

سنتز نانو ذرات گرافن اکساید با بستر اپوکسی با رویکرد کاهش RCS و افزایش مقاومت حرارتی پهپادها

مهدی اصلی نژاد*^۱، علیرضا ملکی جوان^۱، مسعود حسین زاده^۲

۱- دانشکده مهندسی جنگ الکترونیک-دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

۲- مرکز تحقیقات آجا، مدرس دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶)

چکیده

نانو کامپوزیت های پلیمری از استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی، رسانایی الکتریکی و مقاومت شیمیایی بالایی برخوردار هستند. در این مقاله نانو ذرات اکسید گرافن با استفاده از روش هامرز اصلاح شده سنتز شده و سپس برای بهبود خصوصیات حرارتی پوشش اپوکسی، جلوگیری از تجمع نانو ذرات و توزیع مناسب آنها در سطح اپوکسی، به وسیله تری اتوکسی سیلان (۳-آمینوپروپیل) (APTES) عامل دار شده اند. نوآوری این مقاله، سنتز نانو ذرات اکسید گرافن در بستر رزین اپوکسی می باشد که علاوه بر بررسی خاصیت جذب امواج مایکروویو می تواند مقاومت حرارتی را نیز افزایش دهد. نتایج تجزیه و تحلیل حرارتی نیز نشان می دهد که باقیمانده مواد در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد به ترتیب برای اکسید گرافن، GO و اپوکسی به ترتیب ۳/۷، ۶۲/۴ و ۸/۲۱ درصد است. با توجه به اینکه ضخامت نمونه افزایش یافته است، زمانی که از نانو ذرات اکسید گرافن با ۱۰ درصد وزنی استفاده می شود، تلفات در فرکانس ۹/۵ گیگاهرتز به بیشترین مقدار خود یعنی ۵۷ dB می رسد. بر همین اساس چون در این آنالیز مقدار تلفات زیاد بوده است، گزینه مناسبی برای قرار دادن پوشش بر روی یک پهپاد می باشد. نتایج حاصل از مدل سازی پهپاد، نشان می دهد که پوشش های حاوی نانو ذرات اکسید گرافن در بالاترین درصد وزنی (۱۰ درصد وزنی)، می تواند باعث کاهش سطح مقطع راداری شده از ۱۵ dB تا ۲۵ dB- شود.

واژه های کلیدی: کاهش سطح مقطع راداری، گرافن اکساید، امواج الکترومغناطیسی، رزین اپوکسی

Synthesis of epoxy substrate graphene oxide nanoparticles with the approach of reducing RCS and increasing the thermal resistance of UAVs

Mehdi Aslinezhad*, Alireza Malekijavan and Masoud hoseinzadeh

Abstract

Polymer nanocomposites have high strength, low weight, thermal stability, electrical conductivity, and high chemical resistance. In this paper, graphene oxide nanoparticles are synthesized using the modified Hammers method and then to improve the thermal properties of the epoxy coating, prevent the accumulation of nanoparticles, and their proper distribution on the epoxy surface by triethoxysilane (3-aminopropyl) (APTES) have become functional. The innovation of this paper is the synthesis of graphene oxide nanoparticles in an epoxy resin substrate which, in addition to investigating the microwave absorption properties, can also increase the thermal resistance. The results of the thermal analysis also show that the residual materials at 500 °C for graphene oxide, GO and epoxy are 3.7, 62.4, and 8.21 percent, respectively. Due to the fact that the thickness of the sample has increased, when graphene oxide nanoparticles with 10% by weight are used, the losses at the frequency of 9.5 GHz reach their maximum value - 57 dB. Accordingly, because the number of casualties in this analysis was high, it is a good option to put the cover on a drone. The results of UAV modeling show that coatings containing graphene oxide nanoparticles at the highest wattage (10 wt%) can reduce the radar cross-section from -15 to -25 dB.

Key words: Reduce radar cross section, Graphene oxide, Electromagnetic waves, Epoxy resin

مقدمه

پوشش های جذب امواج الکترومغناطیسی می توانند به طور موثر تشعشعات الکترومغناطیسی را به حداقل برسانند و این پوشش های جاذب امواج الکترومغناطیس، لازم است همزمان جذب مؤلفه میدان مغناطیسی و الکتریکی را به صورت اتلاف داشته باشند [۱]. فناوری جذب امواج الکترومغناطیسی یک فناوری مدرن مهم برای کاربردهای نظامی و غیرنظامی مانند سیستم های دفاع رادارگریز، اتاق های تاریک مایکروویو، و حفاظت از استنتاج مایکروویو است. تابش الکترومغناطیسی تجهیزات الکترونیکی یا کاهش انعکاس الکترومغناطیسی از سطوح فلزی مانند کشتی ها، مخازن و هواپیماها جذب امواج الکترومغناطیسی برای استفاده از پلیمرهای رسانای ذاتی یا افزودن پرکننده های مغناطیسی یا دی الکتریک در ماتریس پلیمری است [۲]. گرافن ها دسته ای از مواد هستند که در پوشش های کامپوزیتی جاذب امواج الکترومغناطیس به کار می روند [۳]. این مواد اتلاف مناسبی برای مؤلفه مغناطیسی از خود نشان می دهند. از سوی دیگر به منظور اتلاف مؤلفه الکتریکی، از ترکیبات بر پایه کربن در این پوشش های کامپوزیتی استفاده می شود [۴]. به منظور ایجاد هدایت الکتریکی در کامپوزیت های جاذب امواج مایکروویو از موادی مانند ساختارهای کربن (گرافن، اکسید گرافن، دوده، گرافیت و...) و پلیمرهای هادی مانند پلی آنیلین استفاده می شود. نانو ساختارهای کربنی، به دلیل سطح مقطع بالا، باعث افزایش در میزان جذب امواج الکترومغناطیسی می شوند. نانو ساختارهای اکسید گرافن به دلیل خواصی از قبیل پایداری دمایی و محیطی خوب و خواص دی الکتریکی، ساختار مناسبی برای استفاده در نانو کامپوزیت های جاذب امواج مایکروویو می باشند [۵].

اپوکسی، یکی از مهم ترین پلیمرهای گرمازا، به دلیل عملکرد چسبندگی عالی و کم هزینه بودن به عنوان یک روکش و پس زمینه استفاده شده است [۶]. استفاده از رزین های اپوکسی در کاربردهای حرارتی به دلیل مقاومت و پایداری کم در دمای بالا بسیار محدود می باشد. خصوصیات حرارتی رزین های اپوکسی معمولاً با استفاده از مواد مقاوم در برابر شعله، اصلاح ساختار معدنی و همچنین پرکننده هایی مبتنی بر نانو ذرات بهبود می یابد [۷ و ۸].

ترکیبات حاوی بور یا فسفر و همچنین اصلاح کننده های ساختاری سیلان معمولاً برای بهبود رفتار بازدارنده شعله و پایداری حرارتی رزین های اپوکسی استفاده می شوند. علاوه بر این، ادغام پرکننده های مبتنی بر کربن از گرافن و نانولوله های کربنی (CNT) برای بهبود خواص حرارتی رزین های اپوکسی گزارش شده است [۹]. ساختارهای ترکیبی آلی-معدنی تشکیل شده از رزین اپوکسی، اصلاح کننده های سیلان، و پرکننده های مبتنی بر کربن برای غلبه بر پایداری حرارتی پایین و رفتار مقاوم در برابر شعله ماتریس رزین گزارش شده است [۱۰]. جدیدترین کارها در استفاده از گرافن در ماتریس اپوکسی بر اصلاح شیمیایی گرافن با گروه های عاملی آمین، اپوکسید و عوامل تشکیل دهنده شبکه هیبریدی تمرکز دارد. عامل دار شدن گرافن با گروه های عاملی آمین و اپوکسید منجر به عوامل تشکیل دهنده کامپوزیت می شود که می توانند به ترتیب به عنوان عوامل پخت و پیش ساز رزین نیز عمل کنند [۱۱]. کامپوزیت های اکسید گرافن (GO)^۱ از جمله موادی هستند که حاوی کربن بوده و با عملکرد عالی آن ها، مدول و استحکام کششی بالایی دارند [۱۲]. این نانو ذرات همچنین امواج الکتریکی و الکترومغناطیسی را نیز جذب می کنند [۱۳]. مواد جاذب راداری به دلیل کاربردهای نظامی و غیرنظامی مورد توجه قرار گرفته است [۱۴].

عملکرد اپوکسی در نانولایه های گرافن توسط مواد شیمیایی مختلف حاوی اپوکسید و استفاده از آن در ماتریس اپوکسی به عنوان تقویت کننده و عوامل پیش ساز رزین، بارها گزارش شده است [۱۵]. آمین سازی نانولایه های گرافن برای تولید مواد تقویت کننده و همچنین عامل پخت نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۶].

کامپوزیت ها با افزودن محتوای کم گرافن عامل دار شده با آمین، پیشرفت های مکانیکی قابل توجهی را نشان دادند. لی و همکارانش از گرافن اصلاح شده توسط یک عامل جفت کننده سیلان حاوی آمین (APTES) استفاده کردند و مشاهده کردند که افزودن ۰.۲ درصد وزنی GO با عامل آمینه باعث افزایش ۳۲ درصدی مدول یانگ و افزایش ۱۶ درصدی در استحکام کششی می شود. وانگ و همکارانش همچنین از GO اصلاح شده با APTES برای تقویت رزین اپوکسی استفاده کردند و

^۱ Graphene oxide

ها برای کاربردهایی به عنوان مواد جذب امواج الکترومغناطیسی در دماهای بالا بسیار سودمند است [۲۱]. رن^۳ و همکاران، برای اولین بار سنتز موفقیت‌آمیز نانو کامپوزیت‌های چهار جزئی شامل گرافن، نانو ذرات هسته و پوسته $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}$ و نانو ذرات اکسید روی^۴ را مورد بررسی قرار دادند. میکروسکوپ الکترونی اندازه‌گیری انتقال، نشان داد که قطر نانو ذرات هسته / پوسته $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}$ حدود ۱۸ نانومتر، ضخامت پوسته Fe_3O_4 حدود ۵ نانومتر و قطر نانو ذرات ZnO در بازه ۱۰-۲ نانومتر است. پارامترهای الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شده در فرکانس ۷/۳ گیگاهرتز اتلافی برابر با ۲۰ dB- را نشان می‌دهد [۲۲]. ژانگ و همکاران^۵ همچنین نانو کامپوزیت‌ها را با پرکننده‌های اکسید گرافن، فریت منیزیم و پلی وینیلیدن فلوراید سنتز کردند. در این مطالعه، ترکیبات با اجزاء فریت منیزیم / واکس، اکسید گرافن / منیزیم فریت / واکس و اکسید گرافن / فریت منیزیم / پلی وینیلیدن فلوراید ساخته شده و مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب گرافن اکسید، فریت منیزیم و پلی وینیلیدن فلوراید حاوی ۵٪ وزنی هر پرکننده، بهترین میزان جذب را دارد و در فرکانس ۹/۲ گیگاهرتز، اتلافی معادل ۲۹- دسی‌بل دارد [۲۳]. یوسفی و همکاران^۶ یک نانو کامپوزیت حاوی اکسید گرافن تک لایه در بستر رزین اپوکسی را بررسی کرده بود. این نمونه با وزن ۳٪ اکسید گرافن در برآوردها، اختلاف ۳۸- دسی‌بل را نشان داد. همچنین میزان جذب حدود ۹۹/۹٪ را برای امواج نشان می‌دهد [۲۴]. ورما و همکاران^۷ نانو ذرات هگزا فلوراید باریم با ابعاد ۲۰-۳۰ نانومتر سنتز کردند. نانو ذرات هگزا فریت باریم با اکسید گرافن به مدت ۴ ساعت در ۴۰۰ دور در دقیقه با هم مخلوط شدند، ذرات هگزا فریت باریم بر روی سطح اکسید گرافن تثبیت شدند. نانو کامپوزیت به ضخامت ۳ میلی‌متر را سنتز و مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه میزان جذب با ۳۲ دسی‌بل کاهش نیز در حدود ۹۹/۹ درصد نشان داده شده است [۲۵]. هدف اصلی این کار بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با اکسید گرافن

دریافتند که پایداری حرارتی رزین پخت به طور قابل توجهی افزایش یافته است [۱۶].

یو و همکارانش از گرافن اصلاح شده توسط سیلیسکوبوکسان های الیگومری چند وجهی اکتامینوفیل استفاده کردند و دریافتند که خواص حرارتی رزین پخت به طور قابل توجهی افزایش یافته است [۱۷].

به نظر می‌رسد که استفاده از یک سیستم پخت با عملکردهای آمین بیشتر منجر به درجه بیشتری از چگالی شبکه می‌شود. اوکازاکی و همکارانش از سیلیس اصلاح شده با دندریمر پلی (آمیدوآمین) پرشاخه (PAMAM) به عنوان یک عامل پخت رزین اپوکسی استفاده کردند. آنها نشان دادند که رفتار مقاوم در برابر حرارت محصول با استفاده از سیلیس اصلاح شده با دندریمر نسبت به اتیلن دی آمین برتر است. دندریمر PAMAM معمولاً با تکرار دو فرآیند اضافه کردن استرهای اکرلیک مایکل به گروه‌های آمینه به عنوان هسته آغازگر و آمیداسیون بخش‌های استری حاصل با یک آلکیل دی آمین سنتز می‌شود. [۱۸ و ۱۹].

به‌طور عمده از دو نوع ماده، یعنی مواد دی‌الکتریک و مواد مغناطیسی به عنوان جاذب امواج مایکروویو استفاده می‌شود. به صورتی که، ویژگی‌های جذب مایکروویو یک ماده به خواص دی‌الکتریک آن (ضریب گذردهی الکتریکی (ε))، خواص مغناطیسی (ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ))، ضخامت و دامنه فرکانس بستگی دارد. مارکانو و همکاران^۲ مطالعه را در مورد روش هامرز متفاوت، روش هامرز اصلاح شده و روش هامرز بهبود یافته بدون NaNO_3 تکمیل کردند. همانطور که می‌دانیم، اکسیداسیون با استفاده از NaNO_3 گازهای سمی منتشر می‌کند. بنابراین، روش بهبود یافته هامرز جایگزین استفاده از NaNO_3 با H_2SO_4 ، H_3PO_4 و دو برابر مقدار KMnO_4 شد [۲۰]. این نمونه‌ها به دلیل اثر مکمل الکترومغناطیسی، عملکرد جذب امواج الکترومغناطیسی خوبی را نشان دادند. این نمونه‌ها دارای خواص جذب امواج الکترومغناطیسی بسیار بهتری نسبت به گرافن عامل‌دار شده تهیه شده به طور جداگانه با rGO هستند، که نشان دهنده نقش حیاتی روش مصنوعی در تعیین خواص محصول است. همچنین این نمونه‌ها عملکرد بسیار بهتری نسبت به جاذب های تجاری دارند. مهمتر از همه، پایداری زیاد این کامپوزیت

^۳ Ren et al

^۴ ZnO

^۵ Zhang et al

^۶ Yousefi et al

^۷ Verma et al

^۲ Marcano et al

نوآوری این مقاله، سنتز نانو کامپوزیتی بر پایه رزین اپوکسی با پرکننده‌های اکسید گرافن یا نانو ساختارهای گرافنی می باشد که سنتز نانو کامپوزیت، بر پایه گرافن دندریمردار شده بوده که جذب امواج الکترومغناطیسی را نسبت به گرافن عاملدار شده بیشتر افزایش می دهد و کاربرد آن تر از مواد قابل استفاده همچون فرامواد ضریب شکستی می باشد [۲۸]. به همین منظور آنالیزهایی های در گستره فرکانسی ۴-۱۲ گیگاهرتز مورد بررسی قرار می گیرد و شبیه سازی این ماده بر روی یک پهنای باند توسط نرم افزار CST، انجام شده است.

تهیه گرافن اکسید (GO) از طریق اکسیداسیون گرافیت

برای تهیه اکسیداسیون گرافیت از روش هارمز اصلاح شده استفاده می شود [۲۹]. گرافیت اکسید شده با استفاده از سانتریفیوژ و شست و شوی محصول با هیدروکلرید (۱۰٪ حجمی) و شست و شوی مکرر آن با آب مقطر بدست آمد. جهت ایجاد ورقه های اکسید گرافن، محصول درون ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر ریخته شده و به مدت ۲ ساعت تحت امواج فراصوت قرار گرفته و سپس محصول سانتریفیوژ گردیده و در دمای اتاق خشک شد.

تهیه گرافن اکساید دندریمردار^۸ شده

برای تهیه پلی آمید و آمین (PAMAM) دندریمر گرافت^۹ شده با گرافن (GD) به وسیله روش واگرا با واکنش متوالی مایکل ادیشن^{۱۰} و واکنش آمیداسیون با استفاده از یک هسته GoNH₂ تهیه شده است. گرافن اکساید آمین دار شده (۵/۰ گرم) درون ۳۰ میلی لیتر متانول توزیع گردیده و عملیات الکتروسونیک سوزنی به مدت ۳۰ دقیقه انجام می شود و سپس ۷ روز در دمای محیط بر روی استریلر ترکیب شده و سپس ماده، درون راکتور قرار گرفته و بعد از افزودن گاز نیتروژن ۱/۶ میلی لیتر متیل اکریلات درون ۵ میلی لیتر متانول درون حمام یخ قرار داده شده و به مدت سه روز (در دمای اتاق تاریک) ترکیب می شود. در نهایت محصول را در ۱۰۰ میلی لیتر اتانول شست و شو داده و در حلال n-هگزان (۴۰۰ میلی لیتر) رسوب داده می شود و سپس رسوب، در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت در آن خلأ قرار گرفته خواهد شد. برای به دست آوردن دندریمر پیوند شده با گرافن، گرافن اکساید متیل

است. اصلاح سطح توسط ۳ آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان (APTS) با روش محلول آبی انجام شد. اکسید گرافن اصلاح شده سطحی با فرآیند فراصوت در ماتریس اپوکسی مخلوط شد و کامپوزیت ها با روش قالب گیری فشرده سازی تهیه شدند. سه فرمت مختلف: گرافن (G)، اکسید گرافن (GO)، و اکسید گرافن (APTS-GO) به ترتیب در یک ماتریس اپوکسی برای تشکیل کامپوزیت ها گنجانده شدند. آزمایش های کششی و ضربه ای نشان می دهند که کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با اکسید گرافن اصلاح شده نتایج بهتری نسبت به کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با اکسید گرافن اصلاح نشده می دهند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که پراکندگی اکسید گرافن اصلاح شده با سطح روی ماتریس اپوکسی در فراصوت با فرکانس بالا بهتر از اکسید گرافن اصلاح نشده روی سیستم اپوکسی است. نتایج نشان می دهد که ساختار جدید می تواند به پهنای باند گسترده تر، باندهای عملیاتی متعدد دست یابد. افزایش پهنای باند تا ۸ برابر معمولی است. علاوه بر این، جاذب های گزارش شده قابلیت عملکرد با قطبش های مختلف را دارند [۲۶].

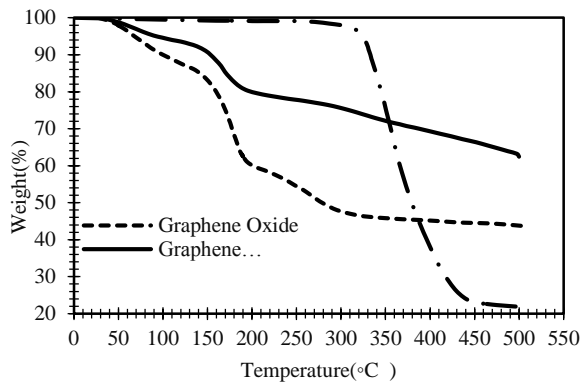
جاذب امواج الکترومغناطیسی نقش مهمی در فناوری رادار مورد استفاده برای کاربردهای نظامی و غیرنظامی دارد. فناوری های جاذب امواج الکترومغناطیسی زیادی در فناوری رادار فعلی مورد استفاده قرار می گیرند که یکی از آنها جاذب مبتنی بر فراماده است. در این مقاله، طراحی فراماده میکرو نواری برای جاذب رادار باند C مورد بحث قرار خواهد گرفت. جاذب های فرامواد در محدوده باند بر روی مواد میکرو نواری با ضخامت ۴/۸ میلی متر و ثابت دی الکتریک ۲/۱۷ طراحی شده اند. چندین تکنیک را می توان برای گسترش فرکانس کاری اجرا کرد که عبارتند از افزایش ضخامت بستر، کاهش ثابت دی الکتریک و اصلاح وصله. در این کار از روش شبیه سازی برای بهینه سازی طراحی و دستیابی به جذب موج الکترومغناطیسی خوب در فرکانس کاری باند C استفاده شده است. نتایج شبیه سازی شده نشان می دهد که طراحی فراماده میکرواستریپ دارای جذب پهنای باند کمتر از ۱۰- دسی بل است که از ۴/۳ گیگاهرتز تا ۷/۱ گیگاهرتز متغیر است. بر اساس ویژگی ها، این طرح می تواند به عنوان جاذب رادار در فرکانس باند C تحقق یابد [۲۷].

^۸ Dendrimer

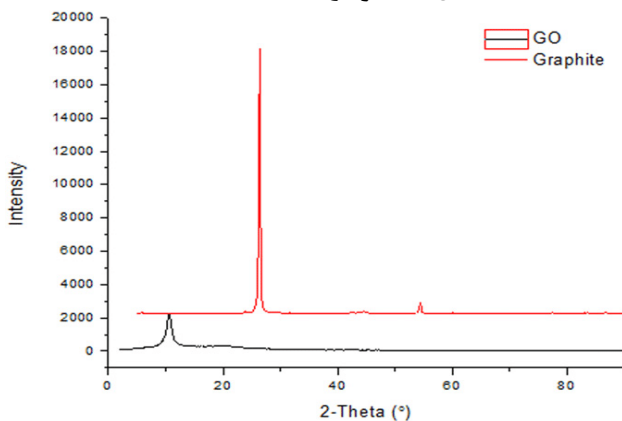
^۹ graft

^{۱۰} Micheal addition

کوچک‌تر از گرافیت هستند می‌توانند خواص بهتری را برای ماتریس فراهم نمایند.

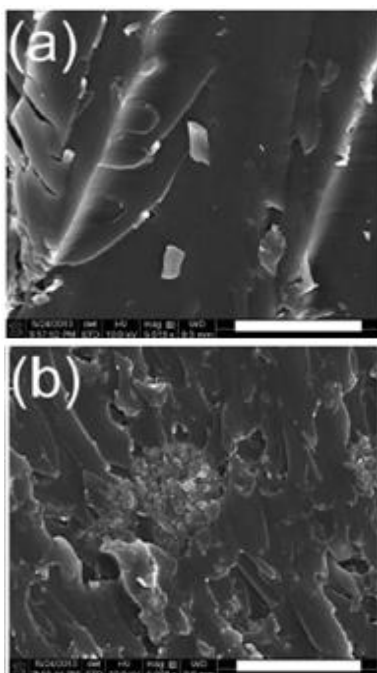


شکل ۲- نمودار TGA



شکل ۳- نمودار XRD برای گرافن اکساید و گرافیت

آنالیز FE-SEM



اکریلات (۰/۲ گرم) را در ۲۰ میلی‌لیتر متانول وارد کرده و عملیات التراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه انجام خواهد شد. محصول رزین اپوکسی و گرافن اکساید عاملدار و دندریمر شده در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی از (۱) رزین اپوکسی (۲) گرافن اکساید عاملدار شده (۳) گرافن اکساید دندریمر

تجزیه و تحلیل داده‌ها

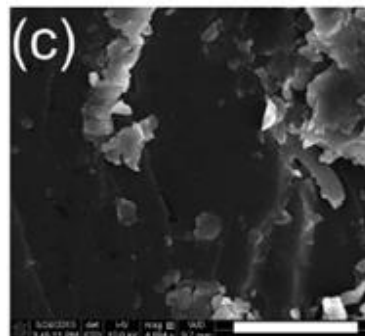
آنالیز TGA و XRD

نتایج تجزیه و تحلیل نمودار TGA^{۱۱} در شکل ۲ آورده شده است. به دلیل این که گرافن خالص از نظر مقاومت حرارتی پایدار است، در دمای ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، حدود ۴۳ درصد وزنی باقی می‌ماند. اما تخریب حرارتی گرافن اکساید در چند مرحله اتفاق می‌افتد به طوری که در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، از بین رفتن GO به دلیل از دست رفتن آب در ساختار آن است. در دمای ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، اکسیژن حساس بر روی سطح یا لبه GO تجزیه می‌شود و در دمای ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، اکسیژن با پایداری حرارتی بالا تجزیه می‌شود. سرانجام در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، گرافن اکساید با درصد وزنی ۴۱ درصد باقی می‌ماند. در مورد GO عامل‌دار شده و اپوکسی، روند تجزیه همانند GO است. همچنین نتایج TGA نشان داد که باقیمانده مواد در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای GO (APTES) و Epoxy به ترتیب ۴۳/۷، ۶۲/۴ و ۲۱/۸ درصد است. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل (۳) XRD^{۱۲}، نمودار قرمز رنگ بیانگر کامپوزیت گرافن اکساید و نمودار مشکی بیانگر گرافیت می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود به دلیل اینکه اندازه ذرات گرافن اکساید

^{۱۱}Thermo Gravimetric Analysis

^{۱۲}X-ray Diffraction

به دلیل بررسی اثرات پلاریزاسیون میدان الکتریکی، پلاریزاسیون بین سطحی و خواص دی الکتریکی مواد می‌باشد. قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی ϵ'' می‌باشد که بیانگر توانایی یک ماده برای از بین بردن انرژی از یک موج الکترومغناطیسی خارجی و تبدیل آن به گرما است که عمدتاً به دلیل وجود الکترون‌های آزاد در ماده رخ می‌دهد. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ($\mu'' = \mu' + j\mu''$) از کامپوزیت‌های گرافن اکساید با بستر اپوکسی در اینجا به دلیل ماهیت غیر مغناطیسی نانو ذرات گرافن و اپوکسی نشان داده نمی‌شود به همین دلیل مقدار $\mu' \sim 1$ و $\mu'' \sim 1$ در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ (الف) بخش واقعی ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ') برای کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی در دامنه فرکانس ۴ تا ۱۲ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی نانو ذرات گرافن در اپوکسی از ۲ تا ۱۰ درصد، ضریب گذردهی الکتریکی بخش واقعی از کامپوزیت‌ها به آرامی از $5/2$ تا $8/3$ در کل محدوده فرکانس اندازه‌گیری شده، افزایش می‌یابد. در این درصد وزنی متوسط فاصله بین ذرات در کامپوزیت‌ها به اندازه کافی بزرگ است، به طوری که ذرات با بار موضعی ناشی از پلاریزاسیون بین سطحی، توانایی واکنش با وجود فاصله طولانی را ندارند. برای نمونه نانو کامپوزیت ۱۰ درصد وزنی اعتقاد بر این است که افزایش سریع (ϵ') ناشی از اثر پلاریزاسیون بین سطحی، بین اپوکسی و ذرات گرافن اکساید می‌باشد. کاهش (ϵ'') از کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی با افزایش فرکانس ممکن است از تأخیر در بارهای ناشی از آن ماده ناشی شود تا الکترومغناطیسی معکوس را در دامنه فرکانس بالا دنبال کند. شکل (۵-ب) بخش موهومی از ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ'') برای کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی با درصد‌های وزنی مختلف از گرافن را نشان می‌دهد. بخش موهومی ضریب گذردهی الکتریکی برای نانو کامپوزیت‌های ۲ درصد وزنی، در کل دامنه فرکانس اندازه‌گیری شده است به دلیل شکل‌گیری یک شبکه با رسانایی پایین مقدار (ϵ'') پایین می‌باشد. نانو کامپوزیت‌هایی با ۱۰ درصد وزنی نیز مقدار ϵ'' نسبتاً کم بوده که علت آن هدایت الکتریکی پایین آن‌ها می‌باشد. علاوه بر این با افزایش درصد وزنی گرافن عامل‌دار شده، (ϵ'') از کامپوزیت افزایش چشمگیر در دامنه فرکانس اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. شکل (۵-ب) برای نمونه‌های کامپوزیت با ۱۰ درصد وزنی گرافن عامل‌دار شده افزایش



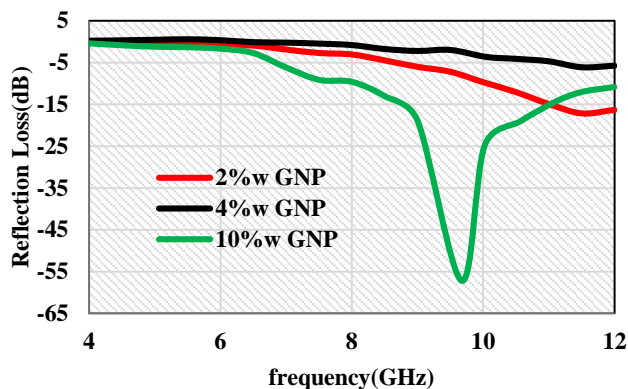
شکل ۴- تصاویر SEM - FE از کامپوزیت‌های

اپوکسی با بارگذاری GNP مختلف: (a) ۲ درصد وزنی (b) ۴ درصد وزنی (c) ۱۰ درصد وزنی در مقیاس ۱۰ میکرومتر

شکل (۴) مورفولوژی مقطعی کامپوزیت‌های GNP - اپوکسی با بارگذاری‌های مختلف GNP را نشان می‌دهد. برای نمونه کامپوزیت با ۲ درصد وزنی، GNP ها به طور تصادفی در ماتریس اپوکسی توزیع شده و صفحات گرافن خیلی ضعیف دیده می‌شوند و چون درصد وزنی کم است به صورت اتفاقی در بستر اپوکسی پخش شده اند. وقتی بارگذاری GNP به ۴ و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد، GNP ها توده‌های بزرگی با اندازه متوسط چند میکرون را تشکیل می‌دهند و به عبارت دیگر، کلوخه شدن ذرات گرافن اکساید، مشاهده می‌شود. همانطور که از اندازه‌گیری‌های دیگر به دست آمده، برای کامپوزیت‌های ۱۰ درصد وزنی GNP توده‌ها به خوبی توزیع شده و در مجاورت یکدیگر قرار دارند، و یک شبکه پیوسته^{۱۳} تشکیل داده‌اند و می‌توانند خواص مورد نیاز برای انجام آزمایش را فراهم کنند.

نتایج به دست آمده به منظور کاهش سطح مقطع راداری

در آنالیز بعدی کاهش سطح مقطع راداری برای یک صفحه با قطر ۴ میلی متر انجام شده است. نمودار مشکی، قرمز و سبز، به ترتیب برای اپوکسی حاوی ۴، ۲ و ۱۰ درصد وزنی گرافن اکساید دندریمر دار شده می‌باشد که در بازه فرکانس ۴-۱۲ گیگاهرتز بررسی شده است. جذب امواج میکروویو توسط کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی، با اندازه‌گیری ضریب گذردهی الکتریکی ($\epsilon'' = \epsilon' + j\epsilon''$) از نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی توانایی ذخیره انرژی الکترومغناطیسی خارجی، اندازه‌گیری قسمت واقعی ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ') در مواد انجام خواهد شد که این امر

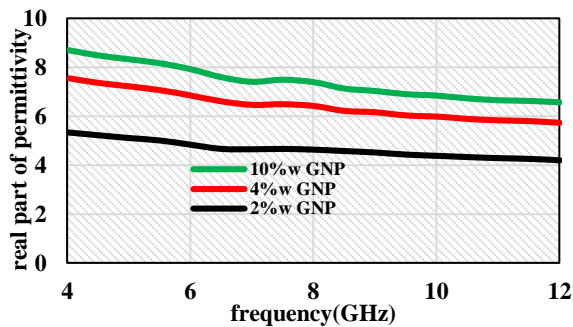


شکل ۶- اتلاف بازتاب امواج میکروویو توسط کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی با درصد وزنی‌های مختلف نانو ذرات گرافن اکساید (GNP) دندریمر در محدوده فرکانس ۴ تا ۱۲ گیگاهرتز شکل (۶) نمودار اتلاف بازتاب را در کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی با درصدهای وزنی مختلف گرافن اکساید را با ضخامت ۴ میلی متر نشان می‌دهد. اتلاف بازتاب از ۵- تا ۱۰- دسی بل در محدوده اندازه‌گیری برای کامپوزیت‌هایی کمتر از ۱۰ درصد وزنی است. برای کامپوزیت‌های خالص، از دست دادن انرژی امواج میکروویو به دی‌الکتریک آن‌ها نسبت داده می‌شود که هدایت الکتریکی بالای آن‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی نانو ذرات اکسید گرافن در اپوکسی، پلاریزاسیون سطحی بین اپوکسی و ذرات گرافن اکساید افزایش می‌یابد. به همین دلیل اثر متقابل موج الکترومغناطیسی خارجی با وجود اثر پلاریزاسیون بین سطحی باعث کاهش تابش امواج میکروویو می‌شود و جذب امواج میکروویو توسط کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی رخ می‌دهد. همچنین شکل ۶، اتلاف بازتاب‌های کامپوزیت گرافن-اپوکسی با بارگذاری نسبتاً زیاد گرافن عامل-دار شده و هدایت الکتریکی بیشتر بهبود یافته و حداقل بازده بازتاب را در دامنه فرکانس اندازه‌گیری شده از ۴ تا ۱۲ گیگاهرتز نشان می‌دهد. حداکثر تلفات بازتاب کامپوزیت‌های گرافن-اپوکسی با ۱۰٪ وزنی بازتاب ۵۷- دسی بل را در ۹/۶۷ گیگاهرتز فراهم می‌کند.

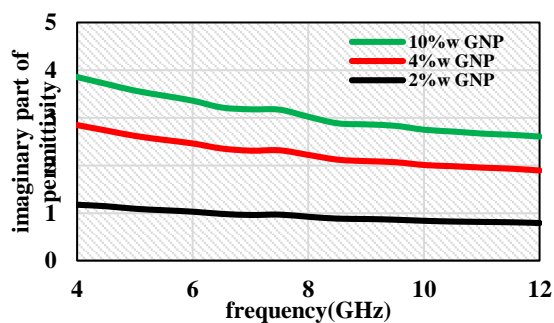
$$(dB) = 20 \log \left| \frac{\left(\sqrt{\frac{\mu^*}{\epsilon^*}} \tan h[d \times \gamma] - Z_0 \right)}{\left(\sqrt{\frac{\mu^*}{\epsilon^*}} \tan h[d \times \gamma] + Z_0 \right)} \right| \quad (1)$$

به طوری که Z_0 امپدانس ورودی مشخصه لایه جاذب است و \square ثابت انتشار الکترومغناطیسی می‌باشد که از رابطه $\gamma = \alpha + \beta j = \frac{j2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu^* \epsilon^*}$ و فاز هستند، λ طول موج میکروویو در فضای آزاد، μ^* نفوذپذیری

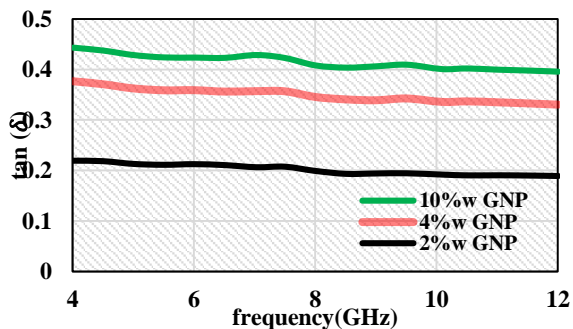
تدریجی (ϵ'') را نشان می‌دهد به طوری که (ϵ'') در فرکانس ۸ و ۹ گیگاهرتز به ترتیب حدود ۳ و ۲/۸۸ به دست می‌آید.



الف



ب



ج

شکل ۷- (الف) نمودار قسمت واقعی ضریب گذردهی الکتریکی ϵ' (ب) نمودار قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی ϵ'' (ج) نمودار تلفات از کامپوزیت‌های گرافن اپوکسی با درصدهای وزنی مختلف نانو ذرات گرافن اکساید (GNP) دندریمر از فرکانس ۴ تا ۱۲ گیگاهرتز

روش Mom مثلثی با تکه‌های مثلثی و توابع پایه RWG (Rao-Wilton-Glisson) حل می‌شوند. با توزیع جریان سازه می‌توان زمینه‌های پراکنده ساختار موردنظر را به دست آورد. از معادله EFIE در حوزه فرکانس استفاده می‌شود تا توضیح دهد که چگونه جریان سطح ناشی از تابش در یک ماده رسانا هنگام تابش موج صفحه الکترومغناطیسی توزیع می‌شود. از آنجاکه کل میدان الکتریکی مماس بر روی سطح رسانا باید صفر باشد، در نهایت معادله زیر به دست می‌آید [۱۹ و ۳۱].

$$(E^i(r) + E^s(r)) = 0, r \in S \quad (5)$$

E^i و E^s به ترتیب، میدان‌های الکتریکی تابشی و پراکنده هستند. میدان الکتریکی پراکنده E^s را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$E^s(r) = -j\omega A(r) - \nabla\phi(r) \quad (6)$$

A پتانسیل بردار مغناطیسی است که توسط معادلات زیر محاسبه می‌شود.

$$A(r) = \frac{\mu}{4\pi} \int J(r') G(r, r') dS' \quad (7)$$

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int Q(r') G(r, r') dS' \quad (8)$$

$$G(r, r') = \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (9)$$

و $R = r - r'$ نشان‌دهنده‌ی فاصله بین نقطه مشاهده شده (r) و نقطه منبع (r') است. پارامترهای μ و ϵ به ترتیب ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی محیط و k عدد موج است که با $k = \sqrt{\mu\epsilon}$ تعریف می‌شود. عبارت $G(r, r')$ برای محیط‌های همگن است، در معادله قبلی، وابستگی هارمونیک $e^{j\omega t}$ برای راحتی حذف می‌شود.

$$\nabla_s \cdot J(r) = -j\omega Q(r) \quad (10)$$

با جایگذاری رابطه ۷ در رابطه ۵ به عبارت زیر می‌رسیم:

$$\phi(r) = \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \int \nabla'_s \cdot J(r') G(r, r') ds' \quad (11)$$

سپس با جایگذاری معادله (۶) در معادله (۵) و گروه‌بندی با معادلات (۷) و (۱۱)، رابطه‌ای در حوزه فرکانس بین میدان الکتریکی کشیده شده و چگالی جریان سطح ناشی از آن به دست می‌آید. که معمولاً محدوده فرکانس EFIE نامیده می‌شود.

$$(j\omega A(r) + \nabla\phi(r)) = (E^i(r)) \quad (12)$$

مغناطیسی مختلط^{۱۵}، ϵ گذردهی الکتریکی مختلط^{۱۶} و d ضخامت جاذب است.

معادلات حاکم بر کاهش سطح مقطع راداری

بررسی شبیه‌سازی این مقاله توسط نرم‌افزار CST صورت گرفته است. معادلات لازم برای بیان فرآیند شبیه‌سازی به صورت زیر می‌باشد:

مقدار جذب توسط معادلات زیر، محاسبه می‌شود:

$$A(w) = 1 - R(w) - T(w) = 1 - R(w) \quad (2)$$

میزان جذب همچنان به صورت زیر نیز محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{|E^r|^2}{|E^i|^2} \quad (3)$$

بطوریکه E^i میدان الکتریکی تابشی و E^r میدان الکتریکی پراکنده شده است. طبق تعریف RCS توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۰].

$$\sigma = \lim_{d \rightarrow \infty} 4\pi d^2 \frac{|E^r|^2}{|E^i|^2} \quad (4)$$

از معادله (۴) می‌توان نتیجه گرفت که کاهش RCS با افزایش جذب به سرعت بالا می‌رود [۳۱].

روش‌های عددی بسیاری برای تجزیه و تحلیل پراکندگی الکترومغناطیسی یک ماده رسانا با شکل و دامنه فرکانس مورد نظر بررسی شده است. بر اساس شرایط مرزی میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی، دو معادله انتگرال مختلف برای تجزیه و تحلیل مشکلات پراکندگی برای اشیا رسانا عنوان شده است و معادله انتگرال میدان الکتریکی (EFIE)^{۱۷} و معادله انتگرال میدان مغناطیسی (MFIE)^{۱۸} به دست آمده است. علاوه بر این، دو معادله انتگرال را می‌توان در هم آمیخت تا فرمول عمومی تری به نام معادله انتگرال میدان ترکیبی (CFIE)^{۱۹} تشکیل شود. معادله EFIE می‌تواند برای هر دو سطح باز و بسته استفاده شود، در حالی که معادلات MFIE و CFIE فقط برای سازه‌های بسته مناسب هستند. تمام این معادلات را می‌توان به عنوان تابعی از چگالی جریان سطح استقرار نشان داد. زمینه پراکنده را می‌توان با استفاده از چگالی جریان به دست آمده از حل یکی از این معادلات محاسبه کرد. معادلات انتگرال MFIE، EFIE و CFIE با استفاده از

¹⁵ Complex permeability

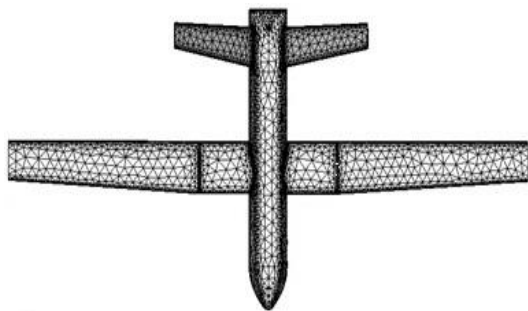
¹⁶ Complex permittivity

¹⁷ Electric field integral equation

¹⁸ Magnetic field integral equation

¹⁹ Combined field integral equation

کوچکی تقسیم شود که بر روی آنها معادلات ماکسول حل شوند. نحوه مش بندی و اندازه آن بر دقت و سرعت شبیه سازی ها تاثیر می گذارد. نرم افزار CST انواع مختلفی از مش ها و الگوریتم ها را ارائه می دهد که در اینجا از مش بندی سطحی مثلثی استفاده می کنیم (شکل ۸). برای تعیین مشخصات مش باید به پنجره Mesh Properties مراجعه کنیم. در این پنجره دو مقدار Steps per wavelength و Minimum number of steps قابل تعیین هستند. مقدار Steps per wavelength وابسته به طول موج حداکثر فرکانس تعیین شده برای شبیه سازی است. این مقدار حداقل تعداد مش ها را در طولی برابر با طول موج تعریف می کند. این مقدار نرخ نمونه برداری فضایی از سیگنال درون ساختار را معین می کند و تاثیر زیادی بر روی کیفیت نتایج و زمان محاسبه دارد. افزایش این عدد منجر به دقت بیشتر می شود، اما متأسفانه زمان کل محاسبات را نیز افزایش خواهد داد. مقدار Minimum number of steps، اندازه مش را کنترل کرده و یک مرز پایینی برای تعداد مش ها مستقل از طول موج تعریف خواهد کرد.



شکل ۸- نمایی از مش بندی پهپاد

این پهپاد با ۲۶۲۹۲ مش مثلثی مدل شده است. در این مدل سازی از خصوصیات الکتریکی گرافن اکساید ۱۰ درصد وزنی و اپوکسی-glass را که در جدول ۱ بیان شده است، استفاده می شود.

جدول ۱- خصوصیات الکتریکی نانو کامپوزیت گرافن

اکساید ۱۰ درصد وزنی و اپوکسی-glass		
پارامتر	اپوکسی-glass	اپوکسی با ۱۰ درصد وزنی گرافن اکساید
Epsilon	۴/۸۲	۷

$$A(r) = \frac{\mu}{4\pi} \int J(r') G(r, r') dS' \quad (13)$$

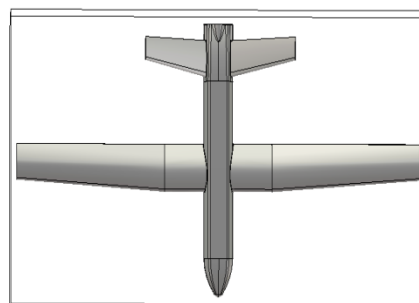
$$\phi(r) = \frac{J}{4\pi\omega\epsilon} \int \nabla_s' \cdot J(r') G(r, r') dS' \quad (14)$$

در نهایت، سطح مقطع راداری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\sigma = \lim_{d \rightarrow \infty} 4\pi d^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (15)$$

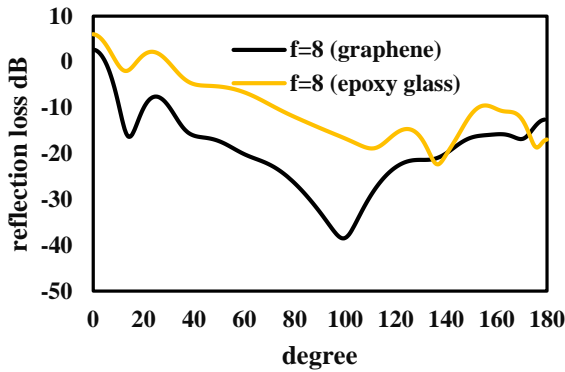
مدل سازی

در این مقاله یک پهپاد با طول ۸ متر، طول هر بال ۴ متر و ارتفاع آن ۲ متر، به طور کامل در نرم افزار CST طراحی شده است. طراحی پهپاد در نرم افزار CST این امکان را فراهم کرد، تا بتوان به بخش های مختلف آن به طور خاص مواد جاذب معینی را اعمال نمود. در صورتی که اگر از یک مدل پیش طراحی شده استفاده شده بود، تنها ممکن بود تا ماده جاذب را به تمام بخش های بدنه آن به طور یکپارچه اختصاص داد. مطابق شکل ۷، امتداد پهپاد در راستای محور X و بال ها به موازات محور Y ها در نظر گرفته شده اند. شبیه سازی در فرکانس ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز (یعنی در باند X) انجام شده است. یک موج الکترومغناطیس صفحه ای با دامنه واحد و فرکانس داده شده بالا، به دماغه زیر پهپاد تابیده می شود. میدان الکتریکی در جهت Z است. در این حال، سطح مقطع راداری محاسبه می گردد. شبیه سازی به کمک یک لپ تاب با پروسسور Core i5 و با ۴ گیگابایت حافظه در محیط نرم افزار CST انجام می شود.

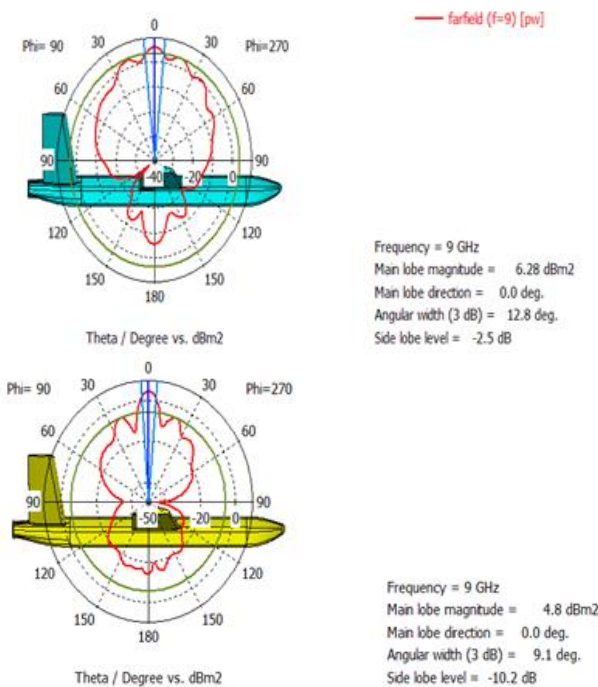


شکل (۷) نمایی از مدل پهپاد

پس از آن که مدل هندسی طراحی شده و منابع تابش و شرایط مرزی مناسب اختصاص داده شدند، مدل باید برای تحلیل الکترومغناطیسی آماده شود. در روش های شبیه سازی الکترومغناطیسی، کل فضای محاسباتی باید به سلول های



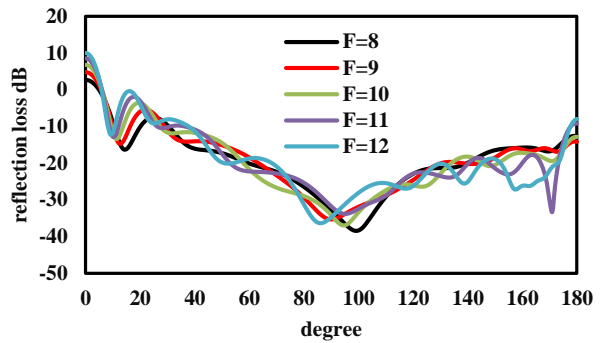
شکل ۱۱- نمودار کاهش سطح مقطع راداری بر حسب درجه تابش امواج و مقایسه نتایج برای پوشش گرافن اکساید و اپوکسی-glass



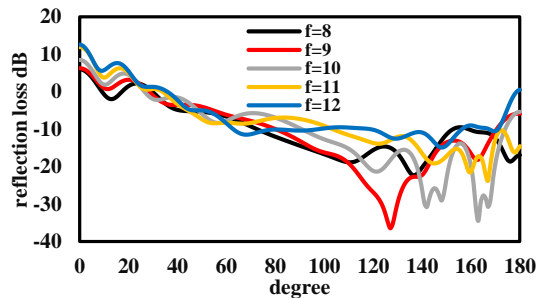
شکل ۱۲- کاهش سطح مقطع راداری در فرکانس های ۹ گیگاهرتز بر حسب نمودار قطبی برای پوشش گرافن اکساید

همانطور در شکل ۱۲ مشاهده می شود، زمانی که از پوشش گرافن اکساید برای کاهش سطح مقطع راداری استفاده می شود، به دلیل بالا بودن ضریب گذردهی بالا و همچنین چگالی نسبتا بالای این ماده در ۱۰ درصد وزنی با بستر اپوکسی، سطح مقطع راداری را نسبت به اپوکسی-glass به اندازه 2.52dB کاهش می دهد. این نتیجه در نمودار قطبی نیز برای یک فرکانس قابل مشاهده است.

μ	۱	۱
Density(kg/m ³)	۱۵۰۰	۱۷۰۰
Thermal conductivity(w/k-m)	۱/۱	۰/۴۵
Heat capacity(kj/kg-k)	۰/۷۵	-
Young's modulus	۳۰	۱۳
Poisson ratio	۰/۲	۰/۲
Thermal expansion(μ m/m-k)	۳/۳	-



شکل ۹- نمودار کاهش سطح مقطع راداری بر حسب درجه تابش امواج الکترومغناطیسی برای پوشش گرافن در فرکانس های متفاوت



شکل ۱۰- نمودار کاهش سطح مقطع راداری بر حسب درجه تابش امواج الکترومغناطیسی برای پوشش اپوکسی-glass در فرکانس های متفاوت

شکل ۹ و ۱۰ بیانگر مقایسه کاهش سطح مقطع راداری در فرکانس های مختلف، برای دو نمونه از پوشش های بدنه ی پهناد را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود هر چه فرکانس کاهش باید طول موج بلندتر و جذب امواج تابشی، کمتر خواهد شد.

نتیجه گیری

پوشش‌های کامپوزیتی که امواج الکترومغناطیسی را جذب می‌کنند، برای افزایش جذب مغناطیسی و الکتریکی و در نتیجه کاهش بازتاب امواج و سطح مقطع راداری مورد نیاز هستند. گرافیت‌ها از جمله موادی هستند که در روکش‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرند و امواج الکترومغناطیسی را جذب می‌کنند. نانوکامپوزیت‌های اکسید گرافن به دلیل افزایش سطح بین پرکننده‌های رسانا و دی‌الکتریک، تلفات الکتریکی را افزایش می‌دهند. کاهش سطح مقطع راداری در نانوکامپوزیت‌های اکسید گرافن در برخی فرکانس‌ها از ۲۸- دسی بل بیشتر است. از طرف دیگر، ترکیبات مبتنی بر کربن در این پوشش‌های کامپوزیتی استفاده می‌شوند. این نانو کامپوزیت‌ها مقاومت بالایی در برابر حرارت بالایی دارند به طوری که باقیمانده مواد در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای GO، GO (APTES) و Epoxy به ترتیب ۳/۷، ۶۲/۴ و ۸/۲۱ درصد است. در این مطالعه، نانو کامپوزیت مبتنی بر رزین اپوکسی با پرکننده‌های اکسید گرافن در بستر رزین اپوکسی سنتز شده و خاصیت جذب امواج الکترومغناطیسی در محدوده فرکانس ۱۲-۴ گیگاهرتز مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله گرافن اکساید ۴،۴ و ۱۰ درصد وزنی در بستر اپوکسی سنتز شده و سطح مقطع راداری، برای یک صفحه با ضخامت ۴ میلی‌متر در فرکانس ۴-۱۲ گیگاهرتز مورد بررسی قرار گرفته است. در کامپوزیت‌های ۱۰ درصد وزن GNP توده‌ها به خوبی توزیع شده و در مجاورت یکدیگر قرار دارند و یک شبکه متصل تشکیل داده و می‌توانند خواص مورد نیاز برای انجام آزمایش را فراهم کنند. با توجه به نتایج به دست آمده در فرکانس حدود ۹/۵ گیگاهرتز مقدار تلفات آن به حدود ۵۷dB - می‌رسد. این مقدار، گزینه مناسب برای مدل‌سازی بر روی یک پهپاد با مشخصات ذکر شده می‌باشد. شبیه‌سازی پهپاد با استفاده از پوشش نانو کامپوزیت گرافن اکساید، تلفات بالایی را نسبت به پوشش پیش فرض خود، یعنی اپوکسی-glass دارد و با توجه به نتایج به دست آمده، گرافن اکساید یک پوشش مناسب جهت کاهش سطح مقطع راداری در باند X می‌باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود که بمنظور افزایش ضریب جذب و همچنین بالابردن میزان اتلاف بازتاب امواج راداری می‌توان از گرافن اکساید با درصد وزنی بالاتر استفاده کرد.

منابع

- [1] Smith, A. T., LaChance, A. M., Zeng, S., Liu, B., & Sun, L. "Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites". *Nano Materials Science*, 1(1), 31-47, 2019.
- [2] Wang, Ya-Min, et al. "Electromagnetic wave absorption coating material with self-healing properties", *Macromolecular Rapid Communications*, 38.23: 1700447, 2017.
- [3] Xu, Jia, et al. "N-doped reduced graphene oxide aerogels containing pod-like N-doped carbon nanotubes and FeNi nanoparticles for electromagnetic wave absorption", *Carbon* 159: 357-365, 2020.
- [4] Bhattacharyya, Rajarshi, et al. "Graphene oxide-ferrite hybrid framework as enhanced broadband absorption in gigahertz frequencies", *Scientific reports* 9.1: 1-12, 2019.
- [5] Heidari, B., Majid F., & Seyed M., & Jalal Rastegar F. "Improving radar absorbing capability of polystyrene nanocomposites: Preparation and investigation of microwave absorbing properties", *Journal of Nanostructures* 10.2: 392, 2020.
- [6] Wan, Y. J., Tang, L. C., Gong, L. X., Yan, D., Li, Y. B., Wu, L. B., & Lai, G. Q. "Grafting of epoxy chains onto graphene oxide for epoxy composites with improved mechanical and thermal properties", *Carbon*, 69, 467-480, 2014.
- [7] Yang, S. Y., Lin, W. N., Huang, Y. L., Tien, H. W., Wang, J. Y., Ma, C. C. M., ... & Wang, Y. S. "Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites", *Carbon*, 49(3), 793-803, 2011.
- [8] Yang, Shin-Yi, et al. "Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites", *Carbon* 49.3: 793-803, 2011.
- [9] Li, Zheng, et al. "Control of the functionality of graphene oxide for its application in epoxy nanocomposites", *Polymer* 54.23: 6437-6446, 2013.
- [10] Fang, Ming, et al. "Constructing hierarchically structured interphases for strong and tough epoxy nanocomposites by amine-rich graphene surfaces", *Journal of Materials Chemistry* 20.43: 9635-9643, 2010.
- [11] Kuan, C. F., Chen, W. J., Li, Y. L., Chen, C. H., Kuan, H. C., & Chiang, C. L. "Flame retardance and thermal stability of carbon nanotube epoxy composite prepared from sol-

- [23] Zeng, J., & Xu, J. Microwave absorption properties of CuO/Co/carbon fiber composites synthesized by thermal oxidation. *Journal of alloys and compounds*, 493(1-2), L39-L41, 2010.
- [24] Yousefi, N., Sun, X., Lin, X., Shen, X., Jia, J., Zhang, B., & Kim, J. K. "Highly aligned graphene/polymer nanocomposites with excellent dielectric properties for high-performance electromagnetic interference shielding", *Advanced Materials*, 26(31), 5480-5487, 2014.
- [25] Verma, A., Ha, A. C., Rutka, J. T., & Verma, S., "What surgeons should know about non-vitamin K oral anticoagulants: a review?" *JAMA surgery*, 153(6), 577-585, 2018.
- [26] Abdalla, Mahmoud A., & Zihrun Hu. "On the study of development of x band metamaterial radar absorber", *Advanced Electromagnetics* 1.3: 94-98, 2012.
- [27] Sentosa, Media. "Design of a microstrip metamaterial for C-band Radar absorber", *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1317. No. 1. IOP Publishing, 2019.
- [28] M. Aslinezhad, "High sensitivity refractive index and temperature sensor based on semiconductor metamaterial perfect absorber in the terahertz band," *Opt. Commun.* Vol. 463, p. 125411, 2020.
- [29] Zeng, J., & Xu, J., "Microwave absorption properties of CuO/Co/carbon fiber composites synthesized by thermal oxidation", *Journal of alloys and compounds*, 493(1-2), L39-L41, 2010.
- gel method. Journal of Physics and Chemistry of Solids*", 71(4), 539-543.
- [12] Dunlop, J. W., & Fratzl, P. "Biological composites", *Annual Review of Materials Research*, 40, 1-24, 2010.
- [13] Knott, E., Shaeffer, J., & Tuley, M. *Radar Cross Section 2nd edn* (Boston, MA: Artech House), 1993.
- [14] Wang, X., et al. "Covalent functionalization of graphene with organosilane and its use as a reinforcement in epoxy composites", *Composites science and technology* 72.6: 737-743, 2012.
- [15] Najafi-Shoa, S., Hossein Roghani-M., & Salami-Kalajahi, M. "Incorporation of epoxy resin and graphene nanolayers into silica xerogel network: an insight into thermal improvement of resin", *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 80.2: 362-377, 2016.
- [16] Wang, X., et al. "Covalent functionalization of graphene with organosilane and its use as a reinforcement in epoxy composites", *Composites Science and Technology* 72.6: 737-743, 2012.
- [17] Yu, Wenqi, et al. "A graphene hybrid material functionalized with POSS: Synthesis and applications in low-dielectric epoxy composites", *Composites science and technology* 92: 112-119, 2014.
- [18] Okazaki, M., et al. "Curing of epoxy resin by ultrafine silica modified by grafting of hyperbranched poly-amidoamine using dendrimer synthesis methodology". *Journal of applied polymer science* 80.4: 573-579, 2001.
- [19] Qi, X., Yang, Y., Zhong, W., Deng, Y., Au, C., & Du, Y. "Large-scale synthesis, characterization and microwave absorption properties of carbon nanotubes of different helicities", *Journal of Solid State Chemistry*, 182(10), 2691-2697, 2009.
- [20] Marcano, D. C., Kosynkin, D. V. Berlin, J. M., Sinitskii, Z. Z., Sun, A., Slesarev, L. B. Alemany, W. Lu, & J. M. Tour, "Improved synthesis of graphene oxide", *ACS Nano*, vol. 4, no. 8, pp. 4806-4814, 2010.
- [21] Zhang, L., et al. "Facile synthesis of iron oxides/reduced graphene oxide composites: application for electromagnetic wave absorption at high temperature", *Scientific reports* 5.1: 1-9, 2015.
- [22] Ren, Y. L., Wu, H. Y., Lu, M. M., Chen, Y. J., Zhu, C. L., Gao, P., ... & Ouyang, Q. Y. "Quaternary nanocomposites consisting of graphene, Fe₃O₄@ Fe core@ shell, and ZnO nanoparticles: synthesis and excellent electromagnetic absorption properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(12), 6436-6442, 2010.