

## پوشش غیریکنواخت و موضعی هواپیما با مواد جاذب جهت دستیابی به کمترین سطح مقطع راداری با کمترین وزن ماده جاذب

داود هامون پیمان<sup>۱\*</sup>، عباس علی قنبری<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۵/۰۸/۰۳؛ پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۶)

### چکیده

در این مقاله پوشش غیریکنواخت و موضعی ماده جاذب بر روی قسمت‌های مختلف بدنه هواپیما جهت دستیابی به کمترین میزان سطح مقطع راداری با به کارگیری کمترین مقدار ممکن از ماده جاذب بررسی شده است. با توجه به وزن بالای ماده جاذب به کار گرفته شده که در حدود ۱۳ کیلوگرم در هر مترمربع است، کاهش میزان ماده جاذب راداری در کاهش وزن هواپیما بسیار مؤثر است. برای انجام محاسبات از بسته نرم‌افزار CST و روش عددی ممان و روش رهگیری پرتو استفاده شد. سطح مقطع راداری تک‌پایه و دوطایه هواپیما تحلیل شد و دیده شد که چگونه شکل می‌تواند بر سطح مقطع راداری تأثیر بگذارد و چگونه استفاده از ماده جاذب راداری می‌تواند سطح مقطع راداری را کاهش دهد.

### واژگان کلیدی

هواپیما، ماده جاذب راداری، سطح مقطع راداری، شبیه‌سازی، جاسوسی.

### ۱- مقدمه

حال، استفاده از روش‌های عددی الکترومغناطیس برای محاسبه کمیت فوق بسیار مفید است. مواد جاذب راداری انرژی را که به سمت رادار برمی‌گردد، از طریق جذب کاهش می‌دهند.

انرژی رادار از طریق یک یا چند مکانیسم تلفاتی جذب می‌شود که ممکن است شامل خواص مغناطیسی یا الکتریکی مواد شود. RAM های دی‌الکتریک از کربن به‌عنوان ماده اصلی استفاده می‌کنند، اما این مواد به‌آسانی به بدنه سلاح‌های عملیاتی اعمال نمی‌شوند و معمولاً بسیار بزرگ و در محیط‌های عملیاتی شکننده هستند. از این‌رو، جاذب‌های مغناطیسی به‌طور گسترده برای سامانه‌های عملیاتی استفاده می‌شوند. هم‌چنین، مواد مغناطیسی امتیاز فشردگی را دارند، از آن‌جایی‌که معمولاً حدود یک‌دهم ضخامت جاذب‌های دی‌الکتریک را دارند و می‌توانند بر روی بازه فرکانسی وسیعی مؤثر باشند. مکانیسم تلفاتی در جاذب‌های مغناطیسی اساساً به‌علت ممان دوقطبی مغناطیسی است. ترکیب‌هایی از آهن ماده اصلی این جاذب‌ها هستند. کربنیل آهن<sup>۳</sup> ساخته‌شده از اکسیدهای آهن (فریت‌ها) به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان ماده جاذب راداری استفاده شده‌اند. گذردهی

آگاهی از سطح مقطع راداری هواپیما نیاز صنعت هوایی است. یک شیوه به‌دست‌آوردن اطلاعات جزئی از مشخصات پراکنش یک هواپیمای جاسوسی از طریق شبیه‌سازی مدل هواپیما است. کدهای پیش‌بینی سطح مقطع راداری<sup>۱</sup> جایگزین ارزان‌تری برای اندازه‌گیری عملی این کمیت هستند [۱-۲]. در این حال، روش‌های محاسباتی در مراحل اولیه پروسه طراحی، پیش از آن‌که هواپیما به‌طور فیزیکی ساخته شود، باید به کار گرفته شوند. از طرفی، روش‌های مختلف مانند شکل‌دهی، بارگذاری فعال، بارگذاری غیرفعال و پوشش‌های RAM<sup>۲</sup> برای کاهش شناسایی استفاده شده است [۳]. در میان این روش‌ها، پوشش‌دهی به‌کمک مواد جاذب رایج‌ترین روش کاهش سطح مقطع راداری بوده است [۴]. البته، سطح مقطع راداری ممکن است با اندازه‌گیری‌های آزمایشی تعیین شود، اما چنین روشی ممکن نیست برای تمام زوایای مشاهده و ابعاد جسم عملی و قابل اعمال باشد [۵]. در این

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: d\_hamun@shirauz.ac.ir

1- Radar Cross Section

2- Radar Absorbing Material

مواد جاذب راداری (RAM) به طور معمول برای کمینه کردن پراکنش الکترومغناطیسی در تجهیزات آزمون آنتن مختلف و اهداف نظامی استفاده می‌شود. ماده RAM باید موج الکترومغناطیسی تابیده شده را با حداقل مقدار ممکن بازتاب نماید و تلفات کافی در ضخامت تعبیه شده فراهم کند. رایج ترین پارامترها برای تعیین عملکرد RAM، ضخامت، بازه فرکانسی مؤثر و زاویه تابش است. معمولاً دو پارامتری که برای ارزیابی RAM به کار می‌روند، ضریب انعکاس ( $\Gamma$ ) و پهنای باند کاری (BW) هستند. یک معیار رایج استفاده شده برای تعیین یک طراحی RAM موفق، کاهش ۱۰ dB یا بیش تر در سطح مقطع راداری جسم در فرکانس‌های مورد نظر است. ماده RAM باید تشعشع الکترومغناطیسی تابشی را با حداقل مقدار ممکن منعکس نماید و تلفات کافی در ضخامت مجاز فراهم کند. اساساً، RAM یک شبکه تلفی توزیع شده است که امپدانس فضای آزاد را به ماده جاذب یا به سطح فلزی رسانا پشت آن تطبیق می‌دهد [۱۰]. مواد تلف دار امواج الکترومغناطیسی را که از آن‌ها عبور می‌کنند، تضعیف می‌کنند. تلفات می‌تواند با گذردهی الکتریکی یا مغناطیسی نسبی مختلط مدل شوند.

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j \epsilon''_r \quad (2)$$

$$\mu_r = \mu'_r - j \mu''_r \quad (3)$$

که وجود جزء موهومی، اتلاف توان در ماده را به شکل حرارت تضمین می‌کند. طراحی RAM، بده بستانی بین ضریب انعکاس و تلف در واحد ضخامت است. اگر انعکاس کم مطلوب باشد، ضخامت ماده در طول موج زیاد خواهد شد.

ساده ترین شکل RAM جاذب‌های تشدید تک لایه مانند صفحه سلیزبری<sup>۱</sup> یا لایه دالان باخ<sup>۲</sup> هستند. لایه دالان باخ شامل یک ماده تلفی همگن بر روی سطح فلزی می‌شود. انعکاس در سطح ماده به علت عدم تطبیق امپدانس بین فضای آزاد و امپدانس ذاتی ماده به وجود می‌آید که برای تابش‌های عمودی به صورت رابطه زیر است [۱۰]:

$$r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\frac{Z}{Z_0} - 1}{\frac{Z}{Z_0} + 1} \quad (4)$$

که در آن،  $Z_0$  امپدانس فضای آزاد و  $Z$  امپدانس ذاتی ماده است. اگرچه مواد جاذب راداری مغناطیسی در مقایسه با همتای دی الکتریک آن‌ها مفید هستند، حضور عنصر آهن در ساختار مولکولی آن‌ها باعث می‌شود، این مواد، حتی در حجم کم، جرم

الکتریکی ( $\epsilon$ ) و پذیرفتاری مغناطیسی ( $\mu$ ) دو مشخصه‌ای هستند که به شدت در اثرگذاری این جاذب‌ها دخیل هستند. هر دوی آن‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای با فرکانس به شیوه‌های مختلفی برای مواد گوناگون تغییر می‌کنند. برای آن که یک جاذب مؤثر باشد، باید ضخامتی داشته باشد که در فرکانس مورد نظر نزدیک یک چهارم طول موج باشد. لایه فریت با ضخامت طول موج حدود یک چهارم بر روی یک سطح رسانا به عنوان لایه تطبیق امپدانس و همچنین جاذب عمل می‌کند [۶].

این مقاله، سطح مقطع راداری یک مدل هواپیما را با پوشش موضعی ماده جاذب راداری با استفاده از روش ممان و روش دنباله‌گیری پرتو تحلیل می‌کند. مقالات [۶-۷] سطح مقطع راداری یک مدل هواپیما با پوشش موضعی را با استفاده از روش اپتیک فیزیکی به دست آورده‌اند که نسبت به روش ممان از دقت کمتری برخوردار است. مقالات [۸-۹] سطح مقطع راداری یک مدل هواپیما را با روش ممان و استفاده از توابع پایه درجه بالاتر به دست آورده‌اند، اما در آن‌ها از ماده جاذب راداری استفاده نشده است.

## ۲- سطح مقطع راداری و استفاده از مواد جاذب برای کاهش آن

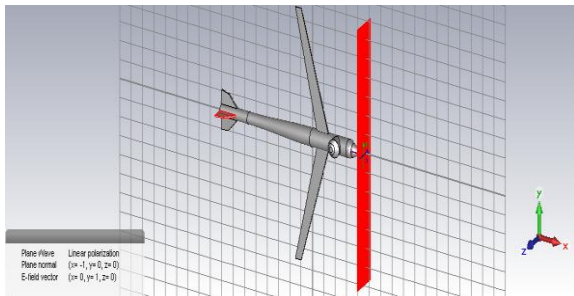
سطح مقطع راداری معیاری برای سنجش توانایی یک هدف در انعکاس سیگنال‌های رادار در جهت گیرنده رادار است، یعنی نسبت توان پراکنده شده در واحد زاویه فضایی در جهت رادار به چگالی توان دریافت شده توسط هدف است. هرچه مقدار سطح مقطع راداری در یک جهت خاص بیشتر باشد، آن هدف امواج رادار را در آن جهت بیشتر منعکس می‌کند. سطح مقطع راداری ترکیبی پیچیده از ویژگی‌های ذاتی مختلف هدف نظیر شکل، اندازه، جنس، سختی سطح و همچنین مشخصات موج رادار نظیر قطبش، فرکانس و زاویه تابش است. اگر یک موج صفحه‌ای به یک هدف تابیده شود، سطح مقطع راداری هدف با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

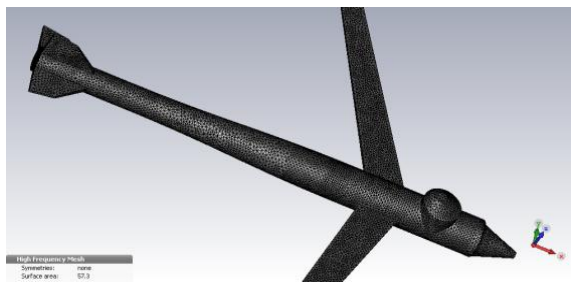
که در آن،  $E_s$  شدت میدان الکتریکی پراکنده شده در جهت مورد نظر،  $E_i$  شدت میدان الکتریکی تابیده شده به هدف و  $r$  فاصله بین هدف و رادار است. واحد سطح مقطع راداری، مترمربع،  $m^2$  است اما به علت تغییرات زیاد سطح مقطع راداری برای یک هدف، معمولاً با dBsm ( $RCS = 10 \log(\sigma/1m^2)$ ) بیان می‌شود.

x و قطبش آن در جهت y است.

بسته نرم‌افزاری CST MWS برای شبیه‌سازی سطح مقطع راداری هواپیما استفاده شد. از حل‌کننده معادله انتگرالی<sup>۱</sup> CST MWS در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz و از Asymptotic Solver در فرکانس ۸ GHz استفاده شد. حل‌کننده معادله انتگرالی CST MWS از گسسته‌سازی روش ممان (MOM) با فرمول‌های انتگرال سطحی میدان الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌کند. برای کاهش پیچیدگی عددی از رهیافت<sup>۲</sup> MLFM استفاده می‌شود. این موجب می‌شود تا از روش‌های تمام حجم مؤثرتر باشد و خصوصاً قابل اعمال به اهداف در بازه از حدود ده تا چندصد طول موج باشد. محاسبه Asymptotic، تحلیلی در حوزه فرکانس براساس روش دنباله‌گیری پرتو (SBR<sup>۳</sup>) است. این حل‌کننده معمولاً برای ساختارهای خیلی بزرگ از نظر الکتریکی که قابل تحلیل با روش‌های دیگر الکترومغناطیسی نیستند، استفاده می‌شود.



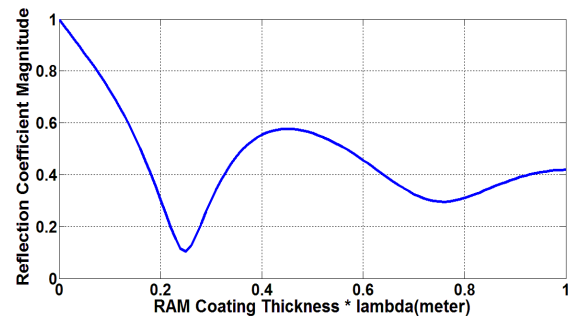
شکل (۲): مدل هواپیما در نرم‌افزار CST



شکل (۳): مش‌بندی سطحی هواپیما در نرم‌افزار CST در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz

شبیه‌سازی در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz و ۸ GHz انجام گرفته است که به ترتیب باند L و X را نشان می‌دهند. در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz، طول هواپیما  $\lambda$  ۸۲/۶، فاصله بین بال‌های هواپیما  $\lambda$  ۸۸، و ارتفاع آن  $\lambda$  ۱۰/۵ است. یک موج الکترومغناطیسی

قابل ملاحظه‌ای داشته باشند. به‌عنوان مثال، جرم  $m^2$  ۱ از ماده جاذب استفاده‌شده در این پژوهش با ضخامت ۰/۲۷ cm، ۱۳/۲ Kg است. هم‌چنین افراد متخصص و آموزش‌دیده برای پوشاندن ماده جاذب به‌طور یکنواخت بر روی سطح هواپیما مورد نیاز است [۱۱]. برای آن‌که ماده جاذب زیاد سنگین نشود، باید میزان ماده جاذب را به حداقل کاهش داد و تغییری در کاهش سطح مقطع راداری ایجاد نشود. این، هم‌چنین قیمت را کاهش می‌دهد. در شکل (۱)، اندازه ضریب انعکاس برای تابش عمودی برحسب ضخامت‌های مختلف ماده جاذب استفاده‌شده در این مقاله (بیان‌شده برحسب طول موج) که پارامترهای آن در بخش ۴ آمده است، در فرکانس 2 GHz نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، بیش‌ترین کاهش در سطح مقطع راداری زمانی به‌دست می‌آید که ضخامت پوشش حدود  $\lambda_p/4$  باشد. همین ضخامت که حدود ۰/۲۷ cm می‌شود، برای ماده جاذب در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد.



شکل (۱): اندازه ضریب انعکاس برای تابش‌های عمودی با ضخامت‌های مختلف RAM (برحسب طول موج) استفاده‌شده در این مقاله در فرکانس 2 GHz

### ۳- مدل‌سازی با نرم‌افزار CST

یک هواپیما با طول ۱۲/۴ m، فاصله بین بال‌های ۱۳/۲ m و ارتفاع ۱/۵۸ m، به‌طور کامل در نرم‌افزار CST مدل‌سازی شد. طراحی هواپیما در نرم‌افزار CST این امکان را فراهم کرد تا بتوان به بخش‌های مختلف آن به‌طور یکتا مواد جاذب معینی را اختصاص داد. در صورتی‌که از یک مدل پیش طراحی‌شده استفاده می‌شد، تنها ممکن بود تا یک ماده جاذب خاص به تمام بخش‌های آن به‌طور یکپارچه اختصاص داد. در این تحقیق، هواپیمای خاصی برای این مدل‌سازی مدنظر نبوده بلکه به‌دست‌آوردن ایده برای بهترین نحوه پوشش یک هواپیما با مواد جاذب مورد نظر است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، دماغه هواپیما در طول محور x و بال‌ها در طول محور y قرار گرفته‌اند. موج صفحه‌ای تابیده‌شده به هواپیما در جهت منفی

1- Integral Equation Solver  
2- Multilevel Fast Multiple Method  
3- Shooting and Bouncing Rays

جاذب‌های تشدید، فضای آزاد و نازک هستند که در بازه فرکانسی ۱ GHz تا ۱۸ GHz در دسترس هستند. در فرکانس‌های در بازه ۱ GHz تا ۲ GHz، انعکاس در فرکانس تشدید اندکی کم‌تر از ۲۰ dB- است. مواد جاذب ECCOSORB® SF به‌طور ایده آل برای کاربردهایی که یک ماده جاذب نازک لازم است و عملکرد پهن باند نیاز نیست، استفاده می‌شود. برای عملکرد مناسب، ECCOSORB® SF باید بر روی یک سطح فلزی قرار بگیرد. این مواد جاذب برای پوشش سطوح فلزی به‌منظور تضعیف جریان‌های سطحی، حذف انعکاس‌ها در اتاقک‌های میکروویو و میرا کردن تشدیدهای حفره‌ها استفاده می‌شود. هم‌چنین، از آن برای پوشش بدنه خارجی هواپیما خصوصاً جاهایی که توان زیادی حضور دارد، استفاده می‌شود.

در شبیه‌سازی، از ماده جاذب SF-2 استفاده شد. هر مترمربع از این ماده جاذب ۱۳/۲ Kg وزن دارد. آزمون استاندارد صنعتی برای اندازه‌گیری گازهای خروجی در چسب‌ها و مواد، ASTM E95 است. این آزمون توسط NASA برای غربال مواد با گازهای خروجی کم<sup>۲</sup> به منظور استفاده در فضا توسعه داده شد. این آزمون محتوای فرار را در نمونه‌های مواد که در محفظه خلاء گرم قرار گرفته‌اند، اندازه‌گیری می‌کند. دو پارامتر<sup>۳</sup> TML و<sup>۴</sup> CVCM که به ترتیب نشان‌دهنده جرم کل از دست داده و مواد متراکم فرار جمع شده هستند، در این آزمون اندازه‌گیری می‌شوند و برای عبور از این آزمون باید  $1\% < TML$  و  $0.1\% < CVCM$  باشند [۱۲]. پارامترهای TML و CVCM برای ماده SF-2 به ترتیب مقادیر ۰/۱۳٪ و ۰/۰۶٪ را دارند (ECCOSORB®, ۲۰۱۱). گذردهی الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی حقیقی و موهومی ماده SF-2 در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق اطلاعات داده‌شده در کاتالوگ مواد جاذب ECCOSORB® SF، ماده SF-2 در فرکانس تشدید ۲ GHz با ضخامت ۰/۲۷ cm باید حداقل انعکاس را داشته باشد [۱۳].

پس از بررسی امپدانس سطحی PEC پوشیده‌شده با ماده جاذب و انجام تعداد از شبیه‌سازی‌ها دیده شد که این ماده در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz حداقل انعکاس را دارد که برای ادامه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد (شکل ۴).

صفحه‌ای با دامنه یک و فرکانس داده‌شده به دماغه هواپیما تابیده شده است و سطح مقطع راداری در صفحه افقی به‌دست آمده است. شبیه‌سازی به‌کمک یک رایانه شخصی Core i7 شرکت DELL با ۴ GB حافظه RAM انجام شد.

پس از آن که مدل هندسی طراحی و منابع تابش و شرایط مرزی مناسب اختصاص داده شدند، مدل باید مش‌بندی شود. در روش‌های شبیه‌سازی الکترومغناطیسی، دامنه محاسباتی باید به سلول‌های کوچکی تقسیم شود که بر روی آن‌ها معادلات ماکسول حل شوند. نوع و اندازه مش‌بندی بر دقت و سرعت شبیه‌سازی‌ها تأثیر می‌گذارد. نرم‌افزار CST انواع مختلفی از مش‌ها و الگوریتم‌ها را ارائه می‌دهد که در این‌جا از مش‌بندی سطحی مثلثی استفاده می‌کنیم. این هواپیما با ۲۶۲۹۲ مش مثلثی در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz مدل شده است. مدل مش‌بندی شده هواپیما در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz در شکل (۳) نشان داده شده است. زمان اجرای شبیه‌سازی در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz برای سطح مقطع راداری دوپایه بین ۲۵۵ ثانیه تا ۱۵۲۹ ثانیه با توجه به نحوه پوشش هواپیما با ماده جاذب طول کشید.

همین زمان برای محاسبه سطح مقطع راداری تک‌پایه بسته به نحوه پوشش با ماده جاذب از ۲۴۸۰۶ ثانیه (تقریباً ۷ ساعت) تا ۴۰۱۹۲ (تقریباً ۱۱ ساعت) ثانیه طول کشید. علت اختلاف قابل توجه زمان شبیه‌سازی‌ها در دو حالت دوپایه و تک‌پایه این است که در حالت دوپایه یک موج به دماغه هواپیما تابیده می‌شود و انعکاس‌های آن در ۳۶۰ درجه به‌دست می‌آید، اما در حالت تک‌پایه، ۳۶۰ موج به هواپیما تابیده می‌شود و انعکاس‌های آن در زاویه مربوطه به‌دست می‌آید که لازم است تا زمان بسیار بیشتری برای محاسبه آن سپری شود. بیش‌ترین زمان لازم برای اجرای شبیه‌سازی‌ها در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz، ۹۰۷ ثانیه بود. حافظه پیک مورد نیاز در تمام شبیه‌سازی‌ها حدود ۲ گیگابایت بود.

#### ۴- پوشش موضعی<sup>۱</sup> ماده جاذب راداری بر روی بدنه هواپیما

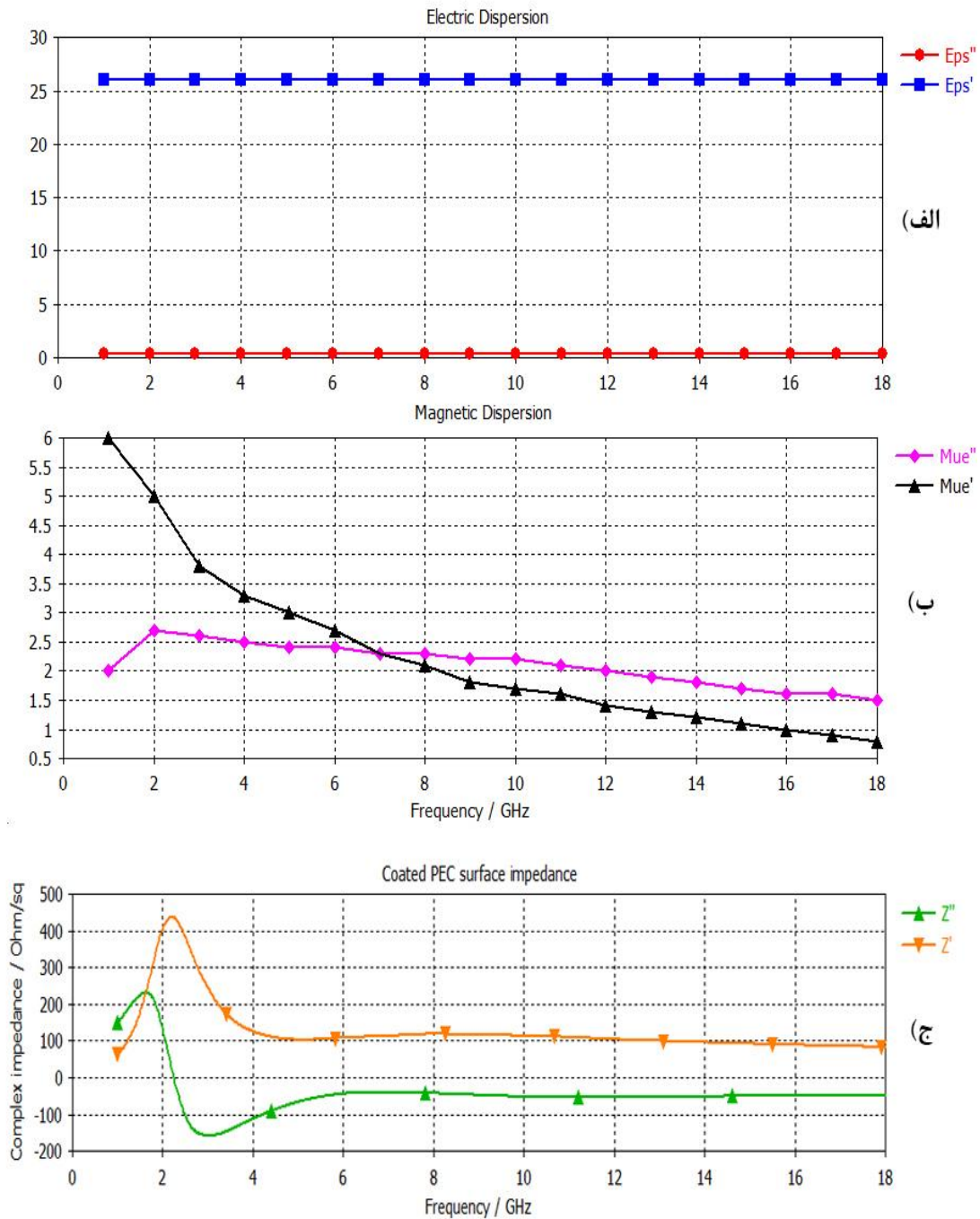
ماده جاذب راداری که در شبیه‌سازی‌ها برای کاهش سطح مقطع راداری استفاده شد، از محصولات Emerson & Cuming Microwave بود. مواد جاذب ECCOSORB® SF یک سری از

2- Low Outgassing

3- Total Mass Loss

4- Collected Volatile Condensable Materials

1- Partially Coating



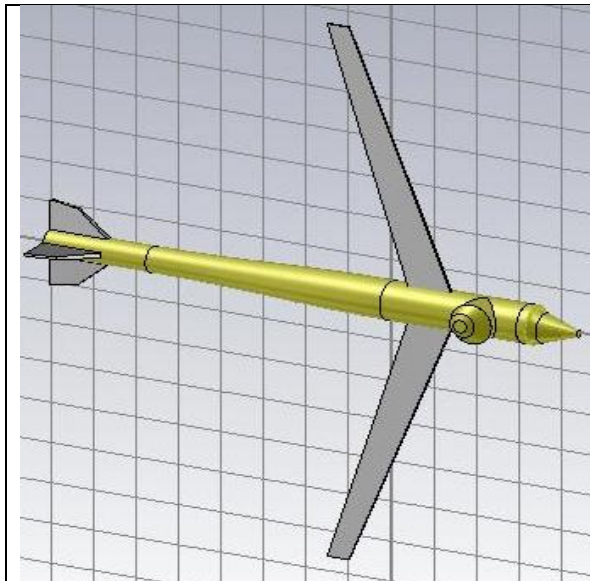
شکل (۴): از ماده جاذب راداری SF-2 برای پوشش هواپیما استفاده شد. الف) گذردهی الکتریکی حقیقی و موهومی ماده SF-2 (ب) پذیرفتاری مغناطیسی حقیقی و موهومی ماده SF-2 (ج) امپدانس سطحی PEC پوشیده شده با ماده جاذب SF-2. این نمودارها پس از انتخاب ماده جاذب SF-2 و اعمال آن به بدنه هواپیما توسط نرم افزار CST به دست آمده اند.

حالت سوم بر روی کل هواپیما ماده جاذب راداری قرار گرفت. به شکل های (۵) تا (۸) مراجعه کنید. رنگ زرد سطوحی را نشان می دهد که با ماده جاذب پوشیده شده اند و رنگ خاکستری نشان دهنده سطوحی است که جنس آن ها رسانای الکتریکی کامل است.

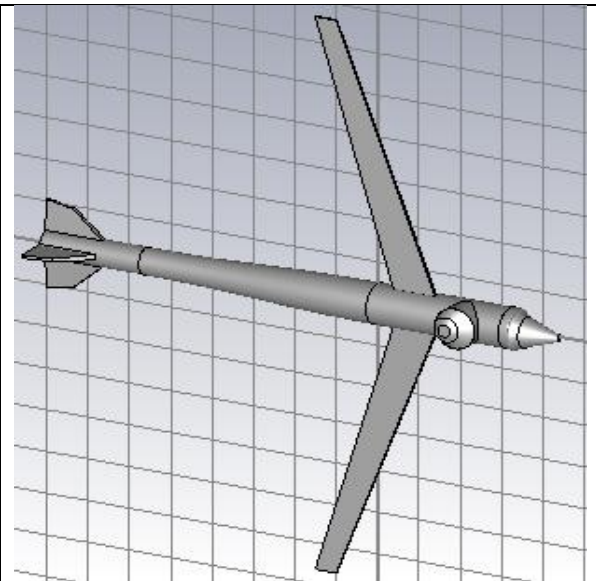
پوشش های مختلف RAM بر روی هواپیما در نظر گرفته شد. در حالت اول، تنها بر روی بخشی از هواپیما یعنی بال ها<sup>۱</sup> و تثبیت کننده ها<sup>۲</sup> ماده جاذب راداری قرار گرفت. در حالت دوم، بدنه هواپیما و دماغه آن با ماده جاذب راداری پوشیده شد و در

<sup>1</sup> Wing

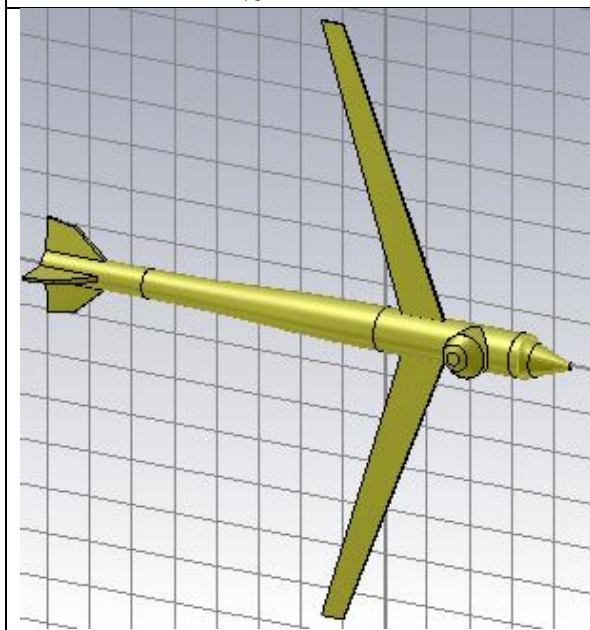
<sup>2</sup> Stabilizer



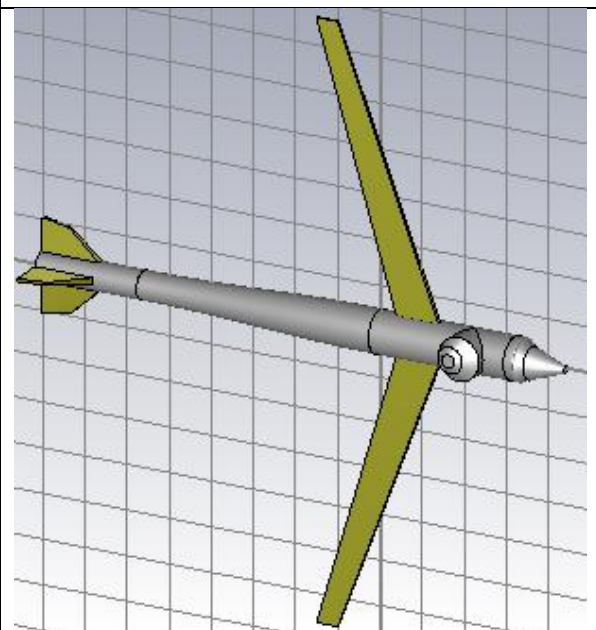
شکل (۷): بدنه هواپیما و دماغه آن با ماده جاذب راداری پوشیده شده است. (حالت دوم)



شکل (۵): مدل هواپیما با بدنه PEC



شکل (۸): کل هواپیما با ماده جاذب پوشیده شده است. (حالت سوم)



شکل (۶): بال‌ها و تثبیت‌کننده‌ها با ماده جاذب راداری پوشش داده شده‌اند (حالت اول).

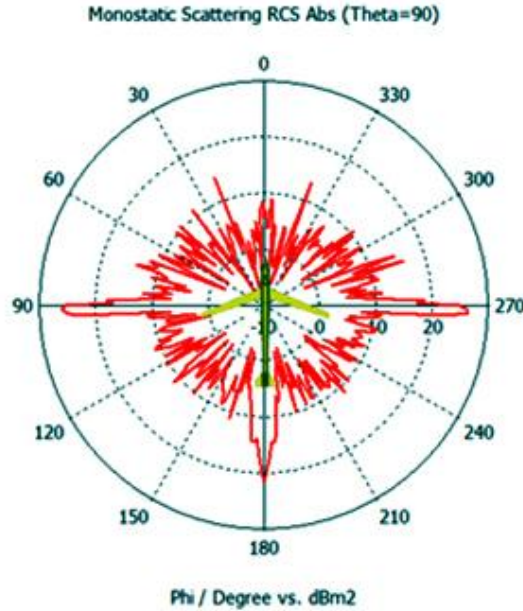
قطبی نشان می‌دهد. شکل (۱۰)، سطح مقطع راداری تک‌پایه هواپیمای PEC و پوشیده‌شده با RAM را در سه حالت مختلفی که در بخش قبلی مطرح شد، نشان می‌دهد. تحلیل سطح مقطع راداری نشان می‌دهد که دماغه هواپیما سهم مهمی در پراکندگی دارد و میزان سطح مقطع راداری در آن به  $5/78 \text{ dBm}^2$  با توجه به شکل (۱۰) می‌رسد. با افزایش زاویه  $\theta$ ، بخش پهن هواپیما به

### ۵- سطح مقطع راداری تک‌پایه هواپیما

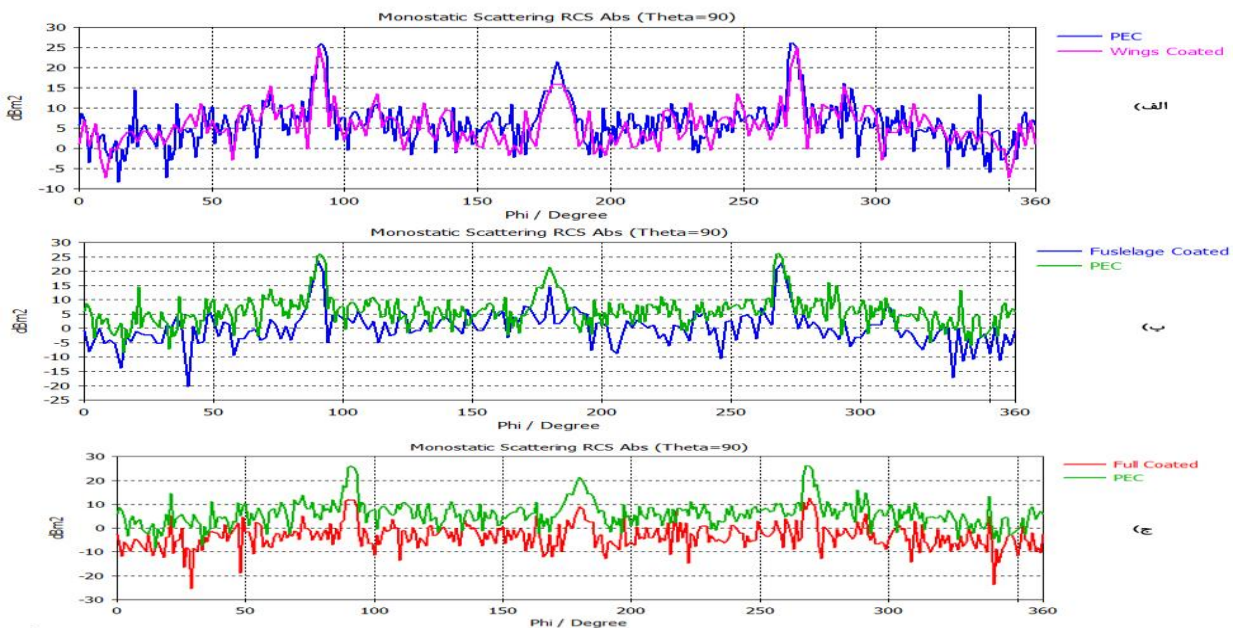
سطح مقطع راداری تک‌پایه هواپیما در فرکانس  $1/925 \text{ GHz}$  با استفاده از روش ممان در نرم‌افزار CST تحلیل شده است. سطح مقطع راداری تک‌پایه در صفحه  $\theta=90^\circ$  درجه برای قطبش افقی به‌دست آمد شکل (۹) سطح مقطع راداری تک‌پایه هواپیما در حالت رسانای الکتریکی کامل در فرکانس  $1/925 \text{ GHz}$  به صورت

قرار می‌گیرد. مقدار سطح مقطع راداری بیشینه  $25/37 \text{ dBm}^2$  در ۹۱ درجه به علت لبه‌های بال‌ها است.

RCS کم می‌کند. سطح مقطع راداری پیک با  $14/47 \text{ dBm}^2$  در ۲۱ درجه به علت بخش استوانه‌ای هواپیما است که در مقابل رادار



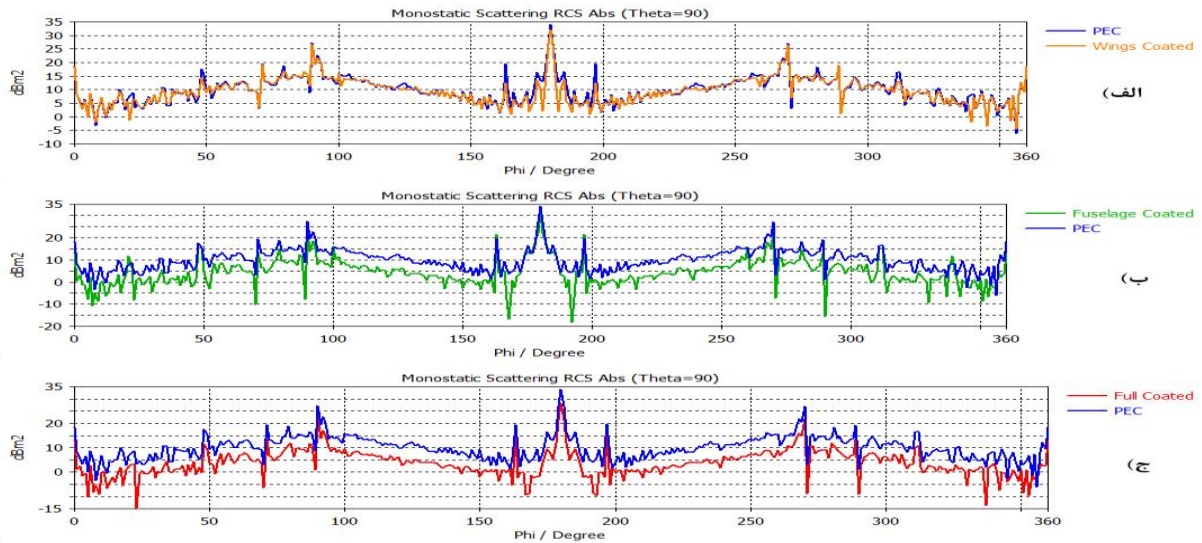
شکل (۹): سطح مقطع راداری تک پایه هواپیما در فرکانس  $1/925 \text{ GHz}$ . قطبش موج صفحه‌ای تابیده شده افقی است.



شکل (۱۰): مقایسه بین سطح مقطع راداری تک پایه هواپیما در حالت رسانای الکتریکی کامل و پوشیده شده با ماده جاذب در فرکانس  $1/925 \text{ GHz}$ . الف) بال‌ها و تثبیت کننده‌ها با ماده جاذب پوشیده شده است. ب) بدنه با ماده جاذب پوشیده شده است. ج) کل هواپیما با ماده جاذب پوشیده شده است.

موضعی با ماده جاذب، سطح مقطع راداری را کاهش می‌دهد و این کاهش قابل مقایسه با پوشش دهی کامل هواپیما است، پس می‌توان این نتیجه را گرفت که نیازی نیست تا یک هدف را به شکل کامل پوشش داد و در عوض، تنها کافی است تا مراکز اصلی پراکنش را پوشش داد.

سطح مقطع راداری  $20/86 \text{ dBm}^2$  در  $180$  درجه به علت سطح انحنادار بخش عقبی هواپیما است. چون هواپیما نسبت به صفحه  $X-Z$  متقارن است، همین تحلیل را می‌توان برای  $\phi = 180$  تا  $360$  درجه انجام داد. هم چنین، شکل (۱۱)، سطح مقطع راداری تک پایه هواپیما را در فرکانس  $8 \text{ GHz}$  نشان می‌دهد. شکل‌های (۱۰) تا (۱۱) نشان می‌دهد که پوشش دهی



شکل (۱۱): مقایسه بین سطح مقطع راداری تک پایه هواپیما در حالت رسانای الکتریکی کامل و پوشیده شده با ماده جاذب در فرکانس ۸ GHz. الف) بال‌ها و تثبیت‌کننده‌ها با ماده جاذب پوشیده شده است. ب) بدنه با ماده جاذب پوشیده شده است. ج) کل هواپیما با ماده جاذب پوشیده شده است.

روبرو به هواپیما تابیده می‌شود، به‌علت زاویه منفرجه بین بال‌ها و بدنه هواپیما سطح مقطع راداری کاهش می‌یابد، اما درحالی‌که از پشت، موج صفحه‌ای به هواپیما تابیده می‌شود، به‌علت زاویه حاده بین بال‌ها و بدنه هواپیما سطح مقطع راداری افزایش می‌یابد.

جدول (۱) مقادیر سطح مقطع راداری میانگین را در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz با واحد مترمربع ( $m^2$ )، در حالت‌های پوشیده شده با ماده جاذب و بدون پوشش با ماده جاذب در سه بازه ۱۱ درجه در بخش‌های روبرو، جانب و پشتی هواپیما نشان می‌دهد. داده‌های جدول (۱) نشان می‌دهد درحالی‌که موج صفحه‌ای از

جدول (۱): مقایسه بین سطح مقطع راداری تک پایه میانگین هواپیما در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz در حضور ماده جاذب و عدم حضور آن

سطح مقطع راداری میانگین به $m^2$			بدون ماده جاذب		موج تابیده شده	
پوشیده شده با ماده جاذب						
کل هواپیما	بدنه	بال‌ها				
۰/۱۷	۰/۴۳	۱/۹۳	۳/۴۳		۵° تا ۳۵۵°	روبرو
۲/۵۷	۱۶/۵۶	۱۹/۵	۴۲/۸۵		۹۵° تا ۸۵°	جانبی
۲/۵۳	۲/۸۸	۲۸/۸۴	۴۲/۷۶		۱۷۵° تا ۱۸۵°	پشت

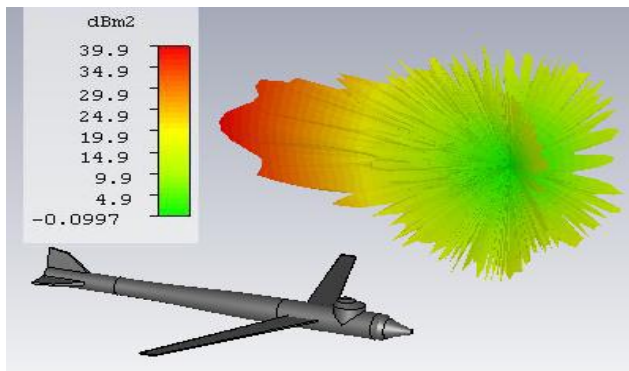
می‌شود. برای یک موج صفحه‌ای تابشی، دماغه هواپیما مانند یک منبع نقطه‌ای عمل می‌کند. در این حال، سطح مقطع راداری با مقدار حداقل  $5/78 \text{ dBm}^2$  در صفر درجه دیده می‌شود. با افزایش زاویه  $\theta$ ، بدنه هواپیما به سطح مقطع راداری کمک می‌کند و مقدار RCS را افزایش می‌دهد. سطح مقطع راداری بیشینه  $14/48 \text{ dBm}^2$  در  $43^\circ$  درجه به دلیل پراکنش موج از لبه بال‌ها است و افزایش سطح مقطع راداری پس از آن به دلیل پراکنش موج از بخش استوانه‌ای بدنه هواپیما اتفاق می‌افتد. سطح مقطع راداری بیشینه  $39/9 \text{ dBm}^2$  در  $180^\circ$  درجه به علت سطح انحنا دار بخش عقبی هواپیما و هم‌چنین به دلیل پراکنش مستقیم دیده می‌شود. بنابراین، با توجه به اشکال (۱۲) و (۱۴)، می‌توان نتیجه

## ۶- سطح مقطع راداری دوپایه هواپیما

شکل (۱۲)، سطح مقطع راداری دوپایه هواپیما را در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz، در حالت رسانای الکتریکی کامل به شکل قطبی نشان می‌دهد. در این حالت، یک موج به دماغه هواپیما تابیده می‌شود و انعکاس‌های آن در  $360^\circ$  درجه به دست می‌آید. سطح مقطع راداری دوپایه سه‌بعدی همراه با هواپیما در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz در حالت رسانای الکتریکی کامل در شکل (۱۳) نشان داده شده است. نتایج تحلیل سطح مقطع راداری دوپایه در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz در شکل (۱۴) نشان داده شده است. طبق این نتایج، برای یک موج صفحه‌ای تابشی، پیک‌هایی در  $43^\circ$  و  $180^\circ$  درجه وجود دارد و یک مقدار کمینه در صفر درجه مشاهده



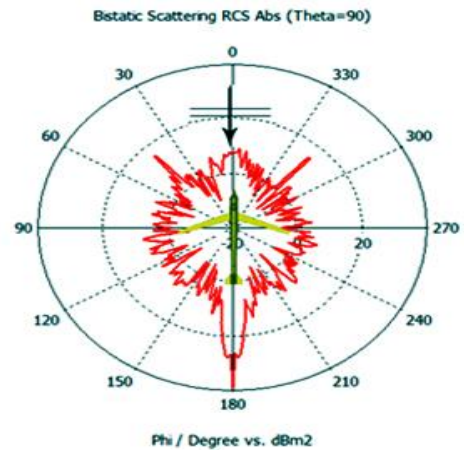
(۱۹) نشان داده شده است. مشاهده و بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که چگونه استفاده از ماده جاذب راداری می‌تواند باعث کاهش چگالی جریان سطحی شود. همان‌طور که این اشکال نشان می‌دهد، اندازه چگالی جریان در لبه بال‌ها نسبت به بقیه بال‌ها بیشتر است و بنابراین، نقش مهم‌تری در تعیین سطح مقطع راداری دارد.



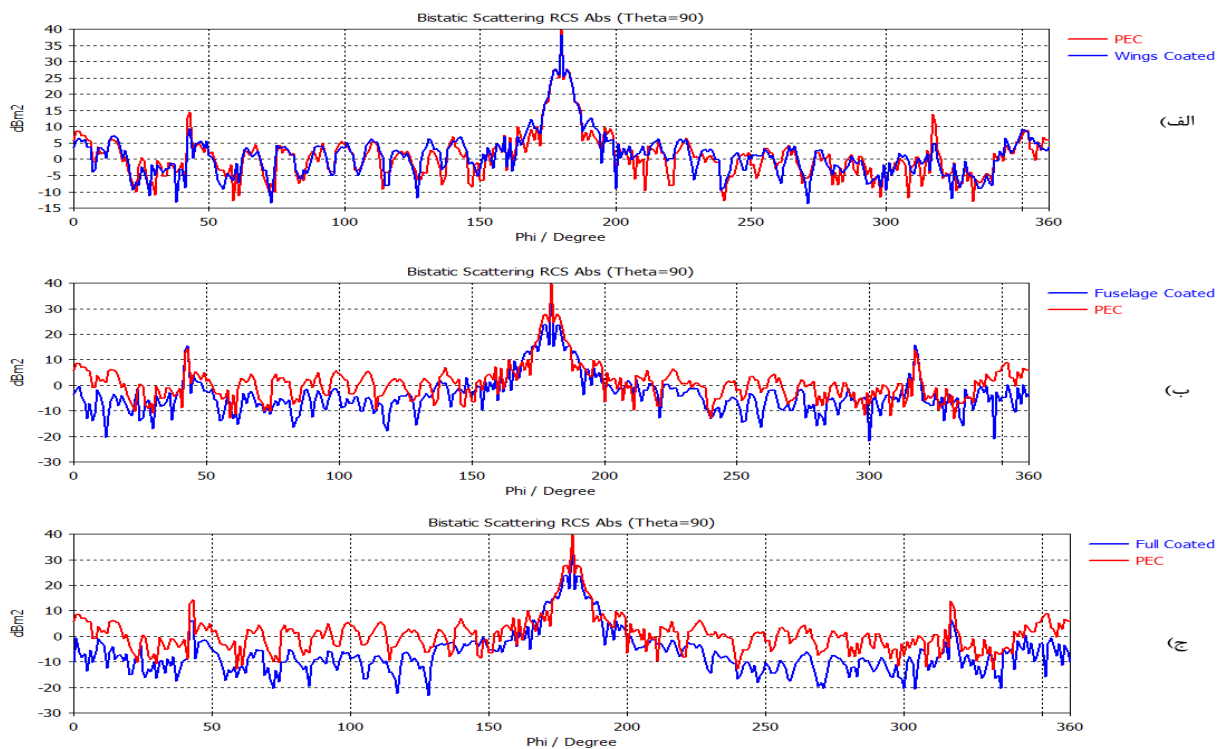
شکل (۱۳): سطح مقطع راداری دوپایه هواپیما در سه بعد در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz

گرفت که سهم اصلی را در سطح مقطع راداری بخش استوانه‌ای هواپیما، گوشه‌های بال‌ها و لبه‌های بال‌ها دارد. همچنین، شکل (۱۵) سطح مقطع راداری دو پایه هواپیما را در فرکانس ۸ GHz نشان می‌دهد.

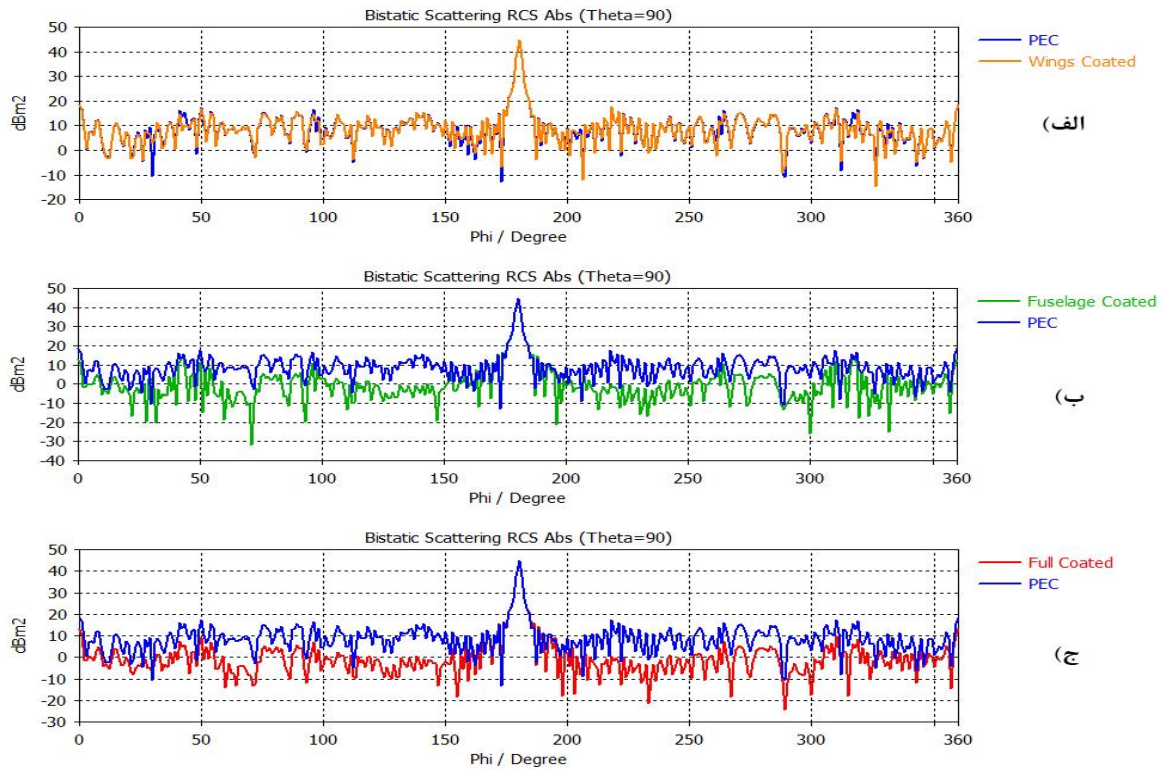
اندازه چگالی جریان برای هواپیمای بدون پوشش و پوشیده‌شده با ماده جاذب در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz، در شکل‌های (۱۶) تا



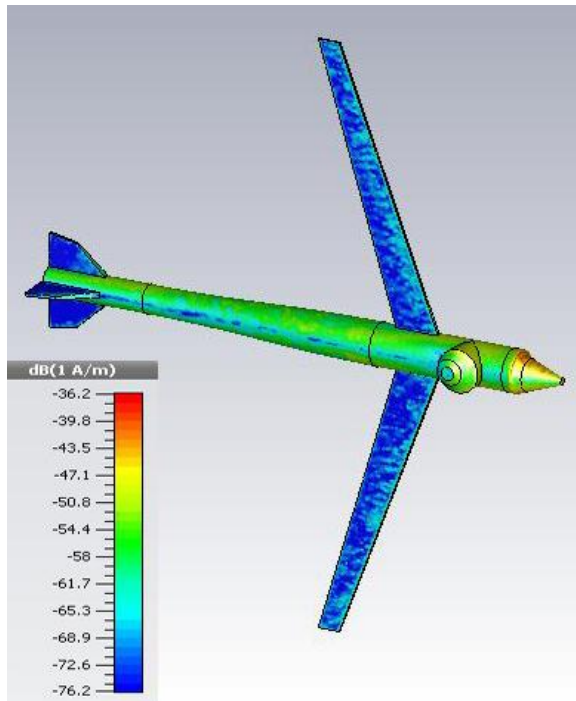
شکل (۱۴): سطح مقطع راداری دوپایه هواپیما در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz موج صفحه‌ای تابیده‌شده به هواپیما در جهت منفی X و قطبش آن در جهت Y است.



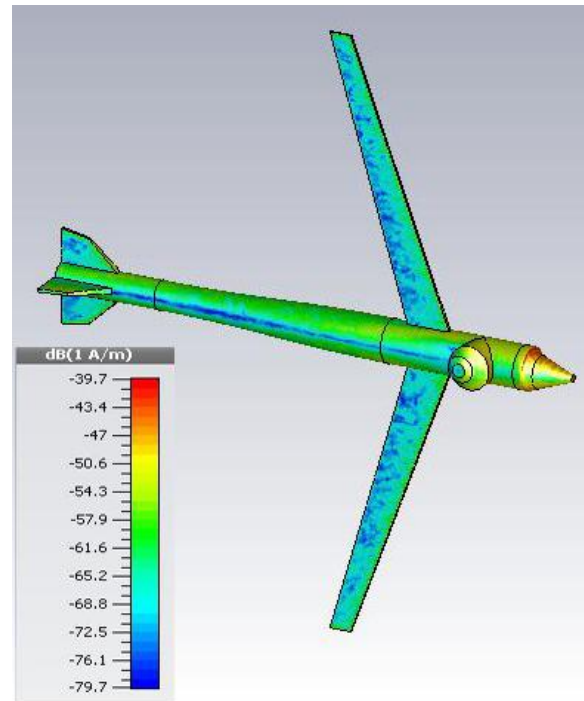
شکل (۱۵): مقایسه بین سطح مقطع راداری دوپایه هواپیما در حالت بدون پوشش و پوشیده‌شده با ماده جاذب در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz (الف) بال‌ها و تثبیت‌کننده‌ها با ماده جاذب پوشیده شده است. (ب) بدنه با ماده جاذب پوشیده شده است. (ج) کل هواپیما با ماده جاذب پوشیده شده است.



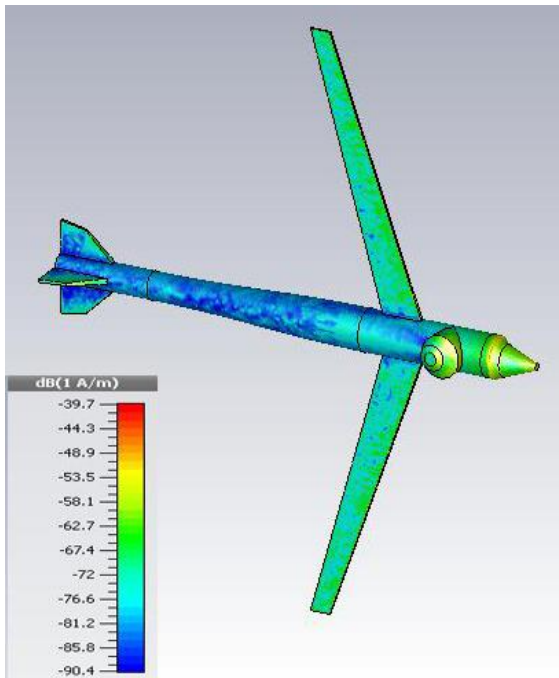
شکل (۱۵): مقایسه بین سطح مقطع راداری دوپایه هواپیما در حالت بدون پوشش و پوشیده شده با ماده جاذب در فرکانس ۸ GHz (الف) بال‌ها و تثبیت کننده‌ها با ماده جاذب پوشیده شده است. (ب) بدنه با ماده جاذب پوشیده شده است. (ج) کل هواپیما با ماده جاذب پوشیده شده است.



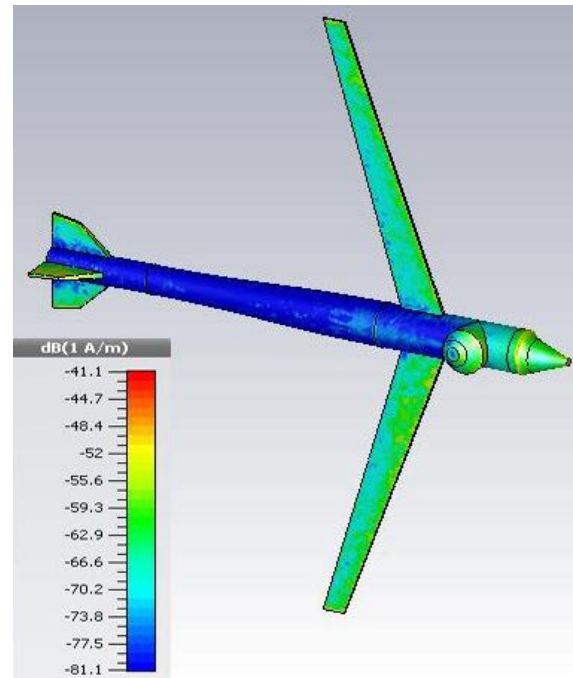
شکل (۱۷): اندازه چگالی جریان (بال‌ها و تثبیت کننده‌ها با ماده جاذب پوشیده شده است).



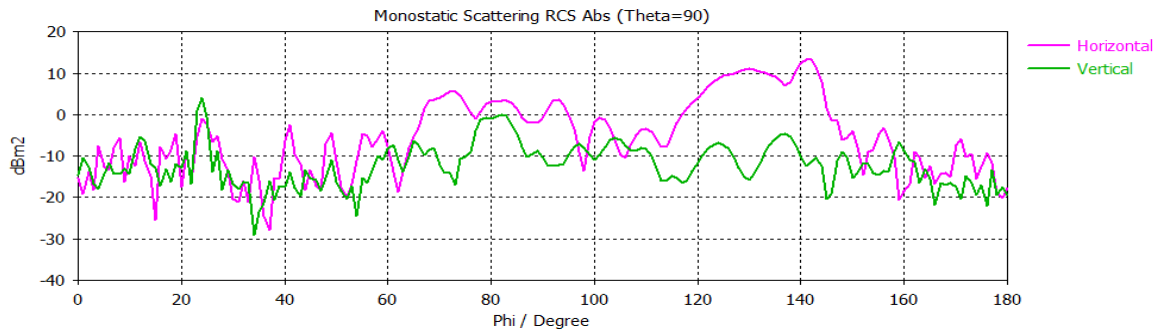
شکل (۱۶): اندازه چگالی جریان در حالت بدون پوشش، با بدنه هادی کامل (PEC).



شکل (۱۹): اندازه چگالی جریان (کل هواپیما با ماده جاذب پوشیده شده است).



شکل (۱۸): اندازه چگالی جریان (بدنه و دماغه با ماده جاذب پوشیده شده است).



شکل (۲۰): سطح مقطع راداری تک پایه بال هواپیما بدون ماده جاذب در قطبش های افقی و عمودی

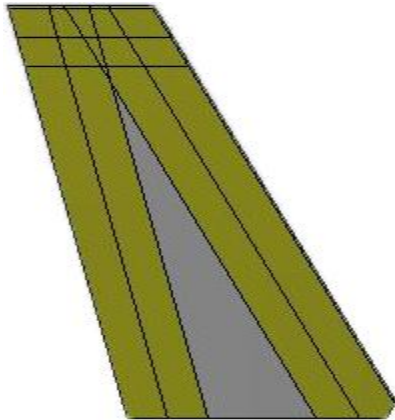
جدول (۲): سطح مقطع راداری میانگین تک پایه برای بال هواپیما در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz در حالت های مختلف بر حسب  $dBm^2$

سطح مقطع راداری میانگین به $dBm^2$				بدون ماده جاذب	موج تابیده شده
پوشیده شده با ماده جاذب					
حالت سوم	حالت دوم	حالت اول			
-۱۹/۴	-۱۶/۵	-۱۰	-۵/۵	قطبش افقی	
-۲۲/۲	-۲۰/۴	-۱۸/۷	-۱۲/۱	قطبش عمودی	

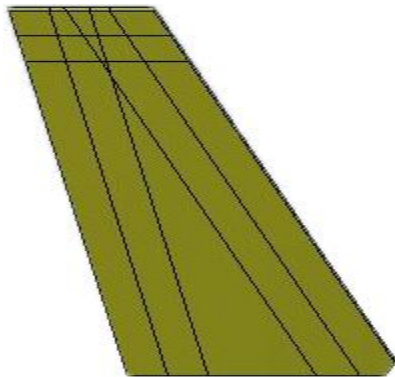
۸ cm است. در این شکل محور z عمود بر صفحه بال به سمت بیرون صفحه و محور x ها به سمت راست صفحه است. سطح مقطع راداری تک پایه در صفحه  $\theta = 90^\circ$  و برای تابش های موج الکترومغناطیسی با  $\varphi = 0^\circ \sim 180^\circ$  قطبش های افقی و عمودی با ماده جاذب و بدون ماده جاذب در فرکانس ۱/۹۲۵ GHz به دست آمد. در این فرکانس، تعداد مش ها ۱۶۰۶ تا است. سطح مقطع راداری تک پایه برای حالت PEC

### ۷- کاهش سطح مقطع راداری بال هواپیما

مواد جاذب برای نواحی نظیر حفره ها و لبه ها که شکل دهی به تنهایی برای کاهش سطح مقطع راداری کافی نیست، استفاده می شود [۱۱]. برای بررسی دقیق تر اثر ماده جاذب بر کاهش سطح مقطع راداری تک پایه بال هواپیما، یک مدل بال هواپیما با ابعاد نشان داده شده در شکل (۲۱) در نظر گرفته شد. ضخامت بال



شکل (۲۳): بال هواپیما که از لبه بال‌ها به اندازه  $2\lambda$  با ماده جاذب پوشیده شده است. (حالت دوم)



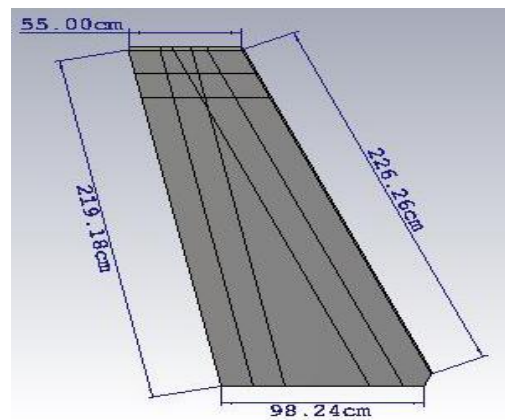
شکل (۲۴): کل بال با ماده جاذب پوشیده شده است. (حالت سوم)

## ۸- نتیجه‌گیری

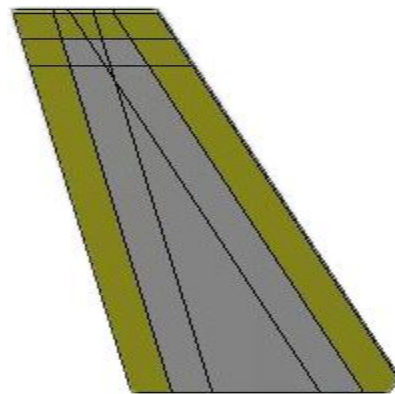
سطح مقطع راداری تک‌پایه و دوپایه یک هواپیما با پوشش موضعی به کمک مواد جاذب صنعتی فریتی در فرکانس  $1/925$  GHz و  $8$  GHz بررسی شد. به‌طور خاص، یک مدل هواپیما با طول  $82/6\lambda$ ، فاصله بین بال‌های  $88\lambda$  و ارتفاع  $10/5\lambda$  در فرکانس  $1/925$  GHz در نظر گرفته شد. اگرچه مدل استفاده‌شده یک مدل ساده است، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد چگونه استفاده از ماده جاذب راداری می‌تواند سطح مقطع راداری را کاهش دهد. ماده جاذب راداری که از آن برای پوشش هواپیما استفاده شد، یک ماده جاذب صنعتی است که به‌دلیل داشتن عنصر آهن در فرمول شیمیایی آن، جرم حجمی قابل ملاحظه‌ای دارد؛ بنابراین، کمینه‌کردن وزن ماده جاذب اهمیت زیادی خواهد داشت مخصوصاً برای هواپیماهای نظامی و رادار گریز. طبق اطلاعات داده‌شده در کاتالوگ ماده جاذب، از آن برای پوشش بدنه خارجی هواپیما خصوصاً جایی که توان زیادی حضور دارد، استفاده می‌شود. هواپیما به‌صورت موضعی و کامل با ماده جاذب پوشش داده شد. در حالت پوشش‌دهی موضعی در یک حالت بال‌ها و در حالت دیگر بدنه با ماده جاذب پوشش داده

قطبش‌های افقی و عمودی در شکل (۲۰) نشان داده شده است. بال هواپیما در حالت‌های مختلف با ماده جاذب پوشش داده شده است. رنگ زرد سطوحی را نشان می‌دهد که با ماده جاذب پوشیده شده‌اند و رنگ خاکستری نشان‌دهنده سطوحی است که جنس آن‌ها رسانای الکتریکی کامل است. نحوه پوشش با ماده جاذب به این صورت است که در حالت اول، از لبه بال به‌اندازه  $2\lambda$  که طول موج در فرکانس  $1/925$  GHz است، با ماده جاذب پوشش داده شده است. در حالت دوم، این مقدار به  $2\lambda$  می‌رسد و سرانجام در حالت سوم، کل بال با ماده جاذب پوشش داده شده است. به شکل‌های (۲۱) - (۲۴) مراجعه شود. ماده جاذب استفاده‌شده همان ماده SF-2 است که در بخش ۴ معرفی شد.

سطح مقطع راداری تک‌پایه به‌دست‌آمده در حالت‌های مختلف پوشیده‌شده با ماده جاذب و بدون آن در قطبش‌های عمودی و افقی برای  $\varphi = 0^\circ \sim 180^\circ$  میانگین‌گیری شده و در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود با افزایش استفاده از ماده جاذب، سطح مقطع راداری در هر دو حالت کاهش می‌یابد و هم‌چنین در قطبش عمودی، در حالت اول استفاده از ماده جاذب راداری، کاهش سطح مقطع راداری نسبت به دیگر حالت‌ها بیشتر بوده است.



شکل (۲۱): بال هواپیما (PEC)



شکل (۲۲): بال هواپیما که از لبه بال‌ها به اندازه  $2\lambda$  با ماده جاذب پوشیده شده است. (حالت اول)

- 2, pp. 177-182, 2014.
- [8] J. Mo, L. Shen, B. Wei, W. Fang, and Y. Yan, "RCS computation of engine by parallel higher order MoM with out-of-core technique,".
- [9] M. Jingyan, F. Weidong, and X. Haigao, "Accurate Evaluation of RCS on the Structure of Aircraft Inlets," in *Antennas & Propagations (ISAP)*, Nanjing, 2013.
- [10] J. Säily and A. V. Räsänen, "Studies on specular and non-specular reflectivities of radar absorbing material (RAM) at submillimetre wavelength," Helsinki University of Technology, 2003.
- [11] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, and M. T. Tuley, "Radar Cross Section," Sci. Tech. Publishing, 2004.
- [12] "NASA Low Outgassing," Masterbond, [Online]. Available: <http://www.masterbond.com/certifications/nasa-low-outgassing>. [Accessed 28 8 2016].
- [13] "ECCOSORB®," Emerson and Cumming Microwave Products Hong Kong LTD, 2011. <http://www.eccosorb.com.hk/materials/ECCOSORB> [2016]

## ۱۰- سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از آقای دکتر حبیب‌اله عبیری عضو هیئت علمی محترم دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز که ما را در پیشنهاد موضوع و ارتقای کیفی این پژوهش یاری نمودند، صمیمانه تشکر می‌نماییم.

شدند. سطح مقطع راداری تک‌پایه و دوپایه هواپیما در این حالت‌ها محاسبه شد. مشاهده شد که نقش اصلی در سطح مقطع راداری را بخش استوانه‌ای بدنه هواپیما و بال‌ها دارند. نشان داده شد که پوشش دهی موضعی ماده جاذب، سطح مقطع راداری را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد و مقدار کاهش قابل‌مقایسه با حالتی است که کل سطح هواپیما با ماده جاذب پوشیده می‌شود. این، باعث کاهش اساسی در وزن و حجم ماده جاذب می‌شود؛ بنابراین، وزن هواپیما و هزینه پوشش ماده جاذب کاهش می‌یابد. در مثال حل‌شده، سطح مقطع راداری تک‌پایه میانگین هواپیما با بدنه هادی کامل و بدون پوشش ماده جاذب، از روبرو  $3/43 \text{ m}^2$  در فرکانس  $1/925 \text{ GHz}$  است. در این حال، اگر تنها بال‌ها با ماده جاذب پوشش داده شوند، سطح مقطع راداری بالا به  $1/93 \text{ m}^2$  در همان فرکانس می‌رسد. اگر فقط بدنه هواپیما با ماده جاذب پوشش داده شود، میانگین سطح مقطع راداری تک‌پایه به  $\text{m}^2$   $0/43$  و در صورتی که کل هواپیما با ماده جاذب پوشش داده شود، کمیت بالا به  $0/17 \text{ m}^2$  در فرکانس  $1/925 \text{ GHz}$  می‌رسد. نتایج میانگین سطح مقطع راداری تک‌پایه نشان می‌دهد که سطح مقطع راداری روبرو هواپیما (head-on RCS)، نسبت به پشت و جانب مقدار کم‌تری دارد. هم‌چنین، یک بال با پوشش موضعی ماده جاذب در نظر گرفته شد و مشاهده گردید که با افزایش ماده جاذب، RCS در قطبش‌های افقی و عمودی کاهش می‌یابد.

## ۹- مراجع

- [1] A. Sefer, M. Alper Uslu and L. Sevgi, "MATLAB-Based 3-D MoM and FDTD Codes for the RCS Analysis of Realistic Objects," *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2015.
- [2] Z. Uddin Faysal, M. Shamaun Sobhan, and F. Oshin Ara, "Implementation and Verification of Simulation Methods to Determine Radar Cross Section of Simple Targets," in *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT)*, 2014.
- [3] K. J. Vinoy and R. M. Jha, "Radar Absorbing Materials from Theory to Design and Characterization," Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [4] M. Alves, R. J. Port, and M. C. Rezende, "Simulations of the radar cross section of a stealth aircraft," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC 2007)*, pp. 409-412, 2007.
- [5] H. Oraizi and A. Abdolali, "Ultra wide band RCS optimization of multilayered cylindrical structures for arbitrarily polarized incident plane waves," *Progress In Electromagnetic Research, PIER* 78, pp. 129-157, 2008.
- [6] A. Upendra Raju and J. Balakrishnan, "A Novel Method for RCS Reduction of a Complex Shaped Aircraft Using Partial RAM Coating," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, no. 2, 2012.
- [7] L. A. de Andrade, L. S. C. dos Santos, and A. Medeiros Gama, "Analysis of Radar Cross Section Reduction of Fighter Aircraft by Means of Computer Simulation," *J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos*, vol. 6, no.

---

## **Non-uniform and Partial Coating of an Aircraft for Achievement of the Minimum Radar Cross Section with the Minimum Weight of Absorbent**

**D. Hamunpeyma\*, A. Alighanbari**

Shiraz University

(Received: 24/10/2016, Accepted: 15/04/2017)

### **Abstract**

In this paper, the reduction of radar cross section of an airplane using overall and partial coverage of fuselage with absorbing material is studied. Specifically, various coverage strategies are tested to achieve minimum radar cross section and minimum mass of the absorbing material. This is important because the weight of absorbent material is usually great, around 13 Kg per square meter, even for a small thickness of 3mm. Therefore, it is extremely important to find effective strategies for covering the fuselage. Using the moment method and ray tracing method in the CST software package, the monostatic and bistatic RCS of an airplane with partial coverage of RAM are calculated. It is shown how partial coverage of the fuselage can affect the RCS. For instance, the head-front radar cross section of the studied airplane without any RAM coverage was found to be  $3.43 \text{ m}^2$  at 1.925 GHz. When only the wings are covered with RAM, the cross section is reduced to  $1.93 \text{ m}^2$ . When the body (without wings) is covered, the average mono-static radar cross section is reduced to  $0.43 \text{ m}^2$ . When all parts are covered with RAM, the average mono-static radar cross section is further reduced to  $0.17 \text{ m}^2$ . Furthermore, the effects of partial coverage of the wings are studied.

**Keywords:** Aircraft, Radar Absorbing Material, Radar Cross Section, Simulation, Stealth

---

\* Corresponding author E-mail: d\_hamun@shirauz.ac.ir