

## خواص جذب امواج راداری نانو کامپوزیت بر پایه پلی آنیلین

بزرگمهر مداح<sup>۱\*</sup>، ابراهیم توکلی<sup>۲</sup>، مهدی یساقی<sup>۳</sup>، یعقوب قانع قره‌باغ<sup>۴</sup>

۱- دانشیار، ۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد و ۴- پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۱۰)

### چکیده

استتار جنگ‌افزارها به‌ویژه هواپیما، بالگرد و پهپادها امروزه امری اجتناب‌ناپذیر است. استتار راداری به معنی پنهان شدن یک جنگ‌افزار از دید رادار می‌باشد که این عمل به شیوه‌های مختلفی انجام می‌شود، مهم‌ترین آنها کاهش سطح مقطع راداری یا استفاده از مواد جذب رادار می‌باشد. در این تحقیق نانوکامپوزیت‌های مختلفی برای اتلاف امواج راداری آزمایش شد که در میان آنها نانوکامپوزیت پلی آنیلین، نانوذرات اکسید آهن (III) و نانوذرات اکسید تیتانیوم مؤثرترین بودند. همچنین تأثیر تغییر ضخامت و درصد اجزاء تشکیل دهنده این نانوکامپوزیت بر جذب امواج رادار بررسی شد. بدین ترتیب، در مرحله اول، نانوذره  $Fe_3O_4$  با استفاده از روش هم رسوبی از آمونیاک در آب تهیه شد. ساختار بلوری و مورفولوژی نانوذره سنتز شده به ترتیب با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و دستگاه پراش اشعه X (XRD) تعیین گردید. در مرحله دوم، نانوکامپوزیت پلی آنیلین/نانوذره اکسید آهن و اکسید تیتانیوم، توسط پلیمریزاسیون آنیلین مخلوط شده با نانوذرات در حضور اکسید کننده آمونیوم پرسولفات در حمام آب و یخ ( $0^\circ C$ ) سنتز شد. در مرحله آخر، پودر نانوکامپوزیت در پارافین کاملاً مخلوط شده و سپس قالب‌گیری گردید. خصوصیات جذب راداری این نانوکامپوزیت با آنالیزور Vector Network در ۸-۱۲ گیگا هرتز مورد بررسی قرار گرفت. بهترین جذب در ضخامت ۴ mm و غلظت ۱۰٪ برای نانوکامپوزیت مشاهده گردید. بیشترین اتلاف موج در ناحیه ۹/۵ گیگا هرتز ۳۳/۳ دسی بل به دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** جذب رادار، پلی آنیلین، نانوکامپوزیت، نانوذرات  $Fe_3O_4$ .

## Radar Absorption Properties of Nanocomposite Based on Polyaniline

B. Maddah\*, A. Tavakoly, M. Yasaghei, Y. Qane Garebagh

Imam Hossein University

(Received: 31/12/2012; Accepted: 01/09/2013)

### Abstract

Nowadays, camouflaging the warfare equipments particularly aircraft, helicopters and drones are inevitable. Camouflaging in the radar range means attenuation, reflection and dispersion of radar waves. This operation can be achieved by different methods most notably, by reducing the radar cross section or using radar absorbent material. In this study different nanocomposites were tested for loss of radar waves. As a result of this research poly-aniline nanocomposite of iron oxide (III) nanoparticles and titanium nanoparticles were the most effective. Also a few experiments were carried-out on the thickness and percentage of nanocomposite constituent. This work was carried out in three stages. In the first stage,  $Fe_3O_4$  nanoparticles were prepared by co-precipitation method using  $NH_3$  solution. The crystal structures and morphology of nanoparticles were investigated and characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). In the second part, conducting polyaniline/nanoparticles ( $TiO_2$  and  $Fe_3O_4$ ) composites were synthesized by in situ polymerization method with ammonium persulfate (APS) as the oxidant and under an ice-water bath ( $0^\circ C$ ). In last step, nanocomposite powders was completely dispersed in paraffin and was followed by casting process on test plate. The radar absorbing property of nanocomposite was investigated by vector network analyzer at the frequency range of 8-12 GHz. The best absorption was caused by the nanocomposite with concentration of about 10% and thickness of 4 mm. Maximum reflections recorded was about 33.3 dB at 9.5GHz.

**Keyword:** Radar Absorbing, Polyaniline, Nanocomposite,  $Fe_3O_4$  Nanoparticles.

## ۱. مقدمه

استتار یکی از ارکان مهم پدافند غیرعامل می‌باشد و استتار در برابر امواج رادار برای تجهیزاتی مانند تانک، هواپیما و تأسیسات حساس، فوق‌العاده اهمیت دارد. پارامترهایی مانند فاصله، شکل هندسی، مواد به کار رفته، مکان‌یابی هدف، پس زمینه، افزایش کلاترها به صورت مصنوعی یا طبیعی [۱] بیشترین تأثیر را بر قابلیت آشکارسازی هدف از دید رادار دارند. اقداماتی 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<sup>۱</sup> (RCS)، استفاده از مواد جذب رادار<sup>۲</sup> (RAM) و یا استفاده از موادی که پخش راداری آنها مطلوب است، اشاره کرد. شکل هندسی شیء مورد نظر و سطح مقطع راداری به یکدیگر مرتبط بوده و هر چه سطح مقطع راداری کاهش یابد، امواج برگشتی از یک جسم به سمت رادار نیز کمتر خواهد بود و بهتر استتار می‌گردد. بر این مبنا اشکال هندسی تجهیزات و ادوات نظامی به سرعت در حال تغییر است و سطوح با زاویه ۹۰ درجه حذف می‌شود و تبدیل به سطوحی با زوایای منحنی و با شیب کم می‌شوند [۱]. فناوری نانو و تولید مواد در ابعاد نانومتری در دهه اخیر توجه بسیاری را به خود معطوف داشته است. نانو کامپوزیت‌ها نیز به عنوان یکی از شاخه‌های این فناوری جدید اهمیت زیادی یافته‌اند و یکی از زمینه‌هایی هستند که کاربردهای صنعتی پیدا کرده‌اند. تلاش اولیه موفقیت‌آمیز در تهیه نانو کامپوزیت‌ها به دهه‌های ۶۰ تا ۷۰ قرن بیستم بازمی‌گردد. نانو کامپوزیت شامل ترکیب ذرات در حوزه ملکولی یا نانو در زمینه پلیمری، فلزی یا سرامیکی است. در همه موارد مشاهده می‌شود که مقدار نانوذرات در این زمینه‌ها می‌تواند به طور کامل خواص این مواد را تغییر دهد. این نانوذرات به عنوان تقویت کننده زمینه و همچنین تغییردهنده رفتار الکتریکی مواد پایه به کار می‌روند. نانوذرات چند جزئی ترکیبی از دو فاز مختلف مانند دو یا چند ترکیب آلی یا یک ترکیب آلی و یک و یا چند ترکیب غیر آلی می‌باشند. این نوع از نانوذرات می‌توانند در قالب چهار گروه طبقه‌بندی شوند. نانوذرات هسته-پوسته، نانوذرات زیرخوشه‌ای، نانوذرات مختلط، نانوذرات چند لایه‌ای که نانوذرات هسته-پوسته شامل یک پوسته از یک نوع اتم می‌باشد که هسته‌ای از نوع دیگر را احاطه کرده است. در حقیقت نانوذرات هسته-پوسته سیستم‌های هیبریدی هستند. انواع مختلفی از هسته و همچنین گروه‌های متنوعی از پوسته وجود دارند. هسته‌ها و پوسته‌ها می‌توانند دارای ویژگی‌های متفاوت باشند که از آن جمله می‌توان به میزان فلزی بودن، میزان نیمه هادی بودن، مغناطیسی بودن آنها اشاره کرد [۲ و ۳].

تحقیقات بر روی جذب‌های امواج الکترومغناطیس در سال ۱۹۳۰ شروع شد [۴]. اولین مقاله در سال ۱۹۳۶ در هلند چاپ شد که

مربوط به بررسی جذب از نوع رزونانسی با استفاده از کربن سیاه به عنوان ماده اتلاف موج و تیتانیم اکساید با گذردهی بالا برای کاهش ضخامت بود [۵]. در جنگ جهانی دوم، آلمان‌ها برای استتار زیردریایی‌های پیشرفته خود (وسچ<sup>۳</sup>) از پودر کربونیل آهن درون لاستیک با ضخامت حدود سه اینچ و فرکانس سه گیگا هرتز استفاده کردند. آنها همچنین جذب‌های ژائومن<sup>۴</sup> با استفاده از چند لایه ورقه‌های پلاستیک سخت تولید نمودند که این ورقه‌ها با سه اینچ ضخامت، انعکاس امواج را ۲۰ دسی‌بل در فرکانس ۲-۱۵ گیگا هرتز کاهش می‌دهد. در دهه ۱۹۸۰ فرآیند طراحی جذب‌ها با روش‌های بهینه‌سازی بهبود یافت و مواد جذب جدید و آنالوگ‌های مداری طراحی شد و پراکنده شدن امواج توسط این مواد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۶ و ۷]. بررسی بیشتر بر روی مواد جذب حاوی کربن و گرافیت، کربنیل آهن و فریت‌ها ادامه یافت [۸]. در حال حاضر دی‌الکتریک‌های مصنوعی با اضافه کردن ناخالصی مانند میله، سیم، دیسک و ناخالصی‌های مارپیچی برای بهبود جذب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. از سال ۱۹۹۰ پژوهش‌های جدید منجر به یافته‌های زیادی در مورد جذب مواد کایرال شده است [۱۰]. در سال‌های اخیر پلیمرهای رسانا به عنوان ماده اصلی مورد استفاده برای جذب امواج رادار به کار می‌رود [۱۱]. در سال ۲۰۰۷ فیلم‌های از فریت‌های اکسید آهن (III) تهیه شد که این فیلم‌ها در ۴ و در ۱۸-۱۲ گیگا هرتز به ترتیب ۱۰- و ۲۰- دسی‌بل اتلاف موج داشته‌اند تهیه گردید [۱۲]. چن و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از فریت اکسید آهن (III) به صورت هسته-پوسته جذب‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه کردند که دارای باند اتلاف به نسبت پهن با بیشینه اتلاف در ۱۰- دسی بل در ۶/۹۶ GHz بود. حسینی [۱۴] در سال ۲۰۱۱ با بررسی خواص فریت‌ها و پلی آنیلین موفق به تهیه فریت منگنز در بستر پلی آنیلین شد که در ناحیه ۱۰/۴ GHz کاهش اتلاف موج ۱۵/۳ دسی‌بل را نشان می‌داد. 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 منحصر به فردی از این خصوصیات باشند و با این مواد کامپوزیتی تهیه می‌گردد که شامل جمیع این ویژگی‌ها باشد. برای حصول به این هدف، آزمایشات و مواد مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت برای تولید ثابت دی‌الکتریک از نانوذرات اکسید تیتانیم، برای ثابت تراوایی از نانوذرات فریت اکسید آهن (III) و برای رسانایی از پلیمرهای رسانا مانند پلی آنیلین استفاده شد. هم چنین قطرهای (ضخامت‌های) مختلف از کامپوزیت برای رسیدن به بهترین نتیجه مورد بررسی قرار گرفت.

<sup>۳</sup>Wesch  
<sup>۴</sup>Jaumann

<sup>۱</sup> Radar Cross Section  
<sup>۲</sup> Radar Absorption Material

**۲. مواد، دستگاه‌ها و روش‌ها****۲-۱. مواد و دستگاه‌ها**

آنیلین، دودسیل سولفات سدیم، هگزانویک اسید، آمونیوم پر سولفات، کلرید آهن (II) ۴ آبه، کلرید آهن (III) ۶ آبه، پارافین، همگی از شرکت مرک خریداری شد. نانو اکسید تیتانیم با اندازه ۴۰ nm از شرکت لیما پارس تهیه شد. دستگاه Network Analyser System hp 8510 c برای تولید امواج الکترومغناطیس در فرکانس ۲-۵۰ GHz به کار رفت. نمونه‌ها جهت آزمایش جذب امواج با دو قالب متفاوت از نظر ابعاد یعنی ۱۵۰×۱۰۰ و ۱۰×۱۰×۲۰ میلی‌متر تهیه شد.

**۲-۲. تهیه مواد جاذب رادار**

برای تهیه پلی آنیلین ابتدا ۴/۵ میلی‌لیتر آنیلین را به ۷۰ میلی‌لیتر از اسید کلریدریک ۲ مولار اضافه و در دمای ۲۵°C به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد. سپس ۴/۵۰ گرم از آمونیوم پر سولفات، در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل گردید. محلول سپس در مدت زمان ده دقیقه به آنیلین اضافه شد و سه ساعت محلول تهیه شده در دمای ۲۰°C نگهداشته شد. محلول حاصل صاف شده و با اسید کلریدریک و آب مقطر شستشو داده و به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای ۶۰°C خشک گردید و پودر سبز رنگ که نشانه تولید پلی آنیلین است حاصل شد [۱۵].

**۲-۳. سنتز نانوذرات Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**

در یک بالن سه دهانه مقدار ۶/۴۹ گرم از کلرید آهن (III) و ۳/۱۸ گرم از کلرید آهن (II) در ۴۷۰ میلی‌لیتر آب مقطر تحت گاز نیتروژن و هم‌زدن شدید حل شد (دهانه‌های بالن سه دهانه باید به‌گونه‌ای باید باشد تا از ورود اکسیژن به محلول جلوگیری گردد زیرا باعث اکسید شدن اکسید آهن (II) به اکسید آهن (III) می‌گردد). سپس ۳۰ میلی‌لیتر از محلول آمونیاک ۲۵٪ وزنی به آرامی به محلول اضافه شد و به مدت یک ساعت در حمام آب ۶۰°C تحت هم‌زدن شدید قرار گرفت. در پایان نانوذرات حاصله توسط یک آهنربا از محلول جدا شد و چندین بار با آب مقطر و اتانول شسته و سپس خشک شد [۱۶].

**۲-۴. تهیه نانو کامپوزیت پلی آنیلین / اکسید تیتانیم / اکسید آهن (III)**

۰/۰۱ مول هگزانویک اسید (۱/۴۴ گرم) با ۰/۰۱ مول مونومر آنیلین (۰/۹۳ گرم) در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی هم زده شد. ۰/۱۰ گرم نانو اکسید تیتانیم و ۰/۱۰ گرم نانو اکسید آهن (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) را داخل محلول (بعد از برداشتن همزن مغناطیسی) ریخته و تحت التراسونیک به مدت ۴ ساعت قرار گرفت. بعد از اولتراسونیک مقدار ۲/۲۸ گرم آمونیوم پر سولفات، در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل کرده و توسط بورت، طی ۲ ساعت به محلول اضافه و هم‌زمان هم زده شد. محلول حاصل ۲۴ ساعت در دمای صفر درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در نهایت محصول سه بار با آب مقطر و

سه بار با متانول شستشو داده شد. نمونه حاصل ۲ ساعت در آون و ۲۴ ساعت در دسیکاتور قرار داده شد.

**۲-۵. روش تهیه نمونه‌ها برای اندازه‌گیری جذب رادار**

نمونه با دو روش برای بررسی جذب امواج رادار تهیه شد، الف) به صورت مخلوط فیزیکی که در این روش بعد از آسیاب کردن مواد مختلف در هاون جهت یکنواختی ذرات، نمونه‌ها مخلوط شده و در نهایت سوسپانسیونی از پودرهای حاصل در پارافین تهیه می‌شود (ب) به صورت کامپوزیت که در این روش عمل پلیمریزاسیون آنیلین در حضور مخلوط یکنواختی از اکسید تیتانیم، اکسید آهن و مونومر آنیلین در حالتی که به شدت در حال هم خوردن هستند، انجام می‌شود و کامپوزیت دارای ساختار هسته-پوسته می‌باشد [۱۳].

**۲-۶. تهیه فیلم با بستر پارافین**

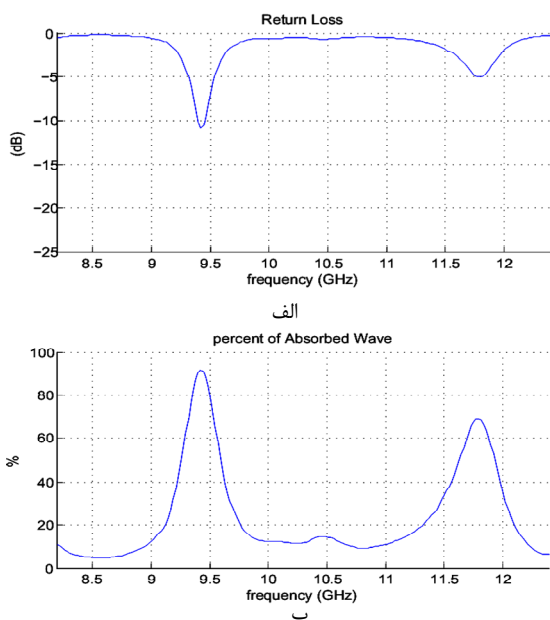
از پارافین به دلیل اینکه به راحتی در اثر گرما ذوب می‌شود و می‌توان به راحتی یک سوسپانسیون از نمونه آزمایشی تهیه کرد که پس از ریختن روی شیشه جامد می‌شود، برای ساخت قالب برای انجام سریع آزمون‌های اولیه استفاده شد.

الف) قالب ۱۰×۱۵۰ میلی‌متری: ابتدا مقدار ۲ گرم از مخلوط نمونه در هاون پودر می‌شود و از طرف دیگر ۱۸ گرم از پارافین جامد (برای فیلم ۱۰ درصد) بر روی هیتر در دمای ۹۰°C به صورت مایع تبدیل می‌گردد، سپس پودر نانو کامپوزیت به آن اضافه می‌شود بعد از مدت ۵ دقیقه هم خوردن در دمای ۹۰°C به سرعت بر روی شیشه ۱۰×۱۵۰ میلی‌متری ریخته می‌شود، برای یکنواخت شدن بهتر است شیشه نیز گرم شود و فیلم تهیه شده برای آزمایش جذب استفاده گردد. فیلم‌های تهیه شده با قالب‌های ۱۰×۱۵ سانتی‌متری به دلیل استفاده زیاد از مواد و عدم یکنواختی مناسب فقط برای آزمایش‌های اولیه مناسب است.

ب) قالب ۱۰×۱۱×۲۱ میلی‌متری: قالب ۱۰×۱۱×۲۱ میلی‌متر از جنس برنج تهیه شد و سپس نمونه را که به صورت پودر نرم تهیه شده بود، با پارافین مخلوط نموده و در ۹۰°C به مدت ۵ دقیقه حرارت داده شد و در مخلوط در حالت مذاب درون قالب ریخته و بعد از ۵ دقیقه از درون قالب برداشته می‌شد. لازم به ذکر است هر چند خود پارافین حالت روغنی دارد اما بهتر است قبل از ریختن مواد در درون قالب اطراف دهانه درونی قالب را با گریس آغشته نموده تا نمونه به راحتی از آن خارج گردد.

**۳. نتایج و بحث****۳-۱. خصوصیات نانو ذره مغناطیسی**

از روش SEM به صورت گسترده‌ای برای تعیین مورفولوژی، شکل و تخمین اندازه ذرات در ابعاد میکرو و نانو استفاده می‌شود. در شکل (۱) تصویر SEM مربوط به Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> نشان داده شده است. تصویر SEM مربوط نشان دهنده تشکیل نانوذرات مغناطیسی به نسبت



شکل ۳. الف) منحنی نمودار افت انعکاس توان موج برگشتی بر حسب فرکانس، ب) منحنی نمودار درصد جذب امواج میکروویو بر حسب فرکانس: مخلوط پلی آنیلین/اکسید آهن (III) و اکسید تیتانیوم با درصد وزنی ۴۰ و ضخامت ۷/۵ mm

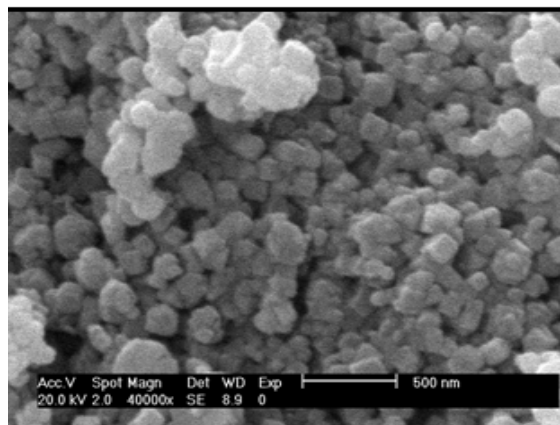
### ۳-۳. بررسی خصوصیات جذب راداری نانو کامپوزیت پلی آنیلین / اکسید تیتانیوم / اکسید آهن (III)

خصوصیت جذب راداری نمونه پارافینی نانو کامپوزیت پلی آنیلین / اکسید تیتانیوم / اکسید آهن در ناحیه ۸-۱۲GHz مورد بررسی قرار گرفت همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، این ترکیب، از بیشترین جذب در فرکانس ۹/۳GHz و بیشترین افت توان موج برگشتی در این فرکانس برابر ۱۷/۵dB - و همچنین از بیشینه جذب ۹۸/۲ درصدی برخوردار می‌باشد. افزایش اکسید تیتانیوم به نانو کامپوزیت باعث کاهش فرکانس جذب و افزایش افت توان برگشت نسبت به حالتی که فقط از نانو اکسید آهن و آنیلین استفاده شده (۱۴)، ناحیه جذب ۱۰/۴GHz و کاهش اتلاف موج ۱۵/۳ دسی‌بل) گردیده است.

### ۴-۳. تأثیر در صد و ضخامت نانو کامپوزیت پلی آنیلین، نانو اکسید تیتانیوم، اکسید آهن (III) بر جذب امواج رادار

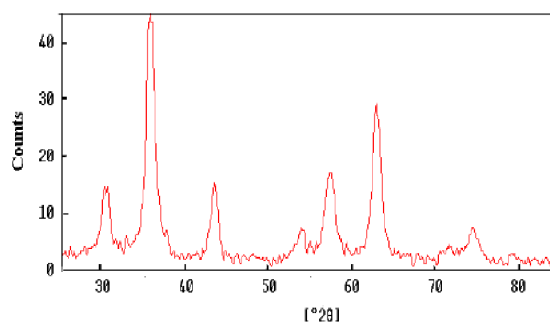
برای بررسی تأثیر ضخامت بر روی جذب، نمونه‌های ۱-۴ (جدول ۱) تهیه شد و نتایج نشان داد که افزایش ضخامت از ۴ به ۷/۵ میلی‌متر باعث افزایش جزئی در جذب می‌شود (۹۷/۹ به ۹۸/۲) اما این افزایش ضخامت باعث سنگینی گونه پوشش داده شده و مصرف تقریباً دو برابری ماده جاذب می‌شود. بنابراین از ضخامت ۴ و کمتر برای بررسی تأثیر ضخامت بر جذب امواج رادار استفاده شد. از آنجایی که هر ماده‌ای در فرکانس مورد نظر در ضخامت خاصی

مکعبی در سطح نانوذرات می‌باشد. از این تصویر می‌توان فهمید که نانوذرات از گستره توزیع به نسبت مناسبی برخوردارند. بر اساس تصویر به دست آمده متوسط اندازه ذرات برای نانو ذره  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  حدود ۴۷ nm تخمین زده می‌شود.



شکل ۱. تصویر SEM مربوط به نانو  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

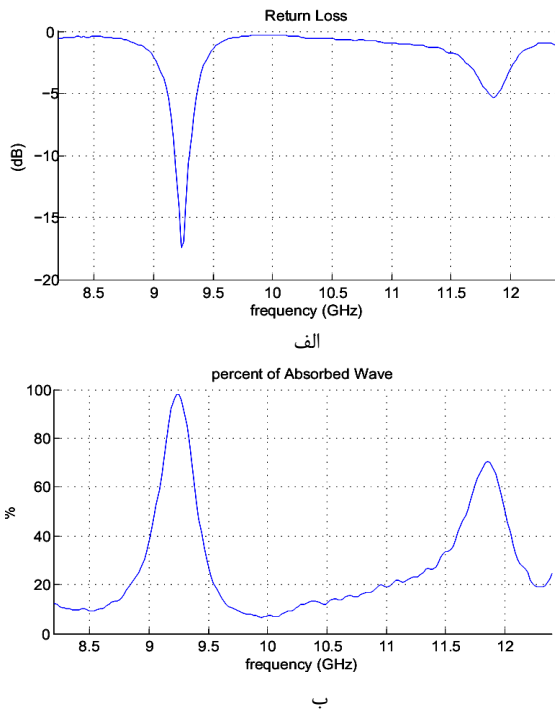
با استفاده از روش XRD ساختار بلوری نانوذرات مغناطیسی تعیین شد. شکل (۲) الگوی پراش نانو ذره سنتز شده را نشان می‌دهد که کاملاً بر الگوی ساختار بلوری مگنتیت خالص منطبق می‌باشد (بر اساس کارت دستگاه XRD، JCPDS No. 07-0322). همچنین الگوی XRD نشان دهنده مکعبی برای نمونه سنتز شده می‌باشد. به علاوه هیچ پیک ناخالصی مشاهده نمی‌شود. اندازه ذرات بر اساس معادله شرر ۳۰ nm تخمین زده شد.



شکل ۲. الگوی پراش XRD برای  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

### ۲-۳. بررسی خصوصیات جذب راداری مخلوط پلی آنیلین، اکسید تیتانیوم، اکسید آهن (III)

خصوصیات جذب راداری قالب پارافینی تهیه شده در ناحیه ۸-۱۲ GHz مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که از شکل (۳) می‌توان استنباط نمود، بیشترین جذب در فرکانس ۹/۴GHz و بیشترین افت توان موج برگشتی در این فرکانس برابر ۱۱dB - و همچنین بیشترین جذب ۹۱/۸ درصد می‌باشد.



شکل ۴. الف) منحنی نمودار افت انعکاس توان موج برگشتی بر حسب فرکانس، ب) منحنی نمودار درصد جذب امواج میکروویو بر حسب فرکانس، نانو کامپوزیت پلی آنیلین/اکسید اکسید آهن (III)، اکسید تیتانیم با درصد وزنی ۴۰ و ضخامت ۷/۵mm

بیشترین میزان جذب را ارائه می‌دهد، بنابراین محاسبه و پیش‌بینی ضخامت لازم برای نمونه‌های مختلف قبل از شروع آزمایش می‌تواند به دستیابی نمونه بهینه منجر گردد. زمانی که تراوایی  $(\mu_r)$  و گذردهی  $(\epsilon_r)$  کامپوزیت برابر باشند، جذب صد در صد بوده و هیچ انعکاسی نخواهیم داشت [۱۵]. وقت که  $|\mu_r| > |\epsilon_r|$  باشد بیشترین میزان افت انعکاس در ضخامت  $(d)$  نصف طول موج اتفاق می‌افتد. اما زمانی که  $|\mu_r| < |\epsilon_r|$  می‌باشد بیشترین میزان جذب در ضخامت یک چهارم طول موج مورد نظر اتفاق می‌افتد. معمولاً فریت‌ها چنین خصوصیتی دارند. طول موج در ماده  $(\lambda)$  به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{(|\mu_r| \times |\epsilon_r|)^{1/2}} \quad (1)$$

$$|\mu_r| > |\epsilon_r| \rightarrow d = 0.5\lambda = 0.5 \frac{\lambda_0}{(|\mu_r| \times |\epsilon_r|)^{1/2}} \quad (2)$$

که در آنها طول موج در هوا می‌باشد [۱۷].

به طور کلی بهترین ضخامت برای یک ماده جاذب رادار مضرری از  $\lambda/4$  می‌باشد (رابطه ۲) که با توجه به جدول (۱) بهترین نمونه‌ها ردیف ۲، ۵ و ۸ می‌باشد که همگی دارای ضخامت ۴ میلی‌متر است. از طرف دیگر، همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است بهترین درصد در این نانو کامپوزیت ۱۰ درصد است، هر چند این درصد از نانو کامپوزیت دارای پهنای باند کم است، اما مقدار اتلاف موج آن به میزان ۳۳/۳ دسی‌بل می‌باشد که دارای اتلاف موج بسیار بالا است.

جدول ۱. تأثیر درصد و ضخامت کامپوزیت پارافین، پلی آنیلین، نانو اکسید آهن (III)، نانو اکسید تیتانیم بر جذب امواج رادار

نوع ماده	درصد کامپوزیت در پارافین	ردیف	ضخامت نمونه (mm)	میزان اتلاف به صورت کیفی	بهترین پهنای باند	بهترین فرکانس اتلاف	بیشترین میزان اتلاف بر حسب دسی بل	بیشترین درصد جذب
پارافین و پلی آنیلین نانو $Fe_3O_4$ و نانو $TiO_2$	۴۰٪	۱	۷/۵	خوب	۹-۹/۵	۹/۲	۱۷/۵	۹۸/۲
		۲	۴	خوب	۸-۱۰	۹/۶	۱۶/۸	۹۷/۹
		۳	۲	کم	۹/۵-۱۰	۹/۷	۴/۷	۶۶/۸
		۴	۱	بسیار کم	-	-	-	-
	۲۰٪	۵	۴	خوب	۹/۳-۹/۶	۹/۵	۲۶/۰	۹۹/۷
		۶	۲	بسیار کم	-	-	-	-
		۷	۱	بسیار کم	-	-	-	-
		۱۰٪	۸	۴	بسیار خوب	۹/۳-۹/۶	۹/۵	۳۳/۳
	۹		۲	کم	۹/۳-۹/۶	۹/۴	۹/۵	۸۸/۸
	۱۰		۱	بسیار کم	-	-	-	-
	۵٪		۱۱	۴	بسیار کم	-	-	-
		۱۲	۲	بسیار کم	-	-	-	-

## ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به تجربیات به دست آمده در تولید مواد جاذب مشخص شده است که تنها با استفاده از مواد دی الکتریک (نانو اکسید تیتانیم) یا مغناطیس (اکسید آهن) نمی‌توان به خواص جذب خوبی دست یافت. در نتیجه طراحی ترکیب مواد با ساختارهای متفاوت جهت به دست آوردن خواص جذب موج الکترومغناطیس بهینه ضروری است. این طراحی می‌تواند شامل ترکیبی از مواد دی الکتریک، مواد مغناطیس و یک بستر پلیمری باشد. نتایج و بررسی‌های به عمل آمده در این تحقیق بیانگر این است که با استفاده از پلیمر رسانای آنیلین، نانو اکسید آهن و نانو اکسید تیتانیم می‌توان کامپوزیت‌های پلیمری با خاصیت مغناطیسی و دی الکتریک مناسب تهیه کرد. نانوذرات مغناطیسی پایداری محیطی کمی دارند و به تنهایی قابلیت استفاده به عنوان جاذب امواج میکروویو را ندارند، بنابراین نیاز به نگهدارنده پلیمری داشته که پلیمر آنیلین به علت داشتن خاصیت رسانایی مناسب، قابلیت جذب موج، تهیه ساده و قیمت مناسب بهترین گزینه می‌باشد. استفاده از کامپوزیت پلی آنیلین در مقایسه با روش مخلوط کردن باعث توزیع یکنواخت‌تر ذرات تشکیل دهنده کامپوزیت و در نهایت جذب بیشتر در نمونه شد. نانو کامپوزیت سنتز شده به عنوان جاذب امواج و ضد رادار عمل می‌کند. ضخامت و درصد مواد تشکیل دهنده ماده جاذب نقش کلیدی در جذب دارند و بهترین ضخامت ۴ mm و بهترین درصد در این نانو کامپوزیت ۱۰ درصد است که دارای اتلاف موج ۳۳/۳ دسی‌بل می‌باشد.

## ۵. مراجع

- [4] Wu, A.; Yang, X.; Yang, H. "Magnetic Properties of Carbon Coated Fe, Co and Ni Nanoparticles"; J. Alloy. Compd. 2012 513, 193-201.
- [5] Lee, S. M. "International Encyclopedia of Composites"; New York: VCH Publishers, 1991.
- [6] Kasevich, R. S.; Broderick, F. "Broadband Electromagnetic Energy Absorber"; US Patent 5,223,849, 1993.
- [7] 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.
- [8] Van Der Plas, G.; Barel, A.; Schweicher, E. "Antennas and Propagation"; IEEE Trans. 1989, 37, 1327-1332.
- [9] Gaylor, K. "Radar Absorbing Materials Mechanisms and Materials"; DSTO Materials Research Laboratory, 1989.
- [10] Jaggard, D. L.; Engheta, N. "Chirosorb™ as an Invisible Medium"; Elect. Lett. 1989, 25, 173-174.
- [11] Chakravarty, S.; Mitra, R.; Williams, N. R. "Microwave Theory and Techniques"; IEEE Trans. Antennas Propag., 2001, 49, 1050-1056.
- [12] Wei, J.; Liu, J.; Li, S. "Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Magnetic Films Plated on Hollow Glass Spheres"; J. Magn. Magn. Mater. 2007, 312, 414-417.
- [13] Chen, Y. J.; Gao, P.; Zhu CL, Wang, R. X, Wang, L. "Synthesis, Magnetic and Electromagnetic Wave Absorption Properties of Porous Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Fe/SiO<sub>2</sub> Core/Shell Nanorods"; J. Appl. Phys. 2009, 106, 054303-4.
- [14] Hosseini, H.; Mohseni, S.; Asadnia, A.; Kerdari, H. "Synthesis and Microwave Absorbing Properties of Polyaniline/MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposite"; J. Alloy Compd. 2011, 509, 4682-4687.
- [15] Ingwei, L.; Gengchao, W.; Xiaoxuan, L.; Dongming, L. "Surface Properties of Polyaniline /Nano- TiO<sub>2</sub> Composites"; Appl. Surf. Sci. 2004, 229, 395-401.
- [16] Li, Y. S.; Church, J. S.; Woodhead, A. L.; Moussa, F. "Preparation and Characterization of Silica Coated Iron Oxide Magnetic Nano-Particles"; Spectrochimica Acta A 2010, 76, 484-489.
- [17] Bueno, A. R.; Gregori, M. L.; Maria C. S. "Microwave-Absorbing Properties of Ni 0.50- x Zn 0.50- x Me<sub>2</sub> x Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Me=Cu, Mn, Mg) Ferrite-wax Composite in X-Band Frequencies"; J. Magn. Magn. Mater. 2008, 320, 864-870.
- [1] Jenn, D. C. "Radar and Laser Cross Section Engineering"; Washington: American Inst. of Aeronautics, 1995.
- [2] Emerson, W. H. "Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers through the Years"; IEEE Trans. Antennas Propag, 1973, 21, 484-487.
- [3] Phang, S. K.; Tadokoro, M.; Watanabe, J.; Kuramoto, N. "Synthesis, Characterization and Microwave Sorption Property of Doped Polyaniline Nanocomposites Containing TiO<sub>2</sub> Nanoparticles and Carbon Nanotubes"; Synth. Met. 2008, 158, 251-258.