



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



بررسی میزان کاهش سطح مقطع راداری صفحه‌های آلومینیومی تخت و تک انحنایی در بازه‌ی فرکانسی باند ایکس

محمد خاکباز^۱، مهرداد متوسل‌الحق^۱، روح‌الله طالبی توتی^{۱*}

^۱ ایران، تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rtalebi@iust.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، به تحلیل و بررسی کاهش سطح مقطع راداری (RCS) یک صفحه‌ی آلومینیومی تخت و یک صفحه‌ی آلومینیومی تک انحنایی از روش شکل‌دهی مقطع در بازه‌ی فرکانسی باند ایکس پرداخته می‌شود. بنابراین، ابتدا به تحلیل معادلات حاکم بر RCS این دو مقطع به روش‌های اپتیک هندسی، گشتاورها و مروری بر بسط معادلات ماکسول در تئوری امواج الکترومغناطیسی پرداخته می‌شود، سپس به تحلیل عددی سطح مقطع راداری این دو هندسه که از جنس انتخابی آلومینیوم سری ۷۰۷۵ به ضخامت ۵ میلی‌متر که مشابه بدنه‌ی یک سازه هوایی است، به کمک نرم‌افزار کامسول پرداخته می‌شود و پس از شبیه‌سازی موج میکروویو فرودی بر سطح سازه در باند ایکس، نمودارهای قطبی الگوی بازتاب و پارامترهای پراکندگی بررسی می‌گردد. در نهایت از مقایسه این دو مقطع با یکدیگر، بهترین شکل مقطع برای استفاده در این زمینه انتخاب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی سطح مقطع تک انحنایی در مقابل صفحه‌ی تخت عملکرد بهتری در میزان افت امواج الکترومغناطیس از خود نشان می‌دهد و در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز به میزان ۱۱ دسی‌بل خواهد رسید.

کلمات کلیدی: سطح مقطع راداری؛ شکل‌دهی مقطع؛ الگوهای تابش و بازتاب؛ صفحه‌ی تک انحنایی.

۱- مقدمه

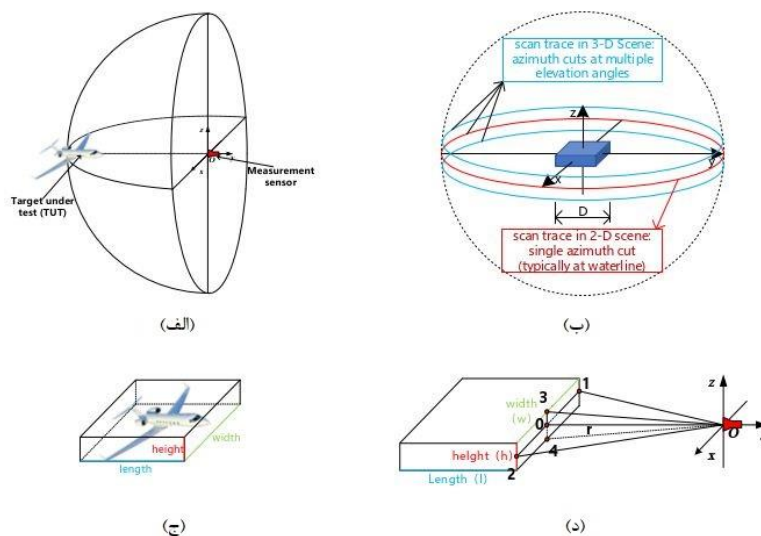
رادار و تشخیص سیگنال‌های رادیویی از قدیمی‌ترین کاربردهای فناوری امواج میکروویو است که در صنایع مختلف نظامی و هوافضا کاربرد بسیاری دارد. در یک عملکرد پایه‌ای، یک فرستنده، سیگنال‌هایی را به سوی هدف ارسال می‌کند و بخشی از این سیگنال‌ها به قسمت‌هایی از هدف برخورد می‌کنند و منعکس می‌شوند، سپس توسط یک تشخیص‌دهنده‌ی حساس این سیگنال‌های برگشتی شناسایی می‌شوند که اگر از یک آنتن باریک استفاده شده‌باشد، جهت هدف را می‌توان با موقعیت زاویه‌های دقیق به‌دست آورد. فاصله‌ی هدف نیز با استفاده از زمان ارسال سیگنال و برگشت آن قابل اندازه‌گیری است. روش‌هایی جهت کاهش سطح مقطع راداری وجود دارد مانند روش استفاده از فناوری پوشش‌های مواد نانوفناوری و روش شکل‌دهی مقطع که هر کدام مزایا و معایب مختص خود را به همراه دارند. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌ی رادارها و پوشش‌های راداری انجام شده‌است. آزمایشات متعددی در

زمینه‌ی ساخت پوشش‌های رادارگریز با خواص و رفتار فیزیکی و شیمیایی مختلف و کاهش سطح مقطع راداری انجام شده‌است و همچنین، روش‌های متعددی از جانب محققان مختلف در خصوص این موضوع پیشنهاد شده‌است.

۱-۱ تاریخچه

ابراهیم عثمان در سال ۱۹۹۹، توانست روش‌هایی را افزون بر روش‌های موجود در تخمین سطح مقطع راداری یک جسم پیشنهاد کند [۱]. یکی دیگر از افرادی که در زمینه‌ی تعامل تابش امواج الکترومغناطیسی با ماده کار می‌کرد کوین گیلور نام داشت که فارق التحصیل رشته‌ی RCS بود؛ او تحقیقات خود را در زمینه‌ی سیستم‌های راداری در سال ۱۹۸۰ تکمیل نمود که طی آزمایشات متعددی توانست با بهره‌گیری از معادلات مکسول با در نظر گرفتن شرایط مرزی، خصوصیات مواد همگن و ناهمگن را در یک پراکندگی یکنواخت ملاحظه کند [۲].

در اوایل سال ۱۹۶۰ یک برنامه اندازه‌گیری جامع توسط دانشگاه ایالتی اوهایو برای توصیف مقدار رادارگریزی ابقا شد که هدف از این برنامه، اندازه‌گیری بهتر و ایجاد توانایی پیش‌بینی عددی برای اندازه‌گیری RCS داخلی و خارجی بود که برای تحلیل عددی محدوده فرکانس‌های وسیع تا باندهای امواج میلی‌متری کاربرد داشت. همچنین با استفاده از این ابزارها، پراکندگی امواج با دقت کمتر از ۰٫۲ دسی‌بل و محدوده‌ی دینامیکی بیشتر از ۱۳۰ دسی‌بل توسط لوانت سوگی مورد بررسی قرار گرفت [۳]. رزنده و مارتین توانستند روش‌هایی که برای کاهش سطح مقطع راداری وجود داشت را بررسی کرده و مناسب‌ترین روش‌ها را برای کاهش RCS در صفحات تخت در ناحیه‌ی مایکروویو در بازه‌ی فرکانسی مشخصی پیشنهاد دهند [۴ و ۵]. یک فیزیکدان روسی به نام پیوتر اوفیمتسف، مدلی را برای پیش‌بینی چگونگی پخش‌شدگی امواج الکترومغناطیسی، از جمله امواج راداری، بعد از برخورد با سطوح دوبعدی و سه‌بعدی استخراج کرد. اگر چه نتیجه‌ی تحقیقات او در اتحاد جماهیر شوروی منتشر شده بود، تحقیقات او ظاهراً هیچگاه دارای کاربرد عملی در نظر گرفته نشد. این تا زمانی بود که لاکهید مارتین متوجه این تحقیقات شده و کارهای او را به زبان انگلیسی ترجمه کرد و بدین ترتیب بود که آثار و تحقیقات اوفیمتسف به پایه‌ی فناوری رادارگریزی مدرن تبدیل شد [۸-۶]. به‌عنوان مقدماتی‌ترین روش برای کاهش سیگنال برگشتی، روش شکل‌دهی مقطع به معنای این است که لبه‌ها و سطح جسم به شکلی طراحی گردد تا انرژی بازتابی از جسم در غیر از جهت رادار منعکس گردد. با طراحی دقیق، از این روش از انعکاس امواج به منبع اصلی جلوگیری می‌شود؛ بدین منظور از تراش‌ها، بریدگی‌ها و انحناهایی با زوایای تیز استفاده می‌گردد. در سال ۱۹۹۹ ریوس و همکاران توانستند آغازگر معادلات انتگرال استراتن-چو باشند که معادلات مکسول را به یک جفت معادله تبدیل می‌کند؛ نظریه‌ی آن‌ها در تقریب میدان دور، مستلزم آن است که محدوده بزرگ باشد و در مقایسه با هر بُعد جسم به توابعی همگن بدل گردد [۹ و ۱۰]. در شکل (۱) چگونگی تابش و بازتاب امواج کروی بر روی صفحه‌ی تخت نشان داده شده‌است.



شکل ۱. چگونگی اندازه‌گیری سطح مقطع راداری [۱۱]: (الف) موج کروی برخورد در هدف تحت آزمایش، (ب) هندسه‌های جمع‌آوری داده‌های پراکندگی میدان نزدیک، (ج) هندسه‌ی هدف تحت آزمایش و (د) تجزیه و تحلیل موج تابشی

۲- معادلات حاکم بر کاهش سطح مقطع راداری

۱-۲ دسته معادلات ماکسول در امواج الکترومغناطیسی

فرم کلی رادارگریزی با حل معادلات ماکسول تکمیل می‌گردد که چهار معادله‌ی دیفرانسیل با روابط مابین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی توسط جریان و منبع ولتاژ نمایان می‌گردد. معادلات ماکسول به صورت فرم بسته به شرح ذیل است:

$$\oint D ds = \int \rho dv = q \quad (1)$$

$$\oint E dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int B ds - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

$$\oint H dl = \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$\oint B ds = 0 \quad (4)$$

$$Es - \oint (ikz_0 (n \times H) \psi + (n \times E) \times \nabla \psi + (n \cdot E) \nabla \psi) ds = 0 \quad (5)$$

$$Es - \oint (-iky_0 (n \times E) \psi + (n \times H) \times \nabla \psi + (n \cdot H) \nabla \psi) ds = 0 \quad (6)$$

اگر امواج الکترومغناطیسی تحت تأثیر خواص مواد و جنس سطح مقطع قرار بگیرد آنگاه گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مشابه رابطه‌ی زیر در معادلات تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} J &= \bar{\sigma} E \\ B &= \mu_r \mu_0 H \\ D &= \epsilon_r \epsilon_0 E \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن ϵ_0 ثابت گذردهی هوا، μ_0 ثابت تراوایی هوا، ϵ_r ضریب گذردهی وابسته مختلط و μ_r ضریب تراوایی وابسته مختلط است. همچنین، $\bar{\sigma}$ بیانگر ضریب هدایت مواد است. گذردهی و نفوذپذیری مطابق با رابطه‌ی زیر می‌تواند به ماتریس پراکندگی (انعکاس، جذب و عبور) مرتبط شود:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن، درایه‌ی S_{11} بیانگر مقدار انعکاس به سمت ورودی موج است و مقدار S_{21} برابر با مقدار جذب و عبور از سطح مقطع به صورت انتقال است.

۲-۲ معادلات RCS حاکم بر سطح سازه

در حالت کلی، معادله‌ی اصلی کاهش سطح مقطع راداری که بیانگر توان موج برگشتی از سطح سازه است، در مختصات کروی به صورت رابطه‌ی (۹) بیان می‌شود:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4} \quad (9)$$

که در آن σ ، P_t ، P_r ، G_t و A_e به ترتیب بیانگر سطح مقطع راداری، توان برگشتی، توان ارسالی، کارایی توان فرستنده‌ی موج و دیافراگم آنتن گیرنده است.

از آنجا که صفحه‌ی تک انحنایی بخشی از سطح جانبی یک استوانه است، امواج فرودی قطبی شده برای کاهش سطح مقطع راداری روی سطح استوانه با سطح مقطع قاعده‌ی بیضوی بر حسب میزان شعاع‌های انحنای سازه با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$\sigma = \frac{\lambda r_1^2 r_2^2 \sin \theta}{8\pi \cos \theta^2 \left((r_1^2 \cos \varphi)^2 + (r_2^2 \sin \varphi)^2 \right)} \quad (10)$$

برای سطح یک استوانه با مقطع قاعده‌ی دایروی می‌توان نوشت:

$$\sigma = \frac{\lambda r \sin \theta}{8\pi \cos \theta^2} \quad (11)$$

برای یک صفحه‌ی تک انحنایی از سطح استوانه پوشیده‌شده از یک ماده‌ی دی‌الکتریک به‌صورت تحلیلی با روش MOM، گشتاورها مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شوند:

$$\left[\frac{\eta_1}{jk_1} \gamma_t \ell_1 + \frac{\eta_2}{jk_2} \gamma_t \ell_2 \right] (J_1) - [\gamma_t \kappa_1 + \gamma_t \kappa_2] (M_1) = \gamma_t E^p \quad (12)$$

$$[\gamma_t \kappa_1 + \gamma_t \kappa_2] (J_1) + \left[\frac{1}{jk_1 \eta_1} \gamma_t \ell_1 + \frac{1}{jk_2 \eta_2} \gamma_t \ell_2 \right] (M_1) = \gamma_t H^p \quad (13)$$

برای یک صفحه‌ی تخت نیز معادلات کاهش سطح مقطع راداری به‌صورت رابطه‌ی زیر در نظر گرفته می‌شود:

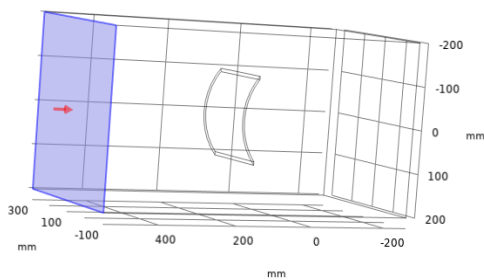
$$\sigma_{\max} = \frac{4\pi w^2 h^2}{\lambda^2} \quad (14)$$

۳- شبیه‌سازی مدل با هندسه‌های مختلف

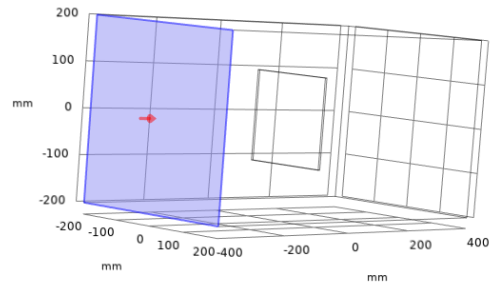
پس از ارائه‌ی معادلات حاکم بر مسئله، برای شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار کامسول فیزیک چندگانه، مطابق با شکل (۲-الف) ابتدا شرایط محیطی فضای موج و خواص فیزیکی سطح مقطع تعیین می‌گردد. هندسه‌ی مورد نظر یک صفحه‌ی مربعی از جنس آلومینیوم با ضخامت ۵ میلی‌متر و ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر است. فیزیک انتخابی در نرم‌افزار electromagnentic wave است و باند فرکانسی مورد نظر باند ایکس تعریف می‌شود. موج فرودی در سطح سازه از نوع موج dc microwave با طول موج پیش‌فرض در بازه‌ی فرکانسی ۸ الی ۱۲ گیگاهرتز در دو مسیر ورودی و خروجی تعریف می‌شود. برای خروجی گرفتن از تحلیل‌های مورد نظر گزاره‌های نمودار اسمیت و قطبی فعال می‌شود تا علاوه بر پارامترهای پراکندگی نمودارهای امپدانس موج فرودی، نمودارهای قطبی الگوهای تابش و بازتاب به‌دست آید. پس از تحلیل مورد نظر، همین تنظیمات مطابق با شکل (۲-ب) برای یک صفحه‌ی تک انحنایی مقعر با شعاع انحنای مشخص انجام می‌شود. پارامترهای ورودی مسئله در جدول ۱ بیان شده‌است.

جدول ۱. مقادیر اولیه‌ی پارامترهای مختلف در شبیه‌سازی

| جنس مقطع | ابعاد هندسی | نوع موج | طول موج | بازه فرکانسی | دمای محیط | فشار محیط | شرایط مرزی |
|-------------------|------------------|-------------|---------------------|----------------------|-------------|-----------|----------------|
| آلومینیوم ۷۰۷۵ | ۲۰۰*۲۰۰ میلی‌متر | میکروویو-DC | ۳۷,۵-۲۵ میلی‌متر | ۱۲,۴-۸,۲ گیگاهرتز | ۲۹۳,۵ کلوین | ۱ اتمسفر | آزاد-آزاد-آزاد |



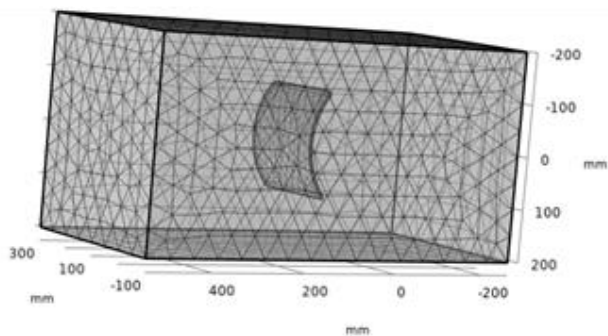
(ب)



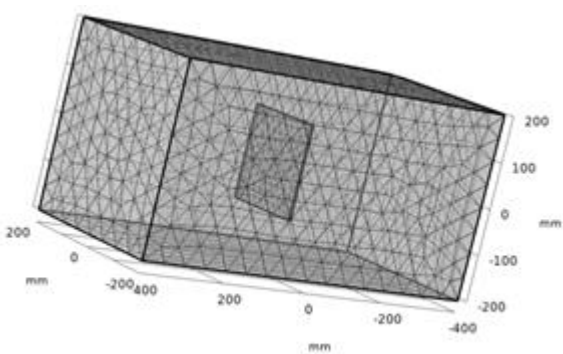
(الف)

شکل ۲. شبیه‌سازی عددی تحت تأثیر موج ورودی مایکروبو: (الف) مقطع صفحه‌ی تخت، (ب) مقطع صفحه‌ی یک انحنایی مقعر

در ادامه برای استخراج نتایج به المان‌بندی مقطع صفحه‌ی تخت و یک انحنایی پرداخته می‌شود. مش انتخابی از نوع free tetrahedral با مقدار حداقل ۲۵ میلی‌متر و حداکثر ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود که به ترتیب در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده‌است.



(ب)



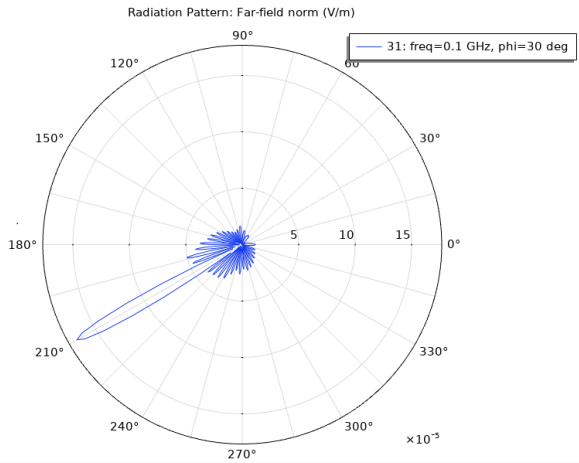
(الف)

شکل ۳. مش‌بندی صفحه‌ها: (الف) مقطع تخت، (ب) مقطع یک انحنایی مقعر

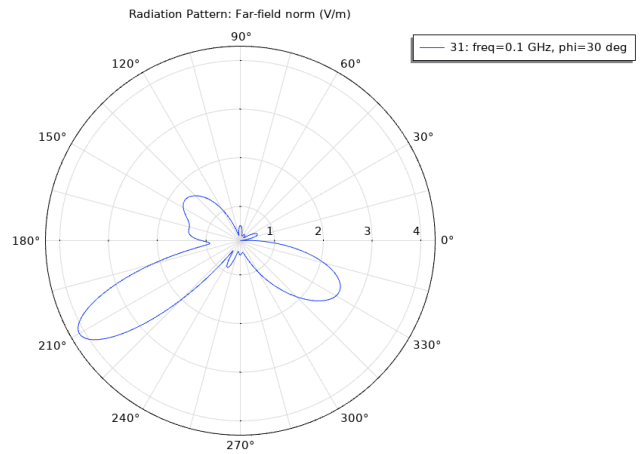
۴- نتایج شبیه‌سازی

در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) نمودارهای قطبی الگوی تابش به ترتیب برای صفحه‌ی تخت و صفحه‌ی یک انحنایی مقعر نشان داده شده‌است. همچنین در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) نمودارهای الگوی بازتاب به ترتیب برای صفحه‌ی تخت و صفحه‌ی یک انحنایی مقعر نشان داده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پراکندگی امواج در صفحه‌ی یک انحنایی از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند و نسبت به صفحه‌ی تخت در زوایای مختلفی امواج را بازتاب می‌دهد.

در شکل‌های (۶) و (۷) پارامترهای پراکندگی به ترتیب برای صفحه‌ی تخت و صفحه‌ی یک انحنایی مقعر نشان داده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشترین افت سیگنال (S_{11}) برای یک صفحه‌ی یک انحنایی در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز معادل ۱۱ دسیبل حاصل می‌شود و کمترین افت سیگنال برای یک صفحه‌ی تخت ساده به‌طور میانگین نزدیک به صفر در باند ایکس ثبت شده‌است؛ بدین معنی که یک صفحه‌ی صاف بالای ۹۰ درصد موج ورودی را به سمت منبع رادار بازتاب می‌کند. به‌صورت بالعکس هرچه S_{11} بر حسب دسی‌بل مقداری منفی‌تر شود، پارامتر جذب و عبور که مرتبط با ماهیت مواد سطحی و جنس سازه است مقداری مثبت‌تر می‌شود.

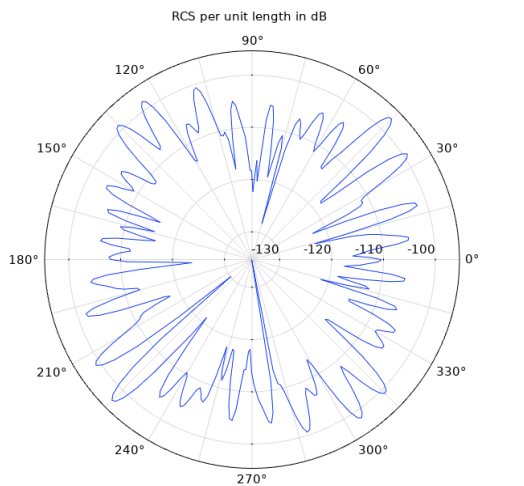


(ب)

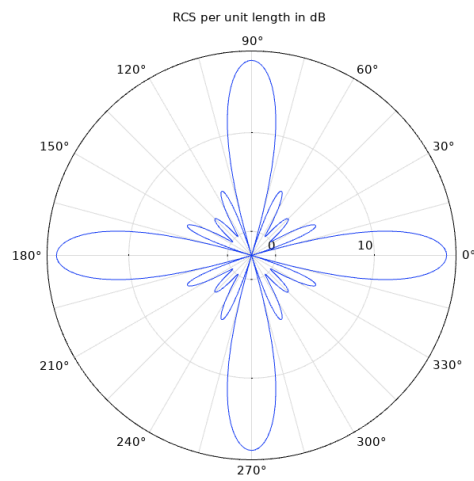


(الف)

شکل ۴. نمودار قطبی الگوی تابش: الف) صفحه‌ی تخت، ب) صفحه‌ی یک انحنایی

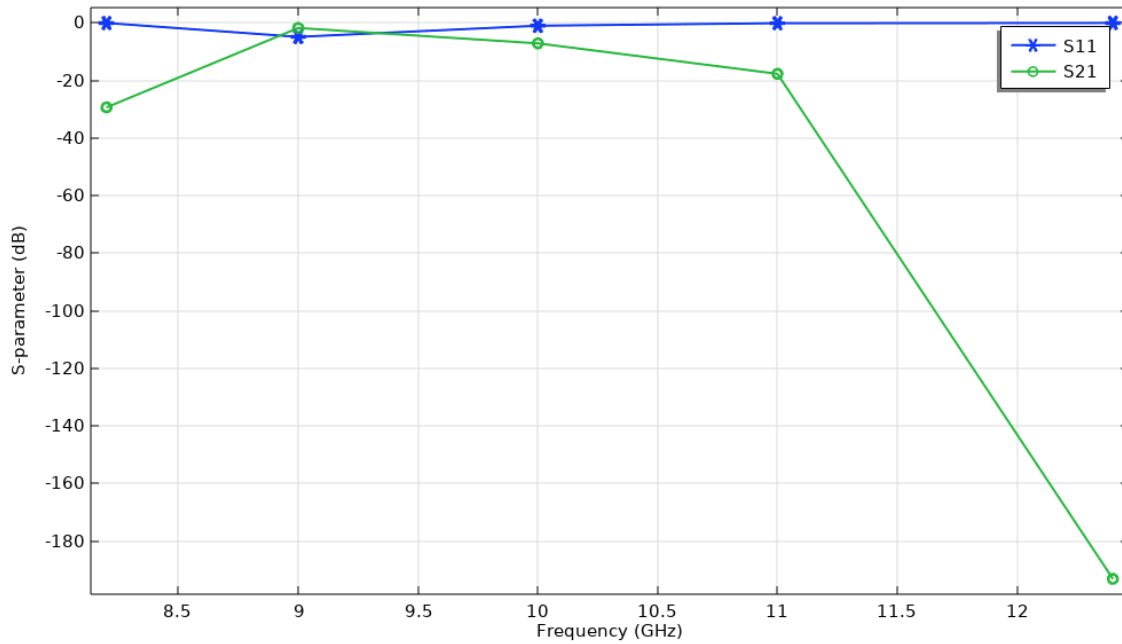


(ب)

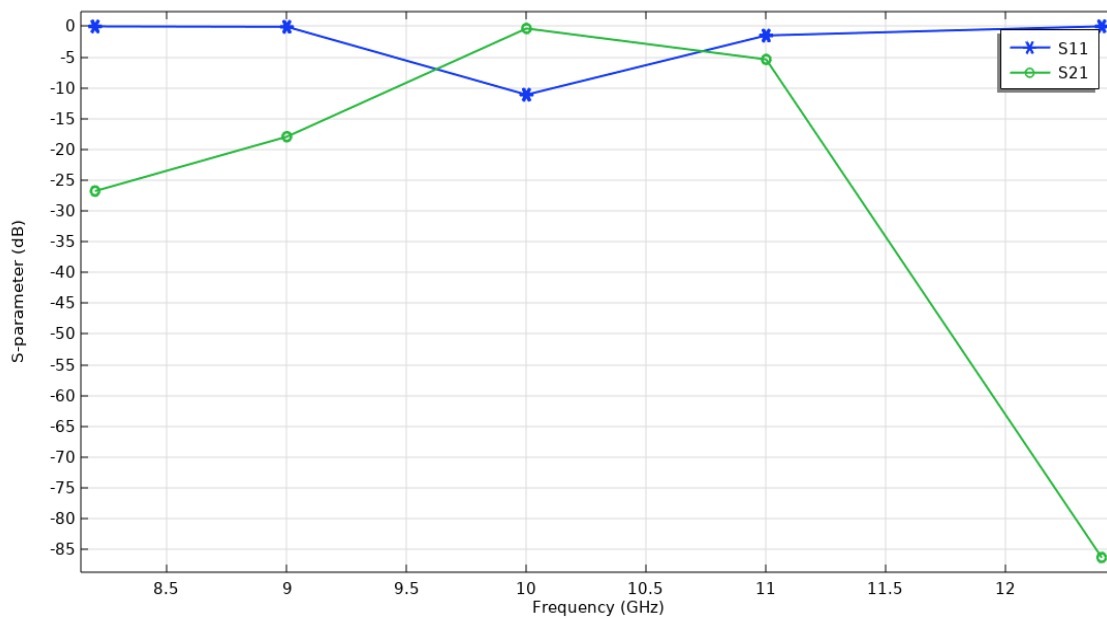


(الف)

شکل ۵. نمودار قطبی الگوی بازتاب: الف) صفحه‌ی تخت، ب) صفحه‌ی یک انحنایی



شکل ۶. پارامترهای پراکندگی برای یک صفحه‌ی تخت در باند ایکس



شکل ۷. پارامترهای پراکندگی برای یک صفحه‌ی یک انحنایی در باند ایکس

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر هندسه‌ی سطح مقطع در بهبود مقدار سطح مقطع راداری به صورت حل عددی به کمک نرم‌افزار کامسول پرداخته شد. نتایج غالب استخراج‌شده به شرح زیر است:

✓ الگوی تابش برای یک صفحه‌ی تخت الگویی محدود و مشخصی دارد، اما در یک صفحه‌ی یک انحنایی پراکندگی الگوی تابش بیشتر است، همچنین برای یک صفحه‌ی تخت در زاویه برخورد عمودی نقاط حداکثر به صورت باریک و با بلندی بیشتر وجود دارد اما برای یک صفحه‌ی یک انحنایی نقاط حداکثر کمتری و دارای بلندی کوتاه‌تری در الگوی تابش است.

✓ الگوی بازتاب یا RCS برای یک صفحه‌ی تخت دارای الگوی پراکندگی مشخصی است که به زاویه‌ی برخورد مستقیم امواج وابسته است و در زوایای عمودی مانند ۹۰ درجه، دارای دامنه‌های بلندتری است در صورتی که بازتاب برای یک صفحه‌ی یک انحنایی با زوایای متفاوتی پراکندگی رخ می‌دهد و به‌دلیل انحنای بازتابی گسترده‌تر و با رفتار پیچیده‌تری از خود نشان می‌دهد.

✓ در حالت کلی یک صفحه‌ی تخت به‌دلیل ماهیت هندسی که دارد می‌تواند موج را با زاویه‌ی ورودی و خروجی یکسان به سمت آنتن بازگرداند و بالای ۹۰ درصد قابل شناسایی است، اما یک صفحه‌ی یک انحنایی از همان جنس به‌دلیل انحنای تقعر نسبی که دارد می‌تواند موج ورودی را بیشتر پراکنده کرده و بخش زیادی از توان موج ورودی را تلف کند و درصد کمتری نسبت به یک صفحه‌ی تخت قابل شناسایی باشد.

مراجع

1. Ahmed, Tarig, Ibrahim Osman, and Moutaman Mirghani. "Estimation of radar cross sectional area of target using simulation algorithm." *International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering* 4, no. 2 (2018).
2. Kevin Glver, "Radar Absorbing Materials – Mechanisms and Materials", 1980-1982.
3. L. Sevgi, "Complex Electromagnetic Problems and Numerical Simulation Approaches," IEEE Press/John Wiley, New York, 2003.
4. M. C. Rezende, I.M. Martin, M. A. S. Miacci, E. L. Nohara, "Radar cross section measurements (8GHz -12GHz) of flat plates painted with Microwave absorbing materials", *Proc. Of MTT- S, IMOC*, (2001).
5. Faez, R., Martin, I.M., De Paoli, M.A., Rezende, M.C., "Microwave properties of EPDM/PAni-DBSA blends." *Synth. Met.* 119, 435–436 (2001).
6. Kim, Y., Jung, I., Yook, J., "Numerical Investigation of 3-D Radar Cross Section of Dielectric Barrier Discharge Plasma", *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Dec. (2015).
7. P.Ya. Ufimtsev, "The 50-Year Anniversary of the PTD: Comments on the PTD's Origin and Development," *published in the journal IEEE Antennas & Propagation* 55, no.3, 18-28, June (2013).
8. Ufimtsev, P. Ya. "Elementary edge waves and the physical theory of diffraction." *Electromagnetics* 11, no. 2, 125-160 (1991).
9. Rius JM, Vall-Llossera M., "High frequency radar cross section of complex objects in real time". *Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S Digest*, 1062-1065 (1991).
10. Rius, J. M., M. Vall-Ilossera, C. Salazar, and A. Cardama. "Shaped reflector antenna analysis by graphical processing methods." *Applied Computational Electromagnetics Society journal* 14, 45-51 (1999).
11. Liu, Yang, Weidong Hu, Wenlong Zhang, Jianhang Sun, Baige Xing, and Leo Ligthart. "Radar cross section near-field to far-field prediction for isotropic-point scattering target based on regression estimation." *Sensors* 20, no. 21, (2020).