

## چکیده

استفاده از توزیع تجمعی فاز ثانویه در کامپوزیت یکی از راه‌های موثر برای کاهش آستانه نفوذ الکتریکی، افزایش رسانایی و بهبود محافظت ماده در برابر امواج الکترومغناطیس می‌باشد. در این پژوهش از فرآیند اختلاط مکانیکی و پرس گرم برای ساخت کامپوزیت‌های پلی اتیلن/کربن سیاه، با توزیع تجمعی و تصادفی استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی نشان داد که در طی فرایند اختلاط مکانیکی، پوشش‌دهی پلیمر با کربن سیاه به خوبی انجام شده است. در نمونه حاوی ۲ درصد وزنی کربن سیاه با ایجاد ساختار تجمعی رسانایی الکتریکی نسبت به ساختار تصادفی، حدود ۳۰۰۰ برابر افزایش یافت. با استفاده از آزمون تحلیلگر شبکه برداری مشاهده شد با افزایش میزان کربن سیاه از ۲ به ۵ درصد وزنی، بیشینه میزان محافظت الکترومغناطیس کامپوزیت از 6 dB به 16 dB افزایش یافته است.

**کلمات کلیدی:** کامپوزیت زمینه پلیمری رسانا، محافظت الکترومغناطیس، رسانایی الکتریکی، توزیع تجمعی،

کربن سیاه

## **Effect of Carbon Black Distribution on Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Polyethylene composite**

The application of conductive particles with segregated distribution in the polymeric matrices is one of the most effective ways to reduce percolation threshold, increase conductivity, and improve EMI shielding properties. In this study, mechanical mixing and hot compression molding were used to fabricate polyethylene/carbon black composite with segregate and random distributions. Microscopic images showed that during the mechanical mixing process, the polymeric granules were well coated with carbon black. The electrical conductivity of segregated structure composite ( 2 wt% carbon black) increased about 3000 times compared to the

random structure(2%wt carbon black). Using the vector network analyzer, it was revealed that by increasing the black carbon content from 2 to 5 wt%, the maximum EMI shielding effectiveness of the composite increased from 6 dB to 16 dB, respectively.

Key words:

Conductive polymer composite, conductive property, segregated structure, carbon black, Electromagnetic Interference Shielding Properties.

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری رسانا به دلیل کاربردهای فراوان مانند استفاده به عنوان محافظ در برابر امواج الکترومغناطیس، باتری‌ها، پوشش‌های ضد الکتروسیسته ساکن، حسگرهای الکتروشیمی و سنسورها توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده اند [۴-۱]. رسانایی الکتریکی قابل تنظیم، مقاومت در برابر خوردگی همراه با چگالی کم باعث شده تا این دسته از مواد در حوزه‌های کاربردی مختلف مورد استفاده قرار گیرند [۵]. از طرفی با گسترش وسایل الکترونیکی و مخابراتی در دهه‌های اخیر، تداخل الکترومغناطیس به مشکلی جدی تبدیل شده است که می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد قطعات الکترونیکی شود. ضمن اینکه قرار گرفتن در معرض این امواج در بلند مدت تهدیدی جدی برای سلامت انسان‌ها محسوب می‌شود. به همین دلیل طراحی و توسعه مواد محافظ الکترومغناطیس ضروری به نظر می‌رسد. روند رو به رشد مطالعات در این حوزه را می‌توان با مقایسه تعداد مقالات منتشر شده در حوزه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری محافظ الکترومغناطیس در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ مشاهده کرد. در سال ۲۰۲۰ حدود ۲۵۰ مقاله در این حوزه منتشر شده است که اهمیت این دسته از کامپوزیت‌ها را به عنوان محافظ الکترومغناطیس نشان می‌دهد [۶].

پلیمرها معمولاً رسانایی الکتریکی بسیار ضعیفی دارند. هنگامی که تقویت‌کننده رسانا به میزان مشخصی به زمینه پلیمری افزوده شود، در کامپوزیت زمینه پلیمری رسانایی الکتریکی ایجاد می‌شود. با افزایش رسانایی الکتریکی ساختار، میزان محافظت کامپوزیت در برابر امواج الکترومغناطیس افزایش می‌یابد [۱]. در کامپوزیت‌های زمینه رسانا (CPC)<sup>۱</sup> فازهای مختلفی را می‌توان به عنوان تقویت‌کننده به کار برد. تقویت‌کننده‌های فلزی به دلیل رسانایی الکتریکی ذاتی بالا از ترکیبات بسیار جذاب در ساخت کامپوزیت‌های رسانا برشمرده می‌شوند؛ اما چگالی قابل توجه و مشکلات مربوط به فرآوری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با مواد فلزی استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند [۷]. مواد پایه کربنی از جمله رایج‌ترین تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری رسانا هستند.

---

<sup>۱</sup> Conductive Polymer Composites

در این میان نانولوله‌های کربنی با نسبت ابعادی و سطح ویژه بالا و نیز خواص الکتریکی و مکانیکی عالی بسیار مورد توجه محققان بوده است. گرافن نیز از دیگر آلوتروپ‌های کربن است که علاوه بر رسانایی الکتریکی، خواص مکانیکی و حرارتی پلیمر را افزایش می‌دهد. مدول یانگ ۱ TPa و رسانایی ۶۰۰۰ S/cm و سطح ویژه  $m^2g^{-1}$  ۲۶۳۰ موجب انجام پژوهش‌های بسیاری پیرامون کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با گرافن شده است. با این وجود، هزینه قابل توجه فرآوری، استفاده از گرافن و نانولوله کربنی را در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی رسانا محدود نموده است. یکی دیگر از مواد پایه کربنی، کربن سیاه است که معمولاً به عنوان تقویت‌کننده در لاستیک، رنگ در پلاستیک‌ها و فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های رسانا کاربرد دارد. رسانایی ذاتی مناسب، پایداری شیمیایی مطلوب و هزینه کم سبب شده تا کربن سیاه کاربری زیادی در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری داشته باشد [۲، ۳، ۸-۱۱].

در کامپوزیت‌های با توزیع تصادفی فاز رسانا، معمولاً بایستی مقدار قابل توجهی از فاز رسانا به پلیمر افزوده شود تا رسانایی الکتریکی مطلوب در ساختار حاصل شود. یکی از چالش‌های ساخت CPC<sup>۱</sup> ها، کاهش آستانه نفوذ (میزان فاز رسانای مورد نیاز برای انتقال عایق/رسانا) است [۱۲]؛ چرا که افزایش میزان فاز رسانا منجر به کاهش خواص مکانیکی و بروز مشکلاتی در فرآوری کامپوزیت می‌شود. ضمن اینکه با توجه به هزینه بیشتر فاز تقویت‌کننده نسبت به زمینه پلیمری، با افزایش میزان فاز رسانا هزینه تولید CPC افزایش می‌یابد. بنابراین ساخت CPC با هدف کاهش مقدار فاز رسانا و با هزینه کم موضوع جذابی برای محققین و صنعتگران است [۸، ۱۳، ۱۴].

محققین از روش‌های مختلفی برای کاهش آستانه نفوذ استفاده می‌کنند. ایجاد ساختار تجمعی یکی از ساده‌ترین و موثرترین روش‌هاست [۱۵]. در کامپوزیت‌های با ساختار تجمعی، فاز رسانا به جای توزیع تصادفی در زمینه، تنها در مرز ذرات پلیمری قرار می‌گیرد. در نتیجه مسیرهای رسانای متراکم زیادی بین ذرات پلیمری ایجاد می‌شود و با افزایش تماس ذرات رسانا با یکدیگر، آستانه نفوذ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با ایجاد ساختار تجمعی، تعداد

---

<sup>۱</sup> Conductive Polymer Composites

زیادی قفس در ساختار به وجود می‌آید که امواج الکترومغناطیس پس از بازتاب‌های متوالی داخل قفس‌ها انرژی خود را از دست داده و میرا می‌شوند. در نتیجه با ایجاد ساختار تجمعی، نه تنها رسانایی الکتریکی کامپوزیت به ازای مقدار مشخصی از تقویت‌کننده افزایش یافته، بلکه میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس نیز بهبود پیدا می‌کند [۱، ۲، ۱۵، ۱۷].

چنگ<sup>۱</sup> و همکارانش به بررسی محافظت الکترومغناطیس و رسانایی کامپوزیت زمینه پلیمری رسانا تقویت شده با نانولوله کربنی و کربن سیاه پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با ایجاد ساختار تجمعی، آستانه نفوذ کم ۰/۰۹ درصد حجمی و رسانایی  $3/33 \text{ S/m}$  قابل حصول است [۸]. در مطالعه دیگر هنگ<sup>۲</sup> و همکارانش، برای ساخت کامپوزیت پلیمری رسانا با توزیع تجمعی، با فناوری لیزر زینترینگ از پلی‌آمید تقویت شده با کربن سیاه به عنوان فاز رسانا استفاده کردند و حد آستانه ۰/۸۷ درصد وزنی در ساختار تجمعی را ایجاد نمودند [۳]. آلام<sup>۳</sup> و همکاران، با استفاده از گرافن و پلی‌پروپیلن کامپوزیت پلیمری با ساختار تجمعی را فراوری و به بیشینه رسانایی  $\text{S/m}$  ۱۰/۸۶ دست یافتند. در این تحقیق با اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی گرافن، میزان محافظت الکترومغناطیس dB ۱۹/۳ حاصل شد [۱۱].

هدف از تحقیق حاضر ساخت کامپوزیت زمینه پلیمری رسانا با استفاده از توزیع تجمعی فاز تقویت‌کننده به منظور بهبود رسانایی الکتریکی و محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس است. به این منظور کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)<sup>۴</sup> و کربن سیاه (CB)<sup>۵</sup> در درصد‌های وزنی مختلف با استفاده از اختلاط مکانیکی و پرس گرم ساخته شد و میزان رسانایی الکتریکی و میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس مورد بررسی قرار گرفت.

---

<sup>۱</sup> Cheng

<sup>۲</sup> Hong

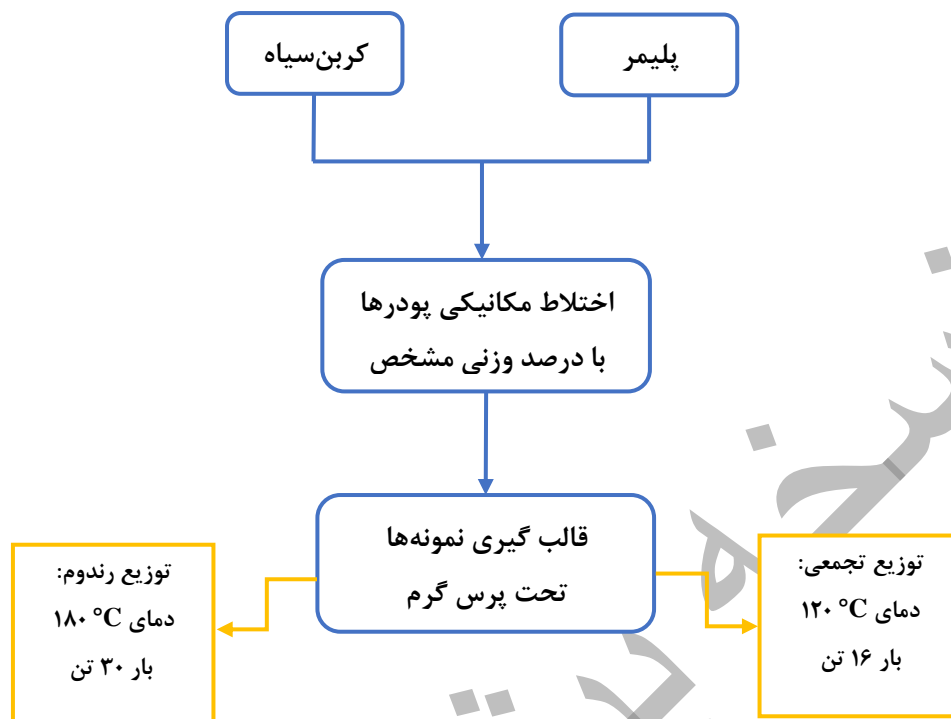
<sup>۳</sup> Alam

<sup>۴</sup> High Density Polyethylene

<sup>۵</sup> Carbon Black

## روش پژوهش

پودر پلیمر با چگالی بالا (Jam Petrochemical Co) و کربن سیاه (Carbon Simorgh Co) به عنوان فاز زمینه و تقویت کننده کامپوزیت پلیمری رسانا انتخاب شدند. در این پژوهش ۲، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی کربن سیاه به پودر پلیمری اضافه شد. به منظور تولید گرانول های کامپوزیتی پلی اتیلن/کربن سیاه، مواد اولیه به مدت ۱۰ دقیقه تحت اختلاط مکانیکی قرار گرفتند. در مرحله نهایی برای ساخت نانو کامپوزیت از پرس گرم استفاده شد. در تولید کامپوزیت هایی با ساختار تجمعی، با افزایش دما و رسیدن به دمای ذوب پلیمر، ویسکوزیته مذاب پلیمری کاهش یافته و باعث نفوذ ذرات رسانا به داخل پلیمر شده و منجر به عدم ایجاد ساختار با توزیع تجمعی می شود. بنابراین نیاز به انتخاب دما قبل از دمای ذوب پلیمر می باشد. در این پژوهش برای ساخت کامپوزیت با ساختار تجمعی، دمای ۱۲۰ °C برای فرآوری کامپوزیت انتخاب گردید. پودرهای قالب گیری شده به مدت ۳ دقیقه در ۱۲۰ °C تحت بار ۱۶ تن قرار گرفت تا کامپوزیت پلیمری با توزیع تجمعی فاز ثانویه حاصل شود. همچنین برای ساخت کامپوزیت های پلیمری با توزیع تصادفی فاز ثانویه، نمونه ها در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد تحت فشار بار ۳۰ تن قرار گرفتند. علت افزایش دما و فشار در نمونه تصادفی، ایجاد شرایط مطلوب برای حصول اطمینان از نفوذ کامل ذرات رسانا به داخل نواحی پلیمری می باشد. خلاصه مراحل آماده سازی و ساخت کامپوزیت در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱. خلاصه مراحل ساخت کامپوزیت با توزیع رندوم و تجمعی.

در جدول ۱، نحوه کدگذاری کامپوزیت‌ها آمده است. کامپوزیت با توزیع تصادفی کربن سیاه با کد r-CB و کامپوزیت‌های با توزیع تجمعی با کد s-CB نام‌گذاری شده اند.

کامپوزیت پلی اتیلن تقویت شده با

کد نمونه	درصد وزنی کربن سیاه	توزیع فاز ثانویه
r-CB2	۲	تصادفی
s-CB2	۲	تجمعی
r-CB5	۵	تصادفی
s-CB5	۵	تجمعی
s-CB7.5	۷/۵	تجمعی
s-CB10	۱۰	تجمعی

جدول ۱. نامگذاری نمونه‌های کربن سیاه

## مشخصه‌یابی

مورفولوژی پودر پلیمر و پودر کامپوزیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)<sup>۱</sup> مدل TESCAN BRNO-LMU با ولتاژ ۱۰ kV بررسی شد. برای مشاهده سطح شکست کامپوزیت، نمونه به مدت ۴۰ دقیقه در نیتروژن مایع قرار گرفته و سپس شکسته شد. برای اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی نمونه‌های کامپوزیتی، از دستگاه پروب چهارسر مجهز به الکترومتر ساخت شرکت Keithley استفاده شد. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه (۱) رسانایی الکتریکی بر حسب زیمنس بر متر (S/m) محاسبه شد [۱۸].

$$\sigma = \frac{1}{Rwt} \quad (1)$$

در این رابطه، مقادیر  $\sigma$ ،  $R$ ،  $w$ ،  $l$  و  $t$  به ترتیب رسانایی، مقاومت الکتریکی، عرض، طول و ضخامت نمونه هستند. برای اندازه‌گیری میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس در باند ایکس (۸-۱۲ گیگاهرتز) از دستگاه تحلیلگر شبکه برداری (VNA)<sup>۲</sup> استفاده شد. مطابق با استاندارد WR90 نمونه‌ها به ابعاد  $10 \times 22/86 \text{ mm}^2$  برش زده شد. بعد از اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی  $S_{11}$ ،  $S_{12}$  و  $S_{21}$ ، میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس با استفاده از روابط ۲ تا ۷ محاسبه گردید [۱۳].

$$R = S_{11}^2 \quad (2)$$

$$T = S_{12}^2 \quad (3)$$

$$A = 1 - R - T \quad (4)$$

<sup>۱</sup> Field Emission Scanning Electron Microscope

<sup>۲</sup> Vector Network Analyzer



پارامترهای  $R$ ،  $A$  و  $T$  به ترتیب کسر توان بازتاب، جذب و عبور موج الکترومغناطیس از نمونه را نشان می‌دهند. با استفاده از روابط ۵-۷ میزان محافظت از طریق مکانیزم بازتاب ( $SE_R$ )، محافظت با مکانیزم جذب ( $SE_A$ ) و میزان محافظت کل ( $SE_{Total}$ ) نمونه محاسبه گردید.

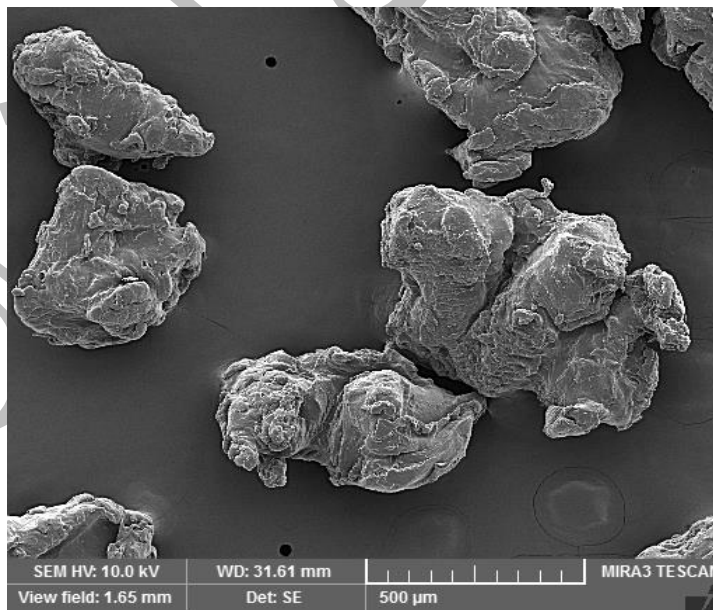
$$SE_R = -10 \text{ Log } (1-R) \quad (5)$$

$$SE_A = -10 \text{ Log } (T/1-R) \quad (6)$$

$$SE_{Total} = SE_R + SE_A \quad (7)$$

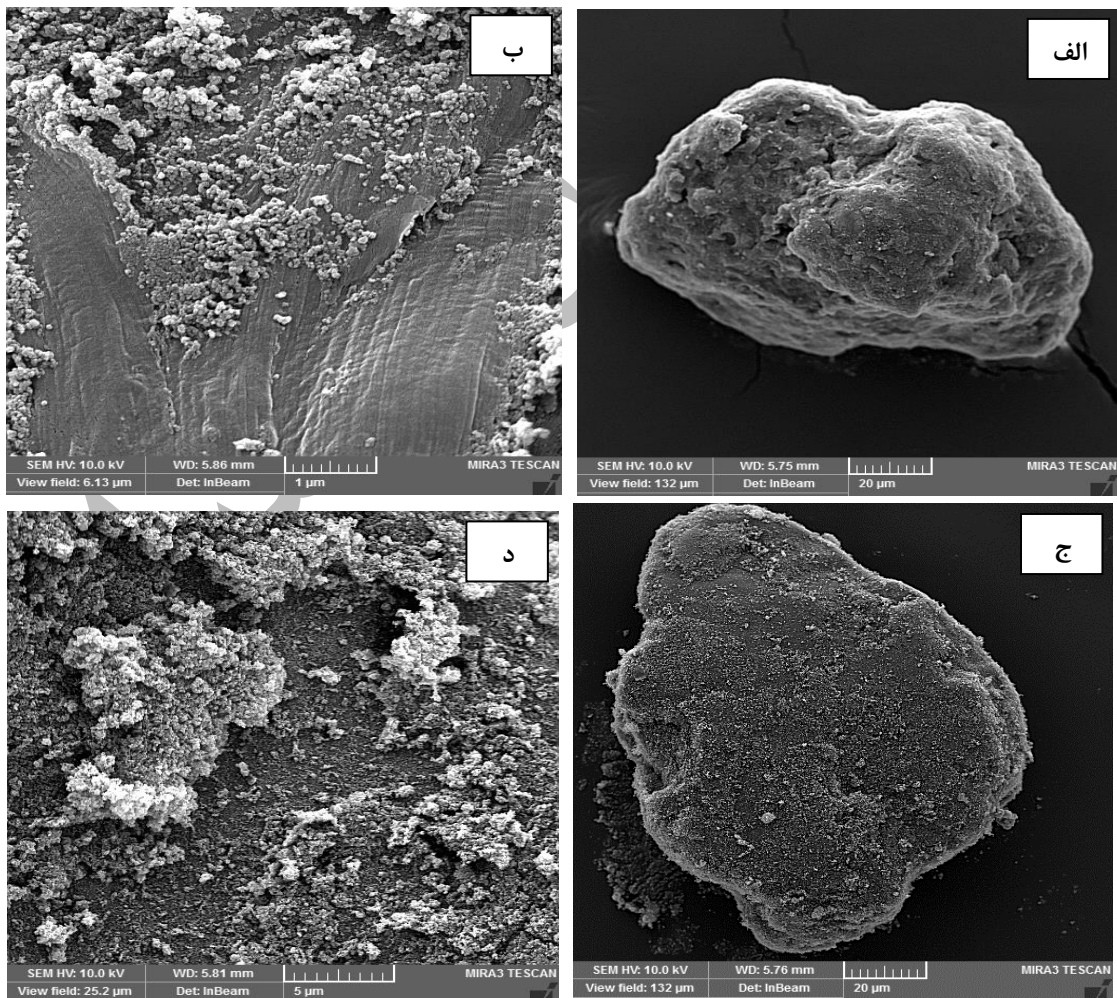
## نتایج و بحث

تصویر مورفولوژی گرانول‌های HDPE اولیه در شکل ۲ آورده شده است. اندازه گرانول‌های پلیمری در بازه ۲۰۰-۵۰۰ میکرون بوده و در سطح گرانول‌ها ناهمواری مشاهده می‌شود. این ناهمواری‌ها برای قرارگیری فاز تقویت‌کننده بر روی سطح گرانول‌ها و ایجاد قفل‌شدگی مکانیکی و بهبود استحکام فصل مشترک مطلوب است.



شکل ۲. تصویر FESEM گرانول‌های HDPE اولیه

شکل ۳ تصویر FESEM از پودر کامپوزیت حاوی ۲ و ۷/۵ درصد کربن سیاه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ قسمت‌های الف و ج مشاهده می‌شود، پس از انجام اختلاط مکانیکی، ابعاد گرانول‌ها به حدود ۸۰ تا ۱۵۰ میکرون رسیده است. با مشاهده قسمت‌های ب و د شکل ۳ می‌توان میزان پوشش‌دهی در دو درصد وزنی مختلف را مقایسه کرد. در پودر کامپوزیت CB-2 ذرات کربن سیاه روی سطح پلیمر قرار گرفته‌اند؛ ولی پوشش‌دهی پلیمر کامل نشده است. اما در پودر کامپوزیت CB-7.5 با افزایش درصد وزنی کربن سیاه، مقدار قابل توجهی از ذرات کربن سیاه بر روی گرانول‌های پلیمری قرار گرفته‌اند که نوید ایجاد شبکه رسانا در مرزهای گرانول‌ها در ساختار تجمعی را می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ قسمت د نشان داده شده است، در بعضی از قسمت‌ها مقدار بیشتری کربن سیاه روی سطح پلیمر تجمع یافته‌اند.



شکل ۳. تصویر FESEM (الف، ب) پودر کامپوزیت s-CB2 و (ج، د) پودر کامپوزیت s-CB7.5

در جدول ۲، نتایج رسانایی الکتریکی نمونه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است. در نمونه r-CB2 افزودن ۲ درصد وزنی کربن سیاه، رسانایی الکتریکی  $0.007 \text{ S/m}$  ایجاد کرده است؛ اما در نمونه s-CB2 با افزودن مقدار مشابه کربن سیاه، رسانایی الکتریکی حدوداً  $3000$  برابر افزایش یافته و به  $20 \text{ S/m}$  رسیده است. این افزایش مقدار رسانایی الکتریکی نشان می‌دهد که در نمونه s-CB2 ساختار تجمعی با موفقیت ایجاد شده است. ذرات کربن سیاه که در مرز گرانول‌های پلیمری قرار گرفته‌اند، مسیرهای رسانا را به وجود آورده و سبب ایجاد شبکه رسانا درون ساختار کامپوزیت شده است. نتیجه ایجاد ساختار مذکور افزایش چشمگیر رسانایی الکتریکی ماده است. همان طور که در جدول ۲ مشخص است، در کامپوزیت‌های با توزیع تجمعی، با افزایش درصد کربن سیاه، رسانایی الکتریکی روند افزایشی را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که در نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی کربن سیاه، رسانایی به  $78 \text{ S/m}$  رسیده است. با افزایش مقدار کربن سیاه، ذرات کربنی بیشتری به پلیمر متصل شده و پوشش همگن‌تری از فاز رسانا بر سطح گرانول‌های پلیمری ایجاد شده است. در نتیجه ضخامت لایه رسانا در مرز گرانول‌ها و رسانایی الکتریکی ساختار افزایش یافته است.

جدول ۱. رسانایی الکتریکی نمونه‌های کامپوزیتی

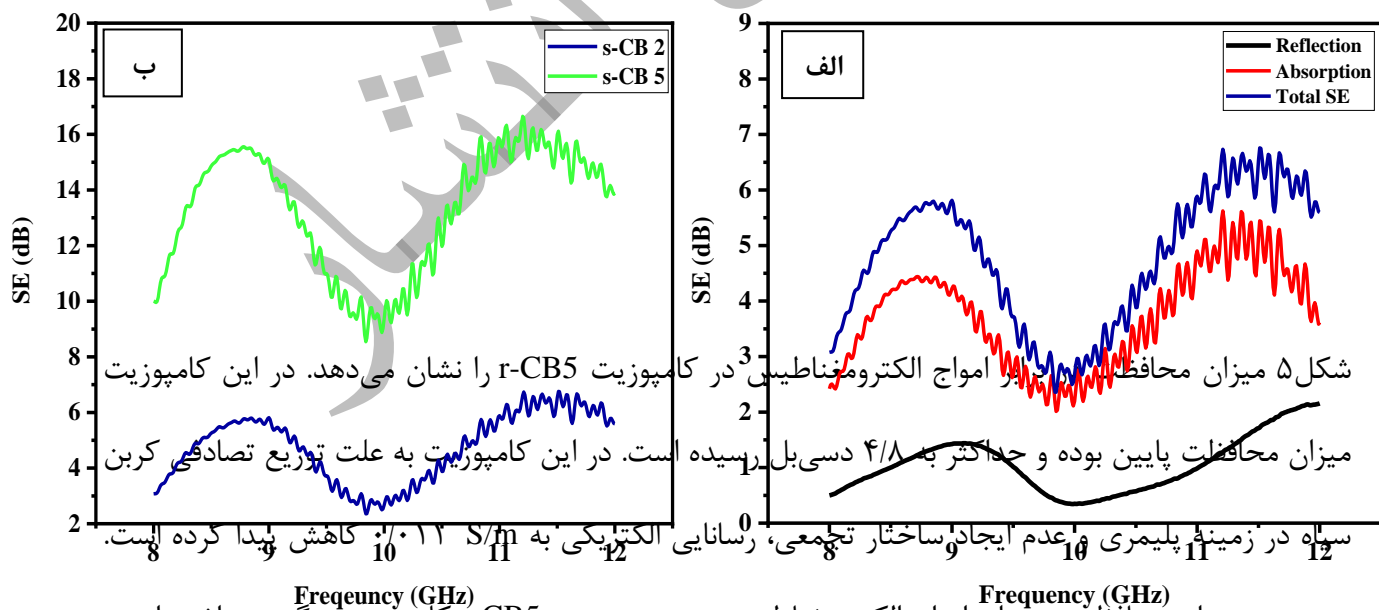
در شکل ۴ میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس دو کامپوزیت s-CB2 و s-CB5 نشان داده شده است.

مکانیزم‌های جذب و بازتاب در	رسانایی الکتریکی (S/m)	کد نمونه	در قسمت الف سهم هریک از
است. این نمودار نشان می‌دهد	۰/۰۰۷	r-CB2	کامپوزیت s-CB2 آورده شده
مکانیزم بازتاب است. به طور	۲۰	s-CB2	که سهم مکانیزم جذب بیشتر از
میزان جذب و بازتاب امواج	۰/۰۱۱	r-CB5	مثال در فرکانس ۱۱ گیگاهرتز
با ۴/۹ و ۰/۹۸ دسی‌بل است و	۵۹	s-CB5	الکترومغناطیس به ترتیب برابر
غالب محافظت در این	۷۲	s-CB7.5	بیانگر این نکته است که مکانیزم
الکترومغناطیس است. در	۷۸	s-CB10	کامپوزیت، مکانیزم جذب امواج
تصادفی فاز ثانویه، میزان			کامپوزیت‌های رسانا با توزیع

محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس بسیار پایین می‌باشد. اما در کامپوزیت رسانا با توزیع تجمعی، به دلیل

ایجاد لایه رسانا در مرز گرانول‌های پلیمری، هر ذره پلیمر مانند یک قفس رفتار می‌کند و امواج الکترومغناطیس

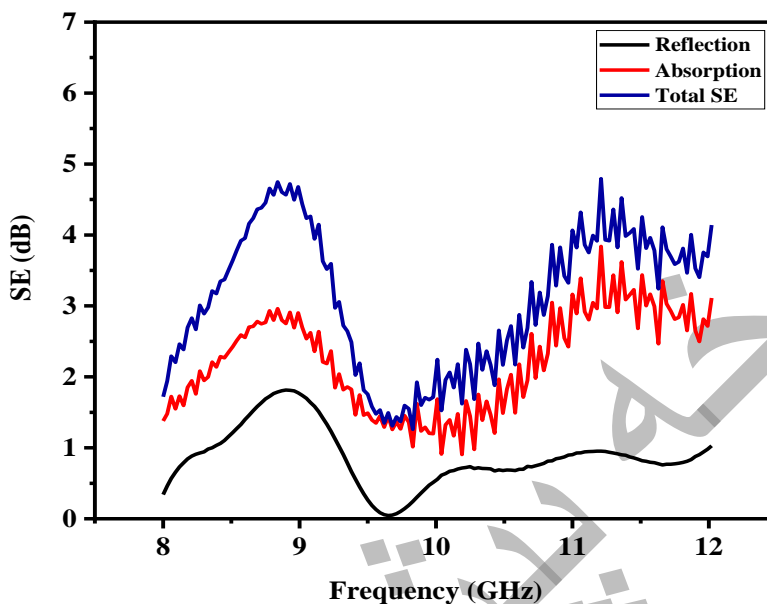
چندین بار درون یک ذره انعکاس یافته و داخل ماده به صورت گرما تضعیف می‌شوند و در نتیجه میزان محافظت و جذب در برابر امواج افزایش می‌یابد [۱۸]. بنابراین در نمونه s-CB2 ایجاد ساختار با توزیع تجمعی منجر به افزایش میزان جذب کامپوزیت شده است. در شکل ۴ قسمت ب، میزان محافظت موثر کل (SE Total) کامپوزیت در دو نمونه با ساختار تجمعی مقایسه شده است. افزایش درصد کربن سیاه از ۲ به ۵، منجر به افزایش میزان محافظت موثر شده است. با افزایش درصد کربن سیاه، میزان قرارگیری ذرات کربن سیاه در سطح ذرات پلیمری، ضخامت پوشش کربن روی ذرات و میزان بازتاب‌های متوالی و در نتیجه تضعیف امواج درون قفس‌ها افزایش یافته است که سبب افزایش میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس شده است.



شکل ۵ میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس در کامپوزیت r-CB5 را نشان می‌دهد. در این کامپوزیت میزان محافظت پایین بوده و حداکثر به ۴/۸ دسی بل رسیده است. در این کامپوزیت به علت توزیع تصادفی کربن سیاه در زمینه پلیمری و عدم ایجاد ساختار تجمعی، رسانایی الکتریکی به  $10^{-11}$  S/m کاهش پیدا کرده است.

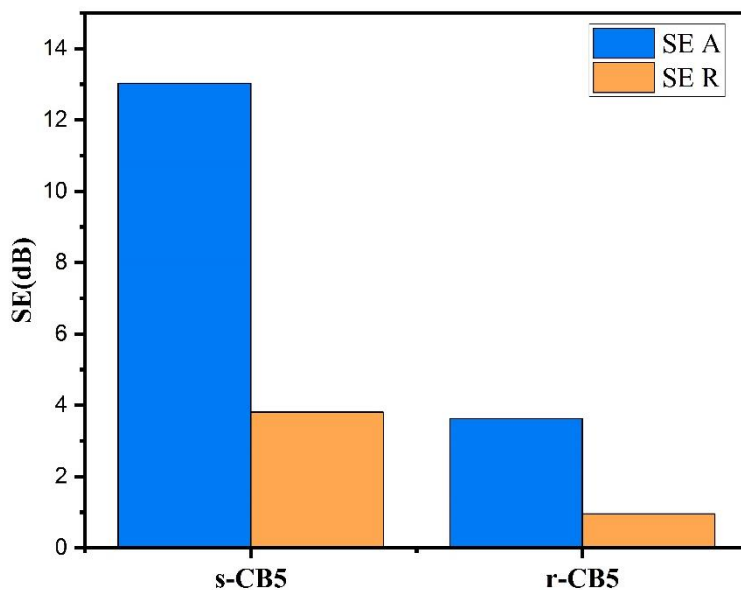
در نتیجه میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس نسبت به نمونه s-CB5 کاهش چشمگیری داشته است. شکل ۴. مقادیر محافظت کامپوزیت در برابر امواج الکترومغناطیس: الف) مقایسه میزان محافظت با مکانیزم‌های جذب و بازتاب و محافظت کل در کامپوزیت s-CB2 و ب) مقایسه محافظت موثر کل در کامپوزیت‌های s-CB5 و s-CB2.

میانگین میزان محافظت موثر کل در کامپوزیت s-CB5، ۳،۳ دسی بل می باشد. اما در کامپوزیت r-CB5، میانگین محافظت موثر کل به ۲/۹ دسی بل کاهش پیدا کرده است.



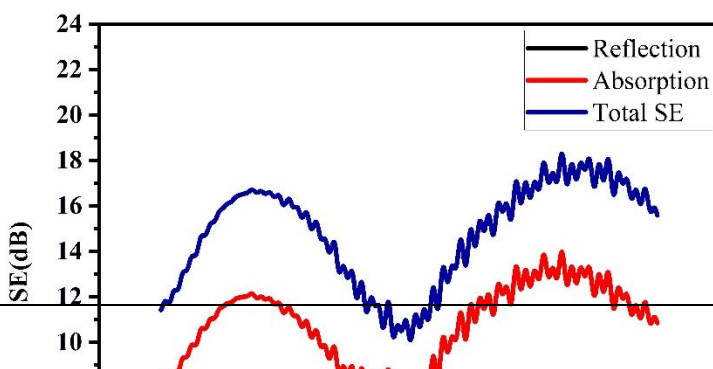
شکل ۵. مقادیر محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس در کامپوزیت r-CB5

به منظور مقایسه بهتر میزان محافظت با مکانیزم جذب و بازتاب در دو نمونه s-CB5 و r-CB5، مقدار جذب و بازتاب در بیشینه محافظت در نمودار شکل ۶ مشخص شده است. رسانایی الکتریکی پایین در نمونه r-CB5 نشان دهنده این است که مسیرهای رسانا در ساختار تشکیل نشده است. به همین دلیل میزان  $SE_A$  و  $SE_R$  نسبت به نمونه s-CB5 کاهش پیدا کرده است. علیرغم کاهش میزان محافظت، در نمونه با ساختار تصادفی، به علت افت رسانایی الکتریکی مقدار بازتاب نیز کاهش پیدا کرده است. اما در نمونه s-CB5 با ایجاد ساختار تجمعی، مقدار جذب امواج الکترومغناطیس افزایش زیادی داشته است.



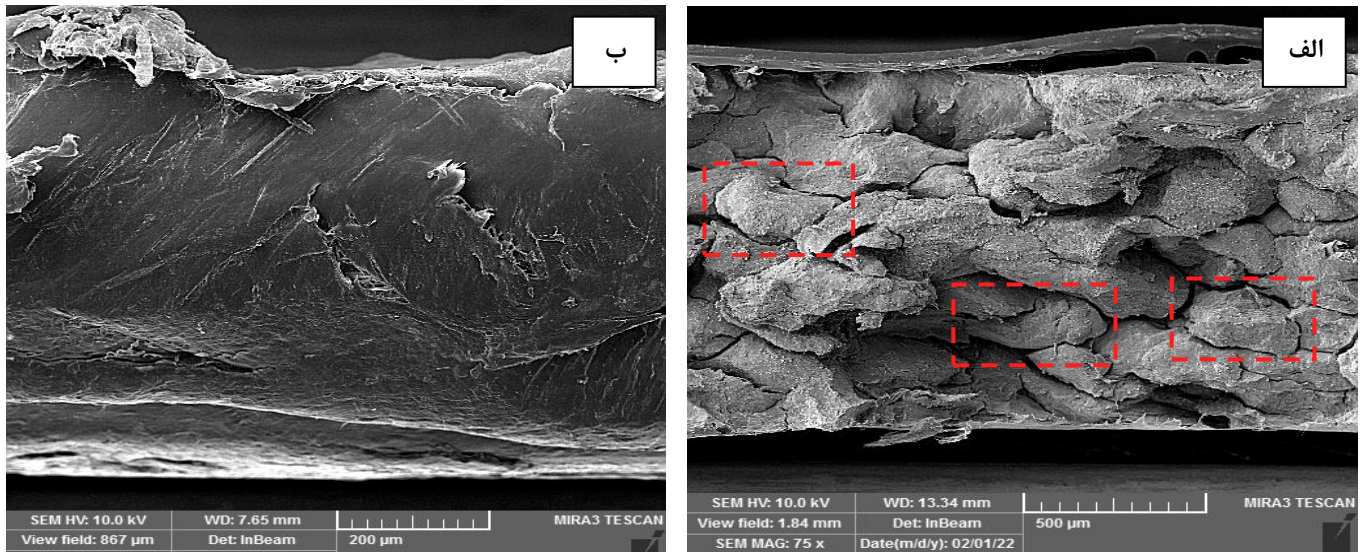
شکل ۶. مقایسه میزان جذب و بازتاب در نمونه s-CB5 و r-CB5

در شکل ۷ نتیجه میزان محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس در نمونه s-CB10 نشان داده شده است. از مقایسه با شکل ۴ ب مشخص می‌شود که با افزایش درصد کربن از ۵ به ۱۰، میزان محافظت در برابر امواج افزایش یافته است. در نمونه s-CB5 مقدار میانگین میانگین محافظت کل در برابر امواج، ۱۳ دسی‌بل بود. این مقدار در نمونه s-CB10 به ۱۴٫۸ دسی‌بل افزایش یافت. با افزایش مقدار کربن سیاه در مسیرهای رسانا و افزایش رسانایی، میزان محافظت در برابر امواج نیز افزایش پیدا کرده است.



در شکل ۸ سطح شکست کامپوزیت‌های s-CB5 و r-CB5 مقایسه شده است. در شکل ۸ قسمت الف، تعدادی از ذرات پلیمری در تصویر مشخص شده‌اند. هنگام اعمال نیروی فشاری در فرایند پرس گرم، ذرات در جهت عرضی کشیده شده و تغییر شکل داده‌اند. با توجه به این که در طی فرآیند ساخت نمونه کامپوزیتی با ساختار تجمعی، ذوب کامل ذرات پلیمری اتفاق نمی‌افتد، اتصال مکانیکی بین ذرات ضعیف بوده و در هنگام شکست نمونه، ترک‌ها در مرز ذرات به وجود آمده و سبب شکست کامپوزیت شده است. اما در کامپوزیت r-CB5 (شکل ۸ قسمت ب) به علت دمای بالا در هنگام قالب‌گیری کامپوزیت، گرانول‌های پلیمر کاملاً ذوب شده است و ساختار تصادفی ایجاد شده است. در نتیجه سطح شکست کامپوزیت صاف بوده و شکست درون دانه‌ای ایجاد شده است.





شکل ۸. تصویر FESEM از سطح شکست الف) کامپوزیت s-CB 5 و ب) کامپوزیت r-CB5

### نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر توزیع تجمعی و تصادفی کربن سیاه در کامپوزیت HDPE/CB بر خواص رسانایی الکتریکی و محافظت الکترومغناطیس مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش اختلاط مکانیکی و پرس گرم ساخته شدند. با ایجاد ساختار تجمعی، رسانایی الکتریکی نسبت به ساختار تصادفی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در نمونه حاوی ۲ درصد کربن سیاه، رسانایی الکتریکی از  $0.007 \text{ S/m}$  در ساختار تصادفی، به  $20 \text{ S/m}$  در ساختار تجمعی رسیده است. با افزایش درصد کربن سیاه، رسانایی بهبود یافته و با اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی کربن سیاه، رسانایی به  $78 \text{ S/m}$  رسیده است. نتایج آزمون جذب امواج الکترومغناطیس نشان داد که با ایجاد ساختار تجمعی نسبت به ساختار تصادفی، میزان محافظت و جذب در کامپوزیت افزایش یافته است. روند افزایش بیشینه محافظت کامپوزیت از  $6 \text{ dB}$  به  $16 \text{ dB}$  با تغییر درصد وزنی کربن سیاه از ۲ به ۵ درصد، لایه پوششی ضخیم کربن سیاه در مرزهای گرانول‌های کامپوزیتی در ساختار حاصل شده است. با افزایش بیشتر درصد وزنی کربن سیاه به ۱۰، بیشینه محافظت به  $18 \text{ dB}$  می‌رسد. تصاویر سطح شکست از کامپوزیت‌های

s-CB5 و r-CB5، مشخص کرد که در کامپوزیت با ساختار تصادفی، شکست به صورت بین‌دانه‌ای بوده؛ اما در ساختار تجمعی به علت اتصال مکانیکی ضعیف بین دانه‌ها، شکست از مرز دانه اتفاق افتاده است.

## منابع

1. Gong, T., et al., *Low percolation threshold and balanced electrical and mechanical performances in polypropylene/carbon black composites with a continuous segregated structure*. Composites Part B: Engineering, 2016. **99**: p. 348-357.
2. Ou, R., et al., *Fabrication and electrical conductivity of poly (methyl methacrylate)(PMMA)/carbon black (CB) composites: comparison between an ordered carbon black nanowire-like segregated structure and a randomly dispersed carbon black nanostructure*. The Journal of Physical Chemistry B, 2006. **110**(45): p. 22365-22373.
۳. Hong, R., et al., *Two-step approach based on selective laser sintering for high performance carbon black/polyamide 12 composite with 3D segregated conductive network*. Composites Part B: Engineering, 2019. **176**: p. 107214.
۴. Lan, T., et al., *Tunable morphology and resistivity of ternary polymer composites of carbon black/low density polyethylene/ethylene-vinyl acetate with carbon blacks having different surface properties*. Journal of Applied Polymer Science, 2021. **138**(34): p. 50845.
۵. Cheng, H., et al., *Endowing Acceptable Mechanical Properties of Segregated Conductive Polymer Composites with Enhanced Filler-Matrix Interfacial Interactions by Incorporating High Specific Surface Area Nanosized Carbon Black*. Nanomaterials, 2021. **11**(8): p. 2074.
۶. Wang, M., et al., *Construction, mechanism and prospective of conductive polymer composites with multiple interfaces for electromagnetic interference shielding: a review*. Carbon, 2021. **177**: p. 377-402.
۷. Duan, H., et al., *Ultrahigh molecular weight polyethylene composites with segregated nickel conductive network for highly efficient electromagnetic interference shielding*. Materials Letters, 2017. **209**: p. 353-356.
۸. Cui, C.-H., et al., *Percolation and resistivity-temperature behaviours of carbon nanotube-carbon black hybrid loaded ultrahigh molecular weight polyethylene composites with segregated structures*. RSC advances, 2015. **5**(75): p. 61318-61323.
۹. Liu, H., et al., *Recent progress in morphological engineering of carbon materials for electromagnetic interference shielding*. Carbon, 2021. **172**: p. 569-596.
۱۰. Burmistrov, I., et al., *Improvement of carbon black based polymer composite electrical conductivity with additions of MWCNT*. Composites Science and Technology, 2016. **129**: p. 79-85.

- .۱۱ Alam, F.E., et al., *Highly conductive 3D segregated graphene architecture in polypropylene composite with efficient EMI shielding*. *Polymers*, 2017. **9**(12): p. 662.
- .۱۲ Zhai, W., et al., *Segregated conductive polymer composite with synergistically electrical and mechanical properties*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018. **105**: p. 68-77.
- .۱۳ Zhang, Y.-P., et al., *Injection molding of segregated carbon nanotube/polypropylene composite with enhanced electromagnetic interference shielding and mechanical performance*. *Composites Science and Technology*, 2020. **197**: p. 108253.
- .۱۴ Wang, Y., et al., *3D-printing of segregated carbon nanotube/polylactic acid composite with enhanced electromagnetic interference shielding and mechanical performance*. *Materials & Design*, 2021. **197**: p. 109222.
- .۱۵ Bao, Y., et al., *Preparation and properties of carbon black/polymer composites with segregated and double-percolated network structures*. *Journal of Materials Science*, 2013. **48**(14) : (p. 4892-4898).
- .۱۶ Wang, T., et al., *A healable and mechanically enhanced composite with segregated conductive network structure for high-efficient electromagnetic interference shielding*. *Nano-Micro Letters*, 2021. **13**(1): p. 1-14.
- .۱۷ Sharif, F., et al., *Segregated hybrid poly (methyl methacrylate)/graphene/magnetite nanocomposites for electromagnetic interference shielding*. *ACS applied materials & interfaces*, 2017. **9**(16): p. 14171-14179.
- .۱۸ Moazen, S., S. Sahebian, and M. Haddad-Sabzevar, *Low percolation behavior of HDPE/CNT nanocomposites for EMI shielding application: Random distribution to segregated structure*. *Synthetic Metals*, 2021. **281**: p. 116900.