

بررسی جذب امواج راداری در ناحیه فرکانسی X توسط

نانوکامپوزیت فریتی در بستر پلی یورتان

بزرگمهر مداح^{۱*}، علی داوودی^۲، محمدرضا خاکباز^۳

۱-دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۲-دانشیار، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد علوم تحقیقات، واحد خراسان رضوی

(دریافت: ۹۳/۰۲/۲۸، پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۳)

چکیده

رادار به عنوان یک سیستم مهم در میدان جنگ مدرن برای تشخیص و از بین بردن توان نظامی دشمن مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از مواد جذب رادار، یکی از روش های مرسوم در برابر حسگر راداری می باشد. این مواد، انرژی رادار را جذب می کند، تابش برگشت داده شده را کاهش می دهند و در نتیجه از شناسایی جلوگیری می کند. نانوکامپوزیت های مختلفی برای اتلاف امواج راداری، در این تحقیق آزمایش شد و از میان آن ها نانوکامپوزیت پلی آنیلین، نانواکسید آهن و نانواکسید تیتانیوم بر پایه پلی یورتان با موفقیت تهیه شد. همچنین تأثیر ضخامت و درصد غلظت این نانوکامپوزیت ها بر میزان جذب امواج، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر افت انعکاسی که در محدوده فرکانسی ۸-۱۲ گیگاهرتز برای کمپوزیت با ضخامت ۷/۵ میلی متر برای فرکانس ۹/۷ گیگاهرتز مشاهده می شود، حدود ۲۲/۵ دسی بل است.

کلید واژه ها: جذب امواج رادار، نانوکامپوزیت، نانوذره تیتان، پلی یورتان، نانوذرات Fe_3O_4

Investigation of X Frequency Microwave Absorbance of Ferrite Nano-Composite in Polyurethane Matrix

B. Madah^{*}, A. Davoudi, M. R. Khakbaz

Imam Hossein University

(Received: 18/05/2014; Accepted: 04/03/2015)

Abstract

In modern battlefield, Radar has emerged as an important sensor to detect and target the military equipment of enemy. The camouflage against radar sensor is mainly achieved through the use of radar absorbing materials (RAM). These materials absorb most of the radar incident energy, thereby reducing the reflected signal to minima, and thus locking the capability of radar detection. In this study, the ability of different nanocomposites were examined to measure the reflection loss. Polyaniline, iron oxide and titanium oxide nanocomposite on Polyurethane substrate was successfully tested and absorbed good amount of radar waves. In order to optimize the reflected loss (the amount of absorbance), the effect of parameters such as thickness and concentration of nanocomposite were considered. The results indicated that the maximum loss in range of 8-12 GHz for a thickness of nanocomposite as 7.5 mm, is about 22.5 dB at 9.7 GHz.

Keywords: Radar Absorbing, Nanocomposite, Titanium Oxide, Polyurethane, Fe_3O_4 Nano-Particle.

*Corresponding Author E-mail: bozorgmaddah@yahoo.com

۱. مقدمه

جاذب‌های ایده‌آل کمک کنند [۳]. استفاده تنها از پلیمر به‌عنوان جاذب موج الکترومغناطیس برای تولید افت مغناطیسی/الکتریکی کافی نیست و همچنین کاربرد آن را در فرکانس‌های بالا محدود می‌کند. مواد نانوساختار به‌علت مساحت سطح بیشتر، اثر تونل کوانتومی باعث افزایش افت مغناطیسی و الکتریکی زیادتری می‌شوند. ترکیب پلیمرها و نانومواد به‌علت افت بزرگ الکتریکی/مغناطیسی مواد معدنی و قابلیت پوشش‌دهی و روان‌کنندگی پلیمرها امکان یک استراتژی بهینه برای طراحی مواد جاذب بسیار خوب را فراهم می‌کند مواد جاذب امواج الکترومغناطیس به‌طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

الف- جاذب‌های دی‌الکتریک

ب- جاذب‌های مغناطیسی

دسته اول جاذب‌های دی‌الکتریک هستند. این جاذب‌ها گذردهی حقیقی پایین و گذردهی موهومی بالا داشته و رسانایی نیز ارائه می‌کنند و جذب بالایی البته در ضخامت بیشتر نشان می‌دهند.

جاذب‌های دی‌الکتریک انرژی موج را گرفته و تبدیل به حرارت می‌کنند و بدین ترتیب از انعکاس جلوگیری می‌شود [۴]. برای تهیه جاذب‌های دی‌الکتریک به دو صورت عمل می‌شود. در حالت اول از پلیمرهای رسانا استفاده می‌شود و با تهیه کامپوزیت این پلیمرها با نانو ذرات دارای ضریب دی‌الکتریک بالا مانند اکسید تیتانیوم، نانوکامپوزیتی رسانا با خاصیت دی‌الکتریک خوب به‌دست می‌آید که توانایی بالایی در جذب امواج الکترومغناطیس دارد [۵]. در حالت دوم از کامپوزیتی بر پایه پلیمرهای رسانا با ضریب دی‌الکتریک بالا و پرکننده‌های رسانا مانند گرافیت، نانولوله‌های کربنی، فلورن، کربن سیاه و ... استفاده می‌شود [۶]. دسته دوم، جاذب‌های مغناطیسی هستند. این مواد به چندین دسته تقسیم می‌شوند؛ که بهترین مواد مغناطیسی برای جذب امواج الکترومغناطیس، فریت‌ها هستند [۷]. تراوایی موهومی بیشتر نسبت به تراوایی حقیقی، میزان جذب امواج را بیشتر می‌کند. این جاذب‌ها پهنای جذب فرکانسی را پهن‌تر کرده، میرایی را افزایش داده و ضخامت پوشش جاذب را کاهش می‌دهد. فریت‌ها با ترکیب‌های مختلف، پودرهای کربونیل آهن و نیکل از جمله مواد مغناطیسی هستند که استفاده می‌شوند. برخی از نگه‌دارنده‌های متداول نیز سرامیک‌ها، رزین‌ها، پلاستیک‌ها، لاستیک‌ها هستند. دسته‌های دیگری نیز از مواد جاذب وجود دارد که از آن جمله فروالکتریک‌ها هستند؛ که ضریب دی‌الکتریک بالایی دارند. سیجنتو مغناطیس دسته جدیدی از مواد هستند که همزمان خاصیت فرومغناطیسی و آنتی‌فرومغناطیسی یا فروالکتریکی و فرومغناطیسی دارند. این مواد در ضخامت‌های کم‌تر جذب بیشتری نسبت به سایر جاذب‌ها از خودشان نشان می‌دهند. نانومواد دانسیته پایین، افت مغناطیسی و الکتریکی بالایی دارند،

اگرچه تجهیزات الکتریکی برای راحتی بیشتر زندگی بشر ساخته شده‌اند اما آلودگی الکترومغناطیسی خطرات فراوانی را متوجه انسان و دستگاه‌های حساس می‌کند؛ بنابراین باید با روش‌های از تأثیر امواج بر بشر و دستگاه‌های حساس جلوگیری کرد. یکی از این روش‌ها استفاده از پوشش‌های جاذب امواج است. از طرف دیگر، برای جلوگیری از آشکار شدن و شناسایی اشیاء و تجهیزات به وسیله امواج الکترومغناطیسی (مانند امواج رادار) نیاز به اقدامات متقابل داریم. اقدامات متقابل در برابر طیف راداری شامل اقداماتی است که بر امواج راداری اثر گذاشته و بیش‌ترین اتلاف را داشته باشند و در نتیجه امواج به گیرنده امواج رادار برنگردد. از این اقدامات می‌توان به کاهش سطح مقطع راداری^۱ (RCS)، استفاده از مواد جاذب رادار^۲ (RAM) و یا استفاده از موادی که پخش راداری آن‌ها مطلوب است اشاره کرد [۱]. امواج رادار، موج‌های الکترومغناطیسی با محدوده طول‌موجی بلندتر از یک متر و کوتاه‌تر از یک میلی‌متر یا برابر با آن، با فرکانسی بین ۰/۳ گیگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز هستند. مواد جاذب تابش الکترومغناطیس برای استتار در برابر امواج رادار برای تجهیزاتی مانند تانک، هواپیما و تأسیسات حساس، فوق‌العاده اهمیت دارد [۲].

در حالت ایده‌آل مواد جاذب امواج باید دارای وزن سبک، ضخامت کم، میزان جذب امواج الکترومغناطیس بالا، پهنای وسیع فرکانس جذب را داشته باشند. در گذشته تلاش‌های قابل توجهی برای ساخت و طراحی مواد مختلف جهت رسیدن به اهداف ایده‌آل ذکرشده صورت گرفته و مواد متفاوتی برای جذب موج الکترومغناطیس به‌کار رفته است. مواد معدنی مرسوم، همانند فریت‌ها و پودرهای فلزی با افت الکتریکی یا مغناطیسی بالا تولید شده‌اند، اما معایب آن‌ها کاربرد گسترده آن‌ها را محدود می‌کند. برای مثال آن‌ها به‌طور نسبی دانسیته بالایی دارند و باعث افزایش وزن زیادی می‌گردند. آن‌ها اغلب رسانایی الکتریکی داشته و منجر به کاهش سریع تراوایی در فرکانس‌های بالا به‌علت اتلاف جریان گردابی شده و پهنای فرکانس باند جذب آن‌ها نسبتاً باریک است. این مواد اغلب به‌عنوان جاذب موج‌های الکترومغناطیس در فرکانس‌های پایین، به‌عنوان نمونه در آسمان‌خراش‌های بدون انعکاس استفاده می‌شوند. پلیمرها با دانسیته پایین (به‌عنوان مثال دانسیته پلی‌آنیلین ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و حتی دانسیته پلی‌استیلن فوم مانند ۰/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است) و قابلیت هدایت جریان الکتریکی و خواص مغناطیسی مناسب می‌توانند مشکلات ذکرشده در بالا را حل کنند و به طراحی

^۱ Radar Cross Section

^۲ Absorption Material Radar

در ناحیه ۱۰/۴ GHz کاهش اتلاف موج ۱۵/۳ دسی‌بل را نشان می‌داد. چوبی و همکاران [۲۱] کامپوزیت جدیدی از اپوکسی، شیشه و آرامید با ساختار ساندویچی تهیه و خواص جذب رادار آن را بررسی کردند. همچنین آن‌ها موفق شدند که یک نانوساختار جذب امواج رادار که دارای خصوصیات دی‌الکتریک مناسب برای جذب در ناحیه x است را طراحی کنند [۲۲]. با توجه به متون مشخص شده است که عواملی مانند ثابت دی‌الکتریک، ثابت تراوایی، رسانایی و اندازه ذرات بر روی جذب و اتلاف امواج الکترومغناطیس تأثیرگذار هستند. در این تحقیق برای بررسی خصوصیات جذب راداری موادی انتخاب می‌شود که هر یک از مواد حداقل دارای یک ویژگی منحصربه‌فردی از این خصوصیات باشند و با این مواد کامپوزیتی تهیه می‌گردد که شامل جمیع این ویژگی‌ها باشد. برای حصول به این هدف، آزمایش‌ها و مواد مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت برای تولید ثابت دی‌الکتریک از نانوذرات اکسید تیتانیوم، برای ثابت تراوایی از نانوذرات فریت اکسید آهن (III) و برای رسانایی از پلیمرهای رسانا مانند پلی‌آنیلین همچنین پوشش کامپوزیت از پلی‌یورتان استفاده شد. همچنین درصد‌های مختلف از کامپوزیت برای رسیدن به بهترین نتیجه مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد، دستگاه‌ها و روش‌ها

۲-۱. مواد و دستگاه‌ها

دو دسیل سولفات سدیم، پارافین، آمونیوم پرسولفات، کلرید آهن (II) ۴، آب، کلرید آهن (III)، آمونیاک، تیتانیوم ایزوپروپوکسید، کلرید آهن (III) ۶، آب‌آنیلین، همگی از شرکت مرک خریداری شده است. دستگاه عددی Network Analyser System. hp 8510 برای تولید امواج الکترومغناطیس در فرکانس ۲-۵۰ گیگاهرتز به کار گرفته شد. این دستگاه با توجه به نیاز کاربر می‌تواند فرکانس‌های متفاوتی را بر روی آن تنظیم نمود. این دستگاه داده‌ها را به صورت نمودار و یا دیجیتال بر اساس فرکانس‌های متفاوت ذخیره می‌نماید و می‌تواند بیش‌ترین و کم‌ترین فرکانس، بیش‌ترین اتلاف برحسب دسی‌بل و برحسب درصد داده‌ها را ارائه نماید. نمونه‌ها از نظر اندازه باید یا در اندازه ۱۵۰ × ۱۰ میلی‌متر و یا به اندازه ۲۲/۵ × ۱۰ میلی‌متر باشند (اندازه دهانه دستگاه آنالیزور) که برای درست کردن نمونه قالب‌های به اندازه‌های فوق تهیه گردید. اولتراسونیک (Bandlinesonrx Digitec Type : DT 255) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (مدل Philips-XL 30) برای کار استفاده شد.

در نتیجه برای جذب موج الکترومغناطیس با ضخامت نازک مناسب هستند. اما تهیه و کاربرد عملی آن‌ها مشکل می‌باشد. نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلیمر هر دو خصوصیت افت موج بالا و قابلیت تهیه آسان را دارند [۸].

تحقیقات بر روی جذب‌های امواج الکترومغناطیس در سال ۱۹۳۰ شروع شد [۹]. اولین مقاله در سال ۱۹۳۶ در هلند چاپ شد که مربوط به بررسی جذب از نوع رزونانسی با استفاده از کربن سیاه به‌عنوان ماده اتلاف موج و تیتانیوم‌اکساید با گذردگی بالا برای کاهش ضخامت بود. بررسی بیش‌تر بر روی مواد جذب حاوی کربن و گرافیت، کربنیل آهن و فریت‌ها ادامه یافت [۱۰]. در حال حاضر دی‌الکتریک‌های مصنوعی با اضافه کردن ناخالصی مانند میله، سیم، دیسک و ناخالصی‌های مارپیچی برای بهبود جذب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. همچنین فیلم‌های از فریت‌های اکسید آهن (III) تهیه شد که این فیلم‌ها در ۴ و در ۱۸-۱۲ گیگاهرتز به ترتیب ۱۰- و ۲۰- دسی‌بل اتلاف موج داشته‌اند تهیه گردید [۱۲ و ۱۳]. در سال‌های اخیر پلیمرهای رسانا به‌عنوان ماده اصلی مورد استفاده برای جذب امواج رادار به کار می‌رود [۱۴ و ۱۵]. پلیمرهای رسانا مزایای زیادی همانند وزن سبک، رسانایی تنظیم‌پذیر یا حتی خواص مغناطیسی داشته و از این‌رو خواص جذب موج الکترومغناطیس بسیار خوب با پهنای فرکانس جذب پهن دارند. نانومواد که از ضریب تراوایی و دی‌الکتریک بالایی برخوردار هستند هنگامی که با پلیمرهای رسانا ترکیب شده و تشکیل نانوکامپوزیت را می‌دهند می‌توانند به‌عنوان یک جذب ایده‌آل استفاده شوند [۱۶]. پلی‌یورتان به‌عنوان زمینه پوشش‌ها، کامپوزیت‌ها و نظیر این‌ها استفاده می‌شود، زیرا خواص مکانیکی بسیار خوب، سازگاری زیستی خوب، انعطاف‌پذیری در طراحی، وزن سبک و قیمت پایینی دارد. نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی بر پایه پلی‌یورتان تهیه شده است. کامپوزیت با ۵ درصد وزنی نانولوله کربنی خواص جذب بهتری نشان می‌دهد و مکانیزم جذب به‌طور عمده در اثر افت دی‌الکتریک نانولوله می‌باشد. پلی‌یورتان به جهت ارزان بودن و تشکیل توده‌های متخلخل که در اتلاف امواج مؤثر بوده و می‌تواند یک بستر مناسب باشد و نتایج خوبی با این بستر به‌دست آمده است [۱۷]. فیلم‌هایی از فریت‌های اکسید آهن (III) تهیه شده که در ۴ و در ۱۸-۱۲ گیگاهرتز به ترتیب ۱۰- و ۲۰- دسی‌بل اتلاف موج داشته‌اند [۱۸]. چن و همکاران [۱۹] با استفاده از فریت اکسید آهن (III) به صورت هسته- پوسته جذب‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه کردند که دارای باند اتلاف نسبتاً پهن با ماکزیمم اتلاف در ۱۰- دسی‌بل در ۶/۹۶ GHz بود. حسینی [۲۰] با بررسی خواص فریت‌ها و پلی‌آنیلین موفق به تهیه فریت منگنز در بستر پلی‌آنیلین شد که

با اسید کلریدریک و آب مقطر شست و شو داده شده و به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای 60°C خشک گردید. پودر سبزرنگ نشانه تولید پلی آنیلین است.

۲-۴. سنتز نانوذرات اکسید تیتانیوم

ابتدا $10/5$ میلی لیتر معادل $(0/6)$ مول آب مقطر، 9 میلی لیتر معادل $(0/15)$ مول اتانول و $0/08$ میلی لیتر معادل $(0/002)$ مول اسید کلریدریک در درون بالن 100 میلی لیتری مجهز به همزن مغناطیسی ریخته شد و سپس درون بالن درحالی که محتویاتش در دمای اتاق به شدت هم زده می شد، مقدار 3 میلی لیتر $(0/01)$ مول) تیتانیوم ایزوپروپوکسید به آرامی و قطره قطره اضافه گردید. رسوب سفیدرنگی تشکیل شد؛ و به منظور دستیابی به پیشرفت واکنش، نمونه همراه با عمل همزدن به مدت یک هفته در دمای اتاق قرار گرفت، محتویات بالن پس از فیلتراسیون به مدت 2 ساعت در دمای 50°C خشک شد [۱۸].



(الف)



(ب)

۲-۵. تهیه نانوکامپوزیت اکسید آهن (III) / پلی آنیلین

اکسید تیتانیوم /

ابتدا $0/01$ مول هگزانوئیک اسید برای تهیه نانوکامپوزیت، معادل $1/44$ گرم با $0/01$ مول مونومر آنیلین، معادل $0/93$ گرم در 20 میلی لیتر آب مقطر به مدت 30 دقیقه با همزن مغناطیسی هم زده شد. $0/1$ گرم نانوکامپوزیت تیتانیوم و $0/1$ گرم نانوکامپوزیت آهن (Fe_3O_4) را داخل محلول (بعد از برداشتن همزن مغناطیسی) ریخته و تحت التراسونیک به مدت 4 ساعت قرار گرفت بعد از اولتراسونیک مقدار $2/28$ گرم آمونیوم پروسولفات، در 20 میلی لیتر آب مقطر حل نموده و توسط بورت، طی 2 ساعت به محلول اضافه و همزمان هم زده می شود. محلول حاصل 24 ساعت در دمای صفر درجه سانتی گراد قرار گرفت. در نهایت محصول سه بار با آب مقطر و سه بار با متانول شست و شو داده شد و 2 ساعت در هاون قرار گرفت.

۲-۶. اندازه گیری میزان جذب

با استفاده از روابط 1 میزان افت انعکاس (RL) توان موج برگشتی داده های آنالیزگر طیفی را به صورت درصد جذب تبدیل می کنیم. [۱۹]. در این رابطه RL میزان افت انعکاس بر حسب دسی بل (dB) می باشد.

$$\% \text{ Absorption} = 1 - 10^{(-\frac{RL}{10})} \quad (1)$$

برای مثال نمونه ای با افت 9 dB دارای درصد جذب $87/4$ می شود.

$$87/4 = (1 - 10^{(-9/10)}) \times 100$$

شکل ۱. الف) دهانه 100×150 میلی متر مورد استفاده در دستگاه آنالیز (ب) دهانه $22/5 \times 10$ میلی متر

۲-۲. سنتز نانو ذرات Fe_3O_4

یک بالن سه دهانه با استن شسته و خشک شد. 450 میلی لیتر آب مقطر را داخل بالن ریخته و در حمام آب گرم قرار داده شد؛ و مقدار $3/18$ گرم FeCl_2 و $6/49$ گرم FeCl_3 داخل آب مقطر با دمای 60°C اضافه می گردد. گاز N_2 به داخل ظرف دمیده شد و به مدت یک ساعت با همزن مکانیکی خوب به هم زده شد و سپس مقدار 30 میلی لیتر آمونیوم به تدریج به محلول داخل بالن اضافه گردید و بعد از مدت یک ساعت بالن را از داخل حمام آب گرم بیرون آورده و داخل یک بشر ریخته و روی آهن ربای مغناطیسی قرار داده شد تا ذرات ته نشین گردد. سپس رسوب چندین بار با آب مقطر شسته شد و در هوای محیط خشک گردید. سپس نمونه با هاون خرد شد تا پودر نرمی حاصل گردد. مورفولوژی و اندازه نانوذرات مغناطیسی پودر حاصل با دستگاه SEM تعیین گردید.

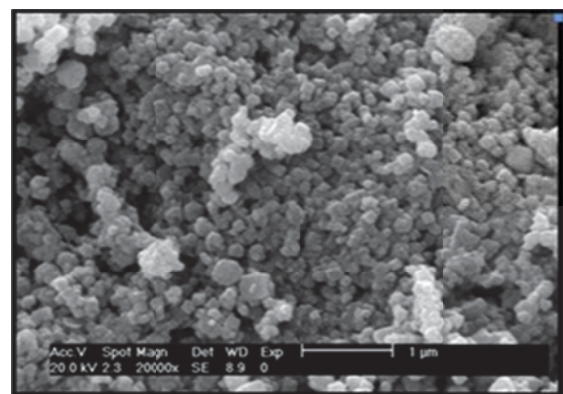
۲-۳. سنتز پلی آنیلین

برای تهیه پلی آنیلین ابتدا $4/5$ میلی لیتر از آنیلین را به 70 میلی لیتر از اسید کلریدریک 2 مولار اضافه شده و در دمای 25 درجه سانتی گراد به مدت 20 دقیقه هم زده شد. سپس $4/5$ گرم از آمونیوم پروسولفات، در 20 میلی لیتر آب مقطر حل گردید و در مدت زمان ده دقیقه به محلول آنیلین اضافه شد و به مدت سه ساعت در دمای 20°C نگه داشته شد، محلول حاصل فیلتر شده و

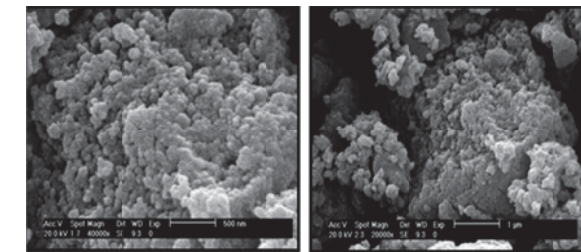
۳. نتایج و بحث

۳-۱. خصوصیات نانوذره مغناطیسی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) در شکل (۲) نشان داده شده است. اندازه نانوذرات اکسید آهن ۷۰-۵۰ نانومتر می‌باشد. تصویر SEM مربوطه نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات مغناطیسی به مورفولوژی تقریباً مکعبی در سطح نانوذرات می‌باشد از این تصویر می‌توان استنباط کرد که نانوذرات از گستره توزیع به نسبت مناسبی برخوردارند.

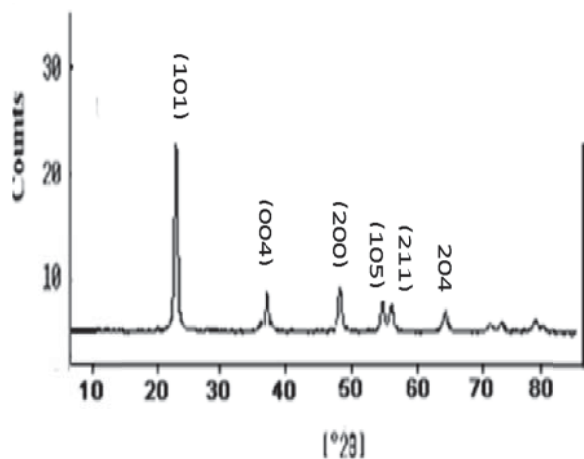


شکل ۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی نانوذرات اکسید آهن (III) دارای مورفولوژی تقریباً مکعبی با اندازه ۷۰-۵۰ نانومتر



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی نانوذرات اکسید تیتان با ساختار تقریباً گروی با اندازه متوسط ۸۰-۴۰ نانومتر

با استفاده از فن XRD ساختار بلوری نانوذره اکسید تیتانیوم تعیین شد. شکل (۵) الگوی پراش نانوذره سنتز شده را نشان می‌دهد اندازه ذرات با میانگین‌گیری از اندازه‌های به‌دست‌آمده از پیک‌های شاخص اکسید تیتانیوم به‌دست می‌آید. به‌عبارت‌دیگر ابتدا اندازه ذرات برای هر نمونه در پیک‌های شاخص اکسید تیتانیوم در محدوده ذکر شده با استفاده از معادله شرر حساب می‌شود، سپس از اندازه‌های به‌دست‌آمده میانگین گرفته می‌شود و اندازه تقریبی نانوذره اکسید تیتانیوم ۴۵ نانومتر محاسبه گردید.

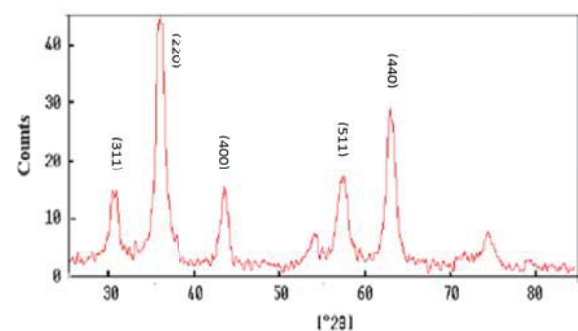


شکل ۵. الگوی پراش XRD نانوذره اکسید تیتانیوم

۳-۳. اتلاف امواج رادار با کامپوزیت پلی‌یورتان، پلی‌آنیلین

برای بررسی میزان تأثیرگذاری پلی‌آنیلین در جذب راداری کامپوزیت، ابتدا کامپوزیت آنیلین و پلی‌یورتان (۶۰:۴۰) در قالب $10 \times 22/5$ میلی‌متر تهیه شد. شکل (۶) نمودار افت انعکاس توان موج برگشتی (برحسب dB) و نمودار جذبی به‌صورت درصد، برای کامپوزیت در شرایط غلظتی ۴۰ درصد (وزنی/وزنی) را نشان می‌دهد. طبق اطلاعات استخراج‌شده این کامپوزیت دارای بیش‌ترین جذب در فرکانس (GHz) ۹/۷ با بیشینه جذب ۴۳ درصدی برخوردار می‌باشد.

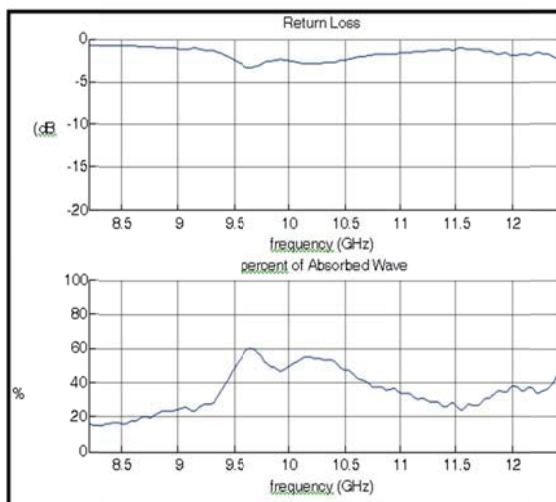
با استفاده از فن XRD ساختار بلوری نانوذرات مغناطیسی تعیین شد. شکل (۳) الگوی پراش نانوذره سنتز شده را نشان می‌دهد که کاملاً بر الگوی ساختار بلوری مگنتیت خالص منطبق می‌باشد (بر اساس کارت دستگاه XRD، JCPDS No. 07-0322). به‌علاوه هیچ پیک ناخالصی مشاهده نمی‌شود. اندازه ذرات بر اساس معادله شرر ۵۰ nm تخمین زده شد.



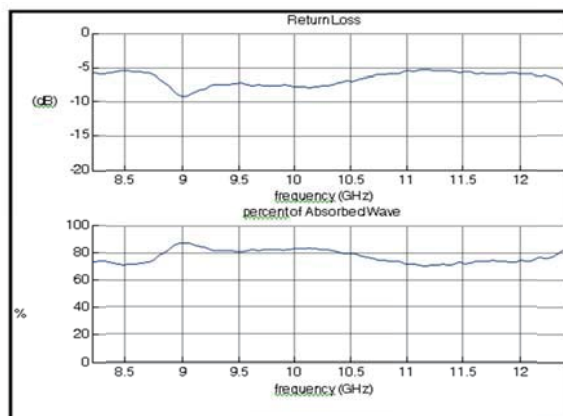
شکل ۳. الگوی پراش XRD نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) سنتز شده

۳-۲. خصوصیات نانوذره اکسید تیتانیوم

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوکامپوزیت تیتانیوم (TiO_2) با بزرگ‌نمایی متفاوت در شکل (۴) نشان داده شده است، تصویر SEM مربوطه نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات با ساختار تقریباً گروی



شکل ۷. اتلاف امواج رادار توسط کامپوزیت پلی‌یورتان، پلی‌آنیلین، نانو اکسید تیتانیوم با ضخامت ۴ میلی‌متر برای کامپوزیت در شرایط غلظتی ۴۰ درصد (وزنی/وزنی)، نمودار بالا، افت انعکاس توان موج برگشتی (برحسب dB) و نمودار پایین، جذب به صورت درصد

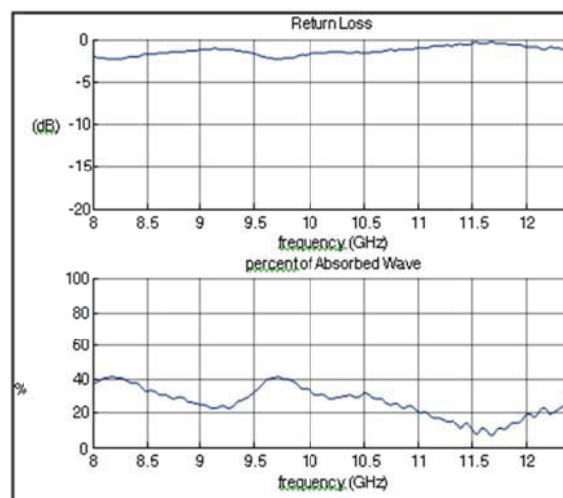


شکل ۸. اتلاف امواج رادار توسط کامپوزیت پلی‌یورتان، پلی‌آنیلین، نانو Fe_3O_4 با ضخامت ۴ میلی‌متر برای کامپوزیت در شرایط غلظتی ۴۰ درصد (وزنی/وزنی)، نمودار بالا، افت انعکاس توان موج برگشتی (برحسب dB) و نمودار پایین، جذب به صورت درصد

طبق اطلاعات استخراج شده این کامپوزیت، بیش‌ترین جذب در فرکانس (GHz) ۹ با بیشینه جذب ۸۷ درصدی برخوردار می‌باشد. افزایش چشم‌گیر جذب نشان‌دهنده نقش مهم نانوذرات Fe_3O_4 در جذب امواج رادار می‌باشد. نانوذرات Fe_3O_4 گونه پارامغناطیس بوده بنابراین می‌تواند افت مغناطیسی زیادی ایجاد کند.

۳-۶. مقایسه کامپوزیت‌های تهیه‌شده با دو بستر پارافین و پلی‌یورتان

کامپوزیتی از پلی‌آنیلین، نانو اکسید تیتانیوم، اکسید آهن در دو بستر متفاوت یعنی پلی‌یورتان و پارافین تهیه شد. خصوصیات طیفی این دو نمونه باهم مقایسه شده است (جدول ۱).



شکل ۹. اتلاف امواج رادار توسط کامپوزیت پلی‌یورتان، پلی‌آنیلین با ضخامت ۴ میلی‌متر برای کامپوزیت در شرایط غلظتی ۴۰ درصد (وزنی/وزنی)، نمودار بالا، افت انعکاس توان موج برگشتی (برحسب dB) و نمودار پایین، جذب به صورت درصد

۳-۴. اتلاف امواج رادار با کامپوزیت پلی‌یورتان، پلی‌آنیلین، نانوذرات TiO_2

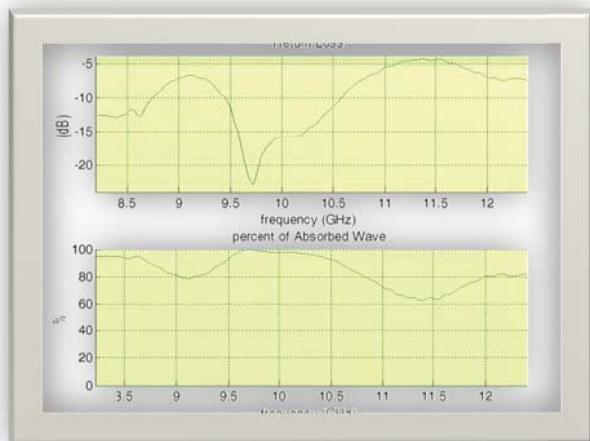
برای بررسی میزان تأثیرگذاری نانوذرات TiO_2 در جذب راداری کامپوزیت، ابتدا کامپوزیت آنیلین و پلی‌یورتان و نانوذرات TiO_2 در قالب $10 \times 22/5$ میلی‌متر تهیه شد. شکل (۷) نمودار افت انعکاس توان موج برگشتی برحسب (dB) و نمودار جذب امواج الکترومغناطیس به صورت درصد، برای کامپوزیت با درصد وزنی ۴۰ درصد را نشان می‌دهد. طبق اطلاعات استخراج شده این کامپوزیت دارای بیش‌ترین جذب در فرکانس (GHz) $9/7$ و با بیشینه جذب ۶۰ درصدی برخوردار می‌باشد. با مقایسه جذب به‌دست‌آمده در بخش ۲-۴ می‌توان استنباط کرد که افزایش نانو اکسید تیتانیوم باعث افزایش جذب شده است. همان‌طور که در مقدمه بررسی شد یکی از فاکتورها مؤثر در جذب داشتن ثابت دی‌الکتریک مناسب می‌باشد و از طرف دیگر نانو اکسید تیتانیوم یک جاذب دی‌الکتریک خوبی می‌باشد.

۳-۵. اتلاف امواج رادار با کامپوزیت پلی‌یورتان، پلی‌آنیلین، نانوذرات Fe_3O_4

برای بررسی میزان تأثیرگذاری نانوذرات Fe_3O_4 در جذب راداری کامپوزیت، ابتدا کامپوزیت آنیلین و پلی‌یورتان و نانوذرات Fe_3O_4 در قالب $10 \times 22/5$ میلی‌متر تهیه شد. شکل (۸) نمودار افت انعکاس توان موج برگشتی برحسب (dB) و نمودار جذب امواج الکترومغناطیس به صورت درصد، برای کامپوزیت با درصد وزنی ۴۰ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خصوصیات طیفی کامپوزیت‌های تهیه‌شده

نوع ماده	درصد ماده	ضخامت نمونه (mm)	بهترین پهنای باند جذبی	بهترین فرکانس اتلاف	بیش‌ترین میزان اتلاف (دسی‌بل)	بیش‌ترین درصد جذب
پلی‌آنیلین، نانو اکسید تیتانیوم، اکسید آهن (III) در بستر پارافین	۴۰٪	۷/۵	۸-۱۰/۵	۹/۲	۸	۸۴/۷
پلی‌آنیلین، نانو اکسید تیتانیوم، اکسید آهن (III) در پلی‌یورتان	۴۰٪	۷/۵	۸-۱۲	۹/۶	۹/۲	۹۹/۵



شکل ۹. منحنی نمودار بالا، افت انعکاس توان موج برگشتی و منحنی نمودار پایین، جذب امواج میکروویو مربوط به نانوکامپوزیت پلی‌آنیلین، اکسید آهن (III)، نانو اکسید تیتانیوم در بستر پلی‌یورتان با درصد وزنی ۴۰ و ضخامت ۷/۵ میلی‌متر می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج و بررسی‌های به‌عمل‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از پلیمر رسانای پلی‌آنیلین می‌توان کامپوزیت‌های پلیمری با خاصیت مغناطیسی و رسانایی مناسب تهیه کرد. از آنجاکه نانوذرات مغناطیسی پایداری محیطی کمی دارند، به‌تنهایی قابلیت استفاده به‌عنوان جاذب امواج میکروویو را ندارند. لذا نیاز به نگاه‌دارنده پلیمری داشته که پلیمر رسانای پلی‌آنیلین این نقش را به‌عهده دارد. از طرف دیگر این پلیمر به‌علت داشتن خاصیت رسانایی مناسب قابلیت جذب موج داشته و همچنین به‌علت تهیه ساده‌تر این پلیمر و نیز قیمت مناسب بهترین گزینه برای استفاده می‌باشد، علت استفاده از نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) داشتن ضریب تراوایی مناسب و دلیل استفاده از نانوذرات اکسید تیتانیوم به دلیل وجود ضریب دی‌الکتریک مناسب می‌باشد. نتایج حاصل در این تحقیق نشان می‌دهد نانوکامپوزیت پلی‌آنیلین با نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسید تیتانیوم با ۴۰ درصد وزنی و با ضخامت ۷/۵ میلی‌متر و با اتلاف ۲۲/۵ دسی‌بل و ۹۹/۵ درصد اتلاف موج راداری می‌باشد.

همان‌طور که از داده‌های جدول مشخص است کامپوزیت با بستر پلی‌یورتان دارای جذب بالاتری می‌باشد از طرف دیگر پایداری حرارتی بالاتر پلی‌یورتان باعث می‌شود که کامپوزیت تهیه‌شده دارای استحکام مناسب برای اتصال به سطوح فلزی و سطوح پلیمری شود.

۳-۷. تأثیر درصد و ضخامت نانوکامپوزیت پلی‌آنیلین، نانو اکسید تیتانیوم، اکسید آهن (III) و پلی‌یورتان بر جذب امواج رادار

از آنجایی که هر ماده‌ای در فرکانس مورد نظر در ضخامت خاصی بیش‌ترین میزان جذب را ارائه می‌دهد لذا تعیین بهترین ضخامت لازم است. همچنین یکی از فاکتورهای موثر در جذب غلظت مواد جاذب است بنا براین، نمونه‌های با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و با ضخامت ۷/۵، ۴ و ۲ از کامپوزیت تهیه شد و مورد آزمودن جذب رادار قرار گرفت. نتایج در جدول (۲) خلاصه گردیده شده است و همچنین نمودار جذبی بهترین کامپوزیت در شکل (۹) نمایش داده شده است.

جدول ۲. تأثیر درصد و ضخامت کامپوزیت پلی‌یورتان، پلی‌آنیلین، نانو اکسید آهن (III)، نانو اکسید تیتانیوم بر جذب امواج رادار

نوع ماده	درصد ماده	ضخامت نمونه (mm)	بهترین فرکانس اتلاف	بیش‌ترین میزان اتلاف (دسی‌بل)	بیش‌ترین درصد جذب
پلی‌یورتان و پلی‌آنیلین، نانو Fe_3O_4 ، نانو TiO_2	۴۰٪	۷/۵	۹/۷	۲۲/۵	۹۹
		۴	۹/۶	۱۲	۹۳
		۲	۹/۴	۳/۱	۵۱
	۲۰٪	۷/۵	۹/۵	۱۲	۹۳
		۴	۹/۵	۳/۶	۵۶
		۲	۹/۶	۲/۲	۳۸
	۱۰٪	۷/۵	۹/۵	۹/۲	۸۸
		۴	۹/۳	۲/۷	۴۶
		۲	-	-	-

۵. مراجع

- [14] Gaylor, K. "Radar Absorbing Materials Mechanisms and Materials"; DSTO Materials Research Laboratory, 1989.
- [15] Jaggard, D. L.; Engheta, N. "Chirosorb TM as an Invisible Medium"; *Elect. Lett.* 1989, 25, 173-174.
- [16] Jun, Z.; Jincheng, X.; Peng, T.; Wei, H. "Ferromagnetic and Microwave Absorption Properties of Copper Oxide-Carbon Fiber Composites"; *J. Alloy Comp.* 2009, 487, 304-308.
- [17] Kalaitzidou, K.; Fukushima, H.; Drzal, L. "A New Compounding Method for Exfoliated Graphite-Polypropylene Nanocomposites with Enhanced Flexural Properties and Lower Percolation Threshold"; *Compos. Sci. Technol.* 2007, 67, 2045-2051.
- [18] Wei, J.; Liu, J.; Li, S. "Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Fe₃O₄ Magnetic Films Plated on Hollow Glass Spheres"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2007, 312, 414-417.
- [19] Chen, Y. J.; Gao, P.; Zhu, C. L.; Wang, R. X.; Wang, L. "Synthesis, Magnetic and Electromagnetic Wave Absorption Properties of Porous Fe₃O₄/Fe/SiO₂ Core/Shell Nanorods"; *J. Appl. Phys.* 2009, 106, 054303-4.
- [20] Hosseini, H.; Mohseni, S.; Asadnia, A.; Kerdari, H. "Synthesis and Microwave Absorbing Properties of Polyaniline/4 Nanocomposite"; *J. Alloy Compd.* 2011, 509, 4682-4687.
- [21] Choi, I.; Lee, D.; Lee D. G. "Hybrid Composite Low-Observable Radome Composed of E-glass/Aramid/Epoxy Composite Sandwich Construction and Frequency Selective Surface"; *Compos. Struct.* 2014, 117, 98-104.
- [22] Choi, I.; Lee, D.; Lee, D. "Optimum Design Method of a Nano-composite Radar Absorbing Structure Considering Dielectric Properties in the X-band Frequency Range"; *Compos. Struct.* 2015, 119, 218-226.
- [23] Xingwei, L.; Gengchao, W.; Xiaoxuan, L.; Dongming, L. "Surface Properties of Polyaniline/Nano- TiO₂ Composites"; *Appl. Surf. Sci.* 2004, 229, 395-401.
- [24] Xiaoling, Y.; Gang, L.; Duanming, Z.; Huahui, H. "An Optimizing Method for Design of Microwave Absorbing Materials"; *Mater. Design.* 2006, 27, 700-705.
- [25] Bueno, A. R.; Gregori, M. L.; Maria, C. S. "Microwave-absorbing Properties of Ni_{0.5-x}Zn_{0.5-x}Me_{2x}Fe₂O₄ (Me=Cu, Mn, Mg) Ferrite Wax Composite in X-band Frequencies"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2007, 320, 864-870.
- [1] Bing, T.; Liangjun, Y.; Taihong, S.; Linfeng, Y.; Youchun, Z. "Preparation of Nano-Sized Magnetic Particles from Spent Pickling Liquors by Ultrasonic-Assisted Chemical Co-Precipitation"; *J. Hazard. Mater.* 2009, 163, 1173-1178.
- [2] Huo, J.; Wang, L.; Haojie, Y. "Polymeric Nanocomposites for Electromagnetic Wave Absorption"; *J. Mater. Sci.* 2009, 44, 3917-3927.
- [3] Zhongzhu, W.; Hong, B.; Jian, L. "Magnetic and Microwave Absorbing Properties of Polyaniline/Fe₂O₄ Nanocomposite"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2008, 320, 2132 - 2139.
- [4] Petrov, V. M.; Gagulin, V. V. "Microwave Absorbing Material"; *Inorg. Mater.* 2001, 37, 93-98.
- [5] Sook, W. P.; Masato, T.; Jiro, W.; Noriyuki, K. "Microwave Absorption Behaviors of Polyaniline Nanocomposites Containing TiO₂ Nanoparticles"; *Current Applied Physics.* 2008, 8, 391-394.
- [6] Yuzun, F.; Haibin, Y.; Minghui, L.; Guangtian, Z. "Evaluation of the Microwave Absorption Property of Flake Graphite"; *Mater. Chem. Phys.* 2009, 115, 696-698.
- [7] Kimura, S.; Kato, T.; Hyodo, T. "Electromagnetic Wave Absorption Properties of Carbonyl Iron-Ferrite/PMMA Composites Fabricated by Hybridization Method"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2007, 312, 181-186.
- [8] Truong, V. T.; Riddell, R. F. "Polypyrrole Based Microwave Absorbers"; *J. Mater. Sci.* 1998, 33, 4971-4976.
- [9] Emerson, W. H. "Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years"; *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1973, 21, 484-487.
- [10] Kasevich, R. S.; Broderick, F. "Broadband Electromagnetic Energy Absorber"; *US Patent* 5, 223, 849, 1993.
- [11] Cory, H.; Shiran, S.; Heilper, M. "An Iterative Method for Calculating the Shielding Effectiveness and Light Transmittance of Multilayered Media"; *IEEE Trans. Electromag. Compat.* 1993, 35, 451-456.
- [12] Chakravarty, S.; Mitra, R.; Williams, N. R. "Microwave Theory and Techniques"; *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2001, 49, 1050-1056.
- [13] Wei, J.; Liu, J.; Li, S. "Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Fe₃O₄ Magnetic Films Plated on Hollow Glass Spheres"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2007, 312, 414-417.