

Polymerization  
Quarterly, 2013  
Volume 3, Number 3  
Pages 25-34  
ISSN: 2252-0449

# Dielectric Polymer Composites: An Introduction and Their Applications

Mohsen Sadroddini, Mehdi Razzaghi Kashani\*

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

Received: 20 July 2013, Accepted: 28 September 2013

## Abstract

In recent years there has been an increasing need in obtaining high-permittivity (high-k) materials due to rapid development of electrical/electronic industry. In practice, these materials are mainly designed and employed as polymeric composites containing different ceramics, conductive metallic and non-metallic fillers. Each kind of these fillers may improve the dielectric properties of the final composite by a specific mechanism. Use of ceramics is a more common approach and those of conducting fillers and a combination of ceramics and conducting particles are of later methods. This is a brief report on basic definitions, methods of increasing the dielectric constant, recent advances and research efforts toward achieving high dielectric properties, including high-k and low dielectric loss tangent for polymer composite.

## Key Words

polarization,  
dielectric constant,  
dissipation factor,  
dielectric nanocomposite,  
nanoparticles

---

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

## کامپوزیت‌های پلیمری دی‌الکتریک: معرفی و کاربردها

محسن صدرالدینی، مهدی رزاقی کاشانی\*

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

دریافت: ۱۳۹۲/۴/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۶

در سال‌های اخیر، با توجه به گسترش صنعت برق و الکترونیک، تقاضا برای مواد با ثابت دی‌الکتریک زیاد به شدت رو به افزایش است. در کاربردهای عملی، این مواد عمدتاً به شکل کامپوزیت‌های پلیمری حاوی انواع پرکننده‌های سرامیکی و رسانای فلزی و غیرفلزی طراحی و استفاده می‌شوند. هر گونه‌ای از این پرکننده‌ها با سازوکار مشخصی خواص دی‌الکتریک کامپوزیت نهایی را بهبود می‌دهند. در این میان، استفاده از ذرات سرامیکی روش بسیار معمول و قدیمی‌تر و به کارگیری ذرات رسانا یا ترکیبی از این دو نوع پرکننده روش جدیدتری به شمار می‌رود. در این گزارش، ابتدا به طور اجمالی به تعاریف اولیه و سپس به روش‌های بهبود خواص دی‌الکتریک، پیشرفت‌ها و زمینه‌های پژوهشی جدید برای دستیابی به خواص دی‌الکتریک کارآمد اشاره شده است که شامل ثابت دی‌الکتریک زیاد و تانژانت اتلاف دی‌الکتریک کم است.

### چکیده



محسن صدرالدینی



مهدی رزاقی کاشانی

### واژگان کلیدی

قطبش،  
ثابت دی‌الکتریک،  
ضریب اتلاف،  
نانو کامپوزیت‌های دی‌الکتریک،  
نانوذرات

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

## مقدمه

ماده دی‌الکتریک، عایق الکتریسیته است که از دوقطبی‌های کوچک خنثی الکتریکی تشکیل شده است. زمانی که این مواد در معرض میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرند، بارهای الکتریکی درون ماده جریان نمی‌یابند (برخلاف مواد رسانا)، بلکه این دوقطبی‌های الکتریکی تنها به مقدار اندکی از موقعیت تعادلی خود جابه‌جا شده و به آرایش یافتن با میدان الکتریکی تمایل می‌یابند. بدین ترتیب که انتهای مثبت آنها به طرف پتانسیل کمتر و انتهای منفی آنها به طرف پتانسیل بیشتر متمایل می‌شود (شکل ۱). این جابه‌جایی، بازآرایی و توزیع مجدد ذرات باردار قطبش (polarization) نام دارد که مهم‌ترین مفهوم پایه‌ای در خواص دی‌الکتریک به شمار می‌رود.

بسته به منشأ ایجاد دوقطبی‌های الکتریکی در ماده، نوع قطبش معین می‌شود که می‌توان به قطبش الکترونی (electronic polarization)، قطبش یونی (ionic polarization)، قطبش جهت‌یافتگی (orientational polarization) و در نهایت قطبش بین‌سطحی (interfacial polarization) یا فضا-بار (space-charge polarization) اشاره کرد. قطبش الکترونی، خارج شدن ابر الکترونی منفی از حالت تعادل خود و جابه‌جا شدن آن نسبت به هسته مثبت در اتم بوده و نوع یونی در واقع جابه‌جایی یون‌های مثبت و منفی در جهت‌های مخالف یکدیگر است. قطبش جهت‌یافتگی آرایش دوقطبی‌های موقت موجود در ماده است که در واقع تجمع حاملان بار در سطح مشترک بین اجزا در آمیزه‌های ناهمگن متشکل از دو جزء یا بیشتر است. نمایی از این فرایندها در شکل ۲ نشان داده شده است.

هنگامی که دو الکتروود رسانا به وسیله خلأ یا یک ماده دی‌الکتریک از هم جدا می‌شوند، تشکیل یک خازن را می‌دهند. با ورود یک دی‌الکتریک میان الکتروودها، ماده دی‌الکتریک مطابق با سازوکارهای مختلف قطبش به میدان الکتریکی اعمالی پاسخ می‌دهد. با ایجاد دوقطبی‌های الکتریکی، این ماده مقدار بار بیشتری را در واحد سطح در مجاورت الکتروودها القا می‌کند. بدین ترتیب، نسبت به حالتی که



شکل ۱- اثر اعمال میدان الکتریکی بر دوقطبی‌های الکتریکی و پدیده قطبش [۱].

الکتروودها به وسیله خلأ از هم جدا شده‌اند، ظرفیت خازن بیشتری به وجود می‌آید. در نهایت، ظرفیت یک خازن (C) با صفحات موازی به‌طور مستقیم با مساحت مؤثر الکتروودها (A) و به‌طور معکوس با فاصله بین صفحات (d) متناسب بوده و برابر است با:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

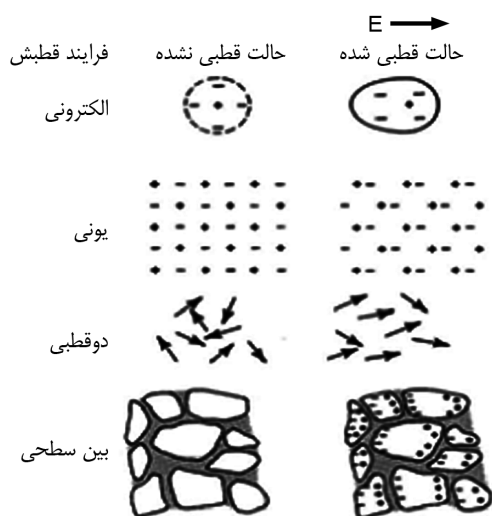
که  $\epsilon_0$  گذردهی در خلأ (با مقدار  $8.854 \text{ pF/m}$ ) و  $\epsilon_r$  نیز گذردهی نسبی است که کمیت فیزیکی بدون بعد و معادل با نسبت گذردهی ماده دی‌الکتریک به گذردهی در خلأ است. این نسبت اغلب به عنوان ثابت دی‌الکتریک ماده شناخته می‌شود.

به طور کلی، ثابت دی‌الکتریک یک ماده عایق وابسته به بسامد میدان الکتریکی اعمالی است و به شکل یک کمیت فیزیکی مختلط توصیف می‌شود که به ترتیب بخش حقیقی آن بیانگر ذخیره انرژی و بخش موهومی آن بیانگر اتلاف انرژی در ماده است:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (2)$$

$$\frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \tan \delta \quad (3)$$

$\epsilon^*$ ،  $\epsilon'$ ،  $\epsilon''$  و  $\tan \delta$  به ترتیب ثابت دی‌الکتریک مختلط، ثابت دی‌الکتریک ذخیره، ثابت دی‌الکتریک اتلافی و تانژانت اتلاف دی‌الکتریک است که ضریب اتلاف نیز نامیده می‌شود و مفاهیمی مشابه خواص دینامیکی- مکانیکی مواد دارند. این کمیت‌ها به همراه استحکام دی‌الکتریک مهم‌ترین کمیت‌ها در مواد دی‌الکتریک به



شکل ۲- انواع گوناگون قطبش [۲].

شمار می‌روند [۱].

بیشتر پلیمرهای طبیعی و سنتزی عایق الکتریسیته بوده و جزء مواد دی‌الکتریک طبقه‌بندی می‌شوند. این مورد از مفیدترین ویژگی‌های مواد پلیمری است که آنها را برای استفاده گسترده در صنایع برق و الکترونیک مناسب می‌کند. پلیمرها در مقایسه با مواد معدنی، اغلب ثابت دی‌الکتریک کمی در حدود ۲-۵ دارند. در موارد استثنایی این عدد می‌تواند به ۱۰ نیز برسد که هنوز برای کاربردهای عملی مقدار کمی به حساب می‌آید، ولی دارای استحکام دی‌الکتریک نسبتاً زیادی هستند. بدین معنی که در مقایسه با مواد معدنی قابلیت تحمل میدان‌های الکتریکی قوی‌تر و حفظ خواص الکتریکی و عایقی خود را دارند. جدول ۱ خواص دی‌الکتریک تعدادی از پلیمرها و مواد معدنی را نشان می‌دهد.

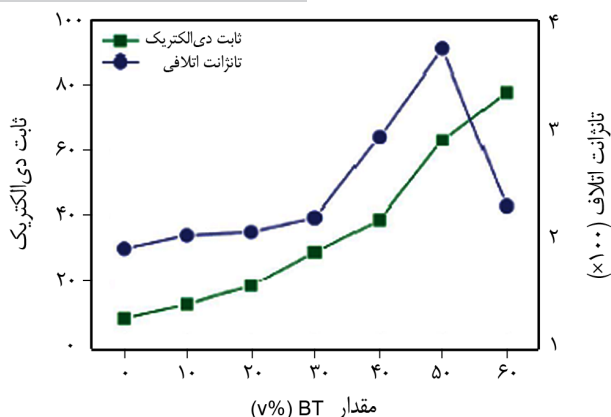
مواد با ثابت دی‌الکتریک زیاد در مقایسه با  $\text{SiO}_2$  مورد استفاده در نیمه‌رساناها، از ثابت دی‌الکتریک قابل توجهی برخوردارند. امروزه، تقاضا برای این مواد با توجه به گسترش صنعت برق و الکترونیک، به عنوان خازن و عایق الکتریسیته به شدت رو به افزایش است. این مواد قابلیت زیادی در ذخیره سازی انرژی الکتریکی دارند که نتیجه آن بهبود کارایی این قطعات است. به عنوان مثال، در محرک‌های الکتریکی بر پایه پلیمر، از راه‌های مؤثر افزایش بازدهی در مقدار

تحریک، افزایش ثابت دی‌الکتریک و کاهش اتلاف دی‌الکتریک شناخته شده است. در میان مواد موجود در طبیعت، سرامیک‌ها و فلزات افزون بر خواص مکانیکی مناسب و پایداری گرمایی عالی، ثابت دی‌الکتریک زیادی هم دارند. با این وجود، مسائلی مانند چگالی و سختی زیاد، شکنندگی و شرایط فرایندپذیری سخت مانع از استفاده آنها به عنوان ماده دی‌الکتریک می‌شود. از طرفی، مواد پلیمری دارای مزایایی مانند وزن کم، فرایندپذیری آسان، انعطاف‌پذیری خوب، قیمت مناسب و تنوع کاربرد هستند. به عنوان نمونه، مواد پلیمری به دلیل سبکی و انعطاف‌پذیری مناسب کاربردهای گسترده‌ای در وسایل الکترومکانیکی یافته‌اند که قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی و الکتریکی را به هم دارا هستند [۴].

تا به امروز، پژوهش‌های گوناگونی به منظور بهبود خواص دی‌الکتریک پلیمرها انجام گرفته است که از میان آنها می‌توان به طراحی و ساخت کامپوزیت‌های متشکل از مواد پلیمری و پرکننده‌های متفاوت اشاره کرد. این موضوع، می‌تواند نیازهای یک ماده دی‌الکتریک را که داشتن ثابت دی‌الکتریک زیاد و شاخص اتلاف کم است، برآورده کند. در ادامه، طیف گسترده مواد با ثابت دی‌الکتریک زیاد که تا به امروز توسعه و کاربردهای عملی یافته‌اند، مرور می‌شود.

جدول ۱- خواص دی‌الکتریک تعدادی از پلیمرها و مواد معدنی [۳].

| ماده                                   | ثابت دی‌الکتریک<br>در ۱ kHz | شاخص اتلاف<br>در ۱ MHz | استحکام دی‌الکتریک<br>(kV/mm) |
|----------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|
| پلی اتیلن (PE)                         | ۲/۳                         | ۰/۰۰۰۱۰                | ۲۰۰                           |
| تفلون (PTFE)                           | ۲/۱                         | ۰/۰۰۰۰۷                | ۸۸-۱۷۶                        |
| پلی استیرن (PS)                        | ۲/۵                         | ۰/۰۰۰۲۰                | ۲۰۰                           |
| پلی وینیل کلرید (PVC)                  | ۳/۵                         | ۰/۰۵۰۰۰                | ۲۴۰                           |
| پلی آمید (PA)                          | ۴                           | ۰/۰۴۰۰۰                | ۲۰۰                           |
| رزین اپوکسی                            | ۴                           | ۰/۰۲۰۰۰                | ۲۵-۴۵                         |
| رزین فنولی                             | ۷                           | ۰/۰۵۰۰۰                | ۱۲۰                           |
| پلی وینیلیدن دی‌فلوئورید (PVDF)        | ۱۰                          | ۰/۲۴                   | ۱۰/۲                          |
| استرانسیم تیتانیت ( $\text{SrTiO}_3$ ) | ۲۰۰۰                        | ۰/۰۰۰۲                 | ۹                             |
| باریم تیتانیت ( $\text{BaTiO}_3$ )     | ۱۷۰۰                        | ۰/۰۰۰۱                 | ۱۲                            |
| تیتانیا ( $\text{TiO}_2$ )             | ۱۱۴                         | ۰/۰۰۰۲۰                | ۸                             |
| آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )    | ۹                           | ۰/۰۰۱۰۰                | ۶                             |
| سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ )              | ۳/۹                         | ۰/۰۰۰۰۴                | ۱۰                            |



شکل ۳- ثابت دی‌الکتریک و تانژانت اتلاف نانوکامپوزیت  $\text{PVDF/BaTiO}_3$  در بسامد ۱ kHz و دمای محیط [۷].

تنها حدود ۱۸ (در مقایسه با مقدار ۶ برای PI خالص) به دست آمده است [۶].

در پژوهش دیگری Yong و همکاران خواص دی‌الکتریک نانوکامپوزیت PVDF و پرکننده  $\text{BaTiO}_3$  را مطالعه کرده‌اند. همان گونه که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزودن ۶۰٪ حجمی پرکننده در بسامد ۱ kHz، ثابت دی‌الکتریک در حدود ۸۰ (در مقایسه با مقدار ۹ برای PVDF خالص) و تانژانت اتلاف حدود ۰/۰۲۳ به دست آمده‌اند. این بهبود خواص کامپوزیت پلیمری حاوی ذرات سرامیکی به دلیل گذردهی نسبی زیاد این ذرات در مقایسه با پلیمر است. به علاوه، افزایش مقدار پرکننده سرامیکی منجر به افزایش مساحت بین سطحی فاز سرامیکی و پلیمر می‌شود. نتیجه این افزایش سطح، اثر قطبش بین سطحی روی خواص دی‌الکتریک و اهمیت آن است [۷].

قطبش بین‌سطحی در آمیزه‌های ناهمگن متشکل از دو جزء یا بیشتر دیده می‌شود و مهم‌ترین نوع قطبش در سامانه‌های پلیمر- پرکننده است. در این گونه آمیزه‌ها که اجزا دارای ضرایب دی‌الکتریک و رسانایی الکتریکی متفاوتی هستند، حاملان بار در سطح مشترک بین اجزا تجمع می‌یابند. این تجمع بار، سبب تغییر و انحراف میدان الکتریکی در اطراف ذره و درون ماتریس می‌شود و در نتیجه روی قطبش ماده اثر می‌گذارد. این اثر با عنوان قطبش ماکسول-واگنر (Maxwell-Wagner polarization) نیز شناخته می‌شود.

این پژوهشگران با استفاده از معادلات الکتروستاتیک و حل آنها برای سامانه‌های ناهمگن معادله‌ای برای پیش‌بینی ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت‌ها استخراج کردند. مقدار دوقطبی الکتریکی برخاسته از بارهای بین سطحی القا شده در مرکز ذره برابر است با :

## روش‌های بهبود نفوذپذیری دی‌الکتریک

تاکنون روش‌های مختلفی به منظور افزایش ثابت دی‌الکتریک مواد پلیمری به کار گرفته شده است. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد :

الف- کامپوزیت‌های تصادفی،

ب - کامپوزیت‌های ساختار یافته تحت میدان و

ج - سنتز پلیمرهای جدید.

روش اول بر مبنای پراکنش و توزیع ذرات پرکننده با ثابت دی‌الکتریک زیاد در یک بستر پلیمری است. نظر به این که در دهه‌های اخیر، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان مرسوم‌ترین روش در ساخت مواد مهندسی شناخته شده است، این روش در ساخت مواد پلیمری با ثابت دی‌الکتریک زیاد نیز توسعه یافته است. بدین منظور، پرکننده‌هایی با ثابت دی‌الکتریک زیاد معمولاً به حالت پودر به بسترهای پلیمری مختلف افزوده می‌شوند. به طور کلی، کامپوزیت حاصل دارای مقدار ثابت دی‌الکتریکی بین بستر پلیمری خالص و ذرات پرکننده است.

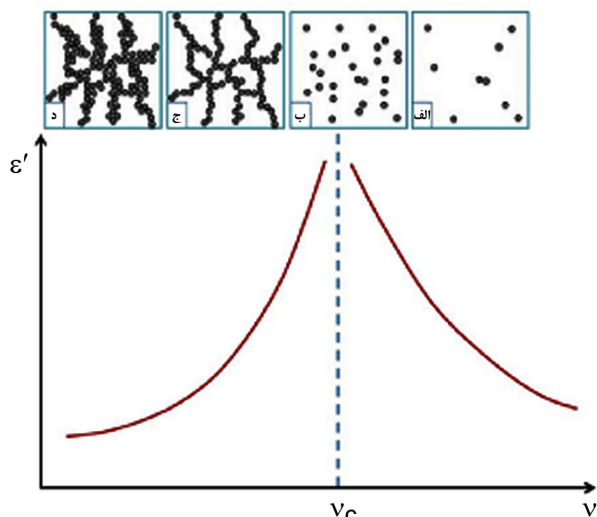
روش دوم نیز مشابه این روش است با این تفاوت که کامپوزیت حاصل در یک میدان الکتریکی خارجی به منظور ایجاد آرایش دوقطبی‌های الکتریکی پخت می‌شود و بیشتر در پلیمرهای گرماسخت کاربرد دارد. ایجاد پیوندهای عرضی می‌تواند باعث بهبود قطبش و ایجاد ناهمسانگردی در کامپوزیت نهایی شود. این روش با عنوان اثر الکترورنولوژی شناخته می‌شود.

درنهایت، روش سوم سنتز یک ماده پلیمری جدید با خواص مورد نظر است. در این روش تلاش بر این است که با وارد کردن گروه‌های قطبی مختلف به زنجیر پلیمرها یا پیوند زدن آنها به زنجیر پلیمری معماری جدیدی از زنجیرها را ایجاد کرد که نتیجه آن می‌تواند بهبود خواص پلیمر باشد [۵].

## کامپوزیت‌های پلیمر- سرامیک

روش معمول و سنتی بهبود خواص دی‌الکتریک پلیمرها، پخش تصادفی پودرهای سرامیکی فروالکتریک دارای ممان‌های دوقطبی دائمی با ثابت دی‌الکتریک زیاد مانند باریم تیتانیت ( $\text{BaTiO}_3$ )، باریم استرانسیم تیتانیت ( $\text{BaSrTiO}_3$ ) و تیتانیا ( $\text{TiO}_2$ ) در بستر پلیمری بوده است.

Dang و همکاران در پژوهشی، خواص دی‌الکتریک نانوکامپوزیت پلی‌ایمید (PI) و پرکننده  $\text{BaTiO}_3$  را بررسی کرده‌اند. ثابت دی‌الکتریک در بسامد ۱ kHz با افزودن ۴۰٪ حجمی پرکننده



شکل ۴- تغییرات ثابت دی‌الکتریک با مقدار پرکننده و ریزساختار پرکننده در بستر پلیمری [۸].

که این ذرات، نه تنها باعث افزایش رسانایی شده بلکه منجر به قطبش بین‌سطحی نیز می‌شوند. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در غلظت‌های کم پرکننده ذرات جدا از هم بوده و خواص الکتریکی کامپوزیت به‌وسیله بستر پلیمری معین می‌شود. اما با افزایش مقدار پرکننده، مسیرهای رسانایی (conductive paths) کوچکی تشکیل می‌شود. در نهایت، در یک نقطه بحرانی موسوم به آستانه نفوذ (percolation threshold)، نقطه  $V_c$  در نمودار، این مسیرها به یکدیگر متصل شده و باعث جهش در رسانایی الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک می‌شوند. آستانه نفوذ بیانگر غلظتی از پرکننده است که در آن، مسیرهای رسانایی در سراسر محیط پلیمری تشکیل شده و این مسیرها با هم در تماس هستند [۸].

این نظریه وابستگی توانی را برای رسانایی و ثابت دی‌الکتریک در نزدیکی آستانه نفوذ پیش‌بینی می‌کند:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma(f_{\text{filler}} - f_c)^t \quad f_{\text{filler}} > f_c \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma(f_c - f_{\text{filler}})^q \quad f_{\text{filler}} < f_c \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon(f_c - f_{\text{filler}})^{-q} \quad f_{\text{filler}} < f_c \quad (10)$$

$\varepsilon$  ثابت دی‌الکتریک ماتریس پلیمری،  $\sigma$  پیش‌ضریب رسانایی،  $f_c$  کسر حجمی آستانه نفوذ،  $t$  و  $q$  توان‌های بحرانی مشخص‌کننده انتقال به ترتیب در منطقه دی‌الکتریک و منطقه رسانا هستند که با استفاده از برازش داده‌ها محاسبه می‌شوند. توان‌های بحرانی  $t$  و

$$p(t) = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_c r^3 E_0 \left[ \beta_{\text{cond}} + (\beta_{\text{dielec}} - \beta_{\text{cond}}) e^{\frac{-t}{\tau_{\text{MW}}}} \right] \quad (4)$$

$$\beta_{\text{cond}} = \frac{\sigma_p - \sigma_c}{\sigma_p + 2\sigma_c} \quad (5)$$

$$\beta_{\text{dielec}} = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_c}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_c} \quad (6)$$

$$\tau_{\text{MW}} = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_p + 2\varepsilon_c)}{\sigma_p + 2\sigma_c} \quad (7)$$

که  $\varepsilon_p$  و  $\varepsilon_c$  به ترتیب ثابت‌های دی‌الکتریک،  $\sigma_p$  و  $\sigma_c$  رسانایی ذرات و ماتریس و  $\tau_{\text{MW}}$  زمان آسودگی از قطبش است. با توجه به معادله (۴) که معادله ماکسول-واگنر نام دارد، یک انتقال از رفتار کنترل رسانشی در میدان‌های الکتریکی مستقیم و متناوب با بسامد کم به رفتار کنترل دی‌الکتریک در بسامدهای زیاد وجود دارد که بسامد این انتقال برابر با  $2\pi/\tau_{\text{MW}}$  است. به عبارت دیگر، پاسخ الکتریکی سامانه در میدان‌های الکتریکی مستقیم و متناوب با بسامد کم با اختلاف رسانایی و در میدان‌های الکتریکی با بسامد زیاد با اختلاف ثابت‌های دی‌الکتریک ذرات و ماتریس کنترل می‌شود.

همان‌طور که از این موارد برمی‌آید، به‌طور کلی در این کامپوزیت‌ها برای دستیابی به ثابت‌های دی‌الکتریک زیاد باید مقادیر زیادی از پرکننده سرامیکی به بستر پلیمری افزوده شود که نقطه ضعف اساسی این کامپوزیت‌ها نیز همین مورد است. مزیت این گونه کامپوزیت‌ها، وابستگی ضعیف خواص دی‌الکتریک به دما و بسامد است. اما با این وجود، دلایلی مانند ازدست رفتن انعطاف‌پذیری بستر پلیمری، ثابت دی‌الکتریک نه چندان زیاد و فرایندپذیری سخت باعث محدودیت در ساخت و کاربرد این کامپوزیت‌ها شده است.

### کامپوزیت‌های پلیمر-پرکننده رسانا

روش دیگر ساخت کامپوزیت‌های دی‌الکتریک افزودن ذرات رسانای الکتریسیته فلزی و غیرفلزی مانند  $\text{Ag}$ ،  $\text{Al}$ ،  $\text{Ni}$  و الیاف کربن به ماتریس پلیمری بر پایه نظریه نفوذ (percolation) است. مزیت استفاده از ذرات رسانا در برابر ذرات سرامیکی عایق با گذردهی زیاد، امکان بهبود چشمگیر گذردهی نسبی در غلظت‌های کم پرکننده است که موجب حفظ خواص مکانیکی ارزشمند پلیمر می‌شود.

انگیزه اصلی استفاده از ذرات رسانا از این واقعیت ناشی می‌شود

به منظور غلبه بر این مسائل و مشکلات، پیشنهاد شده است تا سامانه‌های سه‌جزئی شامل فاز سرامیکی، فاز رسانای الکتریکی و فاز پلیمری می‌توانند انتخاب مناسبی برای دستیابی به کامپوزیت‌های با ثابت دی‌الکتریک زیاد و شاخص اتلاف کم باشند. در این راستا، Dang و همکاران کامپوزیتی سه‌جزئی از  $\text{BaTiO}_3$ ، PVDF و Ni طراحی کردند. آنها مشاهده کردند، وقتی کسر حجمی باریم تیتانیت ۴۰٪ است، ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت سه‌جزئی با افزایش مقدار نیکل از ۰ به ۲۳٪ حجمی (کسر حجمی آستانه نفوذ) از عدد ۴۰ به ۸۰۰ صعود می‌کند و تانژانت اتلاف دی‌الکتریک حدود ۰/۵ به دست می‌آید. این افزایش قابل توجه از این حقیقت برخاسته است که در نزدیکی آستانه نفوذ، تعداد زیادی از ذرات رسانا به وسیله لایه‌های دی‌الکتریک نازک پوشیده شده و یک شبکه خازنی ایجاد می‌شود [۱۱].

Sumesh و همکاران نیز در پژوهشی کامپوزیت سه‌جزئی پلیمر، سرامیک و فلز با استفاده از اپوکسی، نقره و یک کمپلکس معدنی (CLNT) با اختلاط ساده مکانیکی تهیه کردند. آنها با ثابت نگه‌داشتن کسر حجمی پرکننده معدنی ۲۰٪ و افزودن نقره تا ۲۸٪ حجمی (آستانه نفوذ) ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت را در بسامد ۱ kHz از ۸/۳ به ۵۵۰ بهبود دادند. در این کامپوزیت‌ها نیز رفتار نفوذی کامپوزیت‌های پلیمر-پرکننده رسانا مشاهده شد، با این تفاوت که افزودن ذرات سرامیکی باعث پهن‌تر شدن محدوده آستانه نفوذ شد [۱۲].

### پیشرفت‌های اخیر در نانومواد با ثابت دی‌الکتریک

در سال‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری برای سنتز و کاربرد نانوذرات انجام گرفته که دلیل آن خواص منحصر به فرد مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی نانوذرات است. افزون بر آن، نانوذرات به دلیل دارا بودن نسبت مساحت سطحی به واحد حجم زیاد ترجیح بیشتری (نسبت به ذرات میکرونی) برای کامپوزیت‌های دی‌الکتریک دارند که نتیجه آن کاهش وزن و اندازه و افزایش کارایی کامپوزیت نهایی است. با این وجود، ذرات بی‌نهایت ریز سرامیکی می‌توانند باعث تغییر ساختار بلوری از چهاروجهی (که دارای بیشترین ثابت دی‌الکتریک است) به مکعبی شده و در نهایت منجر به کاهش خواص دی‌الکتریک کامپوزیت شود.

برای نانوکامپوزیت‌های پلیمر-پرکننده رسانا همچنان مشکل اساسی اتلاف دی‌الکتریک زیاد برقرار است. این مسئله و محدوده فرایندپذیری باریک به دلیل رفتار نفوذی آن، مانع از داشتن کاربردهای واقعی این نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. در سال‌های اخیر،

q به ترتیب حدود ۲-۱/۶ و ۱-۰/۸ در مراجع ذکر شده‌اند [۱]. در پژوهشی Roa و همکاران کامپوزیت اپوکسی-نقره را انتخاب کرده‌اند. در این پژوهش، نقطه انتقال فلز-عایق (آستانه نفوذ) حدود ۱۱/۵٪ حجمی به دست آمد. در ۱۱/۲۳٪ حجمی نقره و بسامد ۱۰ kHz، ثابت دی‌الکتریک ۱۵۰۰ و شاخص اتلاف ۰/۱۵ حاصل شد. اما افزایش اندک در مقدار پرکننده (۱۱/۵۲٪ حجمی) باعث افت ناگهانی و شدید ثابت دی‌الکتریک به ۰/۱ و افزایش اتلاف به ۵/۳۳ شد که بیانگر وابستگی شدید این کامپوزیت‌ها به مقدار پرکننده است. علاوه بر آن، با افزودن پرکننده مقدار رسانایی از مرتبه  $10^{-10}$  به  $10^{-1}$  S/m افزایش یافت که استحکام دی‌الکتریک کامپوزیت را به شدت کاهش داد [۹].

در پژوهشی دیگر، Dang و همکاران کامپوزیتی از PVDF و CF (الیاف کربن) طراحی کردند. مقدار ثابت دی‌الکتریک این کامپوزیت در بسامد ۱ kHz در نزدیکی نقطه آستانه نفوذ (۷/۴٪ حجمی) حدود ۸۵ (تقریباً ۱۲ برابر بزرگتر از PVDF خالص) و مقدار حدود رسانایی  $10^{-4}$  S/m به دست آمد. آنها افزایش ثابت دی‌الکتریک را به تشکیل شبکه‌ای از خازن‌های بسیار کوچک به وسیله الیاف کربن نسبت دادند. با برازش معادله ۱۰ روی داده‌ها، آستانه نفوذ برابر ۶/۶٪ حجمی و توان بحرانی q، ۰/۸۷ به دست آمد که توافق خوبی بین مقدار تجربی و نظری مشاهده شد. در ضمن، کسر حجمی کم آستانه نفوذ در مقایسه با پرکننده‌های کروی رسانا به نسبت منظر زیاد الیاف کربن نسبت داده شد [۱۰].

به طور کلی نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد، کسر حجمی اندکی از پرکننده‌های رسانا، ثابت دی‌الکتریک پلیمر را به شدت افزایش می‌دهد. در حالی که به دلیل غلظت کم، مدول و خواص مکانیکی تغییر خاصی نمی‌کنند. اما مشکل عمده در استفاده از این نوع پرکننده‌ها، افزایش رسانایی الکتریکی و به دنبال آن کاهش شدید استحکام دی‌الکتریک است که به‌ویژه در میدان‌های الکتریکی بزرگ بسیار حائز اهمیت است. خواص این کامپوزیت‌ها به دلیل انبساط گرمایی ذرات رسانا به دما نیز بسیار وابسته است.

### کامپوزیت‌های پلیمر-سرامیک - پرکننده رسانا

همان گونه که اشاره شد، در کامپوزیت‌های پلیمر-سرامیک نقطه ضعف اساسی لزوم استفاده از مقادیر بسیار زیاد پرکننده برای بهبود خواص دی‌الکتریک است. از طرفی در کامپوزیت‌های حاوی ذرات رسانا، مسئله اساسی افزایش رسانایی الکتریکی و کاهش استحکام دی‌الکتریک است که در واقع مانع از کاربرد های عملی این گونه کامپوزیت‌ها می‌شود.

برای حل مسائل کامپوزیت‌های پلیمر- ذرات رسانا، کارهایی انجام گرفته است. روش‌های گوناگونی برای دستیابی به دی‌الکتریک کارآمد از جمله ثابت دی‌الکتریک زیاد و اتلاف دی‌الکتریک کم برای این مواد پیشنهاد شده که در بخش بعدی به آنها اشاره می‌شود.

## بهبود عملکرد نانو کامپوزیت‌های دی‌الکتریک

### کنترل توزیع و پراکنش

توزیع و پراکندگی یکنواختی از نانوذرات در نانو کامپوزیت‌ها مورد نیاز است، زیرا انبوه شدن نانوذرات به خواص نامطلوب الکتریکی منجر می‌شود. بنابراین، پراکندگی نانوذرات از عوامل بسیار مهم برای بهبود خواص دی‌الکتریک و تکرارپذیری آن است. به طور ساده، استفاده از عوامل فعال سطحی می‌تواند پراکنش نانوذرات در ماتریس پلیمری و در نتیجه عملکرد کلی نانو کامپوزیت را بهبود بخشد.

اصلاح شیمیایی نانوذرات هم روشی بسیار مفید برای آسانی پراکندگی نانوذرات است. این روش ساده و آسان در طیف وسیعی از سامانه‌ها با انتخاب عامل اصلاح مناسب قابل استفاده است [۱۳]. در پژوهشی Chong و همکاران خواص دی‌الکتریک کامپوزیت اپوکسی و ذرات آلومینیم را مطالعه کردند. آنها ذرات پرکننده را با استفاده از عامل سیلانی ۷-آمینوپروپیل تری متوکسی اصلاح سطح کردند. ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت با این کار از ۸۰ به ۱۱۰ افزایش پیدا کرد. آنها این افزایش را به توزیع و پخش بهتر ذرات در بستر پلیمری نسبت داده‌اند [۱۴].

### پرکننده‌های ترکیبی هسته-پوسته

تماس مستقیم پرکننده‌های فلزی رسانا به اتلاف دی‌الکتریک زیاد یا حتی رسانایی کامپوزیت پلیمر- پرکننده در نقطه آستانه نفوذ یا بالاتر از آن منجر می‌شود. به تازگی، استفاده از ساختارهای هسته-پوسته فلز- عایق برای تهیه کامپوزیت‌های با ثابت دی‌الکتریک زیاد و اتلاف دی‌الکتریک کم مطرح شده است.

در این گونه ذرات، هسته فلزی به منظور افزایش ثابت دی‌الکتریک از راه قطبش بین سطحی کاربرد دارد، در حالی که پوسته عایق نقش یک لایه محافظ را برای کنترل مقدار اتلاف ایفا می‌کند. این لایه محافظ از راه معلق نگه داشتن الکترون‌های آزاد در سطح مشترک پلیمر- پرکننده مانع از حرکت و انتقال الکترون‌های هسته‌های

مجاور به هم می‌شود. در نهایت، کامپوزیت حاصل علاوه بر ثابت دی‌الکتریک زیاد، اتلاف دی‌الکتریک کمی خواهد داشت. در این راستا، Dang و همکاران نانو کامپوزیتی متشکل از پلیمر PVDF و ذرات هسته-پوسته  $\text{Ag-TiO}_2$  برای مطالعه اثر این ساختارها بر خواص دی‌الکتریک طراحی کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد، ضخامت پوسته سرامیکی در خواص دی‌الکتریک نانو کامپوزیت نهایی نقش کلیدی ایفا می‌کند [۱۵].

### کاربردهای کامپوزیت‌های دی‌الکتریک

کامپوزیت‌های با ثابت دی‌الکتریک زیاد در گستره وسیعی از صنایع میکروالکترونیک، مهندسی برق و زیست‌شیمی کاربرد دارند. این کامپوزیت‌ها در صنایع میکروالکترونیک به عنوان خازن، مواد فعال الکتریکی و ابزار ذخیره کننده انرژی الکتریکی کاربرد پیدا کرده‌اند. به دلیل دارا بودن خواص مناسب الکتریکی و مکانیکی از کاربردهای متنوعی در زمینه مهندسی برق نظیر وسایل نقلیه الکتریکی، ابزار ذخیره انرژی الکتریسیته و تولید انرژی الکتریکی به وسیله پلیمرهای فعال الکتریکی برخوردار شده‌اند. کامپوزیت‌های با ثابت دی‌الکتریک زیاد می‌توانند به عنوان مبدل‌های الکتریکی عمل کرده و انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی و برعکس تبدیل کنند. این محرک‌های الکتریکی قابلیت استفاده به عنوان عضلات مصنوعی، پوست مصنوعی و سامانه های دارورسانی را نیز دارند [۱].

### نتیجه گیری

امروزه کامپوزیت‌های دی‌الکتریک به دلیل کاربردهای متنوعی که در صنایع برق و میکروالکترونیک یافته‌اند، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. به طور کلی، مواد دی‌الکتریک کارآمد باید دارای ثابت دی‌الکتریک زیاد، اتلاف دی‌الکتریک کم، پایداری گرمایی زیاد، فرایندپذیری آسان و خواص دی‌الکتریک مناسب در بازه بسامدی گسترده باشند. با این وجود، چنین ماده آرمانی که خواص مزبور را به طور هم‌زمان برآورده کند، تاکنون محقق نشده است. بنابراین، طراحی و ساخت آمیزه‌هایی متشکل از مواد پلیمری، ذرات سرامیکی و ذرات رسانای فلزی و غیرفلزی راه مؤثری به سوی ساخت کامپوزیت‌های دی‌الکتریک، به‌ویژه کامپوزیت‌های بستر پلیمری است.

در این میان، استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری حاوی پرکننده‌های

اتلاف دی‌الکتریک و به دنبال آن کاهش شدید استحکام دی‌الکتریک است. به منظور غلبه بر این مسائل و مشکلات، کامپوزیت‌های سه‌جزئی پلیمر، پرکننده‌های سرامیکی و ذرات رسانا می‌توانند کاندیدای مناسبی برای مواد دی‌الکتریک کارآمد باشند. در این سامانه‌ها نیز همچنان رفتار نفوذی کامپوزیت پلیمر-پرکننده رسانا مشاهده می‌شود، با این تفاوت که به دلیل وجود ذرات سرامیکی می‌توان اتلاف دی‌الکتریک این کامپوزیت‌ها را کنترل کرد تا افزون بر ثابت دی‌الکتریک زیاد، اتلاف دی‌الکتریک کم نیز به دست آورد. در چند سال اخیر، پیش‌های جدیدی به سوی خواص منحصر به فرد پرکننده‌های نانو، استفاده از ساختارهای هسته-پوسته، اصلاح سطح پرکننده‌ها و توزیع و پراکنش هر چه بیشتر آنها درون ماتریس پلیمری در مطالعات به دست آمده است. در این پژوهش‌ها تلاش اصلی افزایش هرچه بیشتر ثابت دی‌الکتریک و کاهش حداکثری اتلاف دی‌الکتریک کامپوزیت نهایی بوده است.

## مراجع

1. Tony B. and David B., *Electrical Properties of Polymers*, Cambridge, 2nd ed., UK, 58-72, 2005.
2. Moulson A., *Electroceramics*, John Wiley, West Sussex, 2nd ed., England, 2003.
3. Peter B., Shiva B., Yogesh A., Shushan G., and Arief W., Polymer Composite and Nanocomposite Dielectric Materials for Pulse Power Energy Storage, *Materials*, **2**, 1697-1733, 2009.
4. Dang Z., Yuan J., Zha J., Zhou T., Sheng T., and Guo H., Fundamentals, Processes and Applications of High-Permittivity Polymer-Matrix Composites, *Prog. Mater. Sci.*, **57**, 660-723, 2012.
5. Federico C., Giuseppe G., Fabia G., and Danilo D., *Enhancing the Dielectric Permittivity of Elastomers*, University of Pisa, Italy, 53-54, 2007.
6. Dang Z., Lin Y., Xu H., Shi C., Li S., and Bai J., Fabrication and Dielectric Characterization of Advanced BaTiO<sub>3</sub>/polyimide Nanocomposite Films, *Adv. Funct. Mater.*, **18**, 1509-1517, 2008.
7. Yong L., Xingyi H., Zhiwei H., Pingkai J., Shengtao L., and Toshikatsu T., Large Dielectric Constant and High Thermal Conductivity in Poly(vinylidene fluoride)/Barium Titanate/Silicon Carbide Three-Phase Nanocomposites, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 4396-4403, 2011.
8. Wei W., *Novel Metal-Polymer Composite with High Percolation Threshold*, MSc Thesis, Auburn University, May 2012.
9. Roa Y. and Wong C., A Novel Ultra High Dielectric Constant Epoxy-Silver Composite for Embedded Capacitor Application, *8th International Symposium on Advanced Packaging Materials*, 243-248, 2002.
10. Dang Zh., Wu J., Xu H., Yao S., and Jiang M., Dielectric Properties of Upright Carbon Fiber Filled Poly(vinylidene fluoride) Composite with Low Percolation Threshold and Weak Temperature Dependence, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 0729121-3, 2007.
11. Dang Z., Shen Y., and Nan C., Dielectric Behavior of Three-Phase Percolative Ni/BaTiO<sub>3</sub>/Polyvinylidene Fluoride Composites, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4814-4816, 2002.
12. Sumesh G. and Mailadil T., Three-Phase Polymer-Ceramic-Metal Composite for Embedded Capacitor Applications, *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 1298-1302, 2009.
13. Lu J. and Wong C., Recent Advances in High-k Nanocomposite Materials for Embedded Capacitor Applications, **15**, 1322-1328, 2008.
14. Chong C., Shuhui Y., Rong S., Suibin L., Lvqian W., and Ruxu D., Micro-Structural and Interfacial Effects on the Dielectric

Properties of High-k Aluminum/Epoxy Composites for Embedded Capacitors, *International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, 589-592, 2009.

15. Dang Zh., You Sh., Zha J., Song H., and Li Sh., Effect of Shell-layer Thickness on Dielectric Properties in Ag and  $\text{TiO}_2$  Core and Shell Nanoparticles Filled Ferroelectric Poly(vinylidene fluoride) Composites, *Phys. Status Solidi*, **207**, 739-742, 2010.