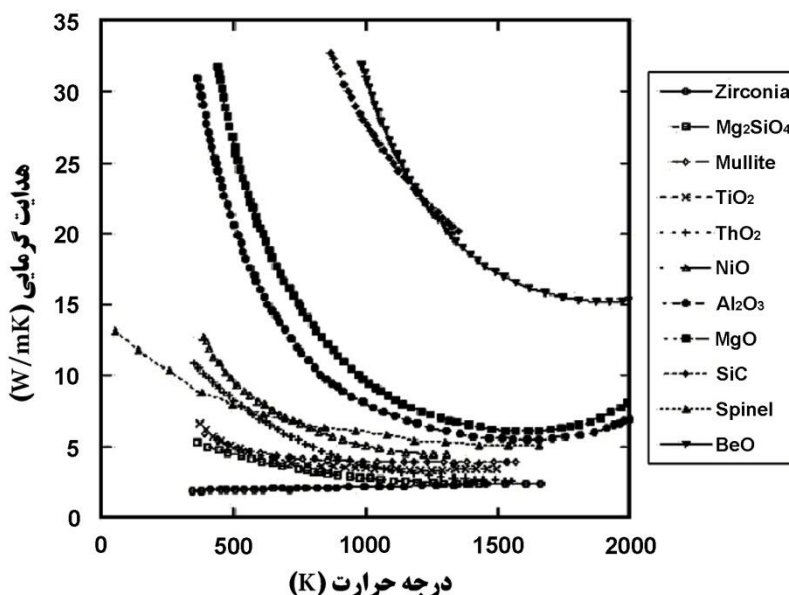
سه مشکل عمده برای معرفی پوشش‌های مانع حرارتی وجود دارد. اول انتخاب مواد اکسیدی که پتانسیل لازم برای ضریب هدایت حرارتی پائین را داشته باشند، که هزاران اکسید سه جزئی و تعداد بی‌شماری اکسید بیش از سه جزء وجود دارد. دومین مشکل ارزیابی و تعیین پایداری ترمودینامیکی با و یا بدون آزمایشات پر زحمت است. سومین مشکل ایجاد و تثبیت تخلخل داخلی است که باعث کاهش انتقال حرارت هدایتی از مرکز ماده به سطح آن شود. در نبود یک تئوری با دقت بالا برای ضریب هدایت حرارتی دما بالا، از مدل‌های موجود برای تخمین زدن حداقل ضریب هدایت حرارتی مواد عایق با ضریب هدایت حرارتی کم در پوشش‌ها استفاده شده است.

### ۳-۱- وابستگی ضریب هدایت حرارتی به دما

شکل ۱ ضریب هدایت حرارتی جامد بلوری ژرمانیم را در درجه حرارت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در دمای پائین کمتر از ۲۰ درجه کلوین، ضریب هدایت حرارتی به وسیله اندازه‌گیری فیزیکی مواد، اندازه دانه و فاصله جابجایی آنها تعیین می‌شود. ضریب هدایت حرارتی در این منطقه به‌سرعت با توان سوم دما ( $T^3$ ) افزایش می‌یابد، به قله می‌رود و سپس کاهش می‌یابد. در درجه حرارت بالاتر از قله در ناحیه سوم ضریب هدایت حرارتی با افزایش ( $1/T$ ) کاهش می‌یابد، که این به علت پراکندگی ناموزون فونون می‌باشد. در ناحیه سوم، مقدار واقعی ضریب هدایت حرارتی به تراکم بستگی دارد، بنابراین مقادیر در ناحیه دوم بوسیله تقاطع ناحیه اول و سوم تعیین می‌شود. در دماهای بالا ضریب هدایت حرارتی به دما بستگی ندارد (انتقال حرارت تابشی در میان مواد در زمان اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی می‌تواند به افزایش آشکار ضریب هدایت حرارتی در دمای بالا منجر شود). در انتخاب و معرفی مواد مناسب نیاز است که بدانیم چه خواصی در ماده تعیین‌کننده این مقدار پایداری می‌باشد و اینکه در چه دمایی تغییر رفتار از وابستگی ( $1/T$ ) به وابستگی پایدار اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال یک مقایسه برای تعدادی از مواد سرامیکی توسط داده‌های کینگری و همکارانش در شکل ۲ نشان داده شده است [۷۱، ۷۰].



شکل ۲- وابستگی ضریب هدایت حرارتی به دما برای یک بلور ژرمانیم از ۲K تا دمای ذوب آن. داده‌ها در چهار ناحیه اصلی رفتار بلورهای مواد را نشان می‌دهند [۷۰].



شکل ۳- وابستگی ضریب هدایت حرارتی به دما برای چند نوع از اکسیدهای چند بلوری [۷۱].

### ۲-۳- مدل‌های ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی یک ماده، نفوذ جریان گرما به وسیله انتقال فونون با تغییرات دما بیان می‌شود. در اولین مدل موفق دمای ضریب هدایت حرارتی را از مقایسه و شباهت تئوری جنبشی گازها برای بدست آوردن یک رابطه برای ضریب هدایت حرارتی استفاده کرد (رابطه ۱۳) [۷۲].

$$K = c_v v_m \Lambda / 3 \quad (13)$$

در رابطه ۱۴،  $c_v$  گرمای ویژه،  $v_m$  سرعت صوت،  $\Lambda$  فاصله آزاد فونون می‌باشد. در روابط بعدی دمای دمای ( $\theta_D$ ) به عنوان مشخصه مواد

شناخته شد که نقش مهمی در تئوری فونون از ضریب هدایت حرارتی جامد را دارد. در درجه حرارت دمای طول موج کوتاه‌ترین طول موج فونون مربوط به اندازه سلول واحد می‌باشد. رابطه وابسته به دمای دمای در رابطه ۱۴ آمده است.

$$\Theta = \frac{2\hbar v_m}{a_0 k_B} \quad (14)$$

در رابطه ۱۵،  $a_0$  ضریب سلول واحد و  $\hbar$  و  $k_B$  به ترتیب ثابت پلانک و ثابت استفان بولتزمن می‌باشند. به طور کلی در درجه حرارت بالاتر، دقت پیش‌بینی مدل برای محاسبه انتقال حرارت مواد عایق‌کننده الکتریکی

در رابطه ۱۸،  $A_{\min}$  حداقل مسافت آزاد میانگین فونون می‌باشد. سرعت متوسط فونون از ترم‌های سرعت موج عرضی و طولی بدست می‌آیند، مانند رابطه ۱۹ [۷۲].

$$v_m = 3^{1/3} \left( \frac{1}{v_p^3} + \frac{2}{v_s^3} \right)^{-1/3} \quad (19)$$

در یک محدوده وسیعی از نسبت‌های پواسون، سرعت صوتی متوسط را می‌توان با رابطه ۲۰ تخمین زد.

$$v_m = A \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (20)$$

که در رابطه ۲۰، مقدار  $A$  برابر  $0.87 \pm 0.02$  می‌باشد. از آنجا که مقادیر مدول یانگ با هر دقتی به ندرت شناخته شده است و کمتر، دقتی بهتر از ۲۰٪ را دارد، بنابراین با دقت خوبی می‌توان  $A = 0.87$  در نظر گرفت. با ترکیب این ترم‌ها کمترین ضریب هدایت حرارتی به صورت رابطه ۲۱ بیان می‌شود.

$$\kappa_{\min} \rightarrow 0.87 k_B N_A^{2/3} \frac{m^{2/3} \rho^{1/6} E^{1/2}}{M^{2/3}} \quad (21)$$

رابطه ۲۱ با استفاده از تقریب مشابه دمای دبای به صورت رابطه ۲۲ بیان می‌گردد.

$$\Theta_D = 3.39 \frac{h}{k_B} N_A^{1/3} \frac{m^{1/3} E^{1/2}}{M^{1/3} \rho^{1/6}} \quad (22)$$

با استفاده از این عبارات، کمترین ضریب هدایت حرارتی برای محدوده‌ای از اکسیدها را می‌توان به آسانی با استفاده از اطلاعات ثابت‌های کششی و چگالی موجود در مراجع محاسبه نمود. این نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

### ۳-۲-۲- تاثیر تخلخل (منافذ)

به غیر از انتخاب مواد در پوشش، وجود تخلخل بیشترین اثر را در کاهش انتقال حرارت از یک پوشش جامد را دارد. در درجه اول منافذ باعث کاهش سطح خالصی که حرارت می‌تواند به‌وسیله فونون‌ها از طریق آن منتقل شود می‌گردد. بنابراین کاهش در ضریب هدایت حرارتی نه تنها به کسر حجمی منافذ، بلکه به نسبت ابعاد آنها و توزیع فضایی آنها نیز بستگی دارد [۷۶].

کمتر می‌باشد، اگرچه وابستگی  $(1/T)$  در ناحیه سوم تقریباً توسط تمام مواد بلوری نشان داده شده است ولی مقدار واقعی آن در حال حاضر نمی‌تواند پیش‌بینی گردد. با توجه به ایده ضریب هدایت حرارتی، شبکه وابسته به بلورهای ناموزون (نامرتب) و استدلال ابعادی می‌باشد، داگدال و مکدونالد مسافت آزاد میانگین فونون را به صورت رابطه ۱۵ پیشنهاد کردند [۷۳].

$$\Lambda = \frac{a}{\alpha \gamma T} \quad (15)$$

که  $a$  فاصله بین اتمی،  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی و  $\gamma$  ضریب گرانشین می‌باشد. نهایتاً توسط لاوسن ضریب هدایت حرارتی ناحیه سوم به صورت رابطه ۱۶ بیان گردید [۷۴].

$$\kappa = \frac{a K^{3/2}}{3 \gamma^2 \rho^{1/2} T} \quad (16)$$

در رابطه ۱۷، سرعت متوسط فونون برابر سرعت موج حرارتی است،  $K$  مدول بالک و  $\rho$  چگالی ساختار بلوری فرض می‌شود. ضریب هدایت حرارتی نیز توسط برمن با تفاوت کمی در ترم‌های دمای دبای بیان می‌شود (رابطه ۱۷) [۸۵].

$$\kappa \alpha \frac{\bar{M} a \Theta_D^3}{\gamma^2 T} \quad (17)$$

در رابطه ۱۷،  $\bar{M}$  وزن اتمی متوسط که از تقسیم وزن اتمی مولکول ( $M$ ) بر تعداد اتم‌های مولکول ( $m$ ) بدست می‌آید. اسلاک، در ادامه این بررسی‌ها نشان داد که اگر ضریب هدایت حرارتی یک ماده در دمای دبای شناخته شده باشد و ضریب هدایت حرارتی مواد دیگر در دمای دبای نیز دارای ساختار بلوری یکسانی باشند، می‌توانند به طور مستقیم در محاسبات از یک ارتباط مقیاس ساده استفاده کنند، سپس یک توافق اساسی بین پیش‌بینی‌های مقیاس وابسته و اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی (در دمای دبای) برای طیف وسیعی از گازهای کمیاب و بلورها با ساختار سفت و محکم را نشان داد [۷۵]. بوت کتیل و کینگری پیشنهاد کردند که حداقل مقدار ضریب هدایت حرارتی به وسیله رابطه ۱۳ با مسافت آزاد میانگین فونون برابر با فاصله بین اتمی می‌باشد.

### ۳-۲-۱- حداقل ضریب هدایت حرارتی دما بالا

برای اهداف حال حاضر و توسعه روش انتخاب مواد برای شناسایی و معرفی جزئیات از رابطه دبای (رابطه ۱۳) به عنوان رابطه پایه برای محاسبات استفاده می‌شود. در درجه حرارت بالا کمترین مقدار ضریب هدایت حرارتی به وسیله رابطه ۱۸ بیان می‌شود [۷۰، ۷۱].

$$\kappa \rightarrow k_B v_m \Lambda \rightarrow k_B v_m \Lambda_{\min} \quad (18)$$

جدول ۴- کمترین ضریب هدایت حرارتی محاسبه شده (w/m.K) [۷۲].

| K <sub>min</sub> | ترکیب  | K <sub>min</sub> | ترکیب                            | K <sub>min</sub> | ترکیب                          |
|------------------|--|------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------------|
| ۱/۴۸             | NiO  | ۲/۳۴             | MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | ۳/۷۸             | BeO                            |
| ۱/۴۸             | LaMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub>           | ۲/۰۷             | TiO <sub>2</sub>                 | ۳/۰۰             | SiC                            |
| ۱/۱۴             | Gd <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | ۲/۰۰             | Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> | ۲/۸۹             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| ۱/۱۳             | Monazite                                       | ۱/۶۸             | Mullite                          | ۲/۵۶             | MgO                            |
| ۰/۹۸             | ThO <sub>2</sub>                               | ۱/۴۹             | ZrO <sub>2</sub> (YSZ)           | ۲/۴۵             | AlN                            |

ضخامت آنها افزایش می‌یابد. یکی از معیارهای انتخاب ضریب هدایت حرارتی مخصوص است، یعنی محصولی از ضریب هدایت حرارتی و چگالی فیزیکی که با  $\rho k$  نشان داده می‌شود. با استفاده از رابطه ۲۱ حداقل ضریب هدایت حرارتی مخصوص به صورت رابطه ۲۵ بیان می‌شود.

$$\rho k_{\min} \rightarrow 0.87 k_B N_A^{2/3} \frac{m^{2/3} \rho^{7/6} E^{1/2}}{M^{2/3}} \quad (25)$$

برای یک بدنه متراکم و یک پوشش متخلخل، ضریب هدایت حرارتی مخصوص به صورت رابطه ۲۶ می‌باشد.

$$\rho_{\text{meas}} k_{\text{eff}} \rightarrow 0.87 k_B N_A^{2/3} \frac{m^{2/3} \rho^{1/6} E^{1/2}}{M^{2/3}} (1 - 2.5p) \quad (26)$$

یک اصل برای پیدا کردن ترکیباتی که ضریب هدایت حرارتی کم در دماهای بالا را دارند این است که ترکیبات مقادیر کمی از عوامل موثر در رابطه  $\rho^{7/6} E^{1/2} / (M/m)^{2/3}$ ، (تمایل به ارائه کمترین ضریب هدایت حرارتی) را داشته باشند. در صورتی که وزن مولکولی زیاد، ساختار بلوری پیچیده، پیوندهای غیرمستقیم و تعداد زیاد اتم‌های مختلف در هر مولکول را داشته باشیم، می‌توانیم پوششی با ضریب هدایت حرارتی کم در دماهای بالا را پیش‌بینی کنیم. علاوه بر توجه به ضریب هدایت حرارتی مواد، از دیگر معیارهای مهم انتخاب آنها می‌توان به پایداری ترمودینامیکی، مقاومت در برابر سایش و تمایل نسبت به تلفات تبخیری اشاره نمود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تحقیقات گسترده‌ای برای ارائه یک رابطه مناسب برای ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های نانو کامپوزیتی پلیمری صورت گرفته شده است. ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های پلیمری بدون در نظر گرفتن مواد پرکننده، از مهم‌ترین خواص حرارتی برای فرآوری و کاربردهای آن می‌باشد. معمولاً پلیمرها دارای ضریب هدایت حرارتی ذاتی بسیار کمتری

در صورت عدم وجود دانش دقیق از توزیع و شکل منافذ، ضریب هدایت حرارتی موثر ( $k_{\text{eff}}$ ) می‌تواند به عنوان گسترش قانون توان از کسر حجمی بیان شود (رابطه ۲۳).

$$k_{\text{eff}} = \kappa (1 - cp - dp^2 \dots) \quad (23)$$

در رابطه ۲۳ ثابت‌های  $c$  و  $d$  وابسته به شکل و توزیع فضایی منافذ می‌باشند. در صورتی که منافذ به صورت طولانی مدت در معرض دمای بالا قرار بگیرند باعث می‌شود همه آنها به شکل کروی (یا از گره‌های سطحی) شوند که باعث کاهش انرژی سطحی زیاد خودشان می‌شود. در نتیجه می‌توان در یک محدوده تمام منافذ را کروی شکل در نظر گرفت. در یک طیف وسیعی از کسر حجمی، ثابت  $c$  تقریباً مقداری برابر با  $2/5$  دارد و ضریب هدایت حرارتی موثر را می‌توان با رابطه ۲۴ تخمین زد.

$$k_{\text{eff}} = \kappa (1 - 2.5p) = \kappa \left[ 1 - 2.5 \frac{(\rho - \rho_{\text{measured}})}{\rho} \right] \quad (24)$$

این باور وجود دارد که تاثیر ثانویه‌ای از تخلخل بر ضریب هدایت حرارتی وجود دارد که در حال حاضر به خوبی قابل درک و فهم نمی‌باشد و نمی‌تواند اندازه‌گیری شود [۷۷].

#### ۳-۲-۳- ضوابط انتخاب مواد افزودنی در پوشش‌های مانع حرارتی

در حال حاضر بیشتر پوشش‌های مانع حرارتی در ترکیب با آلیاژهای تشکیل شده با آلومینا استفاده می‌شوند. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد برای انتخاب مواد زمینه پوشش‌ها محدودیت دیگری وجود دارد، یعنی آنها باید پایداری ترمودینامیکی با اکسید آلومینیم داشته باشند. اگر آنها پایداری ترمودینامیکی ندارند آن وقت لازم است که از یک لایه میانی استفاده شود که آن پایداری ترمودینامیکی با هر دو آلومینا و اجزاء انتخاب شده را داشته باشد. از دیگر معیارهای انتخاب مواد این است که ترکیبات، جرم از دست داده در دمای بالا را برای ارزیابی ارائه نمی‌دهند. یکی از عوامل موثر در پوشش‌های حرارتی، مخصوصاً برای کاربردهای هوافضا، وزن آنها می‌باشد. وزن پوشش‌ها به صورت خطی با چگالی و

نشان داد که مدل لوئیس- نیلسن بهتر از مدل ماکسول ضریب هدایت حرارتی از مواد اولیه را پیش‌بینی می‌کند و پیشنهاد می‌شود که مدل ماکسول فقط برای ارزیابی اولیه ضریب هدایت حرارتی مواد کامپوزیتی خیلی پر شده از پرکننده‌ها استفاده شود. ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها با پرکننده‌های سرامیکی تحت تاثیر گرانشی کلی پرکننده‌ها، اندازه ذرات و توزیع اندازه، رفتار سطح و روش‌های مخلوط کردن می‌باشد و مدل‌های تئوری متوسط موثر، مدل آکاری و نیلسن به ترتیب معرفی شدند که می‌توان از آنها برای پیش‌گویی ضریب هدایت حرارتی ذرات معدنی پرکننده کامپوزیت‌های پلیمری استفاده نمود.

نسبت به فلزات و مواد سرامیکی هستند، بنابراین عایق‌های حرارتی خوبی محسوب می‌شوند. بلورینگی پلیمرها ضریب هدایت حرارتی‌شان را در پوشش به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، همچنین ضریب هدایت حرارتی پوشش‌های پلیمری به عوامل زیادی از جمله ترکیبات شیمیایی، استحکام پیوند، نوع ساختار، وزن مولکولی گروه جانبی، توزیع تراکمی مولکولی، نوع و شدت از نقص یا خطاهای ساختاری، اندازه از مرتبه محدوده متوسط، وضعیت تولید و شرایط دمایی پلیمرها بستگی دارد. ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها با پرکننده فلزی، به ضریب هدایت حرارتی پرکننده‌های فلزی، اندازه و شکل ذرات، کسر حجمی و آرایش فضایی در شبکه پلیمری بستگی دارد و مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی

#### ۴- مراجع

1. S. Ray, "Environmentally Friendly Polymer Nanocomposites", Woodhead Publishing, 328-345, **2013**.
2. J. P. Paques, E. Van Der Linden, C. J. M. Van Rijn, L. M. C. Sagis, "Preparation methods of alginate nanoparticles", *Adv. Colloid Interface Sci.*, 209, 163-171, **2014**.
3. A. Abdul Azeez, K. Yop Rhee, S. Jin Park, D. Hui, "Epoxy clay nanocomposites – processing, properties and applications: A review", *Composites Part B*, 45, 308-320, **2013**.
4. R. D. Toker, N. Kayaman-Apohan, M.V. Kahraman, "UV-curable nano-silver containing polyurethane based organic-inorganic hybrid coatings", *Prog. Org. Coat.*, 76, 1243-1250, **2013**.
5. H. B. Kamal, M. S. Antonious, M. A. Mekewi, A. M. Badawi, A. M. Gabr, K. El Baghdady, "Nano ZnO/amine composites antimicrobial additives to acrylic paints", *Egypt. J. Pet.*, 24, 397-404, **2015**.
6. D. R. Clarke, "Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings", *Surf. Coat. Technol.*, 163, 67-74, **2003**.
7. R. Vaben, M. O. Jarligo, T. Steinke, D. E. Mack, D. Stöver, "Overview on advanced thermal barrier coatings", *Surf. Coat. Technol.*, 205, 938-942, **2010**.
8. J. F. Fua, L. Y. Shia, Q. D. Zhong, Y. Chen, L. Y. Chen, "Thermally conductive and electrically insulative nanocomposites based on hyper branched epoxy and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles modified epoxy resin", *Polym. Adv. Technol.*, 1638, **2010**.
9. M. M. Gallego, R. Verdejo, M. Khayet, J. M. Ortiz de Zarate, M. Essalhi, M. A. Lopez-Manchado, "Thermal conductivity of carbon nanotubes and graphene in epoxy Nano fluids and nano composites", *Martin-Gallego et al. Nano scale Research Letters licensee Springer*, 6:610, **2011**.
10. F. P. Du, H. Tang, D. Y. Huang, "Thermal conductivity of epoxy resin reinforced with magnesium oxide coated multiwalled carbon nanotubes", *Int. J. Polym. Sci.*, 5, **2013**.
11. Y. W. Chang, S. W. Kim, "UV curable transparent urethane-acrylate/clay nanocomposite coating materials with thermal barrier property", *Surf. Coat. Technol.*, 232, 182-187, **2013**.
12. S. Sinha Ray, "Clay-Containing Polymer Nanocomposites, 1st Edition From Fundamentals to Real Applications", Elsevier, Amsterdam, 243-261, **2013**.
13. N. Kheirabadi, A. Shafiekhani, M. Fathipour, "Review on graphene spintronic, new land for discovery", *Superlattices Microstruct.*, 74, 123-145, **2014**.
14. K. M. F. Shahil, A. A. Balandin, "Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials", *Solid State Commun.*, 152, 1331-1340, **2012**.
15. D. C. Moreira, M. C. O. Telles, L. C. S. Nunes, L. A. Sphaier, J. M. L. Reis, "Infrared thermography for estimating the thermal intensification of polymeric nanocomposites" 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering November 18-22, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, **2012**.
16. D. C. Knupp, C. P. Naveira-Cotta, J. V.C. Ayres, R. M. Cotta, H. R.B. Orlande, "Theoretical experimental analysis of heat transfer in nonhomogeneous solids via improved lumped formulation, integral transforms and infrared thermography", *Int. J. Therm. Sci.*, 62, 71-84, **2012**.
17. <http://www.infratec-infrared.com/thermography/application-area/process-optimisation/plastic-industry.html>. **2015**.
18. D. Kolokotsa, P. Maravelaki-Kalaitzaki, S. Papantoniou, E. Vangeloglou, M. Saliari, T. Karlissi, M. Santamouris, "Development and analysis of mineral based coatings for buildings and urban structures", *Sol. Energy*, 86, 1648-1659, **2012**.
19. O. Kaynakli, "Economic thermal insulation thickness for pipes and ducts", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 30, 184-194, **2014**.

20. M. J. Hodgkin, R. H. Estes, "Proceedings of the Technical Programs", NEPCO WEST Conference, Anaheim, CA., 359-366, **1999**.
21. D. Kumlutas, I. H. Tavman, M.T. Coban, "Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials". Compos. Sci. Technol., 63, 113-117, **2003**.
22. H. Lee, S. Eun, "Composites 2004 Convention and Trade Show", American Composites Manufacturers Association, Tampa, Florida, **2004**.
23. C. Liu, T. Mather, "ANTEC 2004", Society of Plastic Engineers, 3080-3084, **2004**.
24. H. Ishidax, S. Heights, "Composition for Forming High Thermal Conductivity Polybenzoxazine-Based Material and Method", US Patent 5.900.447, **1999**.
25. H. R. Frank, D. S. Phillip, "Enhanced Boron Nitride Composition and Polymer Based High Thermal Conductivity Molding Compound", EP 0 794 227 B1, **2002**.
26. R. D. Hermansen, "Room-Temperature Stable, One-Component, Thermally- Conductive, Flexible Epoxy Adhesives", EP 0 754 741 B, **2001**.
27. I. H. Tavman, "Nano Engineered Nano Fibrous Materials", NATO Science Series II, Mathematics, Physics and Chemistry, Edited by S. Guceri, Y. G. Gogotsi, V. Kuznetsov, Academic Book Publication, Dordrecht, Netherlands, 169, 449, **2004**.
28. Z. Han, A. Fina, "Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nano composites: A review", Prog. Polym. Sci., 36, 7, 914-944, **2011**.
29. Y. Agari, A. Ueda, Y. Omura, S. Nagai, "Thermal diffusivity and conductivity of PMMA-PC blends", Polymer, 38, 801-807, **1997**.
30. C. T'Joen, Y. Park, Q. Wang, A. Sommers, X. Han, A. Jacobi, "A review on polymer heat exchangers for HVAC&R applications", Int. J. Refrig, 32, 763-779, **2009**.
31. M. Hu, D. Yu, J. Wei, "Thermal conductivity determination of small polymer samples by differential scanning calorimetry", Polym. Test., 26, 333-337, **2007**.
32. J. G. Speight, "Lange's Handbook of Chemistry", McGraw-Hill, New York, 2794-2797, **2005**.
33. T. J. Lu, C. G. Levi, H. N. G. Wadley, A. G. Evans, J. Am. Ceram. Soc., 84, 2937, **2001**.
34. T. M. Tritt, D. Weston, "Measurement techniques and considerations for determining thermal conductivity of bulk materials. In: Thermal conductivity theory, properties, and applications", Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 187-203, **2004**.
35. M. Rides, J. Morikawa, L. Halldahl, B. Hay, H. Lobo, A. Dawson, C. Allen, "Inter comparison of thermal conductivity and thermal diffusivity methods for plastics", Polymer Testing, 28, 480-489, **2009**.
36. W. Nunes dos Santos, "Thermal properties of polymers by non-steady-state techniques", Polym. Test., 26, 556-566, **2007**.
37. W. Nunes dos Santos, P. Mummery, A. Wall Work, "Thermal diffusivity of polymers by the laser flash technique", Polym. Test., 24, 628-634, **2005**.
38. P. S. Gaal, M. A. Thermitus, D. E. Stroe, "Thermal conductivity measurements using the flash method", J. Therm. Anal. Calorim., 78, 185-189, **2004**.
39. S. M. Marcus, R. L. Blaine, "Thermal conductivity of polymers, glasses and ceramics by modulated DSC", Thermochim. Acta, 243, 231-239, **1994**.
40. M. Merzlyakov, C. Schick, "Thermal conductivity from dynamical response of DSC", Thermochim. Acta, 377, 183-191, **2001**.
41. D. M. Bigg, "Thermal conductivity of hetero phase polymer compositions", Advanc. Polym. Sci., 119, 1-30, **1995**.
42. H. Zhou, S. Zhang, M. Yang, "The effect of heat-transfer passages on the effective thermal conductivity of high filler loading composite materials", Compos. Sci. Technol., 67, 1035-1040, **2007**.
43. W. Zhou, S. Qi, Q. An, H. Zhao, N. Liu, "Thermal conductivity of boron nitride reinforced polyethylene composites", Mater. Res. Bull., 42, 1863-1873, **2007**.
44. J. Zeng, R. Fu, S. Agathopoulos, S. Zhang, X. Song, H. He, "Numerical simulation of thermal conductivity of particle filled epoxy composites", J. Electron. Packag., 131, 1-7, **2009**.
45. E. Nielsen, R. F. Landel, "Mechanical Properties of Polymers and Composites", 2nd edition, Marcel Dekker Inc., New York, **1994**.
46. J. Wang, J. K. Carson, M. F. North, D. J. Cleland, "A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co continuous phases", Int. J. Heat Mass Transfer, 51, 2389-2397, **2008**.
47. D. Bruggeman, "Dielectric constant and conductivity of mixtures of isotropic materials", Ann. Phys., 24, 636-645, **1935**.
48. C. Böttcher, "Theory of Electric Polarization", Elsevier. Amsterdam, Netherlands, **1952**.
49. G. DeLoor, "Dielectric Properties of heterogeneous mixtures", Ph.D. Thesis, University of Leiden, N. L. Leiden, **1956**.
50. C.W. Nan, G. Liu, Y. Lin, M. Li, "Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites", Appl. Phys. Lett., 85, 3549-3555, **2004**.
51. C. Zhi, Y. Bando, T. Terao, C. Tang, H. Kuwahara, D. Golberg, "Towards thermo conductive, electrically insulating polymeric composites with boron nitride nanotubes as fillers", Adv. Funct. Mater., 19, 1857-1862, **2009**.
52. S. Holotescu, F. D. Stoian, "Evaluation of the effective thermal conductivity of composite polymers by considering the filler size distribution law", J. Zhejiang Uni. Sci. A., 10(5), 704-709, **2009**.
53. J. A. King, K. W. Tucker, B. D. Vogt, E. H. Weber, C. Quan, "Electrically and thermally conductive nylon 6,6", Polym. Comp., 20, 643-654, **1999**.

54. H. O. Pierson, "Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes Properties Processing and Applications", Noyes Publications, New Jersey, **1993**.
55. G. Wypych, "Handbook of Fillers: Physical Properties of Fillers and Filled Materials", ChemTec Publishing, Toronto, **2000**.
56. H. Ebadi-Dehaghani, M. Reiszadeh, A. Chavoshi, M. Nazempour, "A study on the effect of zinc oxide (ZnO) and calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) nanoparticles on the thermal conductivity (TC) of polypropylene". Composites Part B, revised, **2011**.
57. J. E. Fischer, "Carbon Nanotubes: Structure and Properties", Taylor and Francis Group, New York, 51-58, **2006**.
58. S. Wolff, M. J. Wang, "Carbon Black Science and Technology (2nd ed.)", Marcel Dekker, New York, **1993**.
59. H. Tu, L. Ye, "Thermal conductive PS/graphite composites", Polyme. Adv. Tech., 20, 21-27, **2009**.
60. V. Causin, C. Marega, A. Marigo, G. Ferrara, A. Ferraro, "Morphological and structural characterization of polypropylene/conductive graphite nano composites", Eur. Polym. J., 42, 3153-3161, **2006**.
61. A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, J. C. Majeste, E. Géhin, "Electrical and thermal behavior of polypropylene filled with copper particles", Composites, 36, 1545-1554, **2005**.
62. H. S. Tekce, D. Kumlutas, I.H. Tavman, "Effect of particle shape on thermal conductivity of copper reinforced polymer composites", J. Reinf. Plast. Compos., 26, 113-121, **2007**.
63. Y. P. Mamunya, V.V. Davydenko, P. Pissis, E.V. Lebedev, "Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders", Eur. Polym. J., 38, 1887-1897, **2002**.
64. L. Kowalski, J. Duszczyk, L. Katgerman, "Thermal conductivity of metal powderpolymer feedstock for powder injection moulding", J. Mater. Sci., 34, 1-5, **1999**.
65. H. Ishida, S. Rimdusit, "Very high thermal conductivity obtained by boron nitride filled polybenzoxazine", Thermochim. Acta, 320, 177-186, **1998**.
66. S. Yu, P. Hing, X. Hu, "Thermal conductivity of polystyrene-aluminum nitride composite", Composites Part A, 33, 289-292, **2002**.
67. J. Gu, Q. Zhang, J. Dang; J. Zhang, Z. Yang, "Thermal conductivity and mechanical properties of aluminum nitride filled linear low-density polyethylene composites", Polym. Eng. Sci., 49, 1030-1034, **2009**.
68. M. Ohashi, S. Kawakami, Y. Yokogawa, "Spherical aluminum nitride fillers for heat conducting plastic packages", J. Am. Ceram. Soc., 88, 2615-2618, **2005**.
69. H. He, R. Fu, Y. Han, Y. Shen, X. Song, "Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions" J. Mater. Sci., 42, 6749-6754, **2007**.
70. C. J. Glassbrenner, G. A. Slack, "Thermal conductivity of silicon and germanium from 3 K to the melting point", Phys. Rev., 134, 1058, **1964**.
71. W. D. Kingery, "Thermal Conductivity: XII, Temperature Dependence of Conductivity for Single-Phase Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., 38, 251, **1955**.
72. C. Kittel, "Introduction to Solid State Physics", 8th Edition, Wiley, 2005.
73. J. S. Dugdale, D. K. C. MacDonald, "Lattice thermal conductivity", Phys. Rev., 98, 1751, **1955**.
74. A. W. Lawson, "On the high temperature heat conductivity of insulators", Phys. Chem. Solids, 3, 155, **1957**.
75. R. Berman, "Thermal Conductivity of Solids", Oxford University Press, **1980**.
76. T. J. Lu, C. G. Levi, H. N. G. Wadley, A. G. Evans, "Distributed porosity as a control parameter for oxide thermal barrier made by physical vapor deposition", J. Am. Ceram. Soc., 84, 2937, **2001**.
77. C. W. Nan, R. Birringer, D. R. Clarke, H. Gleiter, "Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance", J. App. Phys., 81, 6692, **1997**.