

Synthesis and characterization of reduced graphene oxide with magnetized polyaniline for electromagnetic shielding

Mohammad Tajik Ijdani¹, Ali Maleki^{2,*}

1- MSc, Department of Organic Chemistry, University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Organic Chemistry, University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Interference of unwanted electromagnetic waves is a concern in military and industrial applications. Extensive research has focused on electromagnetic interference shielding materials, including radar absorbing coatings. Materials with dielectric or magnetic properties such as magnetite and polymers have been effective absorbers. Metals and carbon materials have also been investigated. However, reduced graphene oxide (RGO) has poor impedance matching. Combining RGO with magnetic materials improves impedance matching. Ternary and quaternary nanocomposites, including conducting polymers, are promising for absorption of microwave and radio waves. This study focuses on RGO/Fe₃O₄ nanoporous composites based on polyaniline. These composites show exceptional electromagnetic wave absorption properties and their synthesis is done in a simple way. This study contributes to electromagnetic interference shielding materials and highlights the potential of RGO/Fe₃O₄/PANI composites.

Keywords

Reduced graphene oxide, Polyaniline, Magnetic nanocomposites, Impedance matching, Wave absorber materials, Electromagnetic interference

Article history:

Received: 25-09-2023

Accepted: 21-10-2023

Corresponding author:

* maleki@iust.ac.ir

سنتز و شناسایی اکسید گرافن احیا شده با پلی آنیلین مغناطیسی شده برای محافظت الکترومغناطیسی

محمد تاجیک ایجدانی^۱، علی ملکی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه شیمی آلی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- استاد، گروه شیمی آلی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

تداخل امواج الکترومغناطیسی ناخواسته یک نگرانی در کاربردهای نظامی و صنعتی می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای بر روی مواد محافظ تداخل الکترومغناطیسی، از جمله پوشش‌های جذب‌کننده رادار متمرکز شده است. مواد با خواص دی‌الکتریک یا مغناطیسی مانند مگنتیت و پلیمرها، جاذب مؤثری بوده‌اند. فلزات و مواد کربنی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این حال، اکسیدگرافن کاهش‌یافته (RGO) تطبیق امپدانس ضعیفی دارد. ترکیب RGO با مواد مغناطیسی تطبیق امپدانس را بهبود می‌بخشد. نانوکامپوزیت‌های سه‌گانه و چهارگانه، از جمله پلیمرهای رسانا، نویدبخش جذب امواج میکروویو و رادیویی هستند. این مطالعه بر روی کامپوزیت‌های نانومتخلخل RGO/Fe₃O₄ بر پایه پلی آنیلین تمرکز دارد. این کامپوزیت‌ها خواص جذب امواج الکترومغناطیسی استثنایی را از خود نشان می‌دهند و سنتز آنها از به یک روش ساده انجام می‌شود. این مطالعه به مواد محافظ تداخل الکترومغناطیسی کمک کرده و پتانسیل کامپوزیت‌های RGO/Fe₃O₄/PANI را برجسته می‌کند.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۷/۲۹

اکسیدگرافن احیا شده، پلی آنیلین، نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی، تطبیق امپدانس، مواد جذاب موج، تداخل الکترومغناطیسی

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

تداخل موج الکترومغناطیسی یک اتفاق نامطلوب از تشعشعات منشأ گرفته از ابزار و وسایل الکترونیکی مختلف در فرکانس‌های مختلف است. به همین دلیل جذب امواج الکترومغناطیسی در ناحیه‌های مایکروویو و رادیویی برای کاربردهای نظامی و صنعتی، یکی از مسائل بسیار مهم به شمار می‌آید [۱]. در همین راستا، پس از جنگ جهانی دوم، مواد متنوع جدیدی به عنوان جاذب رادار و تکنولوژی مایکروویو و رادیویی بررسی شده است. در سال‌های اخیر نیز مخفی کردن سازه‌های هوایی مانند هواپیما، پهپاد و ... مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در حقیقت، پوشش‌های جاذب رادار اعمال شده بر روی بدنه هواپیما باعث مخفی شدن هواپیما از دید رادار می‌شود. بنابراین، حجم قابل توجهی از تحقیقات بر روی توسعه مواد محافظ تداخل الکترومغناطیسی مناسب برای سرکوب چنین آلودگی‌های الکترومغناطیسی چه از طریق بازتاب، جذب یا بازتاب‌های متعدد متمرکز شده است [۲-۴]. برای ساخت مواد جاذب رادار اغلب از مواد دارای خواص دی‌الکتریکی یا مغناطیسی استفاده می‌شود که در اثر برخورد امواج الکترومغناطیسی، آن‌ها را جذب نموده و گرم شده که این عامل باعث جذب و ضعیف شدن امواج می‌شود. در بین موادهای مختلف، مگنتیت مانند فریت و پلیمرهای رسانا بهترین جاذب‌ها می‌باشند [۵-۷].

با توجه به این موضوع، فلزاتی مانند آهن، کبالت و نیکل به دلیل قابلیت انعکاس، رسانایی در کنترل آلودگی الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، کاربرد آن‌ها به دلیل مشکلات پردازش، وزن زیاد، انعطاف پذیری ضعیف و تخریب محیطی محدود شده است. همچنین چندین ماده کربنی مانند کربن سیاه، گرافیت، اکسیدگرافن احیا شده، نانولوله کربنی^۱ و نانوالیاف کربنی^۲ در کاربردهای محافظ تداخل الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۸]. در میان آن‌ها، کربن سیاه/گرافیت پراکندگی ضعیف و آستانه نفوذ بالا را نشان می‌دهد که منجر به عملکرد ضعیف محافظ تداخل الکترومغناطیسی آن‌ها می‌شود. در مقابل، سایر مواد کربن دار به دلیل هزینه، خالص سازی و مراحل طولانی مدت عامل دار کردن، به صراحت در محافظ تداخل الکترومغناطیسی ترجیح داده نمی‌شوند [۹].

در سال‌های اخیر، اکسیدگرافن احیا شده^۳ به دلیل خواص منحصر به فرد خود توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است [۱۰، ۱۱]. با این حال، صفحات RGO به تنهایی در جذب

موج الکترومغناطیسی به دلیل مکانیسم تطبیق امپدانس^۴ ضعیف آن مطلوب نیستند [۱۲]. بنابراین، چندین ماده مغناطیسی مانند Fe_3O_4 ، NiFe_2O_4 ، CoFe_2O_4 ، Ni به منظور بهبود تطابق امپدانس با گرافن ترکیب شده‌اند [۱۳، ۱۴].

اخیراً نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی و چهارتایی به دلیل ویژگی‌های جذب عالی مایکروویو و رادیویی مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند [۱۵-۱۷]. در این زمینه، پلیمرهای رسانا به دلیل رسانایی قابل تنظیم، گذردهی یا نفوذپذیری قابل انطباق، چگالی کم، هزینه کم، سنتز آسان و پایداری محیطی خوب، همواره در ساخت کامپوزیت‌های سه‌تایی به کار رفته‌اند [۱۸]. کامپوزیت‌ها را می‌توان به قطبش دوقطبی، اسپین الکترونیکی و پلاریزاسیون بار چند رابط تولید شده در سیستم سه‌تایی نسبت داد. علاوه بر این، حضور گرافن در این کامپوزیت‌های سه‌تایی نیز می‌تواند دلیل جریان گردابی ناشی از میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط مولفه مغناطیسی و جذب تشعشعات موج الکترومغناطیسی باشد. علاوه بر این، گذردهی/نفوذپذیری پیچیده و تطبیق امپدانس نیز نقش کلیدی ایفا می‌کنند [۱۹، ۲۰].

در این مطالعه، کامپوزیت‌های نانومتخلخل $\text{RGO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ بر پایه‌ی از پلی آنیلین با موفقیت با روش سنتز ساده یک تک ظرف و سپس تحت شرایط تجزیه حرارتی تهیه شدند. نانوذرات Fe_3O_4 به‌خوبی توزیع شده به طور یکنواخت در ماتریس گرافن اکساید احیا شده شدند. کامپوزیت‌های $\text{RGO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ با ضخامت ۰/۴۵ میلی‌متر عملکرد جذب امواج الکترومغناطیسی قابل توجهی در محدوده فرکانسی ۲ تا ۸ گیگاهرتز از خود نشان دادند. اثرات هم‌افزایی از دست دادن دی‌الکتریک نسبت داده شده به آرام‌سازی^۵ و تلفات مغناطیسی تولید شده از تشدید طبیعی و رزونانس تبادل در افزایش خاصیت جذب امواج الکترومغناطیسی کامپوزیت‌های $\text{RGO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ مؤثر است.

۲- تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

کلرید آهن (III) هگزا هیدرات ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) با خلوص ۹۹٪ ساخت مرک آلمان، آهن (II) سولفات هپتاهیدرات ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) با خلوص ۹۹٪ ساخت سیگما آلدردیج، آمونیوم پرسولفات ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) با خلوص ۹۸٪ ساخت مرک آلمان، آنیلین با خلوص ۹۹٪ ساخت مرک آلمان، اسید کلریدریک (HCl) با خلوص ۳۷٪ ساخت مرک آلمان، اتانول ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) با خلوص ۹۹٪ ساخت مرک آلمان، محلول آمونیاک با خلوص ۲۵٪ ساخت مرک آلمان، آب مقطر، هیدرازین هیدرات ($\text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

1- Carbon Nanotube (CNT)

2- Carbon Nanofiber (CNF)

3- Reduced Graphene Oxide (RGO)

4- Impedance

5- multiple relaxation

۳-نتایج و بحث

۳-۱- بررسی طیف زیرقرمز نانو ذرات مغناطیسی rGO/Fe₃O₄/PANI

در طیف زیر قرمز تبدیل فوریه rGO/Fe₃O₄/PANI (شکل ۱) یک پیک پهن اطراف 3400 cm^{-1} مشاهده می‌شود که مربوط به ارتعاش کششی O-H است، این پیک به جذب مولکول‌های آب از هوا بر سطح ساختار سنتز شده نسبت داده می‌شود که پهن شدگی آن به علت تأثیر پیوند هیدروژنی است. یک پیک اطراف 1630 cm^{-1} مربوط به حالت خمشی آب است. یک پیک‌های ساختار گرافن اکساید ارتعاشات کشش پیوند C-O و پیوند C=C می‌باشد که در 1460 cm^{-1} و 1172 cm^{-1} ظاهر شده و یک پیک در حدود 1290 cm^{-1} مشاهده می‌شود که مربوط به ارتعاش کششی متقارن پیوند کوالانسی C-N است. نوارهای ظاهر شده در عددهای موجی 2855 cm^{-1} و 2923 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی C-H بخش‌های آلیفاتیک ساختار گرافن اکساید و گرافن اکساید احیاشده می‌باشد.

۳-۲- بررسی نتایج حاصل از آنالیز متفرق کننده اشعه ایکس rGO/Fe₃O₄/PANI

برای تأیید عناصر موجود در ساختار rGO/Fe₃O₄/PANI از سیستم آنالیز متفرق کننده اشعه ایکس استفاده شد که طیف حاصل در شکل ۲ آورده شده است. این آنالیز وجود عناصر آهن، اکسیژن و کربن را در ساختار نمونه تأیید می‌کند. شکل ۲ تجزیه و تحلیل EDX پراکنده انرژی نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI را نشان می‌دهد. همانطور که در (شکل ۲ الف) برای نانوکامپوزیت مشاهده می‌شود، وجود کربن، اکسیژن را برای گرافن اکساید احیاشده با این تجزیه و تحلیل اثبات شد. (شکل ۲ ب) نشان می‌دهد که ساختار rGO/Fe₃O₄ با نشان دادن حضور عناصر نیتروژن، کربن، اکسیژن و آهن مرتبط است. (شکل ۲ ج) عناصر نیتروژن، کربن، اکسیژن و آهن rGO/Fe₃O₄/PANI تشخیص داده شد که نشان دهنده‌ی شدت عنصر کربن و نیتروژن به وضوح دیده می‌شود. وجود پیک طلا به علت استفاده از این فلز به عنوان یک پوشش رسانا در آنالیز متفرق کننده اشعه ایکس می‌باشد.

۳-۳- بررسی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی rGO/Fe₃O₄/PANI

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۳) اطلاعات دقیقی در مورد اندازه ذرات و مورفولوژی ساختار نانوکامپوزیت در اختیار ما قرار می‌دهد. این تصویر نشان می‌دهد که ساختار گرافن اکساید و گرافن اکساید احیا شده به درستی سنتز شده اند و ساختار ورقه ورقه

خلوص ۸۰٪ ساخت سیگما آلدریج، سدیم نیترات (NaNO₃) با خلوص ۹۹٪ ساخت مرک آلمان، سولفوریک اسید (H₂SO₄) با خلوص ۹۷٪ ساخت مرک آلمان، پتاسیم پرمنگنات (KMnO₄) با خلوص ۹۹٪ ساخت مرک آلمان، هیدروژن پراکسید (H₂O₂) با خلوص ۳۰٪ ساخت سیگما آلدریج، سدیم دودسیل بنزن سولفونات (SDBS) با خلوص ۹۹٪ ساخت سیگما آلدریج و گرافیت با مش Micro-20 با خلوص ۹۹٪ ساخت سیگما آلدریج.

۲-۲- سنتز RGO/SDBS

۲۰۰ میلی‌گرم گرافن اکساید سنتز شده به وسیله روش هامر را با ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر در یک بالن ۲۵۰ مخلوط کرده و به مدت ۳۰ دقیقه تحت التراسونیک قرار داده شده است. سپس، ۲۰۰ میلی گرم SDBS و ۲ میلی لیتر هیدرازین هیدرات به محلول قبلی اضافه شده و برای ۳۰ دقیقه تحت استیرر قرار بگیرد. سپس محلول بدست آمده را در حمام روغن با دمای ۹۰ درجه سانتی گراد برای ۲۴ ساعت قرار داده تا ماده مورد نظر RGO/SDBS تشکیل شود.

۲-۳- سنتز کامپوزیت RGO/Fe₃O₄

۱/۸ گرم (۶/۴ میلی مول) FeSO₄·7H₂O و مقدار ۳/۵۰۱ گرم FeCl₃·6H₂O (۱۲/۹ میلی مول) را در ۵۰ میلی لیتر آب مخلوط کرده و به بالن ۲۵۰ میلی‌لیتر مرحله قبل که شامل ۵۰ میلی لیتر RGO/SDBS (۲ میلی گرم / میلی لیتر) اضافه و حل کرده است. سپس آمونیاک را به صورت قطره ای به محلول تهیه شده در دمای محیط و تحت استیرر اضافه می‌کنیم. محلول مورد نظر را چندین بار شسته و فیلتر کرده و سپس در آون خلا با دمای ۶۰ درجه خشک شده است.

۲-۴- سنتز RGO/Fe₃O₄/PANI و Fe₃O₄/PANI

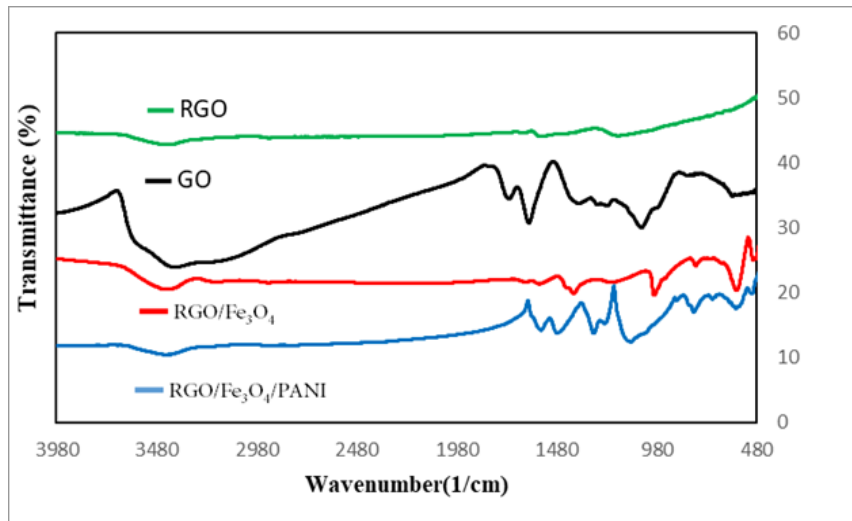
در این مرحله ۷۵۰ میلی گرم از RGO/Fe₃O₄ را به ۵۰ میلی لیتر مخلوط HCl (۱ نرمال) اضافه کرده، ۱ میلی لیتر آنیلین در یک بالن ته گرد ۱۰۰ میلی لیتر افزوده و در حمام یخ قرار می‌دهیم. سپس، آنیلین به وسیله اضافه کردن ۲/۶۲۴ گرم APS در دمای صفر درجه برای ۲۴ ساعت پلیمریزاسیون اتفاق می‌افتد. در نهایت، محصول نهایی فیلتر شده و بعد از شستن چندین بار توسط آب و اتانول در آون خلا در دمای ۶۰ درجه برای ۲۴ ساعت خشک شد. برای سنتز Fe₃O₄/PANI، شرایط مثل قبلی است تنها به جای RGO/Fe₃O₄ از ۷۰۰ میلی گرم Fe₃O₄ استفاده شد.

۲-۵- سنتز Fe₃O₄ و اکسیدگرافن کاهش یافته

Fe₃O₄ با همان روش در غیاب اکسیدگرافن احیا شده محلول در آب سنتز شد و RGO در غیاب SDBS از اکسید گرافیت تولید شد.

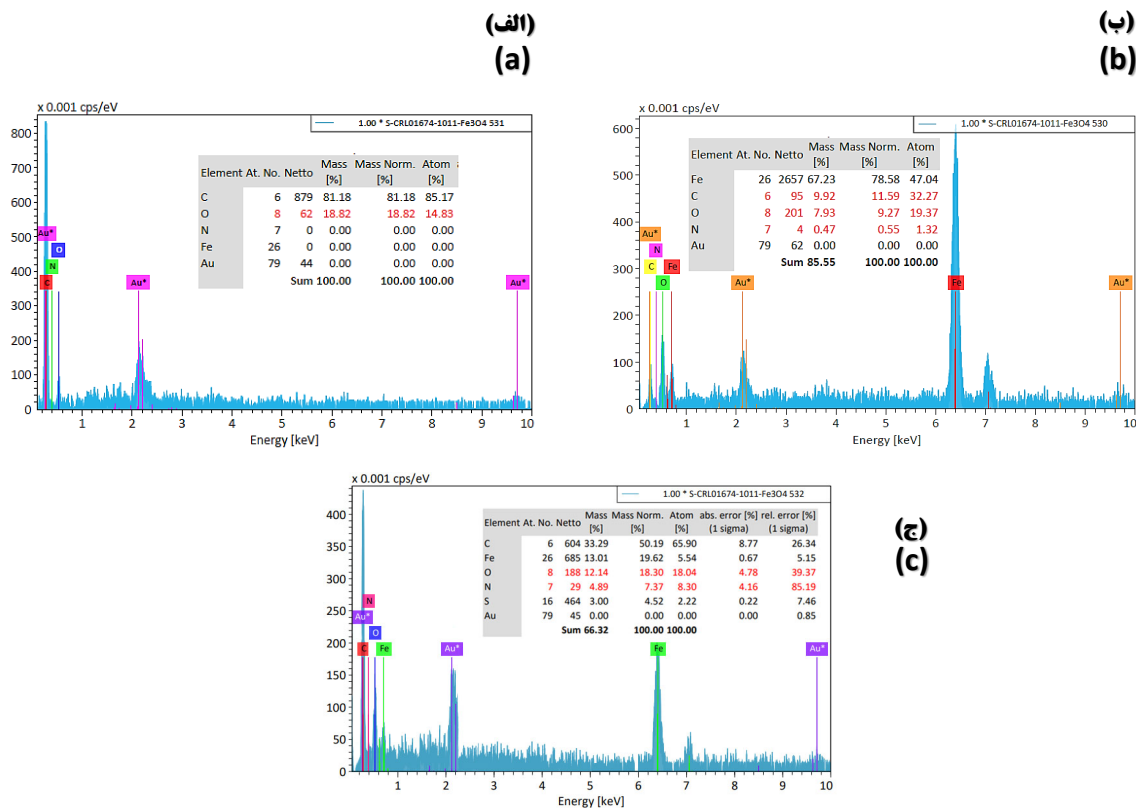
شده است، ساختار کامپوزیت‌های rGO/Fe₃O₄/PANI ممکن است از طریق مسیر زیر تشکیل شود: ذرات پلی آنیلین در فضای بین لایه‌های گرافن اکساید احیاشده در فرآیند پلیمریزاسیون قرار می‌گیرند، سپس ذرات پلیمر آنیلین روی سطح کامپوزیت

ای در آن واضح دیده شده است. شکل (۳ ب)، نانوذرات مغناطیسی Fe₃O₄ بصورت کره‌ای بر روی صفحات گرافن اکساید دیده شد و به دلیل انرژی سطح بالای ذرات مغناطیسی و برهمکنش بین آنها تا حدی تجمع یافته اند. همانطور که در شکل (۳ ج) نشان داده



شکل ۱. مقایسه طیف مادون قرمز (الف) RGO (ب) GO (ج) Fe₃O₄/RGO (د) PANI/Fe₃O₄/RGO.

Figure 1. Comparison of infrared spectrum (a) RGO (b) GO (c) Fe₃O₄/RGO (d) PANI/Fe₃O₄/RGO.



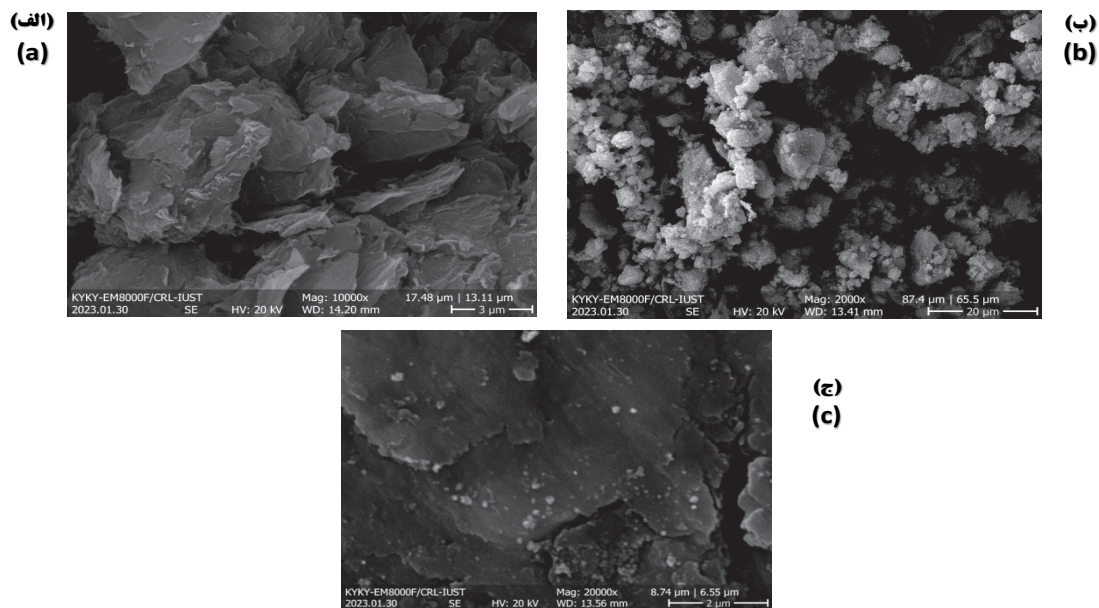
شکل ۲. آنالیز عنصری متفرق کننده اشعه ایکس نانوکامپوزیت‌های (الف) RGO (ب) Fe₃O₄/RGO (ج) PANI/Fe₃O₄/RGO.

Figure 2. EDX of (a) rGO, (b) rGO/Fe₃O₄ and (c) rGO/Fe₃O₄/PANI nanocomposites.

حرارتی بالاتری را در مقایسه با GO نشان می‌دهد که دلیل آن گرافیت شدن و تقویت نیروهای واندروالس بین لایه‌ها از طریق حذف گروه‌های عاملی اکسیژن است. منحنی‌های تجزیه و تحلیل حرارتی هر دو GO و rGO روند مشابهی را منعکس می‌کنند که نشان‌دهنده محتوای نزدیک آن‌ها از گروه‌های اکسیژن‌دار است، همانطور که داده‌های FTIR نشان داد کاهش وزن ۵ درصدی rGO/Fe₃O₄ بین ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تا ۸۰۰ می‌باشد و این نشان‌دهنده پایداری حرارتی نانوکامپوزیت است. کاهش جرم ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در rGO/Fe₃O₄/PANI نشان‌دهنده ازدست‌دادن پلیمرهای

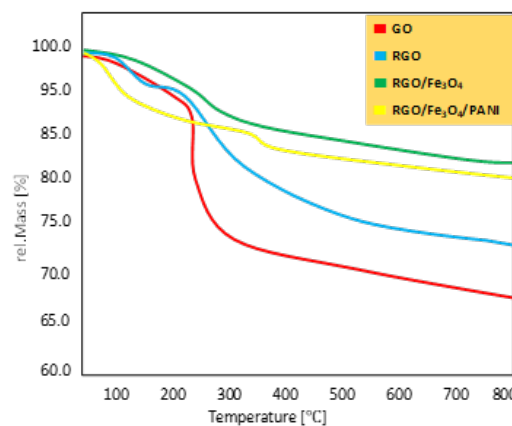
rGO/Fe₃O₄ می‌پوشند.

۳-۴- بررسی آنالیز توزین حرارتی rGO/Fe₃O₄/PANI
شکل ۴ منحنی‌های تجزیه و تحلیل حرارتی (TGA) ترکیبات GO و rGO را نشان می‌دهد. در GO، حداقل کاهش وزن (~۵%) قبل از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تبخیر یا ازدست‌دادن مولکول‌های آب داده می‌شود. کاهش وزن قابل توجه (~۲۵%) در محدوده ۲۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و کاهش وزن ضعیف‌تر (~۱۰%) در محدوده ۲۵۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب نشان‌دهنده از دست رفتن و انتشار CO₂، CO و بخار و H₂O از حساس‌ترین گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار است. از سوی دیگر، rGO پایداری



شکل ۳. تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های (الف) rGO (ب) Fe₃O₄/rGO (ج) rGO/Fe₃O₄/PANI.

Figure 3. SEM images of (a) rGO, (b) rGO/Fe₃O₄ and (c) rGO/Fe₃O₄/PANI nanocomposites.

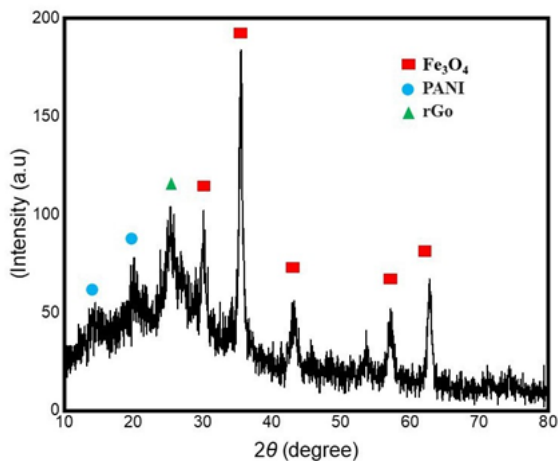


شکل ۴. آنالیز توزین حرارتی (الف) GO (ب) rGO (ج) Fe₃O₄/rGO (د) PANI/Fe₃O₄/RGO.

Figure 4. TGA of (a) GO (b) rGO (c) Fe₃O₄/RGO (d) PANI/Fe₃O₄/RGO.

۳-۶- بررسی الگوی پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI

الگوهای XRD نانوکامپوزیت‌های تهیه شده با روش‌های مختلف سنتز مشخص و مقایسه شدند، همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است. پیک‌های ۱۴/۵ و ۲۱/۶ نشان دهنده‌ی پلی آنیلین و پیک ۲۵/۵ درجه نشان دهنده‌ی گرافن اکساید می‌باشد. الگو پنج پیک شاخص در ۲θهای (۲۲۰)°، ۳۰/۱۷، (۳۱۱)°، ۳۵/۴، (۴۰۰)°، ۴۳/۱، (۴۲۲)°، ۵۶/۹ و (۴۴۰)° برای نمونه قابل مشاهده است. پیک‌های مشاهده شده می‌تواند به صفحات اسپنیل معکوس ساختار Fe₃O₄ مربوط باشد که به خوبی با شماره کارت مرجع (JCPDS #۰۱-۰۸۸-۱۳۰) که در سیستم بلوری مکعبی متبلور می‌شود مطابقت دارد. پیک‌های تیز بر این مساله تاکید دارند که ساختار Fe₃O₄ به شدت بلوری است.



شکل ۶. الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت PANI/Fe₃O₄/RGO

Figure 6. XRD pattern of rGO/Fe₃O₄/PANI nanocomposites.

۳-۷- بررسی جذب امواج ریز موج نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI

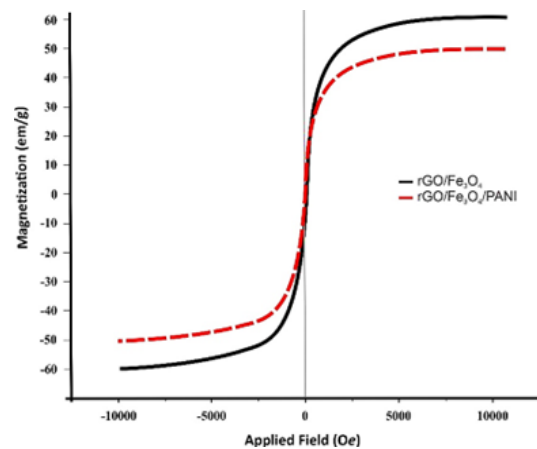
خواص افت انعکاس نانوکامپوزیت‌های تهیه شده در بسامدهای نوار S (۲-۸ GHz) نوار C (۴-۸ GHz) در ضخامت‌های مختلف‌های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. بررسی خواص جذب میکروویو در مواد کامپوزیتی متشکل از اکسیدگرافن rGO و Fe₃O₄ پلی آنیلین نتایج جالبی را به همراه داشت. این مطالعه عملکرد مواد را از طریق مقادیر ازدست‌دادن بازتاب (RL) ارزیابی می‌کرد. قابل ذکر است، این مواد نانوکامپوزیتی قابلیت‌های جذب میکروویو متنوعی ارائه می‌کنند که پتانسیل آنها را برای کاربردهای چندوجهی نشان می‌دهد.

- 1- S-band
- 2- C-band
- 3- Reflection Loss

آنیلین می‌باشد که نسبت به نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄ افت پلی آنیلین قابل محسوس است.

۳-۵- تعیین ممان مغناطیسی با روش مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش rGO/Fe₃O₄/PANI

آنالیز VSM که مغناطیس شدگی را نشان می‌دهد، مغناطیسی شدن rGO/Fe₃O₄/PANI را تأیید می‌کند. در شکل ۵ منحنی مشکی رنگ rGO/Fe₃O₄ است و مقدار مغناطیسی اشباع در نمونه حدود ۶۰/۱ emu/g می‌باشد. منحنی قرمز رنگ میزان مغناطیس شدگی rGO/Fe₃O₄/PANI را نشان می‌دهد مقدار مغناطیسی اشباع در نمونه حدود ۵۰/۳ emu/g از نتایج حاصل از این آنالیز این گونه بر آورد می‌شود که نمونه رفتار سوپرپارامغناطیس از خود نشان می‌دهد به این دلیل که این دسته از مواد یک حلقه پسماند تعریف شده در آزمایش VSM ندارند و منحنی مغناطیسی نسبتاً مسطح در ناحیه صفر، از خواص ویژه مواد سوپرپارامغناطیس است [۲۱،۲۲] که یک مشخصه مهم می‌باشد و آن‌ها را از مواد فرومغناطیسی که یک حلقه پسماند مشخص با مغناطش و نیروی اجباری پسماند غیر صفر نشان می‌دهند، متمایز می‌کند. رفتار سوپرپارامغناطیس مشخصه ذرات مغناطیسی بسیار کوچک مثل نانوذرات است و نتیجه نوسانات حرارتی است که باعث می‌شود گشتاورهای مغناطیسی به سرعت جهت را تغییر دهند. مواد سوپرپارامغناطیس خاصیت مغناطیسی پسماند یا نیروی اجباری قابل توجهی ندارند، زیرا مغناطش آنها به دما و وجود میدان مغناطیسی خارجی بسیار حساس است. شکل ۵ طیف VSM مربوط به نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄ همراه با rGO/Fe₃O₄/PANI را نمایش می‌دهد. که کاهش خاصیت مغناطیسی دال بر پوشش دار شدن سطح نانوکامپوزیت می‌باشد.

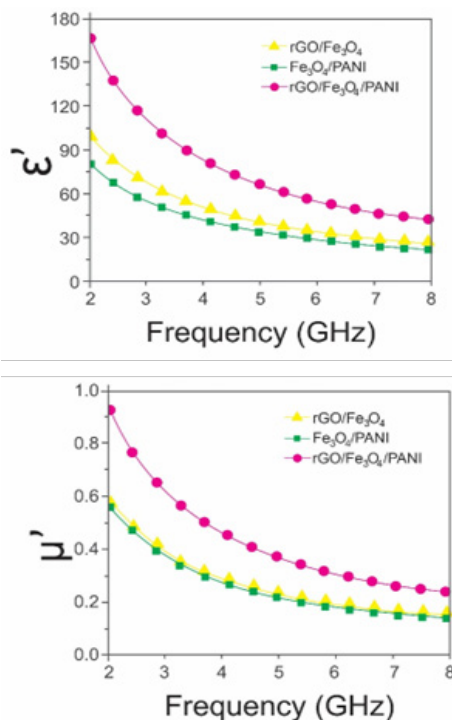


شکل ۵. مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش نانوکامپوزیت‌های (الف) Fe₃O₄/RGO

(ب) PANI/Fe₃O₄/RGO

Figure 5. VSM diagram of (a) rGO/Fe₃O₄ and (b) rGO/Fe₃O₄/PANI nanocomposites.

حضور پلی آنیلین باعث افزایش نفوذپذیری الکتریکی کامپوزیت شد. البته به علت تطابق مناسب مقاومت کامپوزیت علت اصلی جذب را می‌توان به پخش شدگی امواج همچنین نفوذ آن به محیط جاذب نسبت داد.



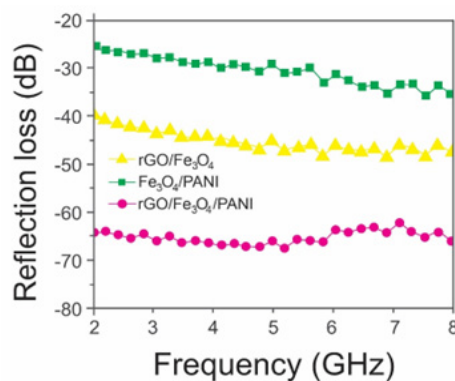
شکل ۸. منحنی‌های نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی rGO/Fe₃O₄/PANI. Figure 8. Magnetic and electrical permeability curves of rGO/Fe₃O₄/PANI nanocomposites.

۴- نتیجه گیری

در اینجا، ما استفاده از پودر اکسیدگرافن احیا شده با پلی آنیلین پارامغناطیسی تهیه شده را به عنوان یک جاذب خوب در محدوده نوار S (۲-۸ GHz) و نوار C (۴-۸ GHz) گزارش می‌کنیم. ساختار پارامغناطیسی می‌تواند جذب موج را حتی در درصد وزن کم در ماتریس پارافین به طرز قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد [۲۵]. جذب عالی در محدوده نوار S پتانسیل عالی پودر نانوکامپوزیت مغناطیسی را به عنوان جزء خوب برای توسعه جاذب های میکروویو کارایی بالا، نشان می‌دهد.

مطالعه جامع ما به نگرانی مهم تداخل امواج الکترومغناطیسی در کاربردهای نظامی و صنعتی می‌پردازد [۲۶، ۲۷]. ما تحقیقات گسترده‌ای در مورد مواد محافظ تداخل الکترومغناطیسی انجام داده‌ایم و بر توسعه و ارزیابی عملکرد کامپوزیت‌های نانومتخلخل rGO/Fe₃O₄ مبتنی بر پلی آنیلین متمرکز شده‌ایم. از طریق تحقیقات خود، ما سهم قابل توجهی در این زمینه داشته ایم و نشان

ترکیب Fe₃O₄ و پلی آنیلین عملکرد جذب میکروویو متوسطی را ایجاد کرد که احتمالاً به دلیل هم‌افزایی بین خواص مغناطیسی و هدایت الکتریکی است و آن را برای کاربردهایی مناسب می‌کند که در آن محافظ تداخل الکترومغناطیسی متوسط (EMI) مورد نیاز است. در مقابل، کامپوزیت RGO و Fe₃O₄ به طور قابل توجهی جذب افزایش یافته را نمایش می‌داد که نشان می‌دهد تعامل بین هدایت الکتریکی RGO و ویژگی‌های مغناطیسی Fe₃O₄ به مقادیر RL بهتری منجر می‌شود. با این حال، قابل توجه‌ترین عملکرد جذب میکروویو زمانی به دست آمد که هر سه جزء ترکیب شدند. کامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI با ضخامت ۰/۴۵ میلی‌متر خواص جذب استثنایی را نشان داد که بر مزایای هم‌افزایی ترکیب این مواد تأکید می‌کند. این کامپوزیت برای کاربردهای پیشرفته مانند فناوری پنهان کاری، مواد جذب رادار و محافظ قوی EMI مناسب است، جایی که به حداقل رساندن امواج الکترومغناطیسی منعکس شده از اهمیت بالایی برخوردار است. این یافته‌ها بر تطبیق پذیری این مواد کامپوزیتی برای کاربردهای مختلف جذب میکروویو، از جمله سیستم‌های رادار پیشرفته، دستگاه‌های ارتباطی، و محافظ تداخل الکترومغناطیسی (EMI) تأکید می‌کند.



شکل ۷. نمودار افت انعکاس از نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI. Figure 7. Reflection loss diagram of rGO/Fe₃O₄/PANI nanocomposites.

۳-۸ بررسی نفوذپذیری مغناطیسی، الکتریکی نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI

بر اساس نظریه‌ی خط انتقال، نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی از مهم‌ترین عوامل در میرایی امواج ریزموج درون جاذب است [۲۳، ۲۴] براین اساس نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی نمونه‌های جاذب مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که منحنی‌های نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی امواج برای نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI در شکل ۸ نشان داده شده طبق انتظار

های rGO/Fe₃O₄/PANI راه را برای اجرای عملی در کاربردهای نظامی، صنعتی و سایر کاربردهای مرتبط هموار می کند. این مطالعه بر اهمیت تحقیقات میان رشته‌ای تاکید و چشم‌انداز آینده امیدوارکننده در زمینه مواد جذب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می نماید.

داده‌ایم که مواد با خواص دی‌الکتریک یا مغناطیسی، مانند مگنتیت و پلیمرها، جاذب‌های مؤثر امواج الکترومغناطیسی هستند [۲۸-۳۱]. علاوه بر این، پتانسیل فلزاتی مانند آهن، کبالت و نیکل و همچنین مواد کربنی را برای محافظت از تداخل الکترومغناطیسی بررسی کرده‌ایم [۳۲-۳۵].

تحقیقات ما در مورد اکسیدگرافن احیا شده (rGO) تطابق امپدانس ضعیف برای جذب موج را نشان داد [۳۶،۳۷]. برای غلبه بر این محدودیت، مواد مغناطیسی مانند Fe₃O₄، NiFe₂O₄، CoFe₂O₄، نیکل و آهن کربونیل را با گرافن با موفقیت ترکیب کرده‌ایم که در نتیجه تطبیق امپدانس بهبود یافته است.

علاوه بر این، وجود گرافن، همراه با قطبش دوقطبی و اثرات رابط، به‌عنوان عامل مهمی شناخته شده است که جذب امواج الکترومغناطیسی را افزایش می‌دهد. ما از تکنیک‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل ترکیب، ساختار و خواص نانوکامپوزیت rGO/Fe₃O₄/PANI استفاده کرده‌ایم. تجزیه و تحلیل طیف مادون قرمز وجود پیوندها و گروه‌های عاملی خاص را تأیید کرد، در حالی که تجزیه و تحلیل پراکندگی اشعه ایکس ترکیب عنصری مورد تأیید قرار داد. تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بینش‌هایی را در مورد اندازه ذرات و مورفولوژی نانوکامپوزیت ارائه کرد و تجزیه و تحلیل توزین حرارتی ویژگی‌های پایداری حرارتی و کاهش وزن را نشان داد.

علاوه بر این، آنالیز مغناطیس‌سنج رفتار مغناطیسی نانوکامپوزیت را بررسی و الگوهای پراش اشعه ایکس حضور اکسیدگرافن و پلی آنیلین را تأیید کرد. تجزیه و تحلیل جذب مایکروویو خواص ازدست‌دادن انعکاس را ارزیابی و تجزیه و تحلیل نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی عوامل مؤثر بر تضعیف امواج مایکروویو را بررسی کرد.

به طور کلی، مطالعه ما عملکرد قابل توجه جذب امواج الکترومغناطیسی کامپوزیت‌های نانومتخلخل rGO/Fe₃O₄/PANI را بررسی می کند. این کامپوزیت‌ها باند جذب گسترده و خواص جذب مؤثر را نشان می دهند و از مکانیسم‌هایی مانند تلفات دی‌الکتریک، تلفات مغناطیسی و اثرات رزونانس استفاده می کنند [۳۸-۴۰].

در نتیجه، ما در تحقیقات خود در راستای کمک به تلاش‌های مداوم در توسعه مواد برای محافظت از تداخل الکترومغناطیسی حرکت کرده و به چالش‌های ناشی از تداخل امواج الکترومغناطیسی ناخواسته پرداخته [۴۱،۴۲] و بینش‌های امیدوارکننده‌ای را برای توسعه مواد پیشرفته با کاربردهای بالقوه در زمینه‌های مختلف ارائه کرده‌ایم. سنتز و تجزیه و تحلیل ترکیب موفقیت آمیز کامپوزیت

۵- مراجع

- [1] J. Mondal, and S. K. Srivastava, “ δ -MnO₂ nanoflowers and their reduced graphene oxide nanocomposites for electromagnetic interference shielding”, ACS Applied Nano Materials, Vol.3, (2020), 11048-11059.
- [2] B. Zohuri, and B. Zohuri, “Radar-Absorbent Material and Radar Cross Section”, Radar Energy Warfare and the Challenges of Stealth Technology, (2020), 147-203.
- [3] B. Noorbakhsh, A. Abdolali, and M. Janfirooz, “In-band radar cross-section reduction of the slot array antennas by RAM-based frequency selective surfaces”, IET Microwaves, Antennas & Propagation, Vol.15, (2021), 457-463.
- [4] M. Zainuri, and D. Andryani. (2019). Characterization of BaM and PaNi-based Radar Absorbency (RAM) behavior with multilayer geometry structure for x-band absorption. Materials Science Forum,
- [5] S. Sankaran, K. Deshmukh, M. B. Ahamed, and S. K. Pasha, “Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: A review”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.114, (2018), 49-71.
- [6] Q. Abbas, G. Murtaza, N. Muhammad, M. Ishfaq, H. Iqbal, A. Asad, G. A. Ashraf, and M. Z. Iqbal, “Structural, dielectric and magnetic properties of (ZnFe₂O₄/Polystyrene) nanocomposites synthesized by micro-emulsion technique”, Ceramics International, Vol.46, (2020), 5920-5928.
- [7] S. Goel, A. Garg, H. B. Baskey, M. K. Pandey, and S. Tyagi, “Studies on dielectric and magnetic properties of barium hexaferrite and bio-waste derived activated carbon composites for X-band microwave absorption”, Journal of Alloys and Compounds, Vol.875, (2021), 160028.
- [8] M.-S. Cao, X.-X. Wang, W.-Q. Cao, and J. Yuan, “Ultrathin graphene: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding”, Journal of Materials Chemistry C, Vol.3, (2015), 6589-6599.
- [9] G. Wang, G. Zhao, S. Wang, L. Zhang, and C. B. Park, “Injection-molded microcellular PLA/graphite nanocomposites with dramatically enhanced mechanical and electrical properties for ultra-efficient EMI shielding applications”, Journal of Materials Chemistry C, Vol.6, (2018), 6847-6859.
- [10] A. T. Smith, A. M. LaChance, S. Zeng, B. Liu, and L. Sun, “Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites”, Nano Materials Science, Vol.1, (2019), 31-47.
- [11] R. Tarcan, O. Todor-Boer, I. Petrovai, C. Leordean, S. Aștilean, and I. Botiz, “Reduced graphene oxide today”, Journal of Materials Chemistry C, Vol.8, (2020), 1198-1224.
- [12] M. Cao, C. Han, X. Wang, M. Zhang, Y. Zhang, J. Shu, H. Yang, X. Fang, and J. Yuan, “Graphene nanohybrids: excellent electromagnetic properties for the absorbing and shielding of electromagnetic waves”, Journal of Materials Chemistry C, Vol.6, (2018), 4586-4602.
- [13] S. Chhetri, N. C. Adak, P. Samanta, N. C. Murmu, S. K. Srivastava, and T. Kuila, “Synergistic effect of Fe₃O₄ anchored N-doped rGO hybrid on mechanical, thermal and electromagnetic shielding properties of epoxy composites”, Composites Part B: Engineering, Vol.166, (2019), 371-381.
- [14] M. Fu, Q. Jiao, and Y. Zhao, “Preparation of NiFe₂O₄ nanorod-graphene composites via an ionic liquid assisted one-step hydrothermal approach and their microwave absorbing properties”, Journal of Materials Chemistry A, Vol.1, (2013), 5577-5586.
- [15] C. Wang, Y. Ma, Z. Qin, J. Wang, and B. Zhong, “Synthesis of hollow spherical MoS₂@ Fe₃O₄-GNs ternary composites with enhanced microwave absorption performance”, Applied Surface Science, Vol.569, (2021), 150812.
- [16] M. Wu, X. Qi, R. Xie, Z. Bai, S. Qin, W. Zhong, and C. Deng, “Graphene oxide/carbon nanotubes/CoxFe₃-xO₄ ternary nanocomposites: Controllable synthesis and their excellent microwave absorption capabilities”, Journal of Alloys and Compounds, Vol.813, (2020), 151996.
- [17] R. Manna, and S. K. Srivastava, “Reduced graphene oxide/Fe₃O₄/polyaniline ternary composites as a superior microwave absorber in the shielding of electromagnetic pollution”, ACS omega, Vol.6, (2021), 9164-9175.
- [18] S. Varshney, A. Ohlan, V. Jain, V. Dutta, and S. Dhawan, “Synthesis of ferrofluid based nanoarchitected polypyrrole composites and its application for electromagnetic shielding”, Materials Chemistry and Physics, Vol.143, (2014), 806-813.
- [19] K. Manna, and S. K. Srivastava, “Fe₃O₄@ carbon@ polyaniline trilaminar core-shell composites as superior microwave absorber in shielding of electromagnetic pollution”, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Vol.5, (2017), 10710-10721.

- [20] S. K. Srivastava, and J. Pionteck, "Recent advances in preparation, structure, properties and applications of graphite oxide", *Journal of nanoscience and nanotechnology*, Vol.15, (2015), 1984-2000.
- [21] S. Laurent, S. Dutz, U. O. Häfeli, and M. Mahmoudi, "Magnetic fluid hyperthermia: focus on superparamagnetic iron oxide nanoparticles", *Advances in colloid and interface science*, Vol.166, (2011), 8-23.
- [22] M. Drogenik, I. Ban, D. Makovec, A. Žnidaršič, Z. Jagličić, D. Hanžel, and D. Lisjak, "The hydrothermal synthesis of super-paramagnetic barium hexaferrite particles", *Materials Chemistry and Physics*, Vol.127, (2011), 415-419.
- [23] J. Zhang, W. Hu, Z. Chen, P. Yang, K. Wang, X. Xie, B. Huang, L. Dong, and H. Wang, "Reliable Crack Monitoring Based on Guided Wave Through Periodically Loaded Transmission Line", *IEEE Sensors Journal*, Vol.23, (2023), 6799-6809.
- [24] M. Y. Frankel, S. Gupta, J. A. Valdmanis, and G. A. Mourou, "Terahertz attenuation and dispersion characteristics of coplanar transmission lines", *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol.39, (1991), 910-916.
- [25] M. Zahid, R. Anum, S. Siddique, H. F. Shakir, and Z. Rehan, "Polyaniline-based nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications: A review", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol.36, (2023), 1717-1761.
- [26] S. Naghdi, B. Jaleh, M. Eslamipناه, A. Moradi, M. Abdollahi, N. Einali, and K. Y. Rhee, "Graphene family, and their hybrid structures for electromagnetic interference shielding applications: Recent trends and prospects", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.900, (2022), 163176.
- [27] N. Devi, and S. S. Ray, "Electromagnetic interference cognizance and potential of advanced polymer composites toward electromagnetic interference shielding: A review", *Polymer Engineering & Science*, Vol.62, (2022), 591-621.
- [28] X. Wang, C. Li, H. Geng, J. Xie, Z. Chen, X. Zhang, C. Xiong, and S. Wang, "Tunable dielectric properties and electromagnetic wave absorbing performance of MoS₂/Fe₃O₄/PANI composite", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol.637, (2022), 128285.
- [29] X. Fang, L. Pan, J. Yao, S. Yin, Y. Wang, Q. Li, and J. Yang, "Controllable dielectric properties and strong electromagnetic wave absorption properties of SiC/spherical graphite-AlN microwave-attenuating composite ceramics", *Ceramics International*, Vol.47, (2021), 22636-22645.
- [30] D. Tahir, H. Heryanto, S. Ilyas, A. N. Fahri, R. Rahmat, M. H. Rahmi, Y. Taryana, and S. G. Sukaryo, "Excellent electromagnetic wave absorption of Co/Fe₂O₃ composites by additional activated carbon for tuning the optical and the magnetic properties", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.864, (2021), 158780.
- [31] L. Wang, M. Huang, X. Qian, L. Liu, W. You, J. Zhang, M. Wang, and R. Che, "Confined magnetic-dielectric balance boosted electromagnetic wave absorption", *Small*, Vol.17, (2021), 2100970.
- [32] R. Wilson, G. George, and K. Joseph. (2020). An introduction to materials for potential EMI shielding applications: Status and future. In *Materials for Potential EMI Shielding Applications* (pp. 1-8). Elsevier.
- [33] H. Alshahrani, and V. A. Prakash, "Development of highly flexible electromagnetic interference shielding composites for electronic applications using Cobalt/Hevea brasiliensis seed husk carbon dots/Bamboo microfibre-polyvinyl alcohol", *Industrial Crops and Products*, Vol.191, (2023), 115967.
- [34] C. Srinivas, K. N. Praveen, E. R. Kumar, S. Singh, S. S. Meena, P. Bhatt, T. C. Rao, D. Sarkar, B. Arun, and K. J. Raju, "Microwave absorption properties of rare earth (RE) ions doped Mn-Ni-Zn nanoferrites (RE= Dy, Sm, Ce, Er) to shield electromagnetic interference (EMI) in X-band frequency", *Ceramics International*, Vol.48, (2022), 33891-33900.
- [35] H. Liu, S. Wu, C. You, N. Tian, Y. Li, and N. Chopra, "Recent progress in morphological engineering of carbon materials for electromagnetic interference shielding", *Carbon*, Vol.172, (2021), 569-596.
- [36] S. Wang, Q. Li, K. Hu, Q. Liu, X. Liu, and X. Kong, "Activating microwave absorption performance by reduced graphene oxide-borophene heterostructure", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.138, (2020), 106033.
- [37] H. Zhang, N. Luo, T. Liu, F. Chen, and Q. Fu, "Light-weight, low-loading and large-sheet reduced graphene oxide for high-efficiency microwave absorber", *Carbon*, Vol.196, (2022), 1024-1034.
- [38] P. Singh, and S. Shukla, "Advances in polyaniline-based nanocomposites", *Journal of Materials Science*, Vol.55, (2020), 1331-1365.
- [39] E. Cui, F. Pan, Z. Xiang, Z. Liu, L. Yu, J. Xiong, X. Li, and W. Lu, "Engineering dielectric loss of FeCo/Polyvinylpyrrolidone core-shell nanochains@

graphene oxide composites with excellent microwave absorbing properties”, *Advanced Engineering Materials*, Vol.23, (2021), 2000827.

[40] Z. Liao, M. Ma, Z. Tong, R. Wang, Y. Bi, Y. Chen, K. L. Chung, and Y. Ma, “Fabrication of ZnFe₂O₄/C@ PPy composites with efficient electromagnetic wave absorption properties”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.602, (2021), 602-611.

[41] N. Wu, Q. Hu, R. Wei, X. Mai, N. Naik, D. Pan, Z. Guo, and Z. Shi, “Review on the electromagnetic interference shielding properties of carbon based materials and their novel composites: Recent progress, challenges and prospects”, *Carbon*, Vol.176, (2021), 88-105.

[42] Y. Chen, J. Li, T. Li, L. Zhang, and F. Meng, “Recent advances in graphene-based films for electromagnetic interference shielding: Review and future prospects”, *Carbon*, Vol.180, (2021), 163-184.