

کاهش سطح مقطع راداری یک صفحه تخت مربعی با استفاده از پوشش پلاسمایی ناشی از ذرات آلفا

محسن دهقان^۱، روح اله رضوی نژاد^{۲*}، مرتضی رضایی^۳

۱- عضو انجمن هسته‌ای ایران ۲- دانشیار، ۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۷/۰۴/۲۳، پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۶)

چکیده

بررسی کاهش سطح مقطع راداری از موضوعات مهم تحقیقاتی در سال‌های اخیر است. پنهان‌سازی پلاسما پایه، از روش‌های کاهش سطح مقطع راداری است که در آن، موج الکترومغناطیسی رادار، در طی برخوردی بین ذرات باردار در لایه پلاسمایی پوشاننده ساختار، میرا شده و میزان موج برگشتی آن کاهش می‌یابد. در این مقاله، نخست به مرور جامع پنهان‌سازی بر پایه پلاسما پرداخته شد. از کد MCNPX برای محاسبه چگالی الکترون هوا ناشی از ایزوتوپ‌های آلفا در شرایط STP استفاده شده است. سپس، سطح مقطع راداری یک صفحه تخت رسانا، در حضور و عدم حضور پوشش پلاسمایی ایجاد شده به وسیله هسته‌های آلفا، با استفاده از روش حل FEM با نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده است. مهم‌ترین جنبه تحقیقاتی این طرح، تلاش برای بهینه‌سازی کاهش سطح مقطع راداری با تغییر پارامترهای پلاسمای ایجاد شده به وسیله هسته‌های پرتوزا است. نتایج به دست آمده کاهش ۷ تا ۱۱ دسی‌بل را در سطح مقطع راداری در بازه فرکانسی معمول راداری ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: پنهان‌کاری راداری پلاسما، سطح مقطع راداری، چگالی الکترون، فرکانس برخوردی، پلاسمای سرد غیرمغناطیسه

Radar Cross Section Reduction of a Flat Square Plate Using Plasma Coating Caused By Alpha Particles

M. Dehghan, R. Razavi^{*}, M. Ramezani

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 14/07/2018; Accepted: 08/10/2018)

Abstract

The investigation on the reduction of radar cross section (RCS) has been an interesting research subject in recent years. Plasma-based stealth is a RCS reduction technique associated with the reflection and absorption of incident EM wave by the plasma layer surrounding the structure. In this paper, an overview of the plasma stealth has been presented. The MCNPX codes are employed to calculate the density electron of air in STP conditions by the alpha decay. Then, the RCS of the flat conductive plate, in the presence and absence of plasma coatings created by alpha decay of nuclei, is simulated by FEM solving method in CST-studio. The most important aspect of the research is the attempt to optimize the RCS reduction by changing the plasma parameters created by the radioactive nuclei. The obtained results show a reduction of 7 to 11 dB at RCS in the typical radar frequency range (2 to 12 GHz).

Keywords: Plasma Stealth, RCS, Electron Density, Collision Frequency, Non-Magnetized Cold Plasma.

*Corresponding Author E-mail: rrazavin@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

در فرآیندهای نظامی رسیدن به کمینه ناپیدایی که همان کاهش سطح مقطع راداری^۱ جسم پرنده است، مد نظر است؛ اصطلاح پنهان کاری، مخفی شدن کامل از دید منابع راداری را بیان نمی‌کند بلکه تلاش می‌کند که پرنده در فاصله‌ای نزدیک‌تر از رادار مورد آشکارسازی و ردیابی قرار گیرد. این شبیه به روش استتار است که به‌وسیله سربازان در صحنه نبرد مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ تا وقتی که سربازان به اندازه کافی به دشمن نزدیک نشده باشند، نمی‌توان آن‌ها را شناسایی نمود. عموماً، فناوری پنهان کاری، شامل هر چیزی که مشخصات را کوچک کرده و از شناسایی و آشکارسازی هدف محافظت نماید، می‌شود [۱]. رابطه (۱) (برد رادار) به‌وضوح این مورد را بیان می‌کند [۲].

$$R_{max} = 4 \times \sqrt{\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}}} \quad (1)$$

در رابطه (۱) R_{max} بیشینه برد آشکارسازی، P_t توان ارسالی، G و A_e بهره و مساحت مؤثر آنتن دریافت‌کننده و ارسال‌کننده، σ سطح مقطع راداری هدف و S_{min} کمینه سیگنال قابل آشکارسازی است. پنهان شدن هواپیما از منابع رادار یا پنهان کاری با شکل‌دهی بدنه، لایه‌نشانی، مواد مهندسی‌شده، پلازما و ... به‌دستی می‌آید. به‌طور خاص پنهان کاری پلازما پایه یک موضوع تحقیقاتی مهم است. بر اساس برخی گزارش‌ها، بعضی کشورها ناپیدایی پلازما پایه را در بخش هوافضا پیاده‌سازی کرده‌اند [۳].

پلازما به‌عنوان فناوری پنهان‌کار فعال شناخته می‌شود؛ روس‌ها برای کاربردهای پنهان‌سازی از پلازما سرد استفاده می‌کنند و این مهم احتمالاً با جایگذاری مولد پلازما در دماغه هواپیما حاصل شده است. این مولد حجیم حدود ۱۰۰ کیلوگرمی یک ابر یونیزه را در اطراف هواپیما ایجاد و امواج تابشی رادار را جذب می‌کند. این فناوری برای ایجاد ابر پلازما جهت کاربرد پنهان‌سازی، کاهش RCS حدود ۲۰dB را در جنگنده بمبافکن SU-27 حاصل نموده و در نتیجه کاهش سطح مقطع راداری را به مقدار دو واحد یا صد برابر کاهش داده است [۳].

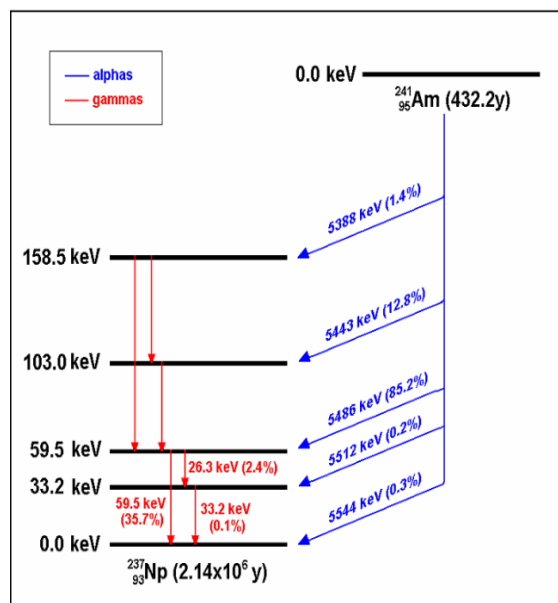
پلازما را می‌توان به روش‌های متنوعی ایجاد کرد: (۱) تخلیه الکتریکی (۲) لیزر (۳) تفنگ الکترونی و (۴) هسته‌های پرتوزا. هر روشی توزیع چگالی الکترونی ویژه خود را دارد؛ از این‌رو در سال‌های اخیر، گروه‌های متعددی تأثیر موج‌بر پلازما با توزیع‌های چگالی متفاوت را مطالعه کرده‌اند [۴-۶]. در این مقاله تأثیر پلازما ایجادشده توسط هسته‌های آلفا بر کاهش سطح مقطع راداری یک صفحه تخت مربعی بررسی شده است.

۲. روش تحقیق

۲-۱. انتخاب ایزوتوپ مناسب

سازوکار اصلی اتلاف انرژی ذرات آلفا، شامل برخورد آن‌ها با الکترون‌های محیط جاذب است. این برهمکنش‌ها منجر به یونش و برانگیزش اتم‌های جاذب می‌شود. یک ذره آلفا به‌طور متوسط انرژی معادل $36/08 \text{ eV}$ به ازای تولید هر زوج یون، در عبور از هوا یا بافت نرم از دست می‌دهد. یونش ویژه یک ذره آلفا بسیار بالا و از مرتبه ده‌ها هزار زوج یون در هر سانتی‌متر از هواست. این پدیده به‌دلیل بار الکتریکی بسیار بالا و سرعت نسبتاً کم آن بر اثر جرم زیاد است.

با توجه به این‌که ذرات آلفا انرژی نسبتاً بالای خود (بیشتر از 5 MeV) را در فاصله اندکی برجای می‌گذارند، قادر به یونیزه نمودن هوای پیرامون و تولید چگالی بالایی از الکترون در لایه‌ای از سطح می‌باشند و انتخاب مناسبی برای این کاربرد می‌باشند؛ البته باید توجه داشت که ایزوتوپ مناسب باید به‌طور خالص آلفا باشد زیرا که وجود تابش‌های دیگر می‌تواند باعث ایجاد آسیب پرتویی به زیرسامانه‌های الکترونیکی شود. به همین منظور سه ایزوتوپ شبه خالص آلفای ^{241}Am ، ^{210}Po و ^{238}Pu مورد بررسی قرار گرفتند. زنجیره واپاشی و طیف انرژی ذرات آلفای خروجی ^{241}Am ، بر اساس اطلاعات موجود در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به انرژی ذره آلفا با بیشینه شدت در سه ایزوتوپ بالا، انرژی متوسط $5/45 \text{ MeV}$ برای شبیه‌سازی انتخاب شده است.



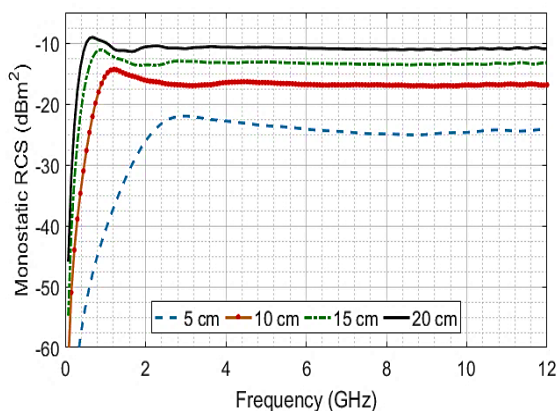
شکل ۱. طیف انرژی ذرات آلفای خروجی چشمه ^{241}Am [۷]

^۱ Radar Cross Section (RCS)

سهیم هستند، σ نوسان می‌کند و به آن ناحیه مای^۳ می‌گویند.

(۳) ناحیه فرکانس بالا ($\lambda \ll a$): در این حالت بخش‌های مختلف جسم به صورت مستقل عمل می‌کنند. به این ترتیب، در طول جسم چندین تناوب از تغییر فاز جریان موجود است. در نتیجه، میدان پراکندگی به شدت وابسته به زاویه خواهد بود و بیشینه پراکندگی مربوط به نقاط خاصی می‌شود. در این ناحیه، σ ممکن است مستقل از طول موج باشد و به آن ناحیه نوری^۴ می‌گویند [۲]. در شکل (۲) سطح مقطع راداری یک صفحه تخت رسانا، در این سه ناحیه تعیین و نشان داده شده است.

طول موج یک رادار متداول باند S، ۱۰ سانتی‌متر است و ابعاد یک پهباد بسیار بزرگ‌تر از ۱۰ سانتی‌متر است؛ بنابراین، پرنده‌های رزمی برای یک رادار باند S یا X همواره در ناحیه فرکانس بالا قرار می‌گیرند. از این رو، برای قرارگیری صفحه آزمون در ناحیه نوری، طول مربع رسانا برابر با ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.



شکل ۲. نواحی مختلف سطح مقطع راداری نرمالیزه شده یک صفحه مربعی رسانا برحسب اندازه ضلع مربع و فرکانس رادار (λ)

۳. نتایج و بحث

۳-۱. محاسبه چگالی الکترون ناشی از اندرکنش ذرات آلفا

با هوا

با استفاده از کد MCNPX ذرات آلفای خروجی از چشمه پرتوزا با انرژی ۵/۴۵ MeV که بر روی سطح یک صفحه تخت رسانا (چشمه سطحی) لایه‌نشانی شده است، در سلول‌های پر شده از هوا ترابرد شدند. مقدار انرژی برجای گذاشته در هر سلول با تعریف کارت فیزیک برای تغییر محدوده انرژی قابل ترابرد آلفا و

۲-۲. محاسبه اندازه مناسب صفحه مربعی آزمون

سطح مقطع راداری با نسبت چگالی توان بازتابی از هدف به چگالی توان ارسالی به هدف برابر است. در واقع اگر R مسافت بین رادار تا هدف، شدت میدان الکتریکی رسیده به سطح هدف E_0 و شدت میدان الکتریکی دریافتی در گیرنده رادار E_S باشند، سطح مقطع راداری برابر است با [۲]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_S}{E_0} \right|^2 \quad (2)$$

در رابطه (۲) نه تنها هدف در ناحیه میدان دور رادار فرض شده، بلکه R نیز به بی‌نهایت میل می‌کند تا بتوان موج تابشی و بازتابی را تخت فرض کرد. فرض دوم این است که هدف، توان تابشی را به طور کامل دریافت و توان پراکندگی را به طور یکنواخت در تمام جهات فضا پراکنده می‌کند. اگرچه این فرض فقط برای کره درست است و برای سایر اجسام این یکنواختی وجود ندارد، ولی همسانگرد فرض کردن سیگنال پراکندگی اجازه می‌دهد که چگالی توان دریافتی در نقطه‌ای به فاصله R از هدف را به توان پراکنده شده روی هدف مربوط کرد.

سطح مقطع راداری یک جسم از یک سو به شکل هندسی و جنس آن و از سوی دیگر تابعی از رادار و پارامترهای فرکانس کار رادار، زاویه تابش موج است. سه ناحیه فرکانسی وجود دارند که رفتار RCS هدف در آن‌ها کاملاً متفاوت است: ناحیه فرکانس پایین، ناحیه تشدید و ناحیه فرکانس بالا. در این تعریف منظور از ناحیه فرکانس پایین یا بالا، تفکیک نواحی برحسب فرکانس نیست بلکه منظور تفکیک بر اساس نسبت ابعاد به طول موج است. اگر هدف کره‌ای نسبت به طول موج هموار باشد، یعنی ناهمواری‌های بزرگ نسبت به طول موج نداشته باشد و شعاع آن a باشد، نواحی فرکانسی را می‌توان چنین تعریف کرد [۲]:

(۱) ناحیه فرکانس پایین ($\lambda \gg a$): در این محدوده، تغییر فاز موج تابشی در طول هدف اندک است. بنابراین جریان القاشده روی بدنه از نظر فاز و دامنه تقریباً ثابت است. در این حالت جسم مانند یک مدار فشرده رفتار می‌کند و تمام اجزای آن با هم تزویج شده و اکوی رادار بستگی بسیار کمی به شکل هدف دارد. برای مثال یک کره کوچک و یک مکعب کوچک هر دو الگوی پراکندگی^۱ همسانگرد و مستقل از جهت دارند. در این ناحیه، σ متناسب با $1/\lambda^4$ تغییر می‌کند و به آن ناحیه رایلی^۲ می‌گویند.

(۲) ناحیه تشدید ($\lambda \approx a$): در این محدوده، فاز جریان در طول جسم تغییر می‌کند و تمام بخش‌های جسم در الگوی پراکندگی

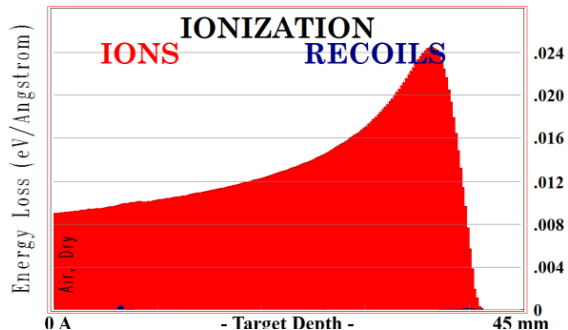
^۳ Mie Region

^۴ Optical Region

^۱ Scattering Pattern

^۲ Rayleigh Region

با تقسیم مقدار انرژی بر جای گذاشته شده بر مقدار $36/08 \text{ eV}$ به ازای تولید هر زوج یون، تعداد زوج الکترون-یون تولیدی به ازای عبور یک ذره آلفا در هوا $n(R) (\#/mm)$ محاسبه می‌شود.



شکل ۶. انرژی بر جای گذاشته ذرات آلفای لایه‌نشانی شده برحسب فاصله از سطح صفحه رسانا در SRIM

الکترون‌های آزاد تولیدشده به وسیله ذرات آلفا، در دو فرآیند بازترکیب و اضافه شدن به اتم خنثی تلف می‌شوند. نرخ زمانی تغییر چگالی الکترون به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۸]:

$$\frac{dn_e}{dt} = q - r \times n_e \times n_i - \beta \times n_e \times n_{O_2} \quad (3)$$

که q نرخ تولید الکترون برحسب حجم هوا، r ضریب بازترکیب الکترون-یون، n_e چگالی یون مثبت، β ضریب اضافه شدن به اتم خنثی و n_{O_2} چگالی مولکول اکسیژن هستند. باید اشاره کرد که مولکول اکسیژن بیشترین گرایش را برای جذب الکترون نسبت به سایر ترکیب‌های موجود در هوا دارد. در حالت تعادل داریم (رابطه ۴) [۸]:

$$q = r \times n_e \times n_i + \beta \times n_e \times n_{O_2} \quad (4)$$

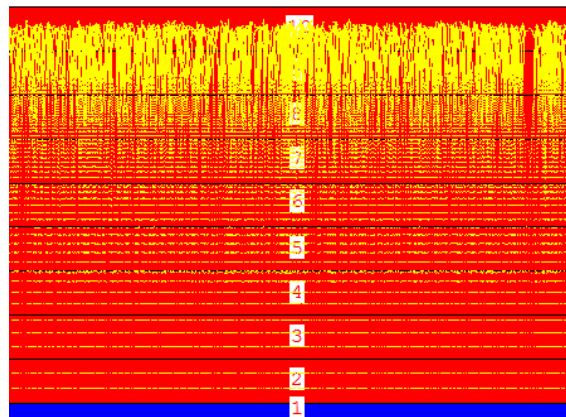
هنگامی که الکترون‌ها از ذرات آلفا به اندازه کافی انرژی دریافت کنند (الکترون‌های δ)، آن‌ها نیز مولکول‌های هوا را تا رسیدن به سطح انرژی معینی، یونیزه یا برانگیخته می‌کنند؛ در نتیجه در مجاورت پویش ذرات آلفا، ناحیه‌ای شامل الکترون‌هایی با انرژی بالاتر از انرژی حرارتی محیط و کافی برای یونیزه نمودن هوا شکل می‌گیرد که به آن رد ذرات آلفا می‌گویند.

هر دو فرآیند اتلاف الکترونی (بازترکیب و اضافه شدن به اتم خنثی)، تابع انرژی جنبشی متوسط الکترون‌های آزاد هستند (رابطه ۵) [۸].

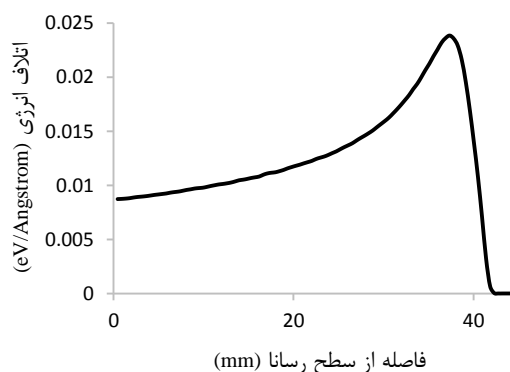
$$r = r(v_e) \quad , \quad \beta = \beta(v_e) \quad (5)$$

احتمال اضافه شدن به اتم خنثی به ازای هر برخورد برای الکترون‌هایی با انرژی میانگین 20 eV تقریباً برابر با صفر است؛

با استفاده از تالی‌های F8* و F6 و ضرب یا تقسیم مقدار به‌دست‌آمده در حجم یا جرم هر یک از سلول‌ها، محاسبه شد (شکل‌های ۳ و ۴).

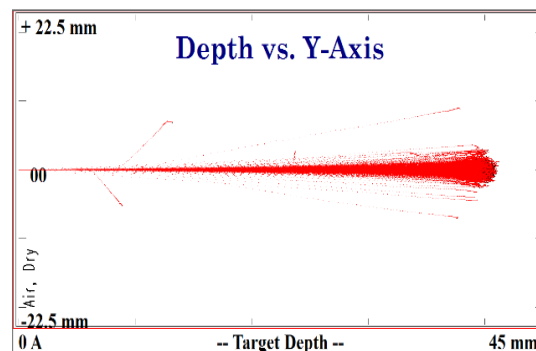


شکل ۳. شبیه‌سازی تراپرد ذرات آلفای لایه‌نشانی شده بر سطح صفحه مربعی رسانا در سلول‌های پر شده از هوا به وسیله MCNPX



شکل ۴. انرژی بر جای گذاشته ذرات آلفای لایه‌نشانی شده برحسب فاصله از سطح صفحه رسانا در MCNPX

برای درستی‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از MCNPX، مقدار انرژی بر جای گذاشته برحسب فاصله از ناشی از یک ذره آلفا، با استفاده از بسته نرم‌افزاری SRIM^۱ محاسبه شد (شکل‌های ۵ و ۶).

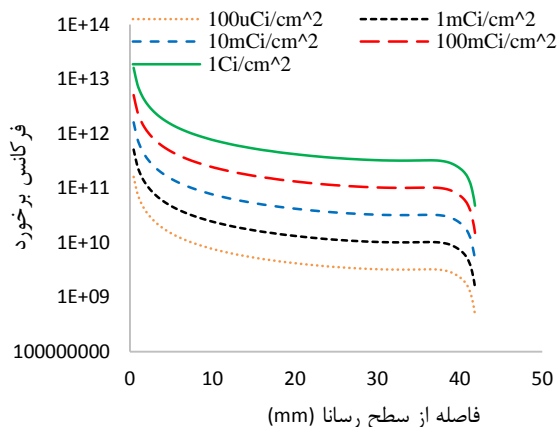


شکل ۵. رد ذرات آلفا در هوا برحسب فاصله از سطح رسانا

¹ Stopping And Range of Ions in Matter

$$v_c = 8.3 \times 10^5 \times \pi a_{air}^2 \sqrt{T} n_e \quad (9)$$

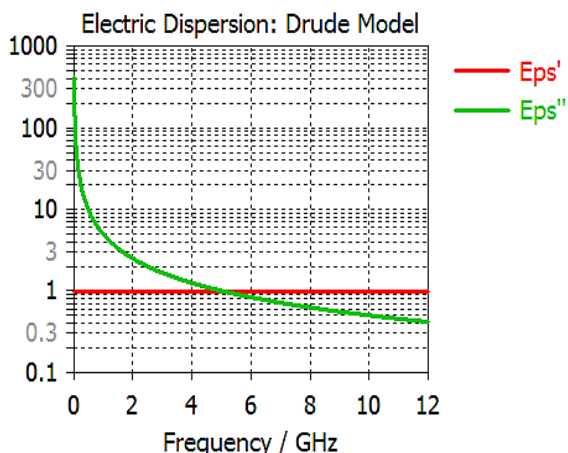
در رابطه (۹) شعاع مولکول هوا [۱۱] $(4.845 \times 10^{-8} \text{ cm})$ و T دما (273K) است. در ادامه فرکانس برخورد پلازما تعیین و در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۹. فرکانس برخورد پلازما برحسب فاصله از سطح صفحه تخت رسانا به ازای اکتیویته‌های مختلف در شرایط STP

پلازما با پارامترهای مختلف، رفتارهای متفاوتی نسبت به امواج الکترومغناطیسی دارد. چگالی الکترون و فرکانس برخورد پارامترهایی مهم هستند که عملکرد پلازما را در جهت کاهش RCS کنترل می‌کنند [۳]. با داشتن این دو پارامتر می‌توان گذردهی دی‌الکتریک مختلط پلازما را با استفاده از رابطه (۱۰) به‌دست آورد که نتایج محاسبه‌شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است [۳]:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \nu^2)} - \frac{i\omega_p^2 \nu}{\omega(\omega^2 + \nu^2)} \quad (10)$$



شکل ۱۰. ثابت دی‌الکتریک پلازما به ازای اکتیویته 100 mCi/cm^2

بنابراین ضریب β برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. ضریب باز ترکیب r برای هوا در شرایط STP و $(E_e)_{avg} = 20 \text{ eV}$ برابر با $r_{STP} = 5.75 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 / \text{sec.e}$ است [۸].

با در نظر گرفتن $n_e = n_i$ ، در این حالت چگالی الکترون از رابطه (۶) به دست می‌آید [۸-۱۰]:

$$n_e = \sqrt{\frac{q}{r}} \quad (6)$$

نرخ تولید الکترون برای ایزوتوپی (گسیلنده آلفا) که بر روی سطح یک صفحه تخت لایه‌نشانی شده است با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید [۸-۱۰]:

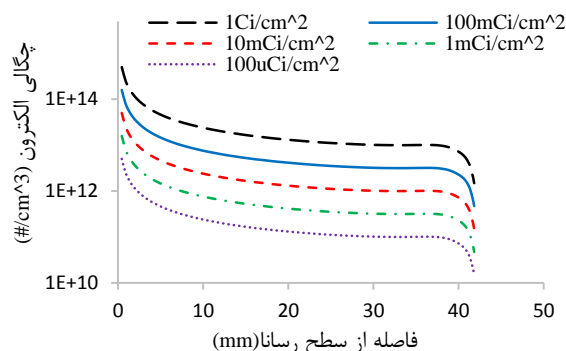
$$q = \frac{5N_\alpha}{2\pi} \int_0^{200} \int_0^{200} \frac{n(R) dx dy}{R^2} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، R فاصله از سطح رسانا، $n(R)$ تعداد زوج-یون تولیدی برحسب فاصله R و N_α تعداد واپاشی صورت گرفته برحسب Bq/cm^2 است [۹]. چگالی الکترون به ازای اکتیویته‌های متفاوت چشمه در سلول‌های مختلف در سطح صفحه تخت مربعی محاسبه و در شکل (۷) نشان داده شده است.

با جایگذاری مقدار چگالی الکترون به‌دست‌آمده در رابطه (۸)، فرکانس پلازما برحسب rad/sec محاسبه شد [۳]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (8)$$

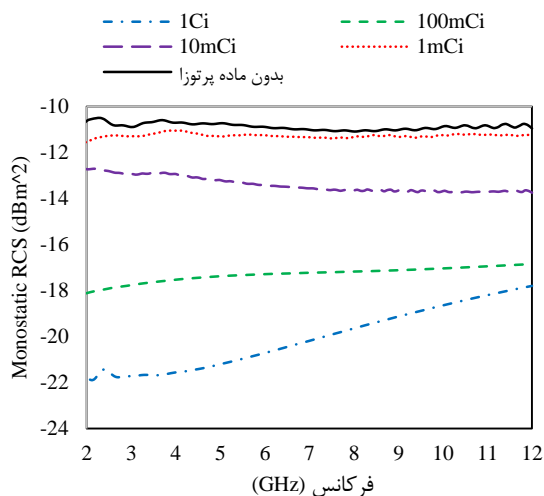
در ادامه نتایج به‌دست‌آمده برای فرکانس پلازما در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷. چگالی الکترون برحسب فاصله از سطح صفحه تخت رسانا به ازای اکتیویته‌های مختلف در شرایط STP

در مرحله آخر، با استفاده از رابطه (۹) فرکانس برخورد پلازما محاسبه شد [۱۱].

¹ Standard Conditions for Temperature and Pressure



شکل ۱۲. شبیه‌سازی سطح مقطع راداری مونواستاتیک صفحه رسانا در بازه فرکانسی ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز و اکتیویته‌های مختلف چشمه آلفا با استفاده از روش حل FEM در نرم‌افزار CST

۴. نتیجه‌گیری

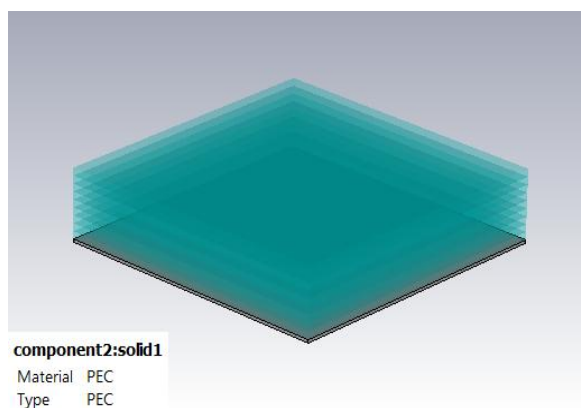
در این مقاله، تأثیر پوشش پلاسمایی ناشی از هسته‌های آلفازا لایه‌نشانی شده بر کاهش سطح مقطع راداری در یک جسم صفحه تخت مطالعه و شبیه‌سازی شده است. بدین منظور ابتدا، چگالی الکترونی پلاسما در اکتیویته‌های متفاوت ایزوتوپ آلفازا و در فاصله‌های متفاوت از سطح رسانا، با استفاده از کد MCNPX محاسبه شد. با جایگذاری این پارامتر در روابط نظری مقادیر فرکانس پلاسما و فرکانس برخورد، به ازای اکتیویته‌های متفاوت و در شرایط STP محاسبه شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار CST، پوشش پلاسمای سرد غیرمغناطیبه جسم صفحه تخت موردنظر، شبیه‌سازی و مقدار RCS مونواستاتیک در گستره فرکانسی متداول ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز به دست آمد. برای قرارگیری صفحه رسانای آزمون در ناحیه نوری، طول رسانا برابر با ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده کاهش بین ۷ تا ۱۱ دسی‌بل را در سطح مقطع راداری در بازه فرکانسی ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز نشان می‌دهد. که در بازه فرکانسی ذکر شده قابل توجه و حائز اهمیت است.

۵. مراجع‌ها

- [1] Vass, S. "Stealth Technology Deployed on The Battle Field"; Informatics Robotics 2003, 2, 257-269.
- [2] Skolnik, M. "Introduction to Radar Systems"; New York, McGraw-Hill Education, 2003.
- [3] Singh, H.; Antony, S.; Rakesh, M. "Plasma-based Radar Cross Section Reduction"; Singapore, Springer, 2016.
- [4] Chaudhury, B.; Chaturvedi, S. "Study and Optimization of Plasma-Based Radar Cross Section Reduction Using Three-Dimensional Computations"; IEEE Trans. Micro. Theory and Tech. 2009, 37, 2116 - 2127.

۲-۳. شبیه‌سازی RCS صفحه پوشیده‌شده با پلاسمای ناشی از اندرکنش ذرات آلفا با هوا

گام اول در شبیه‌سازی RCS پس از تعریف هندسه، تعریف ماده پلاسما در نرم‌افزار CST^۱ است؛ بدین منظور از بسته مایکروویو و افزونه Drude-Lorentz این نرم‌افزار که رفتار دی‌الکتریک مواد از جنس پلاسما را توصیف می‌کند، استفاده شد. با استفاده از مقدار فرکانس برخورد و فرکانس پلاسما که در بخش ۳-۱ محاسبه شدند، لایه‌های مختلف پلاسما شبیه‌سازی شد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است؛ برای ایجاد تمایز و افزایش دقت شبیه‌سازی، تعداد ۱۲ لایه در نظر گرفته شد که به ترتیب دارای ضخامت ۰/۲ میلی‌متر، ۰/۳ میلی‌متر، ۰/۵ میلی‌متر، ۴ میلی‌متر و بقیه لایه‌ها ۵ میلی‌متر هستند و هرکدام از لایه‌ها مطابق نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹، دارای پارامترهای مختص به خود هستند. در این شبیه‌سازی از صفحه تخت رسانای کامل^۲ به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. زاویه برخورد موج ورودی ۹۰ درجه (عمود بر سطح رسانا) در نظر گرفته شد و مسئله در حوزه زمان با استفاده از روش حل اجزای محدود^۳ در حالت مونواستاتیک تحلیل شد.



شکل ۱۱. شبیه‌سازی لایه‌های مختلف پلاسما ناشی از اندرکنش ذرات آلفا با هوا در نرم‌افزار CST

در نهایت سطح مقطع راداری صفحه رسانا در بازه فرکانسی ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز به ازای حالت‌های مختلف بدون ماده پرتوزا و ماده پرتوزا با اکتیویته‌های مختلف $1\text{mCi}/\text{cm}^2$ ، $10\text{mCi}/\text{cm}^2$ ، $100\text{mCi}/\text{cm}^2$ و $1\text{Ci}/\text{cm}^2$ محاسبه شد و در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود با افزایش اکتیویته چشمه، مقدار سطح مقطع راداری در یک بازه وسیع فرکانسی، کاهش پیدا می‌کند.

^۱ Computer Simulation Technology

^۲ PEC

^۳ Finite Element Method (Fem)

- [5] Wei, L. "The Influence of Plasma Induced by α -Particles on the Radar Echoes"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2015, 43, 405-413.
- [6] Wanjun, S.; Zhang, H. "RCS Prediction of Objects Coated by Magnetized Plasma Via Scale Model With FDTD"; IEEE Trans. Micro. Theory and Technol. 2017, 65, 1939-1945.
- [7] <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml>
- [8] August, H. "Plasma Properties Induced in Air by Alpha Radiation"; Proc. of a Symposium on Magneto International Atomic Energy Agency Hydrodynamic Electrical Power Generation Jointly Organized, IAEA, Vienna, 1966.
- [9] Nicholls, R. W. "The Ionization in Air Maintained by a Uniform Plane Circular Distribution of α Radioactivity"; Am. J. Phys. 1954, 22, 59-61.
- [10] Polyanskii, V. "Electromagnetic Wave Backscattering from A Cloud of Alpha-Emitting Radioactive Elements in Air"; Tech. Phys. 2000, 45, 274-276.
- [11] Loschmidt, J. "On the Size of the Air Molecules"; J. Chem. Educ. 1995, 72, 870-875.