



## بررسی خواص جذب امواج ماکروویو کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه، کربن، بازالت و کولار در باند X

محمد حیدری قاسم آبادی<sup>1</sup>، هادی صبوری<sup>2</sup>، رضا سرخوش<sup>3\*</sup>، محمد کاظمی نصرآبادی<sup>4</sup>

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

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، 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:

در دنیای امروز، نیاز به حفاظت مؤثر از انسان‌ها و تجهیزات در برابر امواج الکترومغناطیسی به یکی از چالش‌های اساسی در علم مواد تبدیل شده است. این تحقیق به بررسی میزان جذب مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی پرداخته و به دنبال طراحی و ساخت نمونه‌های کامپوزیتی ایده‌آل با ویژگی‌های مطلوب نظیر وزن سبک، ضخامت کم و قابلیت جذب بالا در باند فرکانسی X (8-12 گیگاهرتز) بوده است. به این منظور، از الیاف کربن، کولار، شیشه و بازالت به عنوان تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی استفاده شده و چهار نمونه با ابعاد 20×20 سانتی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر ساخته شدند. با بهره‌گیری از دستگاه تحلیلگر شبکه، توانایی جذب فرکانس رادیویی این الیاف به روش بازتابی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش فرکانس، قدرت بازتابی در تمامی نمونه‌ها کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که کامپوزیت کربن/اپوکسی بهترین عملکرد را با حداقل توان بازگشتی معادل 39.6961- دسی‌بل در 12 گیگاهرتز به نمایش گذاشت. همچنین، عملکرد قابل توجه نمونه بازالت/اپوکسی در فرکانس 11 گیگاهرتز با ضریب منعکس شده 31.4755- دسی‌بل، امکان کاربردهای حفاظتی الکترومغناطیسی ویژه در صنایع حساسی مانند صنعت بزرگ هوانوردی، ایجاد اتاق‌های ایزوله، بخش‌های پزشکی و کاربردهای ویژه نظامی را تأکید می‌کند. این تحقیق، گام مؤثری در زمینه طراحی مواد کامپوزیتی با خواص جذب بالای امواج الکترومغناطیسی بوده و می‌تواند مبنای مناسبی برای پژوهش‌های آتی در بهینه‌سازی مواد و توسعه فناوری‌های جدید باشد.

دریافت: 1403/11/23

پذیرش: 1403/02/22

### کلیدواژگان:

جاذب امواج الکترومغناطیسی،

کامپوزیت،

فرکانس رادیویی،

تحلیلگر شبکه

## Investigation of microwave absorption properties of epoxy composites reinforced with glass, carbon, kevlar, and basalt fibers in the X-band

Mohammad Heydari Qasemabadi<sup>1</sup>, Hadi Sabouri<sup>2</sup>, Reza Sarkhosh<sup>3\*</sup>, Mohammad Kazemi Nasrabadi<sup>4</sup>

1- PhD student, Graduate Education Center, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran

2- Associated Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran

4- Associated Professor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran

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

### Keywords

Absorber of electromagnetic waves, composite, radio frequency, network analyzer

### Abstract

In today's world, the need to effectively protect humans and equipment from electromagnetic waves has become one of the fundamental challenges in materials science. This research investigated the absorption of electromagnetic wave-absorbing materials and sought to design and manufacture ideal composite samples with desirable characteristics such as lightweight, low thickness, and high absorption capability in the X frequency band (8-12 GHz). For this purpose, carbon, Kevlar, glass, and basalt fibers were used as composite reinforcements, and four samples with dimensions of 20×20 cm and a thickness of 1 mm were manufactured. Using a network analyzer, the radio frequency absorption ability of these fibers was evaluated by the reflection method. The experimental results showed that with increasing frequency, the reflection power decreases in all samples, such that the carbon/epoxy composite exhibited the best performance with a minimum return power of -39.6961 dB at 12 GHz. Also, the remarkable performance of the basalt/epoxy sample at 11 GHz with a reflected coefficient of -31.4755 dB emphasizes the possibility of special electromagnetic shielding applications in sensitive industries such as the large aviation industry, the creation of isolated rooms, medical departments, and special military applications. This research is an effective step in designing composite materials with high absorption properties of electromagnetic waves. It can be a suitable basis for future research in material optimization and the development of new technologies.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

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. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2051978.1914>

### 1- مقدمه

امواج ماکروویو نقش کلیدی در تکنولوژی‌های مدرن، از جمله ارتباطات بی‌سیم، تجهیزات راداری و سیستم‌های شناسایی دارند. یکی از چالش‌های عمده در این زمینه، کنترل و جذب این امواج به‌طور مؤثر است. مواد کامپوزیت‌های پلیمری، به ویژه انواع اپوکسی، به دلیل خواص مکانیکی عالی و ویژگی‌های منحصر به فرد خود نسبت به مواد متداول مانند فلزات، دارای مزیت‌های متعددی هستند. این مزایا شامل سهولت در فرایند ساخت و تولید، هزینه پایین مواد اولیه و فرایند تولید، سرعت بالای تولید و قابلیت‌های چندمنظوره است [1]. به همین دلیل، مواد پلیمری به‌ویژه در صنایع مختلف به‌عنوان جایگزینی برای مواد قدیمی‌تر و متداول، به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

امروزه، کامپوزیت‌های پلیمری به‌ویژه در صنایع خودروسازی، ساخت‌وساز، فضایی و حتی محصولات ورزشی، نقش مهمی را ایفا می‌کنند [2,3]. ظهور و توسعه کامپوزیت‌های پلیمری، تقویت‌شده با الیاف، به‌عنوان یک مفهوم نوین، به دوره بعد از جنگ جهانی دوم بازمی‌گردد. با این حال، در آن زمان هزینه‌های بالای تولید این مواد، محدودیت‌هایی در کاربردهای آن‌ها ایجاد کرد [4]. از سال 1990، هزینه‌های تولید این کامپوزیت‌ها به‌سرعت کاهش یافت و این امر زمینه‌ساز استفاده گسترده‌تر از آن‌ها 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 [5,6]. مواد کامپوزیتی با نسبت مقاومت به وزن بسیار بهتری نسبت به فلزات، نه تنها می‌توانند وزن کمتری داشته باشند بلکه با کاهش وزن، مصرف سوخت و آلاینده‌گی نیز به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. افزون بر این، سازه‌های پلیمری نیاز به اتصالات پیچیده کمتری دارند، که خود باعث افزایش بهره‌وری آیرودینامیکی و کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود. به‌ویژه در صنعت هوانوردی، زمانی که کامپوزیت‌ها برای نخستین بار معرفی شدند، سازندگان هواپیماهای نظامی از این مزایا بهره‌مند شدند و با استفاده از ویژگی‌های این مواد، سرعت و مانورپذیری محصولات خود را بهبود بخشیدند [7]. مواد کامپوزیتی به‌ویژه در کاهش وزن سازه‌های هوایی نقش کلیدی دارند و می‌توانند در انواع کاربردها از جمله ساختارهای اصلی و اجزا هواپیماهای مسافربری و جنگنده‌ها به‌کار روند [8].

امواج الکترومغناطیسی نقش کلیدی در تکنولوژی‌های مدرن امروزی، از جمله ارتباطات بی‌سیم، تجهیزات راداری و سیستم‌های شناسایی دارند. در این میان، رادارها، که به‌عنوان یک سیستم الکترومغناطیسی برای تشخیص و تعیین موقعیت هدف به‌کار می‌رود، نخستین بار توسط دانشمند آلمانی "هرتز" در سال 1886 شناسایی شد و از دهه 1930 به بعد، به‌طور گسترده‌ای مورد بهره‌برداری قرار گرفت. یکی از مؤلفه‌های کلیدی در دسته‌بندی انواع رادارها، فرکانس کاری آن است. طیف فرکانس‌های مختلفی که در انواع رادارها به‌کار می‌رود، مطابق با استاندارد IEEE در جدول (1) نشان داده شده است. یکی از چالش‌های عمده در این زمینه؛ کنترل و جذب این امواج ماکروویو راداری به‌طور مؤثر و قابل توجه می‌باشد.

چهار تکنیک اساسی طراحی سازه و بدنه، بکارگیری و استفاده از مواد جذب راداری، از کار انداختن‌های غیرفعال و از کار انداختن‌های فعال برای کاهش سطح مقطع راداری وجود دارد. کاهش سطح مقطع راداری با انجام تغییراتی در شکل و طراحی یک سازه مانند هواپیما به اصول آیرودینامیکی خاصی محدود می‌شود که تا حدودی باعث کاهش تمرکز و بازتابش منظم امواج الکترومغناطیسی مانند رادارها شده و با ایجاد تفرق و پراش امواج

انعکاسی مانع از بازتابش امواج رادار و گریز از دید رادار می‌گردد. اما، اگر از مواد جذب رادار بدین منظور استفاده گردد، کاهش سطح مقطع راداری تک استاتیک با استفاده از قابلیت جذب انرژی در مواد جذب رادار به دست می‌آید. روش‌های کاهش عموماً به یک منطقه فضایی کوچک محدود می‌شوند.

جدول 1 محدوده‌های فرکانسی امواج رادار [8]

Table 1 Frequency ranges of radar waves [8]

باند	محدوده فرکانس
HF	3-30MHz
VHF	30-300MHz
UHF	300-100MHz
L	1-2GHz
S	2-4GHz
C	4-8GHz
X	8-12GHz
K <sub>U</sub>	12-18GHz
K	18-27GHz
K <sub>a</sub>	27-40GHz
V	40-75GHz
W	75-110GHz
mm	110-300GHz

مواد جذب رادار با استفاده از جذب انرژی امواج باعث می‌گردند که بازتابش امواج به رادار را کاهش دهند. انرژی رادار از طریق یک یا چند مکانیسم جذب می‌شود که ممکن است شامل خواص دی‌الکتریک (الکترومغناطیسی) مواد باشد. این اتلاف در واقع تبدیل انرژی فرکانس رادیویی به گرما است. اگرچه اکثر جذب‌ها انرژی کافی را از بین نمی‌برند به طوری که در هنگام تحت تأثیر قرار گرفتن توسط رادار، به صورت قابل تشخیصی گرم شوند، با این وجود این مکانیسمی است که با آن کار می‌کنند [9].

محققان مطالعات زیادی بر روی خواص مختلف از جمله ریزساختار، خاصیت گذردهی و نفوذپذیری مغناطیسی، قابلیت جذب، مقدار سفیدی، استحکام، مقاومت به خمش و .. کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های جذب مایکروویو انجام داده‌اند که به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. نایتو و همکاران [10] به بررسی وجود فرکانس تطبیق و ضخامت تطبیق برای جذب‌کننده‌های موج الکترومغناطیسی مبتنی بر فریت پرداخته‌اند که حد بالایی فرکانس تطبیق برای فریت جامد 2 گیگاهرتز و ضخامت تطبیق بدون در نظر گرفتن فرکانس تطبیق بین 4 تا 10 میلی‌متر متغیر بدست آمد. ویر [11] اندازه‌گیری ضرایب گذردهی (E) و نفوذپذیری (μ) دو ماده مرکب تفلون و اکسورب را انجام داد که طبق نتایج تفلون دارای ضریب گذردهی (E) نسبتاً پایینی (2.03) است و در حوزه مایکروویو دارای تلفات بسیار کم در باند X می‌باشد و اکسورب دارای ضریب گذردهی (E) نسبتاً بالایی (13.7) است و در حوزه مایکروویو دارای تضعیف حدود 24 تا 40 دسی‌بل در باند X می‌باشد. سینف و همکاران [12] به بررسی نفوذپذیری و گذرپذیری مختلط، مقادیر جذب مایکروویو و تلفات انعکاس بر روی نمونه کامپوزیتی پرداخته‌اند که حداقل تلفات انعکاس 30 دسی‌بل برای کامپوزیت با ضخامت جذب 4.15 میلی‌متر به دست آمد. مقادیر تجربی فرکانس تطبیق و ضخامت تطبیق با مقادیر نظری به دست آمده از حل معادله به صورت عددی مطابقت داشت. سینف و همکاران [13] مطالعات جذب مایکروویو، گذردهی و نفوذپذیری مختلط بر روی کامپوزیت‌های هگزافریت با سطوح مختلف Ba(CoTi)<sub>x</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub> در محدوده فرکانس 8 تا 12.4 گیگاهرتز انجام شد

روی خواص مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت پلیمری اپوکسی / فوم سیلیکا توسط سرخوش و همکاران [23] انجام شد که نتایج نشان داد بیشینه ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری 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 [24] به بررسی اثر فریت و گرافیت بر روی خاصیت جذب امواج ماکروویو رزین اپوکسی پرداختند که نتایج حاکی از آن بود که کامپوزیت‌های طراحی‌شده، توانسته‌اند حداکثر مقادیر گذرپذیری و نفوذپذیری واقعی را به ترتیب با مقادیر  $\epsilon' = 18.90$  و  $\mu' = 0.91$  ثبت کنند. این یافته‌ها به‌وضوح مؤید کارایی بالای این مواد در جذب امواج ماکروویو به‌ویژه در باند فرکانسی 12.4-8.2 گیگاهرتز می‌باشد. یو و همکاران [25] به منظور بهبود خواص، آبکاری الیاف بازالت در دمای پایین را انجام دادند که این روش امکان رسوب نیکل بر روی سطوح الیاف بازالت را فراهم کرد و پوسته نیکل پیوسته و یکنواخت را تشکیل داد و نتایج نشان داد که سطوح الیاف بازالت با یک پوسته نیکل پیوسته و یکنواخت دارای خواص جذب ماکروویو در باند X بسیار بهتر از الیاف بازالت بدون پوشش است. رحیمی پیشبیبجاری و همکاران [26] به ساخت و بررسی کامپوزیت پایه پلیمری با هدف کاهش سطح مقطع راداری پرداخته‌اند. برای این منظور ابتدا، نمونه‌های کامپوزیتی اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه با استفاده از فرآیند نفوذ در خلأ ساخته شده و در گام بعد، پوشش اپوکسی با افزودنی‌های آلومینیوم، آلومینا و اکسید آهن در درصدهای حجمی 1، 3 و 5 بر روی نمونه‌ها اعمال شده و در نهایت میزان جذب امواج آن‌ها در باند X و فرکانس‌های 8.5، 9.5، 10.5 و 11.5 گیگاهرتز تحت آزمون VNA قرار گرفته که به دلیل رسانایی بالاتر بیشترین جذب در کامپوزیت با پوشش آلومینیوم به میزان (5٪) و کمترین جذب در کامپوزیت با پوشش آلومینا به دلیل رسانایی کم و به میزان (1٪) بوده که با افزایش درصد افزودنی‌ها، میزان جذب امواج افزایش یافته است. آنکیتا و همکاران [27]  $\alpha\text{-MnO}_2$  را بر روی الیاف کولار بافته شده با استفاده از روش هیدروترمال در شرایط مختلف واکنش سنتز دادند و کامپوزیت‌های با کارایی بالا با استفاده از قالب‌گیری انتقال رزین با کمک خلاء ساخته شد. پارامترهای الکترومغناطیسی کامپوزیت‌ها در محدوده فرکانس 1-18 گیگاهرتز با توجه ویژه به افت بازتاب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان از افت بازتاب 36.5- در دسی‌بل در فرکانس 11.8 گیگاهرتز در عملکرد جذب ماکروویو دارد. بریس و همکاران [28] الیاف کربن با درصد وزنی بسیار کم نیم درصد را با طول‌های مختلف 3، 6 و 12 میلی‌متر را به عنوان مواد جذب‌کننده ماکروویو به رزین اپوکسی اضافه کردند و اثر طول الیاف کربن بر جذب ماکروویو، به ویژه بر روی باند فرکانس جذب، برای فرکانس‌های بین 1 تا 15 گیگاهرتز بررسی کردند. آن‌ها برای بسط کامپوزیت‌ها، از سه روش مختلف مخلوط کردن اسپاتولا، برشی و اولتراسوند برای پراکندگی الیاف کربن استفاده کردند. نتایج نشان داد که الیاف‌های کوتاه 3 میلی‌متر حداکثر تلفات را در فرکانس‌های بالا (حدود 15 گیگاهرتز) و الیاف‌های 12 میلی‌متر حداکثر تلفات دی‌الکتریک را در فرکانس‌های پایین زیر 4 گیگاهرتز دارند. میرمحمدی و همکاران [29] کامپوزیت‌های پلی آنیلین/ فریت کبالت روی با نسبت‌های 1:1، 1:3 و 6:1 را ساخته و سنتز را توسط روش‌های FTIR، WAXD و SEM مورد آنالیز قرار دادند و خاصیت جذب کامپوزیت‌های ساخته‌شده را در محدوده فرکانس 8-12 گیگاهرتز مورد بررسی قرار دادند که در بین مواد سنتز شده، کامپوزیت حاوی پلی‌آنیلین/فریت کبالت روی با نسبت 1 به 1 کمترین بازتاب، برابر با 16-

که تغییرات تلفات بازتاب مورد بررسی قرار گرفت و حداکثر جذب 16 دسی‌بل برای کامپوزیت‌هایی با ضخامت 2.8 میلی‌متر به دست آمد. اوهران و همکاران [14] به بررسی خواص جذب ماکروویو کامپوزیت‌های پلیمری رسانا با نانوذرات فریت باریوم در محدوده فرکانس 12.4-18 گیگاهرتز پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که نانوکامپوزیت‌های پلیمری رسانا با نانوذرات فریت باریوم دارای خواص جذب ماکروویو بالایی هستند و جذب ماکروویو به اتلاف دی‌الکتریک، نفوذپذیری مغناطیسی و کسر حجمی نانوذرات بستگی دارد. همچنین این کامپوزیت به دلیل جذب 28.9 دسی‌بل به عنوان محافظ، کارایی بالایی دارد. بیونگ سو کوک [15] کامپوزیت ساندویچی جاذب رادار روکش‌شده با نیکل بر روی لبه حمله ایرفویل بال NACA 0012 را انجام داد که کامپوزیت ساندویچی جاذب رادار پیشنهادشده با روکش نیکل دارای جذب ماکروویو 10- دسی‌بل در محدوده فرکانس 5.8-16.3 گیگاهرتز بود. محمد و همکاران [16] مروری دقیق بر فریت‌ها، به‌ویژه فریت‌های شش ضلعی و کامپوزیت‌های آن‌ها برای جذب ماکروویو انجام دادند که نانوکامپوزیت‌های پر شده با نانولوله‌های کربنی به ترتیب 21 دسی‌بل و 18 دسی‌بل در فرکانس‌های 10.4 و 12.4 گیگاهرتز تضعیف تقریبی 99 درصد از خود نشان دادند. شا یون پو [17] به بررسی اثرات اندازه ذرات، چسبندگی رابط ذرات و ماتریس و بارگذاری ذرات بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ذرات پلیمری پرداخته و نتایج تجربی با مدل‌های نظری مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مقادیر Kc و Gc با افزایش اندازه ذرات و بارگذاری افزایش یافته و مدول ثابت باقی می‌ماند. بلال عزیز [18] به بررسی خواص ساختاری، الکتریکی و مغناطیسی کامپوزیت‌های پلیمر - فریت پرداخته و از روش هم‌رسوب‌سازی برای تهیه نمونه‌ها استفاده کرده است که افزایش محتوای فریت باعث افزایش مقاومت در برابر جریان مستقیم و خواص مغناطیسی شده و برای کاربردهای با فرکانس بالا مناسب می‌باشند. سرخوش و همکاران [19] فرآیند آماده‌سازی کامپوزیت پلیمری تفلون تقویت‌شده با الیاف شیشه به روش پخت معمولی انجام دادند و جهت تعیین خواص مکانیکی آزمون کشش و جهت تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی آزمون ثابت دی-الکتریک در باند X انجام گرفت که بیشینه استحکام کششی و مدول یانگ کششی به ترتیب برابر با 130 مگاپاسکال و 3.65 گیگاپاسکال و بیشینه ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌های تولیدی در باند x به ترتیب برابر با 2.37 و 0.096 بدست آمده است. سرخوش و همکاران [20] به فرآیند اصلاح سطح، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی یک کامپوزیت نیمه زیست‌تخریب‌پذیر تهیه شده از پلیمر پلی‌پروپیلن و پارچه الیاف کف پرداختند. ماسری و همکاران [21] نانوذرات فریت-کبالت در غلظت‌های مختلف به رزین اپوکسی اضافه کردند و آزمون کشش برای ارزیابی خواص مکانیکی ترکیبات از جمله چقرمگی، استحکام کشش و حداکثر کرنش قبل از شکست انجام دادند. طالعی و همکاران [22] با استفاده از تحلیل‌های سیگنال به نویز در روش تاگوچی و بهینه‌یابی چندپاسخه، الیاف و رزین‌های مورد استفاده در ساخت ریدوم‌های کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج حاصله نشان داد استحکام کششی ترکیب الیاف شیشه سری E و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلاء بالاترین استحکام کششی مقدار 320.9 مگاپاسکال را دارد و برای ثابت دی‌الکتریک الیاف شیشه سری D و رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلاء با مقدار 2.85 پایین‌ترین ثابت دی‌الکتریک را داشته است. درنهایت با انجام بهینه‌یابی چندپاسخه با روش خاکستری، استفاده از ترکیب الیاف شیشه سری D، رزین اپوکسی و روش ساخت کیسه خلاء پیشنهاد شد. بررسی اثر پرکننده نانوذرات فوم سیلیکا بر

ورق آلومینیوم 2024 با ضخامت 1 میلی‌متر جهت قرار دادن نمونه‌های کامپوزیتی بر روی آن برای بررسی و مقایسه خاصیت جذب تهیه شده است که در شکل 2 نشان داده شده است.

جدول 2 خواص رزین اپوکسی EPL 1012

Table 2 Properties of EPL 1012 epoxy resin			
فیزیکی			
خاصیت	دمای کاری [°C]	قطر 50 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر	قطر 50 میلی‌متر و ضخامت 26 میلی‌متر
عمر مصرف	25	50 دقیقه	20 دقیقه
زمان ژل شدن	25	50 دقیقه	24 دقیقه
زمان پخت		90 دقیقه	25 دقیقه
زمان پخت تا رسیدن به بالاترین استحکام		7 روز	7 روز
حرارتی و الکتریکی			
خاصیت	مقدار	واحد	استاندارد
ضریب دی الکتریک	6	-	D150
مقاومت حرارتی تا نقطه نرمی	65	[°C]	ISO 11357
مقاومت حرارتی عملی	80	[°C]	D648
ضریب انبساط طولی	$6.2 \times 10^{-5}$	[°C] <sup>-1</sup>	D864
مکانیکی			
خاصیت	مقدار	واحد	استاندارد
مدول کششی	27890	Kgf/cm <sup>2</sup>	D638M
استحکام کششی	761	Kgf/cm <sup>2</sup>	D638M
مدول فشاری	9371	Kgf/cm <sup>2</sup>	D695M
استحکام فشاری	974	Kgf/cm <sup>2</sup>	D695M
مدول خمشی	36454	Kgf/cm <sup>2</sup>	D790M
استحکام خمشی	960	Kgf/cm <sup>2</sup>	D790M
سختی	82	Shore D	D2240
مقاومت به ضربه	7.85	kJ/m <sup>2</sup>	D256

دسی‌بل را در فرکانس 11.5 داشت. لیو و همکاران [30] نانولوله‌های کربنی را بر روی الیاف شیشه‌ای سنتز نمودند خواص جذب کامپوزیت‌های سنتز شده با تمرکز بر حداقل تلفات انعکاس حاصل شده در شرایط خاص، مانند غلظت 1 گرم در لیتر، ولتاژ رسوب 16 ولت و زمان رسوب 4 دقیقه اندازه‌گیری شد که منجر به افت بازتاب 3.69- دسی‌بل در ضخامت 2.3 میلی‌متر گردیده است.

بر این اساس، بحث توسعه و دانش صنعت هوایی و سازه‌های هوایی فارغ از سیاست‌های سرمایه‌داران و حاکمان قدرت از این بابت مدنظر است که در تقابل و جنگ و با نگاه نظامی از یک سو مرز دانش را برای تولید هواپیماهای گوناگون توسعه داده‌اند و از سوی دیگر برای کنترل سایر رقبا اقدام به تولید سامانه‌های فناورانه پدافندی بر علیه این فناوری‌های جدید هوایی نموده‌اند و با این حرکت یک میدان و تقابل جدیدتری با عنوان ساخت هواپیماهای پنهان‌کار از دید سامانه‌های پدافندی به جهت مقابله با کشف، شناسایی، رهگیری و انهدام تهدیدات هوایی؛ متبلور شده است که ویژگی‌های خاص خود را به همراه دارد. در این گذر و تحقیق، محقق، از نگاه علمی موضوع ایجاد سازه‌های هوایی با قابلیت رادار گریزی و پنهان‌کاری را هدف‌گذاری کرده و متغیرهای آن را مورد بررسی و تحلیل هدفمند به منظور ایجاد یک تجربه فناورانه ساخت سازه‌های هوایی جاذب راداری، قرار داده است. بنابراین، این تحقیق به‌طور خاص به بررسی تأثیر نوع الیاف بر عملکرد جذب امواج الکترومغناطیسی (در باند فرکانسی X) می‌پردازد، که تاکنون در مطالعات قبلی به صورت جامع و مقایسه‌ای مورد بررسی قرار نگرفته است. در حالی که مطالعات پیشین عموماً به بررسی تأثیر پرکننده‌های جاذب راداری یا تأثیر یک نوع الیاف خاص پرداخته‌اند، این تحقیق به ارزیابی همزمان و مقایسه‌ای تأثیر انواع مختلف الیاف (کربن، کولار، شیشه و بازالت) بر جذب امواج رادیویی در باند X بدون استفاده از پرکننده‌های جاذب راداری روش بازتابندگی می‌پردازد. روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد این کامپوزیت‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان تجزیه و تحلیل دقیق خواص الکترومغناطیسی و ارزیابی کیفی عملکرد جاذب‌های طراحی‌شده را فراهم کنند. این مطالعه به‌دنبال ارائه اطلاعاتی کلیدی در مورد کارایی و پتانسیل مواد کامپوزیتی در کاربردهای حفاظتی و سازه‌ای، به‌خصوص در شرایط واقعی است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌تواند به بهبود طراحی مواد جدید با خواص سبکتر، مقاوم‌تر و با عملکرد بالاتر در برابر امواج الکترومغناطیسی کمک نماید.

## 2- مواد و مراحل تولید نمونه‌ها

### 2-1- مواد موردنیاز

به‌منظور انجام آزمایش‌ها از رزین اپوکسی EPL 1012 تولید شرکت هانتسمن استفاده شده است. که طبق دستورالعمل فنی شرکت هانتسمن، هاردنر EPH112 به نسبت 12 به 100 وزنی به رزین اپوکسی افزوده می‌شود. این رزین با ویسکوزیته بسیار کم در لایه‌چینی دستی، تکنیک تزریق رزین با الیاف شیشه، کربن یا آرامید مورد استفاده می‌باشد. در جدول 2 برخی خواص فیزیکی و مکانیکی این رزین براساس برگه مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت سازنده، آورده شده است.

پارچه‌های الیاف تقویت‌کننده از جنس شیشه، کربن، بازالت و کولار از نوع Plain می‌باشند که زاویه میان تار و پود پارچه 90 درجه است که در شکل 1 نمونه‌ای از آن‌ها نشان داده شده است و در جدول 3 برخی خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است. یک



Fig. 1 Sample of glass fibers used

شکل 1 نمونه الیاف شیشه استفاده‌شده

نظر اعمال می‌گردد. با استفاده از پنجره زمان و تکنیک‌های پردازش سیگنال دیجیتال، انعکاس‌های متعدد ایجاد شده توسط دیوارها، کف و سقف اتاق آزمایش از بین برده می‌شود. تکنیک سوم اندازه‌گیری موجبری دو پورته است در این تکنیک نمونه با سطح مقطع موجبری تطبیق و به همان اندازه پر می‌شود و میزان بازگشتی در طول نمونه اندازه‌گیری می‌شود. تکنیک چهارم بر اساس همان ایده روش سوم است، با این تفاوت که به جای موج‌بر از یک خط کوکسیال با سطح مقطع زیاد و طول مناسب استفاده می‌شود.

### 2-3- اندازه‌گیری به روش بازتابندگی

توجه بسیار به کامپوزیت‌ها در سال‌های اخیر تنها به خواص مکانیکی این مواد محدود نمی‌شود بلکه کامپوزیت‌ها دارای کاربردهای پنهان‌کاری بسیاری نیز هستند. آزمون جذب برای تعیین خواص جاذب فرکانس رادیویی در باند X کامپوزیت تولید شده انجام شد. آزمون جذب به روش بازتابندگی با استفاده از دستگاه تحلیلگر شبکه مدل Keysight N5224 مرکز محیط‌های پیچیده دانشگاه علم و صنعت ایران همان‌طور که در شکل 4 (الف-a) و (ب-b) نشان داده شده است انجام شد.



Fig. 2 Sample of 2024 aluminum sheet

شکل 2 نمونه ورق آلومینیوم 2024

### 2-2- مراحل تولید نمونه‌ها

برای تولید نمونه‌ها از روش لایه‌چینی دستی استفاده شده است. ابتدا پارچه‌ها با ضخامت 0.1 میلی‌متر به ابعاد 22×22 سانتی‌متر برش داده شد. جهت نجسیدن قطعه به قالب و راحت جدا شدن آن، بر روی سطح قالب واکس اعمال گردید و لایه‌ی ژل‌کوت جهت ایجاد کیفیت سطح بالا و حفاظت در برابر رطوبت، قرار داده شد. درصد وزنی برای نمونه‌ها 65٪ الیاف و 45٪ رزین در نظر گرفته شده و اعمال رزین و قرار دادن لایه‌ها (10 لایه) تا ضخامت 1 میلی‌متر انجام شد و جهت جلوگیری از به دام افتادن هوا در حین لایه‌گذاری از غلتک برای صاف کردن سطح استفاده گردید. پس از پخت قطعات در دمای اتاق و در زمان 7 روز، نمونه‌ها به ابعاد 20×20 سانتی‌متر جهت آزمون جذب برش داده شد همان‌طور که در شکل 3 (الف-a) تا (د-d) نشان داده شده است.

### 3- انجام آزمون‌ها

#### 1-3- روش‌های اندازه‌گیری بازتابش مواد جاذب فرکانس رادیویی

در حال حاضر چهار تکنیک برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مواد جاذب فرکانس رادیویی استفاده می‌شود. در تکنیک اول از یک آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده که در صفحه‌ای عمود بر سطح جاذب فرکانس رادیویی قرار دارد، استفاده می‌شود که روش بازتابندگی نامیده می‌شود. در این تکنیک امواج رادیویی توسط آنتن فرستنده به جاذب تابیده شده و انعکاس آن توسط آنتن گیرنده دریافت می‌شود. بازتاب‌های جاذب با بازتاب‌های یک سطح رسانا خوب که در همان موقعیت سطح جاذب قرار گرفته است مقایسه می‌شود. در تکنیک دوم از رویکرد دامنه زمانی استفاده می‌شود. در این روش جاذب بر روی دیوار یا کف اتاق آزمایش نصب می‌شود. سپس یک موج فرودی پالس کوتاه مدت برانگیخته توسط آنتن فرستنده بر روی جاذب تابیده می‌شود که موج منعکس شده توسط آنتن گیرنده دریافت می‌شود و پردازش دیجیتالی برای به دست آوردن بازتاب جذب کننده بر روی پهنای باند فرکانس مورد

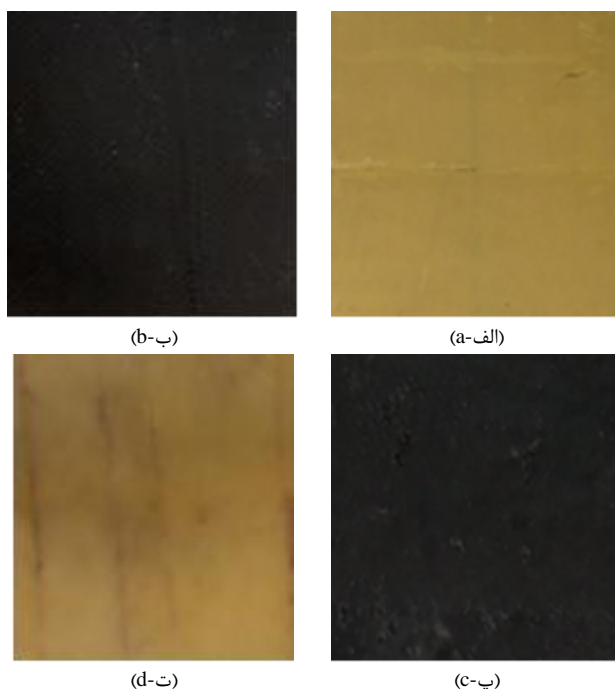


Fig. 3 Prepared samples a) Kevlar/epoxy b) basalt/epoxy c) carbon/epoxy d) glass/epoxy

شکل 3 نمونه‌های آماده‌شده الف) کولار/اپوکسی ب) بازالت/اپوکسی پ) کربن/اپوکسی و ت) شیشه/اپوکسی

Table 3 Fiber properties [31,32]

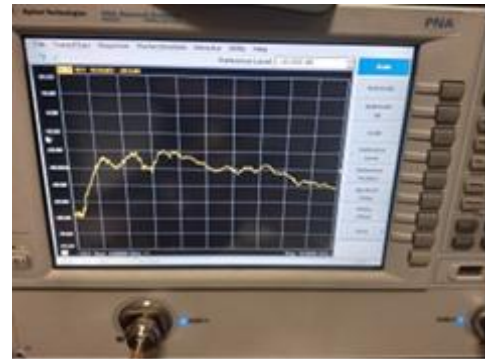
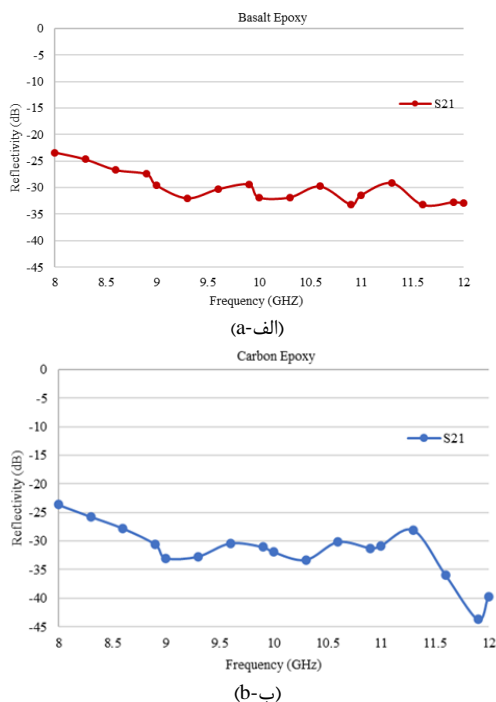
جدول 3 خواص الیاف [31,32]

نوع	چگالی [g/cm <sup>3</sup> ]	استحکام کشش [GPa]	مدول الاستیک [GPa]	ازدیاد طول در تسلیم [%]	ضریب انبساط طولی (10 <sup>-7</sup> /°C)	ضریب دی الکتریک	تانژانت تلفات
کربن	1.8	3.5	230	1.5	-0.4	***	***
شیشه (E-Glass)	2.58	3.445	72.3	4.8	54	6.2	0.0055
کولار	1.44	3.6	131	2.8	-2	4.5	0.001
بازالت	2.6	2.8	70	3.1	8	2.61	0.0068

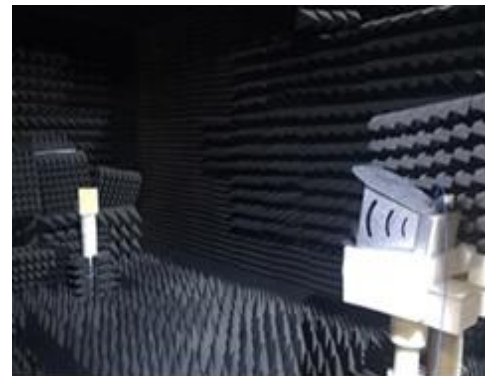
صنایع حیاتی مانند حوزه‌های صنعت هوانوردی، هوافضا و مصارف ویژه نظامی است.

مقایسه ویژگی‌های جذب در محدوده فرکانسی در شکل 6 به خوبی نشان داده شده است که در آن انتقال در ویژگی‌های بازتابی مشهود است. به گونه‌ای که در شکل 6 مشاهده می‌گردد کمترین دامنه موج بازگشتی برای نمونه کربن/اپوکسی و بیشترین توان دامنه موج بازگشتی برای نمونه‌های شیشه و کولار/اپوکسی می‌باشد که نشان‌دهنده خاصیت جذب بیشتر نمونه‌های کربن/اپوکسی می‌باشد. نمونه‌های کربن/اپوکسی کمترین دامنه موج بازگشتی را به نسبت سایر نمونه‌ها دارد که در این بازه فرکانسی بهترین خاصیت جذب را در بین نمونه‌های تولیدی دارد.

در ادامه برای تحلیل و بررسی توان بازگشتی نمونه‌های کامپوزیتی در باند فرکانسی X، نتایج مربوط به این توان بازگشتی در پنج فرکانس مختلف باند X برای چهار نمونه کامپوزیتی، در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که از مقادیر ارائه شده در شکل مشخص است، نمونه کولار با مقدار 22.3489- دسی‌بل در فرکانس 8 گیگاهرتز بیشترین توان بازگشتی را نشان می‌دهد، در حالی که نمونه کربن با مقدار 39.6961- دسی‌بل در فرکانس 12 گیگاهرتز کمترین توان بازگشتی را دارا است. در تمامی فرکانس‌های نشان داده شده در شکل 7، به استثنای فرکانس 11 گیگاهرتز، نمونه کربن به طور مداوم کمترین توان بازگشتی را نشان می‌دهد. این خاصیت به دلیل خواص عالی جذب این کامپوزیت و عدم بازتاب بالای آن در فرکانس‌های مختلف باند فرکانسی X است. در فرکانس 11 گیگاهرتز، نمونه بازالت با مقدار 31.4755- دسی‌بل کمترین توان بازگشتی را نسبت به سایر الیاف نمایش می‌دهد، که نمایانگر عملکرد بهینه این ماده در این فرکانس خاص است. سه نمونه الیاف شیشه، کولار و بازالت که نارسا هستند و قابلیت جذب تقریباً یکسانی از خود نشان دادند اما الیاف کربن که قابلیت رسانایی دارند اختلاف جذب زیادی نسبت به سایر الیاف از خود نشان نداد که علت آن می‌تواند به پیوسته بودن الیاف کربن استفاده شده به صورت پارچه در نمونه‌ها مربوط باشد.



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 4 a) Network analyzer and b) absorption test chamber

شکل 4 الف) دستگاه تحلیل‌گر شبکه (ب) اتاق آزمون جذب

#### 4- نتایج و بحث

برای بررسی قابلیت‌های جذب فرکانس رادیویی مواد کامپوزیتی، چهار نمونه مختلف با استفاده از تقویت‌کننده‌های الیاف متفاوت و یک رزین اپوکسی ثابت ساخته شدند. ضرایب انعکاس این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تحلیلگر شبکه به دست آمد که نمای دقیقی از چگونگی تعامل این مواد با فرکانس‌های میکروویو، به‌ویژه در محدوده باند X (8-12 گیگاهرتز) ارائه می‌دهد.

همچنان که نمودار بازتاب برحسب فرکانس در شکل 5 (الف-ا) تا (ت-d) نشان داده شده است، دامنه انعکاس در فرکانس‌های پایین‌تر، به‌ویژه در فرکانس 8 گیگاهرتز، به اوج خود رسید و با افزایش فرکانس کاهش یافت و به پایین‌ترین سطح خود در 12 گیگاهرتز می‌رسید. این رفتار با پیش‌بینی‌های نظری مربوط به مواد دی‌الکتریک هماهنگ است، جایی که معمولاً تناژت اتلاف با افزایش فرکانس به دلیل تقویت مکانیسم‌های قطبی دی‌الکتریک افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، کامپوزیت کربن/اپوکسی بالاترین قابلیت جذب را نشان داد و حداقل قدرت منعکس شده معادل 39.6961- دسی‌بل را در 12 گیگاهرتز ثبت کرده است، که توانایی فوق‌العاده‌ای در کاهش بازتاب سیگنال و افزایش جذب انرژی را نشان می‌دهد.

همچنین نمونه بازالت/اپوکسی در باند فرکانسی X در بازه فرکانس 11 الی 11.5 گیگاهرتز، این یافته‌ها را تقویت می‌کند که در فرکانس 11 گیگاهرتز، کامپوزیت بازالت/اپوکسی خود را با کمترین دامنه موج منعکس شده (معادل 31.4755- دسی‌بل) متمایز کرده است. این موضوع نشان‌دهنده پتانسیل آن برای کاربردهای حفاظتی الکترومغناطیسی در

این بررسی‌ها، نشان‌دهنده توان و قابلیت‌های جذب الکترومغناطیسی مواد کامپوزیتی در باند X و اهمیت انتخاب صحیح نوع الیاف در طراحی ساختارهای محافظتی الکترومغناطیسی است. به‌ویژه برای کاربردهایی که نیاز به کاهش تداخل الکترومغناطیسی دارند. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات بیشتر در زمینه بهینه‌سازی مواد کامپوزیتی با قابلیت‌های جذب بالا مورد استفاده قرار گیرد.

### 5- نتیجه‌گیری

این مطالعه به خواص جذب فرکانس رادیویی مواد کامپوزیتی ساخته شده از تقویت‌کننده‌های الیاف مختلف با یک ماتریس رزین یکنواخت پرداخته است که با استفاده از روش‌های انعکاس امکان توصیف دقیق قابلیت‌های جذب در فرکانس‌های کلیدی را فراهم کرده و نقش نوع الیاف مختلف را در تأثیرگذاری بر تعاملات الکترومغناطیسی مواد کامپوزیتی، مورد تأکید قرار داده است. نتایج کلیدی حاصل از این پژوهش در زیر آمده است:

- جذب وابسته به فرکانس: با افزایش فرکانس، خواص جذب فرکانس رادیویی در تمام نمونه‌ها بهبود پیدا کرده است، که با یافته‌های موجود در ادبیات علمی که به رابطه بین خواص دی‌الکتریک و فرکانس اشاره دارند، سازگار است. این مشاهده را می‌توان به فرآیندهای قطبی مولکولی تقویت‌شده و کاهش تعاملات طول موج با میکروساختارهای کامپوزیتی نسبت داد.
  - کارایی جذب مقایسه‌ای: در محدوده فرکانسی بررسی شده، نمونه تقویت‌شده با کربن به‌طور مداوم از سایر کامپوزیت‌ها با قابلیت‌های جذب قابل توجهی پیشی گرفته و از خاصیت جذب بیشتری برخوردار است. این رفتار با تحقیقات قبلی که نشان می‌دهند الیاف کربن دارای رسانایی الکتریکی بالاتر و اتلاف دی‌الکتریک کمتری هستند، هماهنگ است و به مؤثر بودن بالای حفاظتی در برابر تداخل الکترومغناطیسی منجر می‌شود.
  - قابلیت‌های الیاف بازالت: در محدوده فرکانسی 11 گیگاهرتز، نمونه حاوی الیاف بازالت توان بازگشتی کمتری نسبت به نمونه کربنی نشان داد که نشان‌دهنده تأثیر فرکانس بر قابلیت جذب امواج در این نمونه است.
  - معیارهای عملکرد مشابه شیشه و کولار: الیاف شیشه و کولار ویژگی‌های جذب مشابهی از خود نشان دادند که حاکی از پتانسیل هم‌افزایی در استفاده از این مواد در ماتریس‌های کامپوزیتی ترکیبی است. این یافته ادبیات موجود را تأیید می‌کند که به مزایای ترکیب انواع مختلف الیاف برای دستیابی به ویژگی‌های مکانیکی و الکترومغناطیسی بهینه اشاره دارد.
- نتایج این تحقیق به‌طور قابل توجهی به پیشرفت مستمر مواد کامپوزیتی سبک و با کارایی بالا که برای کاربردهای مختلف، از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی و ارتباطات تجاری می‌توانند مناسب باشند، کمک می‌کند. مطالعات آینده باید به بررسی کامپوزیت‌های ترکیبی و بهینه‌سازی فرمولاسیون‌های رزین برای افزایش بیشتر قابلیت‌های جذب الکترومغناطیسی بپردازند.

### 6- مراجع

[1] Wirawan, R., Zainudin, ES., Sapuan, SM., "Mechanical properties of natural fibre reinforced PVC composites", A review, Sains Malaysiana, Vol. 38, No. 4, pp. 531-5, 2009.

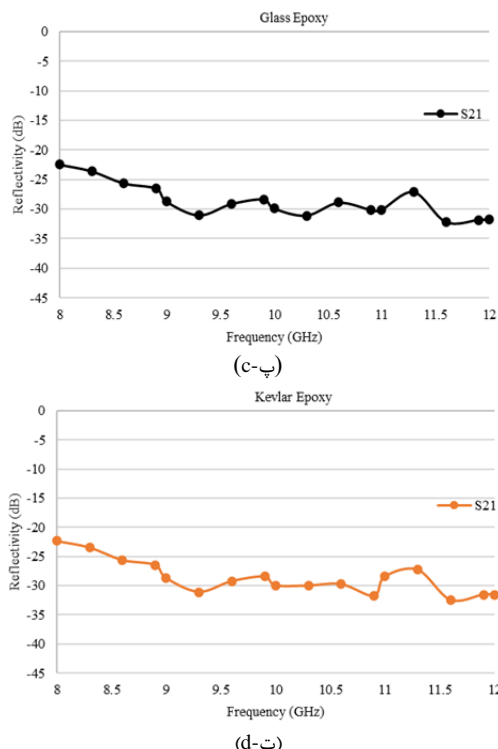


Fig. 5 Frequency-dependent reflection diagrams of a) basalt/epoxy b) carbon/epoxy c) glass/epoxy d) Kevlar/epoxy

شکل 5 نمودار بازتاب برحسب فرکانس (الف) بازالت/اپوکسی (ب) کربن/اپوکسی (پ) شیشه/اپوکسی (ت) کولار/اپوکسی

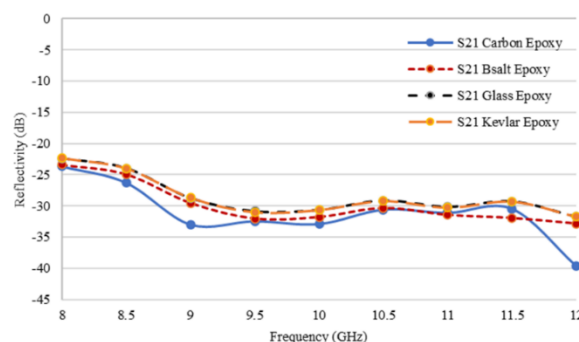


Fig. 6 Absorption comparison chart of production samples

شکل 6 نمودار مقایسه جذب نمونه‌های تولیدی

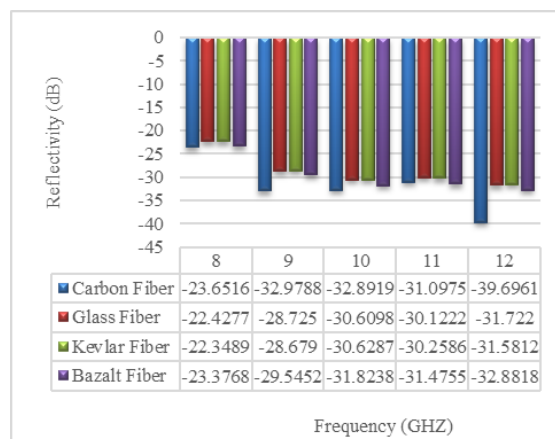


Fig. 7 Reflectance value of samples

شکل 7 مقدار بازتاب نمونه‌ها

- [20] Sarkhosh, R., Arabqomi, H., Farrokhhabadi, A., "Experimental investigation of mechanical and electrical properties of semi-biodegradable polypropylene/hemp woven thermoplastic composite", In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 62-77, 2023.
- [21] El-Masry, M. M., Ramadan, R., Ahmed, M. K., "The effect of adding cobalt ferrite nanoparticles on the mechanical properties of epoxy resin", Results Mater, Vol. 8, p. 100160, 2020.
- [22] Talei-Fard, E., Parsa, H., Eskandari Jam, J., "Investigation of tensile strength and dielectric constant of GFRP composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1708-1714, 2022.
- [23] 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. 37-5, 2024.
- [24] Mishra S, Pratap V, Chaurasia AK, Soni AK, Dubey A, Dixit AK. Combined effect of exfoliated graphite/ferrite filled epoxy composites on microwave absorbing and mechanical properties. Physics Open, Vol. 14, p. 100138, 2023.
- [25] Yu-Qing, K., Mao-Sheng, C., Xiao-Ling, S., Zhi-Ling, H., "The enhanced dielectric from basalt fibers/nickel core-shell structures synthesized by electroless plating", Surface & Coatings Technology, Vol. 201, No. 16, pp. 7201-7206, 2007.
- [26] 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.
- [27] Ankita, H., Biplab, K., Deka., Kyungil, K., Do, Young, K., Young-Woo, N., Jae-Hun, C., Chun-Gon, K., Young-Bin, P., Hyung, Wook, P., "Microwave absorption and mechanical performance of  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> nanostructures grown on woven Kevlar fiber/reduced graphene oxide-polyaniline nanofiber array-reinforced polyester resin composites", Composites Part B engineering, Vol. 140, pp.123-132, 2018.
- [28] Breiss, H., El Assal, A., Benzerga, R., Méjean, C., Sharaiha, A., "Long carbon fibers for microwave absorption: Effect of fiber length on absorption frequency band", Micromachines, Vol. 11, No. 12, p. 1081, 2020
- [29] Mirmohammadi, A., Sadjadi, S., Didehban, Kh., Yarahmadi, E., Bahri-Laleh, N., "Synthesis of polyaniline/zinc-cobalt ferrite nanocomposites and their use in the preparation of radar absorber coatings", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 761-767, 2020.
- [30] Xin, L., Lin, L., Zhaojun, L., Hongyu, W., "Carbon nanotube/glass fabric composites for radar absorption", Composite Interfaces, Vol. 29, No. 13, pp. 1471-1481, 2022.
- [31] Morin, B., "Low Dielectric Fabrics", Greer SC Innegrity, 2008.
- [32] Li, Z., Ma, J., Ma, H., Xu, X., "Properties and applications of basalt fiber and its composites", InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 186, p. 012052, 2018.
- [2] Sarkhosh, R., Arabqomi, H., Farrokhhabadi, A., "Experimental investigation of mechanical and electrical properties of semi-biodegradable polypropylene/hemp woven thermoplastic composite", In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 62-77, 2023.
- [3] Liu, YL., Hsu, CY., Wei, WL., Jeng, RJ., "Preparation and thermal properties of epoxy-silica nanocomposites from nanoscale colloidal silica", Polymer, Vol. 44, No. 18, pp. 5159-67, 2003.
- [4] Al-Oqla, F. M., Sapuan, S. M., Ishak, M. R., Nuraini, A. A., "A decision-making model for selecting the most appropriate natural fiber-Polypropylene-based composites for automotive applications", Journal of Composite Materials, Vol. 50, No. 4, pp. 543-56, 2016.
- [5] Mrazova, Maria., "Advanced composite materials of the future in aerospace industry", Incas bulletin, Vol. 5, No. 3, pp. 139-150, 2013.
- [6] 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.
- [7] <http://composite.about.com/od/applications/a/Composites-In-Aerospace.htm>.
- [8] Skolnik, M. I., "Introduction to radar systems", New York McGraw-hill, Vol. 3, pp. 81-92, 1980.
- [9] 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, pp. 061301-1-061301-25, 2012.
- [10] Naito, Y., 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.
- [11] Weir, W. B., "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies", Proc. IEEE, Vol. 62, No. 1, pp. 33-36, 1974.
- [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", Indian J Pure & Appl Phys, Vol. 42, pp. 221-228, 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] Kwak, B. S., "Nickel-coated glass/epoxy honeycomb sandwich composite for broadband RCS reduction", Compos Part B Eng, Vol. 191, p. 107952, 2020.
- [16] Mohammed, I., Mohammed, J., Srivastava, A. K., "Recent progress in hexagonal ferrites based composites for microwave absorption", Cryst. Res. Technol., Vol. 58, No. 3, p. 2200200, 2023.
- [17] Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B., Mai, Y. W., "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites", Compos Part B Eng, Vol. 39, No. 6, pp. 933-961, 2008.
- [18] Aziz, B., "Structural, Electrical, and Magnetic Properties of Ferrite-Polymer Composites", J Electron Mater, Vol. 47, No. 11, pp. 6437-6442, 2018.
- [19] 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.