

Study on Morphological, Structural, Electrical, and Electromagnetic Shielding Properties of Carbon Fabric Coated with Nickel and Cobalt by Electroplating Method

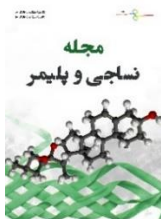
Hamidreza Moradi ¹, Komeil Nasouri ^{1*}, Gholamreza Askari ²

¹ Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

² Information & Communication Technology Institute, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Article Information	Abstract
<p>Article history:</p> <p>Received: 2025-03-08 Accepted: 2025-05-25</p>	<p>Carbon fabrics (CFs) were coated using an electroplating method with nickel and cobalt particles that possess electrical and magnetic properties. The nickel-coated carbon fabric (CFs-Ni) and cobalt-coated carbon fabric (CFs-Co) were produced; then, surface structure, elemental analysis, microstructure, color variations, electrical conductivity, magnetic properties, and EMI shielding effectiveness were examined and compared. Surface structure and elemental analysis show that metal particles are deposited on the surfaces of the CFs in both samples. The average particle sizes of nickel and cobalt were calculated to be 86 ± 12 nm and 129 ± 23 nm, respectively. In the CFs-Co sample ($M_s = 72.24$ emu/g), due to the superior magnetic properties of the cobalt metal mass, the magnetic properties are significantly better than those of the CFs-Ni sample ($M_s = 21.87$ emu/g). Additionally, other magnetic parameters are higher in the CFs-Co sample due to the larger particle sizes compared to CFs-Ni. The electrical conductivity of the CFs-Ni and CFs-Co samples are 407.12 ± 31.59 S/cm and 310.96 ± 23.19 S/cm, respectively. The average EMI shielding effectiveness for both samples CFs-Ni and CFs-Co were measured to be 67.16 ± 1.64 dB and 56.71 ± 3.41 dB, respectively. The contributions of absorption and reflection of electromagnetic waves for both samples were analyzed. The absorption rates for the CFs-Ni and CFs-Co samples were calculated to be 80.5% and 88.6%, respectively. This study demonstrates that both samples, due to their exceptional electromagnetic wave absorption, can be used as materials for EMI shielding applications, such as in aerospace industries and sensitive electronic components.</p>
<p>Keywords:</p> <p>Carbon Fabric, Electroplating, Nickel, Cobalt, EMI Shielding.</p>	

* Corresponding author: k.nasouri@iut.ac.ir



مطالعه بر روی خواص مورفولوژیکی، ساختاری، الکتریکی و محافظت الکترومغناطیسی پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت به روش آبکاری الکتریکی

حمیدرضا مرادی^۱، کمیل نصوری^{۱*}، غلامرضا عسکری^۲

۱- دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲- پژوهشکده فاوا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵	پارچه های کربن (CFS) به روش آبکاری الکتریکی با ذرات نیکل و کبالت که دارای خواص الکتریکی و مغناطیسی هستند، پوشش دهی شدند. پارچه پوشش داده شده با نیکل (CFS-Ni) و پارچه پوشش داده شده با کبالت (CFS-Co) تولید شد؛ سپس آنالیزهای ساختار سطحی، عنصری، ریز ساختار، تغییرات رنگ، هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و محافظت EMI بررسی و نتایج مقایسه می شود. ساختار سطحی و آنالیز عنصری نشان می دهد که ذرات فلزی در دو نمونه روی سطوح CFS پوشش داده می شوند. میانگین اندازه ذرات نیکل و کبالت به ترتیب برابر 86 ± 12 nm و 129 ± 23 محاسبه شده است. در نمونه CFS-Co ($Ms = 72/24$ emu/g) با توجه به خواص برتر مغناطیسی توده فلزی کبالت خواص مغناطیسی به طور قابل توجهی برتر از نمونه CFS-Ni ($Ms = 21/87$ emu/g) هست و همچنین سایر پارامترهای مغناطیسی به علت اندازه ذرات بزرگ تر نمونه CFS-Co بیشتر از نمونه CFS-Ni می باشد. هدایت الکتریکی نمونه CFS-Co و CFS-Ni به ترتیب برابر $40.7/12 \pm 59.31$ S/cm و $31.0/96 \pm 23/19$ می باشد. میانگین میزان محافظت EMI هر دو نمونه CFS-Co و CFS-Ni به ترتیب برابر $67/16 \pm 1/64$ dB و $56/71 \pm 3/41$ اندازه گیری می شود. سهم جذب و انعکاس الکترومغناطیسی دو نمونه مورد بررسی قرار میگیرد. سهم جذب برای نمونه CFS-Co و CFS-Ni به ترتیب برابر $80/5\%$ و $88/6\%$ محاسبه شده است. این پژوهش نشان داد هر دو نمونه با توجه به جذب فوق العاده امواج الکترومغناطیسی می توان به عنوان وسیله ای برای کاربردهای محافظت EMI به عنوان مثال در صنایع هوا - فضا و قطعات الکترونیکی حساس استفاده کرد.
واژه های کلیدی:	پارچه کربن، آبکاری الکتریکی، نیکل، کبالت، محافظت EMI

۱ مقدمه

برآورده کنند [۲، ۳]. در نتیجه، تلاش برای مواد محافظ EMI سبک وزن، با استحکام بالا و کارآمد به عنوان نیاز اساسی شناخته شده است. تا به امروز، مواد مختلف محافظ EMI با عملکرد محافظ عالی بر اساس مکانیسم های بازتاب، جذب و بازتاب های متعدد امواج EM ساخته شده اند [۴، ۵]. با این حال، بازتاب هنوز مکانیسم غالب در این مطالعات است. تئوری انتقال موج EM نشان می دهد که تطبیق امپدانس یک عامل حیاتی برای طراحی مواد محافظ EMI به صورت غلبه مکانیسم جذب است [۶]. تحقیقات بر روی مواد کربنی با گرافیت و کربن سیاه [۷] شروع می شود و الگویی از سازگاری مواد فلزی و مواد جدید (گرافن) [۸، ۹] و نانو الیاف کربن [۱۰] عملکرد بسیار خوبی در جذب مایکروویو از خود نشان می دهند. الیاف کربن (CFS) به عنوان یکی از انواع الیاف با کارایی بالا، به دلیل استحکام و مدول ویژه بالا و ضریب انبساط حرارتی پایین به یکی از مهمترین و پیشرفته ترین تقویت کننده ها تبدیل شده اند [۱۱]. الیاف کربن با توجه به ویژگی های منحصر به فرد به موادی خاص برای هواپیماهای سنگین، قطعات خودرو، تجهیزات الکتریکی و همچنین در زمینه محافظت امواج الکترومغناطیسی

طراحی و توسعه مواد حفاظتی در برابر امواج الکترومغناطیسی به عنوان یک فناوری کلیدی در تأمین امنیت و عملکرد صحیح دستگاه های الکترونیکی، در مواجهه با اثرات منفی میدان های الکترومغناطیسی به شمار می آید. از آنجایی که دستگاه های الکترونیکی در بخش های مختلف از جمله لوازم الکترونیکی مصرفی، خودرو، هوافضا، مراقبت های بهداشتی و کاربردهای صنعتی گسترش می یابند، نیاز به محافظ EMI موثر برای اطمینان از قابلیت اطمینان و ایمنی عملیاتی به طور فزاینده ای مهم شده است. فرایند محافظت شامل بازتاب، جذب و بازتاب های چندگانه داخلی نقش مهمی در تعیین اثربخشی راه حل های محافظ مورد استفاده در زمینه های مختلف بازی می کنند [۱]. مواد رایج مورد استفاده در محافظت الکترومغناطیسی مبتنی بر فلز اگرچه به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند، اما با چالش هایی مانند چگالی بالا، انعطاف پذیری محدود، پیچیدگی در تولید و حساسیت به خوردگی رنج می برند، در نتیجه نمی توانند نیازهای محافظ EMI کارآمد را

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات: k.nasouri@iut.ac.ir

به روش آبکاری الکتریکی بررسی کردند. در نسبت مولی Ni:Co به ۱:۱ خواص ریزساختاری آلیاژ NiCo را بهبود بخشید و هدایت الکتریکی به $571/42 \text{ S/cm}$ و راندمان محافظت EMI را به $52/7 \text{ dB}$ رسید. در بررسی های انجام شده پژوهشی در مورد مقایسه ساختار داخلی و میزان محافظت پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و پارچه کربن پوشش داده شده با کبالت به روش آبکاری الکتریکی وجود ندارد. بنابراین، در این پژوهش پارچه کربن با نیکل و کبالت بصورت جداگانه تحت شرایط یکسان به روش آبکاری الکتریکی لایه نشانی شدند. ساختار داخلی، رنگ پارچه، هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و محافظت EMI پارچه کربن لایه نشانی شده مورد بررسی قرار گرفت.

۲ تجربیات

۱-۲ مواد

از پارچه کربن با الیاف ۳۰۰۰ رشته گرید T300 با بافت ساده (جیلین، چین)، استون (مرک)، اسید نیتریک ۶۵٪ (دکتر مجلی، HNO_3)، اسید بوریک (مرک، H_3BO_3)، نیکل سولفات ۶ آبه (گرید صنعتی، $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، کبالت سولفات ۷ آبه (مرک، $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) و نیکل کلراید ۶ آبه (گرید صنعتی، $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، کبالت کلراید ۶ آبه (مرک، $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) و سدیم دودسیل بنزن سولفونات (مرک، SDBS) استفاده شد.

۲-۲ آماده سازی و آبکاری الکتریکی پارچه کربن

ابتدا نمونه های پارچه کربن در ابعاد $3 \times 4 \text{ cm}^2$ برش داده شد. برای حذف آهار موجود روی سطح پارچه کربن توسط استون به مدت ۳۰ min در دمای محیط آهار زدایی انجام شد و سپس به مدت ۲۴ h در دمای محیط قرار گرفت. پارچه های کربن تحت اصلاح سطح اسیدی با استفاده از اسید نیتریک برای ایجاد گروه های عاملی فعال و همچنین ایجاد ناپیکناختی سطحی برای بهبود چسبندگی بهتر سطح در دمای 80°C و به مدت دو ساعت قرار گرفت، سپس با استفاده از آب مقطر چندین بار شسته شد [۱۷].

محلول الکترولیت برای فرایند آبکاری الکتریکی تهیه شد. محلول مورد استفاده در پوشش دهی با نیکل از نیکل سولفات با غلظت مولی $0/19 \text{ mol/L}$ و $0/084 \text{ mol/L}$ (۴۹/۴۴ g/L) و نیکل کلراید $0/084 \text{ mol/L}$ (۱۹/۹۶ g/L) و محلول مورد استفاده در پوشش دهی با کبالت از کبالت سولفات با غلظت $0/19 \text{ mol/L}$ (۴۰/۵۳ g/L) و کبالت کلراید $0/084 \text{ mol/L}$ (۱۹/۹۸ g/L) تهیه شد که نسبت مولی یون های Ni^{2+} به Co^{2+} در هر دو محلول یکسان باشد. اسید بوریک به عنوان بافر pH برای حفظ $\text{pH} = 3-4$ که غلظت آن در هر دو محلول برابر 30 g/L و SDBS به عنوان یک عامل ضد لایه برداری با غلظت $0/1 \text{ g/L}$ در آب یونیزه تهیه شد. پارچه کربن به عنوان کاتد و یک صفحه نیکل با خلوص ۹۹٪ به عنوان آند استفاده شد. فرایند آبکاری نیکل و کبالت با فاصله کاری 2 cm ، چگالی جریان الکتریکی $4/8 \text{ A/dm}^2$ و زمان آبکاری 10 min در دمای اتاق انجام شد. زمان آبکاری و چگالی جریان مورد استفاده در این پژوهش با توجه به کارهای اولیه جهت رسیدن به یک پوشش یکنواخت و همچنین کارهای قبلی [۲۱، ۲۲] انتخاب گردید. شکل ۱

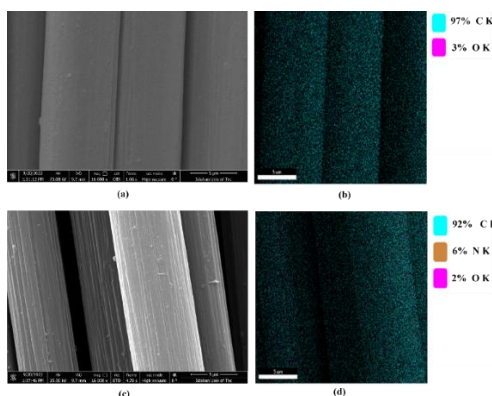
تبدیل می شوند [۱۲]. الیاف کربن دارای خاصیت مغناطیسی نیستند، در نتیجه تفاوت زیادی بین ثابت های دی الکتریک و مغناطیسی ایجاد می شود که منجر به ویژگی های تطبیق امپدانس ضعیف می شود، بنابراین وقتی به تنهایی استفاده می شود، عملکرد محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس ایده آل نیست. بنابراین، توسعه مواد جاذب الکترومغناطیسی با انواع مکانیسم های تلفات و تطبیق امپدانس، به هم افزایی اجزای مختلف، برای به دست آوردن نوع جدیدی از جاذب الکترومغناطیس منجر می شود. پوشش جاذب مغناطیسی روی سطح الیاف کربن یکی از روش های حل این مشکل است. از یک سو، خواص مغناطیسی مواد کربنی را می توان تا حد زیادی بهبود بخشید [۱۳]. الیاف کربن پوشش داده شده با ذرات فلزی را می توان با روش های مختلف از جمله روش رسوب شیمیایی بخار (CVD)، رسوب فیزیکی بخار (PVD)، الکتروکلس و آبکاری الکتریکی تولید کرد [۱۴، ۱۵]. در سال های اخیر، نانوذرات فلزات (آهن، کبالت، نیکل) به دلیل خواص مغناطیسی عالی بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. روش آبکاری الکتریکی روشی ساده، ارزان قیمت و با قابلیت تجاری سازی برای لایه نشانی بسترهای رساناست. این روش با توجه به استفاده از یون های فلزی در محلول الکترولیت دارای مشکلات زیست محیطی است ولی نسبت به روش الکتروکلس آلاینده کمی دارد. فرایند آبکاری الکتریکی به طور گسترده در محیط های صنعتی برای طیف گسترده ای از پوشش های فلزی، از کاربردهای مهندسی تا تزئینی، استفاده می شود. آبکاری الکتریکی به دلیل تنظیم دقیق ترکیب، مورفولوژی، بلورینگی و همچنین ویژگی های متناسب، پاسخ های بهتری را از نظر تأثیر اقتصادی و پایداری محیطی ارائه می دهد [۱۶]. درویش زاده و همکاران [۱۷] الیاف کربن به روش آبکاری الکتریکی با نیکل با چگالی جریان $3/5 \text{ A/dm}^2$ و زمان پوشش دهی 8 min لایه نشانی کردند. مقادیر محافظت EMI الیاف کربن لایه نشانی شده حدود 43 dB در فرکانس $8-12 \text{ GHz}$ و رسانایی الکتریکی $431/4 \text{ S/cm}$ بود. کیم و همکاران [۱۸] خواص محافظت EMI کامپوزیت آلیاژ نیکل/کبالت با الیاف کربن در محدوده فرکانس $1/5 \text{ GHz}$ بررسی کردند. این کامپوزیت مقادیر SE را در محدوده $75-80 \text{ dB}$ در $1/5 \text{ GHz}$ نشان داد. وانگ و همکاران [۱۹] فیلم های کامپوزیت سبک تولید کردند، آنها الیاف کربن را با پوشش نیکل به روش الکتروکلس پوشش داده شده و سپس الیاف کربن با پوشش نیکل در رزین پلی ایمید (PI) قرار داده شد تا کامپوزیت نهایی (CF@Ni/PI) را تشکیل دهد. عملکرد محافظت این لایه های نازک CF@Ni/PI بررسی شد که نشان داد که نمونه با پوشش نیکل اثر محافظت EMI برابر 71 dB در ضخامت $1/2 \text{ mm}$ است. وان و همکاران [۲۰] آلیاژ مغناطیسی Co/Fe بر روی سطح الیاف کربن (Fe/Co@CFs) به روش آبکاری الکتریکی تحت شرایط جریان $0/5 \text{ A}$ و زمان 5 min در دماهای 25°C ، 35°C و 50°C پوشش دادند. ذرات با شکل نامنظم و هرم با تنظیم دمای آبکاری به دست آمده است. مورفولوژی ها دارای ویژگی های مغناطیسی متفاوت و گذردهی پیچیده متفاوت بودند و نشان دادند که جذب امواج الکترومغناطیس توسط FeCo@CF می تواند با تنظیم مورفولوژی ذرات کنترل شود و بهترین جذب امواج الکترومغناطیس در دمای 25°C و ضخامت $1/8 \text{ mm}$ برابر $37/7 \text{ dB}$ بدست آمد. مرادی و همکاران [۲۱]، اثر نسبت مولی نیکل به کبالت (۱:۰/۵، ۱:۱ و ۲:۱) بر مورفولوژی و میزان محافظت الیاف کربن لایه نشانی شده با آلیاژ نیکل/کبالت

منفی آبی را نشان می‌دهد. R نشان دهنده بازتاب نور نمونه‌ها است. جهت اندازه‌گیری میزان محافظت الکترومغناطیسی نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co در فرکانس ۸-۱۲ GHz (باند X) از یک تحلیلگر شبکه برداری (VNA، HP 8510c) استفاده شد.

۳ بحث و نتیجه گیری

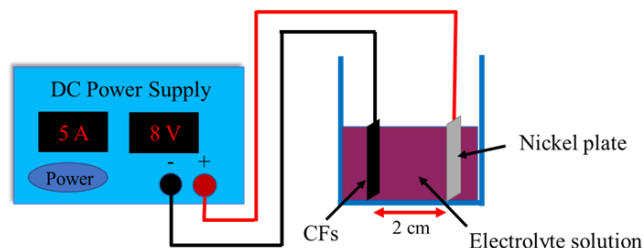
۱-۳ بررسی مشخصات و مورفولوژی سطحی پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت

به منظور بررسی خصوصیات و ساختار سطحی پارچه‌های کربنی بدون پوشش و پوشش داده شده با نیکل و کبالت از آنالیز FESEM استفاده گردیده است. شکل ۲ نتایج آنالیز FESEM و نقشه پراکندگی (MAP) پارچه کربن آهار زدایی شده با استون و نیز پس از عملیات با اسید نیتریک نشان داده شده است. در شکل a همان‌طور که در تصویر مشخص است پس از عملیات با استون، سطح الیاف کربن صاف و دارای مقداری ناخالصی بر روی سطح است که نشان‌دهنده حذف مقدار زیادی از لایه آهاری است. با توجه به شکل c می‌توان مشاهده نمود که پس از عملیات با اسید نیتریک، سطح الیاف دارای خوردگی‌های بسیار جزئی به صورت شیار گردیده است و همچنین مقداری از ناخالصی‌های باقیمانده از سطح حذف شده اند. شکل (b) تصویر MAP به دست آمده می‌توان مشاهده نمود که الیاف کربن خام در ابتدا حاوی حدود ۹۷٪ وزنی عنصر کربن و ۳٪ وزنی عنصر اکسیژن بوده که با انجام عملیات اسیدی و فعال‌سازی سطح الیاف کربن همان‌طور که در شکل d-۲ می‌توان مشاهده نمود از میزان کربن کاسته شده و به میزان نیتروژن در سطح الیاف کربن افزوده شده است. عنصر کربن به ۹۲٪ وزنی کاهش یافته و عناصر اکسیژن و نیتروژن به ترتیب ۲٪ و ۶٪ وزنی هستند. از نتایج به دست آمده این دو آنالیز می‌توان استنباط نمود که با انجام عملیات شستشوی الیاف توسط استون، آهار سطحی از روی الیاف برداشته شده و سطح الیاف تمیز و آماده عملیات‌های بعدی است. با انجام عملیات با اسید نیتریک ناهمواری‌های سطحی الیاف افزایش یافته و گروه‌های فعال اکسیژن‌دار و نیتروژن‌دار بر روی سطح ایجاد شده که به چسبندگی بهتر ذرات فلزی نیکل و کبالت با الیاف کربن کمک بسیاری خواهد نمود.



شکل ۲ تصاویر FESEM و MAP نمونه پارچه کربن خام و اصلاح سطح شده با اسید: (a) تصویر پارچه کربن خام، (b) MAP پارچه کربن، (c) تصویر پارچه کربن اصلاح سطح شده با اسید و (d) MAP پارچه کربن اصلاح سطح شده با اسید

طرحواره فرایند آبکاری الکتریکی پارچه کربن نشان داده شده است. پس از فرایند آبکاری، نمونه‌ها چندین بار با آب شسته و خشک شدند.



شکل ۱ طرحواره فرایند آبکاری الکتریکی پارچه کربن

۲-۳ روش اندازه گیری مشخصات

تغییرات وزن نمونه‌ها در فرایند آبکاری با نانو ذرات نیکل و کبالت محاسبه شد. وزن نمونه‌ها قبل از لایه نشانی و بعد از لایه نشانی به وسیله ترازو (Nano Pajouhan Raga) با دقت ۰/۰۰۱ g اندازه گیری شد. افزایش وزن نسبی نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co مطابق رابطه (1) محاسبه می‌شود:

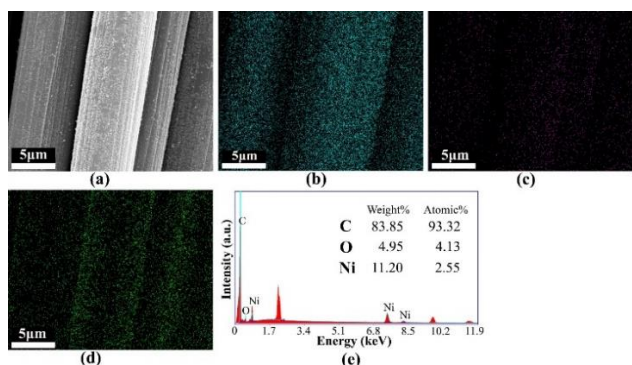
$$Loading (wt. \%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

که در آن m_1 و m_2 به ترتیب وزن نمونه‌ها قبل و بعد از پوشش دهی با ذرات نیکل و کبالت هستند. ضخامت نمونه‌های لایه نشانی شده با دستگاه اندازه گیری ضخامت (HANS BAER AG, CH-8004 ZUERICH) با دقت ۰/۰۱ mm و میانگین‌گیری از ۵ محل مختلف نمونه اندازه گیری شد.

جهت بررسی ساختار سطح نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co توسط میکروسکوپ الکترونی (FESEM، QUANTA FEG-450) استفاده شد. میانگین اندازه نانو ذرات لایه نشانی شده روی سطح پارچه کربن با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی نشر میدانی توسط نرم‌افزار ImageJ به دست آمد. تجزیه و تحلیل عنصری سطح نمونه‌ها با استفاده از یک طیف سنجی پراکنده انرژی (EDS) متصل به دستگاه FESEM انجام شد. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از روش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. ساختار بلوری نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co با پراش پرتو ایکس (XRD، Asenware, AW-XDM300) با استفاده از Cu-Ka در محدوده $90^\circ - 10^\circ$ آنالیز شد. خواص مغناطیسی پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت با استفاده از دستگاه VSM (VSM-MDKB) در دمای اتاق مورد مطالعه قرار گرفت.

رسانایی نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co توسط دستگاه پروب چهار نقطه‌ای (4PP) بر اساس استاندارد ASTM D257-07 مورد بررسی قرار گرفت [۲۳]. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، نمونه‌ها در ابعاد $2 \times 2 \text{ cm}^2$ برش داده شدند. جریان در محدوده ۱-۰/۱ mA اعمال و مقادیر ولتاژ اندازه گیری شد. پارامترهای رنگی نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (Datacolor Spectraflash SF-600) تعیین شد. قدرت رنگ پارچه با استفاده از داده‌های رنگ CIELAB مانند مقادیر L^* ، a^* ، b^* و R به دست آمد. مقدار L^* روشنایی و تاریکی نمونه را نشان می‌دهد. مقادیر a^* مثبت و منفی به ترتیب رنگ‌های قرمز و سبز، b^* مثبت زرد و

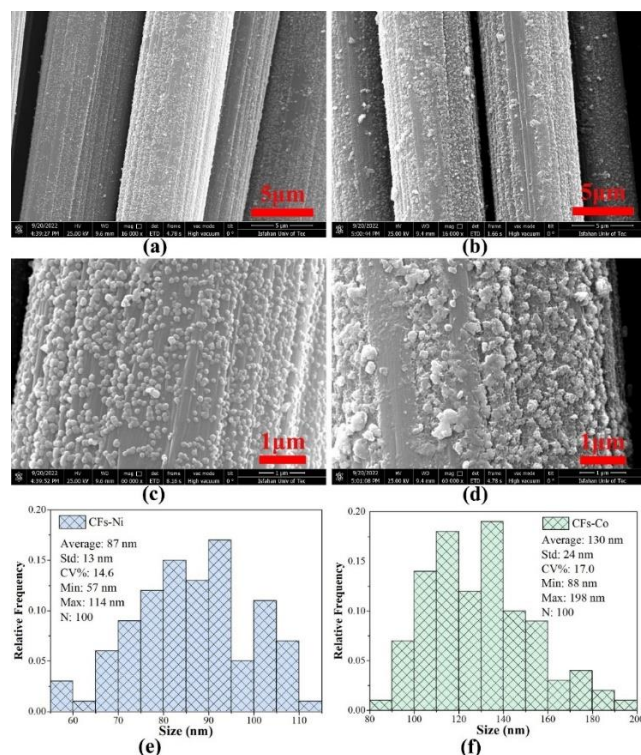
شکل ۴ تصاویر نقشه دوبعدی و طیف EDS پارچه پوشش داده شده با نیکل را نشان می‌دهد. در نقشه‌های دو بعدی EDS (شکل b، c و d)، عناصر کربن، اکسیژن و نیکل به ترتیب در رنگ‌های آبی، بنفش و سبز نشان داده شده‌اند. تصاویر نقشه برداری EDS توزیع دقیق تری از لایه فلزی تشکیل شده روی سطح پارچه کربن را نشان می‌دهد. نقشه‌های دو بعدی EDS به وضوح نشان می‌دهد که ذرات نیکل به طور یکنواخت روی سطح پارچه کربن پخش شده‌اند و عنصر اکسیژن در سطح پوشش داده شده ناچیز است با توجه به نمودار آنالیز EDS (شکل e) پیک مربوط به فلز پوشش داده شده مشاهده شد و در نتیجه ذرات نیکل با موفقیت پوشش دهی شده است. نمونه پوشش داده شده با نیکل شامل درصد وزنی عناصر ۸۳/۸۵٪ کربن، ۱۱/۲۰٪ نیکل و ۴/۹۵٪ اکسیژن است. عنصر اکسیژن در پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل کمتر از ۵٪ وزنی است.



شکل ۴ خصوصیات مورفولوژیکی و ساختاری: (a) تصویر FESEM از پارچه پوشش داده شده با نیکل (b) تصاویر EDS و نقشه پراکندگی عنصر کربن، (c) عنصر اکسیژن و (d) عنصر نیکل (e) الگوی EDS و تحلیل محتوای عناصر نمونه CFs-Ni

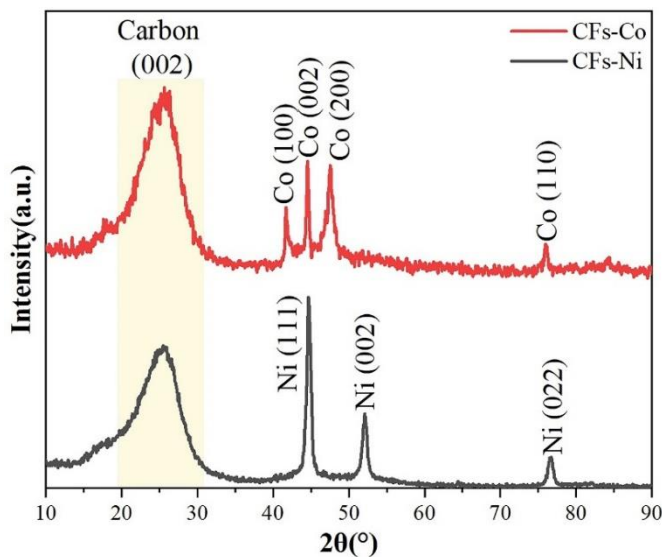
شکل ۵ تصاویر نقشه دوبعدی و طیف EDS پارچه پوشش داده شده با کبالت را نشان می‌دهد. در نقشه‌های دو بعدی EDS (شکل b، c و d)، عناصر کربن، اکسیژن و کبالت به ترتیب در رنگ‌های آبی، بنفش و صورتی نشان داده شده‌اند. تصاویر نقشه برداری EDS توزیع دقیق تری از عناصر موجود روی سطح پارچه کربن را نشان می‌دهد. نقشه‌های دو بعدی EDS به وضوح نشان می‌دهد که ذرات کبالت روی سطح لیف رسوب کرده و روی سطح لیف پخش شده‌اند. با توجه به نمودار آنالیز EDS (شکل e) پیک مربوط به فلز پوشش داده شده مشاهده شد و در نتیجه پوشش دهی با ذرات کبالت موفق بوده است. نمونه پوشش داده شده با کبالت شامل درصد وزنی عناصر ۸۱/۹۱٪ کربن، ۱۳/۵۸٪ کبالت و ۴/۵۱٪ اکسیژن است. عنصر اکسیژن در پارچه کربن پوشش داده شده با کبالت کمتر از ۵٪ وزنی است. درصد وزنی های نزدیک نیکل و کبالت در پارچه کربن پوشش داده شده نشان دهنده تمایل یکسان فلزات نیکل و کبالت با سطح پارچه کربن است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ها با مقدار یکسانی از ذرات فلزی پوشش داده شده‌اند و اکسیدهای فلزی نیز تشکیل نشده‌اند.

تصاویر مربوط به سطح پارچه‌های کربن پوشش داده شده با دو بزرگ‌نمایی ۱۶۰۰۰× و ۶۰۰۰۰× در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ (a و c) مربوط به سطح پارچه پوشش داده شده با نیکل است. لایه ایجاد شده توسط فلز نیکل بصورت ذرات فلزی ریز هستند که در کنار یکدیگر رسوب کرده اند، همچنین در پوشش دهی با نیکل ذرات در یک ناحیه تجمع نکرده و پوشش ذرات فلزی در کل ناحیه لیف کربن است. در شکل ۳ (b و d) تصویر سطح پارچه پوشش داده شده با کبالت نشان داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌کنیم ذرات فلز کبالت بصورت تجمع یافته روی یکدیگر رسوب کرده‌اند بر خلاف نیکل که بصورت ذره‌ای رسوب کرده بود همچنین مشاهده می‌شود که ذرات کبالت ابعاد بزرگتری با سطوح ناهموار و تیز دارند، نسبت به ذرات نیکل رسوب کرده دارند که این مورد روی خواص رسانایی الکتریکی، خواص مغناطیسی و محافظت EMI اثر گذار است. در شکل ۳ (e و f) منحنی‌های توزیع اندازه ذرات نیکل و کبالت رسوب کرده نشان داده شده است. نمودار (e) منحنی اندازه ذرات نیکل رسوب کرده نشان می‌دهد که ذرات نیکل دارای میانگین اندازه ذرات ۸۷ nm هستند و نمودار (f) منحنی اندازه ذرات کبالت رسوب کرده نشان می‌دهد که دارای میانگین اندازه ذرات ۱۳۰ nm هستند. با توجه به انرژی سطحی بالاتر و بر همکنش مغناطیسی قوی‌تر ذرات کبالت همان‌طور که در تصاویر FESEM مشخص بود تجمع افزایش یافته و سبب افزایش اندازه ذرات در نمونه پوشش داده شده با ذرات کبالت شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مورفولوژی سطح، اندازه و توزیع نیکل و کبالت بر روی سطح پارچه کربن را به نوع ماده پوشش دهی بستگی دارد. پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل تولید شده از فرایند آبکاری الکتریکی دارای اندازه ذرات یکسان و توزیع یکنواخت و برای کاربردهای مختلف الکترونیکی مفید هستند.



شکل ۳ تصاویر FESEM با بزرگنمایی های مختلف و نمودار اندازه ذرات: (a و c) پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل، (b و d) پارچه کربن پوشش داده شده با کبالت، (e) توزیع اندازه نانوذرات نیکل و (f) توزیع اندازه نانوذرات کبالت

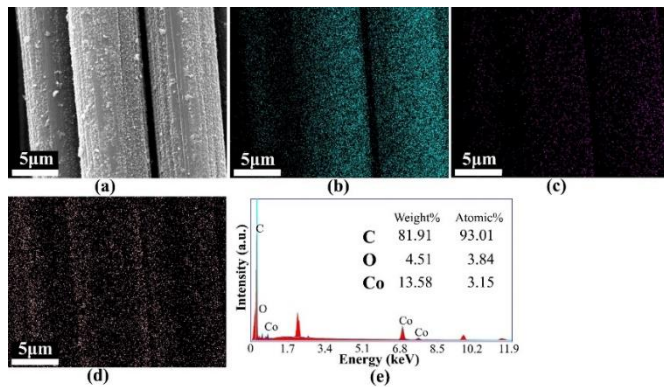
پیک دیگر در زاویه های $44/5^\circ$ مرتبط با صفحه (111)، در حدود 52° مربوط به صفحه (۰۰۲) و در زاویه حدودی 76° درجه برای صفحه (۰۲۲) نیکل که به صورت ساختار مکعبی (FCC) رسوب کرده‌اند که با نتایج پژوهش‌های دیگر مطابقت دارد [۲۴، ۲۱]. نمودار قرمز مربوط به پارچه کربن لایه نشانی شده با کبالت است. پیک های نانوذرات کبالت به ترتیب در حدود 43° ، 45° ، 48° و 75° به ترتیب برای صفحات (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۲۰۰) و (۱۱۰) که به شکل ساختار شش ضلعی (HCP) رسوب کرده‌اند که با نتایج پژوهش‌های دیگر مطابقت دارد [۲۵، ۲۱]. در طیف XRD پیک دیگری مشاهده نشد که نشان از خالص بودن ذرات نیکل و کبالت تشکیل شده و عدم وجود اکسید این فلزات بر روی سطح پارچه کربن می‌باشد که با نتایج EDS تطابق دارد. یکی از مهم‌ترین عواملی که بر پهنای پیک‌ها تأثیر می‌گذارد، اندازه دانه‌های بلوری است. هنگامی که اندازه دانه‌های بلوری کوچک باشد، پیک‌های XRD گسترش یافته و پهنای آن‌ها افزایش می‌یابد و هر چه اندازه بلورها بزرگتر پیک‌ها تیزتر می‌شوند. با توجه به طیف XRD پیک‌های مربوط به نمونه CFS-Co تیز تر هستند که نشان دهنده اندازه بلورهای بزرگتر کبالت است. شدت هر پیک به تعداد اتم‌ها در سطح خاصی از بلور و همچنین تقارن ساختاری آن سطح بستگی دارد که با توجه به طیف XRD شدت پیک‌ها در صفحات بلوری نمونه CFS-Ni بیشتر است که نشان دهنده نظم ساختاری بیشتر بلورهای ذرات نیکل است.



شکل ۷ طیف XRD نمونه های CFS-Co و CFS-Ni

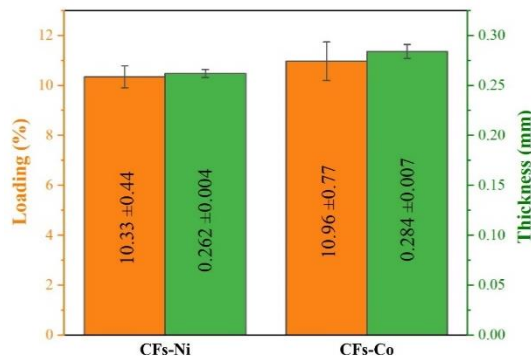
۳-۳ بررسی تغییرات رنگ نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni

رنگ نمونه‌های پارچه کربن با نوع ذره استفاده شده برای پوشش دهی ارتباط دارد. بازتاب نور به‌عنوان تابعی از طول موج برای نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co در شکل ۸ قسمت (a) نشان داده شده است. نمونه CFS-Ni منحنی بازتابی نسبتاً صعودی دارد؛ از حدود ۱۴٪ در ۴۰۰ nm تا حدود ۲۸٪ در ۷۰۰ nm، این یعنی با افزایش طول موج (از بنفش به قرمز)، بازتاب نور بیشتر می‌شود. بازتاب بیشتر در طول موج‌های بلندتر (قرمز) می‌تواند باعث دیده شدن رنگی با به‌صورت خاکستری روشن یا نقره‌ای شود. به دلیل بازتاب قابل توجه، ظاهر این نمونه روشن‌تر از نمونه CFS-Co خواهد بود. نمونه CFS-



شکل ۵ خصوصیات مورفولوژیکی و ساختاری: (a) تصویر FESEM از پارچه پوشش داده شده با نیکل (b) تصاویر EDS و نقشه پراکندگی عنصر کربن، (c) عنصر اکسیژن و (d) عنصر کبالت (e) الگوی EDS و تحلیل محتوای عناصر نمونه CFS-Ni

در شکل ۶ نمودار ضخامت و افزایش وزن (wt.%) نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است با توجه به شرایط یکسان آبکاری پارچه پوشش داده شده با ضخامت کمتر از $0/3$ mm (ضخامت اولیه پارچه $0/228 \pm 0/02$ mm) و یک پارچه محافظ سبک با حداقل افزایش وزن (زیر 10%) از ذرات فلزی بر روی سطح پارچه کربن ایجاد شد. تغییر نوع ذره فلزی بر درصد افزایش وزن و ضخامت نمونه اثر زیادی نداشته است و با توجه به تصاویر FESEM افزایش ضخامت تحت تاثیر تجمع ذرات بوده است. در این پژوهش سعی شده با توجه به افزایش وزن و ضخامت تقریباً یکسان نمونه‌ها، تأثیر نوع ذره فلزی بر میزان محافظت الکترومغناطیس بررسی گردد.

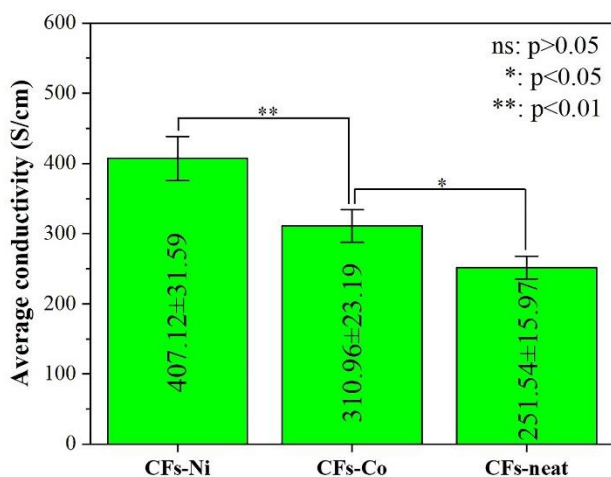


شکل ۶ نمودار درصد بارگذاری ذرات و ضخامت نمونه های CFS-Co و CFS-Ni

۲-۳ خواص ریزساختاری پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت

شکل ۷ الگوهای XRD پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده در هر دو نمودار پیک در زاویه حدودی 26° مربوط به صفحه (002) کربن مشاهده شده است. این پیک نشان دهنده پارچه کربن استفاده شده به عنوان زیر لایه است، شدت این پیک برای نمونه های CFS-Ni و CFS-Co زیاد است که نشان می‌دهد لایه فلزی نازک روی پارچه کربن تشکیل شده است که با نتایج FESEM و ضخامت‌های اندازه‌گیری شده مطابقت دارد. نمودار مشکی رنگ مربوط به پارچه کربن لایه نشانی شده با نیکل است که علاوه بر پیک در زاویه 26° سه

همان‌طور که گفته شد هدایت الکتریکی فلز کبالت خالص بیشتر از نیکل است ولی هدایت الکتریکی نمونه CFS-Co برابر 310.96 ± 23.19 S/cm و کمتر از نمونه CFS-Ni است. با توجه به تصاویر FESEM میتوان متوجه شد که ذرات نیکل یکنواخت تر و ذرات در کنار یکدیگر رسوب کرده اند و یک لایه فلزی روی سطح داریم که این پیوستگی لایه سبب شده هدایت الکتریکی نمونه CFS-Ni بیشتر باشد و نمونه CFS-Co نسبت به نمونه CFS-neat به مقدار کمی رسانایی افزایش دهد. با توجه به افزایش هدایت الکتریکی در اثر پوشش دهی سطح مشخص شد که اکسید فلزی در عملیات پوشش دهی تشکیل نشده است زیرا اکسیدها مانع از افزایش هدایت الکتریکی می‌شود که با نتایج XRD و EDS مطابقت دارد؛ از نتایج هدایت الکتریکی نمونه‌ها می‌توان انتظار داشت که این نمونه‌ها بتوانند محافظت EMI خوبی ایجاد کنند.

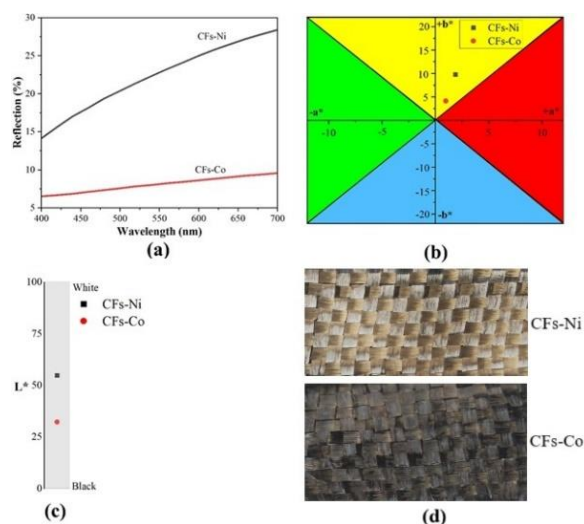


شکل ۹ هدایت الکتریکی نمونه‌های پارچه کربن بدون پوشش، پوشش داده شده با نیکل و پوشش داده شده با کبالت برحسب (S/cm)

۳-۵ خواص مغناطیسی نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni

برای تحلیل خواص مغناطیسی پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت، از آزمون VSM استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، منحنی پسماند مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده با نیکل و کبالت در محدوده میدان مغناطیسی ۱۰۰۰۰ Oe تا ۱۰۰۰۰۰ Oe در دمای اتاق نشان داده شده است. دو نمونه ساختار مشابه رفتار فرومغناطیس نرم را نشان دادند. نمونه نیکل در میدان ۱۰۰۰۰ Oe به اشباع رسیده است ولی نمونه پوشش داده شده با کبالت هنوز به اشباع مغناطیسی نرسیده است. بین منحنی پسماند دو نمونه پوشش داده شده با نیکل و کبالت تفاوت زیادی وجود دارد. در جدول ۱ می‌توان مقادیر مغناطش شدگی اشباع (M_s)، وادارندگی مغناطیسی (H_c) و مغناطش باقیمانده (M_r) را مطالعه نمود. پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل دارای مقادیر مغناطش اشباع $21/81$ emu/g وادارندگی مغناطیسی $110/40$ Oe و مغناطش باقیمانده $6/92$ emu/g است که این مقادیر به ترتیب برای نمونه پوشش داده شده با کبالت برابر $24/72$ Oe، $29/70$ Oe و $15/01$ emu/g است. مقادیر M_s نمونه CFS-Ni با توجه به M_s کمتر توده نیکل فلزی ($55-60$ emu/g) نسبت به توده کبالت فلزی (163 emu/g) است [۲۷-۲۹]. توجه به تصاویر FESEM و منحنی‌های اندازه ذرات متوسط اندازه ذرات نیکل برابر 86 nm و ذرات

Co دارای منحنی تقریباً صاف و یکنواخت است؛ بازتاب بین ۶٪ تا ۸٪ در کل محدوده نورمرئی که این نشان‌دهنده جذب زیاد نور است، به‌ویژه در طول‌موج‌های بالا بنابراین، نمونه با پوشش کبالت تیره‌تر دیده می‌شود، این نمونه رنگی نزدیک به رنگ مشکی دارد. قسمت (b) شکل مقادیر a^* و b^* نمونه‌های پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت را نشان می‌دهد. دو نمونه دارای مقادیر مثبت a^* و b^* هستند. پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل و کبالت دارای رنگ در ناحیه زرد - قرمز هستند. مقادیر L^* برای دو نمونه CFS-Co و CFS-Ni در قسمت (c) ارائه شده است. مقادیر L^* برای نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni به ترتیب $54/81$ و $32/24$ به دست آمده است؛ با توجه به اینکه مقادیر L^* بین ۵۰-۲۰ قرار گرفته نشان می‌دهد مقدار روشنایی دو نمونه متوسط است و رنگ پارچه کربن به خاکستری میانه یا رنگی با روشنایی متوسط تغییر کرده است. همچنین نمودار نشان می‌دهد نمونه پوشش داده شده با نیکل L^* یا شاخص روشنایی نمونه بیشتر از نمونه پوشش داده شده با کبالت است که می‌تواند به رنگ سفید - قره‌ای نانوذرات نیکل مرتبط باشد. نتایج نشان می‌دهد که رنگ پارچه کربن را می‌توان به طور مؤثر از رنگ سیاه به قرمز - زرد با فرایند آبرکاری الکتریکی نیکل و کبالت تغییر داد. در قسمت (d) تصاویر واقعی نمونه CFS-Co و CFS-Ni نشان داده شده است.



شکل ۸ (a) مقادیر بازتاب نور در طول موج ۴۰۰-۷۰۰ nm، پارامترهای رنگ: (b) a^* CIE، b^* CIE، (c) L^* CIE نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni اندازه‌گیری شده توسط اسپکتروفتومتر

۳-۴ هدایت الکتریکی نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni

شکل ۹ هدایت الکتریکی پارچه کربن بدون پوشش، با پوشش نیکل و کبالت پس از لایه بررسی کرده است. نمونه CFS-neat دارای هدایت الکتریکی 251.54 ± 15.97 S/cm است که پس از لایه نشانی با ذرات فلزی نیکل (CFS-Ni) هدایت الکتریکی افزایش دو برابری داشته و به مقدار 407.12 ± 31.59 S/cm می‌رسد که به دلیل این است که ذرات نیکل هدایت الکتریکی بالاتری نسبت به مواد کربنی دارند، پس با انجام عملیات لایه نشانی و افزایش ضخامت لایه تشکیل شده بر روی پارچه کربن انتظار می‌رود هدایت الکتریکی نیز افزایش پیدا کند. با توجه به این که هدایت الکتریکی فلز کبالت و فلز نیکل به ترتیب برابر $1/6 \times 10^7$ و $1/4 \times 10^7$ است [۲۶].

میزان محافظت بر اساس داده‌های S_{12} و S_{21} محاسبه می‌شود. اثربخشی محافظ کل (SE_{tot}) پوشش داده شده را می‌توان در نسبت توان EM برخوردی (P_1) به توان EM عبوری (P_t) امواج EM در محدوده فرکانس 8-12 GHz مطابق رابطه (۲) اندازه‌گیری کرد.

$$SE_{tot} = 10 \log \frac{P_1}{P_t} = 20 \log \frac{E_1}{E_t} = SE_A + SE_R + SE_M \quad (2)$$

مقادیر SE_A و SE_R را می‌توان بر اساس پارامترهای S اندازه‌گیری شده توسط تحلیلگر شبکه برداری به صورت زیر به دست آورد [۳۲، ۳۱]:

$$SE_{tot} = -10 \log(|S_{12}|^2) = -10 \log(|S_{21}|^2) \quad (3)$$

$$SE_R = -10 \log(1 - |S_{11}|^2) \quad (4)$$

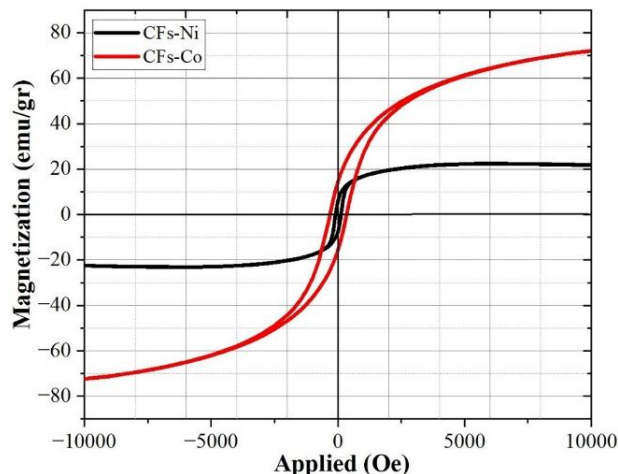
$$SE_A = -10 \log \left[\frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)} \right] \quad (5)$$

شکل ۱۱ محافظت SE_{tot} نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni در محدوده فرکانس باند X نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است در نمونه CFS-Ni با ضخامت ۰/۲۶۲ mm و افزایش وزن ۱۰/۹۶٪ و نمونه CFS-Co با ضخامت ۰/۲۸۴ mm و افزایش وزن ۱۰/۹۶٪ می‌توان با مقدار کم ذرات نیکل و کبالت سطح بالایی از محافظ EMI را در فرکانس‌های مختلف بدون نوسان زیاد به دست آورد. SE_{tot} مورد نیاز برای استفاده تجاری و صنعتی باید بیش از ۲۰ dB باشد [۳۳]. در شکل (a) عملکرد محافظتی EMI نمونه بدون پوشش (CFS-neat) حدود ۴۰ dB، نمونه CFS-Ni حدود ۷۰ dB و نمونه CFS-Co حدود ۶۰ dB نشان می‌دهد که عملکرد محافظتی عالی EMI را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (a) نمونه پوشش داده شده با نیکل در فرکانس بالا و نمونه پوشش داده شده با کبالت در فرکانس پایین عملکرد محافظتی بهتری دارد.

میانگین محافظت EMI کل به صورت نمودار میله‌ای در شکل (b) نشان داده شده است. میانگین محافظت EMI نمونه CFS-Ni و CFS-Co به ترتیب در ۶۷،۱۶ و ۵۶،۷۱ dB به دست آمد، در صورتی که میانگین محافظت EMI در نمونه بدون پوشش فلزی ۳۷،۶۲ dB است. واضح است که پوشش پارچه کربن با ذرات فلزی نیکل و کبالت‌ها که هدایت الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی بهبود می‌بخشد عملکرد محافظت EMI پارچه کربن را نیز بهتر می‌کند [۳۴]. رسانایی بالاتر نمونه CFS-Ni به علت وجود ذرات فلزی نیکل و همچنین طبق تصاویر FESEM و نقشه دو بعدی EDS پوشش یکنواخت تر سبب شده میانگین SE_{EM} نمونه CFS-Ni بیشتر از از نمونه CFS-Co باشد.

شکل (c) میانگین مکانیسم‌های جذب و انعکاس در محافظت EMI نمونه‌ها نشان می‌دهد. انعکاس رایج‌ترین روش محافظ EMI است که ناشی از عدم تطابق امپدانس سطح ماده با فضای آزاد که ناشی از هدایت الکتریکی زیاد ماده است، می‌باشد. همچنین جذب نیز در ماده محافظ رخ می‌دهد و انرژی امواج EM را از طریق تلفات رسانایی، جریان گردابی یا مغناطیسی به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند [۳۱]. در نمونه‌های پوشش داده شده با ذرات نیکل و کبالت، به دلیل استفاده از فلزات با خاصیت رسانایی و نفوذپذیری مغناطیسی بالا، هر دو مکانیسم جذب و انعکاس در محافظت EMI موثر

کبالت برابر ۱۲۹ nm است. متوسط اندازه نانوذرات کبالت بیشتر از ذرات نیکل است و مقادیر M_r و H_c با توجه به افزایش اندازه ذرات کبالت زیاد شده است، این مطلب همبستگی مناسبی با پژوهش وان و همکاران در مورد نانوذرات آهن/کبالت دارد [۳۰]. مقادیر H_c نمونه‌های پوشش داده شده با نیکل و کبالت کمتر از ۵۰۰ Oe است که بیانگر این است که الیف کربن پوشش داده شده ساختار مغناطیسی نرم دارند. خواص مغناطیسی برتر دو نمونه CFS-Co و CFS-Ni می‌توان انتظار داشت که این نمونه‌ها بتوانند محافظت EMI خوبی ایجاد کنند.



شکل ۱۰ منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni

جدول ۱ پارامترهای مغناطیسی در دمای اتاق برای نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni

نمونه	Ms (emu/g)	Hc (Oe)	Mr (emu/g)
CFS-Ni	۲۱،۸۷	۱۱۱،۴۰	۶،۹۲
CFS-Co	۷۲،۲۴	۳۲۹،۷۰	۱۵،۰۱

۳-۶ خواص محافظت الکترومغناطیسی نمونه‌های CFS-Ni و CFS-Co

محافظ EMI به معنای تضعیف امواج الکترومغناطیسی (EM) ساطع شده توسط مواد محافظ است [۳۰]. هنگامی که امواج EM به یک محافظ EMI برخورد می‌کنند، بخشی از آنها روی سطح منعکس می‌شود و باعث تضعیف امواج عبوری می‌شود که با محافظت انعکاسی (SE_R) نشان داده می‌شود. آن قسمتی از امواج EM برخوردی که منعکس نمی‌شوند، وارد فضای داخلی محافظ می‌شوند و از طریق تلفات رسانایی، تلفات مغناطیسی یا تلفات جریان گردابی جذب می‌شوند که محافظت جذب (SE_A) را تشکیل می‌دهند. هنگامی که امواج EM وارد شده به دلیل عدم انطباق در ورودی و خروجی نمونه و وجود قسمت‌های ناهمگن درون مواد برخوردی چندگانه، و بازتاب‌های متعددی ایجاد می‌شود و امواج EM پراکنده می‌شوند که منجر به تلفات بیشتر امواج ورودی شده که محافظت بازتاب چندگانه (SE_M) را تشکیل می‌دهد. مجموع محافظت EMI کلی که با SE_{tot} نشان داده می‌شود، شامل SE حاصل از جذب (SE_A)، SE حاصل از انعکاس مواد (SE_R) و SE حاصل از بازتاب‌های داخلی متعدد (SE_M) است. شایان ذکر است که وقتی SE_{tot} بزرگتر از ۱۵ dB باشد، می‌توان از SE_M صرف‌نظر کرد [۳۱].

مقایسه کار انجام شده با جدول ۲ نشان می‌دهد که در این پژوهش با روزرسانی فرایند آبکاری الکتریکی توانسته شده افزایش حداقل وزن (۱۰٪ وزنی) به محافظتی بالای ۵۵ دسی بل رسیده شود در صورتی که جدول ۲ نشان می‌دهد مقادیر افزایش وزن در کارهای مشابه بالای ۲۰٪ وزنی است و همچنین در این پژوهش پارچه با ضخامت بسیار کم (کمتر از ۰٫۳ میلی متر) به یک محافظت عالی رسیده شده است. مقادیر هدایت الکتریکی در این پژوهش برای پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل ۴۰۷ S/cm و پارچه پوشش داده شده با کبالت ۳۱۰ S/cm هست که در مقایسه با سایر کارهای انجام شده که مقادیری در بازه ۴۰۰-۶۰۰ S/cm هستند نشان می‌دهد با وجود ایجاد لایه‌ای با ضخامت کم که خاصیت انعطاف نمونه حفظ می‌کند توانسته شده به هدایت الکتریکی مشابه سایر کارها در ضخامت بیشتر رسیده شود. بنابراین می‌توان بیان نمود که با کنترل مورفولوژی و ریزساختار نانوذرات نیکل و کبالت پوشش داده شده بر روی پارچه به روش آبکاری الکتریکی منجر به نتایج مطلوب تر در هدایت الکتریکی و محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی شده است. همچنین از آبکاری الکتریکی که یک فرایند با صرفه اقتصادی بالا است در دمای محیط و با صرفه جویی در زمان و چگالی جریان الکتریکی انجام شده است که برای تولید در مقیاس صنعتی بسیار مهم است و همچنین نشان دهنده این است که پارچه کربن پوشش داده شده با نیکل دارای محافظت کلی الکترومغناطیسی بهتری نسبت با پارچه کربن پوشش داده شده با کبالت و اکسید آهن هستند که این موضوع با توجه با پژوهش های بررسی شده در جدول نیز مطابقت دارد.

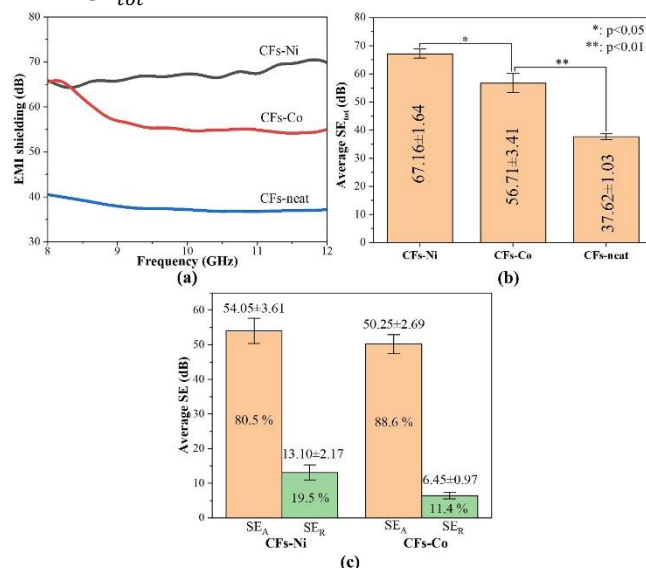
هستند. طبق رابطه (۶) با توجه به رسانایی و خاصیت مغناطیسی دو نمونه، عمده محافظت EMI از طریق مکانیسم جذب صورت می‌گیرد [۳۵].

$$SE_A = 3.34t\sqrt{f\sigma_r\mu_r} \quad (6)$$

که در این رابطه t ضخامت محافظ بر حسب اینچ، f فرکانس بر حسب هرتز، پارامترهای μ_r و σ_r به ترتیب نشان دهنده نفوذپذیری مغناطیسی و رسانایی نسبت به مس هستند. بطوری که در نمونه CFS-Ni و CFS-Co به ترتیب ۵۴٫۰۵ و ۵۰٫۲۵ dB جذب و ۱۳٫۱۰ و ۶٫۴۵ dB از طریق انعکاس است. همان‌طور که گفته شد خواص رسانایی و مغناطیسی ماده در جذب نقش اصلی را ایفا می‌کند. سهم جذب الکترومغناطیس (A%) و سهم انعکاس امواج (R%) نسبت به محافظت کل الکترومغناطیس با توجه به رابطه‌های (۷) و (۸) محاسبه شد. توجه به رسانایی خوب و خواص مغناطیسی برتر نمونه CFS-Co سهم جذب این نمونه ۸۸٫۶٪ بوده ولی نمونه CFS-Ni به دلیل خواص مغناطیسی ضعیف تر سهم جذب برابر ۸۰٫۵٪ است.

$$A\% = \frac{SE_A}{SE_{tot}} \times 100 \quad (7)$$

$$R\% = \frac{SE_R}{SE_{tot}} \times 100 \quad (8)$$



شکل ۱۱ (a) محافظت EMI نمونه‌های CFS-Co، CFS-Ni، CFS-neat در باند X، میانگین محافظت EMI نمونه‌های CFS-Co، CFS-Ni، CFS-neat و (b) میانگین محافظت EMI نمونه‌های CFS-Co و CFS-Ni برای SEA و SER

جدول ۲ داده‌های گزارش شده از عملکرد ساختاری و محافظت امواج، پارچه کربن پوشش داده شده با ذرات فلزی

مرجع	SE _t /d (dB/mm)	SE _t (dB)	فرکانس (GHz)	افزایش وزن (M, wt%)	هدایت الکتریکی (S/cm)	ضخامت (mm)	نوع فرایند پوشش دهی	نوع ماده
[۳۶]	-	۶۳٫۷	۸-۱۲	۳۸	۵۸۵	-	آبکاری الکتریکی	CFS-Ni
[۱۷]	۱۵۲٫۱	۴۲٫۹	۸-۱۲	۲۳٫۸۶	۴۲۱٫۴۲	۰٫۲۸۲	آبکاری الکتریکی	CFS-Ni
[۳۷]	۳۰	۴۵	۲-۱۸	۳۳	-	۱٫۵	الکتروکترولس	CFS-CoOx
[۳۸]	۸٫۷۵	۳۵	۸-۱۲	۵۰	-	۴	الکتروفوریتیک	CFS-Fe ₃ O ₄
[۳۹]	-	۸۰	۰٫۳-۱٫۲	-	۰٫۰۴۲ Ω.cm	-	آبکاری الکتریکی	CFS-Ni
در این پژوهش	۲۵۶٫۳	۶۷٫۱۶	۸-۱۲	۱۰٫۳۳	۴۰۷٫۱۲ ± ۳۱٫۵۹	۰٫۲۶۲	آبکاری الکتریکی	CFS-Ni
در این پژوهش	۱۹۹٫۷	۵۶٫۷۱	۸-۱۲	۱۰٫۹۶	۳۱۰٫۹۶ ± ۲۳٫۱۹	۰٫۲۸۴	آبکاری الکتریکی	CFS-Co

- [7] Liu, X., Zhang, Z., and Wu, Y., 2011. Absorption properties of carbon black/silicon carbide microwave absorbers. *Composites Part B: Engineering*, 42 (2), pp. 326-329.
- [8] Xu, X. *et al.*, 2020. Bimetallic metal-organic framework-derived pomegranate-like nanoclusters coupled with CoNi-doped graphene for strong wideband microwave absorption. *ACS applied materials & interfaces*, 12 (15), pp. 17870-17880.
- [9] Zhang, N., Huang, Y., Zong, M., Ding, X., Li, S., and Wang, M., 2016. Synthesis of core-shell ZnFe₂O₄@ SiO₂ hollow microspheres/reduced graphene oxides for a high-performance EM wave absorber. *Ceramics International*, 42 (16), pp. 18879-18886.
- [10] Huang, B., Yue, J., Wei, Y., Huang, X., Tang, X., and Du, Z., 2019. Enhanced microwave absorption properties of carbon nanofibers functionalized by FeCo coatings. *Applied Surface Science*, 483, pp. 98-105.
- [11] Guo, H., Huang, Y., Meng, L., Liu, L., Fan, D., and Liu, D., 2009. Interface property of carbon fibers/epoxy resin composite improved by hydrogen peroxide in supercritical water. *Materials Letters*, 63 (17), pp. 1531-1534.
- [12] Guo, H., Chen, Z.-q., Li, J.-j., and Li, L., 2019. Study of Fe/Ni alloy coated carbon fibres prepared by electroplating. *Surface Engineering*, 35 (10), pp. 841-847.
- [13] Jin, D., Yang, X., and Wei, Y., 2022. Preparation and enhancement microwave absorption properties of carbon fibers coated with CoNi alloy by solvothermal. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33 (7), pp. 4510-4522.
- [14] Xi, X. and Chung, D., 2019. Effect of nickel coating on the stress-dependent electric permittivity, piezoelectricity and piezoresistivity of carbon fiber, with relevance to stress self-sensing. *Carbon*, 145, pp. 401-410.
- [15] Xue, Y., Chen, W., Zhao, Q., and Fu, Y., 2019. Electroless carbon fibers: A new route for improving mechanical property and wettability of composites. *Surface and Coatings Technology*, 358, pp. 409-415.
- [16] Giurlani, W. *et al.*, 2018. Electroplating for decorative applications: Recent trends in research and development. *Coatings*, 8 (8), pp. 260.
- [17] Darvishzadeh, A. and Nasouri, K., 2022. Structural engineering of nickel-coated carbon fibers with high electrical conductivity for flexible EMI shielding. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33 (8), pp. 5648-5660.
- [18] Kim, J. T., Park, C. W., and Kim, B.-J., 2017. A study on synergetic EMI shielding behaviors of Ni-Co alloy-coated carbon fibers-reinforced composites. *Synthetic Metals*, 223, pp. 212-217.
- [19] Wang, Y., Wang, J., Liu, Z., Zheng, S., Lu, W., and He, Z., 2023. Nanocone-shaped Ni-electroplated carbon fiber composite films for electromagnetic shielding applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, pp. 4625-4632.

در این پژوهش تأثیر دو ذره فلزی نیکل و کبالت پوشش داده شده روی سطح پارچه کربن بررسی شد. در بررسی ساختار نمونه‌ها دیده شد که تغییر نوع ذره تأثیر زیادی بر کیفیت لایه رسوب کرده و همچنین اندازه ذرات دارد. ذرات نیکل رسوب کرده اندازه ذرات کمتری نسبت به ذرات کبالت رسوب کرده داشتند که این عامل روی خواص مغناطیسی اثرگذار است و با افزایش اندازه ذرات مقدار M_r و H_c که افزایش یافت. در طیف‌های EDS دیده شد که اکسید فلزات روی سطح وجود ندارد که این نتیجه آزمون XRD هم، تأیید کرد و همچنین هر نمونه‌ها یکنواختی خوبی در پوشش داشتند. نمونه CFS-Ni رسانایی الکتریکی فوق‌العاده ($31/59 \pm 407/12$ S/cm) و بیشتر از نمونه CFS-Co داشت که به علت رسانایی بالای ذرات نیکل و همچنین یکنواختی ذرات بهتر نیکل روی سطح پارچه کربن است. نمونه‌ها محافظت EMI با عملکرد بالا داشتند و مشخص شد که نمونه CFS-Ni تولید شده عملکرد محافظتی برجسته‌تری (با میانگین $67/16$ dB) نسبت به نمونه CFS-Co را نشان می‌دهند و همچنین مشخص شد عمده محافظت EMI توسط مکانیسم جذب در هر دو نمونه صورت می‌گیرد. سهم مکانیسم جذب در محافظت EMI برای نمونه CFS-Co برابر $88/6\%$ بود؛ ولی برای نمونه CFS-Ni سهم مکانیسم جذب در محافظت EMI به دلیل خواص مغناطیسی ضعیف‌تر برابر $80/5\%$ محاسبه شد.

مراجع

- [1] Rohini, R. and Bose, S., 2019. Electrodeposited carbon fiber and epoxy based sandwich architectures suppress electromagnetic radiation by absorption. *Composites Part B: Engineering*, 161, pp. 578-585.
- [2] Yepuri, V., Dubey, R., and Kumar, B., 2021. Prohibition of infrared electromagnetic waves through optical coatings on plain glasses. *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 2883-2886.
- [3] Jasna, M., Pushkaran, N. K., Manoj, M., Aanandan, C., and Jayaraj, M., 2020. Facile preparation of lightweight and flexible PVA/PEDOT: PSS/MWCNT ternary composite for high-performance EMI shielding in the X-band through absorption mechanism. *Journal of Electronic Materials*, 49, pp. 1689-1701.
- [4] Shahzad, F. *et al.*, 2016. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes). *Science*, 353 (6304), pp. 1137-1140.
- [5] Li, Y. *et al.*, 2020. Reversible crumpling of 2D titanium carbide (MXene) nanocoatings for stretchable electromagnetic shielding and wearable wireless communication. *Advanced Functional Materials*, 30 (5), pp. 1907451.
- [6] Liu, J. *et al.*, 2020. Ultrastrong and highly conductive MXene-based films for high-performance electromagnetic interference shielding. *Advanced Electronic Materials*, 6 (1), pp. 1901094.

- [20] Wan, Y. *et al.*, 2016. Microwave absorption properties of FeCo-coated carbon fibers with varying morphologies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 399, pp. 252-259.
- [21] Moradi, H., Nasouri, K., and Askari, G., 2024. Effect of morphology and microstructure of NiCo nanoparticles on the electromagnetic shielding behavior of flexible and durable NiCo-coated carbon fibers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35 (1), pp. 89.
- [22] Moradi, H., Nasouri, K., and Askari, G., 2025. Designing, modeling, and multi-response optimization of Ni/Co-coated carbon fibers for electromagnetic shielding and electrothermal applications. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 172, pp. 106116.
- [23] Nasouri, K., Shoushtari, A. M., and Mojtahedi, M. R. M., 2016. Theoretical and experimental studies on EMI shielding mechanisms of multi-walled carbon nanotubes reinforced high performance composite nanofibers. *Journal of Polymer Research*, 23, pp. 1-8.
- [24] Sassi, W., Dhouibi, L., Berçot, P., Rezrazi, M., and Triki, E., 2012. Comparative study of protective nickel-tungsten deposit behavior obtained by continuous and pulsed currents from citrate-ammonia media. *Surface and Coatings Technology*, 206 (19-20), pp. 4235-4241.
- [25] Manjunatha, M., Reddy, G. S., Mallikarjunaiah, K., Damle, R., and Ramesh, K., 2019. Determination of phase composition of cobalt nanoparticles using ^{59}Co internal field nuclear magnetic resonance. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32, pp. 3201-3209.
- [26] Kruželák, J., Kvasničáková, A., Hložeková, K., and Hudec, I., 2021. Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. *Nanoscale Advances*, 3 (1), pp. 123-172.
- [27] Ranjkesh, Z. and Nasouri, K., 2022. Facile synthesis of novel porous nickel/carbon fibers obtained from cigarette butts for high-frequency microwave absorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10 (1), pp. 106969.
- [28] Song, Y. *et al.*, 2006. Microfluidic synthesis of cobalt nanoparticles. *Chemistry of materials*, 18 (12), pp. 2817-2827.
- [29] Shen, Y. *et al.*, 2019. Tunable microwave absorption properties of nickel-carbon nanofibers prepared by electrospinning. *Ceramics International*, 45 (3), pp. 3313-3324.
- [30] Khajeh, E., Nasouri, K., Askari, G., and Mandegari, M., 2024. Flexible and lightweight metalized polyamide nonwoven for electromagnetic interference shielding, electrothermal, photothermal, and antibacterial applications. *Chemical Engineering Journal*, 502, pp. 158203.
- [31] Wu, N. *et al.*, 2021. Review on the electromagnetic interference shielding properties of carbon based materials and their novel composites: Recent progress, challenges and prospects. *Carbon*, 176, pp. 88-105.
- [32] Ucpinar Durmaz, B., Salman, A. O., and Aytac, A., 2023. Electromagnetic interference shielding performances of carbon-fiber-reinforced PA11/PLA composites in the X-band frequency range. *ACS omega*, 8 (25), pp. 22762-22773.
- [33] Jaroszewski, M., Thomas, S., and Rane, A. V., 2018. *Advanced materials for electromagnetic shielding: fundamentals, properties, and applications*. pp .
- [34] Hu, L .and Kang, Z., 2021. Enhanced flexible polypropylene fabric with silver/magnetic carbon nanotubes coatings for electromagnetic interference shielding. *Applied Surface Science*, 568, pp. 150845.
- [35] Ganguly, S., Bhawal, P., Ravindren, R., and Das, N. C., 20 .¹ Polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding: a review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18 (11), pp. 7641-7669.
- [36] Darvishzadeh, A. and Nasouri, K., 2021. Manufacturing, modeling, and optimization of nickel-coated carbon fabric for highly efficient EMI shielding. *Surface and Coatings Technology*, 409, pp. 126957.
- [37] Liu, Y., Zhang, Z., Xiao, S., Qiang, C., Tian, L., and Xu, J., 2011. Preparation and properties of cobalt oxides coated carbon fibers as microwave-absorbing materials. *Applied Surface Science*, 257 (17), pp. 7678-7683.
- [38] Gholampoor, M., Movassagh-Alanagh, F., and Salimkhani, H., 2017. Fabrication of nano-Fe₃O₄ 3D structure on carbon fibers as a microwave absorber and EMI shielding composite by modified EPD method. *Solid State Sciences*, 64, pp. 51-61.
- [39] Wang, R., Yang, H., Wang, J., and Li, F., 2014. The electromagnetic interference shielding of silicone rubber filled with nickel coated carbon fiber. *Polymer testing*, 38, pp. 53-56.