

علمى- پژوهشى

کاهش سطح مقطع راداری یک صفحه تخت مربعی با استفاده از پوشش پلاسمایی ناشی از عملگر پلاسمای DBD

سروش حریمی ، روحالله خوشخو ، محمدحسین شمس ** ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران (دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳، یذیرش: ۱۳۹۹/۲/۱۹

چکیدہ

یکی از موارد مهم و مورد توجه در صنعت هوانوردی، پنهانکاری وسایل پرنده است. یکیاز روشهای پنهانکاری، کاهش سطح مقطع راداری جسم مورد نظر با استفاده از پوشش پلاسما و با کمک خاصیت جذب پلاسما 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 کهش سطح مقطع راداری روی صفحه تخت و نیز بررسی تاثیر آن در ولتاژها (KV ۶-KV) و فرکانسهای مختلف (۶ کیلوهرتز و ۸ کیلوهرتز) پرداخته شده است. در این تحقیق با استفاده از دو آرایش مختلف، قرارگیری عملگر پلاسما بررسی شده است. نتایج به دستآمده نشان میده که تعداد و فاصله عملگرهای پلاسما و حتی نحوه چیدمان آنها بر میزان سطح مقطع راداری موثر است. در نهایت، در بهترین آرایش قرارگیری عملگرهای پلاسما، میزان سطح مقطع راداری با کمک عملگر پلاسمای DBD به میزان ۴۳/۳۷ درصدی (معادل Bb ۲۰۶۶) در فرکانس ۶ کیلوهرتز کاهش یات.

کلید واژهها: پنهانکاری راداری پلاسما، سطح مقطع راداری، عملگر پلاسمای DBD، صفحه تخت، پلاسمای سرد

۱– مقدمه

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

- (RCS¹) سطح مقطع راداری (
 - (RAM^{r}) , |c|, (RAM^{r})
 - ۳- مرئی بودن
 - ۴- اثر اشعه سرخ

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

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 بهصورت نسبت چگالی توان پراکنده شده در یک جهت داده شده (اغلب همان توان بازتابی بـه طـرف رادار) به چگالی توان تابشی تعریف میشود و فاصله R به جهتی که توان پراکنده شده اندازهگیری میشود، بستگی ندارد[۲–۱]:

 $\sigma = \lim S_s |R^2 \pi 4| / |S_i| \tag{1}$

که S_s و S_i بهترتیب بیانگر شار انـرژی پراکنـده شـده و شـار انرژی تشعشع تابشی میباشند. بهدلیل آنکه میـدان پراکنـدگی بهصورت کروی به طرف خارج از جسم گسترش مییابـد، شـدت آن با نسبت چگالی تـوان در آن با نسبت شده است، تـا وابسـتگی σ را بـه R از بـین ببـرد و در

^{*}رايانامه نويسنده مسئول:shams@mut-es.ac.ir

¹ Radar Cross Section

² Radar Absorbent Material

³ monostatic

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.

همان طور 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 پنهان کار 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 پنهان کاری بر آن اعمال شده است، نسبت به برد همان رادار در همان شرایط برای همان وسيله فاقد اين قابليت، با ريشه 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. پـس کـم 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 ذكر است كه كاهش سطح مقطع رادارى، معايبى از جمله افزايش وزن، افزايش قيمت، افزایش تعمیر و نگهداری، کاهش بار هواپیما و کاهش برد پروازی را نیز در برخواهد 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:

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



شکل (۱): شکل هواپیمای ۱/۴۴ Mig.

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

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

کیم و همکاران[۱۴–۱۳]، نیز تاثیر میزان حجم پلاسما بر کنترل سطح مقطع راداری را بررسی کردند، نتایج آنها بر روی صفحه تخت نشان میدهد، که میزان سطح مقطع راداری تا MdB ۲/۵ کاهش مییابد. آنها همچنین عنوان کردند که با افزایش حجم پلاسما، سطح مقطع راداری به میزان بیشتری کاهش مییابد و با ایجاد تغییرات در حجم پلاسما میتوان به سطح مقطع راداری دلخواه رسید.

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

۳- روش تحقیق

در این تحقیق، دو آرایش مختلف از عملگر پلاسمای DBDبر روی سطح صفحه تخت استفاده شده است. در آرایش اول، از ۷ عملگر پلاسما در فاصله ۱ سانتیمتر در آرایش دوم، از ۸ عملگر پلاسما در فاصله ۰/۵ سانتیمتر از یکدیگر استفاده شد. در هر دو آرایش، صفحه تخت با استفاده از عملگر پلاسما 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_{11} مشخص گردید که شاخص S_{11} نشان دهنده میزان جـذب امـواج راداری و شـاخص S_{21} ، نشاندهنده میزان گسیل امواج راداری هست که با استفاده از فرمولهای (۴–۲) میزان درصد جذب هر یک از فرکانسها در هر یک از شرایط پلاسما خاموش و روشن و همه نمونهها محاسبه گردید.

$$S_{11} = 10^{(\frac{S_{11}}{20})} \tag{(7)}$$

$$S_{21} = 10^{\left(\frac{S_{21}}{20}\right)} \tag{(7)}$$

$$A = 1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 \tag{(f)}$$

$$A(dB) = 10 \times \log_{10}(1 - A) \tag{(a)}$$

که S_{11} و S_{21} به ترتیب میزان جذب و گسیل امواج راداری توسط آنتنها برحسب دسیبل است، همچنین S_{11} و S_{21} به ترتیب شاخص جذب و گسیل امواج رادارای توسط آنتنها به صورت بیبعد و A شاخص جذب امواج توسط پلاسما بدون بعد و A(dB) شاخص میزان جذب امواج توسط عملگرهای پلاسما برحسب دسیبل هست. سپس با استفاده از فرمول (۵)، میزان جذب امواج توسط پلاسما 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 پلکسی گلس با ضخامت ۵ میلی متر و دارای ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی متر مربع ساخته شد، همچنین قسمت بالای صفحه به صورت جدا شونده طراحی شد تا بتوان مدل های عملگرهای پلاسما را راحت تر تعویض کرد. در زیر تصاویری از الگوی صفحه تخت با عملگرهای پلاسما و بدون آن در شکل (۲) نمایش داده شده است.



(الف) صفحه تخت بدون عملگر پلاسما



(ب) صفحه تخت مورد استفاده با عملگرهای پلاسمای نصب شده
شکل (۲): الگوی صفحه تخت مورد استفاده برای انجام آزمون
آزمایشگاهی.

۴-۲- تجهیــزات تولیــد و نظــارت پلاســمای ســرد غیر تعادلی

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 پلاسما توسط عملگرهای پلاسمایی مختلف است. بازهی ولتاژ خروجی و محدوده فرکانس حامل منبع تغذیه به ترتیب ۱ تا۳۰ کیلوولت و ۱ تا۳۰ کیلوهرتز است. فرکانس تحریک ناپایا در بازه ۲۰/۰ تا ارا 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، اندازه گیری شده است. برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیس و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و

تداخلات الکترومغناطیس ناشی از عملکرد منبع تغذیهی ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً تجهیزات اندازه-گیری و داده برداری، از کابلهای دارای پوشش محافظ الکتریکی و همچنین ملاحظات تطبیق امپدانسی 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 دی الکتریک کاپتون با ضخامت mm /۰ بر روی قسمت جداشونده صفحه تخت ساخته شدند. طول هر الکترود ۲۰cm و عرض هر کدام nc /۰ با ضخامت ۱۰ در نظر گرفته شدند. عکسهایی از دو آرایش متفاوت ساخته شده در شکل (۳) قابل مشاهده می باشند. در آرایش اول، تعداد ۸ عملگر پلاسما نصب شده که فاصله بین آنها، جهت جلوگیری از برهمکنش میدانهای الکتریکی آنها بر یک دیگر، مقحه تخت نصب گردید، که فاصله بین آنها mm در نظر صفحه 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.

۴-۴- مجموعه آنتنهای باند ایکس^۱ بههمراه دستگاه داده برداری Keysight N5222A

این مجموعه شامل دو عدد آنتن گیرنده، فرستنده باند ایکس است که بین فرکانس ۴ الی ۱۴۰ گیگاهرتز فعالیت میکنند. همچنین دارای کارآیی 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 آن میتوان فرکانسهای امواجی ارسالی و دریافتی و میزان رفت آن برحسب دسیبل و هرتز استخراج نمود. لازم بذکر است که عدم قطعیت دادههای خروجی B ۲۰/۰۰ ± گزارش شده است. نگهدارنده الگوی صفحه تخت نشان داده شده است. الگوی مفحه تخت و نگهدارنده مدل در ناحیه مابین دو آنتن قرار گرفته است. دو عدد کابل به الکترودهای 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



شکل (۴): مجموعه آنتنهای باند ایکس به همراه دستگاه اندازه گیری.

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 اینصورت، 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 همان طور که در شکل (۵) مشاهده میشود، نمودارها دارای همپوشانی می باشند و پس از بررسی دادههای آزمایشگاهی مشخص گردید، میزان اختلاف نتایج در حدود db ۲۰۰۰ است که نشان دهنده دقت بالای دستگاه دادهبرداری است. به دلیل حساسیت دستگاه تولید پلاسما در توانهای الکتریکی بالا و همچنین جلوگیری از آسیب دیدن

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

برای بررسی اعتبارسنجی نتایج، مراجع [۱۲و۱۲] 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 B ۳ 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 این که دارای خاصیت جذب باشد. در شکلهای (۶ و ۷)، نتایج ذکر شده در مراجع [۱۲و۱۲] قابل مشاهده است. در نتایج بهدست آمده از این تحقیق نیز، حداکثر مقدار کاهش سطح مقطع راداری در فرکانس KHz و ولتاژ KV برابر ۲/۴۶ dB برای جذب امواج راداری است. در همه مراجع [۱۵-۷] میزان کاهش سطح مقطع راداری، در محدوده dB ۲ الی ۸/۵dB است، که این مقدار وابسته به فرکانس، ولتاژ، شکل آرایش کاربردی و نوع رادار مورد استفاده جهت آزمون آزمایشگاهی میباشد.



شکل (۵): نتایج تکرار پذیری آزمایش آرایش اول عمودی در ولتاژ ۶ کیلوولت و فر کانس ۶ کیلوهر تز.



شکل (۶): نتایج اندازه گیری سطح مقطع راداری با پلاسما و بدون آن در ولتاژ ۱۴ کیلوولت و فرکانس ۱ کیلوهرتز [۱۰].



شکل (۷): نتایج اندازه گیری سطح مقطع راداری، پلاسما در حالت روشن و خاموش بهصورت تجربی و شبیهسازی در ولتاژ ۱۸ کیلوولت و فر کانس 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 بهدست آمد و مورد تحلیل قرار گرفت.

-1-6 آرایش اول در حالت قائم برسطح افق

در این آرایش، همانند شکل (۸)، الکترودها به صورت قائم بر سطح افق قرار گرفتهاند. در این آرایش، فاصله بین عملگرهای پلاسما، 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 می شود، در حالت عمودی آرایش اول، با افزایش ولتاژ، شاهد تغییرات کوچکی در شاخص جذب هستیم و نمودار نشان می دهد، نسبت به حالت پلاسما خاموش، مقدار جذب افزایش یافته و پس از آشکار شدن پلاسما در ولتاژ ۶ کیلوولت، میزان جذب از حالت پلاسما خاموش بیشتر است. همچنین، بیشترین میزان جذب در محدوده امواجی بیشتر است. همچنین، بیشترین میزان جذب در محدوده امواجی با فرکانس ۱۰ تا ۱۲ گیگاهرتز است. البته همان گونه 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، ۱۹/۲۰درصد (معادل ۲۵ ط

با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش تـدریجی ولتـاژ تـا لحظـه نمایان شدن پلاسما، میزان جذب روند افزایشی داشته است، امـا

در شکل (۱۲) میزان تغییرات جذب در حالت ولتاژ ثابت ۳/۵ کیلوولت و فرکانس جریان در دو حالت ۶ و ۸ کیلوهرتز مشاهده میشود. 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 جـذب بـا افـزایش فرکانس جریان، با توجه به شکل نمودار در مکان حـداکثر جـذب مشاهده می شود.

لازم بهذکر است که، قسمتهای اول و آخر نمودارها، بیشتر از مقدار صفر، به دلیل وجود خطای ورودی دادهها قابل استناد نیست. همچنین، در مقالات متعدد، بهترین فرکانس عملکردی برای عملگرهای پلاسما را در محدوده ۶ کیلوهرتز در نظر گرفتهاند. بنابراین برای انجام آزمونهای آزمایشگاهی از فرکانس ۶ کیلوهرتز استفاده گردید.



شکل (۸): آرایش اول در حالت عمودی.



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







شكل (۱۱): ناحيه بيشينه تغييرات ولتاژ آرايش اول عمودي.



شکل (۱۲): تغییرات فرکانس (۶۰۸ KHz) بر روی آرایش اول در حالت عمودی (ولتاژ ۳/۵ کیلوولت).



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

۶-۲- آرایش اول در حالت افقی

آرایش اول در حالت افقی در شکل (۳⊣لف) 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. همان گونه که در شکل (۱۴) مشاهده می شود، در برخی فرکانسهای جریان، میزان جذب در حالت پلاسما خاموش بهتر از حالت پلاسما روشن است و در دیگر فرکانسهای جریان، عملکرد حالت جذب امواج در محدوده امواج ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز بوده و بیشترین مقدار جذب در محل امواج با فرکانس ۹ گیگاهرتز است خاموش، کاهش یافته است. لازم بهذکر است که در بهترین حالت، میزان سطح مقطع راداری، حداکثر ۱۲/۹۳٪ (معادل طال ۲/۰۷) کاهش مییابد که تقریبا دو برابر حالت قبل

همان طور که در شکل (۱۵) مشاهده می شود، 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 نغییرات 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 تاثیربخشی 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 نشانمیدهد، شکل عملگرهای پلاسما بر میزان سطح مقطع راداری تاثیرگذار است.















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





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

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

این حالت که در شکل (۲۰) قابل مشاهده است، الکترودها به صورت عمود برسطح افق قرار داده شده اند. در این آرایش، فاصله بین الکترودها، در حدود یک سانتی متر 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 دوحالت 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 برمیزان جذب گذاشته است. اما در سایر امواج راداری، حالت پلاسما روشن از حالت بدون پلاسما تاثیرگذارتر بوده، اما چندان هم، این امر محسوس نیست. همچنین حداکثر میزان کاهش سطح مقطع راداری در بهترین حالت آرایش دوم عمودی، ۲۷/۷۸٪ (معادل BB ۲۰/۴) است.

بررسی تاثیر افزایش ولتـاژ در شـکل (۲۲) نشـان داده شـده است، همانطور که از شکل قبل نیز انتظار میرفت، بـا افـزایش میزان ولتاژ نیـز تغییـرات محسوسـی در میـزان جـذب مشـاهده

نمی شود و می توان بیان نمود، نمودارها تقریباً هم پوشانی دارنـد. البته این موضوع، با توجه به کاهش میزان سطح پوشش پلاسـما در آرایش دوم نسبت بـه آرایـش اول، قابـل پـیش.بینـی بـود. 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 نمی شود، همچنین در شکل (۲۵)، ناحیه حداکثر تغییرات در محدوده فرکامس ۱۰ گیگاهرتز مشاهده می شود. در شکل (۲۶)، به بررسی تاثیر آرایش و نحوه قرارگیری عملگرهای پلاسما در دو آرایش اول و دوم به صورت عمود برسطح پرداخته شده است. براساس شکل (۲۶)، میزان جذب در بیشتر فرکانس های حالت عمودی آرایش دوم از جذب حالت عمودی آرایش اول بیشتر می باشد. بهنظر مى سد كه عدم وجود الكترودها و كمتر بودن پوشش آنها برروی 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 برسطح، برروی میزان سطح مقطع راداری، ارجحیت دارد. از طرفی هرچه سطح با تعداد الکترود کمتری پوشانده شود، میزان كاهش سطح مقطع راداري بيشتر خواهد بود.



شکل (۲۰): آرایش دوم در حالت عمودی.



شكل (۲۱): مقايسه بين حالت پلاسما خاموش و پلاسما روشن آرايش دوم عمودى (ولتاژ ۶ كيلوولت فركانس ۶ كيلوهرتز).



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

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



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

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 پلاسما خاموش و پلاسما روشن نشان داده شده است. همان گونه که قابل مشاهده است، تغییرات جذب در حالت پلاسما خاموش نسبت به حالت پلاسما روشن، بسیار کم است، اما میزان جذب در حالت پلاسما روشن، کمی بیشتر است، محدوده جذب امواج، در محدوده فرکانس ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز هست.

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

روند نمودار قبلی را دنبال می کند. 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 کلیهی آرایشهای بررسی شده تا این لحظه، میزان جذب بهتر بوده که در شکل (۳۳) قابل مشاهده است. بهنظر این امر صورت میپذیرد و طبق بررسیهای قبلی نیز حالت افقی مملکرد 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



شکل (۸۸): مقایسه بین حالت پلاسما خاموش و پلاسما روشن آرایش دوم افقی(ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).





شکل (۲۹): تغییرات ولتاژ (۶ KV، ۵، ۵، ۳٪ ۲) بر روی آرایش دوم در حالت افقی (فرکانس ۶ کیلوهرتز).



------ 2 Kv ---- 3.5 Kv - - - 5 Kv - - 6 Kv





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



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

- ۸- مرجعها
- 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 کلیهی حالتهای بررسی شده در حالت پلاسما روشن (ولتاژ ۶ کیلوولت فرکانس ۶ کیلوهرتز).

۷- نتیجهگیری

همان گونه در مقالات، آزمایشها و تحلیلها بررسی شد، پلاسما دارای خاصیت جذب امواج بوده و می تواند مانع از بازگشت امواج راداری شود، مقدار کاهش میزان سطح مقطع راداری، به عواملی مثل میزان یوشش یلاسما روی جسم، چگالی یلاسمای 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 قراگیری عملگرها در فاصله نیمسانیمتری از یکدیگر می تواند تاثیر بیشتری بر کاهش سطح مقطع راداری داشته باشد و دستیابی به فاصله بهینه بین الکترودها، نیازمند انجام تحقيقات بيشتر است. همچنين قرار گيرى افقى الكترودها نسبت به سطح، تاثیر خیلی بیشتری در کاهش سطح مقطع راداری نسبت به قرار گیری عمودی الکترودها نسبت به سطح دارد. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان میدهد که سطح مقطع راداری در فرکانس KHz حـداکثر به میزان ۴۳/۳۷٪ (معادل (۲/۴۶ dB) کاهش مییابد. میزان کاهش سطح مقطع راداری را مي توان با ارائه الكوى بهتر و افزايش توان دستگاه توليد پلاسما به جهت افزايش ولتاژ و امكان تغيير بيشتر فركانس اعمالي برعملگرها 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 defferent 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