



مقاله پژوهشی

# بررسی رفتار جذب امواج مایکروویو در کامپوزیت آهن اسفنجی/اپوکسی ساخته شده با پودر اسفنجی آهن

الناز خسروی پناه<sup>۲٬۱</sup>، علی سالمی گلعذانی<sup>۲٬۱</sup>\*۶ و حامد ثابت<sup>۲٬۱</sup>

۱- گروه مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران ۲- دانشکده مهندسی ساخت و فناوریهای صنعتی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

تاريخ ثبت اوليه: ١٤٠٣/١٠/٠٨، تاريخ دريافت نسخه اصلاح شده: ١٤٠٣/١٢/٠٥، تاريخ پذيرش قطعي: ١٤٠٤/٠٢/٠٣

#### چکیدہ

فناوری جذب امواج الکترومغناطیس در ناحیه ریز موج موضوع ارزشمندی برای مقاصد تجاری، وسایل ارتباطی و نظامی است. تحقیقات نشان از تاثیرات منفی انتشار امواج (در فرکانس های مختلف) بر بدن انسان و تجهیزات الکترونیکی دارد. بنابراین امروزه جاذب های امواج الکترومغناطیس ضرورت دو چندان یافتهاند. در این تحقیق، برای ساخت نمونه های کامپوزیتی از پودر اسفنجی آهن با دو چگالی متفاوت و رزین اپوکسی استفاده شد. در ترکیب کامپوزیت مقادیر ۵، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد وزنی انتخاب گردید. توزیع یکنواخت پودر در زمینه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. محاسبات شاخص های جذب مانند اتلاف مغناطیسی، اتلاف دی الکتریکی و اتلاف باز تابش بر اساس داده های حاصل از آزمایش تجزیه و تحلیل شبکه برداری (VNA) در باند X (۲۰۸ تا CHZ) انجام پذیرفت. نتایج حاکی از آن بود که نمونه های پودر آهن دانسیته پایین از جذب بهتری برخوردار هستند. نمونه 50-SP1 (شامل ۵۰ درصد وزنی از پودر ای SP1) در ای بالاترین میزان جذب به مقدار B

واژههای کلیدی: کامپوزیت، مواد جاذب امواج الکترومعناطیس، اسفنجی آهن، اتلاف بازتابش.

#### ۱- مقدمه

امروزه پیشرفت سریع سیستمهای الکترونیکی و دستگاههای ارتباطی و استفاده گسترده از تجهیزاتی از قبیل رادارها، سیستمهای ارتباطی تلفن همراه، GPS و وسایل خانگی در سالهای اخیر، موجب افزایش تداخل امواج الکترومغناطیس شده است که در نتیجه آلودگی الکترومغناطیسی را افزایش

داده است. این آلودگی باعث عملکرد نادرست دستگاه های الکترونیکی و مخابراتی می شود و همچنین موجب آسیب به ساختارهای بیولوژیکی و گونه های زنده موجود در محیط زیست می شود [۶-۱]. جذب و سپرسازی در برابر این امواج برای کاهش آلودگی امواج الکترومغناطیس در کاربردهای مختلف احساس می شود. در میان روش های متعدد حفاظت الکترومغناطیسی،

<sup>\*</sup> **عهدەدار مكاتبات:** على سالمى گلعذانى

طراحی و تهیه مواد جذب امواج الکترومغناطیسی به عنوان یک تکنیک بسیار مؤثر برای حذف مشکلات ناشی از تابش مایکروویو اثبات شده است مواد جاذب در برابر امواج الکترومغناطیس، با هدف محدود نمودن انرژی امواج الکترومغناطیس و همچنین جلوگیری از تکثیر انرژی آنها در محیط، ساخته می شوند [۲۲-۷].

از جمله کاربردهای مواد جاذب امواج الکترومغناطیس می توان به کنترل آلودگی الکترومغناطیسی، محافظ های تداخل الکترومغناطیسی، تکنولوژی مخفی سازی و جذب امواج برای رادار گریزی در صنایع نظامی، طراحی های آنتن، بهبود مقاومت در برابر نویز ایجاد شده از سامانه های الکترونیکی و کاهش بازتابش موج اشاره نمود [10-17].

محطوریتی و عسس بروبس موج بستره عبود (ما مرابا در دهه گذشته علایت دانشگاهی و پژوهشی در فهم مخاطرات سلامت و روش های محافظتی در برابر تاثیرات تابش الکترومغناطیس به طور اساسی افزایش یافته است. اطلاعات جمع آوری شده تنها از یک پایگاه داده افزایش ۱۸۰ تا ۳۳۰ درصد بین سال های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ در حوزه تالیفات تداخل امواج الکترومغناطیس، مخاطرات سلامت آن و سپرهای محافظ آن را نشان می دهد [۱۹].

آقای لیو و همکارانش [۲۰] در سال ۲۰۱۶ در بررسی اثر اندازه دانه نانو کپسولهای نیکل با پوشش کربن به این نتیجه دست یافتند که با افزایش اندازه دانه از ۲۵ تا ۵۳ mm اتلاف دی الکتریک کاهش مییابد، از طرفی کاهش میزان بازتابش با پهنای جذب بزرگتر به فرکانسهای کمتر منتقل می گردد؛ البته این در حالی است که ضخامت کمتری نیاز باشد.

آقای تانگ و همکارانش [۲۱] با بررسی پودر آهن متخلخل در کامپوزیت جاذب امواج الکترومغناطیس به این نتیجه رسیدند که تخلخل موجب افزایش سطح ویژه می گردد و متعاقبا کاهش گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی میشود. همچننین تحقیقات نشان داد که خلوص آهن فاکتور مهمی جهت بهبود خواص مایکروویو میباشد. محققین [۲۲] با ساخت کامپوزیتهای نانوالیاف چندجزئی

Fe<sub>3</sub>Si/SiC باعث بهبود عملکرد مواد جاذب امواج الکترومغناطیس شدند. اتلاف بازتاب Bb ۶۷/۵۷ در فرکانس ۲۰/۹۶ GHz بود. حاکی از آن است که این کامپوزیت قابلیت خوبی جذب امواج الکترومغناطیس دارد. پژوهشگران [۲۳] پودرهای آهن اسفنجی و آهن کربنیل را در جذب امواج مایکروویو مورد بررسی قرار دادند. پودرهای آهن اسفنجی (SIPs) با سطح ویژه بالا تقریبا دو برابر بیشتر از پودرهای آهن کربنیل (CIPs) با موفقیت تهیه شدند و برای جذب مایکروویو مورد استفاده قرار گرفتند.

در پژوهشی دیگر [۲۴] کامپوزیت های متخلخل Ni/C با نانوذرات نیکل بر روی ماتریس کربن با خواص جذب الکترومغناطیسی عالی که به دلیل بهبود تلفات چندگانه و تطابق بهینه امپدانس است ساخته شده است. به ویژه، نمونه تطابق بهینه امپدانس است ساخته شده است. به ویژه، نمونه باباق بهینه امپدانس است ماحکه کلسینه شده بود، با تلفات بازتاب برابر با AOV ۲۷ DB کاسینه شده بود، با تلفات ملکرد را داشته و تمام باند Xu (۱۲ تا AGHz) را پوشش داده است.

کامپوزیت های جاذب مایکروویو ساخته شده از SIPs، سبک تر، ناز ک تر بودند و عملکرد جذب مایکروویو بالاتری را نسبت به کامپوزیت های ساخته شده از CIPs در محدوده فرکانس مورد بررسی نشان دادند. از آنجایی که پودرهای آهن اسفنجی ساختار اسفنجی و متخلخل دارند، دارای نواحی سطحی بالایی هستند که منجر به قطبش سطحی زیادی برای تضعیف انرژی امواج EM می شود.

اثر چگالی پودر اسفنجی آهن می تواند از پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر خواص اتلافی و جذب جاذبهای کامپوزیتی میباشد که در بررسیهای سایر محققین به نتایج متفاوت و گاها متناقضی اشاره شده است. روش پیشنهادی این پژوهش به علت روش تولید ارزان پودر اسفنجی آهن در داخل یک روش ارزان قیمت و مقرون به صرفه، ساده و دارای رنج جذب بهتر نسبت به روشهای دیگری که قبلا انجام شدهاند میباشد. آنچه ویژگی این محصول را نسبت به سایر موارد 18

تغيير داده شد. مواردي چون عـدم توزيع يكنواخت، تجمع پودر در سطح، حبس حباب، اکسیداسیون پودر آعن به دلیل گرمایش بیش از حد و جدایش زمینه از پودر به دلیل کاهش بيش از حد حلال موجب نتايج نامعتبر مي گردد.

جدول ۲: نمونه های کامیوزیت تهیه شده.

درصد وزنی پودر آهن	کد نمونه
5	SP1-5
20	SP1-20
35	SP1-35
50	SP1-50
5	SP2-5
20	SP2-20
35	SP2-35
50	SP2-50

تحلیل گر شبکه برداری یک دستگاه اندازه گیری بسیار اصولى براى تعيين خواص الكترومغناطيسي مواد مورد استفاده در سامانههای راداری است. این دستگاه قابلیت اندازه گیری تلفات بازتاب، نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی جاذب های رادار در محدوده های فرکانسی مختلف را دارد. مهمترین پارامترهای قابل تعیین پارامترهای پراکنـدگی شبکه یا پارامترهای S است. هنگامی که موج ورودی به نمونه اصابت مي كند قسمتي از موج از سطح نمونه بازتاب مي شود، قسمتی از موج وارد ماده جاذب شده و توسط فر آیندهای اتلاف مغناطیسی و اتلاف دیالکتریک جذب میشود و آن قسمت که جذب نشده است بازتاب می شود و قسمتی از موج که از نمونه عبور می کند، به انتهای موجبر اصابت مي کند و دوباره وارد پوشش مي شود که يا جذب مي شود يا از نمونه عبور می کند. دستگاه تحلیلگر شبکه همه امواج بازتابي را دريافت و تحليل مي كنـد. خروجي ايـن آزمـايش، یک نمودار اتلافی بر حسب فرکانس است که نشان میدهـد چه مقدار از موج ارسالی توسط ماده جاذب، در چه فرکانسی جذب شده است و چه مقدار از موج ارسالی به منبع باز می گردد [۲۵،۲۶]. مشابه برجسته مي كند تقويت كننده يودر آهني با مورفولوژي اسفنجی و متخلخل بوده که در کشور به روش احیا از حالت جامد توليد شده است. در این تحقیق اثر چگالی و سطح ویژه پودر اسفنجی آهن بر شاخص هاي جذب مانند اتلاف مغناطيسي، دي الكتريكي و اتلاف بازتابش مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲- فعالیتهای تجربی

در تحقیق حاضر، پودر آهن با مورفولوژی اسفنجی و چگالی متفاوت استفاده شد (جدول ۱). این پودر از یک شرکت دانش بنیان داخلی تهیه شد. روش تولید پودر توسط شرکت سازنده فرآيند احيا ذكر شده است. يك ماده جاذب امواج الكترومغناطيس مريايست از اختلاط دو ماده جاذب مغناطیسی و جاذب دیالکتریک در زمینه پلیمری به وجود بيايد. در پژوهش حاضر، پليمر اپوكسي به عنوان جاذب دىالكتريك و پودر اسفنجى آهن به عنوان جاذب مغناطيسي استفاده شد. لازم بذکر است ساختار اسفنجی پودر آهـن بـر اتلاف دىالكتريك كاميوزيت نيز تاثير دارد.

جدول ۱: مشخصات فنی یودرهای آهن.

سطح ویژه (m²/g)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	پودر
$\cdot/\Lambda\Delta\pm\cdot/\cdot$ Y	۰/۵۰	SP1
۰/۵۵ ±۰/۰۲	۰/۸۵	SP2

برای ساخت کامپوزیت درصدهای معینی پودر فلزی در زمینه رزین اپوکسی استفاده شد. در مجموع هشت نمونه به ابعاد ۲۰/۴×۰/۹ in² آماده گردید و با استفاده از تحلیل گر شبکه برداری (VNA) در باند X (۸/۴ تا ۱۲/۴ GHz) مورد بررسی قرار گرفت که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. در فرایند تولید نمونهها، روشهای مختلفی انجام پذیرفت که هر بار به دلیل رویت نتایج نامعتبر این روش تولید بهینه یا



شکل ۱: دستگاه تحلیل گر شبکهبرداری.

۳- نتايج و بحث

مورفولویی سطحی هر دو پودر بکار رفته در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در تصاویر مشخص است ذرات به صورت انباشت تجمعی در کنار هم قرار گرفتهاند که این امر به دلیل تمایل ذرات به تداخل مغناطیسی میباشد.





شكل ۲: تصاوير SEM پودر اسفنجي آهن الف) SP1 و ب) SP2.

**JR** 

به طور کلی دو دیدگاه جذب امواج الکترومغناطیس وجود دارد؛ از دیدگاه میکروسکویی، عملکرد مواد در میدان های الكترومغناطيس، به وسيله جابهجايي الكترون هاي آزاد و پیوندی آنها در میدان الکتریکی و جهات حرکتهای اتمی آنها در میدان مغناطیسی تعیین می شود. بر اساس معادله های ماکسول [۲۷،۲۸] از دیدگاه ماکروسکویی، واکنش مواد (جذب و بازتاب) در برابر امواج الکترومغناطیس بوسیله سه پارامتر مرتبط با هم، گذردهی الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی و هدایت الکتریکی تعیین می شود [۲۹]. مهمترین مشخصههای رفتار مواد در برابر امواج الكترومغناطيس شامل موارد زير است: - گذردهي الکتريکي مختلط - نفوذ يذيري مغناطيسي مختلط تمام اندازه گیریها با فرض آن انجام می گیرد که به هنگام اعمال میدان الکترومغناطیس به یک ماده، مقداری از مولفه های الکتریکی و مغناطیسی آن را اتلاف کرده و سیس با یک تاخیر به میدان پاسخ میدهد. این بدان معناست که گذردهی الکتریکی و نفوذیذیری مغناطیسی می بایست به شکل عوامل مختلط در نظر گرفته شوند. روابط آن ها برای مولفه الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب، به صورت روابط ۱ و ۲ میباشد.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{1}$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \tag{(Y)}$$

## µ و ع به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی فضای آزاد است.

در شکل ۳ رفتار '٤ نمونه های SP1 و SP2 برای درصدهای مختلف پودر آهن آورده شده است. همانگونه که در نمودار ۳-الف مشخص است رفتار این پارامتر در هر هشت نمونه با افزایش فرکانس تقریبا یکسان است. نمونه SP1-50 بیشترین مقادیر عدد حقیقی معادله گذردهی الکتریکی در باند X



شکل ۳: تغییرات <sup>/</sup>٤ - فرکانس، نمونههای پودر الف) SP1 و ب) SP2.

رفتار عدد موهومی ("ع) در مقایسه با فرکانس نمونههای پودر SP1 و SP2 را در نمودار شماره ۴ نمایش داده شد. در این پارامتردر نمودار ۴-الف نمونه 50-SP1 بیشترین مقدار را در سرتاسر فرکانس باند X از خود نمایش میدهد. این نمودار در فرکانس GHz ۹ یک مقدار بیشینه از خود نشان میدهد و پس از یک افت در فرکانس SH2 ۰۱ مجددا تا فرکانس پس از یک افت در فرکانس SH2 ۰۱ مجددا تا فرکانس مربوط به نمونه 25-SP2 در فرکانس GHz میاشد. پیشینه مقدار نمونه 50-SP2 در فرکانس GHz میاشد. همانگونه کنه در نمودار قابل تشخیص است نمودار SP2-50 و 25-SP2 در نقاط مختلفی همدیگر را قطع می نمایند.

در خصوص مقایسه رفتار نمودارها می بایست ذکر شود که بیشینه مقدار نمونه SP1-50 تقریبا بیش از ۳ برابر بیشینه مقدار SP2-35 می باشد. از طرفی تغییرات نمودار SP1-5 و SP2-35 تقریبا در یک بازه هستند. از آنجایی که افزایش مقدار "٤ طبق نظریه الکترون آزاد به معنی افزایش رسانایی می باشد [۳۰]. بنابراین نمونه SP1-50 بیشترین مقدار رسانایی را خواهد داشت.



شکل ٤: تغییرات "٤ - فرکانس، نمونههای پودر الف) SP1 و ب) SP2.

مقادیر 'µ هشت نمونه ساخته شده از یودر SP1 و SP2 در نمودار شماره ۵ نمایش داده شد. نمودار ۵-الف بیان می کند که با افزایش فرکانس در بازه باند X مقدار قسمت حقیقی معادله نفوذيذيري به صنورت نوساني كاهش مي يابد. بيشينه مقدار 'µ در میان چهار نمونه در گستره فرکانسی ۸/۴ تا GHz ۱۰ ابتدا مربوط به SP1-35 و سپس نمونه SP1-20 می باشد. اما در ادامه در محدوده فرکانسی ۱۰ GHz تا ۱۰/۵ بیشینه نمودار 'µ به نمونه SP1-50 تعلق دارد. در محدوده فرکانسی بیش از ۱۰/۵ GHz نمودار متغیر نمونهها همگرا گردیده است و تقريبا مقادير يكساني دارد. روند نزولي نوساني با افزايش فرکانس در بازه باند X در نمودار ۵-ب نیز قابل تشخیص است. بیشینه مقدار 'µ متعلق به نمونه SP2-50 در فرکانس تقريبي GHz ۹ مي باشد و بيشينه نمونه SP2-35 در فركانس ۸/۵ GHz رخ میدهد. در همین راستا نمونه SP2-5 در فركانس ۹/۴ GHz پيك مقدار 'µ را نشان مي دهـد. همچنين در حدود فرکانس ۱۱ GHz بیشینه نمودارها متعلق به نمونه SP2-50 مى باشد.



شکل ۵: تغییرات 'μ - فرکانس، نمونههای پودر الف) SP1 و ب) SP2.

JR

در راستای مقایسه رفتار قسمت حقیقی در نمونه های ساخته شده از پودر های SP1 و SP2 لازم است نمودار به چهار محدوده تقسیم شود. در محدوده ۹/۸ تا بیشتر از GHz ۹ بیشینه مربوط به نمونه 35-SP1 می باشد در محدوده دوم (۹ تا ۱۰ GHz می باشد در محدوده دوم (۹ تا بیشینه مقدار را به خود اختصاص داده اند. در محدوده سوم ۱۰۱ تا حدود حدوده نهایی رفتار همگرایی نمودار موجب همسانی تقریبی مقادیر نمونه ها می گردد.

قسمت موهومی نفوذپذیری مغناطیسی و با نماد "μ نشان داده قسمت موهومی نفوذپذیری مغناطیسی و با نماد "μ نشان داده می شود. مقادیر این پارامتر در هشت نمونه ساخته شده از پودر SP1 و SP2 در شکل ۶ نمایش داده شده است. همانگونه که در نمودار ۶-الف مشخص است بیشینه مقدار مربوط به نمونه ۳۵ درصد وزنی S5-SP1 در فرکانس مربوط به نمونه ۳۵ درصد وزنی S5-SP1 در فرکانس SP1-50 می باشد اما با افزایش فرکانس نمونه SP1-50 عملکرد کلی بهتری نشان می دهد. بیشینه مقدار در نمودار ۶-ب مربوط به نمونه S5-SP2 در حدود فرکانس SH2 می باشد. در حدود فرکانس های ۱۰ و ۱۱ دو قله دیگر از نمونه مذکور قابل رویت است.





شکل ۲: تغییرات "µ- فرکانس، نمونههای پودر الف) SP1 و ب) SP2.

مقایسه دو نمودار اخیر حاکی از آن است که در فرکانس کمتر از GHz ۹ برتری مقدار "µ مربوط به نمونه SP1-35 میباشد و در فرکانس بیش از GHz ۹ اگر چه نمونههای ۵۰ SP1-50 میباشد و در فرکانس می گذارد. به طور کلی مقادیر نتایج بهتری از خود به نمایش می گذارد. به طور کلی مقادیر نمونههای پودر SP1 در بررسی پارامتر "µ بیشتر از نمونههای پودر SP2 میباشد بنابراین می توان نتیجه گرفت با افزایش سطح ویژه و کاهش چگالی مقدار "µ افزایش مییابد.

SP1-35 در فرکانسی ۹ تایی می می می می می می می می اید. اتلاف مغناطیسی هشت نمونه ساخته شده با پودر SP1 و SP2 در در شکل ۷ نمایش داده شد. بررسی رفتار نمودار ۷-الف ماکی از آن است که بیشترین مقدار اتلاف (در این چهار نمونه) در فرکانس A/۷ GHz به میزان ۸/۸ متعلق به نمودار SP1-35 می باشد. در بررسی هر نمونه مشخص می گردد که SP1-35 می SP1-32 و SP1-90 در فاصله فرکانسی ۶/۸ تا SH2 C دادت شده است در حالی که بیشینه 5-SP1 و SP1-90 در SP1-35 در فرکانس های کمتر از SP1 در فامی می می می می می مقدارنمونه 35-SP1 در فرکانس های کمتر از SH2 در نمونه 50-SP1 در محدوده بیش از آن غالب بر نمونه های دیگر است.



در نهایت مقایسه رفتار اتلاف مغناطیسی در دو نمودار ۷-الف و ب بیانگر این مطلب است کنه نمونه SP1-50 در فرکانس بیش از GHz ۹ مقادیر بیشتری از نمونه GHz ۹ رفتار نشان میدهند. همچنین در فرکانس کمتر از GHz ۹ رفتار نمودار نمونه 35-SP1 بالاتر از نمونه 35-SP2 میباشد. به طور کلی نمونههای ساخته شده از پودر SP1 عملکرد بهتری از نظر اتلاف مغناطیسی نسبت به نمونههای SP2 دارد و از طرفی مطابق جدول ۱ میدانیم که پودر SP1 سطح ویژه بیشتر و چگالی کمتر نسبت به نمونه دیگر دارد لذا افزایش سطح ویژه و کاهش چگالی موجب بهبود خواص اتلاف مغناطیس در جاذب می گردد.

در نمودار ۸ اتلاف دی الکتریکی هشت نمونه ساخته شده از پودر SP1 و SP2 قابل مشاهده است. بیشترین مقدار اتلاف در نمودار ۸-الف مربوط به نمونه 50-SP1 در سرتاسر بازه فرکانسی باند X می باشد. بیشترین مقادیر اتلاف دی الکتریکی در نمودار ۸-ب مربوط به نمونه 35-SP2 در فرکانس های ۹/۷ و ۱۰/۷ GHz میلکرد شاخصی ندارد.

مقایسه دو نمودار ۸-الف و ب حاکی از آن است که اتلاف دی الکتریکی در نمونه های SP1 نسبت به نمونه های SP2 بیشتر است. بنابراین سطح ویژه بیشتر و چگالی کمتر موجب افزایش اتلاف دی الکتریکی جاذب می شود. نکته مهم دیگر این است که با افزایش درصد وزنی پودر الزاما در هر نمودار اتلاف دی الکتریکی افزایش نمی یابد.



به نمونه SP1-35 با ضخامت ۲/۷ mm نمایش می دهد. این مقدار حدود ۲۸ dB – و در فرکانس ۹/۵ GHz می باشد. در همين راستا بررسي مقادير اتلاف بازتابش نمونههاي SP1-50و SP1-20 به ترتیب در ضخامت های ۱/۸ و ۳/۱ میلیمتر مقدار ۲۰ dB–و ۲۳–دسی بل در فرکانس.های ۱۰ و GHz اندازه گیری شده است. همانگونه که مشخص است گستره جذب نمونه SP1-50 از فرکانس ۸/۲ تا ۱۲/۴ GHz (تمام محدوده فركانسي باند X) را پوشش ميدهد. اين گستره در نمونه های SP1-35 و SP1-20 به ترتیب حد فاصل فر کانس های ۸/۲ تا ۱۱ و ۸/۲ تا ۱۰ GHz تشخیص داده می شود. نمونه SP1-5 در مقابل نمونه های دیگر عملکرد ضعیفی دارد، در بهینه ترین میزان جذب (اتلاف بازتابش) dB - و در فرکانس GHz می باشد. در نمودار ۹-ب بیشینه مقدار اتلاف مربوط به نمونه SP2-50 در فرکانس dB و ۸/۵ GHz و ۱۸ dB میباشد. بیشینه سه نمونه دیگر از B ١٠- تجاور نمي نمايد. تنها گستره جذب قابل رويت، نمونه SP2-50 در حدد فاصل فرکانس های ۹/۴ تا SP2-50 مى باشد.



نمونه های پودر الف) SP1 و ب) SP2.



نمونههای پودر الف) SP1 و ب) SP2.

بنابراین می توان نتیجه گرفت که درصد وزنی پودر در کامپوزیت اگرچه بر پارامتر اتلاف دی الکتریکی تاثیر گذار است اما الزاما با افزایش مقدار پودر اتلاف دی الکتریکی بیشتری اتفاق نمیافتد. بر اساس نظریه خطوط انتقال، اتلاف بازتاب برای نشان دادن توانایی جذب مایکروویو مواد جاذب امواج الکترومغناطیس بر اساس فرمول ذیل محاسبه می گردد [۳۳-۳۳].

$$Z_{in} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu r}{\epsilon r}} \tanh\left[j\left(\frac{2\pi fd}{c}\sqrt{\mu r \epsilon r}\right)\right]$$
(٣)

$$\operatorname{RL} (dB) = 20 \log \left| \frac{2 \operatorname{in} - 20}{2 \operatorname{in} + 20} \right| \tag{(f)}$$

Zin : امپدانس ورودی ماده جاذب، 20: امپدانس فضای آزاد، ۲۳ ، ۲۹ ، ۲۰ ، ۲۵ مبت ترتیب نفوذپ ذیری مغناطیسی نسبی و گذردهی الکتریکی نسبی، ضخامت جاذب، فرکانس و سرعت نور است. زمانی که امپدانس ورودی ماده جاذب با امپدانس فضای آزاد برابر شود، حالت تشدیدی صورت گرفته و بیشترین مقدار جذب در ماده صورت خواهد گرفت. در این حالت، انرژی موج الکترومغناطیسی می تواند به طور کامل توسط ماده، جذب شده و از طریق اتلافهای مغناطیسی و دی الکتریکی به گرما تبدیل شود [۳۶–۳۴]. اتلاف باز تابش هشت نمونه ساخته شده از پودر SP1 و SP2 اندازه گیری شد و نتایج حاصله در نمودار ۹ به تصویر کشیده شده است. نمودار ۹-الف بهینه ترین میزان جذب را مختص

در مقایسه دو نمودار اخیر با توجه به ضخامت پوشش بیشینه مقدار اتلاف بازتابش و گستره جذب مشخص است که نمونههای ساخته شده از پودر SP1 در ضخامت کمتر، بیشینه و گستره جذب بهتری از خود نشان میدهند بنابراین می توان نتیجه گرفت افزایش سطح ویژه و کاهش چگالی موجب بهبود جذب خواهد شد.

نانو کامپوزیت ها به دلیل دارا بودن خواص بر تر نسبت به ماکرو کامپوزیت ها معروف شده اند. این خواص به دلیل اندازه کوچک، نسبت زیاد سطح به حجم، ساختار سطح، بر هم کنش ذرات و ... می باشد. بنابراین نانو کامپوزیت ها یک اثر مهم در کاربردهای علمی و ساختاری آینده در زمینه هایی مانند اپتیک، الکترونیک، پوشش های محافظ محسوب می شوند.

قابلیت جذب مایکروویو در جاذب با ثابت میرایی (α) مشخص می شود که از طریق رابطه ۵ محاسبه می گردد. هرچه مقدار α افزایش یابد به این مفهوم است که مواد جاذب امواج الکترومغناطیس توانایی جذب بهتری را دارند [۳۹–۳۷].

 $\alpha = \sqrt{2\pi fc} \times \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\mu''\epsilon'' + \mu'\epsilon')^2}}$ ( $\delta$ )

نتایج محاسبه این پارامتر برای نمونه های ساخته شده از پودر SP1 و SP2 در نمودار ۱۰ ارائه گردیده است، حاکی از آن است که بهترین عملکرد در فرکانس های بیش از GHz ۹ مربوط به نمونه 50-SP1 میباشد و عملکرد نمونه ها با درصد وزنی مشابه با برتری مقدار ثابت میرایی نمونه های SP1 همراه است. بنابراین افزایش سطح ویژه و کاهش چگالی موجب افزایش نقاط تماس با امواج الکترومغناطیسی می شود. این امر منجر به جذب بیشتر امواج می گردد. برای افزایش سطح ویژه می توان از نانو ذرات با اشکال مختلف (مانند نانولوله ها، نانوصفحات) استفاده کرد و یا ساختارهای متخلخل در

مقیاس نانو و ترکیب نانومواد با ماتریس های پلیمری را ایجاد کرد.



## ٤- نتیجه گیری

نتایج حاصله نشان داد که به طور کلی نمونه های متشکل از پودر SP1 عملکرد بهتری از نظر اتلاف مغناطیسی و دی الکتریکی، اتلاف بازتابش و ثابت میرایی دارند بنابراین چگالی کمتر و سطح ویژه بیشتر موجب جذب بالاتر در باند فرکانسی X کامپوزیت جاذب اپوکسی و پودر اسفنجی آهن میشود. پیش از این، جاذب های کامپوزیتی مکررا با پودر کرونیل آهن و پودرهای سنتز شده بررسی گردیده بود، اما به ندرت از پودر اسفنجی آهن در تحقیقات جهانی استفاده گردیده است. تولید کامپوزیت با پودر اسفنجی آهن به علت قیمت پایین آن، بسیار مقرون به صرفه است. در طی این تحقیق، نتایج جانبی دیگری نیز حاصل شد. این نتایج حاکی از آن بود که افزایش درصد پودر آهن موجب کاهش مقدار

20

R

Zhao, Chemical Engineering Journal, 446, 2022, 136975.

[8] L. Sun, Q. Zhu, Z. Jia, Z. Guo, W. Zhao, G. Wu, Carbon,

- 208, 2023, 1.
  [9] J. Wang, Q. Zheng, W. Cao, H. Zhai, M. Cao, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 7, 2024, 14.
- [10] X. Zhong, M. He, C. Zhang, Y. Guo, J. Hu, J. Gu, Advanced Functional Materials, 34, 2024, 2313544.
- [11] Z. Jiang, H. Si, Y. Li, D. Li, H. Chen, C. Gong, J. Zhang, *Nano Research*, **15**, 2022, 8546.
- [12] H. Zhao, X. Xu, Y. Wang, D. Fan, D. Liu, K. Lin, P. Xu, X. Han, Y. Du, *Small*, **16**, 2020, 2003407.
- [13] F. Zhang, Z. Jia, J. Zhou, J. Liu, G. Wu, P. Yin, *Chemical Engineering Journal*, 450, 2022, 138205.
- [14] C. Li, L. Zhang, S. Zhang, Q. Yu, D. Li, L. Zhang, C. Gong, J. Zhang, *Nano Research*, **17**, 2024, 1666.
- [15] Y. Wang, X. Li, X. Han, P. Xu, L. Cui, H. Zhao, D. Liu, F. Wang, Y. Du, *Chemical Engineering Journal*, **387**, 2020, 124159.
- [16] M. Chang, Q. Li, Z. Jia, W. Zhao, G. Wu, Journal of Materials Science & Technology, 148, 2023, 150.
- [17] Z. Jiang, Y. Gao, Z. Pan, M. Zhang, J. Guo, J. Zhang, C. Gong, *Journal of Materials Science & Technology*, **174**, 2024, 195.
- [18] H. Lv, Z. Yang, P.L. Wang, G. Ji, J. Song, L. Zheng, H. Zeng, Z.J. Xu, Advanced Materials, 30, 2018, 1706343.
- [19] A. Kumar, Singh, A. Shishkin, T. Koppel, N. Gupta, Composites Part B: Engineering, 149, 2018, 188.
- [20] X. Liu, Journal of Alloys and Compounds, 654, 2016, 628.
- [21] X. Tang, Materials Science and Engineering, 445, 2007, 135.
- [22] D. Xiang, Q. He, D. Lan, Y. Wang, X. Yin, *Chemical Engineering Journal*, **498**, 2024, 155406.
- [23] Y.H. Yu, Ch.Ch. Ma, K.Chi. Yu, Ch.Ch. Teng, H.W. Tien, K.Y. Chang, Y.K. Kuo, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 2014, 674.
- [24] Y. Ma, Sh. Xiong, L. Cai, L. Meng, G. Chen, Ch. Dong, H. Guan, *Carbon*, 233, 2025, 119882.
- [25] E. Handoko, M. A. Marpaung, Z. Jalil, A. Rahwanto, et al., *Journal of Physics*, 2866, 2024, 012025.
- [26] S. Khasim, Results in Physics, 12, 2019, 1073.
- [27] C.H. Papas, Theory of electromagnetic wave propagation: Courier Corporation, 2014.
- [28] M.F. Iskander, *Electromagnetic fields and waves: Waveland Press*, 2013.
- [29] L.F. Chen, Microwave electronics: measurement and materials characterization: John Wiley & Sons, 2004.
- [30] C. Ge, L. Wang, G. Liu, T. Wang, H. Chen, *Journal of Materials Science*, **30**, 2019, 8390.
- [31] S. Zhang, Z. Jia, B. Cheng, Z. Zhao, F. Lu, G. Wu, Advanced Composites and Hybrid Materials, 5, 2022, 2440.
- [32] J. Zhou, D. Lan, F. Zhang, Y. Cheng, Z. Jia, G. Wu, P. Yin, *Small*, **19**, 2023, 2304932.
- [33] C. Sun, Z. Jia, S. Xu, D. Hu, C. Zhang, G. Wu, Journal of Materials Science & Technology, 113, 2022, 128.
- [34] L. Singh, I.W. Kim, B.C. Sin, U.S. Rai, S. H. Hyun & Y. Lee, *Ceramics International*, 41, 2015, 12218.
- [35] E.A. Nenasheva, N.F. Kartenko, I.M. Gaidamaka, O.N. Trubitsyna, S.S. Redozubov & A.I. Dedyk, *Journal of the European Ceramic Society*, **30**, 2010, 395.
- [36] J. Chameswary & M. T. Sebastian, *Ceramics International*, 39, 2013, 2795.
- [37] J. Liu, Z. Jia, Y. Dong, J. Li, X. Cao, G. Wu, *Materials Today Physics*, 27, 2022, 100801.
- [38] T. Hou, J. Wang, T. Zheng, Y. Liu, G. Wu, P. Yin, *Small*, 19, 2023, 2303463.
- [39] Z. Jia, M. Kong, B. Yu, Y. Ma, J. Pan, G. Wu, Journal of Materials Science & Technology, 127, 2022, 153.

/ می گردد. از طرف دیگر داده ها حاکی از آن است که µ مقدار "µ نمونه های SP1 در مقایسه با نمونه های با همان درصد وزنی از پودر دوم بیشتر است. افزایش درصد وزنی در کامیوزیت های ساخته شده از یک نوع یودر، موجب افزایش سشينه اتلاف باز تابش و كاهش ضخامت نمونه ها مي گردد. مضاف بر این گستره بهینه جذب نمونه های یو در SP1 نسبت به کامبوزیت های بودر SP2 (با در صد وزنی بکسان) به مراتب بیشتر است. سطح ویژه بالا امکان کنترل دقیق تر خواص الكترومغناطيسي كامپوزيت را فراهم مي كند. اين قابلیت تنظیم، طراحی مواد جاذب برای فرکانس های خاص را آسان تر میسازد. در نتیجه، افزایش سطح ویژه در كاميوزيتها و نانو كاميوزيتها مي تواند بطور قابل توجهي جذب امواج الکترومغناطیس را بهبود بخشد. این ویژگی در طراحی مواد جاذب امواج برای کاربردهای مختلف، از جمله حفاظت الكترومغناطيسي و كاهش تـداخل امـواج راديـويي، بسیار مهم است.

نانو کامپوزیت های جاذب امواج الکترومغناطیس یک زمینه تحقیقاتی پویا و در حال رشد است که پتانسیل زیادی برای نو آوری و کاربردهای جدید در آینده دارد. با پیشرفت در زمینه نانو تکنولوژی و علم مواد، انتظار میرود که این مواد نقش مهمتری در حل چالش های مربوط به تداخل امواج الکترومغناطیسی در فناوری های نوین ایفا کنند.

#### مراجع

**JR** 

- K. Huo, S. Yang, J. Zong, J. Chu, Y. Wang, M. Cao, *Carbon*, 213, 2023, 118193.
- [2] H. Zhao, F. Wang, L. Cui, X. Xu, X. Han, Y. Du, Nano-Micro Letters, 13, 2021, 208.
- [3] M. He, J. Hu, H. Yan, X. Zhong, Y. Zhang, P. Liu, J. Kong, J. Gu, Advanced Functional Materials, 35, 2025, 2414910.
- [4] Y. Zhang, J. Kong, J. Gu, Science Bulletin, 67, 2022, 1413.
- [5] H. Lv, Y. Yao, S. Li, G. Wu, B. Zhao, X. Zhou, R.L. Dupont, U.I. Kara, Y. Zhou, S. Xi, B. Liu, R. Che, J. Zhang, H. Xu, S. Adera, R. Wu, X. Wang, *Nature Communications*, 14, 2023, 1982.
- [6] Z. Jia, X. Zhang, Z. Gu, G. Wu, Advanced Composites and Hybrid Materials, 28, 2023, 6.
- [7] P. Yin, G. Wu, Y. Tang, S. Liu, Y. Zhang, G. Bu, J. Dai, Y.