

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

ناشی از عملگر پلاسمای DBD

سروش حریمی^۱، روح الله خوشخو^۲، محمدحسین شمس^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۹)

چکیده

یکی از موارد مهم و مورد توجه در صنعت هوانوردی، پنهان کاری وسایل پرنده است. یکی از روش‌های پنهان کاری، کاهش سطح مقطع راداری جسم مورد نظر با استفاده از پوشش پلاسمای با کمک خاصیت جذب پلاسمای می‌باشد. با توجه به استفاده گسترده از عملگرهای پلاسمای DBD جهت کنترل جریان در مصارف هوایی، در این مقاله به بررسی تجربی تاثیر عملگرهای پلاسمای DBD بر میزان کاهش سطح مقطع راداری روی صفحه تخت و نیز بررسی تاثیر آن در ولتاژها (۶ KV-۲ KV) و فرکانس‌های مختلف (۶ کیلوهرتز و ۸ کیلوهرتز) پرداخته شده است. در این تحقیق با استفاده از دو آرایش مختلف، قرارگیری عملگر پلاسمای بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تعداد و فاصله عملگرهای پلاسمای و حتی نحوه چیدمان آنها بر میزان سطح مقطع راداری موثر است. در نهایت، در بهترین آرایش قرارگیری عملگرهای پلاسمای، میزان سطح مقطع راداری با کمک عملگر پلاسمای DBD به میزان ۴۳/۳۷ درصدی (معادل ۲/۴۶ dB) در فرکانس ۶ کیلوهرتز کاهش یافت.

کلید واژه‌ها: پنهان کاری راداری پلاسمای، سطح مقطع راداری، عملگر پلاسمای DBD، صفحه تخت، پلاسمای سرد

۱- مقدمه

پنهان کاری یعنی حرکت مخفیانه، بی آن که دیگران متوجه شوند، قابلیت است که این امکان را فراهم می‌آورد تا وسایلی که دارای این ویژگی هستند، بتوانند تا مقدار قابل توجهی از دید مجموعه سامانه‌های آشکار کننده نظیر رادارها، حسگرهای فرسوخ و فرابنفش و سامانه‌های غیر فعال پنهان بمانند. شاخص‌های موثر بر پنهان کاری را می‌توان به شرح ذیل دسته‌بندی کرد:

۱- سطح مقطع راداری (RCS)^۱۲- مواد جاذب رادار (RAM)^۲

۳- مرئی بودن

۴- اثر اشعه سرخ

با توجه به اینکه در این تحقیق، بر روی شاخص کاهش سطح مقطع راداری، تحقیق صورت گرفته، بنابراین شاخص سطح مقطع راداری در ادامه شرح داده خواهد شد.

* رایانامه نویسنده مسئول: shams@mut-es.ac.ir

^۱ Radar Cross Section^۲ Radar Absorbent Material

۱-۱- سطح مقطع راداری

زمانی که یک جسم توسط امواج راداری روشن می‌شود، انرژی توسط جسم در همه جهتها و با شدت‌های مختلف پراکنده می‌شود. در شرایطی که تک ایستگاهی^۳ نامیده می‌شود، گیرنده رادار در همان موقعیت فرستنده قرار گرفته است؛ و گیرنده، مقداری از تشعشع پراکنده شده به عقب، به طرف منبع را دریافت می‌کند. این تشعشع، بازتاب نامیده می‌شود.

سطح مقطع راداری به صورت نسبت چگالی توان پراکنده شده در یک جهت داده شده (اغلب همان توان بازتابی به طرف رادار) به چگالی توان تابشی تعریف می‌شود و فاصله R به جهتی که توان پراکنده شده اندازه‌گیری می‌شود، بستگی ندارد [۱-۲]:

$$\sigma = \lim_{S_s} S_s |R^2 \pi 4| / |S_i| \quad (1)$$

که S_s و S_i به ترتیب بیانگر شار انرژی پراکنده شده و شار انرژی تشعشع تابشی می‌باشند. به دلیل آن که میدان پراکنده‌گی به صورت کروی به طرف خارج از جسم گسترش می‌یابد، شدت آن با نسبت $1/R^2$ کاهش می‌یابد، بنابراین نسبت چگالی توان در R^2 ضرب شده است، تا وابستگی σ را به R از بین ببرد و در



شکل (۱): شکل هواپیمای Mig ۱/۴۴.

۷۰ فرکانس ۷/۴ GHz کاهش می‌یابد. کابل و همکاران [۱۱] به مطالعه عملگرهای پلازما برای کاهش سطح مقطع راداری پرداختند. آن‌ها همچنین عنوان کردند که عملکرد پلازما به عواملی مثل فرکانس برخورد الکترون‌ها، چگالی و ضخامت پلازما بستگی دارد.

یونجه‌ها و همکاران [۱۲]، با ساخت الگویی دوار متشکل از ۱۰ حلقه عملگرهای پلازما DBD بر روی صفحه تخت مربعی موفق به کاهش سطح مقطع راداری تک ایستگاهی به اندازه ۱۸/۵ dB در محدوده فرکانسی ۹/۴۱ تا ۱۱/۶۵ گیگاهرتز شدند، همچنین عنوان کردند که پلازمای ایجاد شده برخلاف پلازماهای قبلی تولید شده توسط عملگرهای DBD بیشتر به صورت ماده پراکنده کننده عمل می‌کند تا این که به صورت یک ماده‌ی جاذب عمل نماید.

کیم و همکاران [۱۳-۱۴]، نیز تاثیر میزان حجم پلازما بر کنترل سطح مقطع راداری را بررسی کردند، نتایج آن‌ها بر روی صفحه تخت نشان می‌دهد، که میزان سطح مقطع راداری تا ۳/۵ dB کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین عنوان کردند که با افزایش حجم پلازما، سطح مقطع راداری به میزان بیشتری کاهش می‌یابد و با ایجاد تغییرات در حجم پلازما می‌توان به سطح مقطع راداری دلخواه رسید.

کیم و همکاران [۱۵]، تاثیر عملگر پلازما DBD را در کاهش سطح مقطع راداری شبیه‌سازی نمودند. برای انجام شبیه‌سازی از الگوسازی خطی عملگرهای پلازما استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که رادارهای دو ایستگاهی نسبت به رادارهای تک ایستگاهی، میزان تاثیر عملگر پلازما را در کاهش سطح مقطع راداری را بیشتر نشان می‌دهند.

صرف نظر از درست یا غیر واقعی بودن ادعای روسیه در خصوص امکان یا عدم امکان پیاده‌سازی چنین سامانه‌ای به طور قطع، پلازما با چگالی مناسب می‌تواند امواج راداری را جذب، تضعیف و منحرف کند، لذا از لحاظ تئوری سطح مقطع راداری هواپیما، موشک و به طور کلی هر وسیله دیگری را کم می‌نماید و تنها بحث بر سر بازه فرکانسی، پهنای باند و... باقی می‌ماند.

نتیجه σ تنها وابسته به خاصیت جسم است و ارتباطی با فاصله اندازه‌گیری ندارد. واحد اندازه‌گیری سطح مقطع راداری، مترمربع است. با این حال برای سودمندتر شدن نمودار سطح مقطع راداری، اندازه‌گیری بر حسب dBsm، یا دسی‌بل مربوط به یک مترمربع سطح مرجع انجام می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد، سطح مقطع راداری، میزان پخش‌شدگی امواج رادار در یک جهت مشخص بوده و تنها متغیری است که طراح می‌تواند آن را کنترل کند. به منظور پنهان‌کار کردن هواپیما در مقابل رادارها، باید تا حد امکان سطح مقطع راداری را کاهش داد. برای توضیح بیشتر خاطر نشان می‌کنیم، که برد رادار برای وسیله‌ای که فناوری پنهان‌کاری بر آن اعمال شده است، نسبت به برد همان رادار در همان شرایط برای همان وسیله فاقد این قابلیت، با ریشه چهارم نسبت سطح مقطع راداری اولی به سطح مقطع راداری دومی برابر است. به طور مثال اگر بتوان نسبت بین سطح مقطع راداری را به یک صدم رساند، نسبت برد به برد اصلی رادار مقدار ۳۱ درصد خواهد شد، یعنی رادار نزدیک به ۷۰ درصد برد خود را از دست می‌دهد. پس کم کردن سطح مقطع راداری از اهمیت بسیاری برخوردار است. در نتیجه، کاهش سطح مقطع راداری به عنوان بخشی از ایده طرح اولیه موردنظر است. زیرا، این امر، مراحل بعدی و توسعه هواپیما را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. البته لازم به ذکر است که کاهش سطح مقطع راداری، معیایی از جمله افزایش وزن، افزایش قیمت، افزایش تعمیر و نگهداری، کاهش بار هواپیما و کاهش برد پروازی را نیز در بر خواهد داشت.

از آن‌جا که سطح مقطع راداری یک هواپیما جمع برداری تک‌تک قطعات هواپیما است، لذا تاثیر هر یک از این قطعات در سطح مقطع راداری کل، باید در نظر گرفته شود. مضافاً، سطح مقطع راداری بزرگترین قطعه نمی‌تواند از سطح مقطع راداری کلی هواپیما بیشتر باشد. برای رسیدن به سطح مقطع راداری پایین، کارهای مختلفی باید صورت گیرد که عبارتند از:

۱. استفاده از شکل نامتعارف الماس‌وار و یا دندانه‌ریز و اره‌ای جای شکل‌های معمول در صنعت هواپیماسازی مانند جنگنده بمب افکن F-۱۱۷A نایت هاوک.
۲. پس از شکل، مهمترین عامل در کاهش سطح مقطع راداری، استفاده از مواد جاذب امواج رادار می‌باشد.
۳. روش متفاوت دیگر برای کاهش سطح مقطع راداری، که هنوز در عمل به اثبات نرسیده، روش پوشاندن هواپیما با ابر پلازما است که دانشمندان روسیه مدعی به‌کارگیری آن در هواپیمای Mig ۱/۴۴، قابل مشاهده در شکل (۱) هستند [۳].

۳- روش تحقیق

در این تحقیق، دو آرایش مختلف از عملگر پلاسمای DBD بر روی سطح صفحه تخت استفاده شده است. در آرایش اول، از ۷ عملگر پلاسمای در فاصله ۱ سانتی‌متر در آرایش دوم، از ۸ عملگر پلاسمای در فاصله ۰/۵ سانتی‌متر از یکدیگر استفاده شد. در هر دو آرایش، صفحه تخت با استفاده از عملگر پلاسمای به‌طور کامل پوشانیده شد. سپس توسط آنتن‌های باند ایکس و دستگاه‌های اندازه‌گیری، هر دو آرایش بر روی صفحه تخت در دو راستای افقی و عمودی قرار گرفت و میزان جذب راداری بررسی شد.

پس از دریافت داده‌ها در آزمایشگاه سطح مقطع راداری، میزان فرکانس‌ها و شاخص‌های S_{11} و S_{21} مشخص گردید که شاخص S_{11} نشان دهنده میزان جذب امواج راداری و شاخص S_{21} نشان دهنده میزان گسیل امواج راداری هست که با استفاده از فرمول‌های (۲-۴) میزان درصد جذب هر یک از فرکانس‌ها در هر یک از شرایط پلاسمای خاموش و روشن و همه نمونه‌ها محاسبه گردید.

$$S_{11} = 10 \left(\frac{S_{11}}{20} \right)^2 \quad (2)$$

$$S_{21} = 10 \left(\frac{S_{21}}{20} \right)^2 \quad (3)$$

$$A = 1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 \quad (4)$$

$$A(dB) = 10 \times \log_{10}(1 - A) \quad (5)$$

که S_{11} و S_{21} به ترتیب میزان جذب و گسیل امواج راداری توسط آنتن‌ها بر حسب دسی‌بل است، همچنین S_{11} و S_{21} به ترتیب شاخص جذب و گسیل امواج راداری توسط آنتن‌ها به صورت بی‌بعد و A شاخص جذب امواج توسط پلاسمای بدون بعد و $A(dB)$ شاخص میزان جذب امواج توسط عملگرهای پلاسمای بر حسب دسی‌بل هست. سپس با استفاده از فرمول (۵)، میزان جذب امواج توسط پلاسمای بر حسب دسی‌بل بدست می‌آید که با استفاده از آن، نمودارهای جذب بر حسب فرکانس امواج راداری رسم گردیده است [۲].

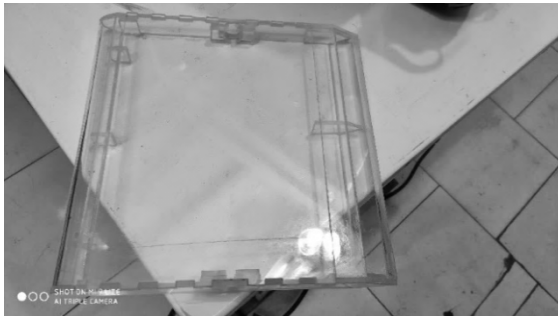
در صورتی که شاخص جذب، مقدار صفر را نشان دهد، این امر بدان معناست که جسم قرار گرفته در جلو آنتن، فلز کامل بوده و همانند خاصیت فلز، تمامی موج ارسالی به آنتن برگشت داده است. هرچقدر شاخص جذب از صفر به سمت منفی برود، در این صورت مقداری از موج توسط جسم، جذب شده است.

۴- تجهیزات آزمون

در این بخش، مجموعه تجهیزات و ابزار مورد نیاز برای آزمون‌ها و سیستم داده برداری به‌طور خلاصه ارائه شده است.

۴-۱- الگو صفحه تخت

الگوی مورد بررسی، از جنس پلکسی‌گلس با ضخامت ۵ میلی‌متر و دارای ابعاد 30×30 سانتی‌متر مربع ساخته شد، همچنین قسمت بالای صفحه به‌صورت جدا شونده طراحی شد تا بتوان مدل‌های عملگرهای پلاسمای را راحت‌تر تعویض کرد. در زیر تصاویری از الگوی صفحه تخت با عملگرهای پلاسمای بدون آن در شکل (۲) نمایش داده شده است.



الف) صفحه تخت بدون عملگر پلاسمای



ب) صفحه تخت مورد استفاده با عملگرهای پلاسمای نصب شده

شکل (۲): الگوی صفحه تخت مورد استفاده برای انجام آزمون آزمایشگاهی.

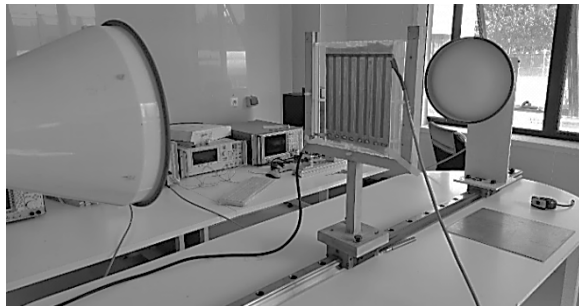
۴-۲- تجهیزات تولید و نظارت پلاسمای سرد غیرتعادلی

منبع تغذیه متناوب مورد استفاده در این آزمون‌ها، یک منبع تغذیه کاملاً خاص با حداکثر توان خروجی یک کیلووات و طیف گسترده‌ای از شاخص‌های الکتریکی برای تشکیل پلاسمای توسط عملگرهای پلاسمایی مختلف است. بازه‌ی ولتاژ خروجی و محدوده‌ی فرکانس حامل منبع تغذیه به ترتیب ۱ تا ۳۰ کیلوولت و ۱ تا ۳۰ کیلوهرتز است. فرکانس تحریک ناپایا در بازه ۰/۲ تا ۱/۲ کیلوهرتز و سیکل کاری از ۱٪ تا ۹۹٪ قابل تنظیم است. میزان توان مصرفی عملگر پلاسمایی با استفاده از مدار الکتریکی واسط، که به‌همین منظور طراحی و در خروجی منبع تغذیه تعبیه شده، اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیس و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و

۴-۴- مجموعه آنتن‌های باندهای یکس^۱ به همراه دستگاه

داده برداری Keysight N5222A

این مجموعه شامل دو عدد آنتن گیرنده، فرستنده باندهای یکس است که بین فرکانس ۴ الی ۱۴۰ گیگاهرتز فعالیت می‌کنند. همچنین دارای کارایی پرتوی بالایی می‌باشند. این دو آنتن به دستگاه تحلیل گر شبکه مایکروویو متصل می‌شوند که از طریق آن می‌توان فرکانس‌های امواجی ارسالی و دریافتی و میزان رفت و برگشت امواج ارسالی را بررسی کرد و داده‌های مورد نیاز را از آن برحسب دسی‌بل و هرتز استخراج نمود. لازم بذکر است که عدم قطعیت داده‌های خروجی ± 0.05 dB گزارش شده است. در شکل (۴)، مجموعه ذکر شده به همراه مدل و محل نصب و نگهدارنده الگوی صفحه تخت نشان داده شده است. الگوی صفحه تخت و نگهدارنده مدل در ناحیه مابین دو آنتن قرار گرفته است. دو عدد کابل به الکتروادهای متصل به صفحه تخت اتصال دارند که یک کابل متصل به الکترودها جهت اعمال ولتاژ و فرکانس جریان الکتریکی به کار می‌رود و کابل دیگر، کابل ارت است که جهت تخلیه جریان الکتریکی استفاده می‌شود.



شکل (۴): مجموعه آنتن‌های باندهای یکس به همراه دستگاه اندازه‌گیری.

۵- تکرار پذیری و بررسی نتایج گذشته نزدیک

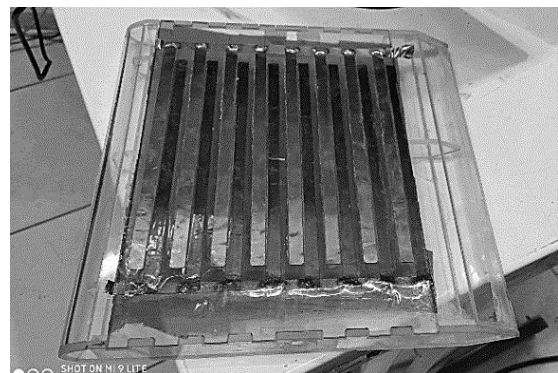
به تحقیق

یکی از موارد بسیار مهم جهت بهره‌برداری از نتایج آزمایشگاهی، قابلیت تکرارپذیری آن است، زیرا در غیر این صورت، استفاده از نتایج آزمایشگاهی همواره با یک عدم قطعیت مواجه خواهد بود. جهت بررسی تکرارپذیری، آرایش اول در حالت عمودی در موقعیت پلاسما روشن در ولتاژ ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز، ۳ مرتبه آزمایش شد و همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، نمودارها دارای هم‌پوشانی می‌باشند و پس از بررسی داده‌های آزمایشگاهی مشخص گردید، میزان اختلاف نتایج در حدود ± 0.05 dB است که نشان‌دهنده دقت بالای دستگاه داده‌برداری است. به دلیل حساسیت دستگاه تولید پلاسما در توان‌های الکتریکی بالا و همچنین جلوگیری از آسیب دیدن

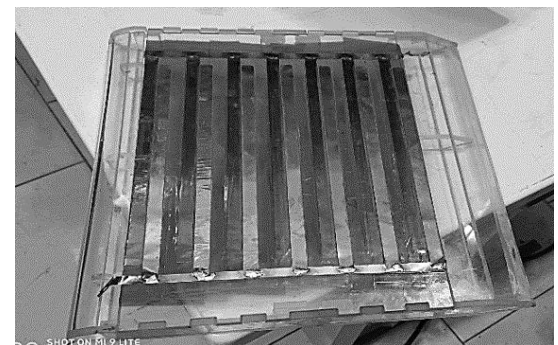
تداخلات الکترومغناطیسی ناشی از عملکرد منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً تجهیزات اندازه‌گیری و داده برداری، از کابل‌های دارای پوشش محافظ الکتریکی و همچنین ملاحظات تطبیق امپدانس در طراحی منبع تغذیه استفاده شده است. همچنین حداکثر فاصله بین منبع تغذیه و ابزارهای اندازه‌گیری در آزمون، مدنظر قرار گرفته است. در این تحقیق، جریان الکتریکی به صورت پایا در نظر گرفته شده است.

۴-۳- عملگرهای پلاسما

آرایه عملگرهای DBD با چهار لایه دی‌الکتریک کاپتون با ضخامت 0.4 mm بر روی قسمت جداشونده صفحه تخت ساخته شدند. طول هر الکتروده 20 cm و عرض هر کدام 1 cm، با ضخامت 0.1 mm در نظر گرفته شدند. عکس‌هایی از دو آرایش متفاوت ساخته شده در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشند. در آرایش اول، تعداد ۸ عملگر پلاسما نصب شده که فاصله بین آن‌ها، جهت جلوگیری از بهم‌کنش میدان‌های الکتریکی آن‌ها بر یکدیگر، 5 mm می‌باشد. در آرایش دوم، تعداد ۷ عملگر پلاسما روی صفحه تخت نصب گردید، که فاصله بین آن‌ها 10 mm در نظر گرفته شد، تا تاثیر فاصله بین عملگرها بر میزان کاهش سطح مقطع راداری در آزمون‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد.



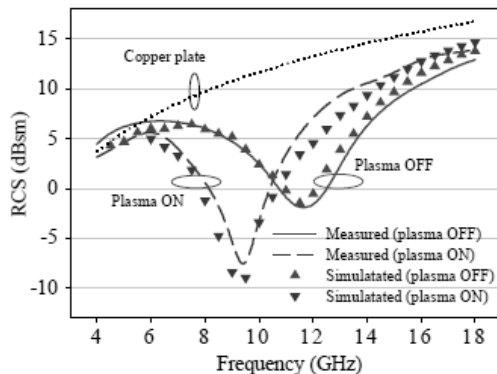
(الف) فاصله بین عملگرهای پلاسما ۵ میلی‌متر



(ب) فاصله بین عملگرهای پلاسما ۱۰ میلی‌متر

شکل (۳): چیدمان‌های مختلفی از نحوه قرارگیری عملگر پلاسما.

^۱ Lens Horn Antenna



شکل (۷): نتایج اندازه‌گیری سطح مقطع راداری، پلازما در حالت روشن و خاموش به صورت تجربی و شبیه‌سازی در ولتاژ ۱۸ کیلوولت و فرکانس ۱ کیلوهرتز [۱۲].

۶- نتایج و بحث

دو آرایش اول و دوم، در دو حالت افقی و عمودی آزمایش شد. نمودار تغییرات جذب امواج بر حسب طول موج‌های مختلف در ولتاژها و فرکانس‌های مختلف به دست آمد و مورد تحلیل قرار گرفت.

۶-۱- آرایش اول در حالت قائم بر سطح افق

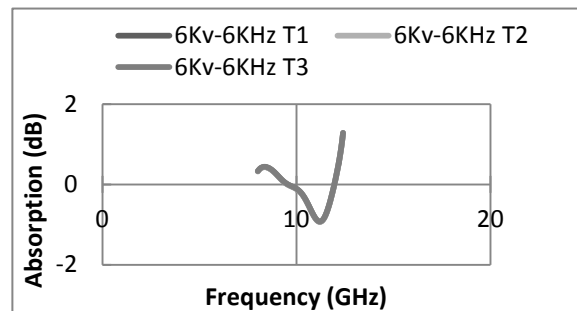
در این آرایش، همانند شکل (۸)، الکترودها به صورت قائم بر سطح افق قرار گرفته‌اند. در این آرایش، فاصله بین عملگرهای پلازما، در حدود ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. لازم بذکر است که محور افقی نمودارهای ذکر شده در ادامه، میزان فرکانس‌های امواج ارسالی و محور عمودی آن‌ها، میزان جذب یا تلفات موج ارسالی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، در حالت عمودی آرایش اول، با افزایش ولتاژ، شاهد تغییرات کوچکی در شاخص جذب هستیم و نمودار نشان می‌دهد، نسبت به حالت پلازما خاموش، مقدار جذب افزایش یافته و پس از آشکار شدن پلازما در ولتاژ ۶ کیلوولت، میزان جذب از حالت پلازما خاموش بیشتر است. همچنین، بیشترین میزان جذب در محدوده امواجی با فرکانس ۱۰ تا ۱۲ گیگاهرتز است. البته همان‌گونه که مشخص است، در مورد امواج راداری با فرکانس کمتر از ۱۰ گیگاهرتز می‌تواند، تا حدودی اثر مخرب بر آشکارسازی جسم نیز داشته باشد. در بهترین حالت، آرایش اول عمودی، حداکثر کاهش میزان سطح مقطع راداری، ۱۹/۲۰ درصد (معادل ۰/۹۳ dB) است.

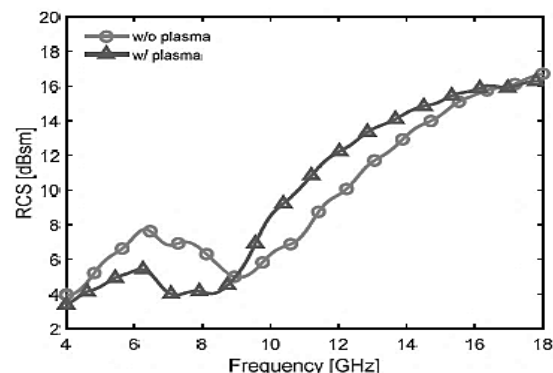
با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش تدریجی ولتاژ تا لحظه نمایان شدن پلازما، میزان جذب روند افزایشی داشته است، اما

الکترودها و ماده دی‌الکتریک مابین عملگرهای پلازما، خطرپذیری انجام تکرارپذیری آزمایش افزایش می‌یابد.

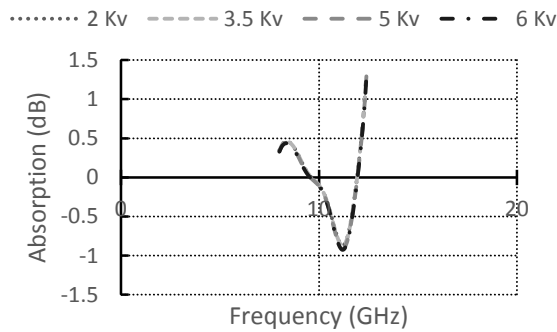
برای بررسی اعتبارسنجی نتایج، مراجع [۱۰ و ۱۲] که در بخش تاریخچه تحقیق عنوان شدند، مورد استفاده قرار گرفتند. هر چند الگوی عملگرهای این دو مرجع متفاوتند، اما روند آزمایشات و نتایج آن‌ها شبیه به نتایج اعلام شده در بخش‌های بعد است. هیونجائه لی و همکاران [۱۰]، موفق به کاهش سطح مقطع راداری به میزان ۳ dB در فرکانس ۷/۴ GHz با الگوی خود گردیدند. یونجها و همکاران [۱۲] نیز موفق به کاهش سطح مقطع راداری به میزان ۸/۵ dB در محدوده فرکانس ۹/۴۱ تا ۱۱/۶۵ گیگاهرتز شدند. همچنین اعلام کردند که پلاسمای تولیدی آن‌ها بیشتر خاصیت پراکندگی دارد، تا این‌که دارای خاصیت جذب باشد. در شکل‌های (۶ و ۷)، نتایج ذکر شده در مراجع [۱۰ و ۱۲] قابل مشاهده است. در نتایج به دست آمده از این تحقیق نیز، حداکثر مقدار کاهش سطح مقطع راداری در فرکانس ۶ KHz و ولتاژ ۶ KV برابر ۲/۴۶ dB برای جذب امواج راداری است. در همه مراجع [۷-۱۵] میزان کاهش سطح مقطع راداری، در محدوده ۲ dB الی ۸/۵ dB است، که این مقدار وابسته به فرکانس، ولتاژ، شکل آرایش کاربردی و نوع رادار مورد استفاده جهت آزمون آزمایشگاهی می‌باشد.



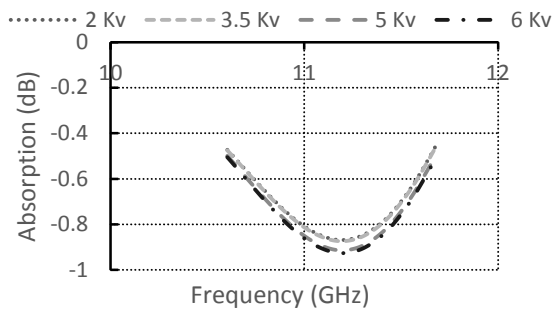
شکل (۸): نتایج تکرارپذیری آزمایش آرایش اول عمودی در ولتاژ ۶ کیلوولت و فرکانس ۶ کیلوهرتز.



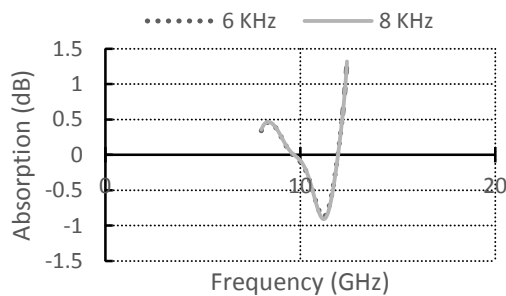
شکل (۹): نتایج اندازه‌گیری سطح مقطع راداری با پلازما و بدون آن در ولتاژ ۱۴ کیلوولت و فرکانس ۱ کیلوهرتز [۱۰].



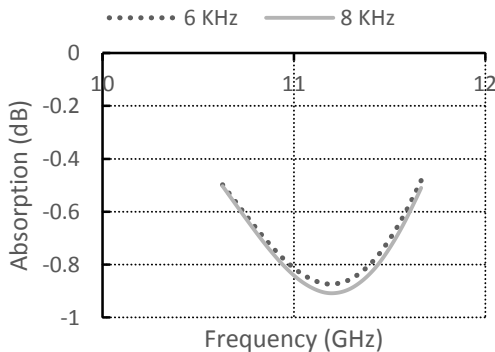
شکل (۱۰): تغییرات ولتاژ (۲-۳-۵-۶ Kv) بر روی آرایش اول در حالت عمودی (فرکانس ۶ کیلوهرتز).



شکل (۱۱): ناحیه بیشینه تغییرات ولتاژ آرایش اول عمودی.



شکل (۱۲): تغییرات فرکانس (۶-۸ KHz) بر روی آرایش اول در حالت عمودی (ولتاژ ۳/۵ کیلوولت).

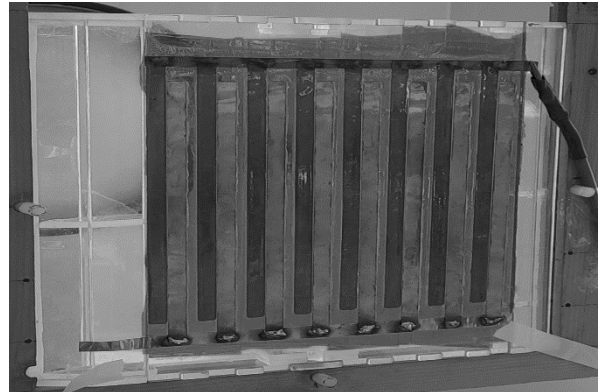


شکل (۱۳): ناحیه بیشینه تغییرات فرکانس آرایش اول عمودی.

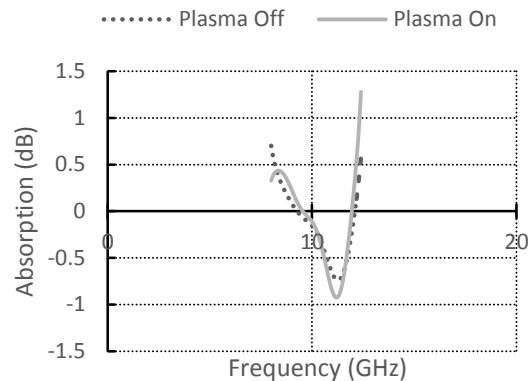
همان گونه که ملاحظه می شود، میزان تغییرات بسیار کم هست. بیشترین میزان تغییرات جذب با افزایش ولتاژ، با توجه به شکل ۱۱ در فرکانس ۱۱/۲ گیگاهرتز مشاهده می شود.

در شکل (۱۲) میزان تغییرات جذب در حالت ولتاژ ثابت ۳/۵ کیلوولت و فرکانس جریان در دو حالت ۶ و ۸ کیلوهرتز مشاهده می شود. مطابق شکل، میزان جذب در فرکانس ۸ کیلوهرتز اندکی بیشتر از فرکانس ۶ کیلوهرتز است. باید خاطر نشان ساخت که با توجه به شکل (۱۳)، بیشترین میزان تغییرات جذب با افزایش فرکانس جریان، با توجه به شکل نمودار در مکان حداکثر جذب مشاهده می شود.

لازم به ذکر است که، قسمت های اول و آخر نمودارها، بیشتر از مقدار صفر، به دلیل وجود خطای ورودی داده ها قابل استناد نیست. همچنین، در مقالات متعدد، بهترین فرکانس عملکردی برای عملگرهای پلازما را در محدوده ۶ کیلوهرتز در نظر گرفته اند. بنابراین برای انجام آزمون های آزمایشگاهی از فرکانس ۶ کیلوهرتز استفاده گردید.

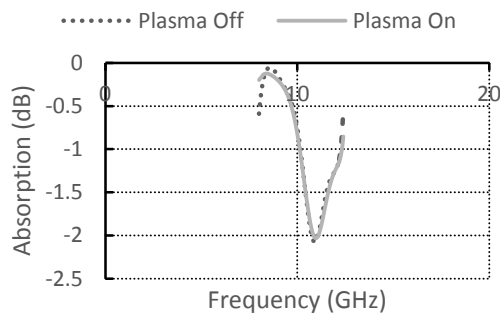


شکل (۸): آرایش اول در حالت عمودی.

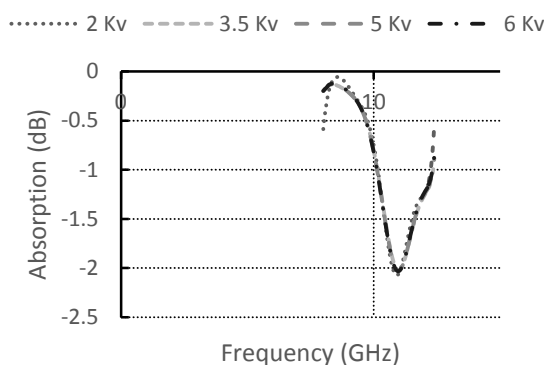


شکل (۹): مقایسه بین حالت پلازما خاموش و پلازما روشن آرایش اول عمودی (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).

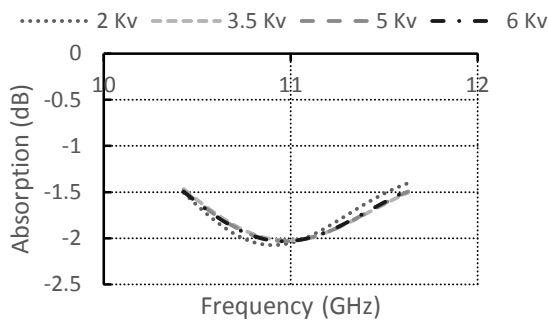
۶-۲- آرایش اول در حالت افقی



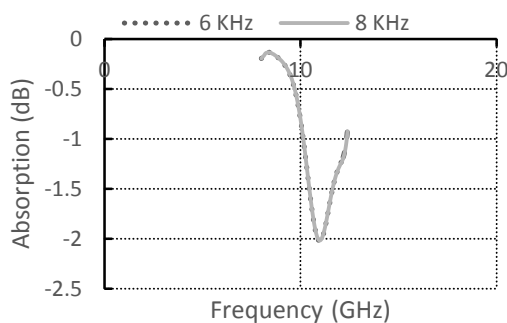
شکل (۱۴): مقایسه بین حالت پلاسما خاموش و پلاسما روشن آرایش اول افقی (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).



شکل (۱۵): تغییرات ولتاژ (۲، ۳/۵، ۵، ۶ KV) بر روی آرایش اول در حالت افقی (فرکانس ۶ کیلوهرتز).



شکل (۱۶): ناحیه بیشینه تغییرات ولتاژ آرایش اول افقی.



شکل (۱۷): تغییرات فرکانس (۶ و ۸ KHz) بر روی آرایش اول در حالت افقی (ولتاژ ۳/۵ کیلوولت).

آرایش اول در حالت افقی در شکل (۳-الف) قابل مشاهده است و الکترودها به صورت موازی با سطح افق قرار داده شده‌اند.

شکل (۱۴) مربوط به بررسی حالت بدون استفاده از عملگرهای پلاسما و با استفاده از عملگرهای پلاسما است، که البته در حالت پلاسما روشن، میزان ولتاژ ۶ کیلوولت و میزان فرکانس جریان، ۶ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، در برخی فرکانس‌های جریان، میزان جذب در حالت پلاسما خاموش بهتر از حالت پلاسما روشن است و در دیگر فرکانس‌های جریان، عملکرد حالت پلاسما روشن بهتر از حالت پلاسما خاموش بوده است. محدوده جذب امواج در محدوده امواج ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز بوده و بیشترین مقدار جذب در محل امواج با فرکانس ۹ گیگاهرتز است و در محل ۱۱ گیگاهرتز، میزان جذب نسبت به حالت پلاسما خاموش، کاهش یافته است. لازم به ذکر است که در بهترین حالت، میزان سطح مقطع راداری، حداکثر ۳۷/۹۷٪ (معادل ۲/۰۷ dB) کاهش می‌یابد که تقریباً دو برابر حالت قبل است.

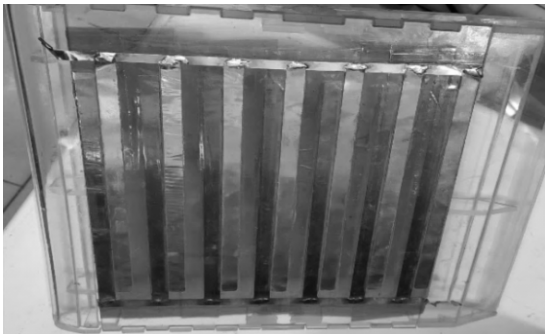
همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، با افزایش تدریجی ولتاژ تا لحظه پدیدار شدن پلاسما در فرکانس جریان ۶ کیلوهرتز، در بعضی موارد میزان جذب کاهش و در برخی امواج راداری دیگر افزایش داشته است که البته میزان تغییرات بسیار کم بوده و نتایج نشان‌دهنده درستی نتایج به‌دست آمده از شکل (۱۴) نیز است. زیرا روند تغییرات جذب در هر دو نمودار به یک صورت بوده، یعنی محدوده جذب امواج در محدوده امواج ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز بوده و بیشترین مقدار جذب با افزایش ولتاژ، در محل امواج با فرکانس ۹ گیگاهرتز است. با توجه به شکل (۱۶)، در محل ۱۱ گیگاهرتز، میزان جذب با افزایش ولتاژ، کاهش یافته است.

در شکل (۱۷ و ۱۸)، با تغییر فرکانس در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت از ۶ به ۸ کیلوهرتز، تغییر بخصوصی در میزان جذب مشاهده نشد. به نظر می‌رسد که مهم‌ترین متغیر در تأثیر بخشی در میزان جذب، شاخص ولتاژ باشد.

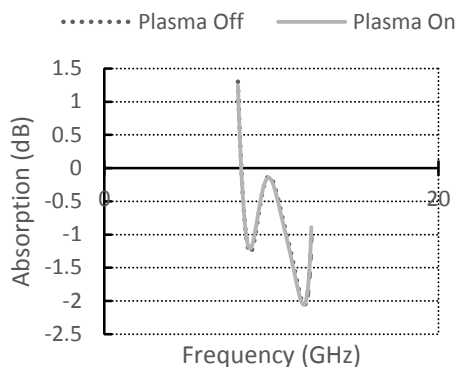
با توجه به مقایسه حالت عمودی و افقی آرایش اول در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود که در قرارگیری عملگرهای پلاسما در امتداد افق، میزان جذب بسیار بهتر از حالت عمودی بوده و این امر نشان‌دهنده، شکل عملگرهای پلاسما بر میزان سطح مقطع راداری تأثیرگذار است.

نمی‌شود و می‌توان بیان نمود، نمودارها تقریباً هم‌پوشانی دارند. البته این موضوع، با توجه به کاهش میزان سطح پوشش پلاسما در آرایش دوم نسبت به آرایش اول، قابل پیش‌بینی بود. در شکل (۲۳) نیز ناحیه حداکثر تغییرات نشان داده شده است.

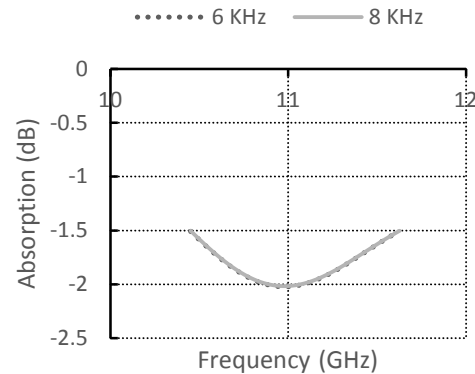
با تغییر فرکانس در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت از ۶ به ۸ کیلوهرتز مطابق شکل (۲۴)، تغییر محسوسی در جذب مشاهده نمی‌شود، همچنین در شکل (۲۵)، ناحیه حداکثر تغییرات در محدوده فرکانس ۱۰ گیگاهرتز مشاهده می‌شود. در شکل (۲۶)، به بررسی تاثیر آرایش و نحوه قرارگیری عملگرهای پلاسما در دو آرایش اول و دوم به صورت عمود بر سطح پرداخته شده است. براساس شکل (۲۶)، میزان جذب در بیشتر فرکانس‌های حالت عمودی آرایش دوم از جذب حالت عمودی آرایش اول بیشتر می‌باشد. به نظر می‌رسد که عدم وجود الکترودها و کمتر بودن پوشش آن‌ها بر روی سطح در حالت عمود، تاثیر بهتری بر نتایج سطح مقطع راداری دارد. اما میزان جذب این حالت نسبت به آرایش اول در حالت افقی کمتر بوده، که در شکل (۲۷) قابل مشاهده است. می‌توان در حالت کلی، این نتیجه را گرفت که قراردادن عملگرهای پلاسما در حالت مماس بر سطح به آرایش عمود بر سطح، بر روی میزان سطح مقطع راداری، ارجحیت دارد. از طرفی هرچه سطح با تعداد الکترودها کمتری پوشانده شود، میزان کاهش سطح مقطع راداری بیشتر خواهد بود.



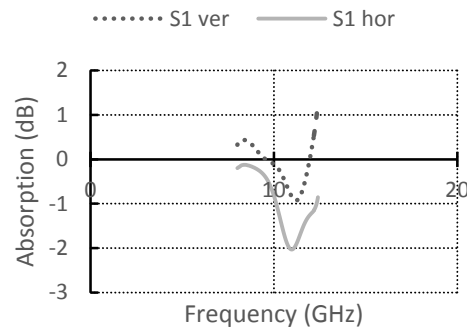
شکل (۲۰): آرایش دوم در حالت عمودی.



شکل (۲۱): مقایسه بین حالت پلاسما خاموش و پلاسما روشن آرایش دوم عمودی (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).



شکل (۱۸): ناحیه بیشینه تغییرات فرکانس آرایش اول در حالت افقی.



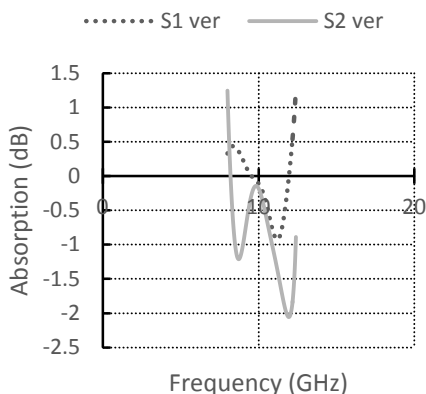
شکل (۱۹): مقایسه بین میزان جذب آرایش اول در حالت عمودی و افقی پلاسما روشن (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).

۳-۶- آرایش دوم در حالت قائم بر سطح افق

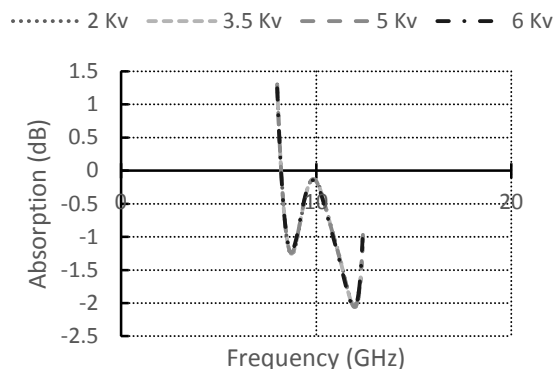
این حالت که در شکل (۲۰) قابل مشاهده است، الکترودها به صورت عمود بر سطح افق قرار داده شده‌اند. در این آرایش، فاصله بین الکترودها، در حدود یک سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بنابراین میزان پوشش پلاسما با توجه به میزان ولتاژ و فرکانس مشابه، نسبت به آرایش اول کمتر است.

شکل (۲۱) به بررسی دو حالت پلاسما خاموش و پلاسما روشن پرداخته است. قابل مشاهده است که تغییرات میزان جذب در حالت خاموش و روشن بودن پلاسما بسیار کم است. بیشترین میزان تغییرات جذب امواج در محدوده فرکانس ۹ گیگاهرتز قرار دارد و در حقیقت، پلاسما اثر منفی بر میزان جذب گذاشته است. اما در سایر امواج راداری، حالت پلاسما روشن از حالت بدون پلاسما تاثیر گذارتر بوده، اما چندان هم، این امر محسوس نیست. همچنین حداکثر میزان کاهش سطح مقطع راداری در بهترین حالت آرایش دوم عمودی، ۳۷/۷۸٪ (معادل ۲/۰۶ dB) است.

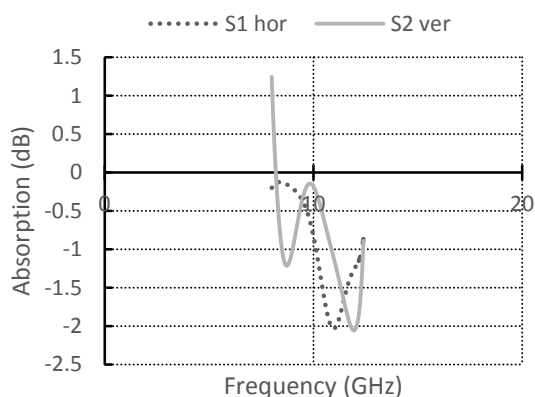
بررسی تاثیر افزایش ولتاژ در شکل (۲۲) نشان داده شده است، همان‌طور که از شکل قبل نیز انتظار می‌رفت، با افزایش میزان ولتاژ نیز تغییرات محسوسی در میزان جذب مشاهده



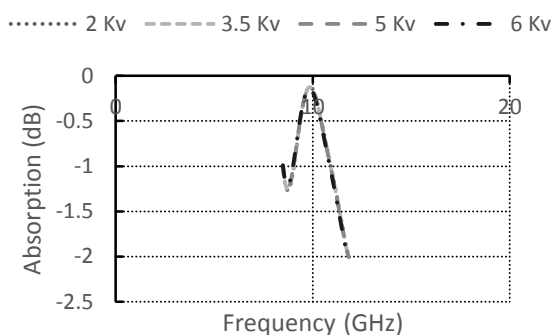
شکل (۲۶): مقایسه بین میزان جذب آرایش اول و دوم در حالت عمودی پلازما روشن (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).



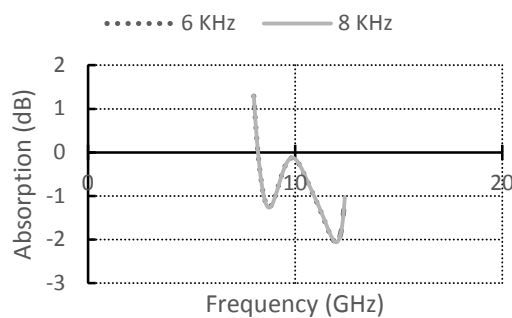
شکل (۲۲): تغییرات ولتاژ (۲، ۳/۵، ۵، ۶ KV) بر روی آرایش دوم در حالت عمودی (فرکانس ۶ کیلوهرتز).



شکل (۲۷): مقایسه بین میزان جذب آرایش اول در حالت افقی و آرایش دوم در حالت عمودی پلازما روشن (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).



شکل (۲۳): ناحیه بیشینه تغییرات ولتاژ آرایش دوم عمودی.

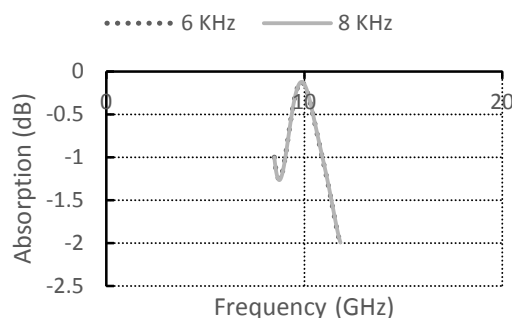


شکل (۲۴): تغییرات فرکانس (۶ و ۸ KHz) بر روی آرایش دوم در حالت عمودی (ولتاژ ۳/۵ کیلوولت).

۴-۶- آرایش دوم در حالت افقی

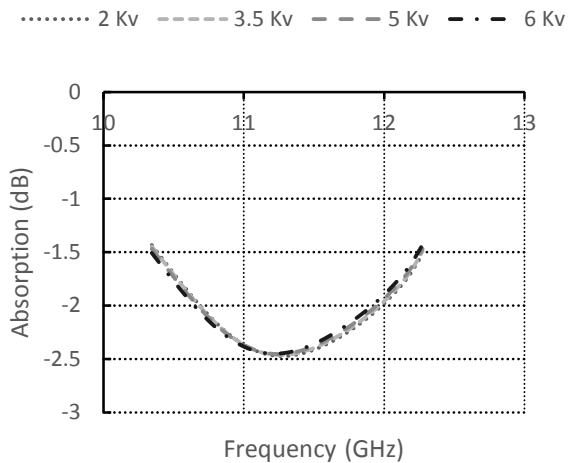
در آرایش دوم، فاصله بین الکترودها در حدود یک سانتیمتر است و منظور از حالت افقی، طرز قرارگیری الکترودها نصب به محور افقی هست که در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.

در شکل (۲۸)، نمودار نسبت میزان جذب امواج در طول موج‌های راداری مختلف برای دو حالت پلازما خاموش و پلازما روشن نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، تغییرات جذب در حالت پلازما خاموش نسبت به حالت پلازما روشن، بسیار کم است، اما میزان جذب در حالت پلازما روشن، کمی بیشتر است، محدوده جذب امواج، در محدوده فرکانس ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز هست.

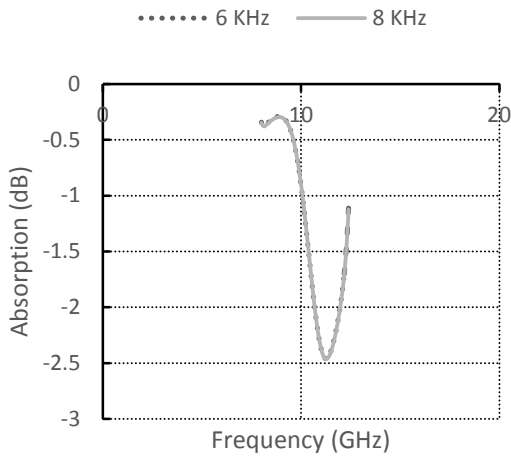


شکل (۲۵): ناحیه بیشینه تغییرات فرکانس آرایش دوم عمودی.

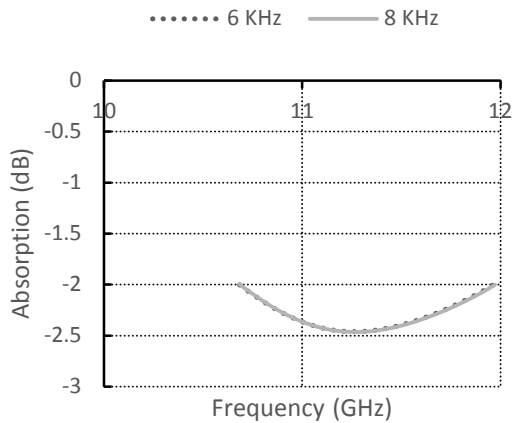
با افزایش ولتاژ هم همانند حالت قبلی تغییرات بسیار کمی در شکل (۲۹) و شکل (۳۰) مشاهده می‌شود و نمودار، همان



شکل (۳۰): ناحیه بیشینه تغییرات ولتاژ آرایش دوم افقی.

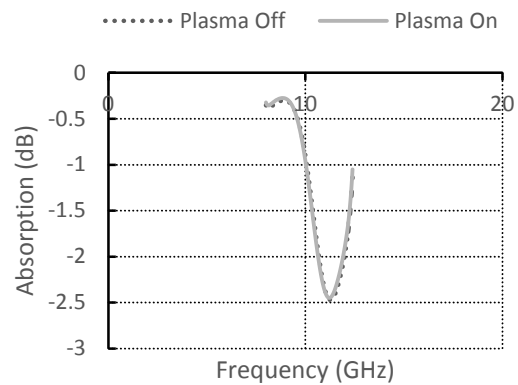


شکل (۳۱): تغییرات فرکانس (۸ و ۶) بر روی آرایش دوم در حالت افقی (ولتاژ ۳/۵ کیلوولت).

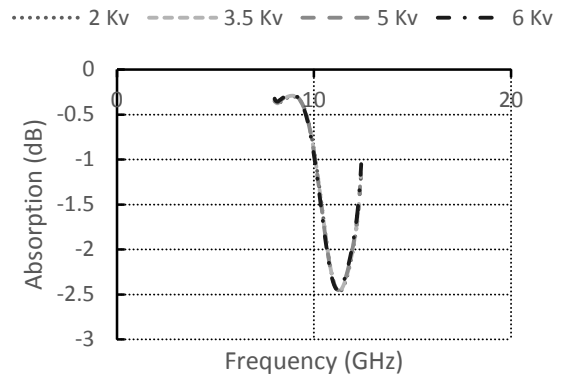


شکل (۳۲): ناحیه بیشینه تغییرات فرکانس آرایش دوم افقی.

روند نمودار قبلی را دنبال می‌کند. در شکل‌های (۳۱ و ۳۲)، نمودار تغییر جذب در اثر تغییر فرکانس نشان داده شده است. با تغییر فرکانس در ولتاژ ۳/۵ کیلوولت از ۶ به ۸ کیلوهرتز، میزان جذب بسیار کم افزایش یافته است. بیشترین میزان جذب امواج در فرکانس ۱۱/۵ گیگاهرتز بوده که هر دو فرکانس، میزان جذب یکسان است. اما در امواج راداری با فرکانس ۹ گیگاهرتز، میزان جذب با فرکانس ۸ کیلوهرتز بیشتر می‌باشد. اما آرایش موردنظر، نسبت به کلیه آرایش‌های بررسی شده تا این لحظه، میزان جذب بهتر بوده که در شکل (۳۳) قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد، چون آرایش دوم نسبت به آرایش اول فلز کمتری دارد، این امر صورت می‌پذیرد و طبق بررسی‌های قبلی نیز حالت افقی عملکرد بهتری نسبت به حالت عمودی دارد و یا این که به دلیل نمایان شدن بیشتر ناحیه دی الکتریک جذب بیشتری صورت گرفته است. همچنین حداکثر کاهش میزان سطح مقطع راداری ۴۳/۳۷٪ (معادل ۲/۴۶ dB) است.



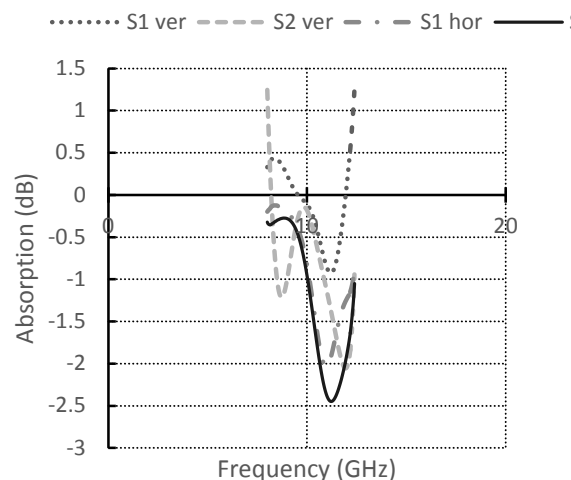
شکل (۳۳): مقایسه بین حالت پلاسما خاموش و پلاسما روشن آرایش دوم افقی (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).



شکل (۳۴): تغییرات ولتاژ (۲، ۳/۵، ۵، ۶ KV) بر روی آرایش دوم در حالت افقی (فرکانس ۶ کیلوهرتز).

۸- مراجعها

- [1] Chaudhury, B.; Chaturvedi, S. "Study and Optimization of plasma-Based Radar Cross Section Reduction Using Three-Dimensional Computations"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2009, 37, 11, 2116-2127.
- [2] Dehghan, M.; Razavi, R.; Ramezani, M. "Radar Cross Section Reduction of a Flat Square Plate Using Plasma Coating Caused By Alpha Particles"; Advance Defence Sci.&Technol., 2019, 03, 123-129.(in Persian)
- [3] Singh, H.; Antony, S.; Jha, R. M. "Plasma-Based Radar Cross Section Reduction"; Computational Electromagnetics, Springer, Singapore, 2016.
- [4] Chaudhury, B.; Chaturvedi, S. "Three-Dimensional Computation of Reduction in Radar Cross Section Using Plasma Shielding"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2005, 33, 6, 2027-2034.
- [5] Vidmar, R. J. "On the Use of Atmospheric Pressure Plasmas as Electromagnetic Reflectors and Absorbers"; IEEE Trans. Plasma Sci. 1990, 18, 4, 733-741.
- [6] Wolf, S.; Arjomandi, M. "Investigation of the Effect of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators on the Radar Cross Section of an Object"; J. Phys. D: Appl. Phys. 2011, 44, 31, 315202.
- [7] Lee, S.; Oh, I.; Hong, Y.; Yook, J. "Analysis of Electromagnetic Wave Scattering Characteristics of Dielectric Barrier Discharge Plasma"; J. Korea Inst. Electromagn Eng. Sci. 2013, 24, 3, 324-330.
- [8] Kim, Y., Jung, I., Yook, J., "Numerical Investigation of 3-D Radar Cross Section of Dielectric Barrier Discharge Plasma"; 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Dec. 2015.
- [9] Mirhosseini, F.; Colpitts, B. G.; Pimentel, R.; Villers, Y. "The Effect of Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuators on Electromagnetic"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2016, 44, 4, 665-669.
- [10] Lee, H.; Jung, I.; Ha, J.; Shin, W.; Yang, J. M.; Lee, Y.; Yook, J. G. "Monostatic RCS Measurement for Dielectric Barrier Discharge Plasma"; J. Electromagn. Eng. Sci. 2016, 27, 3, 246-252.
- [11] Kabbal, M. S.; Karunavathi, R. K.; Singh, D. B. "Study of Dielectric Barrier Discharge Plasma on Radar Cross Section Reduction"; Int. J. Eng. Tech. sci. Res. 2017, 4, 6, 627-634.
- [12] Ha, J.; Shin, W.; Lee, J. H.; Kim, Y.; Kim, D.; Lee, Y.; Yook, J. G. "Effect of Plasma Area on Frequency of Monostatic Radar Cross Section Reduction"; J. Electromagn. Eng. Sci. 2017, 17, 3, 153-158.
- [13] Kim, Y.; Kim, S.; Kim, D.; Lee, Y.; Yook, J.; "Radar Cross Section Reduction by Planar Array of Dielectric Barrier Discharge Plasma under Atmospheric Pressure"; J. Korea Inst. of Electromagn Eng. Sci. 2017, 28, 8, 646-652.
- [14] Kim, Y.; Kim, S.; Lee, Y.; Yook, J. G. "Effect of Plasma Volume on Monostatic Radar Cross Section Control"; J. Electromagn. Wave App. 2018, 32, 15, 1939-1949.
- [15] Kim, Y.; Kim, S.; Kim, D.; Oh, I.; Yook, J. "Numerical Investigation of Scattering from a Surface Dielectric Barrier Discharge Actuator under Atmospheric Pressure"; J. Electromagn. Eng. Sci., 2018, 18, 1, 52-57.



شکل (۳۳): مقایسه کلیه حالت‌های بررسی شده در حالت پلاسمای روشن (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).

۷- نتیجه‌گیری

همان‌گونه در مقالات، آزمایش‌ها و تحلیل‌ها بررسی شد، پلاسمای دارای خاصیت جذب امواج بوده و می‌تواند مانع از بازگشت امواج راداری شود، مقدار کاهش میزان سطح مقطع راداری، به عواملی مثل میزان پوشش پلاسمای روی جسم، چگالی پلاسمای ایجاد شده و عواملی دیگری بستگی دارد. با توجه به نتایج حاصل از سطح مقطع راداری می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از عملگرهای پلاسمای DBD در فواصل یک سانتی‌متری عملگرها از یکدیگر نسبت به فاصله نیم‌سانتی‌متری از یکدیگر می‌تواند تاثیر بیشتری بر کاهش سطح مقطع راداری داشته باشد و دستیابی به فاصله بهینه بین الکترودها، نیازمند انجام تحقیقات بیشتر است. همچنین قرارگیری افقی الکترودها نسبت به سطح، تاثیر خیلی بیشتری در کاهش سطح مقطع راداری نسبت به قرارگیری عمودی الکترودها نسبت به سطح دارد. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سطح مقطع راداری در فرکانس ۶ KHz حداکثر به میزان ۴۳/۳۷٪ (معادل ۲/۴۶ dB) کاهش می‌یابد. میزان کاهش سطح مقطع راداری را می‌توان با ارائه الگوی بهتر و افزایش توان دستگاه تولید پلاسمای جهت افزایش ولتاژ و امکان تغییر بیشتر فرکانس اعمالی بر عملگرها و ایجاد پلاسمایی ضخیم‌تر و چگال‌تر افزایش داد.

Radar Cross Section Reduction of a Flat Square Plate Using Plasma Coating Caused By Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuator

S. Harimi, R. Khoshkhoo, M. H. Shams^{*}

^{*} Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 13/03/2020, Accepted: 08/06/2020)

Abstract

One of the important issues in the aviation industry is the Stealth of flying vehicles. One of the stealth methods is to reduce the radar cross section of the target body by means of plasma coating and plasma absorption properties. DBD plasma actuators are widely used in flow control; however, this experimental study was designed to assess their effect on the level of radar cross section on flat plate in the setting of different voltages and frequencies. Plasma placement was investigated in two different configurations. Results reveal that the number and distance of the plasma actuators as well as their arrangement can influence the radar cross section. The study could eventually achieved 43.37% (~2/46 dB) reduction in radar cross section using DBD plasma actuator in frequency of 6 KHz and best arrangement.

Keywords: Plasma Stealth, Radar Cross Section, DBD Plasma Actuator, Flat Plate, Cold Plasma

^{*} Corresponding author E-mail: shams@mut-es.ac.ir