

ارائه مدل ریاضی تعیین خاصیت هدایت الکتریکی پوشش کامپوزیت رسانا بر پایه کربن سیاه و بررسی تاثیر مقادیر کربن در پوشش

علیرضا وزیری^{۱*}، علی آشتیانی عبدی^۲، مهرداد شیشه‌بر^۱، فیروز قنبری^۳

۱. مرکز توسعه فناوری خودروبی، تهران، ایران

۲. موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

۳. دانشکده علوم پایه، واحد علوم تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران



چکیده

یکی از روش‌های پرکاربرد و درعین حال کم‌هزینه برای تهیه پوشش رسانا، استفاده از رنگدانه کربن سیاه در محمل یک بسپار است. انتخاب بهینه نوع رنگدانه کربن و مقدار مصرف این رنگدانه و همچنین سایر افزودنی‌ها تاثیر زیادی در کیفیت رسانایی این پوشش‌ها دارد. در این تحقیق، چند نسخه پوشش رسانا حاصل از مقادیر مختلف رنگدانه کربن سیاه در ماتریس یک بسپار آکرلیکی تهیه شده است. بر اساس داده‌های حاصل از این نمونه‌ها، مدلی ریاضی برای تعیین رسانایی الکتریکی پوشش بر حسب تابعی از درصد وزنی مصرف رنگدانه کربن سیاه ارائه می‌شود چنانکه به کمک ثوابت حاصل از این مدل می‌توان کارایی پوشش رسانا را به‌صورت کمی مورد ارزیابی قرار داد.

تاریخ دریافت:

۹۴/۹/۲

تاریخ پذیرش:

۹۵/۲/۶

پوشش رسانا، کربن سیاه، مدل‌سازی، رسانایی الکتریکی، کامپوزیت بسپاری

واژگان کلیدی

۱) مقدمه

با ظهور فن آوری‌های پیشرفته‌ی امروزی، از پوشش‌ها هم انتظار می‌رود تا کارایی‌های نوینی غیر از ظاهر، دوام یا حفاظت از زیرآیند خود داشته باشند. رسانایی الکتریکی یکی از این کارایی‌ها است که در حوزه برق، الکترونیک و نساجی و کفپوش کاربردهای متنوعی دارد [۱-۳]. از جمله کاربرد پوشش رسانا در پخش بار استاتیک از سطوح مختلف تجهیزات و نیز در ایجاد تداخل الکترومغناطیسی^۱ است [۴-۵]. برای داشتن چنین خصوصیتی لازم است تا مواد ویژه‌ای در لایه‌ی پوشش به کار گرفته شود. میزان رسانایی مورد انتظار از پوشش‌ها و قطعات رسانا بستگی به نوع کاربرد آن دارد. به عنوان مثال، بار استاتیکی تولیدشده از سطح ماده‌ای از جنس ایف شیشه که در حین اصطکاک تماسی به وجود می‌آید می‌تواند سبب ایجاد ولتاژ بسیار بزرگی شود و به جرقه‌های خطرناک بیانجامد. میزان مقاومت الکتریکی مؤثر برای جلوگیری از چنین پدیده‌ای در حدود $9-10^6-10^9 \Omega/sq$ است. از سوی دیگر برای رسانایی جریان‌های بزرگ مانند آنچه در ساختار کامپوزیتی فضاپیماها اتفاق می‌افتد، میزان رسانایی نزدیک به شبه فلزات نیاز است. نمونه‌ای دیگر از این مسائل تداخل امواج الکترومغناطیسی خارجی ناشی از منابع طبیعی مانند طوفان‌های الکتریکی یا منابع مصنوعی مانند فرستنده‌های موجود در تجهیزات الکترونیکی است که ممکن است موجب تخلیه اطلاعات موجود در حافظه‌های الکترونیکی و همچنین بروز خطا در عملکرد تجهیزات جهت‌یابی و رادیویی گردد [۶]. عموماً پوشش‌های آلی دارای رسانایی الکتریکی نیستند. برای طراحی پوشش‌های رسانا سه روش کلی وجود دارد که شامل به‌کارگیری بسپارهای رسانا در قالب ماتریس یکنواخت، استفاده از رنگدانه‌های رسانا با مقدار مناسب در بستر بسپارهای نارسانا و یا ترکیب هر دو روش است. با وجود پیشرفت‌های متعدد در زمینه‌ی بسپارهای رسانا، مشکلاتی نظیر اکسیداسیون آن‌ها در شرایط محیطی، انحلال ضعیف و فرآیند پذیری سخت، استفاده این مواد را محدود نموده است. بنابراین برای ایجاد رسانایی در پوشش، غالباً از مواد رسانا مانند ذرات فلزات نقره و مس یا مواد بر پایه کربن در محمل‌های نارسانا استفاده می‌شود [۷]. از شناخته‌شده‌ترین موادی که با به‌کارگیری آن‌ها در محمل‌های نارسانا می‌توان به خاصیت رسانایی الکتریکی دست یافت، گونه‌هایی از خانواده مواد کربنی مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی، پودر گرافیت، رنگدانه‌ی کربن سیاه و امثال این‌ها می‌باشند. اگرچه انتظار می‌رود به لحاظ ساختار اتمی و هیبریداسیون اتم‌های کربن در اتصال با یکدیگر، میزان رسانایی الکتریکی تمامی این مواد در ابعاد اتمی مشابه یکدیگر باشد اما در ابعاد بزرگتر به دلیل تفاوت در آرایش‌یافتگی اتم‌ها

در کنار هم، تفاوت‌هایی در کارایی رسانایی هریک از آن‌ها وجود دارد. در هر صورت، هنگامی که به هریک از این ذرات در ساختار نهایی محصول نگاه شود، خاصیت رسانایی تنها زمانی ایجاد می‌شود که یک شبکه‌ی یکپارچه از اتصال ذرات ماده‌ی کربنی در تمامی قسمت‌های محصول نهایی تشکیل شده باشد تا الکترون‌ها بتوانند در میان این شبکه منتقل شوند. قاعدتاً، هرچه اندازه‌ی ذرات این ماده‌ی کربنی ریزتر و دارای سطح ویژه بیشتری باشد (مانند نانو لوله‌های کربنی و گرافن)، می‌توان با درصد ماده‌ی کمتری به این شبکه دست یافت. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی جوانب کاربرد نانو ذراتی مانند گرافن و نانو لوله‌های کربنی در نسخه‌های پوشش‌های رسانا با کاربردهای پیشرفته مانند چاپ مدارهای الکتریکی و حس‌گرها صورت می‌گیرد [۴ و ۸-۱۳]. اما، چنین پوشش‌های حاوی افزودنی مواد کربنی نانو از دید صنعتی، از نظر پایداری پراکنه^۱ و البته هزینه، دارای نقاط ضعف هستند و همچنین محصولات دیگری مانند رنگدانه کربن سیاه و پودر گرافیت در صنعت تولید مواد و پوشش‌های رسانا و کفپوش ضد الکتریسیته ساکن مورد توجه می‌باشند. به عنوان یک ملاک از کارایی ماده‌ی کربنی در ایجاد خاصیت رسانایی، می‌توان میزان مصرف برای رسیدن به رسانایی مشخص یا رسیدن به آستانه‌ی تشکیل شبکه‌ی رسانایی (آستانه‌ی نفوذ)^۲ را مد نظر قرار داد. در مورد را مد نظر قرار داد. در مورد افزودنی‌های پایه کربنی، کارایی رسانایی به شدت به عواملی مثل خلوص، شکل ذرات، میزان تخلخل، اندازه و توزیع ذرات، میزان جذب گاز و از این دست ارتباط دارد. برای مثال، اگرچه معمولاً مقدار مصرف نانوتیوب چندلایه برای رسیدن به آستانه‌ی نفوذ معمولاً حدود ۱ درصد وزنی گزارش می‌شود [۱۴] اما بسته به نوع افزودنی ممکن است تا ۱۵ درصد وزنی افزودنی نانوتیوب نیاز باشد تا رسانایی الکتریکی مورد نیاز حاصل شود [۱۵] که این عدد با محدوده‌ی مصرف کربن سیاه قابل مقایسه است. در مورد کربن سیاه که تنوع محصول زیادی هم دارد، تفاوت خواص رسانایی عمدتاً از تفاوت در روش‌های تولید ناشی می‌شود که منجر به ایجاد ساختارهایی با اندازه ذره و تخلخل متفاوت می‌گردد. لذا تولیدکنندگان کربن سیاه معمولاً برای مصارف رسانایی محصولات ویژه‌ای با نام‌هایی مثل "ویژه فوق رسانا"^۳ یا "بیش ساختار"^۴ را. معرفی می‌کنند که در مقایسه با کربن سیاه مورد استفاده در صنایع لاستیک که تنها برای ایجاد فام سیاه و خواص مکانیکی استفاده می‌شوند قادر هستند با مقدار مصرف بین ۶ تا ۱۲ برابر کمتر، رسانایی مورد نظر را ایجاد کنند. در مورد افزودنی‌های پایه کربنی،

- 1 Dispersion
- 2 Percolation threshold
- 3 Highly conductive carbon black
- 4 High structure carbon black

1 Electromagnetic Interference (EMI)

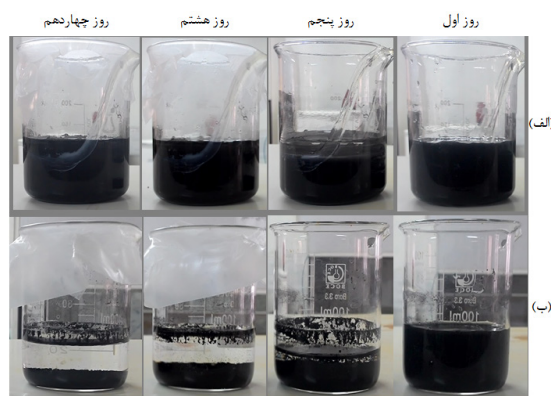
ASTM D1765 ساخت شرکت دوده پارس است. همچنین از رزین پایه آکریلیکی (MT) به‌عنوان بسپار و نیز عامل پراکنش (D200) ساخت شرکت سیماب رزین استفاده شده است. شش نسخه رنگ سانا با درصد جامد وزنی متفاوت از رنگدانه کربن سیاه تهیه شد. نسخه‌های رنگ را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد. برای تهیه‌ی پوشش‌ها، ابتدا رنگدانه در عامل پراکنش با آسیاب گلوله‌ای تا اندازه ذره کمتر از ۳ میکرون باز شد. این خمیر رنگ در مرحله‌ی بعد طی مدت ۲۰ دقیقه با رزین در همزن با سرعت پایین مخلوط شد. پوشش‌ها به‌وسیله‌ی فیلم‌کش ۱۲۰ میکرون روی منسوج پلی‌استر اعمال شد. در فرآیند تثبیت، ابتدا پوشش‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس بسپارش رزین MT در دمای ۱۳۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶-۵ دقیقه انجام گرفت.

برای سنجش میزان پوشش‌ها، مقاومت سطحی پوشش توسط دستگاه مقاومت سنج Resistance Meter ساخت شرکت Electrotech systems امریکا اندازه‌گیری شد. این دستگاه قادر به اندازه‌گیری مقاومت در محدوده $10^1 - 10^6 \Omega$ است. شرایط تثبیت و پخت رزین‌های مختلف برای پوشش دهی متفاوت است اما عموماً شبیه به هم است.

۳ نتایج و بحث

۳(۱) تهیه داده‌های عملی

به‌منظور تهیه‌ی داده‌ی آزمایشگاهی جهت برازش مدل پیشنهادی، لازم است تا چند نمونه پوشش با مقادیر متفاوت از افزودنی کربن سیاه ساخته شود. در تعیین نسخه‌های رنگ مقادیر به‌گونه‌ای انتخاب شدند که همگی نمونه‌ها دارای ۲۵ درصد جامد در فیلم تر بوده و پس از خشک شدن دارای ۱۰ تا ۳۵ درصد رنگدانه نسبت به مجموع رنگدانه، رزین و عامل پراکنش باشند. به دلیل محدودیت دستگاه مقاومت‌سنج، امکان اندازه‌گیری مقاومت سطحی نمونه‌هایی با درصد کربن سیاه کمتر از ۱۰ درصد وجود ندارد و از طرفی نمونه‌هایی با درصد کربن سیاه بیشتر از ۳۵ درصد نیز فاقد خواص فیزیکی مورد انتظار است. درصد جامد خشک نسخه‌ها با توجه به درصد جامد رزین و عامل پراکنش که هر دو معادل ۴۰ درصد هستند محاسبه شده است. نحوه‌ی عملکرد خمیر رنگدانه را در شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد. تصاویر نشان می‌دهند که پراکنده‌ی خمیر رنگدانه در آب در حضور عامل پراکنش پس از دو هفته همچنان پایدار است. در جدول ۲، مقاومت سطحی نمونه‌ها به همراه تصویر پارچه‌های چاپ‌شده با نسخه‌های پوشش سانا با درصد وزنی متفاوت کربن سیاه نشان داده شده است. اینکه ثبات شست‌وشویی و سایشی نمونه‌های با درصد



شکل ۱) پایداری پراکنده‌ی رنگدانه‌ی کربن سیاه در آب به کمک عامل پراکنش (الف) و بدون عامل پراکنش (ب)

جدول ۱) نسخه‌های تر پوشش سانا بر پایه رنگدانه کربن سیاه (برحسب گرم)

نام نمونه	۱۰٪	۱۵٪	۲۰٪	۲۵٪	۳۰٪	۳۵٪
رنگدانه	۰/۵	۱	۱/۱	۲	۲/۵	۵/۲
رزین MT	۱۰	۱۲	۸	۹	۷	۴
D200	۱/۵	۳/۱	۳/۳	۶	۷/۵	۷/۵
آب	۹	۱۲	۱۰	۱۶	۱۶	۱۴
درصد وزنی جامد در پوشش تر	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
درصد وزنی رنگدانه در پوشش خشک	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵

به منظور کاهش جاذبه‌ی ذرات و حصول پراکنش پایدار در محیط غیرقطبی بسپار نیاز است تا مقادیر قابل توجهی از عامل پراکنش^۱ به کار رود [۱۶]. علاوه بر مشکلات پایداری، رابطه‌ی غیرخطی بین درصد مصرف این افزودنی‌ها و رسانایی الکتریکی نیز وجود دارد که ناشی از چند پدیده‌ی میکروسکوپی میان زنجیرهای بسپار با ذرات رنگدانه و ذرات بسپار با خودشان است [۱۷]. با توجه به این دو مشکل، تهیه نسخه‌ی بهینه از کامپوزیت‌های پایه کربنی دشوار است لذا در این تحقیق با ارائه‌ی مدل ریاضی، روند تغییر مقاومت الکتریکی با تغییر درصد رنگدانه کربن سیاه، به عنوان یکی از ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین افزودنی کربنی، مدل شده و روشی برای مقایسه‌ی کارایی انواع افزودنی کربنی و تعیین مقدار بهینه‌ی این رنگدانه در پوشش پایه آب آکریلیکی ارائه می‌شود.

۲) بخش تجربی

رنگدانه سیاه مورد استفاده در این تحقیق از نوع N550 آزمون

1 Dispersing agent

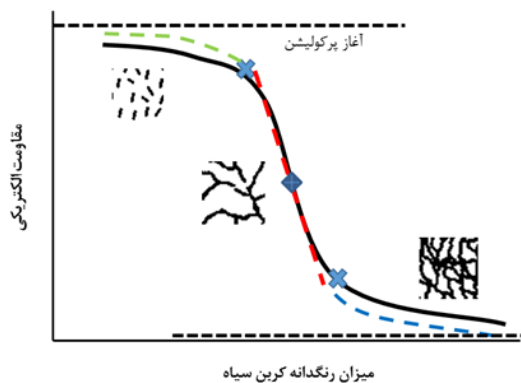
جدول ۲) نتایج مقاومت سنجی نمونه‌ها حاصل از متوسط ۶ بار اندازه‌گیری از نقاط متفاوت نمونه

نمونه	۱۰٪	۱۵٪	۲۰٪	۲۵٪	۳۰٪	۳۵٪
مقاومت سطحی (sp/Ω)	۱۱۵۰	۵۰۹	۲۵.۲	۱۱	۳.۹	۱.۶
وضعیت بصری نمونه						

۲(۳) مدل ریاضی

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، با افزایش مقدار رنگدانه در محمل رزین عایق، پیش از رسیدن به نقطه‌ی بحرانی^۱ مقاومت الکتریکی پوشش بسیار بالا است. اما به محض رسیدن به این نقطه، مسیره‌های نفوذ جریان تشکیل می‌شود^۲ و مقاومت الکتریکی دچار افت شدید می‌گردد. این نقطه‌ی مهم که عطف بین دو نوع رفتار رسانایی پوشش است، به‌عنوان یکی از شرایط مدل در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). همچنین، پیش از این نقطه که عملاً پوشش عایق است را می‌توان به‌عنوان یک مجانب در نظر گرفت چنانکه مقاومت یک عایق از یک حدی به بعد ثابت است. بدیهی است که با فرض وجود رنگدانه حتی به مقدار ناچیز در نسخه رنگ، به‌هرحال به مقدار عددی مقاومت رزین خالص نخواهیم رسید. پس می‌توان این‌طور در نظر گرفت که مقاومت با شیب بسیار کم به سمت مقاومت رزین خالص میل می‌کند. از سوی دیگر شرایط برای زمانی که رزین به حداقل مقدار خود می‌رسد نیز وجود دارد به‌گونه‌ای که مقدار مقاومت به‌صورت حدی و مجانب خود که جریان رنگدانه خالص است نزدیک خواهد شد. پس از نقطه‌ی بحرانی، با افزایش مقدار رنگدانه، تعداد مسیره‌های نفوذ جریان بیشتر می‌شود و رسانایی پوشش افزایش می‌یابد. اما یک پدیده‌ی دیگر نیز تداخل می‌کند. با افزایش مقدار رنگدانه و نزدیک شدن ذرات به هم، تمایل ذاتی ذرات هم نوع و دافعه‌ی بین زنجیره‌های بسیار با ذرات کربن سیاه باعث ایجاد تجمع ذرات رنگدانه می‌شود. همین پدیده باعث کمتر شدن سرعت کاهش مقاومت و افزایش جریان خواهد بود. با این حساب شرط دیگری در مدل وجود دارد و آن هم یک نقطه عطف بین مجانب‌ها است که می‌تواند با پدیده‌ی تجمع توجیه شود [۱۸].

در صورتی که تفسیر وقایع از نظریه‌ی بالا پیروی کند، می‌توان برای نمودار مقاومت برحسب درصد وزنی رنگدانه یک منحنی S شکل در نظر گرفت که انتظار می‌رود با یکی از چند معادله‌ی معروف برازش شود. این



شکل ۳) شمای ایجاد خاصیت رسانایی پوشش توسط رنگدانه کربن سیاه نوع معادلات به معادلات رشد^۱ معروف هستند و در علوم زیستی برای بررسی اثربخشی مقادیر متفاوت دارو کاربرد زیادی دارند [۲۱-۱۹]. با ایده گرفتن از فرآیندهای طبیعی، در بررسی پدیده‌ی فیزیکی رسانایی الکتریکی تحت تاثیر مقادیر متفاوت از کربن سیاه نیز می‌توان از چنین روش‌هایی استفاده کرد. این نوع از توابع عموماً ترکیبی از عملگرهای توانی هستند که متغیر مستقل در توان یک ثابت، مثل ۱۰ یا عدد نپرین یا یک عددی که به‌عنوان ثابت از معادله استخراج می‌شود، می‌باشند. معمولاً با پیچیده شدن معادله، برازش بهتری صورت می‌گیرد اما ترجیحاً معادله‌ای با ثوابت کمتری بتواند روند داده‌ها را تولید کند، مناسب است. از ساده‌ترین معادلات رشد می‌توان به معادله‌های پاسخ به محرک^۲ (معادله ۱)، معادله بولتزمان^۳ و تپه^۴ اشاره کرد. شکل ۳ منحنی حاصل از برازش این معادلات را نشان می‌دهد. عدم وجود روند در منحنی ب شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل قادر است روند داده‌ها را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. همچنین، عدم توانایی مدل معادله ۲ که ترکیب دو معادله‌ی پاسخ به محرک است، نشان می‌دهد که در مورد این آزمایش پدیده‌ی دیگری به‌غیر از نفوذ جریان درون بستر پوشش‌رنگ از طریق تماس رنگدانه‌ها اتفاق نمی‌افتد و همچنین نقطه‌ی عطف و منطقه‌ی خطی

- 1 Growth/sigmoidal functions
- 2 Dose-response
- 3 Boltzmann
- 4 Hill function

- 1 Critical pigment volume concentration
- 2 Percolation threshold

مقایسه قرار داد. چنانکه کوچکتر بودن مقدار k به معنی تغییرات کمتر رسانایی در بازه‌ی برابری از تغییرات وزن افزودنی است. چنانکه از نتایج نیز مشخص است، با توجه به دو برابر بودن مقدار k در گرافیت نسبت به کربن سیاه در رسانایی سطحی یک پوشش کامپوزیتی آکریلیک، لازم است تا در تهیه‌ی نسخه‌ی پوشش بر پایه کربن سیاه دقت بیشتری کرد تا هم از نظر اندازه رسانایی و هم خواص پوشش بهینه عمل کرد. از طرف دیگر، با اندک تغییری در اندازه‌ی وزنی گرافیت، چندین مرتبه بزرگی در مقدار مقاومت سطحی تغییرات حاصل می‌شود. در نهایت، مقدار X_0 به عنوان درصد وزنی بهینه در ایجاد جریان نفوذ نشان می‌دهد که استفاده از کربن سیاه ویژه رسانایی [۵ و ۲۲] می‌تواند با حدود یک سوم مقدار وزنی کربن سیاه N_{550} و قابل مقایسه با نانوتیوب کربن چندلا به به آستانه‌ی نفوذ برسد. البته این موضوع همواره باید در کنار قیمت و سهولت فنی استفاده‌ی چنین افزودنی‌هایی در نظر گرفته شود. همین‌طور که در این تحقیق اثر تغییر افزودنی سیاه بر مقاومت الکتریکی کامپوزیت مدل شد، می‌توان برای بررسی موارد دیگری مانند اثر تغییرات دانه‌بندی، تغییر عوامل پراکنش و مواردی از این دست نیز از داده‌های این مدل استفاده کرد.

۴ نتیجه گیری

بر اساس پیش‌بینی رفتار رنگدانه‌های کربن سیاه در ایجاد رسانایی الکتریکی در پوشش آلی، انتظار می‌رود که رفتار رسانایی الکتریکی پوشش بر حسب درصد وزنی رنگدانه سیاه از یک منحنی رشد با یک منطقه خطی مابین دو مجانب پیروی کند. برازش منحنی‌های رشد شناخته‌شده نشان داد که معادله‌های رشد با یک نقطه عطف متقارن در وسط دو مجانب می‌تواند به خوبی این رفتار را پیش‌بینی کند. اعتبار این مدل به کمک معیارهای آماری خطای مدل تأیید می‌شود.

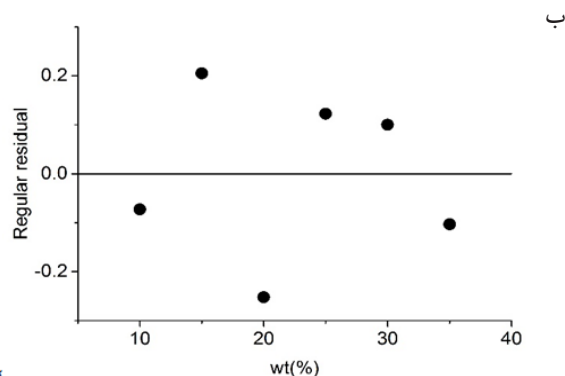
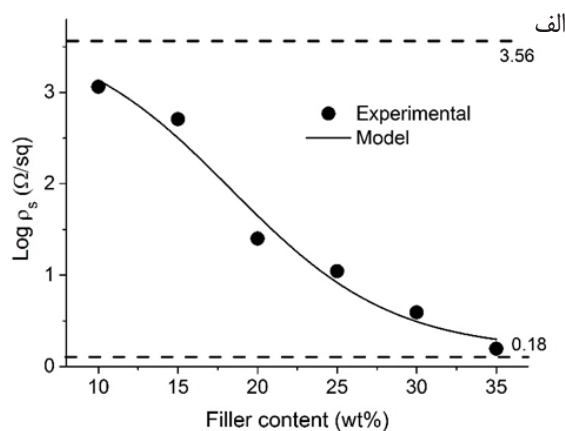
مقایسه‌ی چند نوع افزودنی کربنی نشان می‌دهد که به کمک این مدل می‌توان عملکرد این خانواده از افزودنی‌ها جهت رسانا کردن بسترهای بسیار را به صورت عددی بر اساس ثوابت به دست آمده از معادله مورد مقایسه قرارداد. بر اساس این مدل می‌توان بهترین نسخه‌ی پوشش رسانا را در حدفاصل بین نقطه عطف و مجانب مربوط به آستانه‌ی نفوذ جریان (پرکولیشن) به دست آورد و همچنین می‌توان برای بررسی عملکرد سایر تغییرات در نسخه پوشش رسانا از قبیل افزودنی، اندازه ذره و غیره نیز از این مدل ریاضی استفاده کرد. در ادامه‌ی این تحقیق، در صورتی که بتوان رابطه‌ی مابین ثوابت حاصل از این معادله با خواص ذاتی رنگدانه مانند چگالی، اندازه ذره، شکل ذرات رنگدانه، خواص تر-شوندگی و مواردی از این دست ارتباطی برقرار کرد، می‌توان به مدل کاملی دست یافت که به کمک آن بتوان رنگدانه‌هایی با قدرت رسانایی بسیار بالا طراحی و تولید کرد.

به صورت متقارن مابین دو مجانب قرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی عملکرد مدل، داده‌های حاصل از چند سامانه‌ی کامپوزیت رسانا از مقالات دیگر بر پایه‌ی انواع افزودنی کربنی نیز مورد مقایسه قرار گرفت. در داده‌های فوق، مشابه همین آزمایش مقادیر مصرف افزودنی کربنی بر حسب درصد وزنی است (و نه حجمی) و همچنین مثال‌هایی از رسانایی در حجم کامپوزیتی نیز در کنار رسانایی سطحی برای بررسی صحت مدل استفاده شده است. جدول ۳ نتایج حاصل از این مقایسه

$$R = R_0 + \frac{(R_1 - R_0)}{1 + 10^{(x_m - x)k}} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$R = R_0 + (R_1 - R_0) \left[\frac{p}{1 + 10^{(x_1 - x)k_1}} + \frac{1-p}{1 + 10^{(x_2 - x)k_2}} \right] \quad \text{معادله (۲)}$$



شکل ۳) منحنی حاصل از برازش مدل بر روی داده‌های تجربی (نمودار الف) و نمودار داده مقادیر فاصله داده‌های تجربی از مدل (نمودار ب)

را نشان می‌دهد. از مقادیر χ^2 و R^2 به خوبی مشخص است که مدل قادر است روند تغییرات رسانایی بر حسب مقدار افزودنی کربنی در بستر بسیار را پیش‌بینی کند. مقدار R_0 و R_1 به ترتیب حد پایین و بالای رسانایی حاصل از سامانه‌ی فوق را در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد که برای رسانایی سطحی بر حسب Ω/sq و حجمی بر حسب $\Omega.\text{cm}$ است. میزان حساسیت رسانایی سامانه به تغییرات افزودنی کربنی را می‌توان از شیب کاهش رسانایی (k) مورد

(۵) مراجع

- [13] MakenAli M, Ajeian R. Investigation of effective parameters on the density of vertically-aligned carbon nanotubes synthesized by CVD method, *Journal of Advanced Materials and Novel Coatings*, 6, 2013, 463-473.
- [14] Wernik JM, Meguid SA. Recent developments in multifunctional nanocomposites using carbon nanotubes, *Applied Mechanics Reviews*, 63, 2010, 050801.
- [15] Zhao D, Lei Q, Qin C, Bai X. Melt process and performance of multi-walled carbon nanotubes reinforced LDPE composites, *Pigment & resin technology*, 35, 2006, 341-345.
- [16] Arshak K, Moore E, Cavanagh L, Harris J, McCornigly B, Cunniffe C, Lyons G, Clifford S. Determination of the electrical behaviour of surfactant treated polymer/carbon black composite gas sensors, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36, 2005, 487-491.
- [17] Zhang S, Lin L, Deng H, Gao X, Bilotti E, Peijs T, Zhang Q, Fu Q. Synergistic effect in conductive networks constructed with carbon nanofillers in different dimensions, *Express Polym Lett*, 6, 2012, 159-168.
- [18] Bentley J, Lambourne R, Strivens T. Paint and surface coatings. In: Woodhead Publishing, Cambridge, UK; 1999
- [19] Hood RD. Developmental and reproductive toxicology: a practical approach, CRC Press, 2011,
- [20] Cooke RM. Uncertainty modeling in dose response: bench testing environmental toxicity, John Wiley & Sons, 2009,
- [21] Chin R, Lee BY. Principles and practice of clinical trial medicine, Elsevier, 2008,
- [22] Merzouki A, Haddaoui N. Electrical conductivity modeling of polypropylene composites filled with carbon black and acetylene black, *ISRN Polymer Science*, 2012, 2012,
- [23] Wang T, Chen G, Wu C, Wu D. Study on the graphite nanosheets/resin shielding coatings, *Progress in Organic Coatings*, 59, 2007, 101-105.
- [24] Sun Y, Bao H-D, Guo Z-X, Yu J. Modeling of the electrical percolation of mixed carbon fillers in polymer-based composites, *Macromolecules*, 42, 2008, 459-463.
- [1] Xue C-H, Chen J, Yin W, Jia S-T, Ma J-Z. Superhydrophobic conductive textiles with antibacterial property by coating fibers with silver nanoparticles, *Applied Surface Science*, 258, 2012, 2468-2472.
- [2] Huang L, Huang Y, Liang J, Wan X, Chen Y. Graphene-based conducting inks for direct inkjet printing of flexible conductive patterns and their applications in electric circuits and chemical sensors, *Nano Research*, 4, 2011, 675-684.
- [3] Knittel D, Schollmeyer E. Electrically high-conductive textiles, *Synthetic Metals*, 159, 2009, 1433-1437.
- [4] Enríquez E, de Frutos J, Fernández J, De la Rubia M. Conductive coatings with low carbon-black content by adding carbon nanofibers, *Composites Science and Technology*, 93, 2014, 9-16.
- [5] Al-Saleh MH, Saadeh WH, Sundararaj U. EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric materials: a comparative study, *Carbon*, 60, 2013, 146-156.
- [6] Rupprecht L. Conductive polymers and plastics: in industrial applications, William Andrew, 1999,
- [7] Tracton AA. Coatings materials and surface coatings, CRC Press, 2006,
- [8] Li G, Feng L, Tong P, Zhai Z. The properties of MW-CNT/polyurethane conductive composite coating prepared by electrostatic spraying, *Progress in Organic Coatings*, 90, 2016, 284-290.
- [9] Marinho B, Ghislandi M, Tkalya E, Koning CE, de With G. Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder, *Powder Technology*, 221, 2012, 351-358.
- [10] Hauptman N, Vesel A, Ivanovski V, Gunde MK. Electrical conductivity of carbon black pigments, *Dyes and Pigments*, 95, 2012, 1-7.
- [11] Hauptman N, Gunde MK, Kunaver M, Bešter-Rogač M. Influence of dispersing additives on the conductivity of carbon black pigment dispersion, *Journal of coatings technology and research*, 8, 2011, 553-561.
- [12] Rashvand M, Ranjbar Z, Bastani S, Rohani S, Normohamadian F, Gharanjik K. Functionalization and dispersion of graphene nano plates in resins, *Journal of Advanced Materials and Novel Coatings*, 12, 2015, 809-830.