

Evaluation of Effective Factors on the Dispersibility and Electrical Conductivity of Water-Based Inks Containing Carbon Black

Mohammad Ali Mokhtari Farsi¹, Mohammad Farsi¹, Sahar Abdollahi Baghban^{2*}, Hamze Karimi¹

1- Iran Carbon Company, Tehran, Iran

2- Department of Environmental Research, Institute for Color Science & Technology, Tehran, Iran

Abstract

Water-based conductive inks have emerged as environmentally friendly alternatives to solvent-based systems, offering reduced volatile organic emissions and improved safety. Carbon black, a cost-effective non-metallic conductor, is widely employed in such formulations; however, simultaneously achieving good dispersibility and high electrical conductivity remains challenging due to the opposing influences of its structural and surface properties. This study examines the dispersibility and conductivity of inks prepared with three carbon black grades (N-550, N-330, and N-234) supplied by Iran Carbon Company. Ink pastes were formulated using acrylic resin, a polymeric dispersant, and bead milling. While all inks demonstrated excellent stability under high-speed centrifugation, they exhibited distinct rheological and colorimetric behaviors. Scanning electron microscopy and electrical resistance measurements revealed that inks containing N-234 achieved the highest conductivity, attributed to its complex microstructure and large specific surface area that promote percolation network formation. The surface resistance in ink containing N-234 is about nine times lower than in ink containing N-550. These findings highlight that selecting carbon black with high structure and surface area, combined with optimized dispersants and mixing conditions, enables the concurrent realization of stable dispersions and enhanced electrical performance. This work provides valuable insights for the design of sustainable water-based conductive inks for printed electronics and antistatic coatings.

Keywords

Conductive Ink, Carbon Black, Dispersibility, Colloidal Stabilitye

Article history:

Received: 16-12-2026

Accepted: 04-01-2026

Corresponding author:

*abdollahi-s@icrc.ac.ir

ارزیابی عوامل موثر بر پخش شونددگی و هدایت الکتریکی جوهرهای آب‌پایه حاوی کربن سیاه

محمدعلی مختاری فارسی^۱، محمد فارسی^۱، سحر عبدالهی باغبان^{۲*}، حمزه کریمی^۱

۱- شرکت کربن ایران، تهران، ایران

۲- گروه محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، جوهرهای رسانای آب‌پایه به‌عنوان جایگزین‌های سازگار با محیط‌زیست برای سامانه‌های پایه‌حلالی مورد توجه قرار گرفته‌اند. کربن سیاه به‌عنوان یک ماده رسانای غیرفلزی و مقرون‌به‌صرفه، کاربرد گسترده‌ای در فرمولاسیون این جوهرها دارد. با این حال، دستیابی همزمان به پخش‌شوندگی مطلوب و هدایت الکتریکی بالا در جوهرهای آب‌پایه حاوی کربن سیاه، یک چالش اساسی است، زیرا مشخصه‌های ساختاری و سطحی کربن سیاه تاثیر متضادی بر این دو ویژگی دارند. این پژوهش به بررسی عوامل موثر بر پخش‌شوندگی و هدایت الکتریکی جوهرهای آب‌پایه حاوی سه نوع کربن سیاه تولیدی شرکت کربن ایران (N-550، N-330 و N-234) با مشخصات متفاوت پرداخته است. خمیر جوهرها با استفاده از یک رزین اکریلیک، عامل پخش‌کننده پلیمری و به روش آسیاب ساچمه‌ای تهیه شدند. اگرچه پایداری هر سه جوهر به کمک آزمون سانتیفریوژ در دور بالا تایید گردید، اما این پراکنده‌ها رفتار رئولوژیکی و مشخصه‌های رنگ‌سنجی نسبتاً متفاوتی داشتند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون الکتریکی نشان داد که جوهر حاوی ذرات N-234 به‌دلیل ریزساختار بازتر که به تشکیل شبکه نفوذ کمک می‌نماید، دارای بالاترین هدایت الکتریکی است. مقاومت سطحی در جوهر حاوی N-234 حدود نه برابر از جوهر حاوی N-550 کمتر است. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب کربن سیاه با ساختار کلوخه‌ای بازتر و سطح ویژه بالاتر، در کنار به‌کارگیری عامل پخش‌کننده مناسب و روش اختلاط صحیح، می‌تواند منجر به دستیابی همزمان پخش‌شوندگی و هدایت الکتریکی در جوهرهای آب‌پایه گردد. این یافته‌ها گامی مهم در جهت توسعه جوهرهای رسانای پایدار برای کاربردهای الکترونیک چاپی و پوشش‌های ضدآستاتیک است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۰/۱۴

جوهر رسانا، کربن سیاه، پخش‌شوندگی، پایداری کلوئیدی

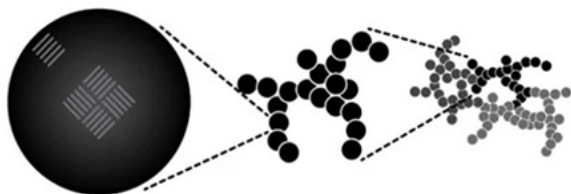
واژگان کلیدی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، توسعه جوهرهای رسانای آب پایه به‌عنوان جایگزینی پایدار برای سامانه‌های حلالی، مورد توجه فراوانی قرار گرفته است [۱،۲]. استفاده از آب به‌عنوان حلال اصلی، موجب کاهش انتشار ترکیبات آلی فرار^۱ و افزایش ایمنی زیست‌محیطی در فرآیند چاپ می‌شود. این نوع جوهرها به‌طور ویژه برای کاربردهایی مانند الکترونیک چاپی^۲، حسگرهای انعطاف‌پذیر، پوشش‌های ضدالکتریسته ساکن و الکترودهای قابل چاپ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳-۵]. برای تولید جوهرهای چاپی که دارای عملکرد الکتریکی هستند، می‌توان از فلزاتی مانند طلا، نقره، مس و نیکل استفاده کرد [۶-۸]. از سوی دیگر مواد رسانای غیرفلزی مانند ترکیبات برپایه کربن (نظیر کربن سیاه، نانولوله‌های کربنی، گرافیت و فولرن‌ها)، برخی از اکسیدهای فلزی، پلیمرهای رسانا و غیره نیز می‌توانند در فرمولاسیون جوهر گنجانده شوند تا به سطوح مختلفی از رسانایی الکتریکی، که اغلب کمتر از سطوحی است که می‌توان با ذرات فلزی بدست آورد، دست یافت [۹-۱۲]. بنابراین، رسانایی الکتریکی در یک جوهر به بستر حامل، نوع، میزان و نحوه توزیع ذرات رسانا بستگی دارد و با تشکیل یک مسیر پیوسته برای جریان الکترون‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مسیر پیوسته به‌عنوان شبکه نفوذ^۳ شناخته می‌شود [۱۳].

در میان ترکیبات کربنی، کربن سیاه یکی از پرکاربردترین و اقتصادی‌ترین پُرکننده‌ها برای جوهرهای رسانا محسوب می‌شود. همانطور که در شکل ۱ مشخص است، ساختار کربن سیاه شامل ذرات کروی با قطر ۱۵ تا ۹۰ نانومتر است (ذرات اولیه^۴) که در ادامه به‌صورت تجمعی^۵ به هم متصل می‌شوند. با اتصال این تجمعات به یکدیگر نیز کلوخه‌های کربنی^۶ با مقیاس بزرگتر از میکرون شکل می‌گیرند. ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه، ساختار^۷ و گروه‌های عاملی در سطح ذرات کربن سیاه نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت الکتریکی و رفتار آنها در داخل جوهر بازی می‌کنند. در مورد کربن سیاه، تشکیل شبکه نفوذ در درجه اول توسط مقدار کربن سیاه کنترل می‌شود که به نوبه خود به ریزساختار کربن سیاه بستگی دارد. در واقع هر ویژگی ساختاری، مانند تخلخل، که حجم مخصوص^۸ رنگدانه را افزایش می‌دهد، امکان تماس نزدیک‌تر بین واحدهای

کربن مجاور را نیز بیشتر خواهد کرد. هرچه نواحی تشکیل دهنده تجمعات کربنی در کربن سیاه کوچک‌تر باشند، قابلیت فشردگی تجمعات بیشتر است. فشردگی بیشتر منجر به حفرات کمتر میان واحدهای کربن رسانا شده و شبکه بدست آمده شباهت بیشتری به یک محیط رسانای پیوسته خواهد داشت [۱۴،۱۵]. کربن‌های سیاه با ساختار کم^۹ (شاخه‌های کوتاه‌تر حاوی دانه‌ها)، هوای کمتری را در خود محبوس می‌کنند و بنابراین، راحت‌تر از کربن‌های سیاه با ساختار بالا، خیس می‌شوند. لیکن، به دلیل فشردگی بیشتر بواسطه انرژی سطح بالاتر و تجمعات سخت‌تر، پخش‌شدگی آنها در بستر جوهر دشوارتر است [۱۶]. در یک درصد وزنی یکسان، احتمال تماس نزدیک‌تر بین تجمعات کربن سیاه مجاور، با افزایش طول ساختار کربن سیاه افزایش می‌یابد. برای رسانایی خوب، فاصله تجمعات مجاور در کربن سیاه باید کمتر از ۵ نانومتر باشند تا انتقال الکترون بتواند از طریق سازوکارهای تونل‌زنی^{۱۰} رخ دهد. در سامانه‌های پلیمری حاوی کربن سیاه، ذرات رسانا به‌صورت خوشه‌هایی درون بستر عایق پلیمر پخش شده‌اند و انتقال الکترون در بین ذرات مجاور معمولاً از سه طریق می‌تواند انجام شود؛ تماس مستقیم ذرات با یکدیگر (مشابه اتصال فلزات)، تونل‌زنی کوانتومی (زمانی که ذرات به یکدیگر بسیار نزدیک هستند، ولی بدون تماس هستند) و در نهایت پرش الکترونی^{۱۱} (زمانیکه که فاصله ذرات بیشتر بوده و نیازمند انرژی حرارتی است). در سازوکار تونل‌زنی کوانتومی، احتمال عبور الکترون (یا همان رسانش) از یک مانع پتانسیل (در اینجا ناحیه عایق بین دو ذره کربن سیاه) با فاصله d به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. برای مواد آلی و پلیمرهای مرسوم، سد پتانسیل معمولاً بین 0.5 تا 2 الکترون‌ولت است. در این شرایط اگر d برابر ۵ نانومتر در نظر گرفته شود، عملاً رسانایی قطع می‌شود. اما برای مقادیر کمتر از دو تا سه نانومتر، هنوز احتمال قابل توجهی برای تونل‌زنی باقی می‌ماند (در حدود $4-10$ تا $6-10$ برابر رسانایی در تماس مستقیم). در جوهرهای حاوی کربن سیاه، حالت دوم یعنی تونل‌زنی، سازوکار اصلی رسانش است [۱۷،۱۸].



شکل ۱. مسیر شکل‌گیری تجمعات و کلوخه‌های کربنی در کربن سیاه از ذرات اولیه.

Figure 1. The formation pathway of carbon aggregates and agglomerates in carbon black from primary particles.

- 9- Low-Structure Carbon Blacks
- 10- Tunneling Mechanisms
- 11- Hopping

- 1- Volatile Organic Compounds
- 2- Printed Electronics
- 3- Percolation Network
- 4- Primary Particle
- 5- Aggregates
- 6- Agglomerates
- 7- Structure
- 8- Specific Volume

راه‌حلی عملی برای غلبه بر دوگانگی پخش‌شوندگی و رسانایی ارائه دهد.

۲- فعالیت‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مواد اولیه و روش ساخت

با هدف ارزیابی و مقایسه شرایط تهیه پراکنه‌های آب‌پایه حاوی کربن سیاه، سه گونه‌ی مختلف دوده از شرکت کربن ایران مطابق با طبقه‌بندی ASTM تهیه شد. مشخصات نمونه‌های مختلف کربن سیاه مورد استفاده در جدول ۱ قابل مشاهده است. رزین جامد اکریلیک از شرکت Briture خریداری شد. ابتدا این رزین با مونواتانول آمین خنثی و سپس پراکنه حاوی ۳۰ درصد وزنی از آن در آب دیونیزه تهیه شد. از یک ضدکف برپایه پلی‌سیلوکسان اصلاح‌شده (Delta FC 1525) به منظور کاهش کف و حباب‌های هوا که می‌توانند به عنوان اتلاف‌کننده انرژی در حین شکستن تجمع ذرات کربن سیاه عمل کنند، استفاده شد. عامل پخش‌کننده (دیسپرسانت) نیز یک کوپلیمر بلاک با کد Tech-6320 بود. درصد وزنی اجزای مورد استفاده در سه پراکنه مختلف جهت بدست آوردن خمیر جوهر در جدول ۲ آورده شده است. به منظور تهیه پراکنه‌ها، ابتدا ترکیب آب، ضدکف، بوتیل گلاکول و دیسپرسانت به محلول رزین افزوده شد. سپس پودرهای کربن سیاه به آرامی تحت همزدن به ظرف اصلی حاوی سایر محتویات منتقل می‌شود و در مرحله پیش اختلاط، مخلوط همه اجزا به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه همزده شد. در ادامه، سرعت همزدن تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه بالا رفت و این شرایط برای مدت ۲۵ دقیقه ادامه یافت. اختلاط اولیه با سرعت پایین برای دستیابی به ترشوندگی بیشتر رنگدانه‌ها و جلوگیری از هرگونه فشردگی پودرها اهمیت دارد. زمانیکه سطح رنگدانه به خوبی خیس نشده باشد، احتمال فشردگی و تراکم کلوخه‌های رنگدانه‌ها بواسطه اعمال تنش بالا وجود دارد [۲۴]. سپس پراکنه‌های پیش مخلوط شده به کمک آسیاب ساچمه‌ای (بسکت‌میل^۴) آزمایشگاهی حاوی ساچمه‌های اکسید زیرکونیوم با قطر تقریبی ۱/۵ میلی‌متر خرد شد. برای انجام مرحله آسیاب، حجم پراکنه تقریباً نصف حجم ساچمه‌ها در نظر گرفته شد. پس از انجام آسیاب، خمیر بدست آمده با نسبت وزنی ۸۵:۲۰ با آب رقیق شد تا جوهرهای مربوطه تهیه شود.

۲-۲- آزمون‌ها و مشخصه‌یابی

از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۵ مدل Mira3 به منظور ریخت‌شناسی ذرات کربن سیاه بهره گرفته شد. پس از آماده شدن جوهرها، برای اندازه‌گیری گرانروی استاتیکی و دینامیکی

علاوه بر اندازه ذرات و ساختار کربن سیاه، شیمی سطح ذرات آن نیز تاثیر قابل توجهی بر خواص پخش‌شوندگی آن در بستر جوهر و در نتیجه رسانایی الکتریکی دارد. کربن سیاه‌هایی با ریزساختار یکسان ممکن است از نظر سهولت در پخش‌شوندگی تفاوت قابل توجهی داشته باشند؛ چنین تفاوت‌هایی را می‌توان به میزان کمپلکس‌های جذب شیمیایی شده^۱ نسبت داد که به نوبه خود به روش تولید و همچنین مواد اولیه مورد استفاده بستگی دارد [۱۹].

حضور اکسیژن روی سطح ذرات کربن سیاه از نقطه نظر کاربردی بسیار حائز اهمیت است. این مراکز قطبی، امکان ترشوندگی سطح کربن سیاه را توسط حلال‌های قطبی و رزین افزایش می‌دهد. افزایش ترشوندگی منجر به پخش‌شوندگی بهتر و سریع‌تر کربن سیاه در یک محیط قطبی می‌شود. اگرچه این امر معمولاً برای تولیدکننده رنگ یا جوهر مطلوب است، اما نباید فراموش کرد که حضور اکسیژن روی سطح ذرات کربن سیاه می‌تواند در نقش رباینده الکترون^۲ سبب کاهش شدید در رسانایی الکتریکی هم برای کربن سیاه با سطح ویژه بالا/ساختار بالا و هم برای کربن سیاه با سطح ویژه کوچک/ساختار پایین شود [۲۰،۲۱]. انواع متداول کربن سیاه که در جوهرها بعنوان پیگمنت مشکی بکار می‌روند، عموماً دارای سطح ویژه پایین و شمار بالایی از گروه‌های قطبی مانند گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل هستند. این ویژگی‌ها سبب می‌شود تا ذرات به‌خوبی در محیط‌های آبی پخش شوند، اما هدایت الکتریکی جوهر نهایی کم خواهد بود. در مقابل، انواع دیگر کربن سیاه که برای استفاده در جوهرهای رسانا استفاده می‌شوند، دارای سطح ویژه بالا و ساختار پیچیده‌تر هستند که منجر به ایجاد مسیرهای رسانای پیوسته می‌شود، ولی به دلیل برهم‌کنش ضعیف با آب و تمایل بالا به تجمع، پخش‌شوندگی^۳ و پایداری چندانی ندارند [۲۲،۲۳].

با توجه به چالش‌های مطرح شده، پژوهش حاضر درصدد است تا ضمن مطالعه عوامل موثر بر هدایت الکتریکی پراکنه‌های آب‌پایه حاوی انواع کربن سیاه، بتواند به روشی در دسترس جهت پایداری سازی جوهرهای مربوطه دست یابد. این هدف‌گذاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا توسعه جوهرهای خاص، به‌ویژه برای کاربردهایی نظیر الکترونیک چاپی، حسگرها و پوشش‌های رسانا رو به افزایش است. بدین ترتیب، این مطالعه ضمن مروری کوتاه بر ویژگی‌های ساختاری و سطحی کربن سیاه، روش‌های بهینه‌سازی پراکنه‌های آب‌پایه را بررسی می‌کند تا بتواند

- 1- Chemisorbed Complexes
- 2- Electron Scavengers
- 3- Dispersibility

4- Basket Mill

5- Field Emission Scanning Electron Microscope

جدول ۱. مشخصات انواع کربن‌های سیاه مورد استفاده در تهیه خمیر جوهر.

Table1. Specifications of the types of black carbon used in the preparation of ink paste.

Sample Code	ASTM Classification	Specific Surface Area (m ² /g)	Volatile content (%)	DBP Oil Absorption (ml/100g)	Iodine Number (mg/g)
Carbon 1	N-550	42	<1	117	45
Carbon 2	N-330	78	<1	102	82
Carbon 3	N-234	119	<1	125	120

جدول ۲. ترکیب درصد وزنی اجزای مورد استفاده در ساخت خمیر جوهر.

Table2. The composition (%) of components used in the ink paste.

Sample Code	Carbon 1	Carbon 2	Carbon 3	30% Solid Acrylic Resin Solution	Dispersing Agent	Butyl Glycol	Defoamer	Water
1	13.3	0	0	72.1	7.8	1.1	0.1	5.6
2	0	13.3	0	72.1	7.8	1.1	0.1	5.6
3	0	0	13.3	72.1	7.8	1.1	0.1	5.6

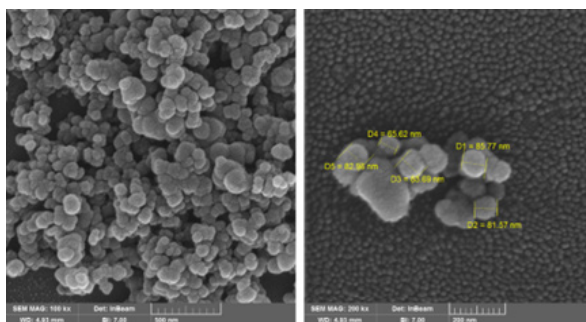
کربن سیاه مورد استفاده، ساختار کلوخه‌ای پیچیده و سلسله‌مراتبی را که مشخصه ذرات کربن سیاه است، تأیید کرد (شکل‌های ۲ تا ۴). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، پارامترهای ساختاری این سه نمونه با یکدیگر متفاوت است. کربن ۳ دارای بالاترین سطح ویژه، جذب روغن و عدد یدی است که همگی نشان‌دهنده وجود ساختار کلوخه‌ای پیچیده‌تر، تخلخل بیشتر و در نتیجه فعالیت سطحی بالاتر می‌باشد. در مقابل به نظر می‌رسد که کربن ۱، ساختار ساده‌تر و فشرده‌تری دارد. خواص ساختاری کربن ۲ نیز بین دو نمونه دیگر می‌باشد. تصاویر SEM نشان می‌دهد که میانگین اندازه ذرات اولیه برای کربن ۱ بیشترین و برای کربن ۳ کمترین مقدار است که این مشاهده با نتایج سطح ویژه آنها کاملاً مطابقت دارد. همچنین مرز بین‌دانه‌ای^۱ در کربن ۱ نسبت به دو نمونه دیگر کمتر مشاهده می‌شود که این موضوع نیز به کاهش تخلخل ذرات و کمتر شدن سطح ویژه این نمونه منجر شده است. این تفاوت‌های ذاتی در ساختار کربن‌های سیاه، تأثیر مستقیمی بر فرآیند پراکندگی و خواص نهایی جوهر خواهد داشت.

به ترتیب از ویسکومتر فورداکاپ شماره ۴ و کربس مدل Lamy استفاده شد. رنگ‌سنجی فیلم خشک‌شده جوهرهای مختلف به کمک دستگاه کالریومتر مدل YS3060 شرکت 3nh در حالت SCI ثبت گردید. به منظور ارزیابی تمایل به رسوب جوهرهای مختلف نیز از سانتیفریوژ با سرعت ۸۰۰۰ دور در دقیقه برای مدت ۱۵ دقیقه بهره گرفته شد. مقاومت سطحی نیز با استفاده از یک از دستگاه پروب چهار نقطه‌ای مدل Jandel اندازه‌گیری شد. مساحت ناحیه چاپی مورد نظر یک سانتی‌متر در یک سانتی‌متر و ضخامت خشک تقریبی آن حدود هشت میکرون در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

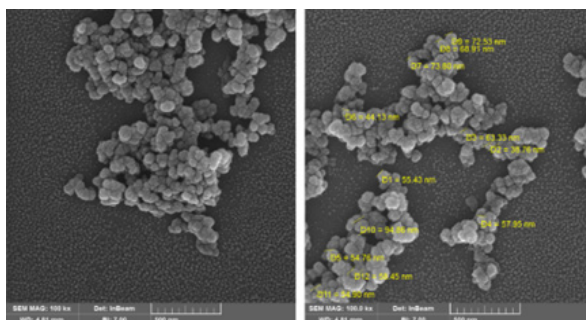
در این پژوهش، جوهرهای آب‌پایه حاوی کربن سیاه با استفاده از سه نوع دوده متفاوت از نظر ساختاری تهیه شدند. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر مشخصات ذرات کربن سیاه بر روی پراکندگی، پایداری فیزیکی، رفتار رئولوژیکی، رنگ‌سنجی و در نهایت خواص الکتریکی لایه‌های نازک حاصل از این جوهرها می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی برای هر سه پودر

1- Grain Boundary



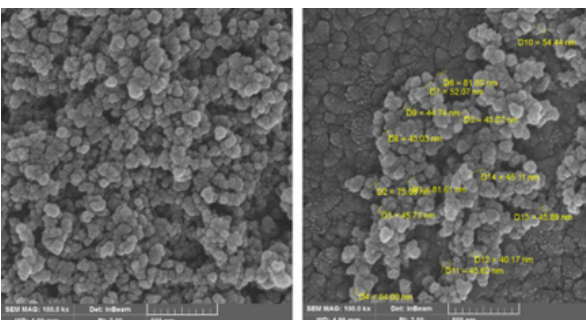
شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کربن ۱ (N-550).

Figure 2. SEM images of Carbon 1 (N-550).



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کربن ۲ (N-330).

Figure 3. SEM images of Carbon 2 (N-330).



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کربن ۳ (N-234).

Figure 4. SEM images of Carbon 3 (N-234).

بازه‌ی ۰/۴۵ تا ۰/۶۰ قرار دارد، بنابراین تغییرات ساختاری دوده‌ها اثر قابل توجهی بر محور قرمز-سبز ایجاد نکرده است. این رفتار نشان می‌دهد که اگرچه افزایش سطح ویژه و جذب روغن دوده باعث بهبود سیاهی و افزایش اندک زردی شده، اما تعادل رنگی در محور a^* تقریباً ثابت مانده است. چنین وضعیتی معمولاً زمانی رخ می‌دهد که دوده‌ها از نظر شیمی سطح و گروه‌های عاملی تفاوت زیادی نداشته باشند و تفاوت آنها عمدتاً به اندازه ذرات و ساختار محدود باشد [۲۵]. از سوی دیگر، روند افزایش گرانیوی جوهر از ۸۵ به ۱۲۷ ثانیه در حالت استاتیک و از ۷۷/۳ به ۸۱/۴ کریس در حالت دینامیک، با افزایش سطح ویژه دوده‌ها کاملاً همخوان است. دوده‌های با ساختار بالاتر، به دلیل نیاز به رزین

نتایج رنگ‌سنجی و گرانیوی جوهرهای تهیه شده در جدول ۳ قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد که افزایش سطح ویژه دوده، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش تیرگی و بهبود جذب نور جوهر دارد. کربن ۱ با سطح ویژه پایین‌تر و جذب روغن متوسط، بالاترین مقدار L^* را ایجاد کرده و بنابراین کمترین شدت سیاهی را دارد. در مقابل، دو دوده با سطح ویژه بالاتر به‌طور مشخص مقدار L^* پایین‌تری ایجاد کرده‌اند که ناشی از اندازه ذرات کوچک‌تر، ساختار توسعه‌یافته‌تر و توانایی بیشتری آنها در پراکندگی و جذب نور است. افزایش تدریجی b^* نیز نشان می‌دهد که دوده‌های با سطح ویژه بالاتر، در عین ایجاد سیاهی عمیق‌تر، تمایل بیشتری به ایجاد تهرنگ گرم (زردی اندک) دارند. در هر سه جوهر مقدار a^* بسیار کوچک و در

خمیرها پس از آسیاب و پیش از سانتریفیوژ با آب با نسبت ۳:۱ رقیق شده‌اند. این نتایج به وضوح تاثیرگذاری فرآیند آسیاب و اصلاح سطح ذرات دوده را بر پایداری پراکنه‌ها نشان می‌دهد و از نقطه نظر زمان انبارداری جوهرهای ساخته شده حائز اهمیت می‌باشد.

اندازه‌گیری مقاومت سطحی فیلم‌های خشک شده جوهر نشان داد که ساختار و سطح ویژه کربن سیاه نقش تعیین کننده‌ای در شکل‌گیری مسیرهای رسانا ایفا می‌کنند. فیلم حاصل از جوهر حاوی کربن ۱ بیشترین میانگین مقاومت سطحی ($7/4 \times 10^4 \Omega/sq$) را نشان داد که با ساختار فشرده‌تر و سطح ویژه پایین‌تر این دوده سازگار است. در چنین شرایطی تماس‌های موثر بین تجمعات، محدودتر بوده و شبکه‌های رسانا کمتر توسعه یافته‌اند. جوهر ۲ میانگین مقاومت سطحی پایین‌تری در حدود $4/1 \times 10^4 \Omega/sq$ داشت و ارتقا در رسانایی مشاهده شد. این بهبود را می‌توان به افزایش نسبی سطح ویژه و ساختار بازتر این دوده نسبت داد که احتمال تماس یا نزدیکی تجمعات کربنی را افزایش می‌دهد و مسیرهای تونلی بیشتری ایجاد می‌کند. بیشترین رسانایی در نمونه حاوی کربن ۳ مشاهده شد، جایی که میانگین مقاومت سطحی به حدود $8/3 \times 10^3 \Omega/sq$ کاهش یافت. ساختار توسعه یافته و سطح

بیشتر برای خیس شدن و تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی درون جوهر، گرانروی را افزایش می‌دهند و این موضوع در داده‌ها به وضوح قابل مشاهده است. این مشاهده کاملاً منطبق با تئوری‌های رئولوژی سوسپانسیون‌ها است. ذرات با ساختار کلوخه‌ای پیچیده‌تر (جذب روغن بیشتر) و سطح ویژه بالاتر، تمایل به جذب مقدار بیشتری از فاز مایع (رزین و آب) در اطراف خود دارند که این امر حجم موثر ذرات معلق را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. افزایش حجم موثر، فضای کمتری برای حرکت آزادانه ذرات باقی گذاشته و در نتیجه باعث افزایش گرانروی کلی سوسپانسیون می‌شود [۲۶]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دوده‌های با سطح ویژه زیاد، اگرچه سیاهی بالاتر و عملکرد نوری بهتری به جوهر می‌دهند، اما در عین حال موجب افزایش گرانروی و گرایش جزئی به زردی می‌شوند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب دوده براساس توازن میان سیاهی مطلوب، کنترل گرانروی و خنثی بودن رنگ را برای طراحی جوهرهای پایه آب نشان می‌دهد.

پایداری جوهرها پس از انجام سانتریفیوژ با دور بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۵ مشخص است، هر سه جوهر پایداری بسیار خوبی پس از فرآیند سانتریفیوژ داشته و هیچ گونه رسوب و جدایش فازی مشاهده نمی‌شود. این درحالی است که

جدول ۳. مشخصات مربوط به انواع گرانروی و مختصات رنگی جوهرهای مختلف.

Table 3. Specifications related to the different types of viscosity and color coordinates of various inks.

Sample Code	Static Viscosity (s)	Dynamic Viscosity (KU)	Color Coordinates			Jetness
			b*	a*	L*	
Ink 1	85	77.3	1.22	0.45	31.40	68.60
Ink 2	104	79.1	1.39	0.60	25.83	74.17
Ink 3	127	81.4	1.52	0.56	25.95	74.05



شکل ۵. پایداری کلوئیدی جوهرها پس از سانتریفیوژ (سرعت چرخشی ۸۰۰۰ دور در دقیقه برای ۱۵ دقیقه).

Figure 5. Colloidal stability of the inks after centrifugation (rotational speed of 8000 rpm for 15 minutes).

پراکنه می‌شود، در حالیکه هم‌زمان قابلیت جذب نور و ایجاد سیاهی عمیق‌تر را بهبود می‌بخشد. اگرچه هر سه جوهر پایداری کلوئیدی مطلوبی پس از سانتریفیوژ نشان دادند، اختلاف در رفتار رئولوژیکی و رنگ‌سنجی آنها به‌طور مستقیم با خواص ذاتی کربن سیاه مرتبط بود. نتایج حاکی از آن است که تشکیل شبکه نفوذ موثر در جوهر، کاملاً به ریزساختار دوده و میزان نزدیکی تجمعات کربنی وابسته است. با توجه به کسر حجمی نسبتاً بالای کربن سیاه در فرمولاسیون جوهرها، هر سه نمونه در ناحیه بالای آستانه پرکولیشن قرار داشتند و جوهر حاوی N-234 کمترین مقاومت سطحی را ارائه داد. این نتایج تایید می‌کند که انتخاب کربن سیاه با سطح ویژه بالا و ساختار گسترده، همراه با استفاده از عامل پخش‌کننده مناسب و فرایند آسیاب موثر، کلید دستیابی هم‌زمان به پخش‌شوندگی مطلوب و هدایت الکتریکی بالا در جوهرهای رسانای پایه‌آب است. یافته‌های حاضر می‌تواند یک راهنمای عملی برای طراحی جوهرهای تخصصی مورد استفاده در الکترونیک چاپی، پوشش‌های ضدالکتریسیته ساکن و حسگرهای انعطاف‌پذیر محسوب گردد.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت کربن ایران به جهت حمایت در کلیه مراحل انجام پژوهش سپاسگزار هستند.

ویژه بالاتر این دوده، امکان ایجاد شبکه‌های رسانای پیوسته‌تری را فراهم می‌کند و فاصله بین واحدهای کربنی را به محدوده‌ای می‌رساند که سازوکار تونل‌زنی به‌طور موثر فعال می‌شود. در یک جوهر رسانای آب‌پایه حاوی ذرات هادی، تشکیل یک شبکه منسجم جهت نفوذ و انتقال الکترون (پرکوله‌شده) از کربن‌سیاه عامل اصلی ایجاد رسانایی الکتریکی است. با توجه به مقادیر وزنی موجود در جوهرها (۱۰/۷ درصد وزنی کربن‌سیاه و ۱۷/۵ درصد وزنی رزین جامد)، نسبت فاز رسانا به فاز عایق در محدوده بیشتر از آستانه پرکولیشن^۱ در سامانه‌های حاوی کربن‌سیاه قرار می‌گیرد. زمانی که مقدار کربن‌سیاه از این آستانه عبور کند، ذرات با ایجاد تماس‌های الکترونی یا تونلی به یکدیگر متصل می‌شوند و مسیرهای پیوسته‌ای برای عبور حامل‌های بار تشکیل می‌دهند. در این حالت، رسانایی جوهر (σ) اغلب به‌صورت یک تابع توانی متناسب با فاصله از مقدار آستانه، براساس رابطه ۱ رفتار می‌کند:

$$\sigma \propto (\phi - \phi_c)^t$$

که در این رابطه ϕ کسر حجمی کربن‌سیاه، ϕ_c آستانه پرکولیشن، و t فاکتور توانی (معمولاً بین ۱/۶ تا ۲/۵) است [۲۷]. برای جوهرهای تهیه شده و با فرض آنکه چگالی متوسط کربن‌سیاه حدود $1/8 \text{ g/cm}^3$ و چگالی رزین حدود $1/1 \text{ g/cm}^3$ باشد، کسر حجمی کربن‌سیاه تقریباً معادل با ۲۷ درصد می‌باشد. در مراجع برای چنین سامانه‌هایی حداقل کسر حجمی کربن‌سیاه جهت رسیدن به آستانه رسانایی بازه ۸ تا ۱۲ درصد ذکر شده است [۲۸، ۲۹]. مقدار نسبتاً بالای بدست آمده نشان می‌دهد که سامانه‌های تهیه شده به‌طور قطع در ناحیه بالای آستانه پرکولیشن قرار دارد و بنابراین انتظار می‌رود جوهرها رسانایی قابل توجهی نشان دهند. با افزایش مقدار رزین یا کاهش مقدار کربن‌سیاه، کسر حجمی کاهش یافته و در نزدیکی ϕ_c رسانایی به‌طور نمایی افت می‌کند. بدون شک این رفتار باید در طراحی جوهرهای رسانا و تنظیم گرانروی، ترکنندگی و پایداری در کنار خواص الکتریکی در نظر گرفته شود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های ساختاری و سطحی کربن سیاه تاثیر تعیین‌کننده‌ای بر پخش‌شوندگی، مشخصه‌های بصری، رفتار رئولوژیکی و عملکرد الکتریکی جوهرهای آب‌پایه دارند. بررسی سه نوع کربن سیاه با ساختارهای متفاوت نشان داد که افزایش سطح ویژه و ساختار کلوخه‌ای موجب افزایش جذب رزین، افزایش حجم موثر ذرات و در نتیجه افزایش گرانروی

۵- مراجع

- [1] Y. Liao, R. Zhang, H. Wang, S. Ye, Y. Zhou, T. Ma, J. Zhu, L. D. Pfefferle, J. Qian, Highly conductive carbon-based aqueous inks toward electroluminescent devices, printed capacitive sensors and flexible wearable electronics. *RSC Adv.* 9 (2019), 15184–15189.
- [2] S. Martinez-Crespiera, B. Pepio-Tarrega, R. M. Gonzalez-Gil, F. Cecilia-Morillo, J. Palmer, A. M. Escobar, S. Beneitez-Alvarez, T. Abitbol, A. Fall, C. Aulin, Use of nanocellulose to produce water-based conductive inks with Ag NPs for printed electronics. *Int. J. Mol. Sci.* 23 (2022), 2946.
- [3] P. Rwei, J.-W. Shiu, M. Senel, A. Hajiaghajani, C. Qian, C.-W. Chen, P. Tseng, M. Khine, A waterborne, flexible, and highly conductive silver ink for ultra-rapid fabrication of epidermal electronics. *Sensors* 25 (2025), 2092.
- [4] T. Mustonen, Inkjet Printing of Carbon Nanotubes for Electronic Applications. M.Sc. thesis, Dept. Electr. and Inf. Eng., Univ. of Oulu, Oulu, Finland, 2009, p. 80.
- [5] Y. S. Hwang, Y. Son, Y. Lee, Printed circuit patterns of conducting polymer. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 472 (2007), 113–122.
- [6] B. Reiser, L. González-García, I. Kanelidis, J. H. M. Maurer, T. Kraus, Gold nanorods with conjugated polymer ligands: sintering-free conductive inks for printed electronics. *Chem. Sci.* 7 (2016), 4190–4196.
- [7] N. S. Shabanov, K. Sh. Rabadanov, S. I. Suleymanov, A. M. Amirov, A. B. Isaev, D. S. Sobola, E. K. Murliev, G. A. Asvarova, Water-soluble copper ink for the inkjet fabrication of flexible electronic components. *Materials* 14 (2021), 2218.
- [8] A. Pajor-Swierzy, F. Szendera, R. Pawlowski, K. Szczepanowicz, Nanocomposite inks based on nickel-silver core-shell and silver nanoparticles for fabrication of conductive coatings at low-temperature sintering. *Colloids Interfaces* 5 (2021), 15.
- [9] Y. Zhang, X. Chen, Y. Dong, G. Zhang, H. Cai, Y. Wu, Y. Bai, High-conductivity graphene/carbon black inks via interpenetrating networks for wearable fabric-based heaters and strain sensors. *J. Mater. Chem. C* 12 (2024), 10083–10095.
- [10] S. Wang, P. K. Ang, Z. Wang, A. L. L. Tang, J. T. L. Thong, K. P. Loh, High mobility, printable, and solution-processed graphene electronics. *Nano Lett.* 10 (2009), 92–98.
- [11] J. J. Hwang, Y. Son, Y. Lee, The effect of graphite and carbon black ratios on conductive ink performance. *J. Mater. Sci.* 52 (2017), 9520–9530.
- [12] J. Yu, S. Lee, E. Lim, T. Kim, K. K. Lee, Preparation of indium tin oxide inks for electrically conductive transparent oxide film with ink-jet printing method. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 519 (2010), 134–140.
- [13] F. Ehrburger-Dolle, J. Lahaye, S. Misono, Percolation in carbon black powders. *Carbon* 32 (1994), 1363–1368.
- [14] X. Bourrat, Electrically conductive grades of carbon black: structure and properties. *Carbon* 31 (1993), 287–302.
- [15] J. Lahaye, F. Ehrburger-Dolle, Mechanisms of carbon black formation. Correlation with the morphology of aggregates. *Carbon* 32 (1994), 1319–1324.
- [16] J. Liang, Q. Q. Yang, Aggregate structure and percolation behavior in polymer/carbon black conductive composites. *J. Appl. Phys.* 102 (2007), 084101.
- [17] R. Zhang, Y. Bin, R. Chen, M. Matsuo, Evaluation by tunneling effect for the temperature dependent electric conductivity of polymer carbon fibre composites with viscoelastic properties. *Polymer J.* 45 (2013), 1120–1134.
- [18] J. Macutkevicius, P. Kuzhir, A. Paddubskaya, S. Maksimenko, J. Banys, A. Celzard, V. Fierro, S. Bištarelli, Electrical transport in carbon black epoxy resin composites at different temperatures. *J. Appl. Phys.* 114 (2013), 033705.
- [19] L. Nelli, G. Tauber, C. Batz-Sohn, R. McIntosh, W. Kalbitz, Surface oxidized carbon black pigments for improved inkjet ink performance. *Nip 25: Digital Fabrication 2009, Technical Program and Proceedings* (2009), 303–306.
- [20] W. Schumacher, Carbon black, in: P. Laden (Ed.), *Chemistry and Technology of Water-Based Inks*, Blackie Academic and Professional, 1997, pp. 153–174.
- [21] D. Pantea, H. Darmstadt, S. Kaliaguine, L. Sümchen, C. Roy, Electrical conductivity of thermal carbon blacks: influence of surface chemistry. *Carbon* 39 (2001), 1147–1158.
- [22] H. Pantea, H. Darmstadt, K. Kaliaguine, C. Roy, Electrical conductivity of conductive carbon blacks: influence of surface chemistry and topology. *Appl. Surf. Sci.* 217 (2003), 181–193.
- [23] J. M. U. Mijovic, M. G. Sadlekova, J. R. Graham, Aqueous carbon black dispersions stabilized by sodium lignosulfonates. *Colloid Polym. Sci.* 299 (2021), 423–435.

- [24] M. Ali, L. Lin, Optimisation and analysis of bead milling process for preparation of highly viscous, binder-free dispersions of carbon black pigment. *Prog. Org. Coat.* 119 (2018), 1–7.
- [25] J. Lee, J. Bae, W. Kim, S. Lee, Aqueous dispersing of carbon black nanoparticles surface-coated with styrene maleic acid (SMA) copolymer. *Polymers* 14 (2022), 5455.
- [26] J.B. Donnet, R.C. Bansal, M.-J. Wang, *Carbon Black: Science and Technology*, CRC Press, 1993.
- [27] D. Stauffer, A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory*, Taylor & Francis, 1994.
- [28] X. Lu, G. J. Lian, J. Parker, R. Ge, M. K. Sadan, R. M. Smith, and D. Cumming, “Effect of carbon blacks on electrical conduction and conductive binder domain of next-generation lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 592, Art. no. 233916, 2024.
- [29] Y. Qin, X. Ouyang, Y. Lv, W. Liu, Q. Liu, and S. Wang, “A review of carbon-based conductive inks and their printing technologies for integrated circuits,” *Coatings*, vol. 13, no. 10, Art. no. 1769, Oct. 2023.