



A Review of the Effect of Nanoparticles on the Improvement of Mechanical and Dielectric Properties of Polyvinyl Chloride, Nanodielectric Polymer, in Wire and Cable Insulation

M. Yaldagard^{1*}, J. Yaldagard²

1- Assistant Professor of Chemical Engineering, Urmia University

2- M. Sc. in Executive Management, Azar Sim Marand

Email: m.yaldagard@urmia.ac.ir

Abstract

Due to its resistance to flame and chemicals, PVC has been widely used as an electrical insulation material for wires and outer sheathing of cables. During normal operation, underground power cables are subjected to various stresses such as exposure to heat, humidity, and mechanical stress, which lead to changes in insulation properties and deterioration over time. Polymer nanodielectric materials refer to polymer nanocomposites that have several weight fractions of inorganic particles with nanometer dimensions. Dispersing these tiny nanoparticles with polymeric materials resulted in significant improvements in both dielectric and thermal properties, which in turn makes polymer nanocomposites the most popular term in the dielectric community. To optimize these novel properties, the dispersion of nanoparticles within polymeric matrices should be enhanced, and this can be achieved by chemical functionalization of nanoparticles surfaces using silanes or polyalcohol as coupling agents. This functionalization will result in changing the chemistry of nanoparticles to be compatible with that of polymers, and to reduce their agglomeration within polymer matrix. In the present study, the results of the researchers' studies on the dielectric properties such as relative electrical permeability, dielectric loss and mechanical properties such as tensile strength and modulus of elasticity of PVC used in insulation of wires and cables due to the introduction of metal oxide nanoparticles and some of their important results have been discussed.

Received: 5 October 2022

Accepted: 16 June 2023

Page Number: 22-51

Keywords:

Nanoparticles,
Polyvinyl Chloride,
PVC,
Nanodielectric Polymer,
Insulator,
Wires and Cables

Please Cite this Article Using:

Yaldagard, M., & Yaldagard, J. (2024). A Review of the Effect of Nanoparticles on the Improvement of Mechanical and Dielectric Properties of Polyvinyl Chloride, Nanodielectric Polymer, in Wire and Cable Insulation. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(132), 22-51, [In Persian].



مروری بر اثر نانوذرات بر روی بهبود خواص مکانیکی و دی‌الکتریک پلی‌وینیل کلراید، نانودی‌الکتریک بسپاری، در عایق‌های سیم و کابل

مریم یلداگرد^{۱*}، جواد یلداگرد^۲

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه ارومیه

۲- کارشناس ارشد مدیریت اجرایی، واحد صنعتی شرکت آذر سیم مرند

پیام‌نگار: m.yaldagard@urmia.ac.ir

چکیده

پی‌وی‌سی به دلیل مقاومت در برابر شعله و مواد شیمیایی، به عنوان مواد عایق الکتریکی سیم‌ها و پوشش بیرونی کابل‌ها به طور گسترده‌ای به کار می‌رود. در طول کارکرد عادی، کابل‌های برق زیرزمینی تحت فشارهای مختلفی مانند گرما، رطوبت و تنش مکانیکی قرار می‌گیرند که منجر به تغییر خواص و خرابی عایق در طول زمان می‌شود. مواد نانودی‌الکتریک بسپاری به نانوکامپوزیت‌های بسپاری که دارای کسرهای وزنی متعددی از ذرات معدنی با ابعاد نانومتری هستند، اطلاق می‌شود. پراکندگی این نانوذرات ریز با مواد بسپاری منجر به بهبودهای قابل توجهی در خواص دی‌الکتریک و حرارتی شده‌است که به نوبه خود نانوکامپوزیت‌های بسپاری را به محبوب‌ترین اصطلاح در جامعه دی‌الکتریک تبدیل کرده‌است. برای بهینه‌سازی این ویژگی‌های جدید، پراکندگی نانوذرات ماتریس‌های بسپاری باید افزایش یابد و این می‌تواند با عامل‌دار کردن شیمیایی سطوح نانوذرات با استفاده از سیلان‌ها یا پلی‌الکل به عنوان عوامل جفت‌کننده به دست آید. این عامل‌دار کردن منجر به تغییر شیمی نانوذرات برای سازگاری با بسپارها و کاهش تجمع آن‌ها در ماتریس بسپاری می‌شود. در مطالعه حاضر، نتایج مطالعات محققان بر اثر وارد کردن نانوذرات اکسید فلزات بر روی خواص دی‌الکتریک نظیر گذردهی نسبی الکتریکی، تلفات دی‌الکتریک و خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی و مدول الاستیسیته پی‌وی‌سی مورد استفاده در عایق سیم‌ها و کابل‌ها بررسی شده و برخی نتایج مهم آن‌ها بحث و بررسی شده‌است.

کلیدواژه‌ها:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶
شماره صفحات: ۲۲ تا ۵۱

نانوذرات،
پلی‌وینیل کلراید،
پی‌وی‌سی،
نانودی‌الکتریک بسپاری،
عایق، سیم و کابل

* ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی
استناد به مقاله:

یلداگرد، مریم، و یلداگرد، جواد. (۱۴۰۳). مروری بر اثر نانوذرات بر روی بهبود خواص مکانیکی و دی‌الکتریک پلی‌وینیل کلراید، نانودی‌الکتریک پلیمری، در عایق‌های سیم و کابل، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۲)، ۵۱-۲۲.

۱. مقدمه

امروزه استفاده از شبکه‌های توزیع فشار ضعیف و متوسط شامل زیرساخت‌های بزرگ از سامانه‌های کابلی برق زیرزمینی گران‌قیمت برای انتقال حجم عظیمی از برق به مناطق دوردست ضروری است. این سامانه‌های کابلی با کاغذ روغنی یا مواد عایق بسپاری ساخته می‌شوند. استفاده از کابل‌های عایق بسپاری در چند دهه اخیر در شبکه‌های توزیع گسترش یافته است. در طول کارکرد عادی، کابل‌های برق زیرزمینی تحت فشارهای مختلفی قرار می‌گیرند که منجر به تغییر خواص عایق در طول زمان می‌شود. علاوه بر این، فرایندهای مختلف پیری مانند قرار گرفتن در معرض گرما، رطوبت و تنش مکانیکی و هم‌چنین تجمع بارهای فضایی که در بسپارها تحت میدان DC انجام می‌شود، باعث ایجاد اعوجاج در میدان الکتریکی و شکست جزئی در عایق کابل می‌شود [۱ و ۲]. علاوه بر این، با اعمال میدان الکتریکی، مواد بسپاری در ناحیه جرقه‌زنی کربنیزه می‌شوند و این نواحی کربنیزه شده به‌عنوان کانال‌های رسانای دائمی عمل می‌کنند که منجر به افزایش تنش بر روی این ناحیه و به‌دنبال آن درختی شدن و منجر به شکست و خرابی کامل عایق می‌شود. این خرابی ممکن است خرابی کامل تجهیزات فشار قوی را در پی آورد که در نهایت منجر به قطعی و اختلال بزرگ در شبکه‌های توزیع می‌شود [۳-۵]. از این رو، کابل‌های درجه بالا با ویژگی‌های عایق خوب باید اجرا شوند تا سامانه قابل اعتماد بماند و از آسیب‌های پرهزینه جلوگیری شود [۶]. بسپارها به‌دلیل قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، سهولت ساخت و هزینه کم، به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان مواد عایق الکتریکی برای کابل‌های زیرزمینی به کار رفتند. رایج‌ترین بسپارهای مصنوعی مورد استفاده برای کابل‌ها، بسپارهای ترموپلاستیک مانند پلی‌وینیل کلراید (پی‌وی‌سی) و پلی‌اتیلن هستند. PVC (پی‌وی‌سی) یک بسپار است که به‌عنوان وینیل شناخته می‌شود. پی‌وی‌سی تقریباً ۵۰ درصد کلر دارد، دارای ساختار نسبتاً خطی با تقریباً ۵ تا ۱۰ درصد بلوری است. پی‌وی‌سی به دو شکل اصلی صلب به‌عنوان استفاده در تولید لوله و بطری و شکل انعطاف‌پذیر به‌عنوان مورد استفاده در لوله‌کشی و عایق کابل برق تولید می‌شود. پی‌وی‌سی به‌دلیل قیمت پایین و خواص دی‌الکتریک و فراوری خوب، یکی از پرمصرف‌ترین مواد عایق است که خواص شیمیایی پایدار، مقاومت عالی در برابر آتش به‌دلیل وجود کلر و

سازگاری با محیط زیست دارد [۷-۹]. این ماده هم‌چنین دارای درجه سختی بالا و خواص مکانیکی خوب است؛ به‌ویژه هنگامی که با مواد در اندازه نانو مخلوط می‌شود و چیزی را که نانوذرات الکتریک نامیده می‌شود، تشکیل می‌دهد [۱۰، ۳]. مواد نانوذرات الکتریک بسپاری در سال‌های گذشته در زمینه تحقیقات عایق الکتریکی فشار قوی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱۱]. در مقایسه با سایر مواد، مقاومت حجمی محصولات پی‌وی‌سی دارای استحکام دی‌الکتریک پایینی هستند. پی‌وی‌سی دارای ثابت دی‌الکتریک بالا، مقدار مماس تلفات دی‌الکتریک و مقاومت حجمی است و به‌طور کلی برای مواد عایق ولتاژ متوسط یا کم و فرکانس پایین مناسب است [۱۲]. برای تقویت خواص مختلف و توانایی دی‌الکتریک مواد عایق بسپاری، نانوذرات معدنی مناسب باید به‌شدت در ماتریس بسپاری پراکنده شوند که نانوکامپوزیت بسپاری نامیده می‌شود [۱۳-۱۵ و ۱۰]. مواد نانوکامپوزیت‌های بسپاری که دی‌الکتریک بسپاری به آن‌ها اطلاق می‌شود، علاقمندی ویژه‌ای در کاربردهای دی‌الکتریک دارند؛ آن‌ها با پراکندگی همگن ذرات معدنی با مقیاس نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) در یک ماده دی‌الکتریک سنتز می‌شوند. پراکندگی این نانوذرات ریز با مواد بسپاری منجر به بهبودهای چشم‌گیری در خواص دی‌الکتریک و حرارتی شده است که نانوکامپوزیت‌های بسپاری را قادر به واجد شرایط بودن در صنعت مهندسی برق، مثلاً به‌عنوان مواد عایق حجیم در دستگاه‌های ولتاژ بالا یا به‌عنوان فیلم نازک در صنعت الکترونیک می‌سازد [۱۶ و ۱۴]. در این مقاله مروری کوتاه بر اثر پراکنده‌های نانوذرات از قبیل نانوذرات روی اکسید، تیتانیوم اکسید و سیلیسیم اکسید و غیره و هم‌چنین اصلاح شیمیایی سطوح نانوذرات با عامل دار کردن آن‌ها با استفاده از سیلان‌ها یا پلی‌الکل به‌عنوان عوامل جفت‌کننده بر روی خواص دی‌الکتریک، خواص مکانیکی و خواص حرارتی پی‌وی‌سی در عایق کابل‌ها پرداخته شده است. کمیت‌های دی‌الکتریکی که در مقالات [۱۷] اندازه‌گیری شدند، گذردهی واقعی ϵ' و گذردهی موهومی ϵ'' هستند که اطلاعاتی را در مورد کارایی یک ماده به‌عنوان عایق نشان می‌دهند. پاسخ دی‌الکتریک نتیجه برهم‌کنش ماده با یک میدان الکتریکی اعمالی است که در فرکانس‌های مختلف (f) و در دمای معین نوسان می‌کند. گذردهی نسبی مختلط ϵ_r با معادله (۱):

دی‌الکتریک منحصربه‌فردی درمقایسه با بسیار پایه و بسیار پرشده با ذرات میکرومتریکی معمولی است [۲۳-۱۸]. منشأ این برتری‌ها عمدتاً به سطح بزرگ نانوذرات با پراکندگی همگن (و درجه پایین کلوخگی نانوذرات) و ناحیه سطح مشترک ویژه بین نانوذرات و بسیار نسبت داده می‌شود [۱۵]. افزایش نواحی سطحی و یا همان سطح مشترک تأثیرات بالقوه‌ای بر خواص دی‌الکتریک نانودی‌الکتریک‌ها دارد. در این میان، تغییر در ساختار محلی که ممکن است با تغییر در تراکم و/یا عمق مکان‌های تله همراه باشد، منجر به کاهش تحرک و انرژی حامل‌ها می‌شود. دومی نقش مهمی در به تأخیر انداختن آسیب در مواد دارد و ممکن است باعث افزایش طول عمر بسیار شود [۲۴]. برای بهینه‌سازی و درک رفتار مواد نانودی‌الکتریک بسیاری تعدادی چالش وجود دارد: این‌که چگونه نانوپرکننده‌ها بر خواص ویژه نانوکامپوزیت‌های بسیاری تأثیر می‌گذارند و امکان بارگذاری حداکثر با درجه پراکندگی خوب برای به‌دست‌آوردن ویژگی‌های عالی نانودی‌الکتریک بسیاری چقدر است، ضروری است. بر این اساس به‌عنوان اولین گزارش منصور و همکاران [۲۵] خواص دی‌الکتریک نانوکامپوزیت‌های پلی‌وینیل کلراید برپایه نانوذرات اکسید روی ZnO سنتز شده به‌روش سل‌ژل ساده (با غلظت تا ۱/۴۳٪ حجمی) را بررسی کردند. ایشان در طول مطالعه، اثر تیمار فراصوت را برای نانوذرات روی اکسید بر روی قدرت شکست نانوکامپوزیت‌ها بررسی کردند و قدرت شکست DC نانوکامپوزیت PVC / ZnO را با ۵۰٪ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی سنتز شده درمقایسه با PVC پایه افزایش دادند. علاوه بر این، در مطالعه آن‌ها وابستگی بخش واقعی گذردهی (ϵ') و تلفات مماس ($\tan \delta$) به هر دو غلظت نانوذرات اکسید روی و فرکانس اعمال شده (۵۰۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز) بررسی شد. شکل (۱) و (۲) خصوصیات ساختاری و ریخت‌شناختی نانوذرات اکسید روی سنتز شده در مطالعه منصور و همکاران [۲۵] را نشان می‌دهد. در الگوی XRD نمونه پودر ZnO سنتز شده تمام خطوط پراش به‌خوبی به ZnO اختصاص داده شده‌اند و اندازه بلور تخمین زده شده با استفاده از معادله شرر برای تمام خطوط پراش ثبت شده نشان داد که پودر اکسید روی مورد بررسی در اندازه نانو بین ۲۸ تا ۴۱/۵ نانومتر با میانگین حدود ۳۵ نانومتر است.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega) \quad (1)$$

داده می‌شود که در آن $i = \sqrt{-1}$ ، $\omega = 2\pi f$ برابر فرکانس زاویه‌ای است. معادله (۲):

$$\epsilon' = t \times \frac{C_p}{(A \times \epsilon_0)} \quad (2)$$

قطبش‌پذیری مواد را به دلیل جهت‌گیری مجدد دوقطبی، تغییر شکل توزیع‌های الکترون غیرمحلی، یا قطبش سطحی نشان می‌دهد. هم‌چنین ϵ'' که متناسب با انرژی تلف‌شده در داخل ماده در هر چرخه است.

$$\epsilon'' = t / (\omega \times R_p \times A \times \epsilon_0) \quad (3)$$

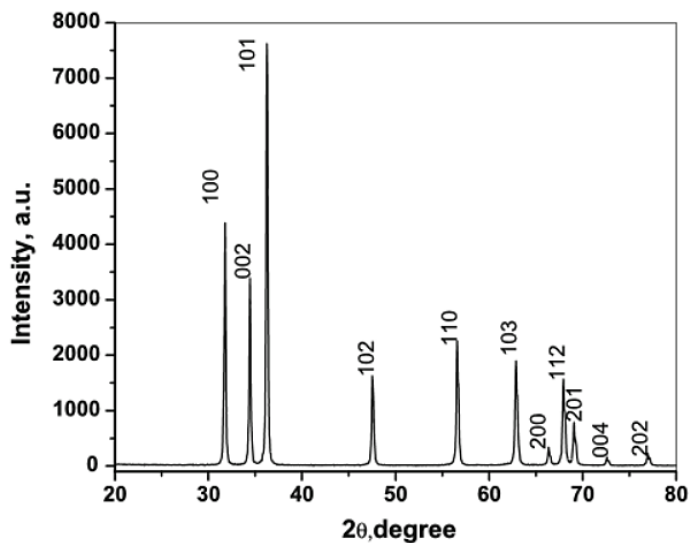
در اینجا t ضخامت نمونه، A مساحت الکترودها، ϵ_0 گذردهی فضای آزاد، و C_p و R_p به ترتیب ظرفیت خازن و مقاومت موازی نمونه‌ها از LCR متر اندازه‌گیری می‌شود. مشخص است که وقتی یک میدان الکتریکی متناوب روی یک ماده اعمال می‌شود، بین تغییر میدان و تغییر در قطبش تأخیر وجود دارد و این تأخیر با زاویه δ نشان داده می‌شود. تلفات دی‌الکتریک ($\tan \delta$) نشان‌دهنده نسبت انرژی تلف‌شده به انرژی ذخیره‌شده در دی‌الکتریک است و با رابطه زیر:

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (4)$$

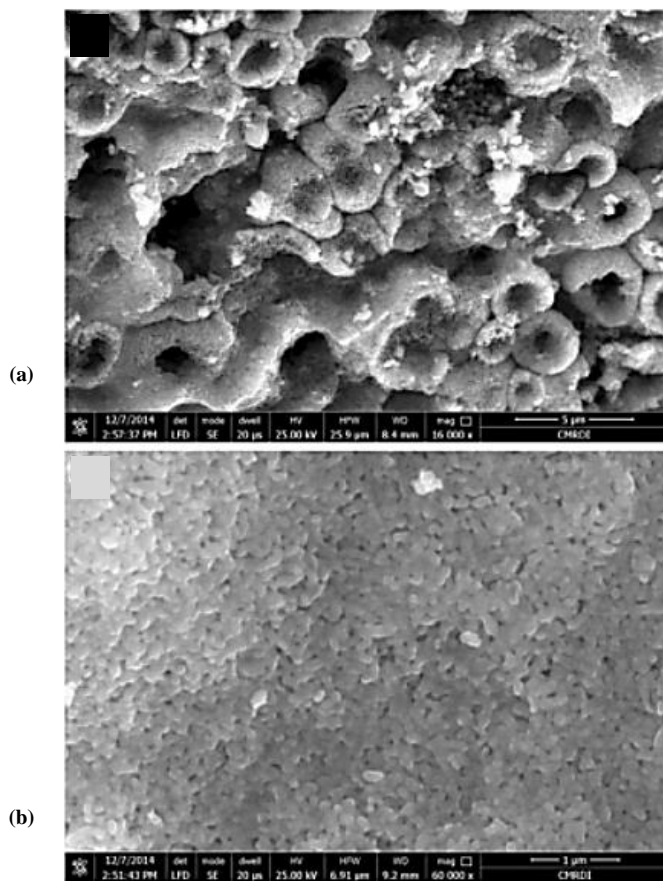
نشان داده می‌شود [۱۷].

۲. بهبود خواص دی‌الکتریک نانودی‌الکتریک PVC بر اساس نانوذرات اکسید فلزات

در میان پرکننده‌های نانوذرات، نانوذرات اکسید فلزات نقش مهمی در نانودی‌الکتریک‌های بسیاری برای افزایش قابلیت اطمینان عایق الکتریکی و به‌دست‌آوردن طراحی فشرده و جمع و جور در دستگاه‌های توان دارند. کارهای تحقیقاتی زیادی ثابت کرده‌است که وارد کردن نانوذرات اکسید فلزات به بسیار دارای رفتار و برتری‌های



شکل ۱. الگوی پرتو ایکس پودر اکسید روی سنتز شده [۲۵].
 Figure 1. XRD pattern of the synthesized ZnO powder [25].

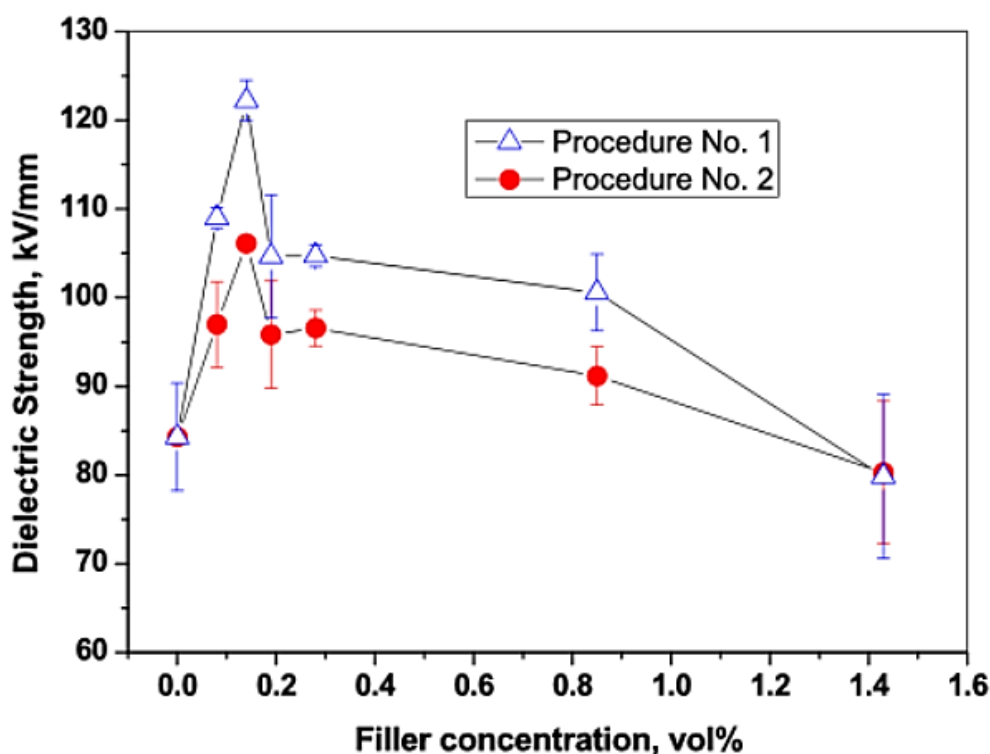


شکل ۲. میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی نانوذرات اکسید روی سنتز شده: (a) در بزرگ‌نمایی ۱۶۰۰۰ و مقیاس ۵ میکرومتر و (b) بزرگ‌نمایی ۶۰۰۰۰ و مقیاس ۱ میکرومتر [۲۵].

Figure 2. FE-SEM micrographs of as-synthesized ZnO-NPs: (a) 16,000× magnification and 5 μm scale; (b) 60,000× magnification and 1 μm scale [25].

DC را به عنوان تابعی از پرکننده‌های نانوذرات ZnO برای نانوکامپوزیت‌های PVC/ZnO آماده شده با استفاده از هر دو روش آماده سازی ذکر شده (از ذکر این روش‌ها در اینجا خودداری شده است) در مقاله مربوطه نشان می‌دهد. به طور کلی، شکل (۳) نشان می‌دهد که برای هر دو روش آماده سازی، با وارد کردن نانوذرات اکسید روی، بهبودهایی در قدرت شکست وجود دارد. در حالی که، می‌توان به وضوح اشاره کرد که نمونه‌های تهیه شده با روش شماره ۱ نسبت به نمونه‌های تهیه شده با روش شماره ۲، افزایش مقاومت شکست بالاتری را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، نانوکامپوزیت‌هایی با ۰/۱۴ درصد حجمی از نانوذرات اکسید روی تهیه شده با روش شماره ۱، ۲۰ درصد افزایش در مقدار استحکام شکست بالاتر از مقدار به دست آمده با نانوکامپوزیت با نسبت ZnO یکسان تهیه شده با روش شماره ۲ را نشان می‌دهند.

شکل (۲) میکروگراف‌های FE-SEM نانوذرات اکسید روی سنتز شده در مطالعات ایشان [۲۵] را نشان می‌دهد. چنان که از شکل (۲-ب) مشاهده می‌شود، ریخت شناسی به دست آمده از ZnO سنتز شده شکل میله مانند با کمی غیر یک نواختی است. قطر نانومیله‌ها بین ۷۰ تا ۱۰۰ نانومتر با طول حدود ۲۰۰ نانومتر است. نانوذرات میله مانند با هم رشد کرده اند و برخی مناطق آگلومرا (کلوخه) را به اندازه چند میکرومتر تشکیل داده اند که در شکل (۲-ا) مشاهده می‌شود. در همین مطالعه خواص دی الکتریک نانوکامپوزیت‌های PVC/ZnO با اندازه گیری استحکام دی الکتریک DC با رمپ ثابت ۱ کیلو ولت بر ثانیه و پاسخ دی الکتریک تابعی از فرکانس عملکرد از ۵۰۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز مطالعه شد و افزایش قابل توجهی در قدرت شکست با افزودن نانوذرات اکسید روی مشاهده شد. مقادیر مقاومت شکست تا ۴۵٪ برای PVC/ZnO با ۰/۱۴ درصد وزنی بیش از مقدار به دست آمده برای نمونه PVC خام رسید. شکل (۳) قدرت شکست



شکل ۳. تغییرات قدرت دی الکتریک نانوکامپوزیت‌های اکسید روی / پی‌وی‌سی طبق روش شماره ۱ و ۲ تابعی از غلظت ماده پرکننده [۲۵].

Figure 3. Dielectric strength variation for PVC/ZnO nanocomposites prepared in accordance with the procedures No. 1 and No.2 as a function of filler concentration [25].

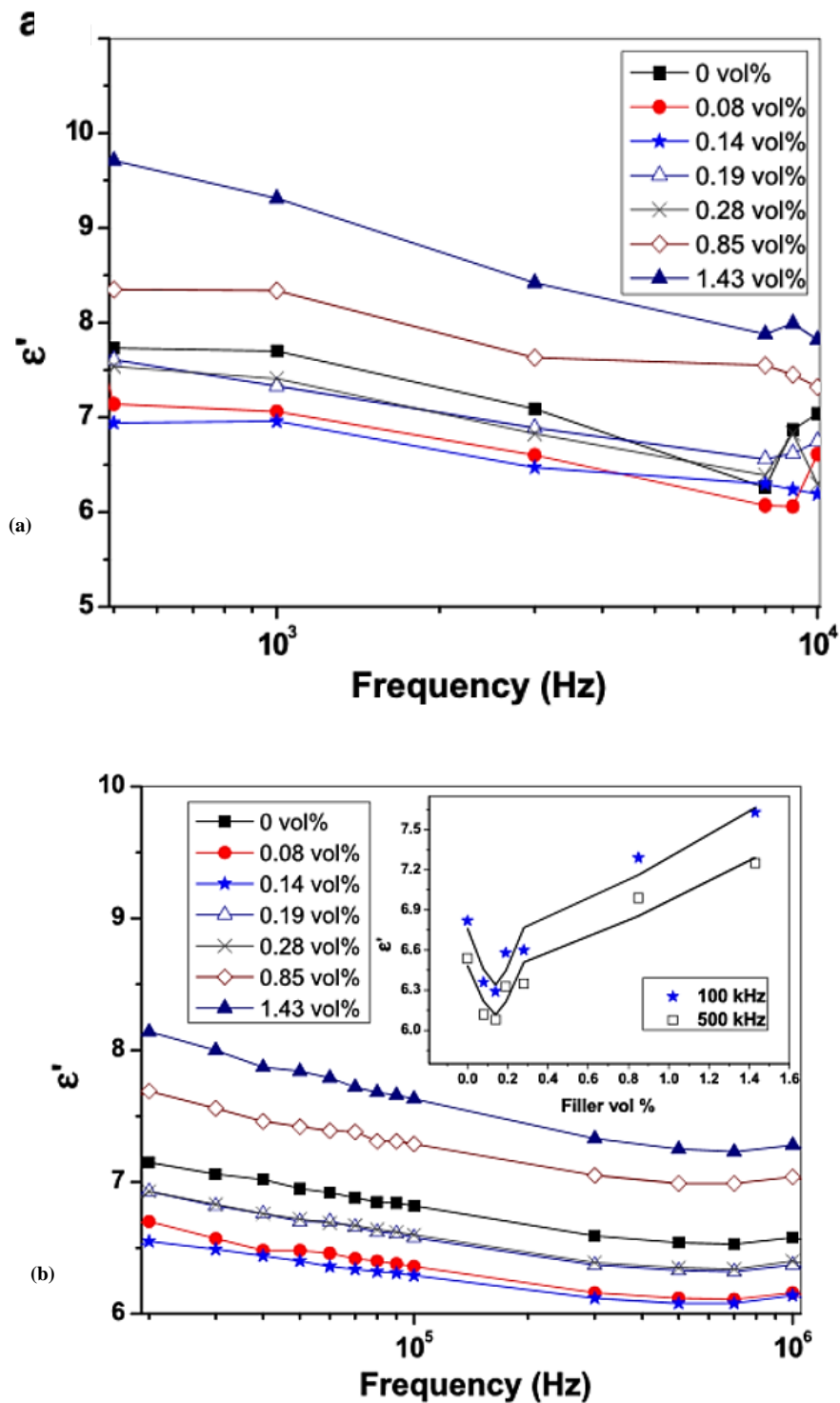
۲-۱ بررسی خواص و اندازه‌گیری‌ها

۲-۱-۱ خواص طیف سنجی دی الکتریک

در واقع، پاسخ دی‌الکتریک یک ماده خاص به وسیله مشخصه‌های دی‌الکتریک ϵ' و $\tan \delta$ مشخص می‌شود؛ بر این اساس، در مطالعات منصور و همکاران [۲۵] شکل (۴) و شکل (۵) به ترتیب اثر غلظت پرکننده را بر وابستگی فرکانس ϵ' و $\tan \delta$ نشان می‌دهد. شکل (۴) - (a, b) که بخش واقعی رفتار گذرای را در بر می‌گیرد، روند کاهشی معمول را با افزایش در محدوده فرکانس اعمال شده برای همه کامپوزیت‌های مورد بررسی نشان می‌دهند. طبق گزارش‌ها این رفتار طبیعی یک ماده دی‌الکتریک به دلیل کاهش سهم قطبش جهت‌گیری با افزایش فرکانس است [۲۶ و ۲۷]. در واقع، مقدار گذردهی دی‌الکتریک مؤثر ϵ' متناسب با تعداد دوقطبی‌های قابل جهت‌گیری موجود در سامانه و توانایی آن‌ها برای جهت‌دهی تحت یک فرکانس اعمالی است. بنابراین، کاهش مقادیر ϵ' با افزایش فرکانس تا 10^6 هرتز بیان می‌کند که با افزایش فرکانس، گروه‌های عاملی آزاد دوقطبی در زنجیره‌های PVC زمان کمتری برای جهت‌دهی خود در جهت میدان متناوب پیدا می‌کنند. در مطالعات ایشان [۲۵] به‌طور هم‌زمان، سهم نانوذرات ZnO در قطبش نیز با افزایش فرکانس اعمال شده - همان‌طور که در مرجع [۲۰] گزارش شده است - کاهش یافته است. علاوه بر این، شکل (۴) - (a, b) اثر افزودن نانوذرات ZnO به ماتریس PVC را بر روی گذردهی مؤثر در کل محدوده فرکانس مورد بررسی، از ۵۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز (طبق شکل ۴ الف) و از ۲۰ کیلوهرتز به ۱ مگاهرتز (طبق شکل (۴) - b) نشان می‌دهد. در محدوده فرکانس پایین‌تر همان‌طور که در شکل (۴) - (a) نشان داده شده است، ϵ' مقادیر بالاتری را برای غلظت بالای پرکننده نانوذرات (۰/۸۵ درصد حجمی و ۱/۴۳ درصد حجمی) نسبت به PVC خام و سایر نانوکامپوزیت‌ها (۰/۰۸ تا ۰/۲۸ درصد حجمی) نشان می‌دهد. از این منحنی‌ها مشخص است که مقادیر ϵ' با افزایش غلظت پرکننده نانوذرات تا ۰/۱۴ درصد حجمی کاهش می‌یابد و سپس با افزایش غلظت پرکننده افزایش می‌یابد. این وابستگی قابل توجه ϵ' به غلظت پرکننده قبلاً

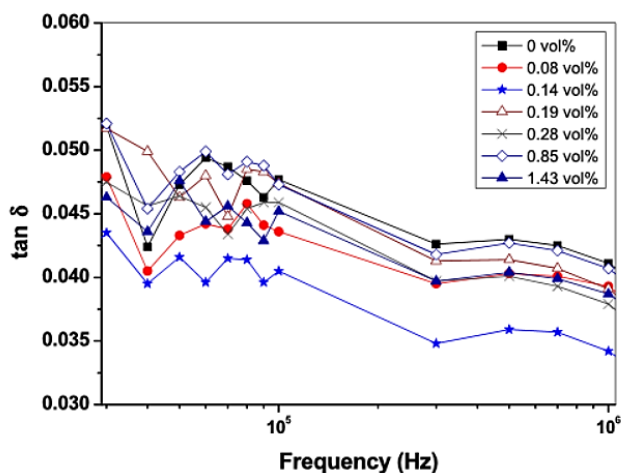
برای نانوکامپوزیت‌ها در غلظت‌های پرکننده پایین مشاهده شده بود [۲۸-۳۱]. این تغییر غیر یک‌نواخت ϵ' با افزایش غلظت پرکننده در نانوکامپوزیت‌ها، به نقش نانوذرات بر میزان آزادی زنجیره‌های بسپاری و دوقطبی - دوقطبی و برهم‌کنش نانوذرات نزدیک هم قرار گرفته، نسبت داده می‌شود.

شکل (۵) تغییر مماس تلفات، $\tan \delta$ ، نمونه‌های آزمایش شده با فرکانس اعمال شده در محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز را در این مطالعه نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که تغییرات مقادیر $\tan \delta$ تحت این محدوده فرکانس برای همه کامپوزیت‌های آزمایش شده تقریباً رفتار مشابهی دارد که با افزایش فرکانس مقادیر $\tan \delta$ کاهش می‌یابد. در واقع، مماس تلفات، $\tan \delta$ ، نسبت بین تلفات دی‌الکتریک و ثابت دی‌الکتریک است و تلفات دی‌الکتریک نشان‌دهنده بخشی از قطبش است که با میدان اعمال شده در فاز نیست. بنابراین، کاهش مقادیر $\tan \delta$ نمونه‌های مورد بررسی با افزایش فرکانس اعمالی می‌تواند به دلیل محدودیت نرخ انتقال تونل زنی حامل‌های بار باشد [۲۱]. این رفتار در محدوده فرکانس پایین‌تر (۵۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز) که با رفتار ϵ' در همان محدوده فرکانس مطابقت دارد، به وضوح ظاهر نشده است. هم‌چنین، شکل (۵) نشان می‌دهد که هیچ وابستگی مشخصی از مقادیر $\tan \delta$ به غلظت پرکننده نانوکامپوزیت‌های مورد مطالعه وجود ندارد. این موضوع را می‌توان به وجود دو اثر افزودن نانوذرات بر روی رسانایی کامپوزیت نسبت داد: حذف تحرک حامل‌های بار در سامانه بسپاری به دلیل مکان‌های به‌دام‌انداختن بار در مناطق مشترک و افزایش چگالی حامل‌های بار به دلیل پرکننده معدنی. در اینجا، هیچ اثر غالبی برای توصیف وابستگی $\tan \delta$ به غلظت پرکننده نانوذرات برای نانوکامپوزیت‌های مورد بررسی در کل محدوده فرکانس اعمال شده وجود ندارد؛ اما برای محدوده فرکانس‌های بالاتر (همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است) مقادیر کمتر $\tan \delta$ برای نانوکامپوزیت با اکسید روی - پی‌وی‌سی ۰/۱۴ درصد حجمی به دست آمده است.



شکل ۴. تغییرات ϵ' برای نانوکامپوزیت‌های اکسید روی / پی‌وی‌سی با فرکانس اعمالی (a) از ۵۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز (b) از ۲۰ کیلوهرتز به ۱ مگاهرتز در دمای اتاق. نمودار الحاقی در شکل (b) تغییرات ϵ' را با غلظت پرکننده نانو در فرکانس‌های ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز نشان می‌دهد. خطوط توپر داده‌های فیت شده از رگرسیون را ارائه می‌کند [۲۵].

Figure 4. (a,b) Variations of ϵ' for the investigated PVC/ZnO nanocomposites with the applied frequency (a) from 500 Hz to 10 KHz (b) from 20 KHz to 1 MHz at room temperature. The inset in (b) represents the variation of ϵ' with ZnO nanofiller concentration at 100 kHz and 500 kHz. The solid lines in the inset represent regression fitting [25].

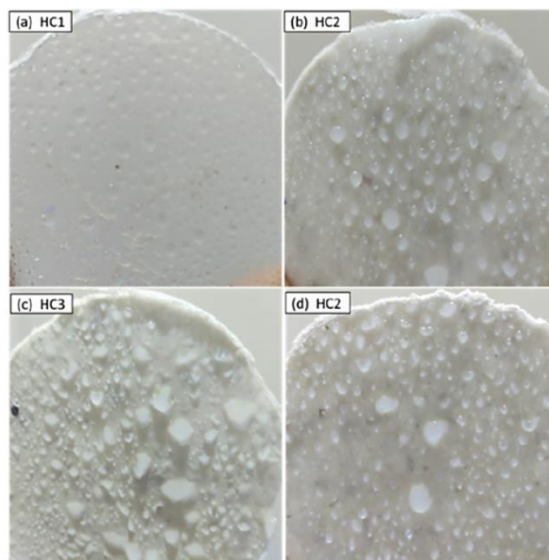


شکل ۵. تغییرات تلفات دی‌الکتریک برای نانوکامپوزیت‌های اکسید روی/پی‌وی‌سی با فرکانس‌های عملی از محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا یک مگاهرتز اندازه‌گیری شده در دمای اتاق [۲۵].

Figure 5. Variations of $\tan\delta$ for the investigated PVC/ZnO nanocomposites with the applied frequency range from 20 kHz to 1 MHz as measured at room temperature [25].

سطح باعث کاهش خاصیت آب‌گریزی سطح با افزایش میزان غلظت نانوذرات و کاهش زاویه تماس از ۱۰۷/۶ تا ۸۶ درجه با افزایش غلظت نانوذرات از صفر تا ۴ phr بود. شکل (۶) طبقه‌بندی کلاس آب‌گریزی نمونه‌های ارائه شده در این مطالعه [۳۲] را بر اساس ترکیب جدول (۱) بر اساس طبقه‌بندی آب‌گریزی مؤسسه تحقیقات انتقال سوئد (STRI) نشان می‌دهد. تصاویر با راهنمای طبقه‌بندی STRI با HC1-HC6 مقایسه و در شکل (۶) آورده شده‌است.

در مطالعه دیگری در راستای بهبود خواص عایق‌کاری نانوکامپوزیت‌های پی‌وی‌سی و ذرات اکسید روی برای کاربردهای ولتاژ و دمای بالا، خواص حرارتی نانوکامپوزیت با آزمون‌های ترموگرانشی و کالریمتری روبش دیفرانسیلی به‌دست‌فایزا و همکارانش [۳۲] بررسی شد و بر طبق گزارش آنان نتایج نشان‌دهنده افزایش نقطه ذوب از ۱۷۲ درجه سلسیوس تا ۲۱۵ درجه سلسیوس بود. هم چنین اثر پرکننده‌های نانوذرات اکسید روی رفتار آب‌گریزی



شکل ۶. طبقه‌بندی آب‌گریزی بر اساس STRI (a) PZ0 (b) PZ2 (c) PZ4 (d) PZ6.

Figure 6. STRI hydrophobicity classification of (a) PZ0, (b) PZ2, (c) PZ4, (d) PZ6.

جدول ۱. ترکیب و مخفف نمونه‌های تهیه شده [۳۲].

Table 1. Composition and abbreviation of all the prepared samples [32].

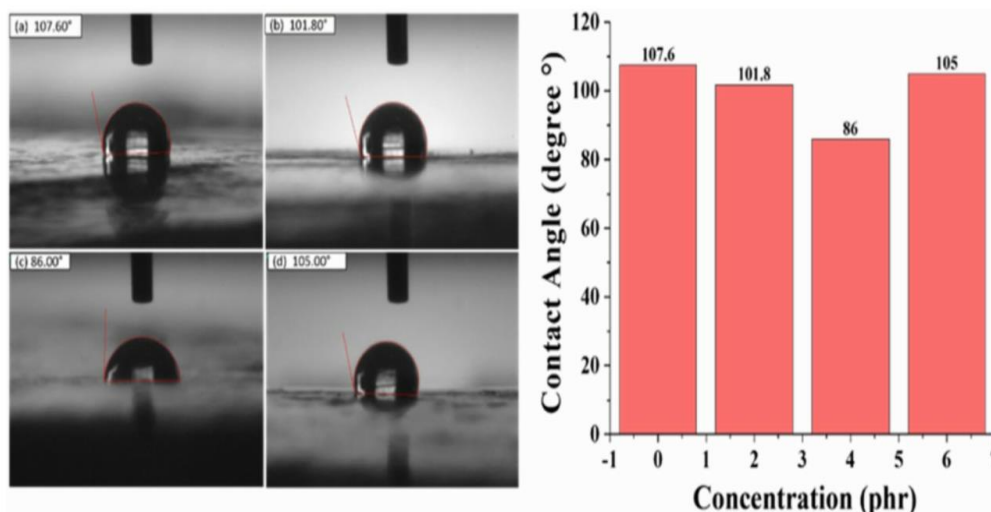
Sample	PVC(phr)	ZO(phr)	Sample code
1	100	0	PZ0
2	100	2	PZ2
3	100	4	PZ4
4	100	6	PZ6

با افزایش غلظت ZnO از ۰ به ۲ و ۴ phr، زاویه تماس از ۱۰۷/۶ درجه به ۱۰۱/۸ درجه و ۸۶ درجه کاهش یافت. این کاهش در زاویه تماس به دلیل برهم کنش نانوذرات اکسید روی با مولکول آب است که در بالا توضیح داده شد. طبق گزارش فایزا و همکارانش با افزایش غلظت ZnO، تعداد نانوذرات ZnO در سطح دیسک PVC افزایش یافت که منجر به افزایش آب دوستی می‌شود. با افزایش بیشتر غلظت ZnO به ۶ phr، زاویه تماس کمی از نمونه ۴ phr از ۱۰۷/۶ درجه به ۱۰۵ درجه کاهش یافت که با طبقه بندی STRI که به سمت آب دوست تر تغییر می‌کند، سازگار است. با کاهش فاصله نانوذرات به دلیل افزایش غلظت، نیروی جاذبه به وسیله نیروهای واندروالس افزایش می‌یابد که منجر به تجمع می‌شود. هم چنین بر طبق مشاهدات فایزا و همکارانش در غلظت‌های بالاتر، نمی‌توان از تجمع کامل اجتناب کرد؛ بنابراین در مورد PZ6 زاویه تماس افزایش می‌یابد.

بر اساس طبقه بندی STRI، نمونه HC1 به عنوان آب گریزترین نمونه در این مطالعه [۳۲] در نظر گرفته شد. کاهش آب گریزی PVC پس از افزودن نانوذرات اکسید روی مشاهده شد. کلاس HC1 در مورد PZ0 دیده می‌شود که برای PZ2 و PZ4 به ترتیب به HC2 و HC3 تبدیل می‌شود. کاهش آب گریزی به دلیل ماهیت آب دوستی سطح اکسید روی که با آب در تعامل است، مشاهده می‌شود؛ با این حال، PZ6 کلاس HC2 را نشان می‌دهد که افزایش ویژگی آب گریز آن به دلیل از بین رفتن سطح ZnO در دسترس ناشی از تجمع نانوذرات اکسید روی است.

۲-۱-۲ اندازه گیری های زاویه تماس

در این مطالعه [۳۲] به منظور انجام تجزیه و تحلیل کمی دقیق برای بررسی ماهیت آب گریز PVC و کامپوزیت‌های آن، اندازه گیری زاویه تماس انجام شد. می‌دانیم که هرچه زاویه تماس بیشتر باشد، ماهیت آب گریزی کامپوزیت بیشتر می‌شود. از شکل (۷) مشخص است که



شکل ۷. اندازه گیری های زاویه تماس (a) PZ0 (b) PZ2 (c) PZ4 (d) PZ6.

Figure 7. Contact angle measurement of (a) PZ0, (b) PZ2, (c) PZ4, (d) PZ6.

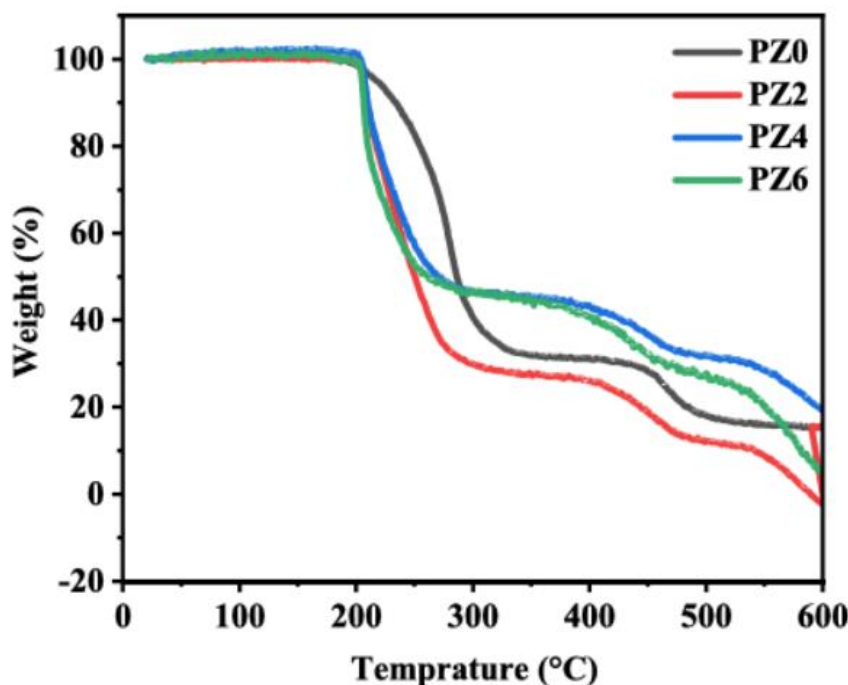
۲-۱-۳ تجزیه و تحلیل حرارتی (TGA)

در این مطالعه [۳۲] برای بررسی پایداری حرارتی PVC و کامپوزیت‌های آن از آنالیز حرارتی گرانشی استفاده شد. شکل (۸) و (۹) به ترتیب ترموگرام TGA و آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA) تمامی نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. بدیهی است که در مورد PVC تمیز دو ناحیه دمایی کاهش وزن ظاهر شد. منطقه اول در حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس شروع شد که می‌توان آن را به کلرزدایی نسبت داد که منجر به تشکیل توالی‌های پلی‌ن مزدوج می‌شود که منجر به تغییر رنگ می‌شود. چنان که در شکل پیداست، هیچ کاهش وزنی قبل از ۲۰۰ درجه سلسیوس در مورد PVC تمیز رخ نداده است که عدم وجود رطوبت و حلال را تأیید می‌کند. دومین منطقه کاهش وزن برای PVC تمیز را می‌توان در حدود ۴۵۰ درجه سلسیوس مشاهده کرد که به دلیل ترک حرارتی زنجیره‌های مزدوج کربنی ظاهر شد. از شکل (۸)، پیداست که PZ0 تا ۴۵۰ درجه سلسیوس پایدار بود. با این حال، نانوکامپوزیت‌ها تا ۵۰۰ درجه سلسیوس پایدار بودند. در مورد نانو کامپوزیت PVC-ZnO سه ناحیه کاهش وزن

مشاهده شد که در آن دو ناحیه اول مشابه PVC بود؛ اما سومین ناحیه کاهش وزن را می‌توان در حدود ۵۲۰ درجه سلسیوس مشاهده کرد که مقدار آن ۱۱، ۲۴ و ۳۰ درصد به ترتیب برای PZ2، PZ4 و PZ6 بود. اولین منطقه کاهش وزن زودتر از PVC تمیز شروع شد، به این معنی که نانوذرات ZnO فعالیت کاتالیزوری را برای کلرزدایی زنجیره‌های PVC نشان دادند. مناطق مختلف کاهش وزن را می‌توان در نمودار DTA در شکل (۹) مشاهده کرد.

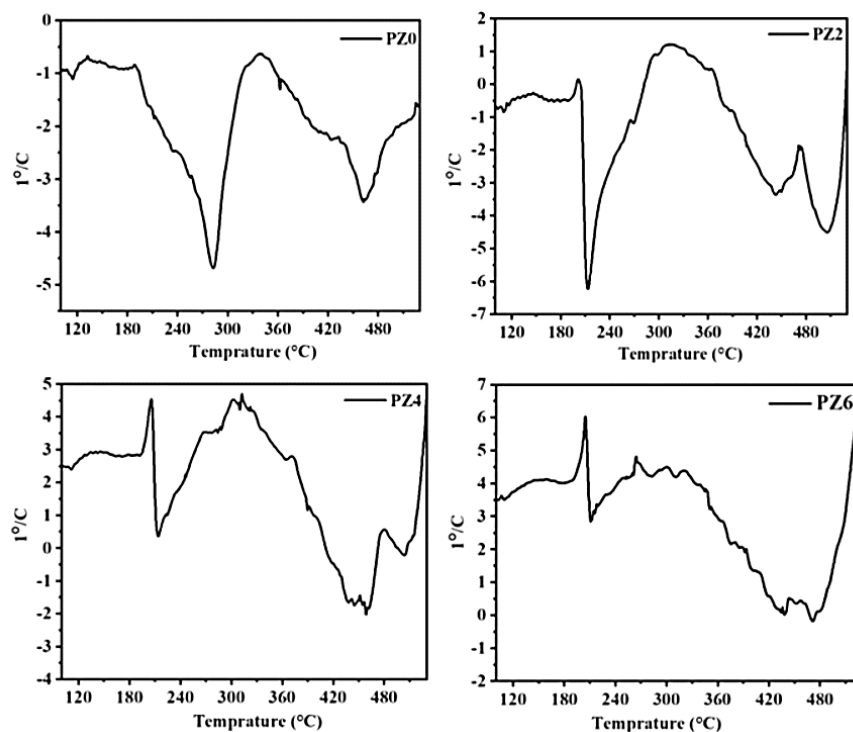
۲-۱-۴ تجزیه و تحلیل کالریمتری اسکن تفاضلی (DSC)

در این مطالعه [۳۲] تجزیه و تحلیل DSC برای بررسی خواص حرارتی بسیار در محدوده دمایی ۲۴ تا ۲۵۰ درجه سلسیوس انجام گرفت. مقایسه ترموگرام‌های DSC برای تمام نمونه‌های آماده شده در شکل (۱۰) آورده شده است. از ترموگرام‌ها مشهود است که یک فرایند گرمازا در حدود ۲۰۵ درجه سلسیوس در مورد نانوکامپوزیت‌هایی که برای PVC تمیز مشاهده نشده، دیده می‌شود.

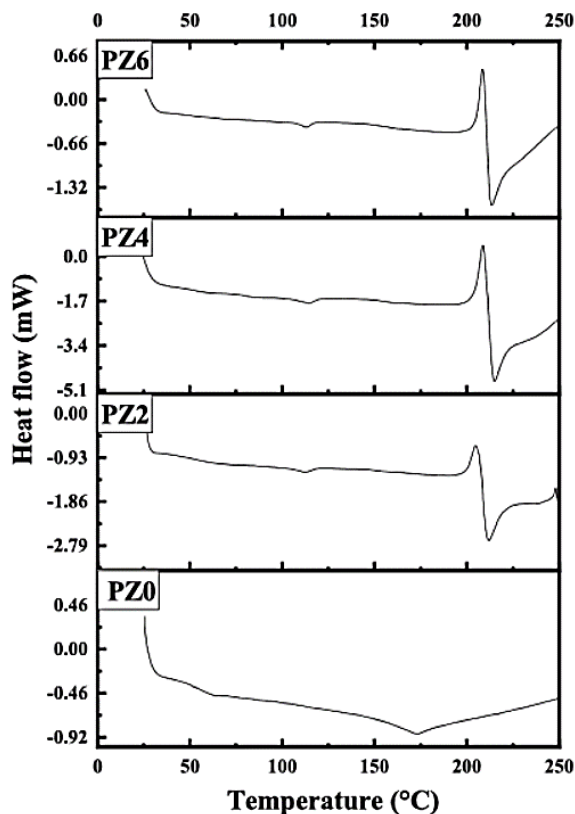


شکل ۸. ترموگراف TGA تمام نمونه‌های آماده شده.

Figure 8. TGA thermograph of all the prepared samples.



شکل ۹. ترموگراف DTA تمام نمونه‌های آماده‌شده.
 Figure 9. DTA thermograph of all the prepared samples.



شکل ۱۰. ترموگراف DSC تمام نمونه‌های آماده‌شده.
 Figure 10. DSC thermograph of all the prepared samples.

هم‌چنین حبشی و همکاران [۳۳] اثر نانوذرات SiO₂ را بر روی خواص دی‌الکتریک کامپوزیت پی‌وی‌سی قبل و بعد از تیمار پیرسازی حرارتی و پی‌وی‌سی خام، بررسی کردند و نتایج آنان کاهش تلفات جرم را برای سامانه کامپوزیتی PVC/SiO₂ نسبت به پی‌وی‌سی خام نشان داد.

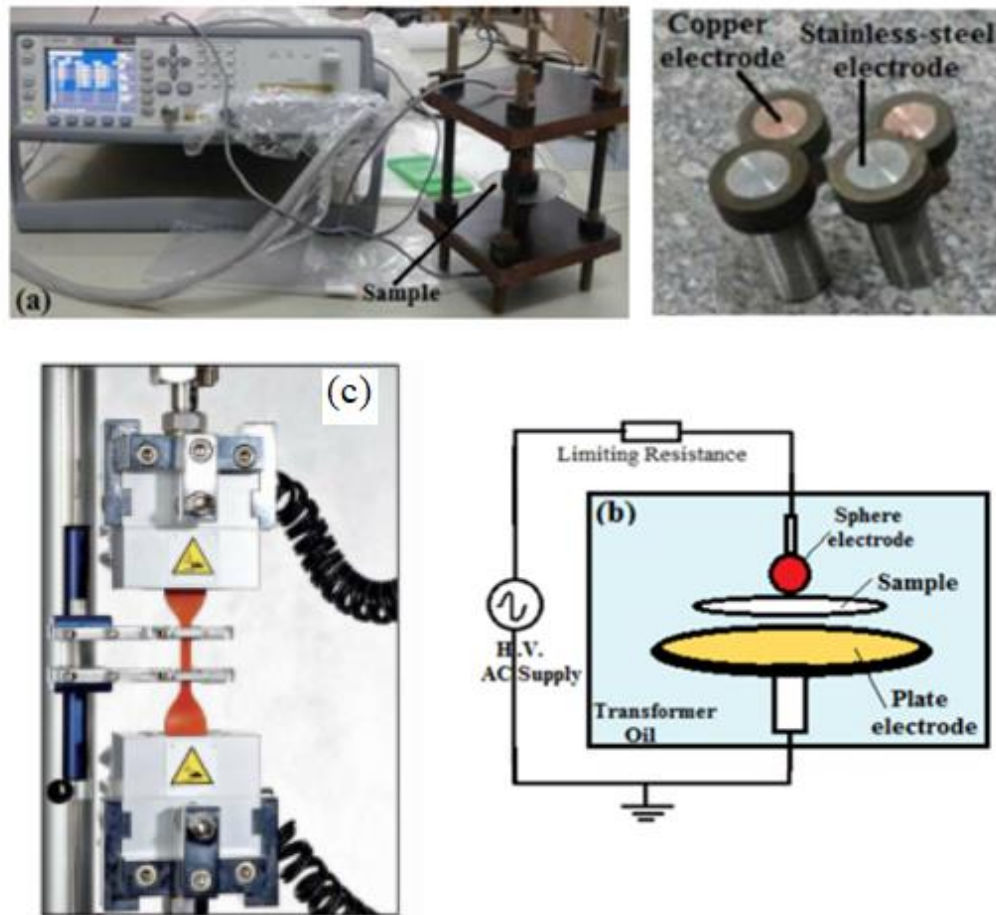
۳. بهبود چندگانه عایق کابل PVC با استفاده از نانوکامپوزیت‌های عامل‌دار شده مبتنی بر نانوذرات مختلف

بسیاری دیگر از مطالعات، علاقمند به افزایش خواص مختلف کابل‌های عایق با اصلاح سطح نانوذرات بودند. برای بهینه‌سازی ویژگی‌های جدید، پراکندگی نانوذرات در ماتریس‌های بسیاری باید افزایش یابد که به نوبه خود می‌تواند با عامل‌دار کردن شیمیایی سطوح نانوذرات با استفاده از سیلان‌ها یا پلی‌الکل به‌عنوان عوامل جفت‌کننده به دست آورد. این عامل‌دار کردن ویژگی آب‌دوستی نانوذرات معدنی را به ویژگی آلی تبدیل می‌کند و از این رو، سازگاری آن‌ها با بسپارها بهبود می‌یابد و موجب کاهش تجمع آن‌ها در ماتریس بسیاری می‌شود [۳۴-۳۷]. بهبود خواص مکانیکی مانند مدول کشسانی و استحکام، یکی از مهم‌ترین اهداف ترکیب نانوذرات عامل‌دار در بسپارهاست. این افزایش تحت تأثیر استحکام ناحیه سطح مشترک و درجه برهم‌کنش سطحی بین نانوذرات و شبکه بسپارهاست [۳۸]. این ناحیه سطح مشترک به‌عنوان یک عملکرد کلیدی در جلوگیری از تجمع نانوذرات در نظر گرفته می‌شود که به‌عنوان نقاط آسیب‌پذیری عمل می‌کند که در آن یک فرایند مخرب می‌تواند آغاز شود. بنابراین، تجمع منجر به زوال خواص الکتریکی، مکانیکی و حرارتی می‌شود. برای کاهش تجمع نانوذرات و افزایش پراکندگی آن‌ها در بسپارها، اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات مورد نیاز است [۳۹ و ۳۶]. اصلاح سطح رایج‌ترین روش برای کاهش اثری سطحی نانوذرات و بهبود سازگاری آن‌ها با زمینه بسپاری و هم‌چنین دستیابی به پراکندگی یک‌نواخت نانوذرات در داخل ماتریس است. روی و همکاران [۴۰] تأثیر تغییر نانوذرات را به وسیله یک عامل جفت‌کننده سیلان بر خواص الکتریکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن/سیلیکا کراس‌لینک‌شده (XLPE/SiO₂) بررسی کردند. مشخص شده است که ثابت دی‌الکتریک مؤثر SiO₂ اصلاح‌شده با

کاهش اندازه از میکرو به SiO₂ اصلاح‌شده در اندازه نانو کاهش می‌یابد و انحنای سطح ذرات نقش مهمی در تغییر میزان پیوند هیدروژنی در بین گروه‌های سیلانول ایفا می‌کند. این منجر به تغییر قطبیت سطحی ذره شده، در نتیجه باعث کاهش ثابت دی‌الکتریک نانوکامپوزیت می‌شود. علاوه بر این، ساگوماران [۴۱] اثر درج کرنات کلسیم (CaCO₃) با نانوذرات SiO₂ غیر عامل‌دار شده با ماتریس PVC را بر روی خواص دی‌الکتریک و مکانیکی مطالعه کرد. در مطالعه او مشخص شد که افزودن SiO₂ تنها بر روی خواص مکانیکی تأثیر دارد و از سوی دیگر CaCO₃ به بهبود خواص دی‌الکتریک کمک می‌کند. خداپرست و همکاران [۴۲] تأثیر نانوذرات TiO₂ عامل‌دار شده را بر رفتار دی‌الکتریک پلی‌وینیلیدین فلوراید مطالعه کردند. داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های آنان نشان داد که یک عامل جفت‌کننده سیلان مناسب در افزایش پراکندگی نانوذرات و در نتیجه در تقویت سطح مشترک بسپار - ذره ضروری است. علاوه بر این، با افزایش غلظت نانوذرات TiO₂ عامل‌دار، گذردهی دی‌الکتریک نمونه‌های آماده شده کاهش یافت. پنگ و همکاران [۴۳] دریافتند که سطح مشترک LDPE/MgO با افزودن نانوذرات MgO عامل‌دار شده به LDPE اثر قابل توجهی بر خواص الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها نشان می‌دهد و این به دلیل به‌دام‌افتادن بارهای فضای آزاد است که به نوبه خود قدرت شکست DC را افزایش می‌دهد. اخیراً عبدل‌گاوارد و همکارانش [۴۴] اثر TiO₂ عامل‌دار شده را به روش شیمیایی بر روی خواص دی‌الکتریک PVC بررسی کردند؛ آنان در آزمایش‌های خود کمیت‌های دی‌الکتریک را شامل گذردهی نسبی، ε، و تلفات دی‌الکتریک، tan δ که اطلاعاتی را در مورد کارایی یک ماده به‌عنوان عایق نشان می‌دهند، اندازه گرفتند و چگونگی تغییر این مشخصه‌ها را در مواد در فرکانس‌های مختلف بررسی کردند و هم‌چنین تأثیر محتویات نانوذرات را بر خواص دی‌الکتریک نانوکامپوزیت‌های ساخته شده بررسی کردند. در مطالعه آنان قدرت شکست دی‌الکتریک AC مواد عایق PVC با ترکیب TiO₂ عامل‌دار در ماتریس آنان در مقایسه با TiO₂ غیر عامل‌دار شده یا PVC تمیز افزایش یافت. علاوه بر این، ضریب گذر و اتلاف دی‌الکتریک به ترتیب در حدود ۴۳٪ و ۴۱٪ نسبت به PVC تمیز در فرکانس ۵۰ هرتز کاهش یافت [۴۴]. شکل (۱۱) تصاویر دستگاه Agilent-E4980A LCR متر مورد استفاده در آزمایش‌های

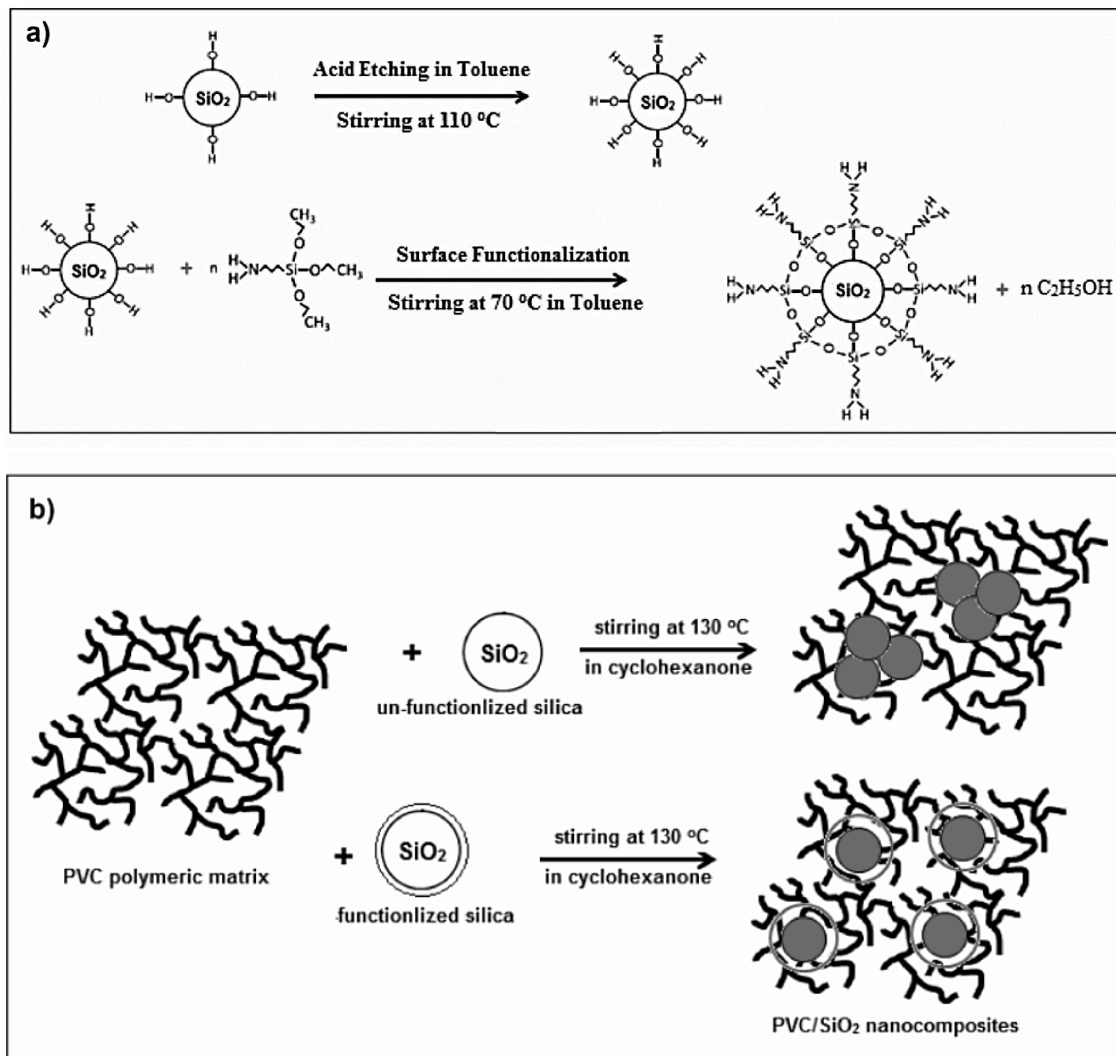
PVC/SiO₂ با استفاده از روش ریخته‌گری محلول تهیه و عامل دار کردن نانوذرات SiO₂ با استفاده از آمینوسیلان انجام شد (شکل (۱۲) - a) که یک جفت کننده مناسب برای ذرات PVC و SiO₂ است که باعث نزدیکی مقادیر کشش سطحی آن‌ها به یکدیگر می‌شود. بارگذاری‌های مختلف شامل ۰/۵٪، ۱٪، ۳٪ و ۵٪ (وزنی/وزنی) نانوذرات SiO₂ عامل دار و غیر عامل دار شده به ماتریس PVC اضافه شد تا اثرات آن‌ها بر خواص دی الکتریک و مکانیکی PVC بررسی شود. شکل (۱۲) - b) طرح فرایند آماده‌سازی نانوکامپوزیت‌ها را در مطالعه عبدل گاوارد و همکارانش [۴۵] نشان می‌دهد. بسیار پی‌وی‌سی تمیز نیز برای استفاده به‌عنوان مرجع در مطالعه آنان تهیه شد.

ایشان برای بررسی خواص دی الکتریک لایه‌های بسیاری به دست آمده در محدوده فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز و طرحواره یک سلول آزمایشی را برای آزمون قدرت شکست دی الکتریک AC در میدان شبه یکنواخت نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که LCR متر بسته به روش اندازه‌گیری خازنی، اندازه‌گیری ثابت دی الکتریک و امیدانس دقیق مواد جامد را فراهم می‌کند. این روش امکان جاروب فرکانس را فراهم می‌کند. اندازه‌گیری‌هایی که دقیقاً نمونه‌های آزمایشی را مشخص می‌کند. هم چنین در مطالعه عبدل گاوارد و همکارانش [۴۵] بهبود خواص دی الکتریک و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های PVC با استفاده از نانوذرات SiO₂ عامل دار گزارش شد. در آزمایش‌های آنان نانوکامپوزیت‌های



شکل ۱۱. (a) متر E4980A متحرک با سلول آزمایش و الکترودهای سل آزمایش (b) طرحواره یک سلول آزمایشی برای آزمایش شکست AC در میدان شبه یکنواخت [۴۵] (c) آزمون مکانیکی نمونه‌های پی‌وی‌سی [۲۳].

Figure 11. (a) Agilent E4980A-LCR meter with test cell and electrodes of test cell (b) Schematic of a test cell for AC breakdown test at quasi-uniform field (c) Mechanical testing of PVC samples [23].



شکل ۱۲. (a) عامل‌دار کردن سطحی نانوذرات سیلیکا با استفاده از عامل جفت‌کننده (b) تهیه نانوکامپوزیت PVC/SiO₂ [۴۵].

Figure 12. (a) Surface functionalization of silica nanoparticles using amino silane coupling agent, (b) preparation of the PVC/SiO₂ nanocomposites [45].

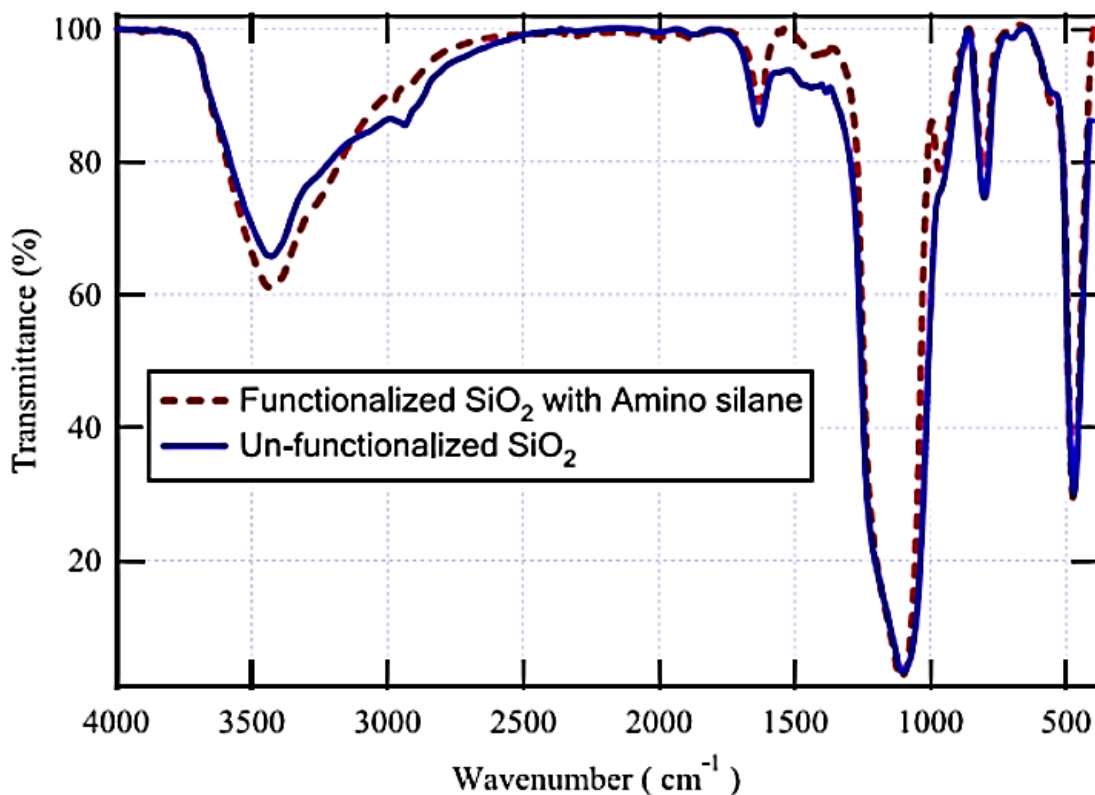
SiO₂ عامل‌دار دیده می‌شود که عبارت‌اند از: نوار جذب در 1250 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات انعطاف پذیر نامتقارن سیلوکسان Si-O-Si، پیک کوچک در 1000 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوندی Ti-O-Si، پیک کوچک در 1580 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی پیوند N-H، و در نهایت، پیک در 2950 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن پیوند C-H در بخش آلی دم پیوندی عامل جفت‌کننده است. همه این پیک‌ها وقوع واکنش شیمیایی عامل جفت‌کننده آمینوسیلان را با گروه‌های هیدروکسیل در سطح نانوذرات SiO₂ طبق نوشته‌های قبلی تأیید می‌کنند [۴۶ و ۴۷].

۳-۱ بررسی مشخصه‌های فیزیکی و ویژگی‌های مکانیکی

نانوکامپوزیت PVC/SiO₂

۳-۱-۱ بررسی نتایج طیف مادون قرمز نانو ذرات SiO₂

شکل (۱۳) طیف مادون قرمز پودر SiO₂ عامل‌دار شده و غیر عامل‌دار شده را در عدد موج از 4000 تا 400 cm^{-1} نشان می‌دهد [۴۵]. همان‌طور که در هر دو طیف نشان داده شده، نوارهای جذب در 3500 cm^{-1} مربوط به ارتعاش پیوندهای O-H یا NH₂، و باندهای جذب در 1600 و 497 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاش پیوندهای H-O-H و Si-O، در هر دو نمونه مشاهده شده است. با این حال، چهار نوار جذبی تنها در طیف های نمونه

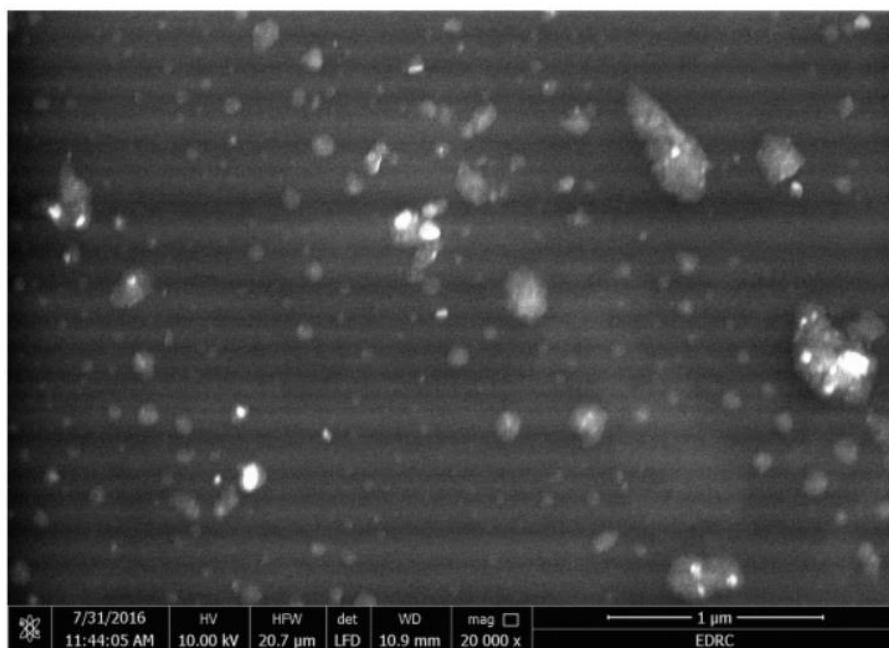


شکل ۱۳. طیف مادون قرمز نانوذرات SiO_2 عامل‌دار شده و غیر عامل‌دار شده [۴۵].

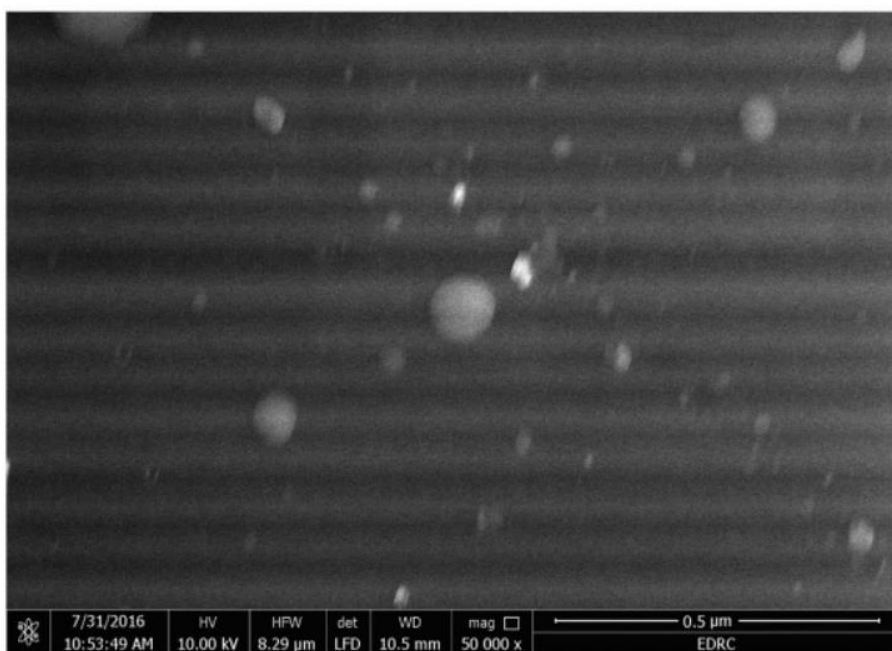
Figure 13. FT-IR spectra of SiO_2 (functionalized and un-functionalized nanoparticles) [45].

شده است. به عبارت دیگر، نانوذرات SiO_2 عامل‌دار، پراکندگی بهتری در ماتریس PVC نسبت به نانوذرات غیر عامل‌دار نشان دادند. در مطالعه عبدال گاوارد و همکارانش [۴۵] هم‌چنین آزمایش‌های مقاومت شکست دی‌الکتریک در میدان یک‌نواخت و غیر یک‌نواخت با استفاده از دو سلول آزمایشی انجام شد که یکی از آن‌ها برای میدان یک‌نواخت، که از الکتروود مس کره-کره (با قطر ۲ سانتی‌متر) تشکیل شده بود و سلول آزمایشی دیگر که برای میدان غیر یک‌نواخت استفاده شد از الکتروود مس کره-صفحه (با قطر کره و صفحه به ترتیب ۲ و ۹/۵ سانتیمتر) تشکیل شده بود. در آزمایش‌های آنان طبق استاندارد ASTM (D149-09) [۴۸]، سلول‌های آزمایشی با روغن ترانسفورماتور، با گذردهی نسبی برابر ۰/۲ پر شدند تا فلاش‌ور روی سطح نمونه قبل از وقوع خرابی از بین برود. نیز دو ولتاژ اعمالی مختلف DC و AC در فرکانس توان، و قطر نمونه حدود ۸ سانتیمتر با ضخامت متغیر از ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر بود، در نظر گرفته شد، که با میکرومتر دیجیتال فاوولر (SYLVAC) اندازه‌گیری شد.

۳-۱-۲ بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت‌های PVC/ SiO_2
 تأثیر تیمارهای آمینه سطح نانوذرات SiO_2 بر پراکندگی SiO_2 در ماتریس PVC در نتایج عبدال گاوارد و همکارانش [۴۵] از مطالعه ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌های تهیه شده، مشاهده می‌شود. این اثرات در مقایسه میکروگراف‌های FE-SEM سطح مقطع دو نانوکامپوزیت، یکی با ۰/۵ درصد وزنی SiO_2 غیر عامل‌دار شده (شکل (۱۴) - a) و دیگری با ۰/۵ درصد وزنی دارای عامل آمینو SiO_2 (شکل (۱۴) - b) به دست آمده است. طبق تفسیر ایشان و همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است؛ گروه‌های هیدروکسیل بسیار فعال متصل به سطح ذرات تمایل به متراکم شدن دارند و در نتیجه چندین خوشه از نانوذرات SiO_2 به اندازه چند میکرومتر تشکیل شده‌اند. این خوشه‌ها یا کلوخه‌ها در شکل (۹) - a در مورد نمونه پی‌وی‌سی/نمونه SiO_2 غیر عامل‌دار شده دیده شده‌اند، با این حال در شکل (۱۴) - b به دلیل عامل‌دار شدن شیمیایی سطح نانوذرات SiO_2 خوشه‌ها ناپدید شده‌اند که این عمل تجمع را کاهش داده و باعث افزایش پراکندگی نانوذرات در زنجیره‌های بسپاری



(a)



(b)

شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپ روبشی نانوکامپوزیت PVC/SiO₂ (۰/۵٪) با ذرات SiO₂ غیر عامل‌دار شده و (b) با ذرات SiO₂ عامل‌دار شده با آمینو [۴۵].

Figure 14. FE-SEM micrographs of PVC/0.5 wt. % SiO₂ nanocomposites, (a) with un-functionalized SiO₂, (b) with amino-functionalized SiO₂ [45].

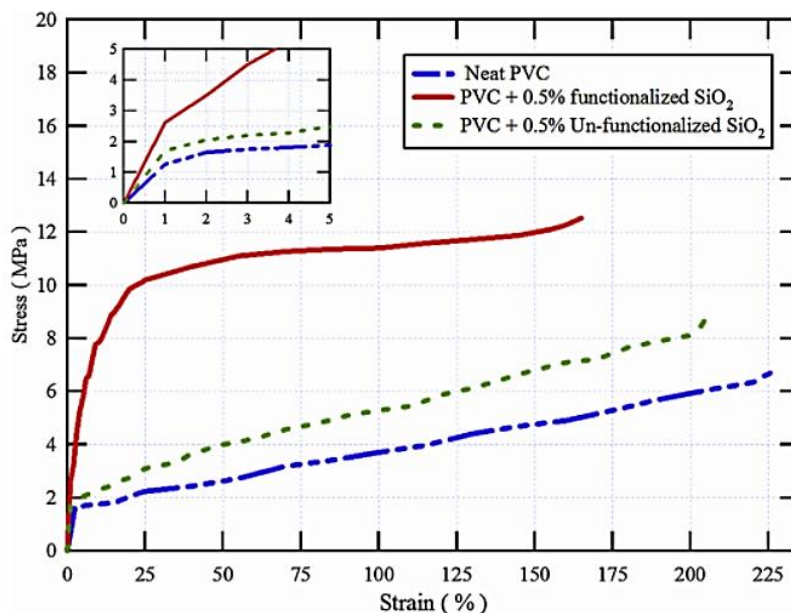
خواص مکانیکی مانند تنش، کرنش، ازدیاد طول، استحکام کششی و مدول کشسانی (مدول یانگ) برای PVC تمیز و نانوکامپوزیت های آن در دمای اتاق با استفاده از دستگاه نمایه چک تانسور (ابزارهای Gibitre)، مدل شماره (TCC 2009054) اندازه گیری شد.

خواص مکانیکی آن نانوکامپوزیت که از تغییر شکل کمتر آن آشکار می شود، با جفت کردن سیلان همراه است که زنجیره های بسیاری را محکم و محدود نگه می دارد. درحالی که در مورد نانوکامپوزیت با SiO_2 غیر عامل دار شده، تجمعات نانوذرات به صورت حفره های نسبتاً بزرگی در ورق آزمایش شده، عمل می کنند که باعث می شود زنجیره های مولکولی آزادانه حرکت کنند و از کنار یکدیگر بلغزند. همه این ها نقش تغییر سطح نانوذرات را با عامل جفت کننده مناسب بر روی چسبندگی سطحی بین نانوذرات SiO_2 و زنجیره های بسیاری ارزیابی کردند که بر رفتار مکانیکی PVC تأثیر می گذارد. کاهش ازدیاد طول مواد بسیاری با افزودن پرکننده برای اکثر نانوکامپوزیت های بسیاری به دلیل محدودیت تحرک زنجیره ای که از پیوند بین نانوذرات و زمینه بسیاری ناشی می شود، به خوبی شناخته شده و مورد انتظار است [۵۲ و ۵۱]. از شیب اولیه منحنی های تنش- کرنش، مدول یانگ E تعیین شده و مقادیر آن ها در جدول (۲) ثبت شده است. استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست نیز از این منحنی ها استخراج و مقادیر آن ها نیز در این جدول ثبت شده است. داده های جدول بندی شده در جدول (۲) نشان می دهد که مدول کشسانی نانوذرات PVC/ SiO_2 غیر عامل دار ۴۷ درصد بیشتر از نمونه پی وی سی پایه است؛ اما مدول کشسانی نانوذرات PVC/ SiO_2 عامل دار شده به ترتیب حدود ۱۴۰ درصد و ۶۴ درصد بیشتر از نسبت به PVC پایه و نانوذرات PVC/ SiO_2 عامل دار نشده افزایش یافته است. این نشان می دهد که افزودن نانوذرات SiO_2 عامل دار باعث بهبود خواص مکانیکی PVC می شود. چنین رفتاری در خواص مکانیکی و افزایش مدول با بارگذاری نانوذرات کم به سطح ویژه بالای آن ها نسبت داده می شود که برای برهم کنش با ماتریس بسیاری در دسترس است. از جدول (۲)، مدول یانگ به دست آمده بر حسب MPa است، نه در GPa (کمتر از پودر رزین پی وی سی) و این بدین دلیل است که نرم کننده ها، تثبیت کننده ها و سایر افزودنی ها به PVC خاصیت ارتجاعی می دهند و آن را برای کابل ها انعطاف پذیرتر می کنند. این با بسیاری از تحقیقات منتشر شده از جمله مراجع [۵۳ و ۵۴] مطابقت دارد.

برای اندازه گیری این مشخصه ها، آزمایش کشش با استفاده از نمونه های دمبل شکل با ابعاد ۴۰ میلی متر در ۴ میلی متر و ضخامت های بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ میلی متر انجام شد. این ورق ها بین دو دستگیره ثابت و محکم می شد تا محورهای بلندشان با جهت بار اعمال شده منطبق شود. اندازه گیری ها با سرعت ۵۰ میلی متر بر دقیقه مطابق با استاندارد [۴۹] ASTM (D882-12) انجام شد. تنش با تقسیم نیروی اعمال شده بر سطح مقطع نمونه آزمایش شده، حساب شد و کرنش با تقسیم تغییر جابه جایی بر طول اولیه نمونه به دست آمد. لازم به ذکر است که این آزمایش کششی، داده های مفیدی را برای اهداف طراحی مهندسی پلاستیک فراهم می کند [۵۰] و برای مطالعه اثر درج نانوذرات SiO_2 عامل دار شده بر پاسخ مکانیکی مواد عایق PVC انجام می شود. بنابراین، سه نمونه در آزمایش های آنان مشخص شد: پی وی سی تمیز، نانوکامپوزیت PVC/ SiO_2 با ۰/۵٪ SiO_2 غیر عامل دار شده و نانوکامپوزیت PVC/ SiO_2 با ۰/۵٪ SiO_2 دارای عامل آمینو.

۳-۱-۳ ویژگی های مکانیکی

در این بخش، داده های به دست آمده از آزمایش کشش برای توصیف تغییر شکل مکانیکی PVC تمیز و دو نانوکامپوزیت آماده شده آن به دست عبدال گاوارد و همکاران [۴۵] بحث شد. PVC/ SiO_2 ۰/۵ درصد وزنی SiO_2 غیر عامل دار شده و PVC/ SiO_2 ۰/۵ درصد وزنی دارای عامل آمینو. آنان تمامی اندازه گیری ها را در دمای اتاق ۲۵ درجه سلسیوس و با سرعت روبشی ۵۰ میلی متر بر دقیقه انجام دادند که داده های به دست آمده در شکل ۱۵ ترسیم شده و مشخصه های مشتق شده در جدول (۲) ثبت شده است. رفتار تنش-کرنش نمونه های آزمایش شده، نشان داده است که افزودن نانوذرات به بسیار باعث کاهش مقادیر کرنش و افزایش مقادیر تنش شده است. این امر به حضور نانوذرات در ماتریس PVC نسبت داده می شود که باعث محدودیت در تحرک زنجیره های PVC می شود که به نوبه خود کشیدگی نمونه را کاهش، ولی استحکام کششی و الاستیسیته آن را افزایش می دهد. هم چنین مشخص شده است که برای نمونه های نانوکامپوزیت با SiO_2 عامل دار، افزایش



شکل ۱۵. مشخصه‌های کرنش-تنش نانوکامپوزیت‌های PVC/SiO₂ ۰/۵ با ذرات SiO₂ غیر عامل‌دار شده و با ذرات SiO₂ عامل‌دار شده با آمینو در ۲۵ درجهٔ سلسیوس [۴۵].

Figure 15. Stress-strain characteristic of PVC, PVC/0.5 wt.% un-functionalized SiO₂ and PVC/0.5 wt.% functionalized SiO₂ nanocomposite at 25 °C [45].

جدول ۲. ازدیاد طول، استحکام کششی و مدول کشسانی PVC تمیز، PVC/SiO₂ ۰/۵ با PVC/SiO₂ ۰/۵ غیر عامل‌دار شده و PVC/SiO₂ ۰/۵ با SiO₂ ۰/۵ عامل‌دار شده با آمینو در دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس [۴۵].

Table 2. Elongation, tensile strength, and modulus of elasticity of Neat PVC, PVC/0.5% un-functionalized SiO₂ and PVC/0.5% functionalized SiO₂ with amino at 25 °C [45].

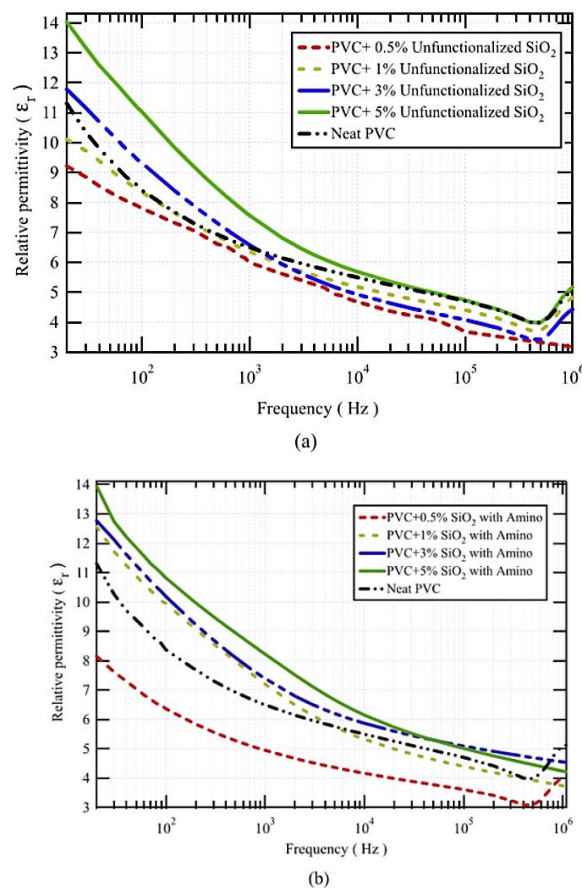
Name of sample	Young's modulus (MPa)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)
Neat PVC	67.17	225.49	6.59
PVC/0.5% un-functionalized SiO ₂	98.5	204.29	8.64
PVC/0.5% amino-functionalized SiO ₂	1610.5	164.92	12.53

مقاومت نانوذرات نشان می‌دهد. طبق یافته‌های آنان برای همهٔ نمونه‌ها ϵ_r با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، که رفتار مورد انتظار در اکثر مواد دی‌الکتریک در نظر گرفته می‌شود. با افزایش فرکانس، مقیاس زمانی که در طی آن میدان الکتریکی در یک جهت اعمال می‌شود، کاهش می‌یابد و دیپول‌ها (دوقطبی‌ها) زمان کافی برای جهت‌گیری در جهت میدان الکتریکی قبل از معکوس شدن آن را ندارند؛ بنابراین، مواد ارزش قطبی‌پذیری بالاتری ایجاد نمی‌کنند. با این حال، با کاهش فرکانس، مقیاس‌های زمانی افزایش می‌یابد و متحرک‌ترین گروه‌ها شروع به جهت‌گیری می‌کنند که در نتیجه گذردهی نسبی مشاهده‌شده، افزایش می‌یابد [۵۸-۵۶].

۳-۱-۴ بررسی خواص دی‌الکتریک، گذردهی نسبی و تلفات دی‌الکتریک
 در این بخش، مشخصه‌های دی‌الکتریک تمام نمونه‌ها مانند گذردهی، رسانایی و تلفات لایه‌های نانوکامپوزیتی عبدال گاوارد و همکاران [۴۵] با استفاده از LCR Agilent-E4980A متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها برای همهٔ فیلم‌ها، با ضخامت و مساحت مشخص، در دمای اتاق و در محدودهٔ فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز و زیر ۱ ولت انجام شد [۵۵]. پس از آن، پاسخ دی‌الکتریک مواد عایق به‌عنوان تابعی از فرکانس بررسی شد. شکل ((۱۱) a, b) تغییر گذردهی نسبی، ϵ_r ، نانوکامپوزیت‌های PVC/SiO₂ را با بارگذاری

است که منجر به محدود کردن زنجیره‌های بسیاری به روشی مشابه آنچه در [۶۰] برای اثر قراردادن گرافن اصلاح‌نشده بر خواص الکتریکی و مکانیکی کامپوزیت‌های PVDF گزارش شده است، می‌شود. افزایش گذردهی در ۵ درصد وزنی SiO_2 ممکن است به کاهش برهم‌کنش رابط بین ماتریس بسپاری و SiO_2 نسبت داده شود که از تشکیل دانه‌های ذرات ناشی می‌شود. این کلوخه‌ها به‌عنوان فضای خالی بین زنجیره‌های بسپاری عمل و تحرک آن‌ها را تسهیل می‌کنند و از این رو قطبش مولکولی اضافی را به حساب می‌آورند [۲۱]. یک دلیل دیگر برای افزایش مقادیر گذردهی با افزایش محتوای نانوذرات SiO_2 ، احتمال حضور گروه‌های هیدروکسیل واکنش ندادۀ متصل به سطح SiO_2 است که این گروه‌های قطبی برای بخش دیگری از قطبی شدن به وجود می‌آیند و مقادیر گذردهی را افزایش می‌دهند.

مقادیر گذردهی برای همه نمونه‌ها در فرکانس بالاتر (بعد از ۵۰۰ کیلوهرتز) ممکن است به دلیل وجود سازوکار قطبش دیگری مانند قطبش اتمی به جای قطبش دوقطبی باشد [۵۹]. هم‌چنین از شکل (۱۶) مشخص است که مقادیر گذردهی نانوکامپوزیت‌ها با غلظت SiO_2 به‌ویژه در مورد کامپوزیت‌هایی با SiO_2 عامل‌دار و در ناحیۀ فرکانس پایین تغییر می‌کند. علاوه بر این، نشان داده شده است که نانوکامپوزیت‌های با ۵/۰ درصد وزنی SiO_2 کم‌ترین مقادیر ϵ_r را دارند، به‌ویژه با SiO_2 عامل‌دار که حدود ۲۵ درصد از PVC تمیز در فرکانس توان (۵۰ هرتز) کاهش می‌یابد. برطبق تفسیر ایشان این موضوع به تعامل خوب بین نانوذرات و زنجیره‌های بسپاری نسبت داده می‌شود که منجر به کاهش تحرک زنجیره در هنگام قرار گرفتن در معرض میدان الکتریکی می‌شود. دلیل احتمالی دیگری که باعث کاهش گذردهی نانوکامپوزیت می‌شود، اثر هسته‌زایی نانوذرات SiO_2

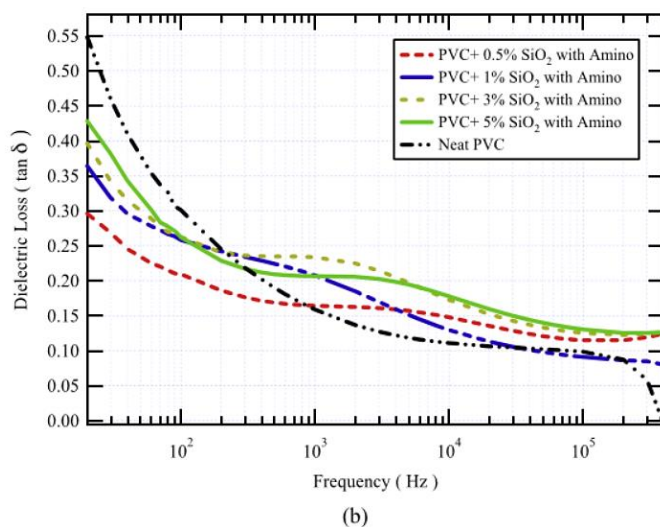
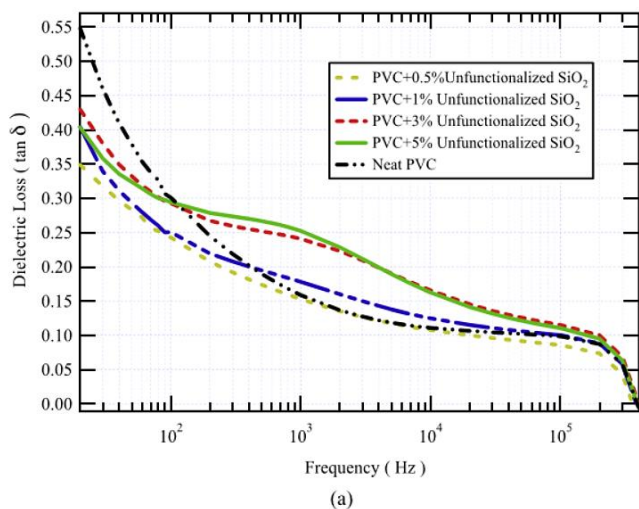


شکل ۱۶. وابستگی فرکانس ϵ_r برای نانوکامپوزیت‌های PVC/ SiO_2 در ۲۵ درجۀ سلسیوس (a) با ذرات SiO_2 غیر عامل‌دار شده و (b) با ذرات SiO_2 عامل‌دار شده با آمینو [۴۵].

Figure 16. Frequency dependence of ϵ_r for PVC/ SiO_2 nanocomposites at 25 °C, (a) with un-functionalized SiO_2 (b) with amino-functionalized SiO_2 [45].

نانوکامپوزیت‌های PVC/SiO₂ ۰/۵ درصد وزنی SiO₂ عامل‌دار شده، حدود ۳۹ درصد نسبت به PVC تمیز در فرکانس ۵۰ هرتز کاهش می‌یابد. با این حال، در فرکانس‌های بالا، تلفات تحت تأثیر افزودن نانوذرات قرار نمی‌گیرد. بنابراین، ۰/۵ درصد وزنی کسر بارگذاری بهینه SiO₂ عامل‌دار شده با ماتریس PVC است که مقادیر ϵ_r و $\tan \delta$ را به ترتیب ۲۵ و ۳۹ درصد نسبت به PVC تمیز در ۵۰ هرتز کاهش می‌دهد. هم‌چنین، برای کسر وزنی ۰/۵ درصد از SiO₂ غیرعامل‌دار شده با نانوکامپوزیت PVC، مقادیر ϵ_r و $\tan \delta$ به ترتیب ۱۱ و ۲۵ درصد نسبت به PVC تمیز در فرکانس ۵۰ هرتز کاهش یافته‌است که قطبش و تلفات داخل مواد عایق کابل را از بین می‌برد.

هم‌چنین عبدال‌گاوارد و همکارانش [۴۵] تغییرات $\tan \delta$ با بارگذاری نانوذرات در فرکانس‌های مختلف را برای نانوکامپوزیت‌های مختلف PVC/SiO₂ بررسی کردند. همان‌طور که در شکل‌های (a, b - (۱۷)) نشان داده شده‌است تمام نمونه‌های بسپاری دارای مقادیر بالای $\tan \delta$ در فرکانس‌های پایین هستند و این به‌طور کلی به جریان نشتی بالاتر در سامانه نسبت داده می‌شود [۶۱]. با این حال، بامقایسه مقادیر تلفات همه نمونه‌ها، مشاهده شده‌است که تلفات نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذرات SiO₂ عامل‌دار کمتر از نانوکامپوزیت‌های با عملکرد ناکارآمد و کمتر از PVC تمیز، به‌ویژه در فرکانس توان (۵۰ هرتز) است. به‌عنوان مثال، تلفات

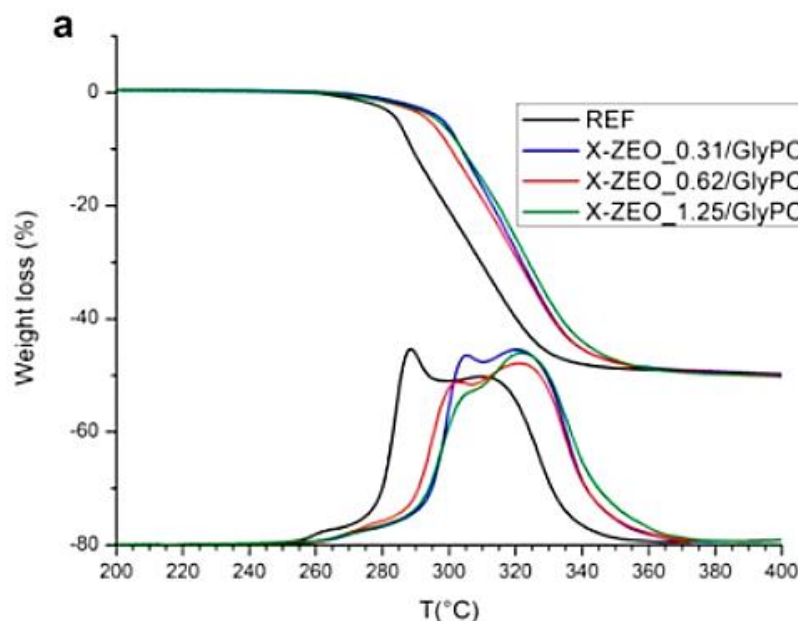


شکل ۱۷. وابستگی فرکانس $\tan \delta$ برای نانوکامپوزیت‌های PVC/SiO₂ در ۲۵ درجه سلسیوس (a) با ذرات SiO₂ غیر عامل‌دار شده و (b) با ذرات SiO₂ عامل‌دار شده با آمینو [۴۵].

Figure 17. Frequency dependence of $\tan \delta$ for PVC/SiO₂ nanocomposites at 25 °C, (a) with un-functionalized SiO₂ (b) with amino-functionalized SiO₂ [45].

حرارتی نمونه‌های تقویت‌شده با نانومواد، با غلظت‌های POSS به 0.31 phr و اثرات افزایشی جالب POSS با ژئولیت‌ها و هیدروتالسیت‌ها برای کاهش آزادسازی HCl بدون از دست‌دادن عملکرد مکانیکی نشان دادند. چنان‌که شکل (۱۸) نشان می‌دهد آزمایش‌های TGA روی سطح شیب‌دار سمت چپ با ترکیب ژئولیت X و گلیسییدیل POSS با افزایش غلظت ژئولیت از 0.31 به 1.25 phr انجام شد. اثرات تثبیت (یعنی تغییر دمای شروع) به‌طور قابل توجهی، برای هر سه فرمول سازگار است؛ درحالی‌که سرعت و نرخ نسبی مسیر تخریب اول در مقابل دوم تحت تأثیر غلظت ژئولیت نوع X است. این رفتار، نقش ژئولیت‌ها را به‌عنوان نگه‌دارنده هیدروکلریدریک اسید [۶۳] زمانی‌که تجزیه تحت کنترل نفوذ می‌شود، تأیید می‌کند. همه فرمول‌های کامپوزیت در 600 ثانیه اول در مقابل P-PVC تمیز پایداری پیدا می‌کنند و پس از این زمان، ترکیب سه نمونه اضافه‌شده، با افزایش پایداری در طول زمان و در پایان آزمایش (پس از 3000 ثانیه) نسبت به افزایش میزان ژئولیت، آن‌ها را متمایز می‌کند.

هم‌چنین در مطالعه دیگری که به‌تازگی عبدال‌گاوارد و همکاران [۲۳] انجام داده‌اند، اثر نانوافزودنی ذرات تیتانیوم اکسید بر روی پی‌وی‌سی بررسی شد و نتایج خیلی مشابهی با نانوکامپوزیت پی‌وی‌سی و ذرات سیلان که در بالا بررسی شد، به دست آمد که در اینجا به دلیل طولانی‌شدن مقاله از بررسی آن پرهیز شده و خواننده علاقمند، به منبع آن راهنمایی می‌شود. هم‌چنین در مطالعات پاولین و همکارانش [۶۲] اثر نانوافزودنی پلی‌هیدرال الیگومریک سلیسیس کیواکسان^۱ بر روی پایداری حرارتی و آتش‌سوزی پی‌وی‌سی مورد استفاده در کابل‌ها، بررسی شده است. در مطالعه آنان اثرات نانومواد، به‌تنهایی و درهم‌افزایی با عوامل مهارکننده هیدروکلراید به‌عنوان ژئولیت‌ها و هیدروتالسیت‌ها^۲، بر پایداری حرارتی و آزادسازی هیدروکلریدریک اسید P-PVC به‌طور عمیق با استفاده از آنالیز گرموزن‌سنجی و روش‌های مرجع ASTM بررسی شد. علاوه بر این، سختی و خواص مکانیکی به‌منظور برجسته‌کردن اثرات این افزودنی‌ها درمنظر استفاده نهایی صنعتی مطالعه شد. در مطالعه آنان داده‌ها بهبودهای مربوطه را در پایداری



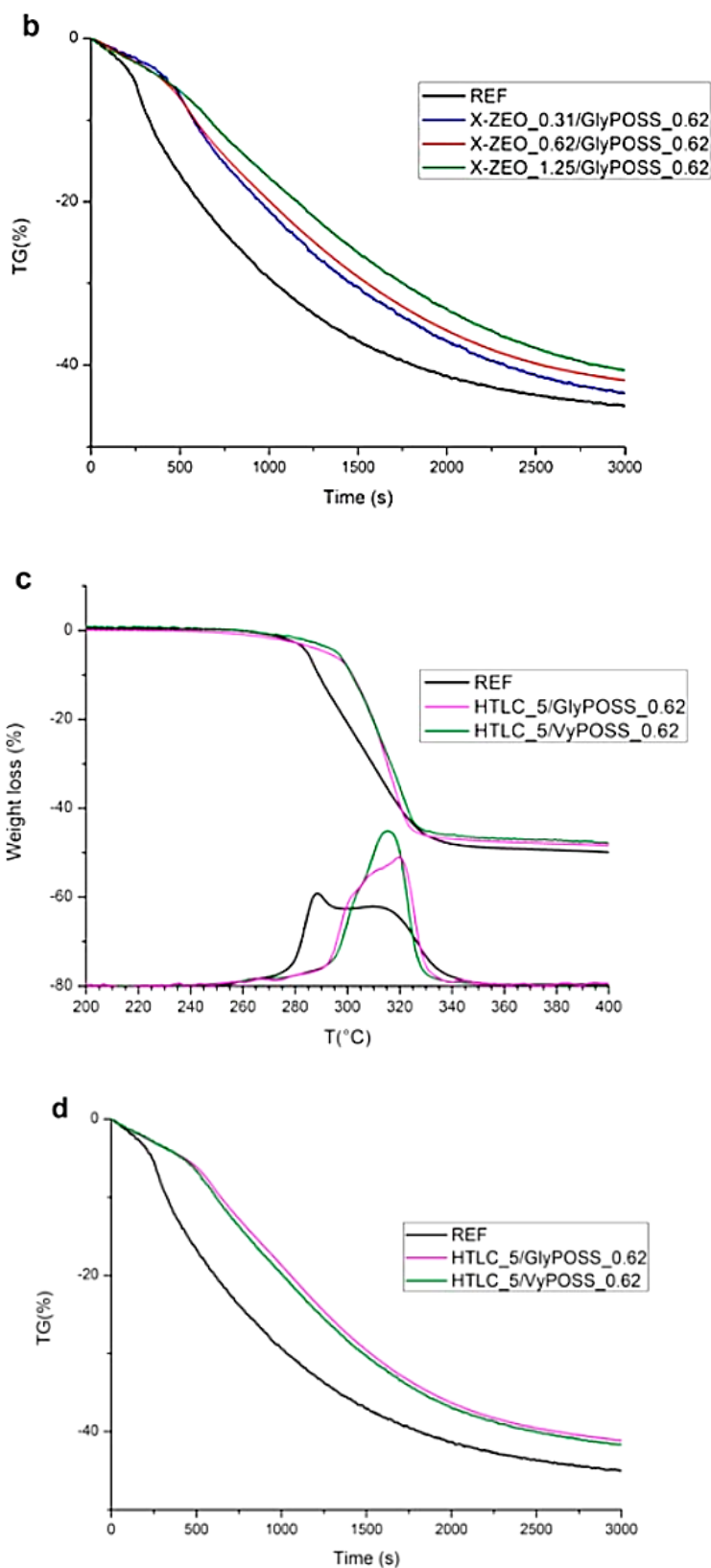
شکل ۱۸. تجزیه و تحلیل آنالیز گرموزن‌سنجی (a, b) REF و نوع X ژئولیت/POSS ($0.31-1.25 \text{ phr}$) و P-PVC (c, d) و فرمول‌بندی REF و HTLC/POSS P-PVC در محدوده ترکیبی $0.62-5 \text{ phr}$ در شرایط رمپ (a, c) و هم‌دما (b, d) [۶۲].

Figure 18. TGA analyses of (a, b) REF and X-type zeolite/POSS (0.31–1.25 phr); (c, d) P-PVC and of REF and HTLC/POSS P-PVC formulations in the compositional range 0.62–5 phr in ramp (a, c) and isothermal conditions (b, d) [62].

1. Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS)

2. Hydrotalcites

3. Parts Per Hundred Parts of Resin



ادامه) شکل ۱۸. تجزیه و تحلیل آنالیز گرموزن سنجی (a, b) REF و نوع X زئولیت / POSS (۰/۳۱-۰/۲۵) و فرمول بندی (c, d) P-PVC و HTLC/POSS در محدوده ترکیبی ۰/۶۲-۰/۵ در شرایط رمپ (a, c) و همدم (b, d) [۶۲].

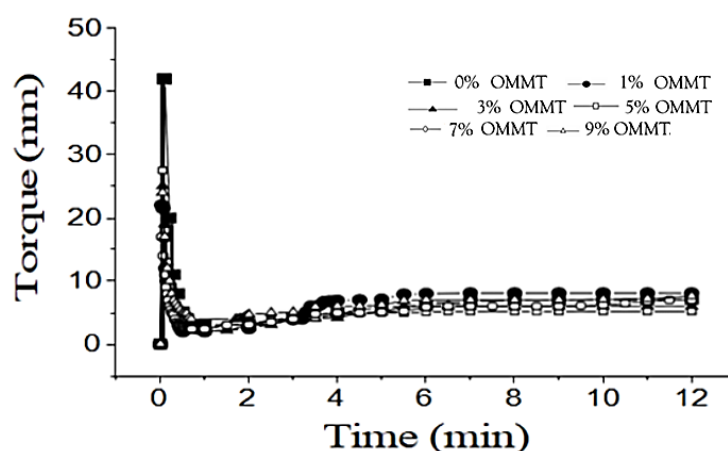
Figure 18. TGA analyses of (a, b) REF and X-type zeolite/POSS (0.31–1.25 phr); (c, d) P-PVC and of REF and HTLC/POSS P-PVC formulations in the compositional range 0.62–5 phr in ramp (a, c) and isothermal conditions (b, d) [62].

وزنی بود از ۰/۱ درصد وزنی تجاوز نکرد. آزمایش رئولوژیکی نشان داد که افزودن خاک رس، گران روی مذاب ترکیب نانوکامپوزیت PVC/OMMT را افزایش نداده است. شکل (۱۹) پلاستوگرام نانوکامپوزیت‌های PVC خالص و PVC/Organoclay را در آزمایش ایشان نشان می‌دهد و نتایج مربوط به آن‌ها در جدول (۳) خلاصه شده است. از شکل (۱) و جدول (۳) می‌توان استنباط کرد که ترکیب خاک رس باعث افزایش اختلاف MH و MH-ML شده است، در حالی که ML در کل ثابت می‌ماند (تقریباً ۳ dN.m). همان‌طور که در شکل پیداست، برای همه فرمول‌ها، ورود خاک رس آلی به ترکیب PVC/Organoclay باعث افزایش گشتاور در حالت پایدار نشده است.

۲-۳ بررسی اثر نانوذرات خاک رس بر روی خواص

دی الکتریک پی‌وی‌سی

بنجدادو [۶۴] اثر نانوذرات خاک رس را بر روی خواص نانوکامپوزیت خاک رس آلی-پی‌وی‌سی بررسی کرد. در این آزمایش، ترکیب نانوکامپوزیت به دست آمده بر پایه خاک رس ارگانیک و بسپار پی‌وی‌سی با درصدهای مختلف نانوذرات خاک رس و پی‌وی‌سی، با اختلاط مذاب تهیه شد. نتایج، بهبود جزئی را در خواص مکانیکی مخلوط (استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست) زمانی که مقدار خاک رس آلی ۱ درصد وزنی بود، نشان داد. پایداری حرارتی (آزمایش کلرزدایی) زمانی به حداکثر رسید که غلظت خاک رس آلی برابر با ۱ درصد وزنی بود. هم‌چنین مطالعه جذب آب نشان داد که مقدار آب جذب شده زمانی که غلظت خاک رس آلی ۱/۵ درصد



شکل ۱۹. نمودارهای گشتاور در مقابل زمان پی‌وی‌سی خام و کامپوزیت‌های آن با درصد خاک رس‌های مختلف.

Figure 19. Torque vs time of pure PVC and its composites with different clay percentages.

جدول ۳. گشتاور بیشینه، گشتاور کمینه، اختلاف گشتاور و گشتاور تعادل یافته در مقابل زمان برای مخلوط PP/NR (90/10) و نانوکامپوزیت‌های آن [۶۴].

Table 3. Torque maximum (MH), Torque minimum (ML), torque difference (MH-ML) and Balanced Torque (BT) vs. time for PP/NR (90/10) blend and its nanocomposites [64].

Organoclay content (phr)	MH (dN.m)	ML (dN.m)	MH-ML (dN.m)	BT (dN.m)
0	16.5	2.5	14	7
1	22	2	20	8
3	24	4	20	7.5
5	25	2.5	22.5	6
7	27.5	2.5	25	5.5
9	42	2.9	39.1	7

PP/NR =Pure PVC/Nano Reinforcement

هم چنین نتایج اندازه‌گیری‌های خاصیت جذب آب کامپوزیت در این مطالعه [۶۴] در جدول (۴) نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فرمول‌بندی حاوی ۱/۵ درصد وزنی خاک رس بالاترین میزان جذب آب را با ۰/۱ درصد ارائه می‌دهد. افزایش جذب آب با افزایش محتوای خاک رس را می‌توان با تجمع ذرات آلی خاک رس توضیح داد. تشکیل و افزایش این آگلومره‌های آلی خاک رس نفوذ حلال (آب) را تسهیل می‌کند و در نتیجه اثر جذب آن را افزایش می‌دهد. میزان جذب آب در این مطالعه [۶۴] به شرح زیر حساب شد:

$$\text{water uptake rate} = \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \times 100\% \quad (5)$$

که در آن W_2 وزن نمونه مرطوب و W_1 وزن نمونه خشک است.

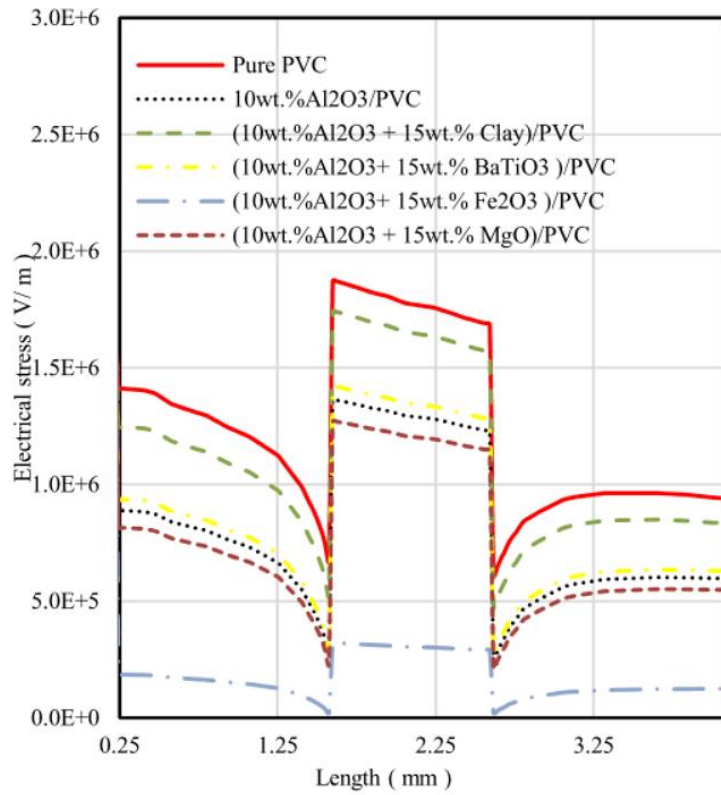
جدول ۴. خواص مقاومت در برابر آب (اندازه‌گیری شده در آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۳ روز) نانوکامپوزیت‌های PVC و PVC/Organoclay تمیز [۶۴].

Table 4. Water resistance properties (measured in water at 25°C for 3 days) of neat PVC and PVC/Organoclay nanocomposites [64].

Organoclay content (%)	Water uptake rate (wt %)
0	0.018
0.5	0.036
0.75	0.053
1	0.073
1.25	0.083
1.5	0.1

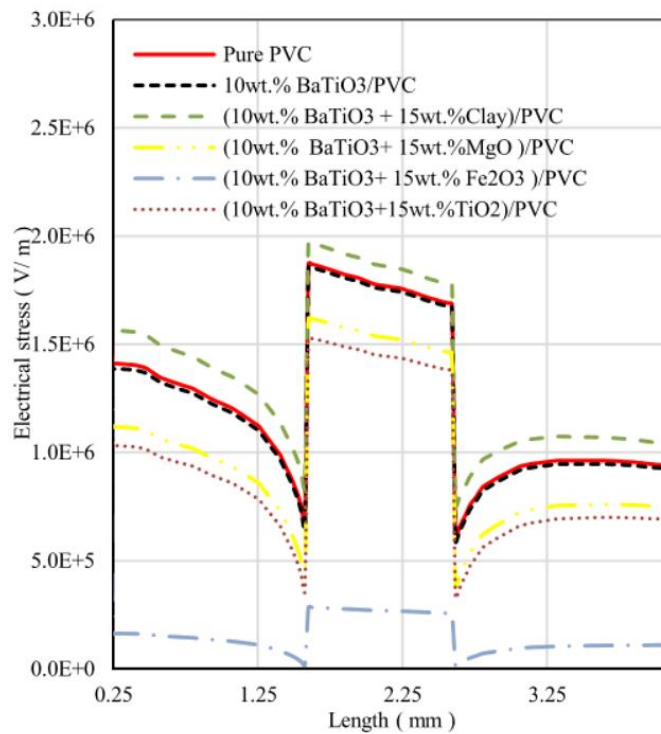
در رابطه با کامپوزیت خاک رس و پی‌وی‌سی در بررسی دیگر اثر درصد‌های وزنی مختلف کامپوزیت نانوذرات باریم تیتانات، اکسید آلومینیوم، اکسید منیزیم و اکسید آهن با خاک رس و پی‌وی‌سی بر روی افزایش توزیع میدان الکتروستاتیکی در کابل‌های توان تک‌هسته‌ای و سه‌هسته‌ای در حضور فضای خالی هوا، آب و ناخالصی‌های مس با روش المان محدود به دست‌تابت و همکاران [۶۵] انجام شد و نتایج آن در شکل‌های ۲۰-۲۲ ارائه شده‌است. شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) رفتار تنش الکتریکی را در انواع مواد عایق پلی‌وینیل کلرید خالص و نانوکامپوزیت‌ها در صورت وجود

فضای خالی هوا نشان می‌دهد. مشاهده شده‌است که افزودن غلظت نانوذرات (10wt.% Al₂O₃+15wt.% Fe₂O₃) به پلی‌وینیل کلراید، توزیع میدان الکتریکی را حدود ۸۲/۹٪ در داخل فضای خالی هوا کاهش می‌دهد و به دلیل تأثیر ثابت دی‌الکتریک بالای نانوذرات Al₂O₃ و Fe₂O₃، توزیع میدان الکتریکی در داخل عایق کابل برق را حدود ۸۶/۸ درصد کاهش می‌دهد. از طرف دیگر مشاهده شده‌است که افزودن غلظت نانوذرات (۱۰ درصد وزنی Al₂O₃ و ۱۵ درصد وزنی خاک رس) به پلی‌وینیل کلراید، توزیع میدان الکتریکی را حدود ۶/۹۵ درصد در فضای خالی هوا کاهش می‌دهد. و توزیع میدان الکتریکی در داخل عایق کابل برق را به دلیل اثر ثابت دی‌الکتریک پایین نانوذرات رس حدود ۱۱/۴ درصد کاهش می‌دهد و سایر توزیع‌های الکتریکی کامپوزیت بین آن‌ها همان‌طور که در شکل (۲۰) آمده، درجه‌بندی می‌شوند. علاوه بر این، مشاهده شده‌است که افزودن غلظت (10wt.% BaTiO₃+15wt.% Fe₂O₃) نانوذرات به پلی‌وینیل کلراید، توزیع میدان الکتریکی را حدود ۸۴/۸٪ در داخل فضای خالی هوا کاهش می‌دهد و به دلیل تأثیر ثابت دی‌الکتریک بالای نانوذرات Fe₂O₃، توزیع میدان الکتریکی در داخل عایق کابل برق را حدود ۸۸/۴ درصد کم می‌کند. از طرف دیگر، مشاهده شده‌است که افزودن غلظت نانوذرات (۱۰ درصد وزنی BaTiO₃ و ۱۵ درصد وزنی خاک رس) به پلی‌وینیل کلراید، توزیع میدان الکتریکی را حدود ۵/۳۴ درصد در فضای خالی هوا افزایش می‌دهد و توزیع میدان الکتریکی در داخل عایق کابل برق را به دلیل تأثیر ثابت دی‌الکتریک پایین نانوذرات BaTiO₃ و خاک رس حدود ۱۰/۶ درصد بالا می‌برد. سایر توزیع‌های الکتریکی کامپوزیت بین آن‌ها همان‌طور که در شکل (۲۱) نشان داده شده، درجه‌بندی شده‌است. در نهایت، مشاهده شد که افزودن غلظت نانوذرات (10wt.% Clay+15wt.% Fe₂O₃) به پلی‌وینیل کلراید، توزیع میدان الکتریکی را حدود ۸۵/۱ درصد در داخل فضای خالی هوا کاهش می‌دهد و به دلیل تأثیر ثابت دی‌الکتریک بالای نانوذرات Fe₂O₃، توزیع میدان الکتریکی در داخل عایق کابل برق را حدود ۸۸/۷ درصد کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، مشاهده شده که افزودن غلظت نانوذرات (۱۰ درصد وزنی خاک رس به علاوه ۱۵ درصد وزنی BaTiO₃) به پلی‌وینیل کلراید، توزیع میدان الکتریکی را حدود ۲/۱۳ درصد در فضای خالی هوا افزایش می‌دهد و به دلیل اثر ثابت دی‌الکتریک



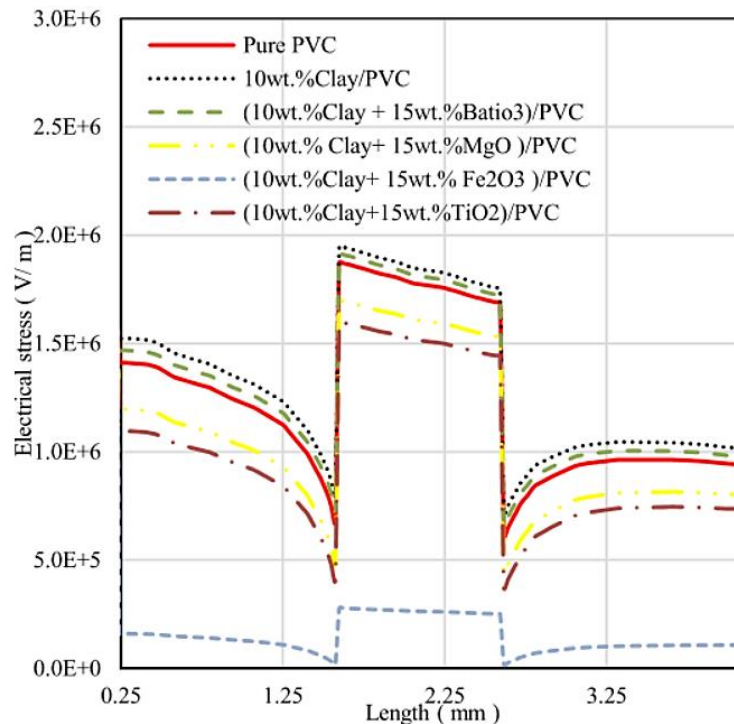
شکل ۲۰. توزیع میدان الکتریکی در عایق کاری کابل با حضور فضای خالی هوا درصدهای وزنی مختلف اکسید فلزات و خاک رس.

Figure 20. Electric field distribution in cable insulation with air void in different percentages of metal oxides and caly.



شکل ۲۱. توزیع میدان الکتریکی در عایق کاری کابل با حضور فضای خالی هوا درصدهای وزنی مختلف اکسید فلزات و خاک رس.

Figure 21. Electric field distribution in cable insulation PVC with air void in different percentages of metal oxides and caly.



شکل ۲۲. توزیع میدان الکتریکی در عایق کاری کابل باحضور فضای خالی هوا درصدهای وزنی مختلف اکسید فلزات و خاک رس.

Figure 22. Electric field distribution in cable insulation with air void in different percentages of metal oxides and caly.

جمع‌آوری شده در این مطالعه نشان دادند که خواص دی‌الکتریک PVC با ترکیب نانوذرات اکسید فلزات، به‌ویژه آن‌هایی که از نظر شیمیایی عامل دار شده‌اند، بهبود یافته‌است. هم چنین استحکام شکست ac با افزودن نانوذرات اکسید فلزات عامل دار به ماتریس PVC بیش از نانوکامپوزیت‌های غیر عاملی افزایش پیدا کرده‌است. علاوه بر این، نتایج این مطالعات نشان داد که عامل دار شدن شیمیایی نانوذرات اکسید فلزات نقش مهمی در بهبود پیوند شیمیایی بین نانوذرات و زنجیره‌های بسپاری ایفا می‌کند که به‌نوبه خود ویژگی عایق الکتریکی PVC را بهبود می‌بخشد.

پایین نانوذرات BaTiO₃ و خاک رس، توزیع میدان الکتریکی در داخل عایق کابل برق را حدود ۴/۲۵ درصد بیشتر می‌کند. سایر توزیع‌های الکتریکی کامپوزیت بین آن‌ها همان‌طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده، درجه بندی می‌شود. بنابراین افزایش غلظت نانوذرات Fe₂O₃ باعث کاهش توزیع میدان الکتریکی در فضای خالی هوا می‌شود؛ بنابراین رفتارهای متفاوتی نسبت به عملکرد تنش الکتریکی در صورت افزودن چندین نانوذرات داخل پلی‌وینیل کلراید مشاهده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری کلی

امروزه افزایش خواص دی‌الکتریک مواد عایق مورد استفاده در کابل‌ها به‌منظور طراحی سامانه‌های عایق جدید که می‌توانند سطوح ولتاژ بالاتر را تحمل کنند، ضروری شده‌است. نانودی‌الکتریک‌ها مواد نانوکامپوزیتی هستند که کسرهای وزنی متعددی از ذرات معدنی با ابعاد نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) دارند. مطالعه حاضر به بررسی بهبود خواص دی‌الکتریک پلی‌وینیل کلراید به‌دلیل درج نانوذرات اکسید فلزات عامل دار شیمیایی پرداخته‌است. بررسی نتایج مقالات

مراجع

- [1] Hashemi, R. (2016). On the overall viscoelastic behavior of graphene/polymer nanocomposites with imperfect interface, *International Journal of Engineering Science*, 105, 38-55.
- [2] Daneshfar, Z. (2022). Study of thermal degradation mechanisms and stability in poly (vinyl chloride), *Iranian Chemical Engineering Journal*, Article in press, Octobr.
- [3] Liu, Z. (2015). Ultra-high voltage AC/DC grids. Elsevier Inc., Electric Power Press, China, 1-737.

- [4] Okba, M. H., Saied, M. H., Mostafa, M., & Abdel-Moneim, T. (2012). High voltage direct current transmission-A review, part I, *2012 IEEE energytech*. IEEE.
- [5] Chen, G., Hao, M., Xu, Z., Vaughan, A., Cao, J., & Wang, H. (2015). Review of high voltage direct current cables, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 1, 9-21.
- [6] Arora, R., & Mosch, W. (2022). High voltage and electrical insulation engineering. John Wiley & Sons.
- [7] Barber, K., & Alexander, G. (2013). Insulation of electrical cables over the past 50 years, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 29, 27-32.
- [8] Titow, M. (1984). PVC technology. fourth edition, Elsevier Applied Science Publisher, London, 6-12.
- [9] Darvishi, R., Esfahany, M. -N, & Bagheri, R. (2016). Simulation of Primary Particle Stability in PVC Suspension Polymerization, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 15, 76-89, [In Persian].
- [10] Lau, K., Vaughan, A., & Chen, G. (2015). Nanodielectrics: opportunities and challenges, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 31, 45-54.
- [11] Tanaka, T., Montanari, G., & Mulhaupt, R. (2004). Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11, 763-784.
- [12] Nelson, J. K., Fothergill, J. C., Dissado, L. A., & Peasgood, W. (2002). Towards an understanding of nanometric dielectrics, *Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena*. IEEE.
- [13] Amin, M., & Ali, M. (2015). Polymer nanocomposites for high voltage outdoor insulation applications, *Reviews on Advanced Materials Science*, 40, 276-294.
- [14] Tanaka, T., & Imai, T. (2013). Advances in nanodielectric materials over the past 50 years, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 29, 10-23.
- [15] Tanaka, T. (2005). Dielectric nanocomposites with insulating properties, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12, 914-928.
- [16] Ahmed, H. M., Windham, A. D., Al-Ejji, M. M., Al-Qahtani, N. H., Hassan, M. K., Mauritz, K. A., Buchanan, R. K., & Buchanan, J. P. (2015). Preparation and preliminary dielectric characterization of structured C60-Thiol-Ene polymer nanocomposites assembled using the Thiol-Ene click reaction, *Materials*, 8, 7795-7804.
- [17] J. P. Runt, J. J. F. (1997). Dielectric Spectroscopy of Polymeric Materials: Fundamentals and Applications. American Chemical Society Press., Washington, DC.
- [18] Kurimoto, M, O. H., Kato, K, Hanai, M, Hoshina, Y, & Takei, M. N, H. (2010). Dielectric properties of epoxy/alumina nano-composite influenced by control of micrometric agglomerates, *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* IEEE.
- [19] Tian, F., Lei, Q., Wang, X., & Wang, Y. (2012). Investigation of electrical properties of LDPE/ZnO nanocomposite dielectrics, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19, 763-769.
- [20] Velayutham, T., Abd Majid, W. H., Gan, W., Khorsand Zak, A., & Gan, S. (2012). Theoretical and experimental approach on dielectric properties of ZnO nanoparticles and polyurethane/ZnO nanocomposites, *Journal of Applied Physics*, 112, 054106.
- [21] Singha, S., & Thomas, M. J. (2009). Influence of filler loading on dielectric properties of epoxy-ZnO nanocomposites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16, 531-542.
- [22] Madani, L., Belkhir, K. S., & Belkhiat, S. (2020). Experimental study of electric and dielectric behavior of PVC composites, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10, 5233-5236.
- [23] Abdel-Gawad, N. M., El Dein, A. Z., Mansour, D. E. A., Ahmed, H. M., Darwish, M. M., & Lehtonen, M. (2020). PVC nanocomposites for cable insulation with enhanced dielectric properties, partial discharge resistance and mechanical performance, *High Voltage*, 5, 463-471.
- [24] Tanaka, T., Matsunawa, A., Ohki, Y., Kozako, M., Kohtoh, M., & Okabe, S. (2006). Treeing phenomena in epoxy/alumina nanocomposite and interpretation by a multi-core model, *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, 126, 1128-1135.
- [25] Mansour, S. A., Elsad, R., & Izzularab, M. (2016). Dielectric properties enhancement of PVC nanodielectrics based on synthesized ZnO nanoparticles, *Journal of Polymer Research*, 23, 1-8.
- [26] Mansour, S. A., Yahia, I., & Yakuphanoglu, F. (2010). The electrical conductivity and dielectric properties of CI Basic Violet 10, *Dyes and Pigments*, 87, 144-148.
- [27] Mansour, S. A., Yahia, I., & Sakr, G. (2010). Electrical conductivity and dielectric relaxation behavior of fluorescein sodium salt (FSS), *Solid State Communications*, 150, 1386-1391.
- [28] Tuncer, E., Sauers, I., James, D. R., Ellis, A. R., Paranthaman, M. P., Aytuğ, T., Sathyamurthy, S., More, K. L., Li, J., & Goyal, A. (2006). Electrical properties of epoxy resin based nano-composites, *Nanotechnology*, 18, 025703.
- [29] Ciuprina, F., Plesa, I., Notinger, P. V., Tudorache, T., & Panaitescu, D. (2008). Dielectric properties of nanodielectrics with inorganic fillers, *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE.

- [30] Singha, S., & Thomas, M. J. (2008). Dielectric properties of epoxy nanocomposites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15, 12-23.
- [31] Nelson, J., & Hu, Y. (2005). Nanocomposite dielectrics—properties and implications, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, 213.
- [32] Khattak, A., Alahmadi, A. A., Ishida, H., & Ullah, N. (2023). Improved PVC/ZnO Nanocomposite Insulation for High Voltage and High Temperature Applications, *Scientific reports*, 13, 7235.
- [33] Habashy, M. M., Abd-Elhady, A. M., Elsad, R., & Izzularab, M. A. (2021). Performance of PVC/SiO₂ nanocomposites under thermal ageing, *Applied Nanoscience*, 11, 2143-2151.
- [34] Liu, D., Pourrahimi, A. M., Olsson, R. T., Hedenqvist, M., & Gedde, U. (2015). Influence of nanoparticle surface treatment on particle dispersion and interfacial adhesion in low-density polyethylene/aluminium oxide nanocomposites, *European Polymer Journal*, 66, 67-77.
- [35] Toor, A., & Pisano, A. P. (2015). Gold nanoparticle/PVDF polymer composite with improved particle dispersion, *IEEE 15th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*. IEEE.
- [36] Rosen, M. J., & Kunjappu, J. T. (2012). Surfactants and interfacial phenomena. John Wiley & Sons.
- [37] Ahn, S. H., Kim, S. H., & Lee, S. G. (2004). Surface-modified silica nanoparticle-reinforced poly (ethylene 2, 6-naphthalate), *Journal of applied polymer science*, 94, 812-818.
- [38] Mansour, D.-E. A., Elsaheed, A. M., & Izzularab, M. A. (2016). The role of interfacial zone in dielectric properties of transformer oil-based nanofluids, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23, 3364-3372.
- [39] Pitsa, D., & Danikas, M. G. (2011). Interfaces features in polymer nanocomposites: A review of proposed models, *Nano*, 6, 497-508.
- [40] Roy, M., Nelson, J., MacCrone, R., Schadler, L. S., Reed, C., & Keefe, R. (2005). Polymer nanocomposite dielectrics-the role of the interface, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12, 629-643.
- [41] Sugumaran, C. P. (2015). Experimental study on dielectric and mechanical properties of PVC cable insulation with SiO₂/CaCO₃ nanofillers, *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. IEEE.
- [42] Khodaparast, P., & Ounaies, Z. (2013). On the impact of functionalization and thermal treatment on dielectric behavior of low content TiO₂ PVDF nanocomposites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20, 166-167.
- [43] Peng, S., He, J., Hu, J., Huang, X., & Jiang, P. (2015). Influence of functionalized MgO nanoparticles on electrical properties of polyethylene nanocomposites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22, 1512-1519.
- [44] Abdel-Gawad, N. M., Mansour, D. -E. A., El Dein, A. Z., Ahmed, H. M., & Darwish, M. (2016). Effect of functionalized TiO₂ nanoparticles on dielectric properties of PVC nanocomposites used in electrical insulating cables, *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. IEEE.
- [45] Abdel-Gawad, N. M., El Dein, A. Z., Mansour, D. -E. A., Ahmed, H. M., Darwish, M., & Lehtonen, M. (2018). Multiple enhancement of PVC cable insulation using functionalized SiO₂ nanoparticles based nanocomposites, *Electric Power Systems Research*, 163, 612-625.
- [46] Chun, H., Yizhong, W., & Hongxiao, T. (2001). Preparation and characterization of surface bond-conjugated TiO₂/SiO₂ and photocatalysis for azo dyes, *Applied Catalysis B: Environmental*, 30, 277-285.
- [47] Van Hai Le, C. N. H., & Thuc, H. H. T. (2013). Synthesis of silica nanoparticles from Vietnamese rice husk by sol-gel method, *Nanoscale Research Letters*, 8, 58.
- [48] ASTM D149-20 (2013). Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies, ASTM.
- [49] D882, A. S., (2001). Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. American Society for Testing and Materials Philadelphia, PA, 162-170.
- [50] Moustafa, H., & Darwish, N. (2015). Effect of different types and loadings of modified nanoclay on mechanical properties and adhesion strength of EPDM-g-MAH/nylon 66 systems, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 61, 15-22.
- [51] Paul, D. R., & Robeson, L. M. (2008). Polymer nanotechnology: nanocomposites, *Polymer*, 49, 3187-3204.
- [52] Weng, G. (1984). Some elastic properties of reinforced solids, with special reference to isotropic ones containing spherical inclusions, *International Journal of Engineering Science*, 22, 845-856.
- [53] Yu, Q., & Selvadurai, A. (2005). Mechanical behaviour of a plasticized PVC subjected to ethanol exposure, *Polymer degradation and stability*, 89, 109-124.
- [54] Pita, V. J., Sampaio, E., & Monteiro, E. E. (2002). Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing, *Polymer Testing*, 21, 545-550.

- [55] Kremer, F., & Schönhal, A. (2002). Broadband dielectric spectroscopy. Springer Science & Business Media.
- [56] Smyth, C. P. (1955). Dielectric behavior and structure, *McGraw Hill, New York*, 53.
- [57] Akram, M., Javed, A., & Rizvi, T. Z. (2005). Dielectric properties of industrial polymer composite materials, *Turkish Journal of Physics*, 29, 355-362.
- [58] Kannurpatti, A. R., & Bowman, C. N. (1998). Structural evolution of dimethacrylate networks studied by dielectric spectroscopy, *Macromolecules*, 31, 3311-3316.
- [59] Ahmed, H. M., Hassan, M. K., Mauritz, K. A., Bunkley, S. L., Buchanan, R. K., & Buchanan, J. P. (2014). Dielectric properties of C60 and Sc3N@ C80 fullerenol containing polyurethane nanocomposites, *Journal of applied polymer science*, 131.
- [60] Bidsorkhi, H. C., D'Aloia, A. G., De Bellis, G., Proietti, A., Rinaldi, A., Fortunato, M., Ballirano, P., Bracciale, M. P., Santarelli, M. L., & Sarto, M. S. (2017). Nucleation effect of unmodified graphene nanoplatelets on PVDF/GNP film composites, *Materials Today Communications*, 11, 163-173.
- [61] Li, Q., Xue, Q., Hao, L., Gao, X., & Zheng, Q. (2008). Large dielectric constant of the chemically functionalized carbon nanotube/polymer composites, *Composites Science and Technology*, 68, 2290-2296.
- [62] Palin, L., Rombolà, G., Milanese, M., & Boccaleri, E. (2019). The use of POSS-based nanoadditives for cable-grade PVC: Effects on its thermal stability, *Polymers*, 11, 1105.
- [63] Grossman, R. F. (2000). Acid absorbers as PVC costabilizers, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 6, 4-6.
- [64] Bendjaouahdou, C. (2022). Characterization and Properties of Poly Vinyl Chloride (PVC)/Organoclay Nanocomposites, *Journal of Physical Chemistry & Biophysics*, 12, 1-4.
- [65] Fouad, M., Thabet, A., Ahmed, A. -M., & Elnodi, A. (2021). High Performance of Power Cables Using Nanocomposites Insulation Materials, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, 9, 8-21.