نشريه علمى پژوهشى



علوم و فناوری **کامپوزیست** http://jstc.iust.ac.ir



طراحی و ساخت پوشش کامپوزیتی پایه پلیمری با هدف کاهش سطح مقطع راداری

³ معصومه رحیمی پیشبیجاری ¹، جعفر اسکندری جم ^{2*}، محسن حیدری بنی

1- دانش آموخته كارشناسي ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي مالك اشتر، تهران، تهران

2– استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، تهران

* تهران، صندوق يستى eskandari@mut.ac.ir ،13877-63681

* تهران، طنتكوق پستى 2000	
اطلاعات مقاله:	چکیدہ
دريافت: 98/11/01	 سطح مقطع راداری میزان قابل شناسایی بودن یک شی توسط رادار را بیان میکند. هرچه این مقدار بیشتر باشـد، شـی بـرای رادار قابـل
پذيرش: 99/10/03	رؤیتتر است. روشهای اساسی کاهش سطح مقطع راداری در قطعات کامپوزیتی از سه طریق تغییر در هندسـه قطعـه، اسـتفاده از مـواد
كليدواژگان	جاذب و لایهچینی کامپوزیتها انجام میشود. در این تحقیق، به ساخت و بررسی کامپوزیت پایه پلیمری با هـدف کـاهش سـطح مقطـع
سطح مقطع راداري	راداری پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا، نمونههای کامپوزیتی اپوکسی تقویتشده با شیشه (GFRP) با استفاده از فرآیند نفـوذ در
ميزان جذب	خلأ ساختهشده و در گام بعد، پوشش اپوکسی با افزودنیهای آلومینیوم، آلومینا و اکسید آهن در درصـدهای حجمـی 1، 3 و 5 بـر روی
مواد جاذب رادار	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 آزمـون VNA
كامپوزيت	قرار گرفته است. به منظور صرفهجویی در تعداد آزمایشها و انتخاب نمونه بهینه، از طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ سطح استفاده
طراحي أزمايش	گردید. نتایج نشان داد که به دلیل رسانایی بالاتر بیشترین جذب در کامپوزیت با پوشش آلومینیوم به میزان (5٪) و کمتـرین جـذب در
	کامپوزیت با پوشش آلومینا به دلیل رسانایی کم و به میزان (1٪) میباشد. در کلیه نمونهها با افزایش درصد افزودنیها، میزان جذب امواج
	افزایش می یابد.

Design and manufacture of polymer based composite coatings with the aim of reducing radar cross section

Masoomeh Rahimi Pishbijari, Jafar Eskandari Jam*, Mohsen Heydari Beni

1- Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 13877-63681, Tehran, Iran, eskandari@mut.ac.ir.

Keywords

Radar Cross Section (RCS) Absorption Rate Radar Adsorbents Composite Test Design

Abstract

Radar cross-sectional area is the degree to which an object can be identified by the radar. The higher this value, the more visible the object is to the radar. Basic methods of radar cross-section reduction in composite components have been through three modifications in segment geometry, the use of adsorbents and the layering of composites. In this study, the fabrication and investigation of polymeric base composite with the aim of reducing the radar cross section is investigated. For this purpose, glass reinforced epoxy resin (GFRP) composites were first fabricated by vacuum penetration process, followed by epoxy coating with aluminum, alumina and iron oxide additives in 1, 3 and 5% volumetric samples. Finally, their absorption at 8.5, 9.5, 10.5 and 11.5 GHz frequencies were investigated under the X-band VNA test. In order to save the number of experiments and to select the optimal sample, the design of the experiment was performed by surface response procedure. The results showed that the highest adsorption in aluminum composite (5%) was due to higher conductivity and the lowest adsorption on aluminum composite (1%) was due to low conductivity. In all samples, the adsorption rate increased with increasing additive percentage.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Rahimi Pishbijari, M. Eskandari Jam, J. and 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.

1– مقدمه

امروزه با پیشرفت دستگاههای شناسایی الکترونیکی از قبیل رادارها قابلیت شناسایی و کشف اهداف، توسط جنگافزارهای زمینی و هوایی به طور قابل ملاحظهای افزایش یافته است. بنابراین دستیابی به تکنولوژی استتار در برابر امواج و نیاز به طراحی و یا پوششهایی که بتوانند اثرات نامطلوب و مخرب این امواج را کاهش و یا کاملاً حذف کنند، اهمیت فراوانی یافته است [1]. از آن جمله میتوان به موارد ذیل جهت استتار و کاهش سطح مقطع راداری در قطعات کامپوزیتی اشاره کرد:

- تغيير در هندسه قطعه
- 2) استفاده از مواد جاذب رادار
 - 3) لايەچىنى كامپوزىتھا

مواد جاذب رادار به دستهای از مواد اطلاق می گردد که روی تجهیزات نظامی برای غیرقابل رویت کردن آنها توسط رادار کشیده می شوند. مواد بسته به ترکیبشان، فرکانس های داده شده را جذب می کنند. مواد جاذب رادار بازگشت انرژی رادار را از طریق وسایلی که انرژی را جذب می کنند، کاهش می دهد. انرژی رادار از طریق یک یا چند مکانیسم جذب می شود. این مواد دارای خاصیت دی الکتریک یا مغناطیسی می باشند. در مجموع، احتیاجات مواد جاذب رادار برای استفاده در کاهش سطح مقطع راداری به شرح زیر می باشند [1]:

- مواد جاذب باید واکنش فرکانسی مناسب داشته باشند.
 - 2) آنها بايد به عنوان پلاريزاسيون متعامد عمل كنند.
 - 3) باید با ویژگیهای خاص زاویه انحراف کار کنند.

با توجه به اهمیت موضوع تحقیقات زیادی در این خصوص صورت پذیرفته است. آباس و همکاران [2]، ثابت دی الکتریک، نفوذپذیری و جذب میکروویو کامپوزیتهای فریت پلیمر تهیه شده با نسبتهای مختلف در پلیاورتان را مورد بررسی قرار دادند. کامپوزیت با محتوای فریت 80٪ وزنی، حداکثر انعکاس اتلافی برابر با 24.5- دسیبل را در 12 گیگاهرتز نشان داد. از معایب جاذب تهیهشده میتوان به درصد بالای فریت اشاره کرد که باعث افزایش هزینه تهیه روکش فوق می گردد.

فنگ و همکاران [3]، در سال 2008 میلادی از اسید هگزانوئیک به عنوان افزودنی پلیآنیلین و از اکسید تیتانیوم^۱ و نانو لوله کربنی تک دیواره به عنوان پرکننده برای تهیه نانوکامپوزیت استفاده کردند. این نانوکامپوزیت ثابت دیالکتریک و ناهمگنی بالایی نشان داد، مقدار جذب میکروویو آنها در رنج 10-13 گیگاهرتز افزایش نشان میداد. مقدار انعکاس اتلافی این کامپوزیت در فرکانس 10 گیگاهرتز برابر با 31- دسیبل بود. از معایب این بررسی میتوان به پهنای باریک باند جذبی اشاره کرد.

طبق مطالعات انجام شده توسط نیکلسون و همکاران [4] در زمینه رسانایی کامپوزیت های تک جهته مشاهده شد که انعکاس امواج به تعداد لایه ها و جهت الیاف وابسته می باشد به طوری که بیش ترین انعکاس در کامپوزیت های تک جهته زمانی رخ می دهد که جهت امواج، موازی با الیاف باشد.

در تحقیق انجامشده توسط رایلی و همکاران [5] به بررسی اثربخشی حفاظتی، طراحی آنتن، هدایت، بازتاب و خواص جذب کامپوزیت کربن در حالتهای مختلف لایه چینی پرداخته شده است. در این تحقیق نمونههای مختلف کامپوزیت الیاف کربن تولید و سپس در یک مکان بدون انعکاس قرار

گرفتند تا مقادیر سطح مقطع راداری آنها با انتشار نرمال اندازهگیری شود. مقادیر اندازهگیری شده با نمونههای آلومینیومی ساختهشده مقایسه شد. تمام اندازهگیریها در محدوده فرکانس 7 تا 12 گیگاهرتز انجام گرفت. نتایج آنها نشان داد که جهت الیاف در نمونههای کامپوزیت الیاف کربن، تأثیر زیادی بر روی سطح مقطع راداری دارد.

در طراحی هواپیمای جنگنده ، مشاهده شد که با جایگزینی سطوح صاف با زوایای نامنظم [6]، همچنین طراحی جنگنده بدون دم [7] و خنک کردن دودهای حاصل از موتور، قبل خروج [8،8] سطح مقطع راداری کاهش مییابد. البته این تغییرات در طراحی، به شکل و خطوط قرمز طراحی قطعه بستگی دارد.

در انتخاب مواد جاذب رادار، محققین نظرات متفاوتی داشتند. طبق مطالعات انجامشده از کربن سیاه، پلی آنیلین، پلی اورتان و اپوکسی به عنوان زمینه می توان در ساخت کامپوزیتهای جاذب رادار بهره برد، اما بنابر اجماع نظر محققان، استفاده از کربن و پلی آنیلین تأثیر به سزایی در کاهش سطح مقطع راداری دارد. در انتخاب تقویت کننده، الیاف کربن جاذب بهتری نسبت به سایر الیاف می باشد. پرکننده یا افزودنیهایی که می توان در مواد جاذب رادار استفاده نمود، شامل: کربن در پلاستر (گچ)، گرافیت، اکسید آهن، تیتانات باریم، نانو لولههای کربنی پودر آهن، آلومینیوم و مس پودر شده، آب مفتولهای فلزی و ... می باشد [10، 11]، که طبق تحقیقات کربن، نانو لولههای کربنی و تیتانات باریم تأثیر بیشتری در کاهش سطح مقطع راداری دارند.

دلفینی و همکاران [12]، به بررسی مواد سرامیکی جاذب رادار برای کاربردهای چند منظوره در محیط های فضایی پرداختند و دریافتند ساختارهای سرامیکی / پلیمری می توانند به عنوان زیر مجموعه های خاص فضاپیما مورد استفاده قرار گیرند تا از مقاومت در برابر درجه حرارت شدید و امواج الکترومغناطیسی به طور همزمان اطمینان حاصل شود.

روئین تن و همکاران [13]، به بررسی نقش پوشش های فریتی جاذب امواج الکترومغناطیس در رادارگریزی شناورهای تندرو پرداختند و دریافتند استفاده از نانوذرات آهن، نیکل و کبالت در ساخت نانوکامپوزیتهای فریتی قادر است در محدودهی فرکانسی امواج رادار، سطح مقطع راداری را حداقل تا ۶ برابر کاهش دهد که این نتیجهی بسیار خوبی محسوب می شود.

در این پژوهش نمونهای از پارچه شیشه با رزین اپوکسی سـاختهشـده و سپس پودر آلومینیوم، آلومینا و اکسید آهن به عنوان پوشـش بـر روی آنهـا اعمال و در نهایت نمونهها با هم مقایسه میشود.

2- روش حل

روش تحقیق شامل انتخاب پارامترهای مهم در فرآیند ساخت کامپوزیت با رسانایی بالا، طراحی آزمایشها با استفاده از روش رویه پاسخ سطح^۲ در نرمافزار دیزاین اکسپرت^۲ و در نهایت ساخت نمونهها و ارزیابی آنها میباشد.

2-1- رسانایی الکتریکی در مواد

رسانایی الکتریکی در مواد میتواند ناشی از حرکت و جابهجایی یونها یا الکترونها در آن مواد باشد. به طور کلی مواد مختلف از نظر میزان مقاومت

² Response Surface Method (RSM)

³ Design Expert

الکتریکی به سه دسته اصلی از مواد طبقهبندی میشوند که شامل مواد نارسانا، مواد نیمهرسانا و مواد فلزی هستند [14].

مواد نارسانا: این مواد که عایقهای الکتریکی نامیده میشوند، دارای مقاومت الکتریکی بسیار بالایی می باش از ^{10 10} الکتریکی بسیار بالایی می باشند. مقاومت الکتریکی آنها بیش از ^{10 10} اهممتر در سانتیمتر ^۱ است.

مواد فلـزی: ایـن دسـته از مـواد کـه رسـانای خـوب جریـان الکتریکـی میباشند، دارای مقاومت الکتریکی پایینی میباشند. میزان مقاومت الکتریکـی آنها ³⁻¹1 اهممتر در سانتیمتر است.

مواد نیمه رسانا: میزان مقاومت الکتریکی این دسته از مواد، مابین مقاومت الکتریکی مواد رسانا و مواد فلزی میباشد. به عبارت دیگر، مقاومت الکتریکی آنها کمتر از 10¹⁰ اهممتر در سانتیمتر و بیشتر از ³⁻¹0 اهـممتـر در سانتیمتر میباشد.

در یک مدار ساده که دارای اختلاف پتانسیل در دو سر مدار باشد، رابطـه اهم برقرار است.

$$V = IR \tag{1}$$

که در آن V اختلاف پتانسیل بر حسب ولت، I شدت جریان بر حسب آمپر و R مقاومت الکتریکی بر حسب اهم میباشد. پارامتر R به عنوان مقاومت در مقابل جریان شناخته می شود و برای مواد مختلف متفاوت است. مفهوم دیگری به نام هدایت الکتریکی نیز وجود دارد که معکوس مقاومت الکتریکی میباشد. این مفهوم به صورت رابطه (2) میباشد [15].

$$\sigma = \frac{1}{R_{ohm}} \tag{2}$$

در سالهای گذشته واحد هدایت الکتریکی mho بود. ولی در سالهای اخیر از واحد زیمنس بر متر یا سانتیمتر استفاده می شود. برای اینکه هدایت و مقاومت الکتریکی به ابعاد هندسی وابسته نباشد، می توان رابطه (3) را نوشت [15].

$$\frac{\Delta V}{L} = \frac{1}{A}\rho \tag{3}$$

که در آن <sup>۵۷ شدت میدان الکتریکی در طول، 1 شدت جریان در سطح و
$$ho$$

مقاومت ویژه حجمی میباشد.</sup>

با استفاده از دو رابطه (2) و (3) هدایت الکتریکی را میتوان به صورت رابطه (4) نوشت [15].

$$\sigma_{(s/m)} = \frac{1}{\rho_{(ohm \cdot m)}} \tag{4}$$

در جدول 1 مقادیر عددی میزان رسانایی و مقاومت الکتریکی مواد مورد استفاده در این تحقیق قید شده است.

جدول 1 مقادیر عددی میزان رسانایی و مقاومت الکتریکی مواد مورد استفاده [16] **Table 1** Numerical values of conductivity and electrical resistance of the materials used [16]

مقاومت الكتريكىΩ·cn	رسانایی الکتریکی S/m	مواد
(0.3125-1000)×10 ⁻¹⁶	(0.0010-3.20)×10 ¹⁶	رزين اپوكسي
1.00×10^{14}	1.00×10^{-14}	آلومينا
4.02××10 ¹²	2.488×10 ⁻¹³	پارچه شیشه
2.82×10 ⁻⁸	3.5×10 ⁷	آلومينيوم
1.23×10 ⁻⁸	0.9775×10 ⁸	اکسید آهن

¹ Ohm.cm

2-2- تابش و اتلاف امواج الكترومغناطيس

تابش الکترومغناطیسی، بر اساس تئوری موجی، پدیده ی موجی شکل است که در فضا انتشار مییابد و از میدانهای الکتریکی و مغناطیسی ساخته شده است. این میدانها در حال انتشار بر یکدیگر و بر جهت پیشروی موج معود هستند. امواج الکترومغناطیسی را نخستین بار ماکسول پیش بینی کرد و سپس هاینریش هرتز آن را با آزمایش به اثبات رساند. ماکسول پس از به دست آورد و بنابراین نشان داد که میدانهای الکتریکی و مغناطیسی هم میتوانند رفتاری موج گونه داشته باشند [17]. تغییر در اندازه و موقعیت بار الکتریکی همواره باعث انتشار موج الکترومغناطیسی میشود. رابطه دامنه موج الکتریکی (E) و دامنه موج مغناطیس (B) به صورت B = B است که الکتریکی (E) و دامنه موج مغناطیس (B) به صورت (E) حالت دامنه موج در آن C سرعت نور در خلأ (برابر با ⁸ 10×3) است. امواج الکترومغناطیس پس از برخورد با سطح فلزات بازتاب داده میشود ولی در برخی مواد، جذب و در برخی به صورت انرژی حرارتی اتلاف میشود. یافتن عمق نفوذ روشی برای بررسی میزان اتلاف امواج در یک ماده است. عمق نفوذ به عنوان ناحیه ای از ماده تعریف میشود که در آن داسته انرژی به $\frac{1}{9}$ مقدار سطح، کاهش یابد.

2-3- انتخاب پارامترهای فرآیند

پارامترهایی از قبیل طراحی، انتخاب تقویت کننده و زمینه به عنوان مواد جاذب رادار، افزودنیها و لایه چینی کامپوزیت ها در میزان سطح مقطع راداری مؤثر میباشند. در این تحقیق پارامترهایی نظیر نوع افزودنی و درصد افزودنی به عنوان پارامترهای مؤثر در ساخت کامپوزیت با رسانایی بالا انتخاب شده است. برای هر یک از این فاکتورها، سه سطح تعریف شده که در جدول 2 قابل مشاهده است.

2-4- طراحی آزمایش با استفاده از نرمافزار دیزاین اکسپرت

طراحی آزمایش به طراحی مجموعهای از آزمایشها به منظور دستیابی به بهینه ترین تعداد آزمایش گفته می شود. در آمار طراحی آزمایش معمولاً به طراحی آزمایش کنترل شده گفته می شود. البته تلاش همه محققان رشته طراحی آزمایش، کاهش تعداد آزمایشها با انتخاب بخشی از کل آزمایشهای لازم جهت رسیدن به هدف بوده است. مسئله اصلی، انتخاب این تعداد آزمایش از کل آزمایشها است که سبب بروز انواع طراحی آزمایش شده است [18].

در این پروژه با استفاده از نرمافزار دیزاین اکسپرت، روش رویه پاسخ سطح، سطوح و فاکتورهای انتخابشده در جدول 2 تعداد حالتهای مختلف برای ساخت نمونه، انتخابشده است. خروجیهای طراحی آزمایش شامل میزان جذب در فرکانسهای 8.5، 9.5، 10.5 و 11.5 گیگاهرتز می باشد.

فاکتور یک، افزودنیها و فاکتور دو درصد افزودنیها میباشد و در جـدول 3 شرح داده شده که اعداد یک تا سه بیانگر کدام افزودنی میباشند.

جدول 2 سطوح تعریف شده برای فاکتورهای مورد استفاده در فرآیند ساخت کامیوزیت با رسانایی بالا

 Table 2 Surfaces defined for the factors used in the high conductivity composite manufacturing process

		سطوح	فاكتورها
اکسیدآهن	آلومينا	آلومينيوم	نوع پودر
5	3	1	درصد افزودني

جدول 3 بیان مفهوم اعداد یک تا سه در طراحی آزمایش Table 3 Express the concept of numbers one to three in the design of

ui <u>e e</u> /	عدد 3	عدد 2	عدد 1	
_	اکسید آهن	آلومينا	آلومينيوم	افزودني

2-5- ساخت نمونه

در ادامه به توضیح روش ساخت نمونه، شامل انتخاب مواد، ساخت نمونههای کامپوزیتی و پوششدهی آنها پرداخته میشود.

1-5-2 مواد

نمونههای کامپوزیتی شیشه-اپوکسی با استفاده از پارچه شیشـه 300 Twill 300 با ضخامت 0.2 gr gr با ضخامت 0.2 میلی متر، خریداری شده از شرکت کولن^۱ اسـترالیا ، رزیـن اپوکسی 5052 LY آرالدیت هانتسمن^۲ با هاردنر 5052 HY و نسبت اختلاط 100 به 38 ساخته شد.

2-5-2 روش ساخت

نمونه با استفاده از فرآیند نفوذ در خلاء ^۲ ساخته شده است که برای این کار ابتدا سطح قالب، که از جنس آلومینیوم سری پنج می باشد، با استفاده از استون تمیز شد تا هیچ گونه آلودگی بر روی سطح وجود نداشته باشد. سپس با استفاده از خمیر آب بند[†] ابعاد قالب مشخص و واکس جداکننده بر روی آن زده شد. واکس جداکننده مورد استفاده در این تحقیق از نوع 5300-DW می باشد. در این مرحله، پنج مرتبه واکس جداکننده بر روی قالب زده شد و پس از خشک شدن به مدت 30 دقیقه مجدد لایه بعدی اعمال شده است. پس از آنکه واکس جداکننده خشک شد، پنج لایه پارچه خشک درون قالب با آرایش 0–90 قرار داده شد و سپس بر روی آن ها یک لایه جداکننده داکرون و سپس یک لایه مش اینفیوژن قرار داده شد. در نهایت با استفاده از کیسه خلاء و پمپ هوا، خلاء بر روی کل قالب اعمال شد. در گام بعد، از سمت دیگر با باز کردن شیر ورودی، به رزین اجازه ورود به درون قالب داده شد که در شکل 1 قابل مشاهده است.

با توجه به هوا پخت بودن رزین مورد استفاده، نمونه پس از قرار گرفتن در دمای محیط به مدت 24 ساعت پخت^۵ شدهاست. در گام بعد، نمونههای 30×30 سانتیمتر طبق استاندارد آزمون میزان جذب امواج رادار بریده شدند. آمادهسازی نمونه برای برش در ابعاد 30×30 سانتیمتر در شکل 2 نشان داده شدهاست.

2-6- آمادەسازى نمونەھا براى ارزيابى

برای آنکه بتوان آزمون سطح مقطع راداری را بر روی نمونه ها انجام داد باید آن را به یک قطعه آلومینیومی (به عنوان مرجع) متصل نمود، که آلومینیوم استفاده شده در این تحقیق، آلومینیوم با گرید 5000 است. برای اتصال نمونه به قطعه آلومینیومی از رزین 828 خریداری شده از شرکت ایپون⁸ و هاردنر 255 F با نسبت اختلاط 100 به 40 استفاده شده است. ضخامت قطعه

- colan HUNSMAN Araldite
- Infusion
- ⁴ Seal tape
- Curing
- Epon

آلومینیومی دو میلیمتر میباشد. اتصال نمونه به آلومینیوم در شکل 3 مشاهده می شود.



Fig. 1 Sample making by vacuum diffusion method

شکل 1 ساخت نمونه به روش نفوذ در خلاء



Fig. 2 Sample made and ready for cutting

شكل 2 نمونه ساخته شده و آماده برش



Fig. 3 Attach the specimens to the aluminum piece شکل 3 اتصال نمونه ها به قطعه آلومینیومی

در این تحقیق به منظور کاهش سطح مقطع راداری، یک لایه پوشش^۱ بر روی نمونهها اعمال شدهاست. در این لایه پوششی، از سه افزودنی پودر آلومینیوم 99٪، آلومینا^۲ (آلومینیوم اکسید) 99٪ و اکسید آهن^۳ 99/98 ٪ با اندازه نانو، استفاده شدهاست. پس از اتصال نمونههای ساخته شده به قطعه آلومینیومی، افزودنیها برای پوشش نمونهها آمادهسازی شده و تعداد نه نمونه با درصدهای مختلفی پوشش داده شدند، که در شکل 4 مشاهده میشود. علاوه بر نمونههای پوشش داده شده با استفاده از افزودنی های مختلف، یک نمونه کامپوزیت بدون پوشش هم تحت آزمون وکتور آنالیزور شبکه⁴ قرار گرفت و نتایج آن با نمونههای پوشش داده شده هده مقایسه گردید.

2-7- نمونه بهینه پیشنهاد شده توسط نرم افزار

طبق تحلیل انجام شده با استفاده از نرمافزار دیزاین اکسپرت، برای افزایش میزان جذب و کاهش سطح مقطع راداری، نمونه پوشش داده شده با آلومینیوم با درصد وزنی 4.871، به عنوان نمونه بهینه معرفی شدهاست که در جدول 4 قابل مشاهده میباشد. همانطور که در جدول 4 مشاهده میشود میزان مطلوبیت دقت انتخاب نمونه بهینه 96٪ میباشد. این نمونه ساخته شد و با درصد خطای کمی نتایجی مشابه نتایج گرفته شده از نرمافزار دیراین اکسپرت داشت.



Fig. 4 Covering samples with different additives and different percentages

شکل 4 پوشش نمونهها با افزودنیهای متفاوت و درصدهای مختلف

جدول 4 تحليل نتايج با استفاده از نرمافزار ديزاين اكسپرت و استخراج نمونه بهينه Table 4 Analysis of results using expert design software and optimal sample extraction

Additive	Al
Additive pct.	4.871
Absorption8.5	2.854
Absorption9.5	1.852
Absorption10.5	1.375
Absorption11.5	0.671
Desirability	0.963

¹ Coat

Fe2O3 VNA, Vector Network Analyzer

2-8- ساخت نمونه بهينه پيشنهاد شده توسط نرم افزار

مطابق پیشنهاد نرمافزار، نمونهای با استفاده از پارچه شیشه و رزین اپوکسی با پوشش آلومینیوم و درصد افزودنی 4/8 ٪ ساخته شد. نتایج نمونه ساخته شده و نمونه پیشنهادی با هم مقایسه گردید که در ادامه به آن پرداخته شدهاست.

2-9- ارزیابی نمونههای ساخته شده از دیدگاه سطح مقطع راداری

سطح مقطع راداری میزان قابل شناسایی بودن شی توسط رادار را بیان می کند. اندازه گیری میزان سطح مقطع راداری نیازمند تعیین محدوده اندازه گیری است. هدف از محدوده آزمون، تهیه محیطی برای شبیهسازی فضای آزاد است. آزمون مورد استفاده برای اندازه گیری سطح مقطع راداری آزمون و کتور آنالیزور شبکه میباشد. در این تحقیق نمونهها با استفاده از دستگاه آنالیز گر شبکه برداری در باند X در محدوده فرکانسی 8-12 گیگاهرتز که در آزمایشگاه قرار دارد، مورد ارزیابی قرار گرفتند. تصویر دستگاه در شکل 5 قابل مشاهده است.

3- بحث روی نتایج

در این پژوهش ابتدا نمونه ها با استفاده از پارچه شیشه و رزین اپوکسی ساخته، در ابعاد مناسب برش داده شده و در نهایت با استفاده از درصدهای متفاوتی از افزودنی های پودر آلومینیوم، آلومینا و اکسید آهان پوشش داده شدند. در نهایت آن ها، تحت آزمون وکتور آنالیزور شبکه قرار گرفتند و نتایج به نرمافزار دیزاین اکسپرت داده شد.

3-1- تأثير افزودنىها بر ميزان جذب امواج

در جدول 5 نتایج گرفته شده از آزمون وکتور آنالیزور شبکه انجام شده بر روی کامپوزیت ساخته شده بدون پوشش مشاهده می شود که این کامپوزیت جذب بسیار پایین و در نتیجه سطح مقطع راداری بالایی دارد و نمی تواند به عنوان جاذب امواج رادار، عملکرد خوبی داشته باشد.



Fig. 5 Wave absorption test device

جدول 5 نتایج آزمون وکتور آنالیزور شبکه انجام شده بر روی کامپوزیت بدون پوشش Table 5 Results of VNA test on uncoated composite

میزان جذب	فر کانس	فر کانس	فر کانس	فركانس	
نمونه بدون	8.5	9.5	10.5	11.5	
پوشش (گيگاهرتز)	0.7	0.5	0.1	0.09	

² Al2O3

شکل 5 دستگاه آزمون میزان جذب امواج

میزان جذب هر یک از نمونههای تقویت شده در چهار فرکانس 8.5، 9.5، 10.5 و 11.5 گیگاهرتز مورد ارزیابی قرار گرفته که در ادامه به آن یرداخته شدهاست.

3-2- میزان جذب امواج در فرکانس 8.5 گیگاهرتز

شکلهای 6، 7 و 8 میزان جـذب امـواج توسـط افزودنیها در فرکانس 8.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف را نشان میدهند. در این فرکانس بیشترین جذب را نمونه تقویت شده با پوشش پودر آلومینیوم و کمترین جذب را نمونه تقویت شده با پوشش پودر آلومینا دارد که در جدول 6 میزان جذب هر نمونه بیان شدهاست.





Fig. 6 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 8.5 GHz with one percent additive شکل 6 میزان جذب امواج توسط افزودنیها در فرکانس 8.5 گیگاهرتز با یک درصد

افزودنى



Fig. 7 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 8.5 GHz with three percent additives شکل 7 میزان جذب امواج توسط افزودنیها در فرکانس 8.5 گیگاهرتز با سه درصد

One Factor 3 AI 2.5 Fe₂O₂ Absorption-8.5 (dB) 2 Al₂O₃ 1.5 A: Additive (Type) 5%

Fig. 8 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 8.5 GHz with 5% additives شکل 8 میزان جذب امواج توسط افزودنیها در فرکانس 8.5 گیگاهرتز با پنج درصد افزودنى

جدول 6 میزان جذب هر افزودنی در درصدهای متفاوت Table 6 The rate of absorption of each additive in different percentages

میزان جذب اکسید آهن	ميزان جذب آلومينا	ميزان جذب آلومينيوم	ميزان افزودني
2.3 dB	1.6 dB	2.8 dB	7.5
2.1 dB	1.5 dB	2.6 dB	7.3
1.7 dB	1.3 dB	2.4 dB	7.1

طبق مشاهدات، در این فرکانس میانگین میزان جـذب آلومینیـوم نسـبت بـه آلومينا 44٪ و نسبت به اكسيد آهن 22٪ بيشتر است. جذب بيشتر آلومينيوم نسبت به دو افزودنی دیگر به دلیل رسانایی بیشتر آن میباشد. همچنین چون سطح یک نمونه نارسانا با یک افزودنی رسانا (آلومینیوم) پوشش داده شدهاست، با افزایش درصد افزودنی میزان جذب نیز افزایش می یابد.

در شــکلهـای 9، 10 و 11 تـأثیر افـزایش درصـد افزودنـی بـر روی افزودنی های مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش درصد افزودنی میزان جذب نیز افزایش می یابد و آلومینیوم بیشترین و آلومینا کمترین جذب را دارا میباشد.

3-3- میزان جذب امواج در فرکانس 5/9 گیگاهر تز

در شکلهای 12، 13 و 14 میزان جذب امواج توسط افزودنیها در فركانس 9.5 گیگاهرتز با درصدهای متفاوت، نشان داده شدهاست. با توجه به این نمودارها می توان دریافت که همانند فرکانس 8.5 گیگاهرتز، در این فركانس نيز بيشترين جذب توسط آلومينيوم و كمترين جذب توسط آلومينا صورت گرفته است. در این فرکانس بهطور میانگین آلومینیوم نسبت به آلومينا 54٪ و نسبت به اكسيد آهن 27٪ جذب بيشتري داشته است.

افزودنى



1% A: Additive (Type)

Fig. 12 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 9.5 GHz with one percent additive





3% A: Additive (Type)

Fig. 13 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 9.5 GHz with three percent additives شكل 13 ميزان جذب امواج توسط افزودنىها در فركانس 9.5 گيگاهرتز با سه درصد



Fig. 14 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 9.5 GHz with 5% additives

شکل 14 میزان جذب امواج توسط افزودنیها در فرکانس 9.5 گیگاهرتز با پنج درصد افزودنی



AI B: Additive pct. (%)

Fig. 9 Aluminum absorption rate at 8.5 GHz with different percentages

شکل 9 میزان جذب آلومینیوم در فرکانس 8.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف



Al₂O₃ B: Additive pct. (%) Fig. 10 Alumina absorption rate at 8.5 GHz with different percentages شکل 10 میزان جذب آلومینا در فرکانس 8.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف



Fig. 11 Iron oxide uptake at 8.5 GHz with different percentages شکل 11 میزان جذب اکسید آهن در فرکانس 8.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف



Fe2O3 B: Additive pct. (%)
 Fig. 17 Iron oxide uptake at 9.5 GHz with different percentages
 شکل 17 میزان جذب اکسید آهن در فرکانس 9.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف



1% A: Additive (Type)



شکل 18 میزان جذب امواج توسط افزودنیها در فرکانس 10.5 گیگاهرتز با یک درصد افزودنی



3% A: Additive (Type)

Fig. 19 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 10.5 GHz with three percent additives شكل 19 ميزان جذب امواج توسط افزودنيها در فركانس 10.5 گيگاهرتز با سه درصد افزودني

شکلهای 15، 16 و 17 تغییرات میزان جذب با افزایش درصد افزودنی را نشان میدهند. همانطور 30 دیده می شود هرچه درصد افزودنی افزایش می یابد میزان جذب نیز افزایش می یابد. همچنین میزان جذب آلومینیوم نسبت به میزان جذب آلومینا و اکسید آهن بیشتر است.

3-4- میزان جذب امواج در فرکانس 10.5 گیگاهرتز

در شکلهای 18، 19 و 20 میزان جذب امواج توسط افزودنیها در فرکانس 10.5 گیگاهرتز در درصدهای مختلف، نشان داده شدهاست. در این فرکانس همانند دو فرکانس دیگر، بیشترین جذب توسط آلومینیوم و کمترین جذب توسط آلومینا صورت گرفته است. در این فرکانس آلومینیوم نسبت به آلومینا 69٪ و نسبت به اکسید آهن 26٪ جذب بیشتری داشته است.



AI B: Additive pct. (%)

Fig. 15 Aluminum absorption rate at 9.5 GHz with different percentages

شکل 15 میزان جذب آلومینیوم در فرکانس 9.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف



Fig. 16 Alumina absorption rate at 9.5 GHz with different percentages شکل 16 میزان جذب آلومینا در فرکانس 9.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف



Al₂O₃ B: Additive pct. (%)









جدول 7 مقايسه نتايج نمونه پيشنهادى توسط نرمافزار و نمونه ساخته شده Table 7 Compare the results of the proposed sample with the software and the sample made

	نمونه	نمونه	درصد اختلاف
Additive	Al	Al	Al
Additive pct.	4.871	4.8	-
Absorption8.5	2.854	2.8	1.89 %
Absorption9.5	1.952	1.8	7.77 %
Absorption10.5	1.475	1.3	11.86 %
Absorption11.5	0.771	0.7	9.21 %
Desirability	0.963	-	-



5% A: Additive (Type)

Fig. 20 The rate of absorption of the waves by the additives at a frequency of 10.5 GHz with 5% additives شكل 20 ميزان جذب امواج توسط افزودنىها در فركانس 10.5 گيگاهرتز با پنج

درصد افزودنی با توجه به شکلهای 21، 22 و 23 می توان مشاهده نمود که با افزایش درصد افزودنی، میزان جذب نیز افزایش می یابد. همچنین نمونه پوشش داده شده با افزودنی آلومینیوم بیشترین و آلومینا کمترین جذب را داراست.

3–5– مقایسه نمونه بهینه ساخته شده با نمونه بهینه پیشنهاد شده توسط نرمافزار

در جدول 7 مقایسه نمونه ساخته شده با نمونه بهینه پیشنهادی توسط نرمافزار نشان داده شده است.



Fig. 21 Aluminum absorption rate at 10.5 GHz with different percentages

شکل 21 میزان جذب آلومینیوم در فرکانس 10.5 گیگاهرتز با درصدهای مختلف

- [10] Neher. L. K., "Non-reflecting background for testing microwave equipment," US Patent 2656535, 1953.
- [11] Tanner. H. A., "Fibrous microwave absorber," US Patent 2977591, 1961.
- [12]Delfini. A., Albano. M., Vricella. A., Santoni. F., Rubini. G., Pastore. R., Marchetti. M., "Advanced Radar Absorbing Ceramic-Based Materials for Multifunctional Applications in Space Environment," Materials, No.11, pp.17-30, 2018.
 [13]Roeintan, A., "Investigating the role of electromagnetic absorption
- [13]Roeintan, A., "Investigating the role of electromagnetic absorption ferrite coating in radar detection of high speed crafts," In Persian, Engineering high-speed vessels, No. 51, pp. 44-49, 2017.
- [14] Eftekhari. A., "Nanostructured conductive polymers," John and sons' publication, Chapter 1, 2010.
- [15] Tahrokhani. A., "Preparation and Evaluation of Electrical Properties of Epoxy Resin Based Nanocomposites and Multi-Walled Carbon Nanotubes / Polyaniline Nanoparticles," MSc Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2015.
- [16] Online Materials Information Resource MatWeb,
- www.Matweb.com, available in 15 June 2019.
- [17] Tolstoy. I, Maxwell. J. C, A Biography, University of Chicago Press, 1983
- [18] Benisi. S., "Industrial Experimental Design Booklet," Shahid Bahonar University of Kerman, 2019

طبق مقایسه انجام شده و بررسی درصد اختلاف نمونهها، نمونه ساخته شده بطور میانگین 7.68 ٪ با نمونه پیشنهادی اختلاف داشته است. طبق مطالعات انجام شده برای رسیدن به بهترین نتیجه و افزایش میزان جذب، باید از یک ماده دی الکتریک و یک ماده مغناطیسی به عنوان جاذب استفاده نمود. با توجه به اینکه در این تحقیق تنها از ماده دی الکتریک استفاده شده است، میزان جذب و درصد اختلاف نمونه بهینه پیشنهادی توسط نر مافزار و نمونه بهینه ساخته شده قابل قبول می باشد.

همچنین طبق مشاهدات مشخص شد که بهطور کلی نمونهه ای پوشـش داده شده نسبت به نمونه بدون پوشش جذب امواج بیشتری داشتند.

4- نتیجهگیری

طبق بررسیهای انجام شده در این تحقیق، مشاهده شد که با قرار دادن یک لایه پوشش بر روی سطح یک کامپوزیت نارسانا، می توان تا حدودی سطح آن را رسانا نمود و از این طریق میزان جذب امواج را در آن افزایش و سطح مقطع راداری را کاهش داد. همانطور که بیان شد از پودرهای مختلفی برای دستیابی به این هدف استفاده میشود. در این تحقیق از پودرهای آلومینیوم، آلومینا و اکسید آهن استفاده میشود. در این یودرهای استفاده شده، پودر روی اومینیوم نتیجه بهتری نسبت به دو پودر دیگر داشت که دلیل آن رساناتر بودن این پودر می باشد. همچنین درصد افزودنی نیز تأثیر شایانی بر روی میزان جذب داشته است که بیشترین جذب در آلومینیوم با 5٪ و کمترین جذب در آلومینا با 1٪ می باشد. در نهایت نایج به شرح زیر می باشد:

- میزان جذب امواج توسط پودر آلومینیوم بیشتر است.
- به دلیل رسانایی بالاتر، آلومینیوم نسبت به دو پودر دیگر جذب بهتری دارد.
 - 3) با افزایش درصد افزودنی میزان جذب افزایش می یابد.
 - 4) آلومینا به دلیل رسانایی کم، کمترین جذب را دارا میباشد.

5- مراجع

- Alavi. M, Javadi. M. Shahvaladi., "Investigation of Radar Cross Section Reduction Methods," MSc Thesis, Imam Hussein University of Technology, Iran, 2015.
- [2] Abbas. S. M, Dixit. A. K, Chatterjee. R, Goel. T. C., "complex permeability and microwave absorption properties of ferrite– polymer composites," Journal of Magnetism and Magnetic Materials., No. 309, pp. 20-24, 2007.
- [3] Phang. S. W, Tadokoro. M, Watanabe. J, Kuramoto. N., "Microwave absorption behaviors of polyaniline nanocomposites containing TiO2 nanoparticles," Current Applied Physics., No.8, pp.391-394, 2008.
- [4] Galehdar. A, Nicholson. K. J, Rowe. W. S. T, and Ghorbani. K., "The conductivity of unidirectional and quasi isotropic carbon fiber composites," in Proceedings of the Microwave Conference (EuMC), Paris, France, pp. 882-885, 2010.
- [5] Riley, Elliot J., Lenzing, Erik H., Narayanan, Ram M., "Characterization of radar cross section of carbon fiber composite materials," Proc. of SPIE, Vol. 9461, No.3, pp. 1-8, 2015.
- [6] ArmanMehr. M., "Minimum Reflection and Radar Absorbents," International Conference on Research in Science and Engineering, Iran, 2016 (In Persian).
- [7] Petrov. V. M, Gagulin. V. V., "Microwave Absorbing Materials," Inorganic Materials., No.2, pp.93-98, 2001.
- [8] M. H. Love, P. S. Zink, P. A. Wieselmann, and H. Youngren., "Body freedom flutter of high aspect ratio flying wings," in Proceedings of the 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp. 18-21, 2005.
- [9] S. Jacobson, R. Britt, D. Dreim, and P. Kelly., "Residual pitch oscillation (RPO) flight test and analysis on the b-2 bomber," AIAA paper, 1998.