



بررسی میزان کاهش بازتاب راداری رویه‌های درجه دوم و مقاطع مخروطی از جنس آلومینیوم در بازه فرکانسی باند ایکس: مطالعه‌ای بر اساس گذردهی و نفوذپذیری الکترومغناطیسی

محمد خاکباز^۱، مسعود جوادی^{۲*}، رضا سرخوش^۲

^۱دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی هوافضا (سازه)، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

^۲استادیار گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

چکیده

این پژوهش به بررسی کاهش سطح مقطع راداری و افت سیگنال الکترومغناطیسی در مقاطع هندسی مختلف، شامل مقاطع مخروطی و رویه‌های درجه دوم از جنس آلومینیوم می‌پردازد. حل عددی، در نرم‌افزار المان محدود کامسول انجام شده و مقاطع با لایه‌ای از جاذب‌های الکترومغناطیسی شامل نانولوله‌های کربنی، مگنتیت سیلیکا در ماتریس رزین اپوکسی پوشش داده شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها در بازه فرکانسی باند ایکس (۸ تا ۱۲ گیگاهرتز) با در نظر گرفتن شرایط محیطی مشابه با برخورد موج ورودی الکترومغناطیسی انجام شده‌است. نتایج حاصل از درایه S₁₁ ماتریس پراکندگی حاکی از آن است که مقطع سهمی‌گون بیضوی با افت ۸/۲- دسی‌بل در ۱۰ گیگاهرتز، اتلاف قابل توجهی به میزان ۸۴/۶ درصد انرژی را دارا است. علاوه بر این، این مقطع تطابق امپدانسی بهینه‌ای در محدوده ۰/۰۵ تا ۱ اهم را ارائه می‌دهد که به بهبود اتلاف و پخش امواج الکترومغناطیسی کمک می‌کند. هندسه بیضوی نیز به افت ۸- دسی‌بل در ۹ گیگاهرتز دست می‌یابد، که این ویژگی‌ها اهمیت آن را در طراحی سیستم‌های پنهان‌ساز به خوبی نمایان می‌سازد. در مقابل، مقطع کروی با میانگین افت ۰/۰۸- دسی‌بل به خاطر یکنواختی سطح خود، عملکرد قابل توجهی را برای کارایی بهینه آنتن در شناسایی می‌دهد. به صورت کلی، انتخاب هندسه و مواد جاذب مناسب تأثیر بسزایی در بهبود کارایی و کاهش سطح مقطع راداری سیستم‌های دفاعی دارد. این نتایج می‌توانند به توسعه راهکارهای مؤثر برای افزایش قابلیت پنهان‌سازی در طراحی‌های آینده کمک کنند.

کلمات کلیدی: سطح مقطع راداری؛ مقاطع مخروطی؛ آلومینیوم؛ باند ایکس؛ اتلاف الکترومغناطیسی؛ مواد جاذب.

Numerical investigation of radar reflection reduction of quadratic surfaces and conical sections made of aluminum in the X-band frequency range: A study based on electromagnetic permittivity and permeability

¹Ph.D student in Aerospace Structural engineering, Shahid Sattari University, Tehran, Iran.

²Assist. Prof., Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran.

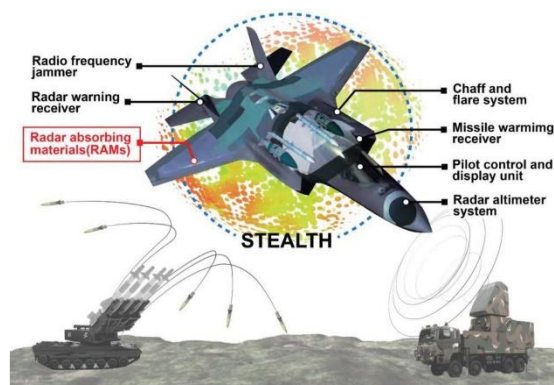
Abstract

This research investigates the reduction of radar cross-section and electromagnetic signal loss in various geometric cross-sections, including conical sections and quadratic surfaces made of aluminum. Numerical solution was performed in the finite element software COMSOL and the cross-sections were coated with a layer of electromagnetic absorbers including carbon nanotubes, silica magnetite in an epoxy resin matrix. Simulations were performed in the X-band frequency range (8 to 12 GHz) considering environmental conditions similar to the incident electromagnetic wave. The results from the S₁₁ element of the dispersion matrix indicate that the elliptical parabolic cross-section with a loss of -8.2 dB at 10 GHz has a significant loss of 84.6 percent of the energy. In addition, this cross-section offers an optimal impedance match in the range of 0.05 to 1 ohm, which helps improve the loss and propagation of electromagnetic waves. The elliptical geometry also achieves a loss of -8 dB at 9 GHz, which clearly demonstrates its importance in the design of stealth systems. In contrast, the spherical cross-section with an average loss of -0.08 dB, due to its surface uniformity, provides a significant performance for optimal antenna performance in detection. In general, the selection of appropriate geometry and absorbing materials has a significant impact on improving the efficiency and reducing the radar cross-section of defense systems. These results can help develop effective solutions to increase stealth capabilities in future designs.

Keywords: Radar cross-section; conical sections; aluminum; X-band; electromagnetic loss; absorbent materials.

۱- مقدمه

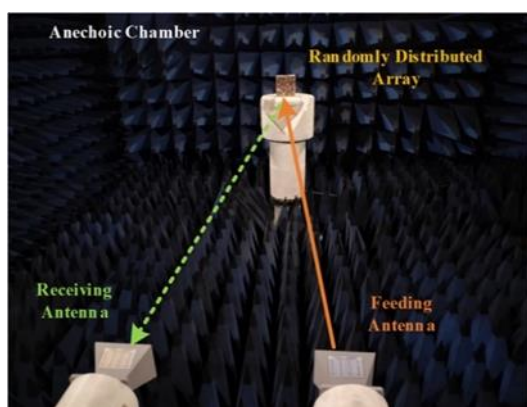
فناوری شناساگری، یکی از روش‌های مرسوم در حوزه نظارت نظامی است که در طی آن، از تکنیک‌های متعددی پیرو پنهان‌کاری سازه درمقابل دید رادار دشمن انجام می‌شود. امروزه، استفاده از مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی با ضخامت کم و تاثیرگذاری بسیار بالا در ابطال انرژی ناشی از سیگنال‌های منبع آنتن، بسیار حائز اهمیت است. مواد بر پایه کربن با ضخامت نانومتر، هدایت الکتریکی و مغناطیسی بالا و خواص مورفولوژی منحصر به فرد، پایه و اساس ساختارهای رادارگریز را تشکیل می‌دهد. شکل ۱، نحوه شناساگری مقاطع پوشیده شده با مواد جاذب، از یک جنگنده نظامی را به نمایش می‌گذارد [۱].



شکل ۱- شماییک کلی از نحوه مخفی کاری، توسط یک سامانه هوایی [۱]

مهم ترین باندهای فرکانسی مورد بررسی برای رادارهای نظارتی دوربرد، باند X (۸-۱۲) گیگاهرتز و باند Ku (۱۲-۱۸) گیگاهرتز است که امواج الکترومغناطیسی در این بازه‌های فرکانسی با توجه به نوع و جنس سطح مقطع، فاصله موج تا مبدا آنتن، اندازه مساحت سطح مقطع و... به صورت غیر خطی رفتار می‌کند [۳و۲]. تغییر در هندسه سطح مقطع، می‌تواند در پراکندگی امواج تابشی به سطح هدف موثر باشد. تغییر شکل و ایجاد پیچیدگی‌های ساختاری در طراحی، علاوه بر کاهش سطح مقطع راداری می‌تواند موجب ایجاد پساهای آیرودینامیکی از سطح سازه شود؛ بنابراین یکی از رایج ترین روش‌های کاهش میدان‌های پراکندگی امواج، اصلاح شکل مقطع است [۴-۵]. استفاده از آرایه‌های فراسطحی دوعنصری، که توزیع تصادفی در ساختار مقطع ایجاد می‌کند می‌تواند

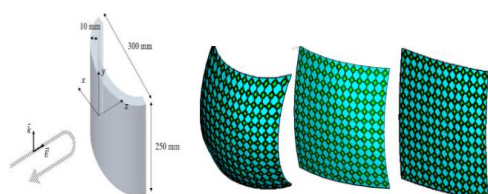
بخشی از انرژی موج دریافتی را تلف کرده و به انرژی گرمایی تبدیل کند و موجب افت انعکاس امواج الکترومغناطیسی از سطح سازه شود. شکل ۲، ستاپ آزمایش محیط آنتن را برای نمونه‌های دارای آرایه‌های دو عنصری را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که ویژگی‌های پراکندگی الکترومغناطیسی در محیط آنتن با یک آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده قابل مشاهده است [۶].



شکل ۲- محیط تست اتاق آنتن برای تخمین پراکندگی موج از سطح [۶]

استفاده از سطوح منحنی با مکانیزم مدولاسیون سلول واحد، برای پاسخ‌های موج الکترومغناطیسی با تابش مورب، می‌تواند به عنوان یک فراساختار منسجم در جهت کاهش سطح مقطع راداری موثر باشد [۷]. یک سطح انتخابی فرکانس می‌تواند به عنوان یک فیلتر فضایی برای امواج الکترومغناطیسی برخوردی استفاده شود که اغلب در طراحی رادوم، برای محافظت از آنتن ها و کاهش سطح مقطع راداری سیستم آنتن، استفاده می‌شود [۸]. یکی از روش‌های دقیق تخمین سطح مقطع راداری اجسام بزرگ، روش اپتیک فیزیکی [۹]. است که تا به امروز، رویکردهای متفاوتی جهت اصلاح الگوریتم RCS سطوح مختلف پیشنهاد شده است. از آن‌جا که مواد نانو به عنوان جاذب‌های کارآمد الکترومغناطیسی توانایی افت انعکاس رادار تا ۱۰- دسی بل را دارند، نانولوله‌های کربنی چند جداره به عنوان یک ماده جاذب دی الکتریک، همراه با یک لایه مغناطیسی مانند اکسید زینک، با ساختار بلوری یا آمورف و خواص مکانیکی و مغناطیسی منحصر به فرد، به عنوان پوشش‌هایی که امواج الکترومغناطیسی را به مقدار قابل توجهی

یابد [۱۸]. محققان برای افت بازتاب موادی که کمتر از ۲ دسی بل بود راهکارهایی را پیشنهاد کردند که تغییر درصد دی الکتریک با مگنتیت های کریستالینه آهن، کبالت و نیکل بود که افت بازتابی بین ۱۷ الی ۲۵ دسی بل در بازه فرکانسی ۱۲-۸ گیگاهرتز بود [۱۹-۲۱]. در میان سطوح، مقاطعی که دارای انحنای یک طرفه هستند بیش تر می توانند موجب پراکندگی امواج الکترومغناطیسی از سطح خود شوند. از این رو روش انتگرال گشتاورها جهت بررسی تحلیلی پارامترهای پراکندگی یک جسم تک انحنای دی الکتریک که بر روی شبکه مرزی سطحی بین دو قطعه همگن فرموله شده است [۲۲] و همچنین کاهش سطح مقطع راداری سطوح منحنی که دارای انحنای یک طرفه هستند، با استفاده از روش پلازما برای حالت های مختلف تقعر محدب، مقعر و مسطح بدست آمده است. نتایج حاکی از آن نشان می دهد که با افزایش خم و انحنای صفحه، میزان کاهش انعکاس الکترومغناطیسی ساختار دستخوش تغییرات قابل توجهی می شود [۲۳].



شکل ۳- بازتاب موج از سطح مقاطع تک انحنای با شعاع متغیر [۲۲]

با توجه به این که پژوهش های متعددی در زمینه میزان کاهش سطح مقطع راداری اشکال هندسی مختلف ارائه شده است، در این پژوهش به صورت تخصصی به بررسی سطوح خاصی از اشکال هندسی پرداخته است که شامل رویه های درجه دوم و مقاطع مخروطی است. جایی که علاوه بر تاثیر پارامترهای هندسی سطوح در کاهش انعکاس راداری به تاثیرات جذب، گذردهی و نفوذپذیری الکترومغناطیسی سطوح پوشیده از نانو مواد جاذب کاربردی در این صنعت، به صورت حل عددی پرداخته است که تاثیرات پراکندگی و اتلاف الکترومغناطیسی را با استفاده از تحلیل پارامترهای ماتریس S به تصویر می کشد. به صورت کلی، انتخاب هندسه مناسب همراه با مواد جاذب الکترومغناطیسی می تواند تاثیر قابل توجهی بر کاهش سطح

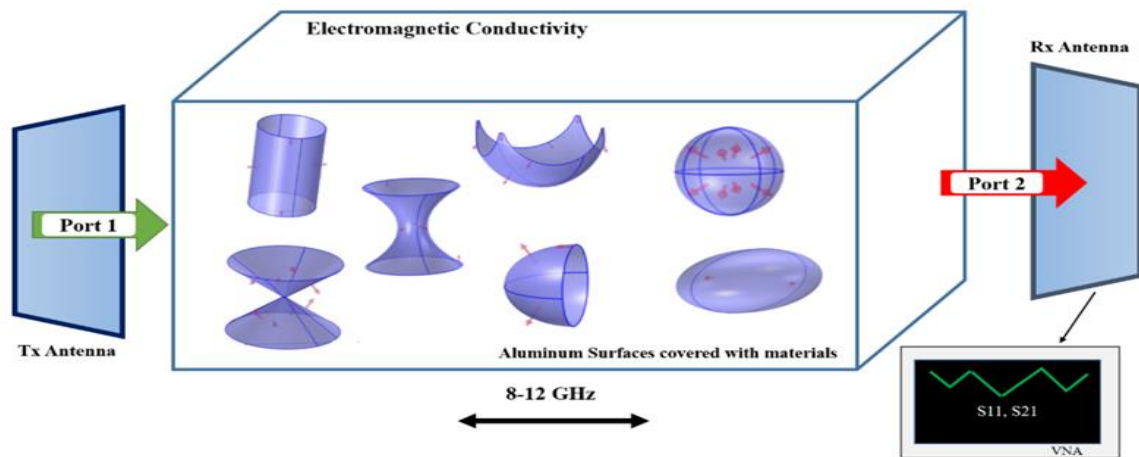
تلف می کنند، استفاده می شوند [۱۰]. جدول ۱، بیش ترین مقدار سطح مقطع راداری را برای تعدادی از اشکال هندسی مرجع را نشان می دهد [۱۱].

جدول ۱- بیش ترین مقدار RCS برای تعدادی از اشکال

هندسی [۱۱]		
Target	Dimensions	Max RCS
Sphere	d: Diameter	$\sigma = \frac{\pi d^2}{4}$
Plate	a,b: Length, Width	$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$
Cylinder	r: radiud, l: length	$\sigma = \frac{2\pi r l^2}{\lambda}$
Dihedral Reflector	a,b: length, width	$\sigma = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$

استفاده از سازه های چندلایه، با لایه هایی که دارای رسانایی الکتریکی و مغناطیسی منحصر به فرد هستند، می تواند در بهبود تطابق امپدانس، بازتاب های متعدد و پراکندگی میان لایه ها، می تواند یکی از موثرترین و مناسب ترین روش های کاهش انرژی تابشی الکترومغناطیسی باشند [۱۲]. ساختارهای CPC، با مشخصه پایین انعکاس و خواص مورفولوژی بالا، به عنوان شبکه های رسانای هیبریدی الکتریکی و مغناطیسی یا شبکه های چندمرحله ای، در ماتریس های پلیمری ساخته می شوند [۱۳-۱۵]. نسبت سیگنال به پارازیت به علاوه نویز (SINR) و اطلاعات متقابل، شاخص های عملکرد مهم تشخیص هدف راداری هستند که انبوهی از استراتژی های طراحی شکل موج براساس آنها پیشنهاد شده اند. طراحی شکل موج بهینه برای تشخیص اهداف تعیین کننده در نویز گاوسی افزودنی برای به حداکثر رساندن برای اولین بار توسط بل مورد بررسی قرار گرفت این مطالعات با گذشت زمان، با توسعه استراتژی های طراحی شکل موج برای سیستم رادار شبکه ای به فریب و پارازیت سرکوب پرداخته شده است [۱۶]. کاهش سطح مقطع رادار باند آنتن ها که عموماً با هواپیما، رادار و پلتفرم های رادارگریز مرتبط است، با توسعه سریع فناوری تشخیص رادار توجه گسترده ای را به خود جلب کرده است. برای یک پلتفرم رادارگریز، مانند یک هواپیما مشخص شده است که، چندین آنتن روی سکو نصب شده است که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کلی پراکندگی دارد [۱۷]. علاوه بر این، سطح مقطع راداری آرایه آنتن به دلیل انتشار متاسرفیس کاهش می

- مقطع راداری و بهبود کارایی سیستم‌های پنهان‌ساز داشته باشد
- فرم کلی امواج الکترومغناطیسی از حل دسته معادلات ماکسول تکمیل می‌گردد که چهار معادله دیفرانسیل با روابط بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی توسط جریان و منبع ولتاژ نمایان می‌گردد. معادلات ماکسول در یک مسیر بسته را می‌توان از روابط (۴-۱)، استخراج کرد.
- $$\oint D \cdot ds = \int dv = q \quad (1)$$
- $$\oint E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int B \cdot ds = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$
- $$\oint B \cdot ds = 0 \quad (3)$$
- $$\oint H \cdot dl = \int (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \quad (4)$$



شکل ۴- شماتیک آزمایش موجبر الکترومغناطیسی طراحی شده در نرم افزار کامسول

۲- معادلات و طرح مسئله

در تعریف آزمایش مورد نظر برای حل عددی در نرم افزار کامسول، یک شبکه الکترومغناطیسی در فضای هدایت الکترومغناطیسی با دو پورت ورودی و خروجی به گونه ای که سطوح آلومینیومی در بخش میانی موجبر قرار گرفته است، طراحی می‌شود. به گونه ای که، جهت بالا بردن میزان اثربخشی اتلاف انرژی الکترومغناطیسی ورودی، یک لایه یک میلی متری به صورت یک مخلوط همگن از دی الکتریک نانولوله‌های کربنی چند دیواره و مگنتیت سیلیکا در ماتریس رزین اپوکسی به صورت کسر جرمی میانگین، با توجه به خواص مکانیکی مواد به سطوح مقاطع نسبت داده شده است. توان ورودی معادل یک وات در حوزه فرکانسی باند ایکس تعریف می‌شود. شکل ۴، شمای کلی آزمایش طراحی شده را به گونه ای بیان می‌کند که تمامی سطوح مقاطع در محیط میانی این تست، هدف تابش مایل موج الکترومغناطیسی قرار گرفته‌اند.

که در آن D چگالی جابجایی الکتریکی، E میدان الکتریکی، H میدان مغناطیسی، q بار درون حجمی، ρ چگالی بار، B چگالی شار مغناطیسی، t زمان، J چگالی جریان الکتریکی، و ϕ پتانسیل الکتریکی است. فرم کلی روابط کاهش سطح مقطع راداری که وابسته به نوع و مساحت سطح مقطع هدف می‌باشد از رابطه (۵) استخراج می‌شود [۲۴].

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma}{4\pi^2 R^4} \times A_e \quad (5)$$

که در آن σ مقطع راداری، P_r توان برگشتی، P_t توان ارسالی، G_t کارایی توان فرستنده موج و A_e دیافراگم آنتن گیرنده است. پارامتر σ باتوجه به موج بازتابی از سطح مقطع و ادغام با معادلات نیکلسون-راس-ویر از روابط (۶-۸)، بدست می‌آید [۲۵].

$$\sigma_e = \sigma(1 - R) \quad (6)$$

$$\frac{Z_s}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_s}{\varepsilon_s}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \quad (12)$$

جایی که μ_r ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و ε_r گذردی الکتریکی ماده است. برای یک سطح چندلایه معادله نهایی امپدانس به فرم معادله (۱۳) است که در آن امپدانس Z_m هرلایه، Z_l امپدانس خط انتقال، d ضخامت هر لایه، η نسبت بازتابی و γ ثابت پراکندگی است.

$$Z = \frac{\sqrt{L_i Z_M (1 - \eta \tan(\omega \gamma_i d_i) \tan(\omega \gamma_{i+1} (x - d_i)))}}{\sqrt{C_i Z_M (-\eta \tan(\omega \gamma_i d_i) - j \tan(\omega \gamma_{i+1} (x - d_i)))}} + \frac{Z_L (j \tan(\omega \gamma_i d_i) + j \tan(\omega \gamma_{i+1} (x - d_i)))}{Z_L (\tan(\omega \gamma_i d_i) \tan(\omega \gamma_{i+1} (x - d_i)) - \eta)} \quad (13)$$

جدول ۲، معادلات سطح و معادلات نهایی امپدانس بار را با توجه به شرایط مرزی و هندسی برای سطوح استوانه، کره، هذلولی یکپارچه، سهمی هذلولی گون، سهمی گون بیضی، بیضی، و مخروط به صورت معین تعریف می کند. جایی که با استفاده از شرایط مرزی و هندسی، ابعاد سطوح، و لایه های ماده، امپدانس نهایی محاسبه شده و بواسطه آن پارامترهای پراکندگی و اتلاف الکترومغناطیسی محاسبه می گردد. قابل توجه است که در ترم های معادلات امپدانس برای سطوح، توابع انتشار و انکسار، ثابت دی الکتریک گذردی و امپدانس فضای آزاد با توجه به نوع ساختار هندسه و ابعاد متناسب با آن ظاهر می شود.

$$R_{(dB)} = -20 \log_{10}(R) \quad (7)$$

$$RL_{(dB)} = -20 \log_{10} \left| \frac{Z_0 - Z_s}{Z_0 + Z_s} \right| \quad (8)$$

که در معادلات فوق σ رابطه مستقیم با R یا میزان رفلکشن از سطح مقطع دارد که پارامتر R ، نیز معادل مقدار مطلق امپدانس ورودی و امپدانس منبع در یک تابع لگاریتمی بیان می شود. از آنجا که ماتریس پراکندگی طبق رابطه (۸) بیان می شود، درایه اول این ماتریس، یعنی S_{11} معادل با همان مقدار مطلق R که در رابطه (۹) به آن اشاره شده است، تعریف می شود.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

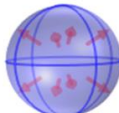
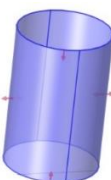
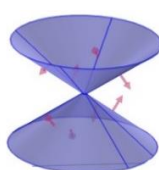
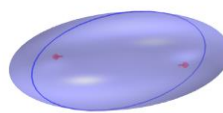
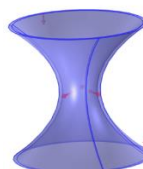
با ادغام روابط (۷، ۸، ۹) فرم نهایی بازتاب از سطح مقطع، به صورت معادله (۱۰) تعریف می شود.

$$RL_{(dB)} = -20 \log_{10} |S_{11}| \quad (10)$$

مقدار مطلق S_{11} با امپدانس منبع و بار که برای هر فرکانس متغیر است و همینطور با گذردی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی، رابطه مستقیم دارد که صورت کلی آن از معادله (۱۱ و ۱۲) قابل استنباط است.

$$\begin{aligned} |S_{11}| &= \lim_{l \rightarrow \infty} \left| \frac{(Z_0^2 - Z_s^2) \sinh(\gamma l)}{2Z_s Z_0 \cosh(\gamma l) + (Z_s^2 + Z_0^2) \sinh(\gamma l)} \right| \\ &= \left| \frac{(Z_0^2 - Z_s^2) \exp(\gamma l)}{2Z_s Z_0 \exp(\gamma l) + (Z_s^2 + Z_0^2) \exp(\gamma l)} \right| = \left| \frac{(Z_0 - Z_s)(Z_s + Z_0)}{2Z_s Z_0 + (Z_s^2 + Z_0^2)} \right| \\ &= \left| \frac{Z_0 - Z_s}{Z_0 + Z_s} \right| = |\Gamma_{in}| \end{aligned} \quad (11)$$

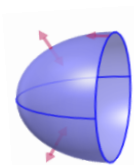
جدول ۲ - معادلات امپدانس و مشخصه‌های هندسی سطوح برای محاسبات پراکندگی الکترومغناطیسی

نوع سطح	معادله سطح	معادله امپدانس بار	تعریف پارامترها	شماتیک سطح مقطع
کره	$x^2 + y^2 + z^2 = 1$	$Z_s = \eta_0 \sqrt{\epsilon_r}$	η_0 امپدانس فضای آزاد، r شعاع کره، Z_0 امپدانس مشخصه خط انتقال، ϵ_r ثابت دی الکتریک کره	
استوانه	$x^2 + y^2 = r^2$	$Z_s = \frac{j\eta_0(K_0 r)}{2} \times \frac{H_1^{(2)}(K_0 r)}{H_0^{(2)}(K_0 r)}$	$H_1^{(2)}$ و $H_0^{(2)}$ توابع هنکل نوع دوم مرتبه صفر و یک، r شعاع استوانه، K_0 ثابت انتشار در فضای آزاد، h ارتفاع استوانه	
مخروط	$\frac{x^2 + y^2}{(Z \tan \theta)^2} = 1$	$Z_s = \frac{\eta_0}{\sin \theta} \times [1 + \cot(K_0 h \cdot \cos \theta)]$	η_0 امپدانس فضای آزاد، K_0 ثابت انتشار در فضای آزاد، h ارتفاع مخروط، θ زاویه راس مخروط	
بیضی	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	$Z_s = \eta_0 \sqrt{\epsilon_r} \times \sqrt{\left[1 + j \left(\frac{a}{c}\right) \cot(K_0 c)\right]}$	η_0 امپدانس فضای آزاد، K_0 ثابت انتشار در فضای آزاد، a و b و c نیم قطرهای بیضی در جهات x, y, z ، ϵ_r ثابت دی الکتریک	
هذلولی یکپارچه	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$	$Z_s = \eta_0 \sqrt{\epsilon_r} \times \left[1 + j \left(\frac{a}{c}\right) \cot(K_0 c)\right]$	η_0 امپدانس فضای آزاد، K_0 ثابت انتشار در فضای آزاد، ϵ_r ثابت دی الکتریک	

$$Z_s = \eta_0 \sqrt{\epsilon_r} \times \left[1 + j \tan(K_0 \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}) \right]$$

سهمی گون بیضوی

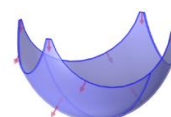
η_0 امپدانس فضای آزاد، K_0 ثابت انتشار در فضای آزاد، ϵ_r ثابت دی الکتریک



$$Z_s = \eta_0 \sqrt{\epsilon_r} \times \left[1 + j \left(\frac{a-b}{a+b} \right) \tan(K_0 \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{2}}) \right]$$

سهمی هذلولی گون

η_0 امپدانس فضای آزاد، K_0 ثابت انتشار در فضای آزاد، ϵ_r ثابت دی الکتریک



و حتی در بعضی از اشکال صفر مطلق باقی می ماند و کم ترین تغییرات را شامل می شود.

برای هندسه سهمی گون بیضوی، بالاترین مقدار S_{11} که در منفی ترین حالت خود قرار دارد، در بازه فرکانسی ۱۰ گیگاهرتزی معادل $-۸/۲$ دسی بل می باشد که مقدار قابل توجهی پراکندگی و اتلاف الکترومغناطیسی را شامل می شود. در رده بعدی سطح مقطع بیضی به عنوان یک مقطع دارای انحنای قابل توجه که پیش بینی می شود بیش ترین پراکندگی موج برخوردی را داشته باشد، در بازه فرکانسی ۹ گیگاهرتزی معادل -۸ دسی بل و برای هذلولوی یک پارچه در همین بازه فرکانسی مقدار $-۷/۸$ دسی بل ثبت گردیده است.

۳- نتایج کاهش انعکاس حاصل از حل عددی

در این بخش، نتایج حاصل از بررسی عددی در نرم افزار به صورت مقادیر عددی جذب و عبور، گراف های الکترومغناطیسی و کانتور های جذب در بازه فرکانسی باند ایکس، با زاویه تابش مایل، بررسی می شود. در جدول ۳، میزان افت سیگنال راداری برای تمام سطح مقاطع آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که، در بازه های بین ۸ الی ۱۰ گیگاهرتز بیش ترین تغییران افت سیگنال مشاهده می شود، اما در بازه بین ۱۰ الی ۱۲ گیگاهرتز، مقادیر افت سیگنال به مقدار صفر نزدیک شده

جدول ۳ - مقادیر S_{11} بر حسب دسی بل برای تمامی هندسه ها در بازه فرکانسی باند ایکس

Frequency (GHz)	8	8/5	9	9/5	10	10/5	11	11/5	12
کره	- 0/5	- 1/8	- 4	- 2	0	0	0	0	0
بیضی	- 0/25	- 3/25	- 8	- 4/5	- 0/6	- 0/4	- 0/2	- 0/1	0
سهمی گون بیضوی	- 4/25	- 2/75	0	- 4	- 8/2	- 4	0	0	0
هذلولی	- 4	- 5/5	- 7/8	- 4	- 0/5	- 0/25	0	0	0
استوانه	- 3/5	- 4/7	- 7	- 4	- 1/1	- 0/75	- 0/3	- 0/25	0
مخروط	- 5	- 2/5	- 0/1	- 1/25	- 2/5	- 1/25	0	0	0
سهمی هذلولی گون	- 5	- 3	- 0/3	- 1/2	- 2	- 1/5	- 1	- 0/7	- 0/2

به صورت گرافیکی است که در شکل ۵، آمده‌است. جایی که بیش‌ترین افت سیگنال و تطابق امپدانسی، به ترتیب متعلق به اشکال سهمی‌گون بیضوی، بیضی و سطح مقطع هذلولی‌گون با مقادیر $8/2$ - دسی بل، 8 - دسی بل و $7/8$ - دسی بل ثبت شده‌است. همان‌طور که اشاره شد، بهینه‌ترین عملکرد آنتن در شناسایی موج بازتابی از سطح مقطع در بازه‌های انتهایی فرکانسی رخ داده و به سمت صفر متمایل می‌شود. در این حالت که سیستم بالاترین افت سیگنال را تجربه می‌کند، S_{21} مثبت‌ترین حالت خود را برحسب دسی بل و نزدیک به صفر ثبت می‌کند تا در مقابل منفی‌ترین بازتاب‌ها، مثبت‌ترین عبور را داشته باشد. برای یک سیستم RF، روابط بین S_{11} و S_{21} به صورت معادله (۱۴) به دست خواهد آمد.

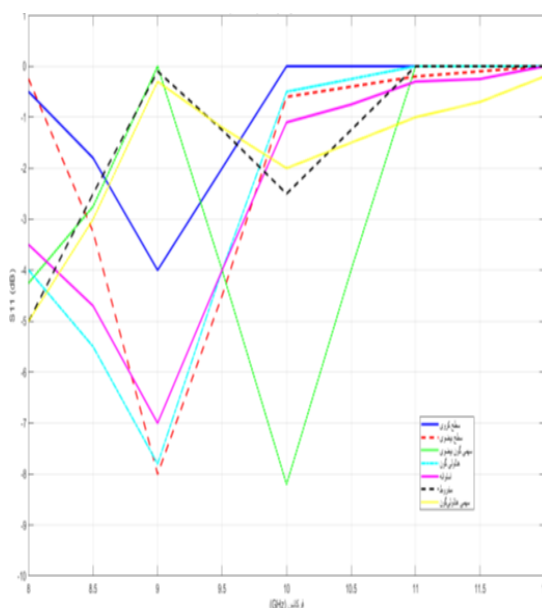
$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1 \quad (14)$$

۳-۱- نتایج انتقال الکترومغناطیسی در حل عددی

S_{21} به معنای انتقال از پورت ۱ به سمت پورت ۲ است که وابسته به گذردهی و نفوذپذیری ماده و سطح است. اگر نوع ماده در میان دو پورت تغییر کند، مثلاً انتقال از وکیوم به دی الکتریک یا اگر سطح و هندسه سازه فاصله بین دو پورت را تغییر دهد، این تغییر می‌تواند موجب تقویت یا انسداد عبور مستمر موج شده و زاویه اتصال را تغییر دهد. به صورت کلی مواد باضرایب هدایت بالا می‌تواند S_{21} را افزایش دهد. شکل ۶، نمودار مقادیر انرژی انتقالی برحسب دسی بل را برای سطح مقاطع نشان می‌دهد به صورتی که برای سطح سهمی‌گون بیضوی که بالاترین افت سیگنال را داشت، مقدار انرژی انتقالی برخلاف انعکاس، به مقدار صفر در بازه فرکانسی ۱۰ گیگاهرتزی می‌رسد و مثبت‌ترین حالت خود را تجربه می‌کند. برای سطح مقاطع هذلولی، بیضی و استوانه که در نمودار S_{11} منفی‌ترین حالت بازتاب را در بازه ۱۰ گیگاهرتزی داشتند، مقدار تابع S_{21} به صفر نزدیک شده و مثبت تلقی می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه‌های انتهایی فرکانسی با فرض اینکه افت سیگنال به صفر می‌رسید، انتقال منفی‌ترین حالت خود تا ماکزیمم 120 - دسی بل است که نشان‌دهنده بالاترین انعکاس به

برای سطح کروی افت سیگنال کم و تقریباً یکنواخت را در زوایای بازتاب مایل، شامل می‌شود که در بازه ۱۰ الی ۱۲ گیگاهرتزی صفر مطلق را ثبت کرده است. برای هندسه مخروطی مقادیر افت در بازه ۸ گیگاهرتزی بیش‌ترین حالت خود یعنی 5 - دسی بل بوده و در بازه‌های فرکانسی بالاتر به مقدار صفر نزدیک می‌شود. مقطع سهمی هذلولی‌گون، در بازه ابتدایی فرکانسی، رفتاری مشابه با افت انعکاس مخروط را ثبت می‌کند، اما به تدریج با افزایش بازه‌های فرکانسی این مقدار مثبت‌تر شده و عملکرد آنتن در جهت بازتاب امواج بهینه‌تر خواهد بود.

از آن جا که در ماتریس پراکندگی، S_{21} درایه دیگری از این ماتریس است، این تابع مقادیر انرژی انتقالی یا انرژی عبوری به سمت پورت شماره ۲ گیرنده را شامل می‌شود. به صورت کلی مقادیر S_{21} با S_{11} معکوس یک‌دیگر تلقی می‌شوند به گونه‌ای که هرچه تلفات بالاتر باشد، بازتاب موج به سمت آنتن کم‌تر بوده و کارایی آنتن در شناسایی موج بازتابی کم‌تر خواهد بود.



شکل ۵- نمودار مقادیر S_{11} برحسب دسی بل برای تمامی هندسه‌ها در بازه فرکانسی

برای مقطع استوانه نیز بیش‌ترین افت سیگنال در بازه ۹ گیگاهرتزی معادل 7 - دسی بل ثبت شده‌است. با توجه به جدول ۳، مقادیر S_{11} برای هر سطح مقطع بر حسب دسی بل،

با توجه به جدول ۳ و ۴، که مقادیر S_{11} و خواص الکتریکی مواد پوششی سطح را آورده است، می‌توان کانتور اتلاف انرژی الکترومغناطیس را با توجه به شکل ۷، نتیجه‌گیری کرد. توان اتلاف شده با توجه به معادله (۱۵)، استنباط می‌شود جایی که P_{in} ، توان ورودی و A ، ضریب جذب را تعریف می‌کند.

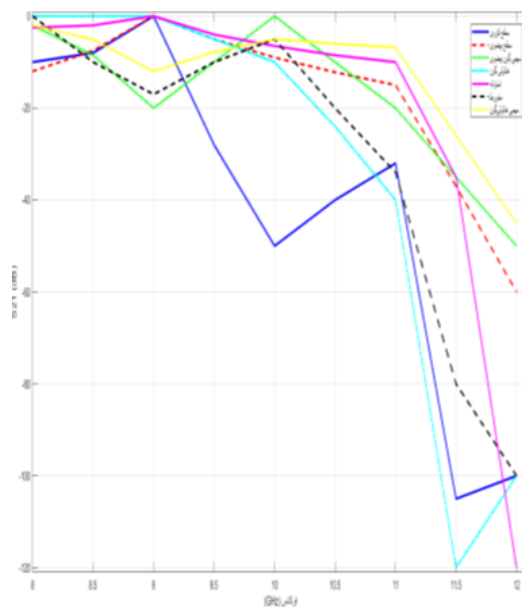
$$P_{abs} = P_{in} \times A \quad (15)$$

مقدار A ، با توجه به رابطه (۱۶)، محاسبه می‌شود.

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (16)$$

جایی که A ، می‌تواند بخشی از تابع عبور یا S_{21} باشد. نمودار سه بعدی شکل ۸، اتلاف و جذب الکترومغناطیسی را بر حسب درصد به نمایش گذاشته‌است. هندسه سهمی‌گون بیضوی با میزان اتلاف الکترومغناطیسی ۸۴٫۸۶٪ در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز، بالاترین جذب را در میان تمامی اشکال نشان می‌دهد. این پدیده احتمالاً به دلیل ساختار هندسی خاص این شکل است که باعث به دام انداختن امواج الکترومغناطیسی و تبدیل آنها به گرما می‌شود. شکل کروی با میانگین جذب ۱۵٫۷۷٪ ضعیف‌ترین عملکرد را دارد که این امر به علت بازتاب بیشتر امواج از سطح منظم و متقارن کره است. انعکاس زیاد در ساختارهای کروی یک خاصیت شناخته شده در الکترومغناطیس است. استوانه با میانگین جذب و اتلاف ۳۴٫۶۹٪ و سهمی‌گون بیضوی با ۳۴٫۹۵٪ عملکرد مشابهی از خود نشان می‌دهند که نشان‌دهنده اهمیت لبه‌ها و زوایا در جذب امواج است. مشاهده می‌شود که اکثر اشکال در محدوده فرکانسی ۹ تا ۱۰ گیگاهرتز بیش‌ترین جذب را دارند که این می‌تواند به خواص پوشش کامپوزیتی با نفوذپذیری نسبی ۳/۹۱ مرتبط باشد. تفاوت چشمگیر بین هدایت الکتریکی آلومینیوم (38000000 S/m) و پوشش کامپوزیتی (3 S/m) (۲۲۰۰) نشان‌دهنده استفاده از مواد با تلفات دی‌الکتریک است که برای جذب امواج طراحی شده‌اند. بیضی با میانگین جذب ۲۶٫۱۶٪ عملکرد متوسطی دارد که نشان می‌دهد صرف غیرکروی بودن برای اتلاف بالا کافی نیست و پارامترهای هندسی دیگری نیز دخیل هستند. با اینکه این هندسه، در بازه ۹ گیگاهرتزی بهینه‌ترین حالت اتلاف را شامل شده‌است. به صورت کلی، رفتار وابسته به فرکانس در تمامی اشکال مشاهده

منبع و کمترین عبور است و اثبات‌کننده رابطه معکوس میان مقادیر S_{21} و S_{11} است.



شکل ۶- نمودار مقادیر S_{21} بر حسب دسی‌بل برای تمامی هندسه‌ها در بازه فرکانسی

۳-۲- نتایج اتلاف انرژی الکترومغناطیسی برای سطوح مختلف

از آن‌جا که در تعریف پوشش روی سطح مقطع در حل عددی از ۲۲ درصد جرمی نانولوله کربنی، ۱۶ درصد نانو سیلیکا و ۶۲ درصد ماتریس رزین اپوکسی تعریف شده‌است، جدول ۴، نسبت دی‌الکتریک و رسانایی سطح مواد استفاده شده در پوشش جاذب الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- خواص الکتریکی مواد پوششی سطح

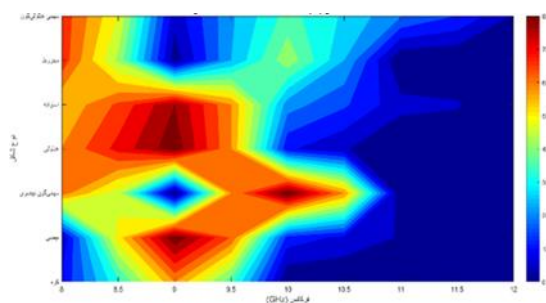
نام ماده	نسبت دی الکتریک	رسانایی پوششی (S/m)
Aluminium	1	3.8×10^7
MWCNT	5	1×10^4
Silica	4	1×10^{-10}
Epoxy Resin	3/5	1×10^{-12}

تطابق توان میان منبع و بار بدست آورد. امپدانس (Z)، از رابطه (۱۷)، بدست می‌آید.

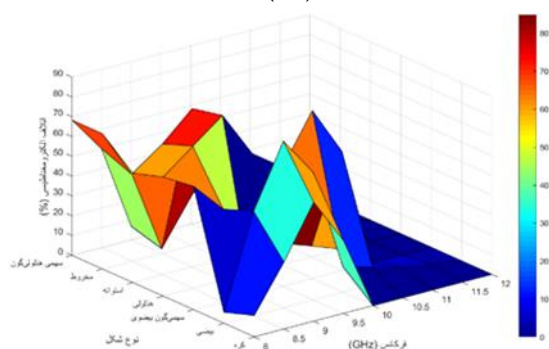
$$Z = R + jx \quad (17)$$

که در آن R ، مقاومت و X راکتانس است. تطابق امپدانس زمانی بدست می‌آید که امپدانس ورودی بار مانند آنتن، با امپدانس منبع برابر باشد. در اشکال (۸-۱۰)، با توجه به مقدار رفلکشن در بازه فرکانسی میزان تطابق امپدانس اشکال بیضی، سهمی‌گون بیضوی و هذلولی‌گون را که بیش‌ترین تلفات را داشتند، نشان داده شده‌است. برای سطح مقطع بیضی بهینه‌ترین میزان تطابق امپدانس که بالاترین جذب و کمترین رفلکشن را دارد، و می‌تواند بخش عمده‌ای از انرژی الکترومغناطیسی را تلف کند، در بازه ۹ گیگاهرتزی متمایل به مرکز دایره، نزدیک به ۲ اهم ثبت شده‌است، اما با توجه به اینکه در بازه‌های انتهایی فرکانسی تطابق امپدانس صفر بوده و رفلکشن صددرصد است، این مقادیر به دیواره‌های دایره نزدیک‌تر هستند. برای مقطع سهمی‌گون بیضوی، بیش‌ترین حالت تطابق امپدانس در نقطه‌ای رخ می‌دهد که بیش‌ترین جذب و کم‌ترین انعکاس را دارد؛ یعنی در بازه فرکانسی ۱۰ گیگاهرتزی که با طیف سبز رنگ متمایل به مرکز دایره، بین امپدانس ۰/۵ الی ۱ اهم رخ می‌دهد. برای مقطع هذلولی‌گون مانند بیضی، بیش‌ترین جذب و تلفات موج در بازه ۹ گیگاهرتزی رخ داده‌است؛ بنابراین، بالاترین تطابق امپدانس در نقطه نرمالیز شده ۲ اهم با راکتانس مثبت رخ داده‌است و در بازه بالاتر فرکانسی، این مقادیر نزدیک به مرزهای دایره و با بازتاب صددرصدی ثبت شده‌است که طیف رنگی در این نواحی، رفته رفته قرمز می‌شود. با بررسی بیشتر الگوی پراکندگی موج، مشخص گردید که پهنای باند جذب در ساختارهای هذلولی‌گون نسبت به ساختارهای بیضوی، حدود ۱۲٪ افزایش یافته‌است که این پدیده را می‌توان با بررسی معادلات ماکسول در شرایط مرزی خاص تحلیل نمود.

می‌شود که برای کاربردهای انتخابی فرکانسی مانند فیلترینگ الکترومغناطیسی مناسب است. سطح مخروط با میانگین جذب ۲۳،۱۳٪ عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد که احتمالاً به دلیل بازتاب بیشتر امواج از سطح شیب‌دار آن است. شکل‌های با ساختار پیچیده‌تر مانند سهمی هذلولی‌گون با میانگین جذب ۲۸،۳۵٪ عملکرد متوسط به بالایی دارند که نشان‌دهنده تأثیر انحنای متعدد در جذب امواج است. با توجه به نتایج، می‌توان استنباط کرد که طراحی سطوح با انحنای مختلط برای جاذب‌های الکترومغناطیسی در باند X مؤثرتر از اشکال هندسی ساده است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- الف) کانتور جذب و اتلاف الکترومغناطیس بر حسب درصد برای هندسه‌های مختلف
ب) نمودار سه بعدی کانتور جذب و اتلاف الکترومغناطیس بر حسب درصد برای هندسه‌های مختلف

۳-۳- نتایج حاصل از تطابق امپدانس در نمودار اسمیت

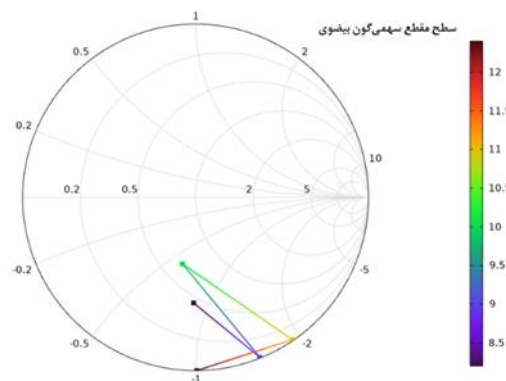
با توجه به نمودار اسمیت می‌توان مقادیر حقیقی و موهومی امپدانس را تخمین زد و تلفات بازتاب در سیستم را با توجه به

۳-۴- نتایج حاصل از ادمیتانس

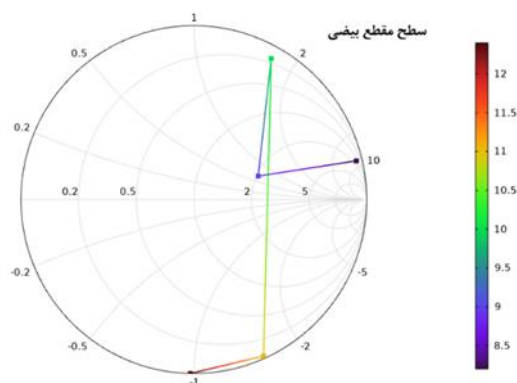
ادمیتانس به صورت کلی، سهولت عبور جریان از یک شبکه را تعریف می‌کند، به گونه‌ای که با افزایش این مقدار، انتقال از سیستم افزایش می‌یابد، این مقدار عکس امپدانس موج بوده و در حالتی که ادمیتانس بار بالا باشد و با امپدانس بار مطابقت داشته باشد، حجم سیگنال ورودی بیش‌تر بوده و انعکاس کم‌تری رخ می‌دهد. فرم کلی ادمیتانس به شکل عبارت (۱۸)، است. که معادل معکوس امپدانس تعریف می‌شود.

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (18)$$

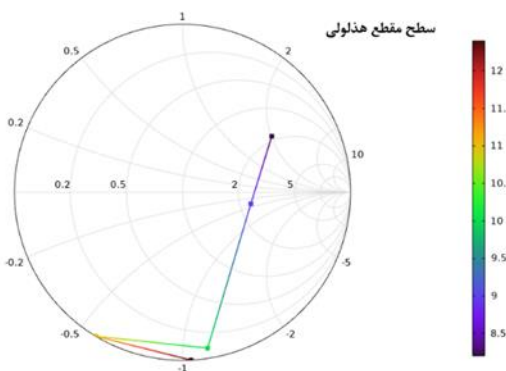
شکل (۱۱-۱۷)، پراکندگی ادمیتانس بار در بازه فرکانسی باند ایکس با واحد سیمنس (S)، برای همه اشکال هندسی نشان می‌دهد. به گونه‌ای که هرچه جذب و عبور بالاتر باشد، ادمیتانس نقطه بحرانی‌تر را در طیف رنگی تیره‌تر نشان می‌دهد، اما هرچه طیف رنگی سردتر و روشن‌تر شود، ادمیتانس بار ورودی کم‌تر می‌شود که در بازه‌های انتهایی فرکانسی که عملکرد آنتن در بازتاب موج ورودی بیش‌تر است، مشاهده می‌شود. برای مقطع استوانه که نزدیک به ۷- دسی‌بل افت انعکاس در بازه ۹ گیگاهرتزی را تجربه کرده است، ادمیتانس بار در بازه ۸/۵ الی ۹ گیگاهرتزی، تا مقدار ۴/۷ سیمنس افزایش می‌یابد و در مابقی بازه‌های فرکانسی به تدریج به ناحیه سردتر و روشن‌تر که معادل ۱ سیمنس است نزدیک می‌شود. برای مقطع هذلولی‌گون یکپارچه مشاهده می‌شود که مشابه این رفتار را در بازه ۹ گیگاهرتزی با مقدار بیشینه ادمیتانس ۵/۵ سیمنس ثبت کرده است، مقطع بیضی با افت سیگنال ۸- دسی‌بل در بازه میان ۸/۵ الی ۹ گیگاهرتز، ادمیتانس نزدیک به ۶ سیمنس را شامل شده و در مابقی بازه‌های انتهایی فرکانسی ادمیتانس به ۱ سیمنس نزدیک می‌شود. مقطع سهمی هذلولی‌گون، در دو بازه ۸ و ۱۰ گیگاهرتزی بالاترین تأثیرات جذب و عبور موج را شامل می‌شود و بدیهی است که ادمیتانس بار در این دونقطه بخصوص در بازه ۸ گیگاهرتزی به مقدار بیشینه ۳ سیمنس برسد. مقطع مخروطی رفتار جذب و عبوری مشابه سهمی هذلولی‌گون را دارد و در بازه‌های ۸ و ۱۰ گیگاهرتزی بیشترین مقدار ادمیتانس را ثبت می‌کند که بحرانی‌ترین حالت آن در بازه ابتدایی فرکانسی با بیشینه مقدار ۳ سیمنس رخ می‌دهد. مقطع کروی در بازه ۸/۵ الی ۹/۵ گیگاهرتز ماکزیمم مقدار ۲/۵ سیمنس را ثبت کرده و



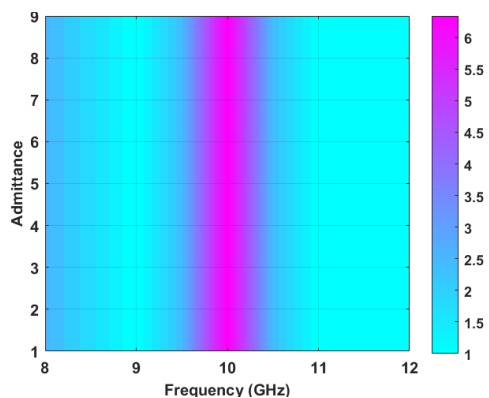
شکل ۸- نمودار قطبی تطابق امپدانس برای سطح سهمی گون بیضوی بیضی



شکل ۹- نمودار قطبی تطابق امپدانس برای سطح مقطع بیضی

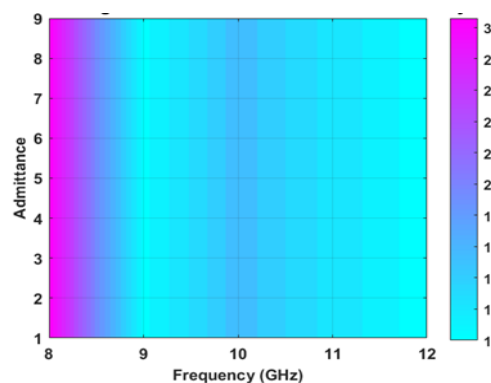


شکل ۱۰- نمودار قطبی تطابق امپدانس برای سطح مقطع هذلولی

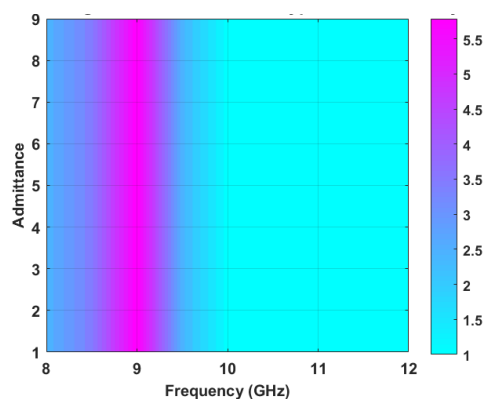


شکل ۱۴ - کانتور بیشینه مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی برای سهمی‌گون بیضوی

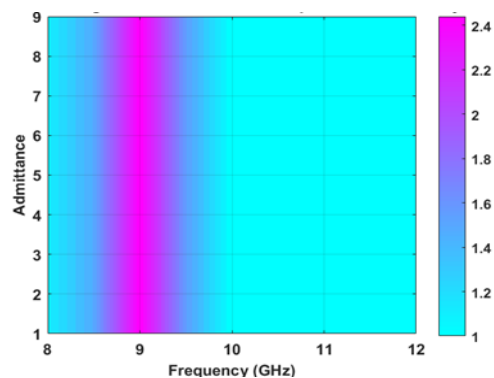
برای سهمی‌گون بیضوی که بالاترین سهم افت سیگنال معادل $8/2$ - دسی‌بل را در بازه فرکانسی ۱۰ گیگاهرتزی دارد، بیشینه ادمیتانس تا $6/5$ سیمنس در این بازه تغییر می‌کند.



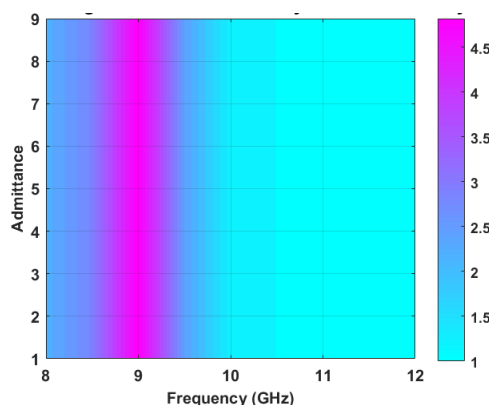
شکل ۱۱ - کانتور بیشینه مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی برای سهمی هذلولی‌گون



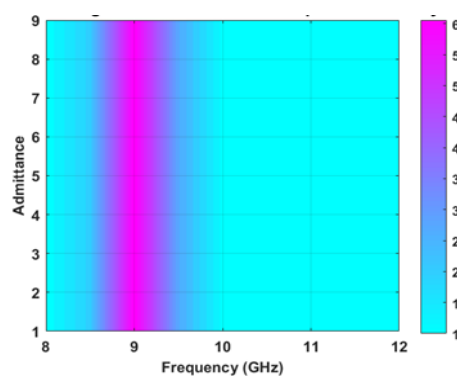
شکل ۱۵ - کانتور بیشینه مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی برای هذلولی یکپارچه



شکل ۱۲ - کانتور بیشینه مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی برای کره

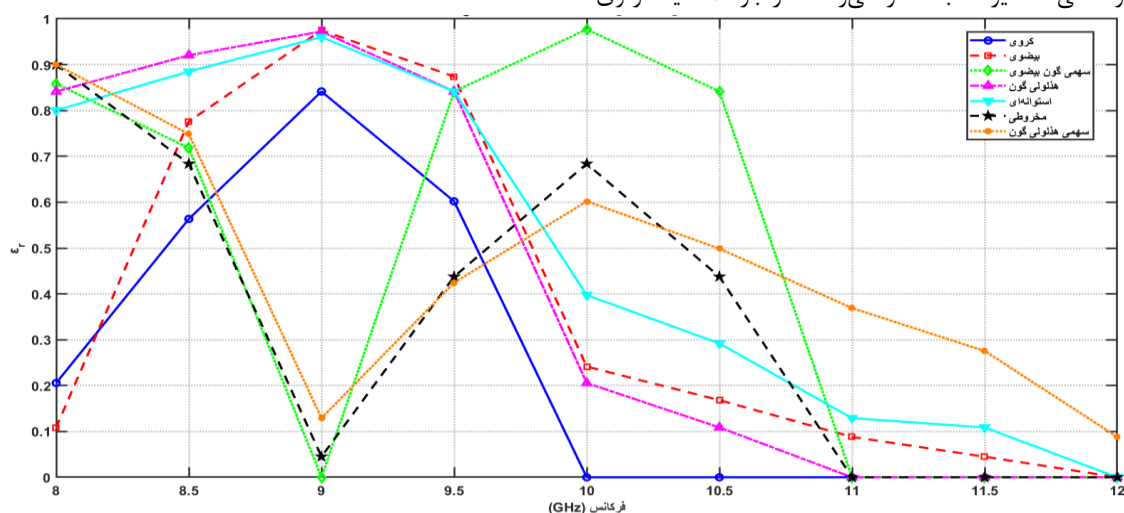


شکل ۱۶ - کانتور بیشینه مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی برای استوانه

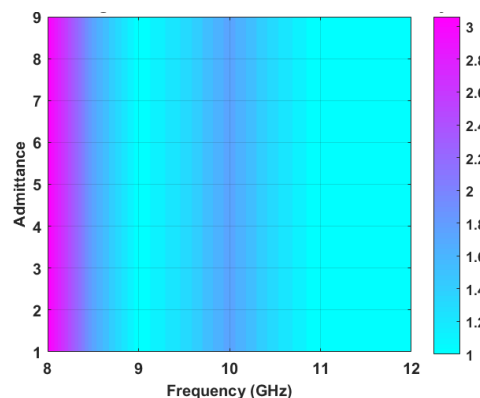


شکل ۱۳ - کانتور بیشینه مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی برای بیضی

بالاترین پیک گذردهی الکتریکی مربوط به هذلولی، استوانه و بیضی است که مقادیر بیشینه گذردهی الکتریکی که بین ۰/۹ الی ۱ است را ثبت می کنند که گذردهی (خلا) نامیده می شود، و البته با بیش تر شدن فرکانس افت ملایمی را به سمت گذردهی صفر شامل می شوند. برای سطح مخروط، سهمی گون بیضوی و سهمی هذلولی گون در ابتدا، در بازه های ابتدایی به صورت اکیدا نزولی است که برای سهمی گون بیضوی مقدار صفر مطلق را در این بازه ثبت می کند، اما فرکانسی بخصوص بازه فرکانسی ۹ گیگاهرتز، نمودار گذردهی در بازه فرکانسی بین ۹ الی ۱۰ گیگاهرتزی مقادیر این سه مقطع به صورت ناگهانی رشد کرده که برای سهمی گون بیضوی به مقدار مطلق ۱ در بازه ۱۰ گیگاهرتزی می رسد که این مقدار، بیشینه گذردهی الکتریکی در میان سطح مقاطع است. برای سطح کروی، بیشینه مقدار گذردهی آن در بازه فرکانسی ۹ گیگاهرتزی معادل ۰/۸۵ است که نسبت به بقیه سطح مقاطع، مقدار میانه را ثبت کرده است. برای مقاطعی مانند استوانه و بیضی، شیب نمودار به صورت ملایم کاهش می یابد اما برای سطوح کروی در بازه ۱۰ گیگاهرتز، مخروط در بازه ۱۱ گیگاهرتز، سهمی گون بیضوی و هذلولی گون نیز که اکثرا در بازه فرکانسی ۱۲ گیگاهرتزی، کاملا کمینه می شوند. در بازه ۱۱ گیگاهرتزی مطلقا صفر شده و تا انتهای بازه فرکانسی یعنی ۱۲ گیگاهرتز همچنان صفر باقی می ماند.



شکل ۱۸- نمودار گذردهی الکتریکی سطوح مختلف



شکل ۱۷- کانتور بیشینه مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی مقادیر ادمیتانس در بازه فرکانسی برای استوانه

۳-۵- نتایج حاصل از تطابق امپدانس در نمودار اسمیت

گذردهی الکتریکی به صورت کلی به رفتار الکتریکی نوع ماده در سطح مقطع می پردازد به گونه ای که بیان می کند، ماده چه مقدار می تواند میدان الکتریکی را در خود نگه دارد نموداری که در شکل ۱۸، ارائه شده است، میزان گذردهی انرژی الکتریکی از سطح مقاطع مختلف را نشان می دهد که در بازه فرکانسی باند ایکس و بین ۱۰ تا ۱، تعیین شده است. در حالت کلی، مشاهده می شود که با تغییر فرکانس گذردهی نیز دستخوش تغییراتی می شود. به صورتی که، بیش ترین نوسانات در بازه ۸/۵ الی ۱۱ گیگاهرتز رخ می دهد و در بازه های انتهایی فرکانسی مقادیر ϵ_r به صفر می رسد. در بازه ۹ گیگاهرتزی

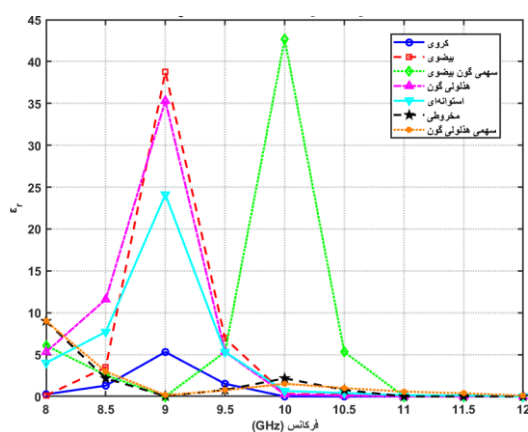
۳-۶- نفوذپذیری مغناطیسی

با توجه به مقادیر S_{11} که برای هریک از شکل‌ها آمده است نفوذپذیری مغناطیسی را می‌توان با توجه به ضرایب بازتاب، از معادله (۱۹) استخراج کرد.

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{11}|^2} \quad (19)$$

به صورت کلی، برای تمامی سطوح، میزان نفوذپذیری مغناطیسی به صورت نموداری که در شکل ۱۹ آمده است، نشان داده می‌شود. در دیدگاه کلی بیش‌ترین تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی در بازه فرکانسی بین ۸/۵ تا ۹/۵ گیگاهرتز به اندازه بیشینه ۳۸ برای مقطع بیضوی، ۳۵ برای مقطع هذلولی، ۲۳/۵ برای استوانه و برای سطح کروی تا ۵ ثبت گردیده‌است برای مقطع سهمی‌گون بیضوی که بالاترین سطح نفوذ را دارد، این مقدار تا ۴۲/۵ افزایش پیدا می‌کند که برای سطح مخروط و سهمی هذلولی‌گون به صورت میانگین کم‌ترین سطح نفوذ را

در بازه فرکانسی ثبت کرده و با عملکرد غیرمغناطیسی نفوذپذیری پایینی را از خود نشان داده‌اند. به صورت کلی از بازه ۱۱ گیگاهرتز به بعد نفوذپذیری مغناطیسی به صورت مطلق صفر شده و سطح مقطع و جنس آن به صورت عایق در مقابل موج عمل می‌کنند.



شکل ۱۹- نمودار نفوذپذیری مغناطیسی سطوح مختلف

جمع بندی نتایج

در این پژوهش به بررسی تخصصی اثرگذاری الکترومغناطیسی بر روی مقاطع مخروطی و رویه‌های درجه دوم پرداخته شد که برخلاف مطالعات پیشین، تمرکز اصلی بر سطوح هندسی خاصی از جمله مقاطع مخروطی و تأثیر آنها در کاهش سطح مقطع راداری بوده است. این مطالعه نه تنها تأثیر پارامترهای هندسی سطوح در کاهش انعکاس راداری را بررسی کرده، بلکه به تحلیل جذب، گذردگی و نفوذپذیری الکترومغناطیسی سطوح پوشیده از نانومواد جاذب از طریق روش عددی پرداخته و تأثیرات پراکندگی و اتلاف الکترومغناطیسی را با استفاده از تحلیل پارامترهای ماتریس S به تصویر کشیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقطع سهمی بیضوی، بیش‌ترین افت سیگنال در بازه ۱۰ گیگاهرتزی، معادل ۸/۲- دسی‌بل را دارا است که در نمودار بازتابی اسمیت، بالاترین تطابق امپدانس را در بازه بین ۰/۵ الی ۱ اهم ثبت کرده است؛ همچنین برای این سطح، بیش‌ترین پیک نمودار در بازه ۱۰ گیگاهرتزی که بالاترین تغییرات افت بازتاب را شامل می‌شود، به عنوان بهینه‌ترین هندسه در اتلاف موج الکترومغناطیسی شناخته شده است. علاوه بر این، بر اساس نتایج حاصل از کانتورهای ادمیتانس که مقادیر معکوس امپدانس را تعریف می‌کند، مقطع سهمی بیضوی با بالاترین ادمیتانس ورودی با مقدار ۶/۵ سیمنس در بازه ۱۰ گیگاهرتزی، بیش‌ترین سهم را از آن خود کرده و بالاترین گذردگی الکتریکی نزدیک به گذردگی خلا و بیش‌ترین نفوذپذیری مغناطیسی را نشان داده است. این هندسه به علت نقاط عطف و انحنای یکطرفه در جهت موج ارسالی می‌تواند موجب توزیع غیرخطی میدان الکترومغناطیسی شده و در فرکانس‌های خاص نواحی فشرده تری را ایجاد کند در مقابل، سطح کروی کم‌ترین میانگین افت انعکاس را با مقدار ۰/۸- دسی‌بل در تمامی بازه‌های فرکانسی ثبت کرده که نشان‌دهنده تطابق امپدانس بسیار پایین و بازتاب بسیار بالا در میان تمامی اشکال هندسی مورد مطالعه است. این امر منجر به بالاترین کارایی آنتن در شناسایی امواج راداری شده است. این نتیجه می‌تواند به علت یکنواخت بودن سطح و ساختار هندسی کره باشد که در بازتاب موج، عملکرد بهینه‌تری نسبت به مقاطع دارای سطح بیضی نشان می‌دهد. این مطالعه با تمرکز ویژه بر رویه‌های درجه دوم و مقاطع مخروطی، افق‌های جدیدی را در زمینه طراحی سطوح با

- [7] Chen M, Wang L, Liu G, Ge C, Wang L, Liu T, Li D, Liang Q, Huang Y (2025) Achieving broadband RCS reduction on curved surfaces through gradient unit design and partition layout strategy. *Thin-Walled Struct* 208:112804
- [8] Han Y, Chang Y, Che W (2022) Frequency-Selective Rasorbers: A View of Frequency-Selective Rasorbers and Their Application in Reducing the Radar Cross Sections of Antennas. *IEEE Microw Mag* 23(2):86-98
- [9] McLaughlin R, Perhinschi M, Yancosek J, Boord W (2025) Integration of Missile Radar Cross Section Assessment Within a Simulation Environment. *AIAA SCITECH 2025 Forum*
- [10] Abdulkhulil M, et al (2022) Multiwalled carbon nanotubes and zinc oxide using a high energy milling method for radar absorbent. *Mater Res Express* 9:025003
- [11] Sevgi L, Rafiq Z, Majid I (2013) Radar cross section (RCS) measurements [Testing ourselves]. *IEEE Antennas Propag Mag*
- [12] Jia ZR, Wang C, Feng AL, Shi PB, Zhang CH, Liu XH, Wang KK, Wu GL (2020) A low-dielectric decoration strategy to achieve absorption dominated electromagnetic shielding material. *Compos Part B Eng* 183
- [13] Zhong X, He MK, Zhang CY, Guo YQ, Hu JW, Gu JW (2024) Heterostructured BN@Co-C@C endowing polyester composites excellent thermal conductivity and Micro wave absorption at C band. *Adv Funct Mater* 34(19)
- [14] Li T, Li JZ, Xu ZK, Tian YR, Li JT, Du JN, Meng FB (2023) Electromagnetic response of multistage-helical nano-micro conducting polymer structures and their enhanced attenuation mechanism of multiscale-chiral synergistic effect. *Small* 19(21)
- [15] Yang Y, Li J, Wang Z, Ju X, Duan H, Tang Y (2024) Structural design and performance regulation of green electromagnetic interference shielding conductive polymer composites: A review. *Adv Nanocompos*
- [16] Ding W, Zhang W, Zhang M, Wang Q, Shao G, Zhou J (2025) Networked radar waveform design for detecting extended target in the presence of jamming. *Phys Commun* 68
- [17] Knott EF, Shaeffer JF, Tuley MT (2004) *Radar Cross Section*. SciTech, Raleigh, NC, USA
- [18] Zheng Q, Ma J, Wu Z, PourMohammadi P (2025) Dual-broadband high-isolation circularly polarized Low-RCS shared-aperture antenna array based on mushroom-type metasurface. *Opt Commun* 574
- [19] Deng L, Han M (2007) Effects of Carbon Nanotube Dispersion Methods on the Radar Absorbing Properties of mwcnt/Fe crystal/Epoxy Nanocomposites. *Appl Phys Lett* 91:023119

خصوصیات الکترومغناطیسی بهینه برای کاربردهای راداری گشوده است و می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های آتی در زمینه توسعه مواد و سطوح هوشمند با قابلیت کنترل انعکاس امواج الکترومغناطیسی باشد.

علائم و نشانه‌ها

امپدانس فضای آزاد	η_0
ثابت انتشار	K_0
توابع هنکل مرتبه ۱ و ۲	$H_0^{(2)}, H_1^{(2)}$
امپدانس بار	Z_s
نفوذپذیری مغناطیسی	μ
گذردهی الکتریکی	ϵ
انعکاس	S_{11}
انتقال	S_{21}
ادمیتانس	Y
راکتانس	R

منابع و مراجع

- [1] Kim SH, Lee SY, Zhang Y, Park SJ, Gu J (2023) Carbon-Based Radar Absorbing Materials toward Stealth Technologies. *Adv Sci* 10:2303104
- [2] Bruder J, Carlo J, Gurney J, Gorman J, Klaus B, Horn P (2003) Designations for Radar-Frequency Bands. *IEEE Std 521-2002 (Revision of IEEE Std 521-1984)* 8:1-10
- [3] Kolanowska A, Janas D, Herman AP, Jedrysiak RG, Gizewski T, Boncel S (2021) Carbon nanotube materials for electrocardiography. *RSC Adv*
- [4] Jiang W, Liu Y, Gong SX, et al (2009) Application of bionics in antenna radar cross section reduction. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett* 8:1275-1278
- [5] Dikmen CM, Çimen S, Çakır G (2014) Planar octagonal-shaped UWB antenna with reduced radar cross section. *IEEE Trans Antennas Propag* 62(6):2946-2953
- [6] Kui Z, Shi Y (2024) Antenna array-based metasurface for multi-scenario wide-angle polarization-insensitive radar cross-section reduction. *Opt Express* 32:13014-13034

- [23] Zainud-Deen SH, Malhat HAE, Shabayek NA (2020) Reconfigurable RCS Reduction from Curved Structures Using Plasma Based FSS. *Plasmonics* 15:341-350
- [24] Ruiz-Perez F, López-Estrada SM, Tolentino-Hernández RV, Caballero-Briones F (2022) Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *J Sci Adv Mater Devices* 7(3)
- [25] Sahin S, Nahar N, Sertel K (2020) A Simplified Nicolson–Ross–Weir Method for Material Characterization Using Single-Port Measurements. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol*
- [20] Bhattacharya P, Sahoo S, Das CK (2012) Microwave absorption behavior of CNTMW based nanocomposites in X band region. *Materials Science Centre, Indian Institute of Technology*
- [21] Feng X, Liao G, Du J, Dong L, Jin K, Jian X (2008) Modeling of diamond field-effect transistors for RF IC development. *Polym Eng Sci* 48:1007
- [22] Im HR, Kim W, Noh YH, Hong IP, Yook JG RCS Estimation of Singly Curved Dielectric Shell Structure with PMCHWT Method and Experimental Verification. Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea