

## Synthesis and characterization of cobalt ferrite composites reinforced with reduced graphene oxide and polyaniline

Ali Maleki<sup>1,\*</sup>, Mohammad Tajik Ijdani<sup>2</sup>

1- Member of the faculty of Iran University of Science and Technology

2- Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology

### Abstract

Efficient microwave absorbing materials are critical for a variety of applications ranging from military aircraft to communications equipment. Addressing the challenges in reducing S-band (2-8 GHz) waves, this research focused on the development of high-performance microwave absorber materials and investigating the potential of graphene in combination with magnetic elements. Cobalt ferrite, known for its promising magnetic properties, forms the basis of these composites. However, the inherent limitations of pure  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  led to the investigation of new approaches, including the incorporation of graphene derivatives such as reduced graphene oxide (rGO) and conductive polymers such as polyaniline. This synthesis included combining iron salts, cobalt sources and rGO, optimizing specific chemical reactions to produce  $\text{rGO}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  and  $\text{rGO}/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  composites. Structural analysis through different techniques showed the presence of distinct functional groups, the morphology of the composites, their thermal and magnetic behaviors. Analysis of microwave absorption highlighted the effectiveness of the composite, especially at 7 GHz, in minimizing the reflection of electromagnetic waves. Also, the presence of polyaniline significantly increased the electrical permeability of the composite and contributed to the effective absorption of microwaves due to the appropriate matching of the composite resistance. In conclusion, the synthesized  $\text{rGO}/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  composite showed exceptional potential as an efficient microwave absorber material in the S-band range. This innovative ternary composite paves the way for advanced applications in diverse fields where attenuation of electromagnetic waves is important.

### Keywords

reduced graphene oxide, cobalt ferrite, polyaniline, magnetic nanocomposite, microwave absorption, S-band waves

### Article history:

Received: 28-10-2023

Accepted: 19-12-2023

### Corresponding author:

\* maleki@iust.ac.ir

## سنتز و شناسایی کامپوزیت‌های فریت کبالت تقویت شده با اکسید گرافن

### احیاء شده و پلی آنیلین

علی ملکی<sup>۱\*</sup>، محمد تاجیک ایجدانی<sup>۲</sup>

۱- دکتری تخصصی، دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

مواد جاذب میکروویو کارآمد برای کاربردهای مختلف که از هواپیمای نظامی تا تجهیزات ارتباطی را شامل می‌شود، حیاتی هستند. این تحقیق با پرداختن به چالش‌ها در کاهش امواج نوار S (۲ تا ۴ گیگاهرتز)، بر توسعه مواد جاذب میکروویو با کارایی بالا و بررسی پتانسیل گرافن در ترکیب با عناصر مغناطیسی متمرکز شد. فریت کبالت که به دلیل خواص مغناطیسی امیدوارکننده آن شناخته شده است، اساس این کامپوزیت‌ها را تشکیل می‌دهد. اما، محدودیت‌های ذاتی  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  خالص منجر به بررسی رویکردهای جدید، از جمله ادغام مشتقات گرافن مانند اکسید گرافن احیا شده (rGO) و پلیمرهای رسانا مانند پلی آنیلین شد. این سنتز شامل ترکیب نمک‌های آهن، منابع کبالت و rGO، بهینه‌سازی واکنش‌های شیمیایی خاص برای تولید کامپوزیت‌های  $\text{rGO}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{rGO}/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  بود. تجزیه و تحلیل ساختاری از طریق تکنیک‌های مختلف حضور گروه‌های عاملی متمایز، مورفولوژی کامپوزیت‌ها، رفتارهای حرارتی و مغناطیسی آنها را نشان داد. تجزیه و تحلیل جذب میکروویو، اثربخشی کامپوزیت را، به ویژه در ۷ گیگاهرتز، در بر حداقل رساندن بازتاب امواج الکترومغناطیسی برجسته کرد. همچنین، حضور پلی آنیلین به طور قابل توجهی نفوذپذیری الکتریکی کامپوزیت را افزایش داد و به جذب موثر امواج میکروویو به دلیل تطابق مناسب مقاومت کامپوزیت کمک کرد. در نتیجه، کامپوزیت  $\text{rGO}/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  سنتز شده پتانسیل استثنایی را به عنوان یک ماده جاذب میکروویو کارآمد در محدوده نوار S نشان داد. این کامپوزیت سه تایی نوآورانه، راه را برای کاربردهای پیشرفته در زمینه‌های متنوعی که تضعیف امواج الکترومغناطیسی مهم است، هموار می‌کند.

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۹/۲۸

اکسیدگرافن احیا شده، فریت کبالت، پلی آنیلین، نانوکامپوزیت مغناطیسی،

جذب میکروویو، امواج باند S

واژگان کلیدی

## ۱- مقدمه

مواد جذب مایکروویو به دلیل کاربردهای حیاتی خود در زمینه‌های هواپیماهای نظامی [۱]، حفاظت از محیط زیست [۲] و تجهیزات ارتباطی [۳] توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. از آنجایی که موج باند سانتی‌متری برای تشخیص رادار بسیار مهم است، بیشتر تحقیقات محافظت امواج بر روی این زمینه متمرکز هستند [۴-۶]. به طور خاص، جذب کارآمد موج نوار S<sup>۱</sup> (۲ تا ۴ گیگاهرتز) با باریک‌ترین عرض پرتو برای تشخیص راداری با کارایی بالا به دلیل دقت زاویه ای بالا و وضوح زاویه ای ایده آل است. امواج نوار S به دلیل طول موج بلندشان به راحتی تضعیف نمی‌شوند، بنابراین توسعه مواد جذب مایکروویو با کارایی بالا در محدوده نوار S یک کار بسیار چالش برانگیز بوده است. تاکنون مواد مختلفی به عنوان مواد جذب مایکروویو مانند پودرهای فلزی بسیار ریز و کربن سیاه رسانا مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷،۸]. با این حال، توسعه جذب های سبک وزن و با کارایی بالا با جذب کارآمد در محدوده نوار S (۲ تا ۴ گیگاهرتز) و نوار C<sup>۲</sup> (۴ تا ۸ گیگاهرتز) برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون برای تضعیف امواج مایکروویو با باند گسترده، هنوز یک چالش بزرگ است [۹].

گرافن به‌عنوان نازک‌ترین ماده از خانواده کربن، ویژگی‌های برجسته‌ای مانند وزن کم، پایداری حرارتی بالا، پایداری شیمیایی و تحرک حامل دارد و پتانسیل زیادی به عنوان یک ماده جذب مایکروویو نشان می‌دهد [۱۰]. با این حال، تضعیف بیشتر مایکروویو توسط گرافن خالص به دلیل تطبیق امپدانس ضعیف ناشی از تلفات دی الکتریک منفرد دشوار است [۱۱]. جذب عالی مایکروویو به طور کلی نیاز به مکمل کارآمد بین گذردهی نسبی و نفوذپذیری دارد. بنابراین، ترکیب یک ماده مغناطیسی با گرافن که دارای گروه‌های هیدروکسیل، اپوکسی و کربوکسیل است یکی از راه‌های موثر می‌باشد [۱۲،۱۳].

در ادامه، در مقایسه با نانوذرات Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> که قبلاً گزارش شده است [۱۴-۱۶]، فریت کبالت (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) مزایای بسیاری از جمله خواص مغناطیسی عالی، پایداری شیمیایی خوب، و استحکام مکانیکی بالا را نشان می‌دهد که آن را به تمرکز تحقیقاتی در زمینه جذب مایکروویو تبدیل می‌کند [۱۷]. در طی چند دهه گذشته، جذب‌های مختلف مایکروویو CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> با مورفولوژی‌های مختلف مانند کروی، توخالی و راگی شکل<sup>۳</sup> به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۸]. با این وجود، بدون توجه به چگونگی تطبیق ضخامت و تنظیم مقدار اضافی آن، شدت جذب CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> خالص

نمی‌تواند مقادیر RL زیر ۱۰- دسی بل را در ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز به دست آورده و به پهنای باند جذب موثر دست یابد. عملکرد ضعیف جذب عمدتاً به دلیل عدم تلفات دی الکتریک و عدم تطابق امپدانس آن بود. برای بهبود خواص جذب آن، انواع ترکیبات کربن CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> با موفقیت تهیه شده است [۱۹-۲۱].

گزارشات پیشین نشان داده‌اند که پلیمرهای رسانا متعلق به جاذب های مایکروویو از نوع تلفات الکتریکی هستند [۲۲،۲۳]. تعداد زیادی از نتایج تجربی بیانگر این موضوع هستند که رسانایی بالای مواد کامپوزیتی به ظرفیت تضعیف قوی و جذب امواج مایکروویو کمک می‌کند، در حالی که رسانایی کم باعث تطبیق امپدانس امیدوارکننده می‌شود [۲۴،۲۵]. پلی‌آنیلین به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی عالی و مکانیسم های دوپینگ انعطاف پذیر به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۶،۲۷]. با این حال، پلی‌آنیلین با چالش‌هایی مانند آستانه نفوذ بالا به دلیل سازگاری محدود و نسبت ابعاد نسبتاً کوتاه آن در پلیمر رسانا مواجه است. علاوه بر این، پراکندگی ذرات مغناطیسی در کامپوزیت‌ها یک مسئله جداگانه است. این معایب کاربرد این کامپوزیت‌ها را در زمینه جذب مایکروویو محدود می‌کند. به عنوان نازک‌ترین و سبک‌ترین ماده در جهان کربن، اکسید گرافن احیا شده، که دارای سطح ویژه بسیار بالا و ساختار دو بعدی منحصربه‌فرد است، ممکن است بهترین نامزد مواد جذب امواج الکترومغناطیسی باشد. به همین دلیل ما در این مطالعه افزودن پلی‌آنیلین به کامپوزیت های اکسید گرافن احیا شده/ذرات مغناطیسی همچون فریت کبالت را به عنوان راهی کارآمد برای غلبه بر این معایب به دلیل سطح ویژه بالا و هدایت الکترونیکی عالی [۲۸] مورد بررسی قرار دادیم که تأثیر آن در نتایج بررسی جذب امواج ریز موج و نفوذپذیری مغناطیسی، الکتریکی به وضوح قابل مشاهده است.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

### ۲-۱- مواد و تجهیزات

کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده از قبیل کلرید آهن (III) هگزا هیدرات<sup>۴</sup> با خلوص ۹۹٪، آهن (II) سولفات هپتاهیدرات<sup>۵</sup> با خلوص ۹۹٪، آمونیوم پرسولفات<sup>۶</sup> با خلوص ۹۸٪، آنیلین با خلوص ۹۹٪، اسید کلریدریک با خلوص ۳۷٪، اتانول با خلوص ۹۹٪، محلول آمونیاک با خلوص ۲۵٪، آب مقطر، هیدرازین هیدرات<sup>۷</sup>،

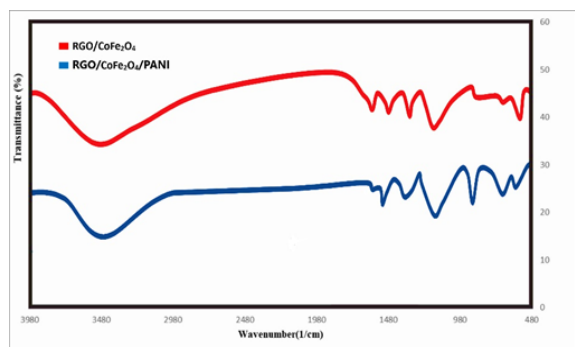
4- FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O  
5- FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O  
6- (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>  
7- NH<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O

1- S-band  
2- C-band  
3- Rugby-shaped

## ۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی طیف زیرقرمز نانو ذرات مغناطیسی rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

پیک پهن مشاهده شده در اطراف  $3400 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی O-H میباشد. پیک ظاهر شده در ناحیه  $1630 \text{ cm}^{-1}$  به دلیل خم شدن گروه‌های O-H در نانوکامپوزیت است. برای پلی آینیلن، پیک در حدود  $1570 \text{ cm}^{-1}$  نشان دهنده تغییر شکل C-H بوده و پیک حدود  $1122 \text{ cm}^{-1}$  به دلیل ارتعاش کششی N=C=N است که ارتعاشات، ماهیت رسانایی پلی آینیلن را نشان می دهد. به طور مشابه، نوارهای طیف‌سنجی در حدود  $1475 \text{ cm}^{-1}$  و  $1570 \text{ cm}^{-1}$  به دلیل کشش بنزن و ارتعاش کینون C=C می باشد. نانو ذرات کبالت فریت، نوارهایی در  $568 \text{ cm}^{-1}$  برای Fe-O و  $679 \text{ cm}^{-1}$  برای Co-O نشان می دهد.



شکل ۱. مقایسه طیف مادون قرمز (الف) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (ب) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

Figure 1. Comparison of infrared spectra (a) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (b) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI.

۳-۲- بررسی نتایج حاصل از آنالیز متفرق کننده اشعه ایکس rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

طیف آنالیز عنصری به روش پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI در شکل (۲) آورده شده است که حضور عناصری مانند آهن، کربن، اکسیژن، کبالت، نیتروژن را نشان میدهد و این تأییدی بر سنتز نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI است.

۳-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

تصاویر SEM و توزیع اندازه ذرات نانوکامپوزیت های rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳- الف) مشاهده می شود نانوذرات کروی و صفحات گرافن اکساید احیا شده برای کامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> بدست آمد. در شکل (۳- ب) شبکه پلیمری پلی

سدیم نیترات<sup>۱</sup>، سولفوریک اسید<sup>۲</sup>، پتاسیم پرمنگنات<sup>۳</sup>، هیدروژن پراکسید، کبالت(II) نیترات هگزاهیدرات<sup>۴</sup> با خلوص ۸۰٪، سدیم دودسیل بنزن سولفونات<sup>۵</sup> با خلوص ۹۹٪ و گرافیت با مش Micro-20 با خلوص ۹۹٪، حلال اتیلن گلیکول با خلوص ۹۹٪ و دیگر مواد و حلال‌های مورد استفاده (اتیل استات با خلوص ۹۹٪، استون با خلوص ۹۹٪) توسط شرکت‌های شیمیایی مرک<sup>۶</sup> و آلدریچ<sup>۷</sup> عرضه شده بودند و همان طور که دریافت شده بودند مورد استفاده قرار گرفتند.

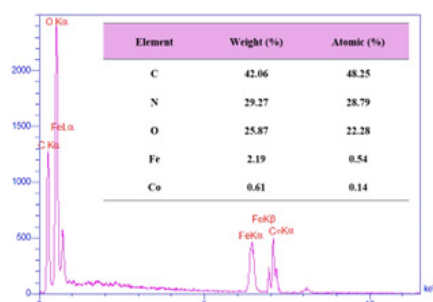
۲-۲- سنتز rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

گرافن اکساید کاهش یافته (rGO/SDBS) که از قبل تهیه شده بود، سنتز شد. در کل تمام پژوهش rGO/SDBS را برای راحتی همان rGO در نظر گرفته شده است. برای سنتز کامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ابتدا ۴ میلی مول کلرید آهن(III) هگزاهیدرات و ۲ میلی مول کبالت(II) نیترات هگزاهیدرات در مخلوطی از ۶۰ میلی لیتر اتیلن گلیکول و ۴۰ میلی لیتر آب دیونیزه حل گردید. محلولی حاوی rGO (۱۰۰ میلی گرم rGO در هر ۱۰ میلی لیتر) به آرامی به مخلوط اضافه و به مدت ۱ ساعت هم زده شد. پس از آن، ۴ میلی لیتر محلول آمونیاک به آرامی به مخلوط اضافه گشت. مخلوط به مدت ۴ ساعت برای دستیابی به یکنواختی خوب به هم زده شد. مخلوط به دست آمده در راکتور اتوکلاو ۱۵۰ میلی لیتری با پوشش تفلون ریخته شد و تا دمای ۱۹۰ درجه سانتیگراد گرم گردید. اتوکلاو به مدت ۲۴ ساعت در آن دما نگه داشته شد. پس از سرد شدن تا دمای اتاق، رسوب بارها با استفاده از آب و اتانول شسته شد. سپس نمونه rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۲ ساعت خشک شد.

۳-۲- سنتز rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

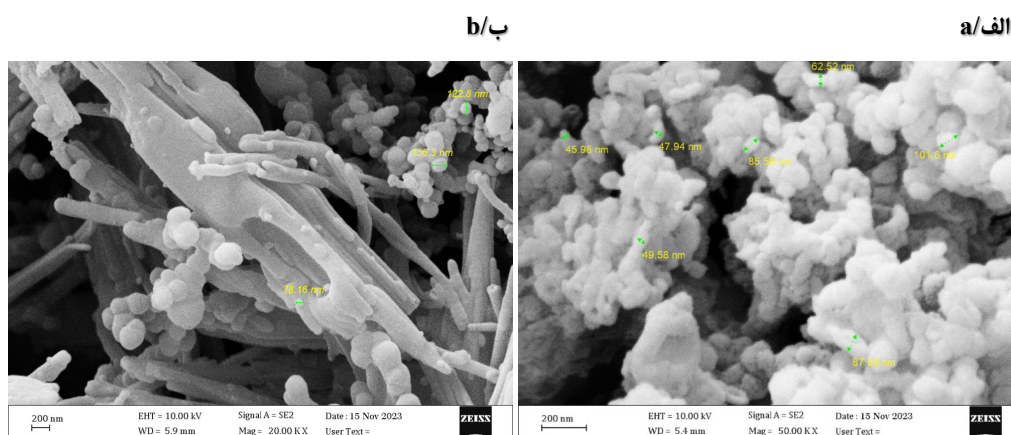
در این مرحله ۷۵۰ میلی گرم از rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> را به ۵۰ میلی لیتر مخلوط HCl (۱ نرمال) / ۱ میلی لیتر آنیلین در یک بالن ته گرد ۱۰۰ میلی لیتر اضافه گشت و در حمام یخ قرار داده شد. سپس، آنیلین به وسیله اضافه کردن ۲/۶۲۴ گرم آمونیوم پرسولفات در دمای ۰ درجه سانتیگراد پلیمریزه شد و واکنش به مدت ۲ ساعت ادامه یافت. در نهایت، محصول نهایی فیلتر شد و بعد از چندین بار شستشو توسط آب و اتانول در آن خلا در دمای ۶۰ درجه برای ۲۴ ساعت خشک گردید.

- 1- NaNO<sub>3</sub>
- 2- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- 3- KMnO<sub>4</sub>
- 4- Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O
- 5- SDBS
- 6- Merck
- 7- Aldrich



شکل ۲. آنالیز عنصری متفرق‌کننده اشعه ایکس نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI.

Figure 2. X-ray scattering elemental analysis of rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI nanocomposite.



شکل ۳. تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های (الف) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و (ب) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI.

Figure 3. SEM images of (a) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and (b) rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI nanocomposites.

به گرمایش همگن و جلوگیری از تمرکز گرما در طول آنالیز حرارتی می‌گردد. افت جرمی برای نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI از دمای ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود که مربوط به تجزیه شدن پلیمرهای آنیلین در ساختار می‌باشد. همچنین افت نامحسوس از دمای ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد نیز مربوط به تجزیه شدن نانوذرات معدنی است.

### ۳-۵- تعیین ممان مغناطیسی با روش مغناطیس‌سنج

#### نمونه مرتعش rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

خواص نانوکامپوزیت‌های rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI با استفاده از یک مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش در دمای ۳۰۰ درجه کلوین مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۵ پاسخ نانوکامپوزیت‌ها به میدان‌های مغناطیسی اعمال شده متفاوت (از +۱۰۰۰۰ Oe تا -۱۰۰۰۰ Oe) را برای نانوذرات نشان می‌دهد. با افزایش میدان مغناطیسی اعمال شده از ۰ به ۱۰۰۰۰ Oe، نانوکامپوزیت‌ها افزایش قابل توجهی در مغناطیسی نشان می‌دهند. این مشاهدات بیانگر آن است که نانوکامپوزیت‌ها به شدت به تغییرات میدان مغناطیسی پاسخ می‌دهند. از مقایسه داده‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش خواص

آنیلین که نانوذرات اکسید فلز را درگیر کرده و یک سیستم کاملاً یکپارچه را تشکیل می‌دهد. اندازه این نانوذرات در شکل (۳) قابل مشاهده است.

### ۳-۴- بررسی آنالیز توزین حرارتی rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

شکل ۴ منحنی‌های rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI را از دمای اتاق تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر نیتروژن نشان می‌دهد. کاهش وزن اولیه تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای rGO به حذف آب جذب شده نسبت داده می‌شود. کاهش وزن قابل توجه در حدود ۳۵۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد که احتمالاً به دلیل تجزیه گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن است. کاهش جرم آهسته‌تر و ثابت در کل محدوده دمایی بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود که می‌تواند به حذف گروه‌های عاملی اکسیژن پایدارتر یا تجزیه در اثر حرارت اسکلت کربنی rGO در تعامل قوی بین CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و گرافن اکساید مرتبط باشد. این پدیده به این واقعیت نسبت داده می‌شود که نانوذرات CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> می‌توانند محدودیت‌های زیادی را بر تحرک نانوصفحات گرافن اکساید تحمیل کنند، در نتیجه منجر

شاخص در  $2\theta$  های  $(220)$   $29.7^\circ$  ،  $(311)$   $35.4^\circ$  ،  $(400)$   $42.81^\circ$  ،  $(422)$   $53.9^\circ$  ،  $(511)$   $57.4^\circ$  و  $(440)$   $62.5^\circ$  برای نمونه قابل مشاهده است. همه این پیک ها به وضوح به فریت کبالت استاندارد (PDF 22-1086) ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ) نمایه شدند. پیک مشخصه حدود زاویه  $2\theta=25^\circ$  به دلیل ساختار شش ضلعی نانوصفحات گرافن و ساختار بی شکل پلیمرهای آنیلین می باشد [29]. همانطور که در شکل (6) مشخص است، در ساختار  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  پیک های مرتبط با پلی آنیلین دیده نمی شود.

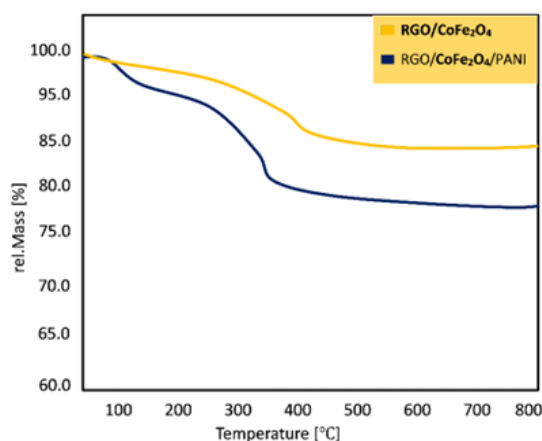
### ۳-۷- بررسی جذب امواج ریز موج نانوکامپوزیت $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$

بررسی ویژگی های جذب مایکروویو در نانوکامپوزیت  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  در فرکانس های نوار S (۸-۲ گیگاهرتز) و C (۸-۴ گیگاهرتز) مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه با هدف

مغناطیسی به حضور نانوذرات  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  و  $\text{rGO/Co-Fe}_2\text{O}_4$   $\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  نسبت داده می شود. حداکثر مقدار مغناطیسی برای  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  تقریباً  $31 \text{ emu/g}$  است، در حالی که برای نانوکامپوزیت  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  تقریباً  $20 \text{ emu/g}$  می باشد. نانوکامپوزیت  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  خواص فرومغناطیسی را نشان می دهد. کاهش خواص مغناطیسی مشاهده شده در منحنی  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  با حضور پلیمرهای پلی آنیلین مرتبط است.

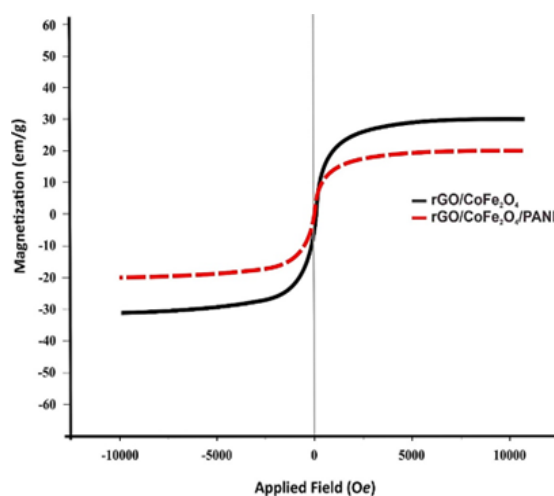
### ۳-۶- بررسی الگوی پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$

ساختار کریستالوگرافی نانوکامپوزیت  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$  توسط آنالیز XRD مورد بررسی قرار گرفت. الگو شش پیک



شکل ۴. آنالیز توزین حرارتی (الف)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  و (ب)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$ .

Figure 4. Thermal weighing analysis of (a)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  and (b)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$ .



شکل ۵. مغناطیس سنج نمونه مرتعش (الف)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  و (ب)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$ .

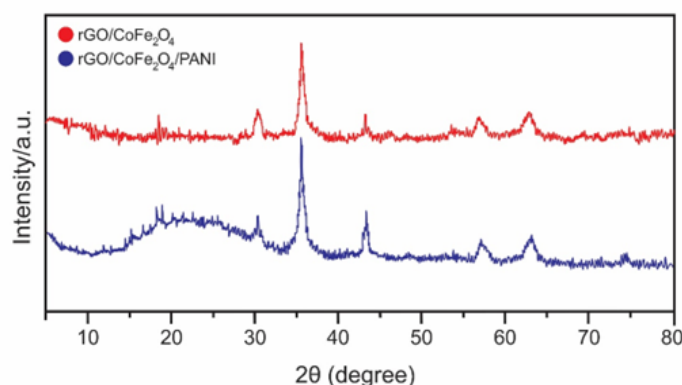
Figure 5. Vibrating sample magnetometer (a)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4$  and (b)  $\text{rGO/CoFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$ .

جذب مایکروویو، سیستم‌های رادار پیشرفته، دستگاه‌های ارتباطی و محافظ تداخل الکترومغناطیسی به ویژه در زمینه عملیات ۷ گیگاهرتز تأکید می‌کند.

### ۳-۸- بررسی نفوذپذیری مغناطیسی، الکتریکی نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI

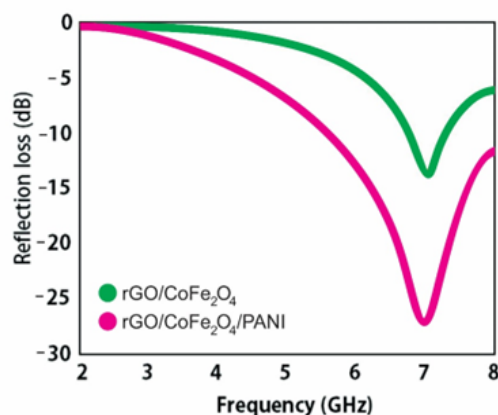
بر اساس نظریه‌ی خط انتقال، نفوذپذیری مغناطیسی الکتریکی از مهمترین عوامل در میرایی امواج ریزموج درون جاذب است [۳۰]. بر این اساس نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی نمونه‌های جاذب مورد مطالعه قرار گرفت. منحنی‌های نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی امواج برای نانوکامپوزیت‌های rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI در شکل ۸ نشان داده شده است. مانند کامپوزیت پیشین همانطور که انتظار می‌رفت حضور پلی آنیلین باعث افزایش نفوذپذیری الکتریکی کامپوزیت شد. البته به علت

ارزیابی خواص جذب مایکروویو کامپوزیت شامل اکسید گرافن (rGO)، CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و پلی آنیلین انجام شد. ارزیابی عملکرد کامپوزیت بر روی بررسی مقادیر افت بازتابی (RL) متمرکز بود. کامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI قابلیت‌های جذب مایکروویو خوبی را نسبت به کامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> نشان می‌دهد که بر هم افزایی سودمند حاصل از ترکیب این مواد تأکید می‌کند. این کامپوزیت برای کاربردهای پیشرفته، از جمله مواردی که در حوزه فناوری مخفی کاری، مواد جاذب رادار، و محافظ تداخل الکترومغناطیسی (EMI) هستند، که در آن کاهش امواج الکترومغناطیسی منعکس شده از اهمیت بالایی برخوردار است، نویدبخش است. این کامپوزیت به ویژه در ۷ گیگاهرتز، در به حداقل رساندن انعکاس امواج الکترومغناطیسی موثر بود. این یافته‌ها بر سازگاری کامپوزیت برای طیف وسیعی از کاربردهای



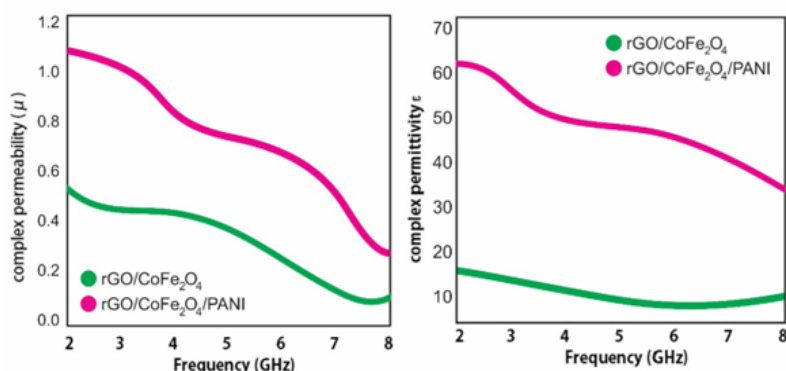
شکل ۶. الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI.

Figure 6. X-ray diffraction pattern of rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI nanocomposites.



شکل ۷. نمودار افت انعکاس نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI.

Figure 7. Reflection loss diagram of rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI nanocomposites.



شکل ۸. منحنی‌های نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی  $rGO/CoFe_2O_4/PANI$  و  $rGO/CoFe_2O_4$ .

Figure 8. Magnetic and electrical permeability curves of  $rGO/CoFe_2O_4$  and  $rGO/CoFe_2O_4/PANI$ .

آنهاست. ترکیب این کامپوزیت از اکسید گرافن احیا شده (rGO)، فریت کبالت ( $CoFe_2O_4$ ) و پلی آنیلین (PANI) ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی متمایز را به آن می‌بخشد. این ویژگی‌ها، به ویژه رسانایی و پاسخ مغناطیسی، به طور یکپارچه با محدوده فرکانس نوار S همسو هستند. در نوار S، انتقال کارآمد سیگنال و کاهش تلفات ضروری است. ماهیت رسانایی ماده که توسط rGO و PANI تسهیل می‌کند، پیش‌بینی می‌شود که یکپارچگی سیگنال را افزایش دهد. به طور همزمان، گنجاندن  $CoFe_2O_4$  به یک پاسخ مغناطیسی مناسب کمک می‌کند که الزامات فرکانس نوار S را تکمیل می‌کند.

در بخش تجربی، مواد و روش‌های دقیق به کار رفته در سنتز کامپوزیت‌ها را مستند کردیم. رویکرد ما شامل استفاده از مواد شیمیایی و حلال‌های مختلف، از جمله نمک‌های آهن، پرسولفات آمونیوم، آنیلین، اسید هیدروکلریک، اتانول و محلول آمونیاک بود. ما فرآیند سنتز را با دقت اجرا کردیم که شامل حل کردن نمک‌های آهن و کبالت، افزودن دقیق rGO، استفاده از تکنیک‌های هم‌زدن، معرفی محلول آمونیاک، انجام گرمایش دقیق در اتوکلاو و اجرای مراحل بعدی شستشو و خشک کردن بود.

بخش نتایج و بحث، یافته‌های عمیق حاصل از تجزیه و تحلیل جامع انجام شده بر روی نانوکامپوزیت  $rGO/CoFe_2O_4/PANI$  را ارائه می‌کند. تجزیه و تحلیل طیف مادون قرمز، ارتعاشات و گروه‌های عاملی خاصی را نشان داد که توصیف جامعی از نانوکامپوزیت را ممکن می‌سازد. ترکیب عنصری از طریق تجزیه و تحلیل دقیق پراکندگی اشعه ایکس تایید شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بینش‌های ارزشمندی را در مورد مورفولوژی کامپوزیت‌ها ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل حرارتی الگوهای کاهش وزن مرتبط با حذف آب و تجزیه گروه‌های عاملی را با دقت تعیین و تجزیه و تحلیل مغناطیس سنخ خواص مغناطیسی را

تطابق مناسب مقاومت کامپوزیت علت اصلی جذب را میتوان به پخش شدگی امواج همچنين نفوذ آن به محیط جاذب نسبت داد. در زمینه کاربردهای نوار S، که در آن انتقال سیگنال کارآمد بسیار مهم است، هر دو کامپوزیت کاهش وابسته به فرکانس در نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی را نشان می‌دهند. نفوذپذیری کمتر در این محدوده فرکانس به طور کلی برای به حداقل رساندن تلفات سیگنال و افزایش کارایی کلی سیستم مطلوب است و در این زمینه نانو کامپوزیت  $rGO/CoFe_2O_4/PANI$  نتایج بهتری را نشان داده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در نتیجه، این مطالعه بر توسعه مواد جذب میکروویو برای موج نوار S (۸ تا ۲۲ گیگاهرتز) به دلیل اهمیت آنها در کاربردهای نظامی، محیطی و ارتباطی متمرکز شد. ما ترکیب گرافن و یک ماده مغناطیسی را برای افزایش خواص جذب بررسی کردیم. فریت کبالت ( $CoFe_2O_4$ ) به عنوان یک ماده مغناطیسی امیدوارکننده ظاهر شد که البته محدودیت‌هایی در دستیابی به جذب کارآمد داشت. برای پرداختن به این محدودیت‌ها، اکسید گرافن احیا شده (rGO) را در کامپوزیت گنجاندیم که رویکردی نوآورانه‌ای را نشان می‌دهد. ما همچنین خواص جذب میکروویو پلیمرهای رسانا مانند پلی آنیلین را با وجود چالش‌های مربوط به سازگاری و پراکندگی ذرات مغناطیسی در کامپوزیت‌ها بررسی کردیم. با استفاده از سطح ویژه بالا و هدایت الکترونیکی عالی rGO، ما با موفقیت از محدودیت‌های کامپوزیت‌های پلیمری رسانا پیشی گرفتیم. به دلیل اکتشاف کامپوزیت‌های سه تایی متشکل از rGO، ذرات مغناطیسی و پلی آنیلین، این مطالعه ای ویژه است که سهمی پیشگام در این زمینه دارد.

انتخاب مواد انتخاب شده برای این مطالعه، شامل  $PANI$ ،  $rGO$ ،  $CoFe_2O_4$ ، با توجه به خواص منحصر به فرد



#### ۷- مراجع

- [1] D. Gunwant, and A. Vedrtam, "Microwave absorbing properties of carbon fiber based materials: A review and prospective", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.881, (2021), 160572.
- [2] B. Wang, Q. Wu, Y. Fu, and T. Liu, "A review on carbon/magnetic metal composites for microwave absorption", *Journal of materials science & technology*, Vol.86, (2021), 91-109.
- [3] J. Li, D. Zhou, P.-J. Wang, C. Du, W.-F. Liu, J.-Z. Su, L.-X. Pang, M.-S. Cao, and L.-B. Kong, "Recent progress in two-dimensional materials for microwave absorption applications", *Chemical Engineering Journal*, Vol.425, (2021), 131558.
- [4] Y. Zhang, F. Dai, A. Hassan, M. R. A. Refaai, S. Salman, K. Nag, I. Mahariq, and Y. Qi, "Investigations of microwave absorption performance of bi-layer absorber composed of FeWO<sub>4</sub> & BiVO<sub>4</sub> nanocomposite powder in 2–18 GHz", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.641, (2023), 1-14.
- [5] X. Ma, K. Logesh, J. Mohammed, C. Dalai, S. Mehrez, S. Alamri, and V. Mohanavel, "Enhancement of microwave absorption properties of bilayer absorber comprising of ZrB<sub>2</sub>@ SiO<sub>2</sub> composite and poly-ortho toluidine (PoTo) in 2–18 GHz frequency", *Ceramics International*, Vol.49, (2023), 4505-4516.
- [6] X. Wang, Z. Lei, C. Zheng, X. Zhuang, Q. Man, and G. Tan, "Morphology control of Ce-doped SnO<sub>2</sub> and enhanced microwave absorbing performance at 2– 18 GHz", *Ceramics International*, (2023).
- [7] H. Wei, Z. Zhang, G. Hussain, L. Zhou, Q. Li, and K. K. Ostrikov, "Techniques to enhance magnetic permeability in microwave absorbing materials", *Applied Materials Today*, Vol.19, (2020), 100596.
- [8] J. Dong, W. Zhou, S. Duan, H. Jia, L. Gao, F. Luo, D. Zhu, and Q. Chen, "Mechanical, dielectric and microwave absorption properties of carbon black (CB) incorporated SiO<sub>2</sub>/PI composites", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol.29, (2018), 17100-17107.
- [9] Z. Zhang, L. Zhang, X. Chen, Z. Wu, Y. He, Y. Lv, and Y. Zou, "Broadband metamaterial absorber for low-frequency microwave absorption in the S-band and C-band", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.497, (2020), 166075.
- [10] X. Wang, Y. Lu, T. Zhu, S. Chang, and W. Wang, "CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/N-doped reduced graphene oxide aerogels for high-performance microwave absorption", *Chemical Engineering Journal*, Vol.388, (2020), 124317.

بررسی کرد، در حالی که تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس ساختار کریستالوگرافی نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI را تایید می کند. علاوه بر این، ما تجزیه و تحلیل کامل جذب میکروویو را برای به دست آوردن درک جامعی از خواص کاهش انعکاس انجام دادیم و نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی کامپوزیت را به دقت بررسی کردیم.

به طور خلاصه، این مطالعه نشان‌دهنده تلاش‌های ما در سنتز و شناسایی نانوکامپوزیت rGO/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI است که پتانسیل زیادی برای کاربردهای جذب میکروویو در موج نوار S دارد. ترکیب اکسید گرافن احیا شده، فریت کبالت و پلی آنیلین یک رویکرد قابل توجه است که تعهد ما را به توسعه مواد جذاب کارآمد نشان می دهد. بینش جامع به دست آمده از این مطالعه، ترکیب، ساختار، خواص مغناطیسی، رفتار حرارتی و قابلیت‌های جذب میکروویو نانوکامپوزیت را روشن می کند. بدون شک، این کار به عنوان پایه ای برای تحقیقات آینده برای بهینه سازی ترکیب و عملکرد مواد جذب میکروویو در کاربردهای مختلف نظامی، محیطی و ارتباطی عمل می کند.

- [11] F. Meng, H. Wang, F. Huang, Y. Guo, Z. Wang, D. Hui, and Z. Zhou, "Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective", *Composites Part B: Engineering*, Vol.137, (2018), 260-277.
- [12] N. Li, H.-L. Jiang, X. Wang, X. Wang, G. Xu, B. Zhang, L. Wang, R.-S. Zhao, and J.-M. Lin, "Recent advances in graphene-based magnetic composites for magnetic solid-phase extraction", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol.102, (2018), 60-74.
- [13] X. Xie, B. Wang, Y. Wang, C. Ni, X. Sun, and W. Du, "Spinel structured MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M= Fe, Co, Ni, Mn, Zn) and their composites for microwave absorption: A review", *Chemical Engineering Journal*, Vol.428, (2022), 131160.
- [14] Y. Zheng, X. Wang, S. Wei, B. Zhang, M. Yu, W. Zhao, and J. Liu, "Fabrication of porous graphene-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hybrid composites with outstanding microwave absorption performance", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.95, (2017), 237-247.
- [15] K. Zhang, Q. Zhang, X. Gao, X. Chen, Y. Wang, W. Li, and J. Wu, "Effect of absorbers' composition on the microwave absorbing performance of hollow Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles decorated CNTs/graphene/C composites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.748, (2018), 706-716.
- [16] R. Taheri-Ledari, S. M. Hashemi, and A. Maleki, "High-performance sono/nano-catalytic system: CTSN/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Cu nanocomposite, a promising heterogeneous catalyst for the synthesis of N-arylimidazoles", *RSC advances*, Vol.9, (2019), 40348-40356.
- [17] S. Wang, Y. Zhao, H. Xue, J. Xie, C. Feng, H. Li, D. Shi, S. Muhammad, and Q. Jiao, "Preparation of flower-like CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@ graphene composites and their microwave absorbing properties", *Materials Letters*, Vol.223, (2018), 186-189.
- [18] P. Jiang, Q. Xu, N. Tran, A. El-Shafay, V. Mohanavel, A. Abdelrahman, and M. Ravichandran, "Boosted microwave absorption properties of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> with extraordinary 3D morphologies", *Ceramics International*, Vol.48, (2022), 13541-13550.
- [19] M. Zhang, J. Zhang, H. Lin, T. Wang, S. Ding, Z. Li, J. Wang, A. Meng, Q. Li, and Y. Lin, "Designable synthesis of reduced graphene oxide modified using CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanospheres with tunable enhanced microwave absorption performances between the whole X and Ku bands", *Composites Part B: Engineering*, Vol.190, (2020), 107902.
- [20] H. Yang, T. Ye, Y. Lin, and M. Liu, "Preparation and microwave absorption property of graphene/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite", *Applied Surface Science*, Vol.357, (2015), 1289-1293.
- [21] D. Zhang, W. He, G. Quan, Y. Wang, Y. Su, L. Lei, Y. Du, Y. Hong, S. Wang, and Y. Tang, "Sterculia lychnophora seed-derived porous carbon@CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> composites with efficient microwave absorption performance", *Applied Surface Science*, Vol.607, (2023), 155027.
- [22] B. G. Soares, G. M. Barra, and T. Indrusiak, "Conducting polymeric composites based on intrinsically conducting polymers as electromagnetic interference shielding/microwave absorbing materials—A review", *Journal of Composites Science*, Vol.5, (2021), 173.
- [23] K. Lakshmi, H. John, R. Joseph, K. George, and K. Mathew, "Comparison of microwave and electrical properties of selected conducting polymers", *Microwave and optical technology letters*, Vol.50, (2008), 504-508.
- [24] Z. Jiang, H. Si, X. Chen, H. Liu, L. Zhang, Y. Zhang, C. Gong, and J. Zhang, "Simultaneous enhancement of impedance matching and the absorption behavior of BN/RGO nanocomposites for efficiency microwave absorption", *Composites Communications*, Vol.22, (2020), 100503.
- [25] B. Kramer, and B. Kuhn, "Electric signaling and impedance matching in a variable environment", *Naturwissenschaften*, Vol.80, (1993), 43-46.
- [26] S. M. Hashemi, A. Maleki, and M. H. Ahmadi, "The impact of ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>@ PANI nanofluid on the performance of pulsating heat pipe, an experimental study", *Journal of Nanostructure in Chemistry*, (2022), 1-16.
- [27] J. Ma, H. Ren, Z. Liu, J. Zhou, Y. Wang, B. Hu, Y. Liu, L. B. Kong, and T. Zhang, "Embedded MoS<sub>2</sub>-PANI nanocomposites with advanced microwave absorption performance", *Composites Science and Technology*, Vol.198, (2020), 108239.
- [28] J. Luo, P. Shen, W. Yao, C. Jiang, and J. Xu, "Synthesis, characterization, and microwave absorption properties of reduced graphene oxide/strontium ferrite/polyaniline nanocomposites", *Nanoscale research letters*, Vol.11, (2016), 1-14.
- [29] D. Narsimulu, O. Padmaraj, E. Srinadhu, and N. Satyanarayana, "Synthesis, characterization and electrical properties of mesoporous nanocrystalline CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as a negative electrode material for lithium battery applications", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol.28, (2017), 17208-17214.
- [30] X. Zeng, X. Cheng, R. Yu, and G. D. Stucky,



“Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers”, Carbon, Vol.168, (2020), 606-623.