



ساخت و بررسی قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی کامپوزیت پلیمر/ فریت Fe_2O_3 در باند X

محمد حیدری قاسم آبادی¹، رضا سرخوش^{2*}، هادی صبوری³، محمد کاظمی نصرآبادی⁴

1- دانشجوی دکتری هوافضا، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

3- دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

4- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

* تهران، صندوق پستی 13846-63113، R.sarkhosh@ssau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

با روزآمدی و پیشرفت سریع سامانه‌های راداری پیشرفته، نیاز به مواد جاذب امواج ماکروویو با پهنای باند وسیع و قدرت کاهش توان بازگشتی امواج ماکروویو بیش از پیش احساس می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع پنهان‌کاری، در اتصال قطعات هوافضایی کامپوزیتی نیاز به چسب‌های با ویسکوزیته بالا با قابلیت جذب امواج ماکروویو می‌باشد. در این مطالعه یک کامپوزیت بر پایه رزین اپوکسی و پرکننده‌های ذرات فریت قرمز (Fe_2O_3) با درصد وزنی 37.5 و 75 طراحی و به روش دستی ساخته شد و قابلیت جذب امواج ماکروویو در باند فرکانسی (8-12 GHz) X، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج و نمودارهای اندازه‌گیری شده توسط تحلیلگر طیف سنج الکترومغناطیسی، نشان می‌دهد با افزایش درصد وزنی پرکننده‌ها، ضریب گذردهی الکتریکی، ثابت دی‌الکتریک، تانژانت تلفات و تلفات بازتابش افزایش می‌یابد که بیشینه مقادیر آن‌ها برای نمونه با درصد وزنی فریت 75، ضریب گذردهی الکتریکی 3.5، ثابت دی‌الکتریک 3.49، تانژانت تلفات 0.065 و تلفات بازتابش 8.1- دسی‌بل بدست آمد. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، با افزایش مقدار پرکننده تا درصد وزنی 37.5 افزایش یافته و با افزایش مقدار وزنی پرکننده فریت این ضریب کاهش می‌یابد. این میرایی الکترومغناطیسی پویا، کامپوزیت اپوکسی/ فریت اکسید آهن قرمز (Fe_2O_3)، را به عنوان گزینه پیشرو برای ساخت سازه‌های هوافضایی با سرنشین و بدون سرنشین، فناوری پنهان‌کاری و کنترل و کاهش تداخلات الکترومغناطیسی در محیط کار صنعتی مطرح می‌سازد.

دریافت: 1404/05/19

پذیرش: 1404/09/08

کلیدواژگان:

کامپوزیت، فریت، ضریب گذردهی الکتریکی، ثابت دی‌الکتریک، تانژانت تلفات

Fabrication and investigation of the electromagnetic wave absorption capability of polymer/ferrite Fe_2O_3 composite in X-band

Mohammad Heydari Qasemabadi¹, Reza Sarkhosh^{1*}, Hadi Sabouri², Mohammad Kazemi Nasrabadi¹

1- Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

P.O.B. 13846-63113, Tehran, Iran, R.sarkhosh@ssau.ac.ir

Keywords

Composite, ferrite, electrical permittivity, dielectric constant, loss tangent

Abstract

With the rapid development and modernization of advanced radar systems, the need for microwave absorbing materials with wide bandwidth and microwave return power reduction is felt more than ever. Considering the importance of the issue of stealth, high-viscosity adhesives with microwave absorbing capabilities are needed in the connection of composite aerospace parts. In this study, a composite based on epoxy resin and red ferrite particle fillers (Fe_2O_3) with 37.5 and 75 weight percent was designed and manufactured manually, and the ability to absorb microwave waves in the X frequency band (8–12 GHz) was evaluated. The results and graphs measured by the electromagnetic spectrometer analyzer show that with increasing weight percentage of fillers, the permittivity, dielectric constant, loss tangent and reflection loss increase, and their maximum values were obtained for the sample with a ferrite weight percentage of 75, permittivity of 3.5, dielectric constant of 3.49, loss tangent of 0.065 and reflection loss of -8.1 dB. The magnetic permeability coefficient increases with increasing the filler amount up to 37.5 weight percentage and decreases with increasing the weight percentage of ferrite filler. This dynamic electromagnetic damping makes the epoxy/red iron oxide ferrite (Fe_2O_3) composite a leading option for the construction of manned and unmanned aerospace structures, stealth technology and control and reduction of electromagnetic interference in the industrial workplace.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Heydari Qasemabadi, M., Sarkhosh, R., Sabouri, H., Kazemi Nasrabadi, M., "Fabrication and investigation of the electromagnetic wave absorption capability of polymer/ferrite Fe_2O_3 composite in X-band." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 2, pp. 2732-2740, 2025. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2068474.1935>

1- مقدمه

امواج ماکروویو به عنوان بخش جدایی ناپذیر فناوری های مدرن، در کاربردهایی چون سیستم های ارتباطات زمینی، هوایی و دریایی نسل پنجم و ششم [1]، رادارهای مختلف هواشناسی، فرودگاهی و مراقبتی [2] و فناوری های مخفی سازی سازه های زمینی، هوایی و دریایی [3] نقش اساسی دارند. در این میان، رادارها، به عنوان یک سیستم الکترومغناطیسی برای تشخیص و تعیین موقعیت هدف به کار می روند که چهار روش اساسی طراحی سازه و بدنه، بکارگیری و استفاده از مواد جاذب راداری، ازکار انداختن های غیرفعال و ازکار انداختن های فعال برای کاهش سطح مقطع راداری وجود دارد.

مواد جاذب امواج ماکروویو با استفاده از جذب انرژی امواج باعث می گردند که بازتابش امواج به رادار را کاهش دهند. انرژی امواج از طریق یک یا چند ساختار جذب می شود که ممکن است شامل خواص دی الکتریک مواد باشد. این اتلاف در واقع تبدیل انرژی امواج ماکروویو به گرما است. اگرچه اکثر جاذب ها انرژی کافی را از بین نمی برند به طوری که در هنگام تحت تأثیر قرار گرفتن توسط رادار، به صورت قابل تشخیصی گرم شوند، با این وجود این ساختاری است که با آن کار می کنند [4]. ظهور و توسعه کامپوزیت های پلیمری، تقویت شده با الیاف، به دوره بعد از جنگ جهانی دوم بازمی گردد که هزینه های بالای تولید این مواد در آن زمان، محدودیت هایی در کاربردهای آن ها ایجاد کرده بود [5]. از سال 1990، کاهش هزینه های تولید کامپوزیت ها، زمینه ساز استفاده گسترده از آن ها در صنایع گوناگون شد و محققان همواره در تلاش هستند با ارائه و ایجاد تغییر در ترکیب مواد و هندسه ساختار و... خواص مکانیکی مواد مرکب را بهبود ببخشند [6,7]. کامپوزیت های پلیمری مبتنی بر رزین اپوکسی به دلیل چگالی پایین (1.1-1.4 گرم بر سانتی متر مکعب) [8] و قابلیت اصلاح شیمیایی ساختار با افزودنی های مختلف از جمله فریت، نانو لوله های کربنی و سایر مواد، گزینه های جذاب برای جایگزینی فلزات سنتی مانند آهن، آلومینیوم، آلیاژهای سخت و سایر فلزات صنعتی را فراهم کرده اند و در انواع کاربردها از جمله ساختارهای اصلی و اجزا هواپیماهای مسافری و جنگنده ها کاربرد دارند [9]. محققان مطالعات زیادی بر روی خواص مختلف از جمله ریزساختار، خاصیت گذردی و نفوذپذیری مغناطیسی، قابلیت جذب، مقدار سفتی، استحکام، مقاومت به خمش و.. کامپوزیت های جاذب ماکروویو انجام داده اند که به تعدادی از آنها اشاره شده است.

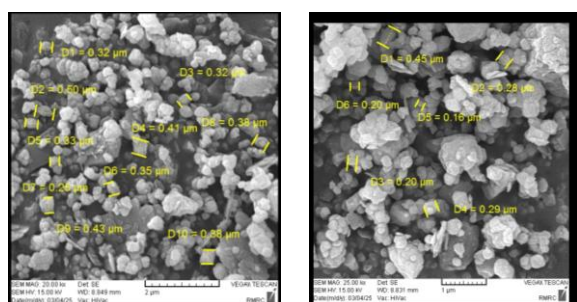
حیدری قاسم آبادی و همکاران [10] به ارزیابی همزمان و مقایسه ای تأثیر انواع مختلف الیاف (کربن، کولار، شیشه و بازالت) بر جذب امواج رادیویی در باند X بدون استفاده از پرکننده های جاذب راداری روش بازتابندگی پرداختند که نتایج آزمایش ها نشان داد که با افزایش فرکانس، قدرت بازتابی در تمامی نمونه ها کاهش می یابد، به گونه ای که کامپوزیت کربن/اپوکسی بهترین عملکرد را با حداقل توان بازگشتی معادل -39.6961 دسی بل در 12 گیگاهرتز به نمایش گذاشت. نایتو و همکاران [11] به بررسی وجود فرکانس تطبیق و ضخامت تطبیق برای پلیمرهای جذب کننده امواج ماکروویو مبتنی بر پرکننده فریت پرداخته اند که حد بالایی فرکانس تطبیق برای فریت جامد 2 گیگاهرتز و ضخامت تطبیق بدون در نظر گرفتن فرکانس تطبیق بین 4 تا 10 میلی متر متغیر بدست آمده است. سینف و همکاران [12] به بررسی نفوذپذیری و گذردی و نفوذپذیری مختلف، مقادیر جذب امواج ماکروویو و تلفات بازتاب امواج بر روی نمونه

کامپوزیتی پرداخته اند که مقدار تلفات بازتابش 30 دسی بل برای کامپوزیت با ضخامت 4.15 میلی متر به دست آمد که مقادیر تجربی با مقادیر عددی فرکانس تطبیق و ضخامت تطبیق مطابقت داشت. سینف و همکاران [13] مطالعات جذب امواج ماکروویو، گذردی و نفوذپذیری مختلط بر روی کامپوزیت ها با پرکننده های هگرافریت با سطوح مختلف $\text{Ba}(\text{CoTi})_x$ Fe_2O_3 در محدوده فرکانس 8 تا 12.4 گیگاهرتز را انجام و تغییرات تلفات امواج بازتابی را مورد بررسی قرار دادند که حداکثر جذب 16 دسی بل برای نمونه هایی با ضخامت 2.8 میلی متر به دست آمد. اوهلان و همکاران [14] به بررسی خواص جذب امواج ماکروویو کامپوزیت های پلیمری رسانا با پرکننده های نانوذرات فریت باریم در محدوده فرکانس 18-12.4 گیگاهرتز پرداختند که نتایج آن ها نشان داد، نانوکامپوزیت های پلیمری رسانا با نانوذرات فریت باریم دارای خواص جذب امواج ماکروویو بالایی هستند و مقدار جذب ماکروویو به مقادیر ضرایب دی الکتریک، نفوذپذیری مغناطیسی و کسر حجمی نانوذرات بستگی دارد. همچنین این کامپوزیت به دلیل جذب 28.9 دسی بل به عنوان محافظ، کارایی بالایی دارد. سرخوش و همکاران [15] فرآیند آماده سازی کامپوزیت پلیمری تفلون تقویت شده با الیاف شیشه به روش پخت معمولی را انجام دادند و جهت تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی آزمون ثابت دی- الکتریک در باند X را انجام دادند که بیشینه ثابت دی الکتریک و تانژانت تلفات نمونه های تولیدی در باند X به ترتیب برابر با 2.37 و 0.096 بدست آمد. بررسی اثر پرکننده نانوذرات فوم سیلیکا بر روی خواص الکتریکی نانوکامپوزیت پلیمری اپوکسی/ فوم سیلیکا توسط سرخوش و همکاران [16] انجام شد که نتایج نشان داد بیشینه ثابت دی الکتریک اندازه گیری شده برای رزین خالص، فوم سیلیکا 5 و 9 درصد وزنی به ترتیب برابر با، 2.95، 2.97 و 3.09 و بیشینه تانژانت تلفات برای رزین اپوکسی، فوم سیلیکا 5 و 9 درصد وزنی به ترتیب برابر با، 0.16، 0.17 و 0.23 است. پراتاب و همکاران [17] به بررسی خاصیت جذب امواج ماکروویو رزین اپوکسی تحت اثر پرکننده های فریت و گرافیت پرداختند که نتایج حاکی از آن بود که کامپوزیت های طراحی شده، توانستند حداکثر مقادیر گذردی و نفوذپذیری واقعی را به ترتیب با مقادیر $\epsilon' = 18.90$ و $\mu' = 0.91$ ثبت کنند که این مواد در جذب امواج ماکروویو به ویژه در باند فرکانسی 2-8.2 گیگاهرتز کارایی بالایی دارند. شی و همکاران [18] به بررسی خواص جذب فوم کامپوزیت متخلخل سه بعدی Fe_3O_4 /گرافن پرداختند که در نسبت 1:1 اکسید گرافن به Fe_3O_4 ، اتلاف بازتاب 45.08 دسی بل در ضخامت 2.5 میلی متر بدست آمد. دانش و همکاران [19] پارامترهای موثر بر قابلیت جذب مانند مواد تقویت کننده، ضخامت لایه و روش های ساخت سازه های کامپوزیتی جاذب رادار را در باند X مورد بررسی و بهینه سازی قرار دادند. طراحی بهینه شده در نهایت به یک جاذب رادار دولایه با ضخامت کل 3.4 میلی متر با عملکرد بالا منجر شد که میانگین تلفات انعکاس 7.5 دسی بل و حداکثر تلفات انعکاس 13.5 دسی بل را در باند X ارائه داد. در پژوهش دیگری دانش و همکاران [20] به بررسی قابلیت جذب کامپوزیت چند لایه با پرکننده های پلی آنیلین و آهن کربونیل پرداختند که تقریباً 80٪ جذب در باند X (8-12 گیگاهرتز) با حداکثر افت بازتاب 14- دسی بل بدست آمد. رحیمی پیشبجاری و همکاران [21] به بررسی کامپوزیت پایه پلیمری با هدف کاهش سطح مقطع راداری پرداخته اند. نمونه های کامپوزیتی اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه با افزودنی های آلومینیوم، آلومینا و اکسید آهن در درصدهای حجمی 1، 3

ماکزیمم پودر استفاده شده در مرجع [18] که 75 درصد وزنی رزین بوده است در نظر گرفته شده است.

جدول 1 خواص رزین اپوکسی LR 2025

Table 1 Properties of LR 2025 epoxy resin			
فیزیکی			
قطر 50 میلی متر و ضخامت 26 میلی متر	قطر 50 میلی متر و ضخامت 3 میلی متر	دمای کاری [°C]	خاصیت
عمر مصرف	25	25	عمر مصرف
زمان ژل شدن	25	25	زمان ژل شدن
زمان خشک شدن	25	720	زمان خشک شدن
حرارتی و الکتریکی			
مقدار	واحد	استاندارد	خاصیت
2.5	-	D150	ضریب دی الکتریک
61	[°C]	D648	مقاومت حرارتی تا نقطه نرمی
80	[°C]	D648	مقاومت حرارتی عملی

Fig. 1 Electron microscope image of Fe₂O₃ ferrite

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی فریت Fe₂O₃

جدول 2 مشخصات پودر فریت Fe₂O₃

Table 2 Characteristics of Fe ₂ O ₃ ferrite powder	
فرمول مولکولی	Fe ₂ O ₃
شکل	پودر
اندازه دانه	0.33(μm)
رنگ	قرمز
وزن مولکولی	159.69(g/mol)
چگالی	5.25 (g/cm ³)

برای ساخت نمونه‌ها، هاردنر مطابق با داده‌های فنی شرکت سازنده به نسبت 15 به 100 به رزین اپوکسی اضافه گردید. پودر فریت Fe₂O₃ پس از وزن‌کشی با ترازو دقت صدم گرم با ترکیب رزین و هاردنر مطابق جدول-3 به مدت 15 دقیقه به روش دستی مخلوط شدند. پودر فریت با دو نوع درصد وزنی متفاوت به ترکیب رزین و هاردنر افزوده شد تا خواص جذب آنها با هم بررسی و مقایسه گردد. پودر فریت Fe₂O₃ شکل-2 الف و نمونه مخلوط شده پودر فریت Fe₂O₃ با رزین اپوکسی در شکل 2-ب نشان داده شده است.

و 5 ساخته شده و در نهایت میزان جذب امواج آن‌ها در باند X (فرکانس های 8.5، 9.5، 10.5 و 11.5 گیگاهرتز) تحت آزمون VNA قرار گرفته که بیشترین جذب در کامپوزیت با پوشش آلومینیوم به میزان (0.5٪) به دلیل رسانایی بالاتر و کمترین جذب در کامپوزیت با پوشش آلومینا به میزان (1٪) به دلیل رسانایی کم بوده است که با افزایش درصد افزودنی‌ها، میزان جذب امواج افزایش یافته است. ونگ و همکاران [22] با افزودن نانو ذرات فریت کبالت به رزین اپوکسی، مقدار جذب 32 دسیبل را در ضخامت 2/5 میلی‌متر به دست آوردند. تحقیقات نشان می‌دهد که مکانیزم‌های بکار گرفته شده در نانوکامپوزیت‌های ترکیب پلیمر با FeSiAl، باعث می‌گردد که تلفات مغناطیسی (μ) در فرکانس‌های زیر 8 گیگاهرتز، به عنوان عامل اصلی جذب مدنظر قرار گیرد [23]. در حالی که تلفات دی‌الکتریک (ε) در محدوده 40-18 گیگاهرتز، در این ساختار غالب می‌شود [24]. از منظر استانداردهای بین‌المللی، ساختارها و موادی که برای جاذبه‌های با کاربری نظامی طراحی، ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌بایست حداقل جذب 15 دسی‌بل ارائه دهند [25,26].

با وجود تحقیقات گسترده در این حوزه، که بخشی از آن در بالا آورده شده است، می‌توان بیان کرد که تحقیقات اندکی به بررسی قابلیت جذب امواج ماکروویو کامپوزیت‌های اپوکسی/فریت قرمز Fe₂O₃ با اندازه ذره میکرو، در محدوده باند فرکانسی X پرداخته‌اند. در این پژوهش برای درک بهتر از مکانیزم جذب ذرات میکرونی، مدل‌های پیش‌بینی برای کامپوزیت‌های میکرونی و راهکار عملی برای صنعت با مواد در دسترس به ارائه یک راهکار مقرون‌به‌صرفه و قابل اجرا در مقیاس صنعتی برای تولید جاذبه‌های امواج الکترومغناطیسی در باند X با استفاده از ذرات میکرومتری فریت Fe₂O₃ با درصد وزنی‌های مختلف به عنوان پرکننده کامپوزیت پرداخته شده تا عملکرد مطلوب و قابلیت تولید انبوه سازه با کاهش بازتابندگی امواج الکترومغناطیسی برای استفاده در سازه‌های هوایی و هوافضایی مورد بررسی قرار گیرد.

2- مطالعه تجربی

2-1- مواد و تجهیزات

رزین مورد استفاده در این پژوهش، رزین اپوکسی LR 2025 و هاردنر HE 1515 است که از شرکت پیوند مبتکر پارس تهیه شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی رزین مطابق با داده‌های فنی شرکت پیوند مبتکر پارس در جدول 1 آورده شده است. فریت مورد استفاده در این پژوهش، فریت Fe₂O₃ می‌باشد که جهت تعیین اندازه دانه فریت، از میکروسکوپ الکترونی آزمایشگاه رازی استفاده شد که نمونه تصویر آن در شکل 1 آورده شده است. مشخصات فنی پودر فریت مورد استفاده، در جدول 2 آورده شده است.

2-2- فرایند آماده‌سازی و تولید کامپوزیت

در اتصال قطعات هوافضایی کامپوزیتی مانند قسمت‌های بالا و پایین بال یا بدنه به یکدیگر نیاز به چسب‌های با ویسکوزیته بالا می‌باشد که خمیری شکل باشند لذا ترکیب پرکننده Fe₂O₃ با رزین با توجه به شکل خمیری آن، از روان شدن رزین حین اتصال و چکه کردن آن جلوگیری می‌کند و با توجه به اهمیت پنهان‌کاری در قطعات هوافضایی، استفاده از پودرهای فریت با قابلیت جذب امواج رادیویی در ساخت چسب‌های اتصالات حائز اهمیت می‌باشد. لذا در این پژوهش با الگوبرداری از مرجع [18] درصد وزنی پودر فریت Fe₂O₃ برای ساخت نمونه‌ها، 0، 50 و 100 درصد

جدول 3 مشخصات و وزن نمونه‌ها

Table 3 Specifications and weights of samples

شماره نمونه	مواد	رزین اپوکسی (gr)	هاردنر (gr)	فریت Fe_2O_3 (gr)	نام اختصاری نمونه‌ها
1	رزین اپوکسی خالص	180	27	-	R
2	رزین اپوکسی پر شده با فریت Fe_2O_3 با 37.5 درصد وزنی	180	27	77.625	RF37.5
3	رزین اپوکسی پر شده با فریت Fe_2O_3 با 75 درصد وزنی	180	27	155.25	RF75

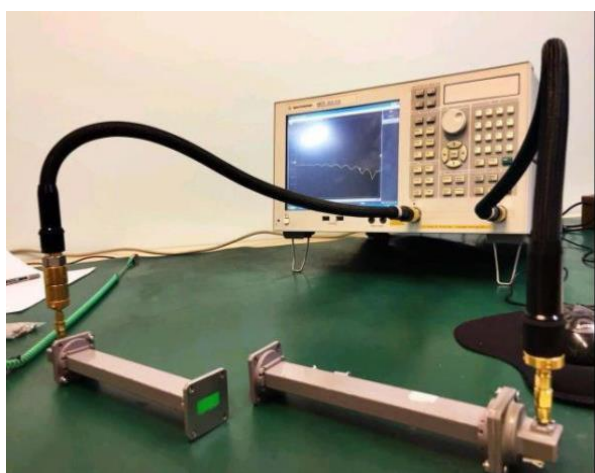


Fig. 4 Network analyzer used in dielectric strength testing

شکل 4 دستگاه نتورک آنالایزر مورد استفاده در آزمون ضریب دی‌الکتریک

استاندارد اندازه‌گیری مشخصه‌های دی‌الکتریک مواد براساس استاندارد ASTM D5568 روش اندازه‌گیری موجبری دوپورت است. روش موجبری مستطیلی نمونه‌ای از دسته‌بندی روش‌های اندازه‌گیری است که روش خط انتقال جهت دستیابی به ضریب گذردهی و نفوذپذیری مختلط نمونه نامیده می‌شود. در این روش نمونه با سطح مقطع موجبری تطبیق و به همان اندازه پر می‌شود و میزان بازگشتی در طول نمونه اندازه‌گیری می‌شود. روش‌های اندازه‌گیری خط انتقال به طور معمول دقیق‌تر از روش تک پورته‌ای است. این روش برای اندازه‌گیری گذردهی الکتریکی نسبی مختلط (ثابت دی‌الکتریک نسبی و تلف) و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مختلط یک ماده جامد، ایزوتروپیک، مناسب است. این اندازه‌گیری برای محدوده فرکانسی 100 مگاهرتز تا 20 گیگاهرتز معتبر است. این محدوده دقیق نیست و بستگی به اندازه نمونه و اندازه خط انتقال موجبری مستطیلی نگهدارنده دارد (نمونه‌های بزرگ در فرکانس‌های پایین و نمونه‌های کوچک برای فرکانس‌های بزرگ). به عنوان یک روش غیر رزونانسی انتخاب هر تعداد فرکانس اندازه‌گیری گسسته در محدوده فرکانسی مناسب خواهد بود. برای پوشش کل محدوده فرکانسی استفاده از چند موجبر با ابعاد مختلف مورد نیاز است. هم‌چنین به طور کلی این آزمایش را می‌توان برای موجبرهای دایروی نیز به کار برد. نمونه‌های مورد آزمایش بایستی به اندازه کافی بلند باشند. برش نمونه‌ها بایستی دقیق و بدون بریدگی‌های نامرتب باشد؛ چرا که وجود هرگونه کوتاه یا بلندی نامنظم در اندازه نمونه‌ها باعث ورود هوای اضافی (ماده‌ای با دی‌الکتریک متفاوت) در لبه‌های مشترک نمونه با موجبر شده و نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نمونه‌ها بایستی بسیار تمیز و بدون آلودگی باشند. برای انجام این آزمون برای هر کدام از 3 ماده ذکر شده، دو نمونه با ابعاد 10.16 میلی‌متر، طول 22.86 میلی‌متر و

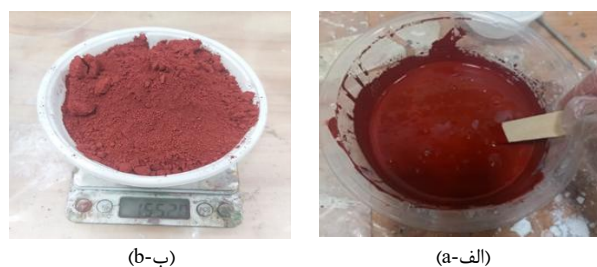


Fig. 2 Materials for making samples (a) Fe_2O_3 ferrite powder (b) Epoxy resin filled with Fe_2O_3 ferrite powder

شکل 2 مواد جهت ساخت نمونه‌ها (الف) پودر فریت Fe_2O_3 (ب) رزین اپوکسی پر شده با پودر فریت Fe_2O_3

در ادامه پس از آماده‌سازی، قالب‌ها با تینر تمیزکاری شدند و جهت جلوگیری از چسبیدن قطعات به قالب، قالب‌ها سه مرحله واکس زده شدند و سپس مواد در درون قالب‌ها شکل 3 ریخته شد. برای خارج شدن حباب‌های حاصل از هم‌زدن و فرآیند پخت، از دستگاه ویبریشن به مدت 45 دقیقه استفاده گردید. پس از 24 ساعت نمونه‌ها با احتیاط از قالب خارج شد و جهت عملیات پخت نهایی نمونه‌ها به مدت 7 روز در دمای محیط قرار گرفتند.



Fig. 3 Molded sample

شکل 3 نمونه قالب‌گیری شده

3- آزمون ثابت دی‌الکتریک

آزمون ثابت دی‌الکتریک برای تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی کامپوزیت تولید شده انجام شد. آزمون ثابت دی‌الکتریک با استفاده از دستگاه نتورک آنالایزر واقع در پژوهشگاه نصر، همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است، انجام شد.

قسمت حقیقی (μ') جزء بدون تلفات است که به ذخیره سازی انرژی در ماده مربوط می شود و قسمت موهومی (μ'') جزء تلفاتی است که میزان اتلاف انرژی مغناطیسی (تبدیل به گرما) در ماده را نشان می دهد.

وقتی میدان مغناطیسی متغیر یک موج به یک ماده با تلفات مغناطیسی می تابد: میدان مغناطیسی، دو قطبی های مغناطیسی درون ماده (مانند دامنه های مغناطیسی در فرومغناطیس ها) را وادار به چرخش و تغییر جهت می کند که این چرخش و تغییر جهت، به دلیل وجود اصطکاک داخلی، با تاخیر همراه است. غلبه بر این اصطکاک داخلی نیاز به صرف انرژی دارد که این انرژی صرف شده از انرژی موج گرفته می شود و به صورت گرما در ماده تلف می گردد. در نتیجه، دامنه موج مغناطیسی کاهش می یابد که این فرآیند اتلاف انرژی در معادلات، در قالب قسمت موهومی گنجانده شده است.

نمودارهای ضریب گذردهی الکتریکی-فرکانس، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی-فرکانس، ثابت دی الکتریک- فرکانس، تاخیرات تلفات- فرکانس و تلفات بازتابش-فرکانس برای نمونه کامپوزیت های تولید شده، با استفاده از دستگاه تحلیلگر شبکه به دست آمد. ضریب گذردهی الکتریکی-فرکانس و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی-فرکانس برای نمونه کامپوزیت R در شکل 6 نشان داده شده است که براساس این منحنی ها بیشینه ضریب گذردهی الکتریکی واقعی 3.08 و موهومی 0.16 و بیشینه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی واقعی 1.09 و موهومی 0.1 برای نمونه بدون پرکننده در باند X بدست آمده است. ضریب گذردهی الکتریکی-فرکانس و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی-فرکانس برای نمونه کامپوزیت RF37.5 در شکل 7 نشان داده شده است که براساس این منحنی ها بیشینه ضریب گذردهی الکتریکی واقعی 3.25 و موهومی 0.2 و بیشینه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی واقعی 1.15 و موهومی 0.14 برای نمونه با درصد فریت با درصد وزنی 37/5 در باند X بدست آمده است. همچنین ضریب گذردهی الکتریکی-فرکانس و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی-فرکانس برای نمونه کامپوزیت RF75 در شکل 8 نشان داده شده است که براساس این منحنی ها بیشینه ضریب گذردهی الکتریکی واقعی 3.5 و موهومی 0.23 و بیشینه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی واقعی 1.05 و موهومی 0.05 برای نمونه با پرکننده فریت با درصد وزنی 75 در باند X بدست آمده است.

نمودار مقایسه ضریب گذردهی الکتریکی-فرکانس برای نمونه های مختلف در شکل 9 آورده شده است که براساس این منحنی ها، با افزایش درصد وزنی پرکننده فریت به نمونه ها، ضریب گذردهی الکتریکی واقعی و موهومی افزایش می یابد. نمودار مقایسه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی - فرکانس برای نمونه های مختلف در شکل 10 آورده شده است که براساس این منحنی ها، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی واقعی و موهومی در درصد وزنی پرکننده فریت 37.5 بیشینه مقدار را دارا می باشد. همچنانکه از منحنی مشاهده می گردد با افزایش مقدار پرکننده فریت به بیش از درصد وزنی 37.5، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی واقعی و موهومی کاهش می یابد.

با ضخامت 2.5 میلی متر همان گونه که در شکل 5-الف، شکل 5-ب و شکل 5-پ نشان داده شده با استفاده از دستگاه واترجت برش زده شد. این ابعاد برابر با ابعاد تیغی دستگاه آزمون در نظر گرفته شدند.

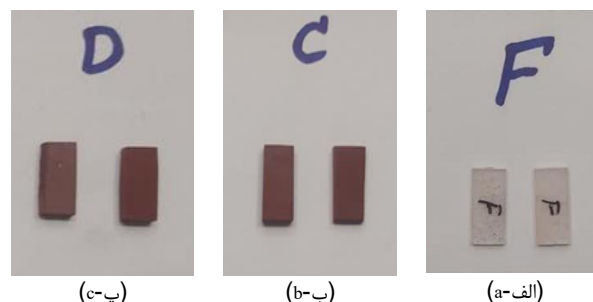


Fig. 5 Cut samples for dielectric constant test (a) Cut sample from pure resin (R) (b) Cut sample from resin filled with 37.5 wt% Fe2O3 ferrite powder (RF37.5) (c) Cut sample from resin filled with 75 wt% Fe2O3 ferrite powder (RF75)

شکل 5 نمونه های برش داده شده برای آزمون ثابت دی الکتریک (الف) نمونه بریده شده از رزین خالص (R) (ب) نمونه بریده شده از رزین پر شده با پودر فریت Fe2O3 با درصد وزنی 37.5 (RF37.5) (پ) نمونه بریده شده از رزین پر شده با پودر فریت Fe2O3 با درصد وزنی 75 (RF75)

4-بحث و نتایج

ضریب گذردهی الکتریکی که با نماد ϵ نشان داده می شود، یک کمیت فیزیکی است که میزان مقاومت یک ماده در برابر تشکیل میدان الکتریکی را توصیف می کند. در حالت کلی و برای میدان های متغیر با زمان (مانند امواج الکترومغناطیسی)، ضریب گذردهی یک عدد حقیقی ساده نیست، بلکه یک عدد مختلط است که به صورت رابطه (1) بیان می شود.

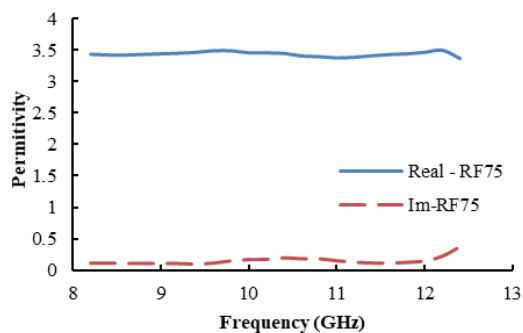
$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

قسمت حقیقی (ϵ') همان جزء بدون تلفات است که به ذخیره سازی انرژی در ماده (پلاریزاسیون) مربوط می شود و سرعت فاز موج را تعیین می کند. قسمت موهومی (ϵ'') جزء تلفاتی است که میزان اتلاف انرژی الکترومغناطیسی (تبدیل به گرما) در ماده را نشان می دهد.

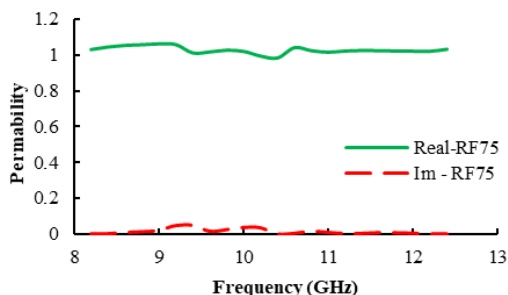
وقتی میدان الکتریکی یک موج به یک ماده می تابد: این میدان بر روی بارهای آزاد (الکترون ها در رساناها) یا بارهای مقید (در دی الکتریک های ناقص) نیرو وارد می کند. این بارها به نوسان واداشته می شوند. در حین این نوسان، بارها با اتم ها یا یون های دیگر برخورد می کنند. این برخوردها باعث انتقال انرژی نوسانی به انرژی حرارتی (گرما) می شود. در نتیجه، انرژی موج اصلی کاهش می یابد و دامنه آن کم می شود. این فرآیند اتلاف انرژی در معادلات، در قالب قسمت موهومی گنجانده شده است.

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی که با نماد μ نشان داده می شود، یک کمیت فیزیکی است که میزان قابلیت یک ماده برای متمرکز کردن خطوط میدان مغناطیسی را توصیف می کند. برای میدان های متغیر با زمان (مانند امواج الکترومغناطیسی)، نفوذپذیری نیز می تواند یک عدد مختلط باشد که به صورت رابطه (2) بیان می شود.

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$



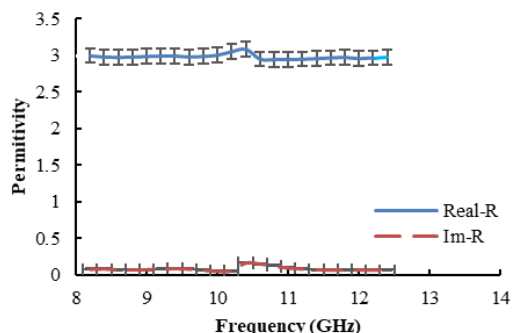
(الف-ا)



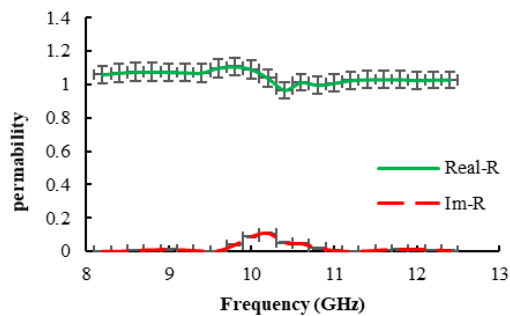
(ب-ب)

Fig. 8 Diagram of electrical permittivity and magnetic permeability coefficients of sample RF75 (a) Diagram of electrical permittivity coefficient (b) Magnetic permeability coefficient

شکل 8 نمودار ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه RF75 (الف) نمودار ضریب گذردهی الکتریکی (ب) ضریب نفوذپذیری مغناطیسی



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 6 Diagram of electrical permittivity and magnetic permeability coefficients of sample R (a) Diagram of electrical permittivity coefficient (b) Magnetic permeability coefficient

شکل 6 نمودار ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه R (الف) نمودار ضریب گذردهی الکتریکی (ب) ضریب نفوذپذیری مغناطیسی

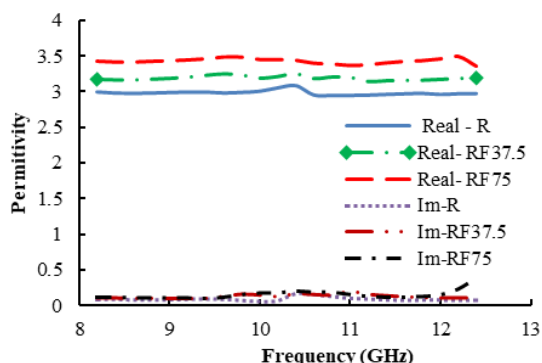
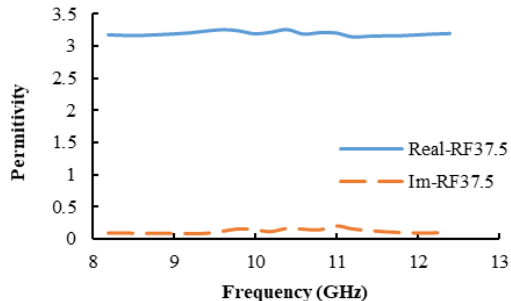
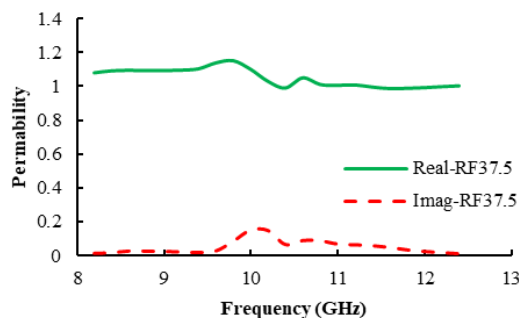


Fig. 9 Diagram comparing the permittivity of samples with different weight percentages of ferrite

شکل 9 نمودار مقایسه ضریب گذردهی نمونه‌ها با درصد وزنی‌های مختلف فریت



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 7 Diagram of electrical permittivity and magnetic permeability coefficients of sample RF37.5 (a) Diagram of electrical permittivity coefficient (b) Magnetic permeability coefficient

شکل 7 نمودار ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه RF37.5 (الف) نمودار ضریب گذردهی الکتریکی (ب) ضریب نفوذپذیری مغناطیسی

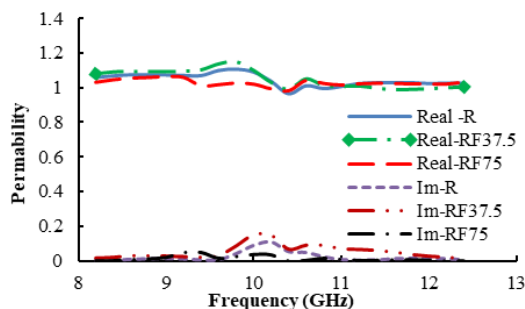


Fig. 10 Graph comparing the permeability coefficient of samples with different weight percentages of ferrite

شکل 10 نمودار مقایسه ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها با درصد وزنی‌های مختلف فریت

جدول 4 خلاصه داده‌های آزمون دی‌الکتریک و روند کلی تغییرات

Table 4 Summary of dielectric test data and overall trend of changes

پارامتر	نمونه R	نمونه R37.5	نمونه R75	روند تغییرات
گذردهی واقعی (ϵ')	3.08	3.25	3.50	افزایش مداوم
گذردهی موهومی (ϵ'')	0.16	0.20	0.23	افزایش مداوم
نفوذپذیری واقعی (μ')	1.09	1.15	1.05	افزایش و سپس کاهش
نفوذپذیری موهومی (μ'')	0.10	0.14	0.05	افزایش و سپس کاهش شدید

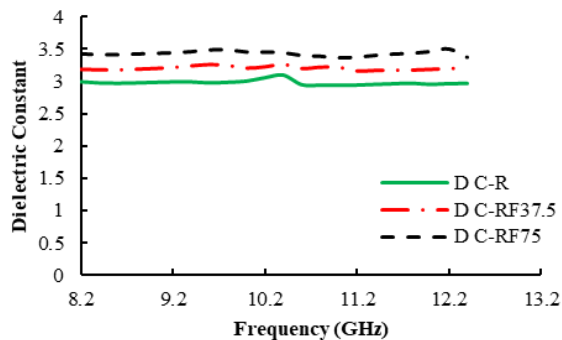


Fig. 11 Diagram comparing the dielectric coefficient of samples with different weight percentages

شکل 11 نمودار مقایسه ضریب دی‌الکتریک نمونه‌ها با درصد وزنی‌های مختلف

نمودار تانژانت تلفات- فرکانس برای نمونه‌های مختلف در شکل 12 نشان داده شده است. براساس این منحنی‌ها، با افزایش درصد وزنی پرکننده فریت، تانژانت تلفات افزایش می‌یابد. طبق نمودارها بیشینه تانژانت تلفات برای نمونه بدون پرکننده فریت، مقدار 0.054 در فرکانس 10.4 گیگاهرتز می‌باشد و بیشینه تانژانت تلفات برای نمونه با درصد وزنی فریت 37.5، مقدار 0.064 در فرکانس 11 گیگاهرتز می‌باشد و بیشینه تانژانت تلفات برای نمونه با درصد وزنی فریت 75، مقدار 0.065 در فرکانس 12.2 گیگاهرتز می‌باشد.

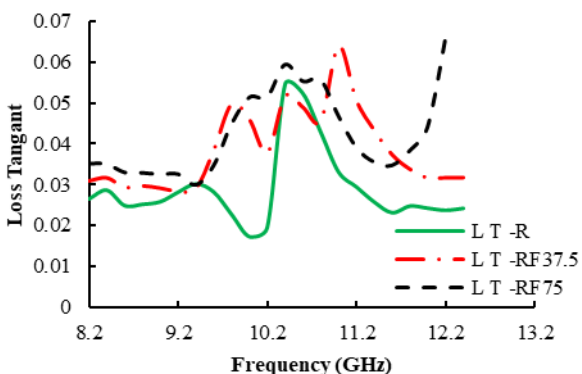


Fig. 12 Comparison chart of loss tangent of samples with different weight percentages

شکل 12 نمودار مقایسه تانژانت تلفات نمونه‌ها با درصد وزنی‌های مختلف

طبق نظریه امواج الکترومغناطیسی، تلفات بازتاب، معیار مهمی برای عملکرد جذب مایکروویو است که معادله آن به صورت رابطه (3) [12] است:

$$RL(\text{dB}) = 20 \text{Log} \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (3)$$

برای تحلیل کمی آزمون دی‌الکتریک انجام شده، مقادیر بیشینه ضریب گذردهی الکتريکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نمونه‌های ساخته شده به صورت مقایسه‌ای در جدول 4 آورده شده است. طبق داده‌های جدول 4 با افزایش درصد فریت، ثابت دی‌الکتریک واقعی به طور پیوسته افزایش یافته است بعلاوه آن که فریت یک ماده با ثابت دی‌الکتریک بالاتر از رزین اپوکسی خالص است و با افزودن آن، چگالی قطبش‌پذیری در کامپوزیت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فریت تلفات دی‌الکتریک نیز، بیشتر شده است زیرا فریت دارای هدایت الکتريکی محدود و ساختارهای قطبش داخلی است که منجر به اتلاف انرژی الکترومغناطیسی به صورت گرما می‌شود لذا افزودن فریت، سهم تلفات دی‌الکتریک در جذب کلی امواج را به طور پیوسته تقویت می‌کند

طبق جدول 4 از نمونه R به R37.5 هر دو پارامتر μ' و μ'' افزایش می‌یابند. با افزودن فریت، حجم ماده مغناطیسی در کامپوزیت افزایش یافته و در نتیجه قابلیت ذخیره‌سازی و اتلاف انرژی مغناطیسی بیشتر می‌شود. این یک روند مورد انتظار است. ولی از نمونه R37.5 به R75 هر دو پارامتر μ' و μ'' کاهش می‌یابند. به ویژه کاهش μ'' (از 0.14 به 0.05) بسیار چشمگیر و تعیین‌کننده است. دلیل آن فشرده شدن فریت‌ها در درصدهای بسیار بالای می‌باشد و که یک شبکه هدایت الکتريکی در سراسر کامپوزیت تشکیل می‌دهند. این شبکه باعث می‌شود میدان الکتريکی القا شده توسط موج، بیشتر جریان‌های گردابی ایجاد کند. این جریان‌های گردابی یک میدان مغناطیسی مقابل (طبق قانون لنز) ایجاد می‌کنند که خاصیت مغناطیسی مؤثر ماده را خنثی می‌کند. در نتیجه، μ' و به ویژه μ'' که نمایانگر تلفات مغناطیسی است، به شدت کاهش می‌یابد. این پدیده به "تلفات گردابی" معروف است و برای ذرات مغناطیسی در فرکانس‌های بالا رخ می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها می‌توان عملکرد جذب را به صورت کمی پیش‌بینی کرد. عملکرد به دو عامل تطابق امپدانس (برای نفوذ موج) و قابلیت تلفات (برای جذب انرژی) بستگی دارد.

در تحلیل داده‌ها نمونه R37.5 دارای بهترین ترکیب خواص است. هم تلفات دی‌الکتریک (ϵ'') و هم تلفات مغناطیسی (μ'') در بالاترین حد خود هستند. این تعادل به ماده اجازه می‌دهد تا هم امپدانس بهتری داشته باشد (چون هم جزء الکتريکی و هم مغناطیسی در تطابق نقش دارند) و هم انرژی نفوذ کرده را به خوبی تلف کند.

نمودار ثابت دی‌الکتریک- فرکانس برای نمونه‌های مختلف در شکل 11 نشان داده شده است. براساس این منحنی‌ها، با افزایش درصد وزنی پرکننده فریت، ثابت دی‌الکتریک افزایش می‌یابد. بیشینه ثابت دی‌الکتریک 3.49 برای نمونه RF75 می‌باشد.

وزنی فریت پرکننده به نمونه‌ها، مقدار جذب در فرکانس‌های پایین‌تر افزایش می‌یابد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کامپوزیت اپوکسی/ فریت قرمز (Fe2O3) تولید شد و تحت آزمون ثابت دی‌الکتریک در باند فرکانسی X قرار گرفت که همراه با کاهش بازتاب نتایج زیر بدست آمد:

- ضریب گذردهی الکتریکی که بسزایی تأثیر در کاهش توان امواج بازتابی (افزایش تلفات) دارد با افزایش درصد پرکننده فریت افزایش می‌یابد که بیشینه ضریب گذردهی الکتریکی واقعی 3.5 و موهومی 0.23 برای نمونه با پرکننده فریت با درصد وزنی 75 در باند X بدست آمده است.
- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (واقعی و موهومی) برای نمونه با درصد وزنی پرکننده فریت 37.5، بیشینه مقادیر را نسبت به سایر نمونه‌ها داراست که بیشینه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی واقعی 1.15 و موهومی 0.14 برای این نمونه در باند X بدست آمده است.
- ثابت دی‌الکتریک با افزایش درصد وزنی پرکننده فریت، افزایش یافت که بیشینه ثابت دی‌الکتریک 3.49 برای نمونه با درصد وزنی 75 بدست آمد.
- تانژانت تلفات با افزایش درصد وزنی پرکننده فریت، افزایش یافت که بیشینه تانژانت تلفات برای نمونه با درصد وزنی فریت 75، مقدار 0.065 در فرکانس 12.2 گیگاهرتز است.
- تلفات بازتابش با افزودن پرکننده فریت، افزایش یافت.
- نمونه RF75 قوی‌ترین جذب در فرکانس 9.7 گیگاهرتز می‌باشد که نشان می‌دهد تلفات الکتریکی بیشترین اثر را بر این نمونه در این فرکانس دارد و این نمونه برای کاربردهای خاص با فرکانس مشخص مناسب است.
- نمونه RF37.5 همانگونه که در تحلیل کمی هم پیش‌بینی شده بود دارای پهنای باند وسیع‌تر برای جذب (محدوده مؤثر 9.5-11.5 گیگاهرتز) می‌باشد و برای کاربردهای با پهنای باند گسترده‌تر مناسب است.

این داده‌ها به وضوح نشان می‌دهند که افزایش درصد فریت باعث بهبود عملکرد جذب شده و امکان تنظیم فرکانس بهینه با تغییر درصد فریت وجود دارد. همچنین این نمونه‌ها برای کاربردهایی نظیر استفاده بعنوان چسب‌های اتصال قطعات کامپوزیتی و محافظ الکترومغناطیسی در مصارف عمومی بعلاوه ارزان بودن و در دسترس بودن مورد مطالعه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

این دستاورد، پایه‌ای مستحکم برای تولید نسل بعدی مواد جذب امواج مایکروویو (فریت قرمز Fe2O3) در مقیاس نانو ذره را در پهنای باندهای مختلف با عملکرد الکترومغناطیسی متفاوت را فراهم می‌آورد.

6- مراجع

- [1] Guo, M., Sin, SW., Qi, L., Xu, D., Wang, G., Martins, RP., "Background timing mismatch calibration techniques in high-speed time-interleaved ADCs", A tutorial review. IEEE Transactions on Circuits and Systems II., Express Briefs., Vol. 69, No. 6, pp. 2564-9, 2022.

که RL تلفات بازتابش بر حسب دسی‌بل، Z0 امپدانس موج در فضای آزاد که یک مقدار ثابت است و Zin امپدانس ورودی ماده جذب که مهمترین پارامتر است و به صورت رابطه (4) [12] محاسبه می‌شود:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right) \quad (4)$$

که در آن f فرکانس، d ضخامت ماده جذب، j واحد موهومی، c سرعت نور در خلأ، ε گذردهی الکتریکی و μ نفوذپذیری مغناطیسی است.

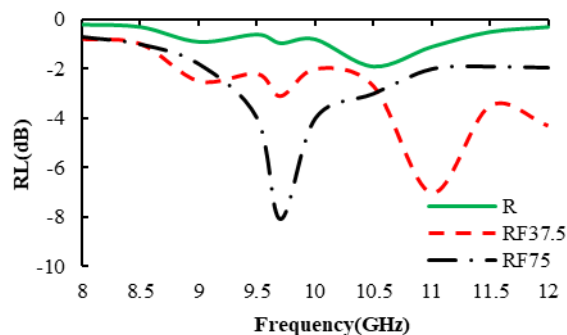


Fig. 13 Comparison chart of reflection losses of samples with different weight percentages

شکل 13 نمودار مقایسه تلفات بازتابش نمونه‌ها با درصد وزنی‌های مختلف

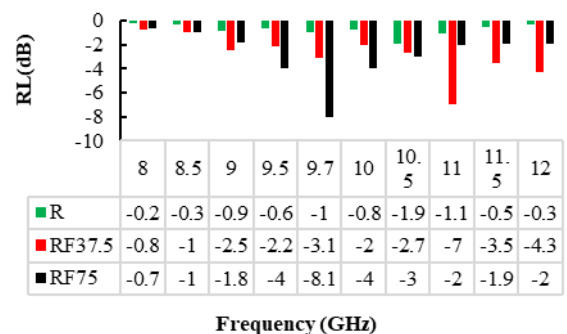


Fig. 14 Reflection losses of samples with different weight percentages

شکل 14 تلفات بازتابش نمونه‌ها با درصد وزنی‌های مختلف

نمودارهای تلفات بازتابش - فرکانس برای هر سه نمونه ساخته شده در شکل 13 نشان داده شده است که عملکرد جذب نمونه‌ها نشان می‌دهد بیشینه جذب برای نمونه با درصد وزنی فریت 75، 8.1- دسی‌بل در فرکانس 9.7 گیگاهرتز می‌باشد. با توجه به شکل 13 ماکزیمم جذب برای نمونه‌های مختلف در فرکانس‌های متفاوتی بدست آمده است که دلیل اصلی این جابجایی، تغییر در خواص دی‌الکتریک و خواص مغناطیسی ماده جذب است که ناشی از تغییر در ترکیب شیمیایی (درصد وزنی مختلف پرکننده پودر فریت Fe2O3) می‌باشد. این تغییرات مستقیماً بر روی امپدانس ورودی ماده و همچنین قابلیت تلف کردن انرژی آن اثر می‌گذارد. در شکل 14 نمودار میله‌ای مقایسه جذب نمونه‌ها نشان داده شده که طبق شکل بیشینه جذب برای نمونه با درصد وزنی فریت 37.5، 7- دسی‌بل در فرکانس 11 گیگاهرتز بدست آمده است که نشان می‌دهد با افزایش درصد

- [20] Danesh, M., Beheshti, H., Heidari-Rarani, M., "A novel three-layer woven fabric composite reinforced by (polyaniline+ carbonyl iron) core-shell/carbonyl iron/polyaniline fillers for high-performance broadband radar absorbing structure", *Journal of Composite Materials*. Vol. 57, No. 30, pp. 4675-86, 2023.
- [21] Rahimi Pishbijari, M., Eskandari Jam, J., Heydari Beni, M., "Design and manufacture of polymer based composite coatings with the aim of reducing radar cross section", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 3, pp. 1047-1056, 2020.
- [22] Zhao, W., Zhou, J., Wang, L., Jin, W., Kong, Y., Chu, Y., Li, J., "Pb 6 Ba 3 Si 2 S 8 I 10: a new thiohalide with a quasi-two-dimensional structure and wide band gap", *Dalton Transactions*, Vol. 53, No. 42, pp. 17200-6, 2024.
- [23] Zuo, H., Wei, W., Yang, Z., Li, X., Ren, J., Xian, Y., Liao, Q., Yin, G., Gao, G., Wu, G., "Performance enhancement of carbon/copper composites based on boron doping", *Journal of alloys and compounds*, Vol. 876, 160213, 2021.
- [24] Zhao, X., Hu, J., Ravi, L., Dong, D., Burgos, R., Chandrasekaran, S., Eddins, R., "Planar common-mode EMI filter design and optimization for high-altitude 100-kW SiC inverter/rectifier system", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 10, No. 5, pp. 5290-303, 2022.
- [25] IEEE Std 299.1-2022, "Standard Test Method for Measuring Effectiveness of Electromagnetic Shielding Materials", 2022.
- [26] Khakbaz, M., Javadi, M., Sarkhosh, R., "Numerical investigation of radar reflection reduction of quadratic surfaces and conical sections made of aluminum in the X-band frequency range: A study based on electromagnetic permittivity and permeability", In Persian, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 15, No. 2, pp. 65-80, 2025.
- [2] Lv, Z., Huang, H., Gao, L., Benediktsson, J.A., Zhao, M., Shi, C., "Simple multiscale UNet for change detection with heterogeneous remote sensing images", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 19, pp. 1-5, 2022.
- [3] Wang, J., "Wide bandgap-based power electronics for aerospace applications", *IEEE Power Electronics Magazine*, Vol. 9, No. 3, pp. 16-25, 2022.
- [4] Qin, F., Brosseau, C., "A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles", *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 6, 2012.
- [5] Al-Oqla, F.M., Sapuan, S.M., "Materials selection for natural fiber composites", Woodhead Publishing; 2017 Jun 9.
- [6] Mrazova, Maria., "Advanced composite materials of the future in aerospace industry", *Incas bulletin* 5.3 (2013): 139.
- [7] Sarkhosh, R., "Experimental study of energy absorption characteristic of sunflower-inspired foam-filled honeycomb structure under out-of-plane loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 2, pp. 2512-2520, 2024.
- [8] Chen, Q., Chatzigeorgiou, G., Meraghni, F., "Hybrid hierarchical homogenization theory for unidirectional CNTs-coated fuzzy fiber composites undergoing inelastic deformations", *Composites Science and Technology*, Vol. 215, 109012, 2021.
- [9] Skolnik, M. I., "Introduction to radar systems," New York, 1980.
- [10] Heydari Qasemabadi, M., Sabouri, H., Sarkhosh, R., Kazemi Nasrabadi, M., "Investigation of microwave absorption properties of epoxy composites reinforced with glass, carbon, basalt, and kevlar fibers in the X-band," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 4, pp. 2626-2633, 2025.
- [11] Naito and Suetake, K., "Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics", *IEEE Trans, Microw. Theory Tech*, vol. 19, no. 1, pp. 65-72, 1971.
- [12] Singh, P., Babbar, V. K., Razdan, A., Srivastava, S. L., Goel, T. C., "Microwave absorption studies of Ca-NiTi hexaferrite composites in X-band", *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 78, No. 2-3, pp. 70-74, 2000.
- [13] Singh, P., Babbar, V. K., Razdan, A., Goel, T. C., Srivastava, S. L., "Magnetic, dielectric and microwave absorption studies of Ba-CoTi hexaferrite-Epoxy composites", 2004
- [14] Ohlan, A., Singh, K., Chandra, A., Dhawan, S. K., "Microwave absorption properties of conducting polymer composite with barium ferrite nanoparticles in 12.4-18 GHz", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 93, No. 5, pp. 18-21, 2008.
- [15] Sarkhosh, R., Zarei, H., Design, "Manufacturing and mechanical and electrical properties evaluation of glass fiber reinforced PTFE polymer matrix composites", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*. Vol. 21, No. 2, pp. 117-27, 2021.
- [16] Sarkhosh, R., Kazemi Nasrabadi, M., Parsafar, R., "Study of the effect of fumed silica on mechanical, electrical, and magnetic properties of epoxy/fumed silica composite", In Persian, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. Vol. 11, No. 2, pp. 37-57, 2024.
- [17] Pratap, V., Mishra, S., Chaurasia, A., Soni, A. K., Dubey, A., Dixit, A. K., "Combined Effect of Exfoliated Graphite/Ferrite Filled Epoxy Composites on Microwave Absorbing and Mechanical Properties", *Ferrite Fill. Epoxy Compos. Microw. Absorbing Mech. Prop.*
- [18] Shi, Y., Gao, X., Qiu, J., "Synthesis and strengthened microwave absorption properties of three-dimensional porous Fe3O4/graphene composite foam", *Ceramics International*. Vol. 45, No. 3, pp. 3126-32, 2019.
- [19] Danesh, M., Beheshti, H., Heidari-Rarani, M., "Optimal design of broadband radar-absorbing composite structures based on different compositions, processing, and geometric parameters", *Journal of reinforced plastics and composites*. Vol. 42, No. 9-10, pp. 430-45, 2023.