تحلیل آنتن پلاسمای ستونی با تحریک موج سطحی

فاطمه صادقی کیا[1] فرخ حجت کاشانی[2] جلیل راشد محصل[3]

۱- استادیار- پژوهشگاه هوافضا - تهران- ایران
sadeghi_kia@ari.ac.ir
۲- استاد- دانشگاه علم‌وصنعت ایران - تهران- ایران
kashani@iust.ac.ir
۳- استاد- دانشگاه تهران - تهران- ایران
jrashed@ut.ac.ir

چکیده: در این پژوهش، آنتن پلاسمای تک قطبی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی آنتن پلاسما به دو روش مجزا، یکی استفاده از سیمولاتور HFSS[1] و دیگری شبیه‌سازی با استفاده از روش عددیFDTD[2] انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی آنتن پلاسما در محیط HFSS، با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه شده در سایر مقالات مقایسه شده و نتایج به‌دست آمده بیانگر میزان قابلیت اطمینان به روش شبیه‌سازی مذکور در این ساختار جدید از آنتنهاست. در ادامه، پس از تشریح مشخصات موج سطحی روی ستون پلاسما، مشخصات تشعشعی، امپدانسی، سطح مقطع راداری و بهره آنتن ستونی پلاسما با روش عددی FDTD مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن با مشخصات تشعشعی آنتن فلزی با ابعاد مشابه مقایسه شده است. با توجه به آن‌که آنتن تک-قطبی معمولاً در محدوده فرکانس تشدید استفاده می‌شود، مشخصات تشعشعی به‌دست آمده از آنتن تک قطبی پلاسما از مقبولیت خوبی برخوردار می‌باشند و بنابراین، از این تکنولوژی نوظهور می‌توان به عنوان عنصر تشعشعی استفاده نمود.

کلمات کلیدی: آنتن پلاسمای تک‌قطبی - موج سطحی - پاشندگی- **FDTD** – مشخصات تشعشعی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۲۱
نام نویسنده‌ی مسئول: فاطمه صادقی کیا
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – شهرک قدس- پژوهشگاه هوافضا، کد پستی ۸۳۴-۱۴۶۶۵

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

۱- مقدمه

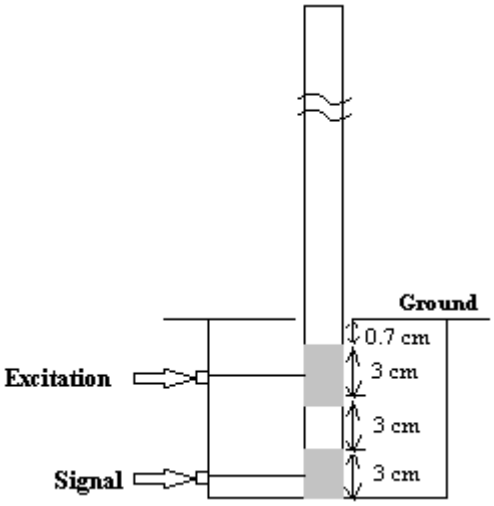
انتشار موج سطحی روی سطح بین ستون پلاسما و محفظه دی-الکتریک اطراف آن حدود سال ۱۹۵۹ کشف گردید[۱]؛ درحالی که شناخت چنین امواجی در سال ۱۹۷۰ به سمت استفاده از آن‌ها به عنوان وسیله‌ای جهت نگهداری یک ستون پلاسما سوق پیدا کرد. مطالعات زیادی در زمینه خواص و کاربردهای تولید پلاسما با استفاده از امواج سطحی (SWD[۳]) انجام شده است. خواص SWD عمدتاً به میزان توان جذب شده در واحد طول پلاسما و شرایط تخلیه اعم از نوع پلاسما و فشار گاز و ابعاد و جنس محفظه دی‌الکتریک و نیز مود و فرکانس موج سطحی بستگی دارد[۲] و [۱۱]. ستون پلاسما با تحریک موج سطحی کاربردهای مختلفی در علوم متفاوت دارد درحالی که یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن در مخابرات، استفاده از ستون پلاسما به عنوان هادی در آنتن می‌باشد.

آنتن پلاسما نوع متفاوتی از انواع آنتن‌ها است؛ زیرا در فناوری آن از گاز یونیزه شده با فشار کم و محفوظ در یک محفظه شیشه‌ای، به عنوان هادی استفاده می‌شود. با اعمال پالس‌های RF به محفظه حاوی گاز، پلاسما به سرعت تولید و ناپدید می‌شود و بنابراین آنتن به سرعت خاموش و روشن می‌گردد. درلحظه خاموش بودن آنتن، گاز داخل محفظه هیچ گونه هدایتی ندارد و آنتن ناپدید می‌شود. از این‌رو روی الگوی تشعشعی سایر آنتن‌ها اثری نخواهد داشت و از دید کلیه رادارها محفوظ خواهد ماند. هنگامی‌که آنتن روشن می‌شود، پلاسما تبدیل به هادی الکتریکی شده و محیطی برای تشعشع سیگنال فراهم می‌کند و تنها در مدت زمان تبادل سیگنال رادیویی قابل رؤیت خواهد بود.

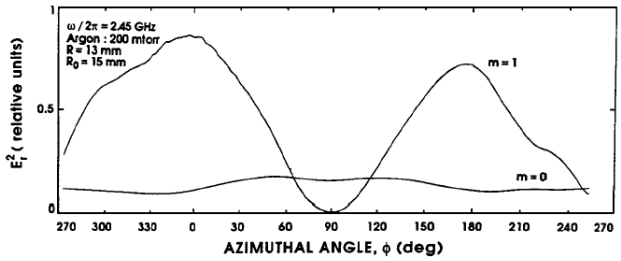
آنتن پلاسما می‌تواند در کاربردهای خدمات شهری، به‌ویژه برای سیستم‌های مخابرات بی‌سیم مناسب باشد[۳]. کاربردهای عمده قابل تحقق این فناوری عبارتند از: آنتن‌های هوشمند، آرایه‌های اسکن دایروی، آنتن‌های قابل شکل‌گیری مجدد، شیلدینگ زمانی و مکانی و شیلدینگ با فرکانس انتخابی [۴].

درحال حاضر، فناوری آنتن پلاسما بسیار ناشناخته است. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی متفاوتی از آنتن پلاسما با تحریک موج سطحی در محفظه دی‌الکتریک انجام شده‌است[۳-۵-۶]. آزمایشات انجام شده بیانگر آن هستند که چنین آنتن‌هایی، به دلیل کم‌نویز بودن، می‌توانند برای ارتباطات باندهای HF (۳-۳۰MHz) و VHF(۳۰MHz-۳۰۰) مفید باشند[۵].

در این مقاله، مشخصات موج سطحی روی ستون پلاسما، اعم از مودهای انتشار، ثابت انتشار موج سطحی β و توزیع چگالی پلاسما درطول ستون تشریح می‌شود.سپس مشخصات تشعشعی آنتن پلاسما با استفاده از شبیه‌سازی آنتن پلاسما به دو روش شبیه‌سازی با سیمولاتور HFSS و پیاده‌سازی روش عددی FDTD، در فشار و توان ثابت، با آنتن فلزی و نیز نتایج ارائه شده در [۷] مقایسه می‌شوند. در بخش پایانی از این پژوهش، سطح مقطع راداری آنتن پلاسما و نیز بهره آن مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن با آنتن فلزی با ابعاد مشابه مقایسه شده است.



شکل (۱): شماتیک آنتن پلاسما با تحریک موج سطحی



شکل (۲): مودهای انتشاری صفر و یک در ستون پلاسما با تحریک موج سطحی. R_0 : شعاع بیرونی محفظه، R شعاع درونی محفظه[۲]

۲- آنتن پلاسما با تحریک موج سطحی

تحریک ستون پلاسما با موج سطحی قابل انعطاف‌ترین نوع تحریک در مقایسه با سایر منابع RF و مایکروویو است؛ زیرا فرکانس تحریک، فشار گاز و چگالی پلاسما محدوده تغییرات وسیعی دارند. به‌علاوه این نوع تحریک راندمان بالاتری دارد و توان HF ناچیزی در مدار تطبیق امپدانس ناپدید می‌شود. در شکل ۱ نحوه تحریک آنتن پلاسما با موج سطحی نشان داده شده است. این روش تحریک در ساختارهای آزمایشگاهی کاربرد زیادی دارد[۳-۶-۵]. ستون پلاسما از محفظه‌ای دی‌الکتریک که می‌تواند برای روشنایی به‌کار رود، به‌دست می‌آید. قسمت انتهایی محفظه داخل جعبه فلزی زیر صفحه زمین قرار دارد. در این بخش، یک حلقه مسی دورتادور محفظه قرار گرفته و جهت اعمال توان RF تحریک به کانکتور N متصل می‌گردد. شکاف کوچکی در محل عبور محفظه دی‌الکتریک از صفحه زمین وجود دارد. با اعمال

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.10- No.1 Spring & Summer 2013

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

توان تحریک به حلقه مسی از طریق کانکتور، میدان الکتریکی قوی بین حلقه و صفحه زمین ایجاد می‌شود به‌طوری‌که خطوط میدان از داخل محفظه عبور کرده و ستون پلاسما را تحریک می‌کند. حلقه مسی دیگری با استفاده از ساختار کوپلینگ مشابه، برای اعمال سیگنال به‌کار می‌رود. بدین ترتیب، پس از تحریک پلاسما، ستون پلاسما تبدیل به هادی الکتریکی می‌شود.

در شبیه‌سازی آنتن پلاسما با روش FDTD و نیز استفاده از سیمولاتور تجاری HFSS، ابعاد محفظه فلزی mm $40\times400\times400$ در نظر گرفته شده است. طول و شعاع ستون پلاسما در شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله به‌ترتیب برابرند با 120mm و 12mm و محفظه با دی‌الکتریکی به ضخامت 0.5mm و ضریب دی-الکتریک $\varepsilon_d = 3$ محصور شده‌است. محفظه دی‌الکتریک با گاز آرگون در فشار 0.4mb (معادل با فرکانس برخورد 500MHz) پر شده است. برای تحریک موج سطحی حلقه فلزی با ارتفاع 30mm که حدود 7mm زیر شکاف دایره‌ای در قسمت بالای جعبه زمین قرار دارد استفاده می‌شود.

۲-۱- مود انتشار

در ساختار استوانه‌ای، مودهای قابل انتشار موج سطحی با وابستگی شدت میدان آن‌ها نسبت به زاویه افقی φ تعریف می‌شود. چنانچه محیط یکنواخت باشد، شدت میدان موج‌های متحرک به صورت $\exp[j(\omega t-\beta z+m\varphi)-\alpha z]$ تعریف می‌شود که t شاخص زمان، z محور طولی، β ضریب فاز محوری ($\beta=\frac{2\pi}{\lambda}$ که λ طول موج موج سطحی در طول محور z است)، α ضریب تضعیف محوری و m عدد صحیحی است که مبین مود انتشار می‌باشد. درحالتی‌که از ستون پلاسما به عنوان آنتن استفاده می‌شود، باید نحوه تحریک به‌گونه‌ای باشد که مود صفر تحریک شود و انتخاب این مود تابعی از فرکانس موج RF و شعاع محفظه دی‌الکتریک است. در شکل ۲ توزیع افقی مربع مؤلفه شعاعی شدت میدان الکتریکی در ستون پلاسما برای دو مود صفر و یک با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مود صفر، مودی است که در سطح مقطع استوانه یکنواخت و متقارن است. تحقق مود صفر زمانی به وقوع می‌پیوندد که حاصلضرب فرکانس موج RF و شعاع محفظه از ۲GHz.cm کمتر باشد[۲].

۲-۲- تئوری پلاسما

موج سطحی متقارن(مود صفر) در راستای محور ستون پلاسما، در فرکانس‌های کم‌تر از فرکانس پلاسما منتشر می‌شود. با صرف‌نظر از تشعشع این موج، می‌توانیم بردار موج k موج سطحی را از رابطه پاشندگی موج سطحی پلاسما برای ستون طویل محاسبه کنیم[۵]. چنانچه چگالی پلاسما یکنواخت فرض شود، k درطول ستون پلاسما از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_r T_0 I_1(T_p a)K_0(T_0 a)+T_p K_1(T_0 a)I_0(T_p a)=0 \qquad (۱)$$

که در آن $T_0^2=k^2-k_0^2$ و $T_p^2=k^2-\varepsilon_r k_0^2$، a شعاع ستون پلاسما، $k_0=\frac{\omega}{c}$ ثابت انتشار فضای آزاد و ε_r ثابت دی‌الکتریک پلاسما است که مقدار آن به‌صورت رابطه ۲ می‌باشد.

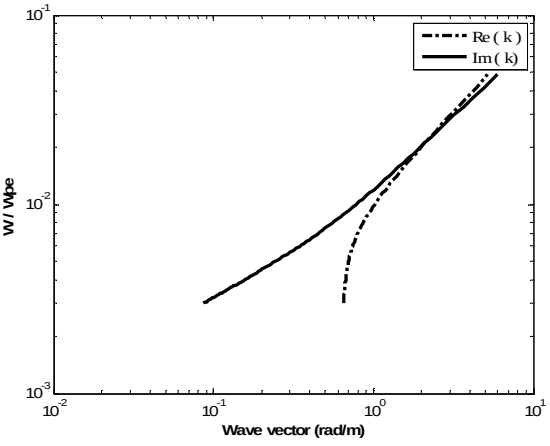
$$\varepsilon_r=1-\frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega+j\nu)} \qquad (۲)$$

ν فرکانس برخورد الکترون خنثی و ω_{pe}^2 فرکانس پلاسمای الکترون است و مقدار آن در رابطه ۳ مشخص گردیده است.

$$\omega_{pe}^2=\frac{n_e e^2}{m_e\varepsilon_0} \qquad (۳)$$

در رابطه بالا، n_e چگالی پلاسما و e و m_e به‌ترتیب بیانگر بار و جرم الکترون می‌باشند. عبارات K و I توابع بسل می‌باشند.

پاشندگی امواج به وسیله رابطه ω برحسب β بیان می‌شود؛ درحالی که در عمل آن را به صورت‌های مختلفی نظیر $\frac{\omega}{c}$ برحسب $\frac{\beta}{\omega}$، $\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$ برحسب βa، $\frac{\omega}{\omega_{pe}}$ برحسب βa و $\frac{\omega}{\omega_{pe}}$ برحسب β بیان می‌دارند.



شکل (۳): رابطه پاشندگی امواج سطحی پلاسما در فرکانس ۳۰MHz و a = ۰/۰۱۲۵m و فرکانس برخورد ν =۱GHz

در شکل ۳، منحنی قسمت‌های حقیقی و موهومی k برحسب $\frac{\omega}{\omega_{pe}}$ برای فرکانس ۳۰MHz، شعاع ستون پلاسما a=۰/۰۱۲۵m و ν =۱GHz رسم شده‌اند. در چگالی‌های زیاد پلاسما که در آن مقدار $\frac{\omega}{\omega_{pe}}$ کوچک است، قسمت حقیقی k به سمت مقدار بردار موج فضای آزاد k_0 میل می‌کند و قسمت موهومی آن، یعنی $\mathrm{Im}\{k\}$، یا ثابت تضعیف مقداری ناچیز در حدود صفر خواهد داشت. در چنین حالتی جریان القایی موج سطحی درطول ستون پلاسما به میزان جریان القایی منتشر شده در آنتن دوقطبی فلزی شباهت بسیاری

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

خواهد داشت و این بدان معناست که شباهت ستون پلاسما به هادی فلزی بیشتر خواهد بود. درحالی که در چگالی‌های کم، موج سطحی به سرعت میرا می‌شود و نسبت به جریان روی سیم طول موج کوتاه‌تری خواهد داشت.

فشار گاز و میزان توان تحریک نقش مهمی در میزان چگالی پلاسما دارند. افزایش توان و فشار، چگالی پلاسما را افزایش می‌دهند.

در شکل‌های ۴ و ۵ میزان تغییرات ثابت فاز β برحسب تغییرات فرکانس و نیز تغییرات فرکانس برخورد (ν) نشان داده شده است. فرکانس برخورد تابعی از فشار پلاسما می‌باشد و با افزایش میزان فرکانس برخورد شباهت ستون پلاسما به هادی فلزی بیشتر می‌شود.

با افزایش توان HF تابیده شده به محفظه دی‌الکتریک حاوی پلاسما، علاوه‌بر چگالی پلاسما، طول ستون پلاسما نیز افزایش می‌یابد. چنانچه میزان توان تحریک P_0 فرض شود، چگالی پلاسما از محل تحریک تا انتهای ستون در آنتنی که در راستای محور zها واقع است، همانگونه که Rayner [۳] معرفی کرده‌است، به صورت رابطه ۴ تغییر می‌کند.

$$n(z) = n_0 - C\nu_m z \qquad (۴)$$

که در آن n_0 چگالی پلاسما در محل تحریک ($z = 0$) است و مقدار آن برابر است با:

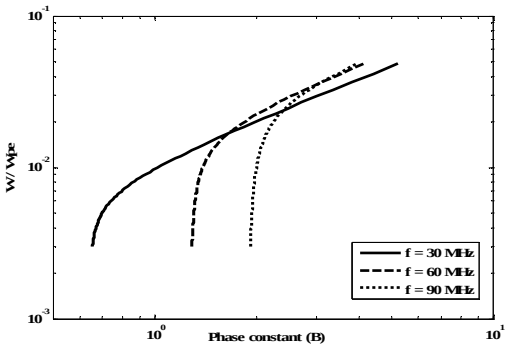
$$n_0 = A(p)\sqrt{P_0} \qquad (۵)$$

$A(p)$ و C در فشار ثابت مقادیر ثابتی هستند و P_0 توان ورودی می‌باشد. طول ستون برابر است با:

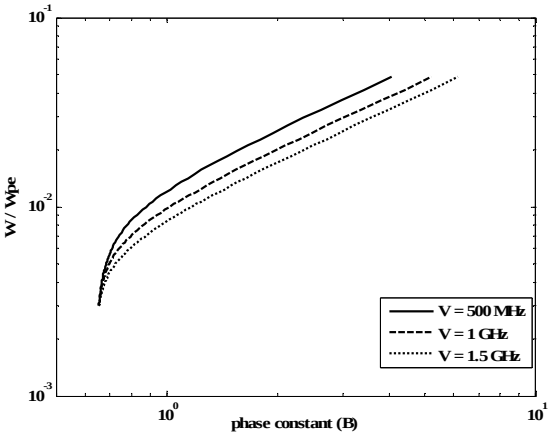
$$L = \frac{n_0}{C\nu_m} = \frac{A(p)\sqrt{P_0}}{C\nu_m(p)} \qquad (۶)$$

قابلیت هدایت درطول ستون پلاسما با تغییر میزان چگالی تغییر می‌کند و مقدار آن در هر نقطه برابر است با:

$$\sigma = \varepsilon_0 \frac{\omega_{pe}^2}{j\omega + \nu} \qquad (۷)$$

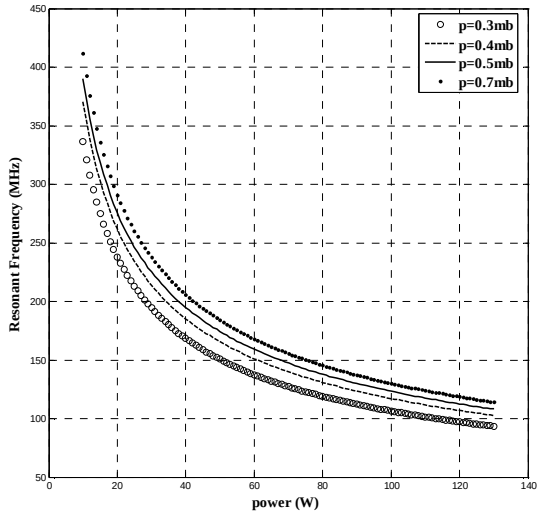


شکل(۴): رابطه ثابت فاز امواج سطحی پلاسما در فرکانس های مختلف و a = ۰/۰۱۲۵m و فرکانس برخورد ν =۱GHz



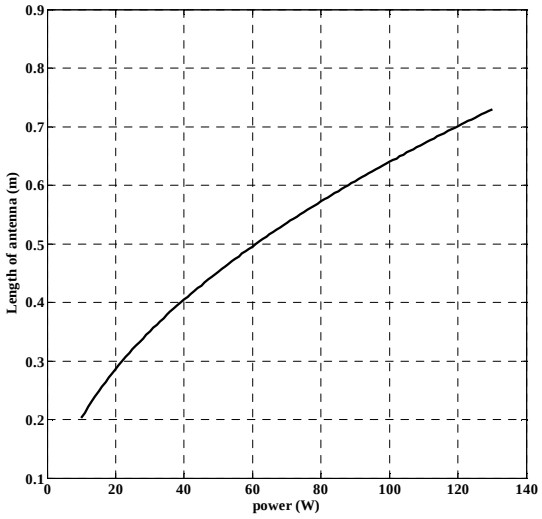
شکل (۵): رابطه ثابت فاز امواج سطحی پلاسما در فرکانس های مختلف و a = ۰/۰۱۲۵m با فرکانس برخورد متفاوت

منحنی تغییرات فرکانس تشدید پلاسما با تحریک موج سطحی در فشار ثابت و فرکانس برخورد ثابت ($C = 5\times10^9$ و $\nu_m = 5\times10^8\,Hz$) در شکل ۶ به نمایش درآمده است. در اثر افزایش فشار داخل محفظه پلاسما می‌توان با صرف توان کمتری به فرکانس تشدید بالاتری دست یافت زیرا همانگونه که اشاره شد، افزایش فشار پلاسما باعث افزایش چگالی پلاسمای داخل ستون می‌شود. به علاوه، تغییر میزان طول ستون پلاسما با تغییر میزان توان تحریک در مشخصات فیزیکی ثابت ذکر شده در بالا در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۶): تغییر میزان توان روی فرکانس تشدید آنتن

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]



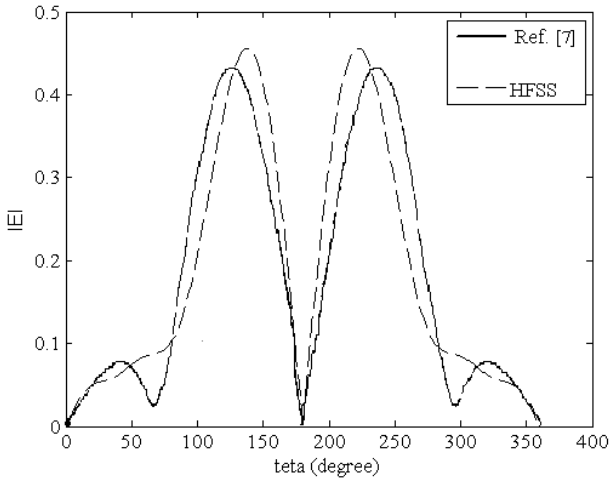
شکل (۷): طول ستون پلاسما با تغییر میزان توان تحریک در فشار ۴۰۰ μb و فرکانس برخورد ۵۰۰ MHz

۳- شبیه‌سازی آنتن پلاسما

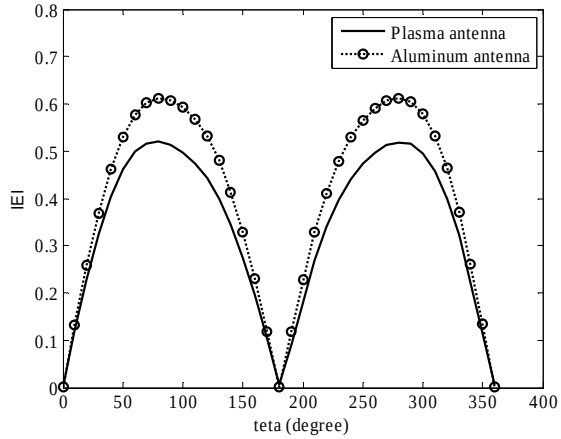
۳-۱- طراحی آنتن پلاسما

سه کمیت عمده و تأثیرگذار در عملکرد آنتن پلاسما عبارتند از فشار گاز درون محفظه، فرکانس تحریک و توان تحریک . ابتدا باید گاز مناسب برای پرکردن محفظه انتخاب شود. انتخاب ما در این طراحی گاز آرگون است. دلیل انتخاب این گاز آن است که در نمونه های آزمایشگاهی کاربرد زیادی دارد و اطلاعات اندازه‌گیری شده درباره آن بیشتر است.

با انتخاب فشار، فرکانس و توان تحریک مناسب برای سیگنال تحریک ، می‌توان عملکرد مطلوبی از آنتن را به‌دست آورد. با انتخاب فشار مناسب گاز درون محفظه میزان فرکانس برخورد و نیز شیب منحنی تغییرات چگالی در راستای طول ستون پلاسما تثبیت می‌شود. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در [۳]، در شبیه سازی مقدار فشار گاز ۴۰۰ μb و فرکانس برخورد ۵۰۰MHz و فرکانس تحریک ۳۰۰MHz در نظر گرفته شده‌است. با انتخاب مقادیر مذکور، مقادیر $A(p)$ و C طبق نتایج ارائه شده توسط اندازه‌گیری در [۳] به ترتیب برابر خواهند بود با $۰/۱۶\times ۱۰^{۱۸} m^{-3}w^{\frac{1}{2}}$ و $۵\times ۱۰^{۹} m^{-4}s$.



شکل (۸): الگوی تشعشعی آنتن تک قطبی پلاسما در فرکانس ۳۰۰MHz و فشار ۴۰۰μb و توان ورودی ۱۲۰ وات : HFSS - - - ، مرجع ۷ ــــــ.



شکل(۹): مقایسه الگوی تشعشعی آنتن تک قطبی پلاسما با آنتن آلومینیوم در فرکانس ۱۵۰MHz

۳-۲- شبیه‌سازی با سیمولاتور

شبیه‌سازی آنتن تک قطبی پلاسما با استفاده از سیمولاتور تمام موج HFSS به روشی که در [۸] بیان شده‌است، انجام شد و الگوی تشعشعی آن با الگوی به‌دست آمده در [۷] مقایسه گردید و نتیجه آن در شکل ۸ نشان داده شده‌است. مقایسه انجام شده حاکی از آن‌است که روش مزبور در شبیه‌سازی آنتن پلاسما به‌وسیله سیمولاتور منتخب، به‌خوبی عملکرد آنتن را تحلیل می‌نماید و تفاوت ناچیزی بین دو الگوی تشعشعی مشاهده می‌شود. در شکل ۹ الگوی تشعشعی آنتن تک قطبی پلاسما در مقایسه با آنتن فلزی با همان طول در فرکانس ۱۵۰MHz نشان داده شده‌است. الگوی تشعشعی آنتن پلاسما نسبت به مشابه فلزی، افت توان تشعشعی اندکی دارد که این مسئله بدیهی است و ناشی از کاهش قابلیت هدایت در ستون پلاسما نسبت به هادیهای فلزی می‌باشد. زیرا مثلاً در فلزی مانند آلومینیوم قابلیت هدایت حدود $\sigma_{Al} \approx 38000000 Simence/m$ است

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

درحالی‌که در آنتن پلاسمای طرح شده مقدار آن در محدوده $15<\sigma<120$ از فاصله محل تحریک تا انتهای آنتن تغییر می‌کند.

۳-۳- شبیه‌سازی به روش FDTD

در این روش، محیط آنتن را به صورت پلاسمای سرد که چگالی آن به صورت محوری تغییر می‌کند، و نمایه تغییرات آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در نظر می‌گیریم. در این نمایه مقدار فشار و درنتیجه فرکانس برخورد پلاسما ثابت در نظر گرفته شده است و مقدار آن‌ها به‌ترتیب $400\mu b$ و $500MHz$ می‌باشد و با اعمال توان تحریک ۱۲۰ وات یعنی فرکانس پلاسما در محدوده $1.73\times10^{10}<\omega_{pe}<7.28\times10^{10}\ rad/s$ عملکرد آنتن بررسی شده‌است.

مجموعه معادلات پلاسمای سرد در فضای بدون میدان مغناطیسی به صورت روابط ۸ می‌باشند.

$$\nabla\times\vec{E}=-\mu_0\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \qquad (۱-۸)$$

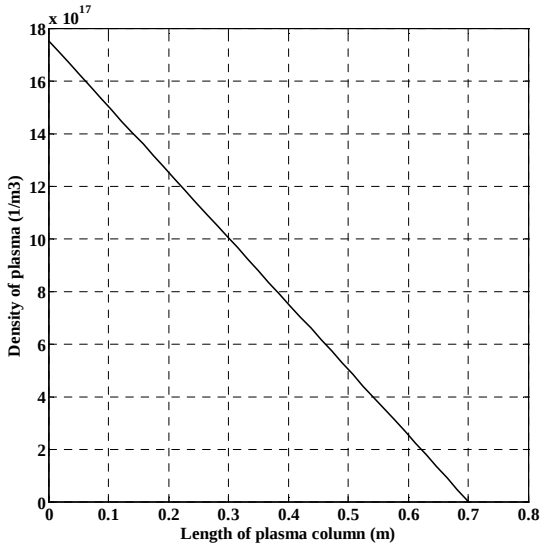
$$\nabla\times\vec{H}=\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}+\vec{J} \qquad (۲-۸)$$

$$\frac{\partial\vec{J}}{\partial t}+\nu\vec{J}=\varepsilon_0\omega_{pe}^2\vec{E} \qquad (۳-۸)$$

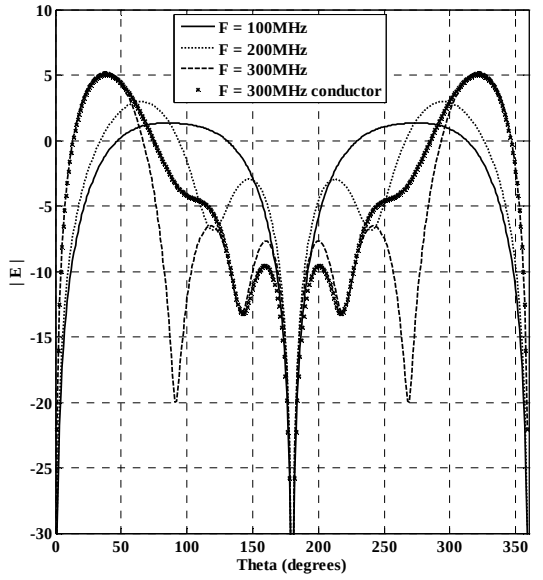
که در آن $\vec{E}$ و $\vec{H}$ به ترتیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌باشند و ε_0 و μ_0 نیز به‌ترتیب قابلیت گذردهی الکتریکی (F/m) و قابلیت هدایت مغناطیسی (H/m) فضای آزاد می‌باشند و $\vec{J}$ چگالی جریان پلاسما [A/m^2] است.

با اعمال روابط Yee و مش‌بندی شماتیک مورد نظر در مختصات دکارتی به صورت Δx، Δy، Δz و نیز در حوزه زمان با گام Δt، انتشار موج الکترومغناطیسی در حوزه زمان تحلیل می‌شود. در این شبیه‌سازی فضای FDTD به $162\times65\times72$ سلول تقسیم و منبع تحریک پالس گاوسی در نظر گرفته شده‌است. قابل ذکر است که در این پژوهش حالت تعادل برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی و محیط پلاسما را مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادیم و این‌گونه فرض نمودیم که محیط پلاسما از قبل ایجاد شده است. جزئیات مربوط به این تحلیل عددی در [۹-۱۰] بیان گردیده است.

با پیاده‌سازی شبیه‌سازی مزبور، الگوی تشعشعی آنتن پلاسما در فرکانس‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با آنتن فلزی با ابعاد مشابه در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. در شکل ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تغییر الگوی تشعشعی، قسمت حقیقی امپدانس ورودی و قسمت موهومی امپدانس ورودی آنتن پلاسما با طول ۷۰cm در فرکانس ۳۰۰MHz با تغییر میزان فرکانس برخورد نشان داده شده‌اند و مقادیر آن‌ها با آنتن فلزی مقایسه شده‌اند. به نظر می‌رسد که هرچه فرکانس برخورد بیشتر باشد، عمق نول‌ها کاهش می‌یابد ولی همانگونه که در شکل ۱۳ مشهود است، ضریب Q آنتن کمتر می‌شود. بدین ترتیب با تغییر فرکانس برخورد و نیز تغییر میزان توان ورودی می‌توان آنتنی طرح نمود که عملکردش با حالت قبل متفاوت باشد. از این خاصیت می‌توان برای ساخت آنتن قابل شکل‌گیری مجدد استفاده نمود؛ زیرا فرکانس کاری آنتن با تغییر دو پارامتر مذکور قابل تغییر است.

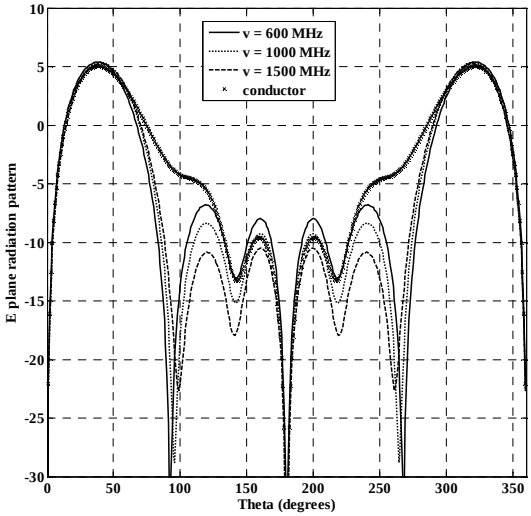


شکل (۱۰): توزیع چگالی پلاسما در طول ستون با اعمال توان ۱۲۰ وات به محفظه‌ای با شعاع ۱۲/۵ mm و اعمال فشار $400\mu b$ به محفظه

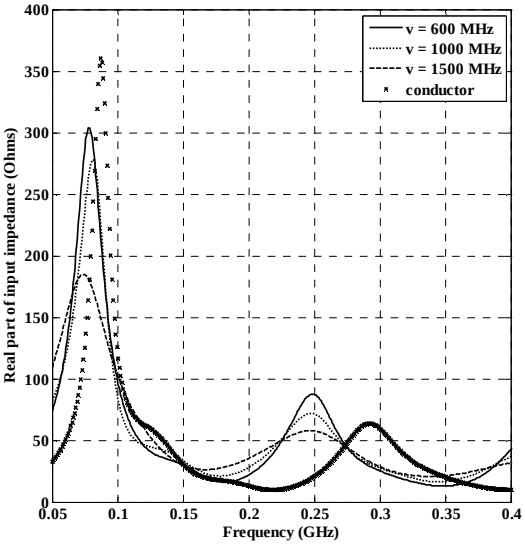


شکل (۱۱): الگوی تشعشعی آنتن پلاسما در فرکانس‌های تحریک متفاوت و مقایسه آن‌ها با آنتن فلزی با ابعاد مشابه

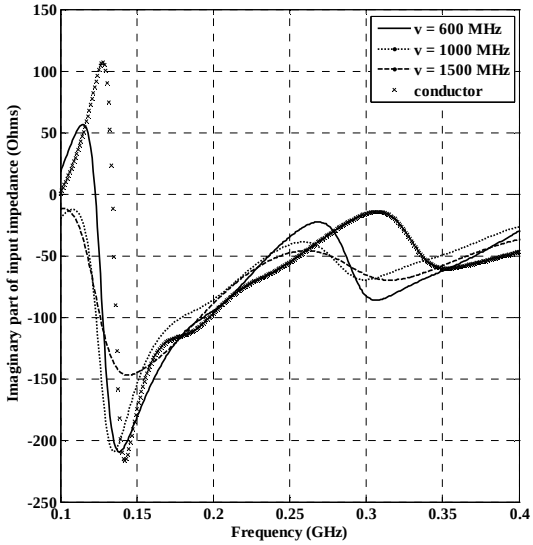
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]



شکل (۱۲): الگوی تشعشعی آنتن پلاسما در فرکانس تحریک ۳۰۰MHz با تغییر فرکانس برخورد الکترون و مقایسه آن‌ها با آنتن فلزی با ابعاد مشابه



شکل (۱۳): قسمت حقیقی امپدانس ورودی آنتن پلاسما در فرکانس تحریک ۳۰۰MHz با تغییر فرکانس برخورد الکترون و مقایسه آن‌ها با آنتن فلزی با ابعاد مشابه



شکل (۱۴): قسمت موهومی امپدانس ورودی آنتن پلاسما در فرکانس تحریک ۳۰۰MHz و تغییر فرکانس برخورد الکترون و مقایسه آن‌ها با آنتن فلزی با ابعاد مشابه

۴- سطح مقطع راداری و بهره در آنتن‌های پلاسما

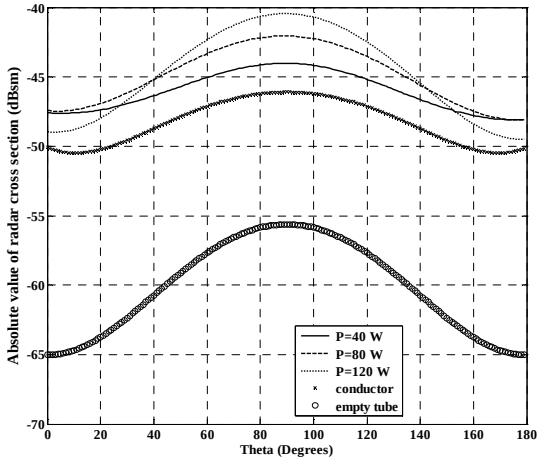
با افزایش چگالی پلاسما در محفظه، عمق پوستی آن کاهش می‌یابد و این کاهش تا زمانی ادامه دارد که ستون پلاسما همانند هادی فلزی رفتار کند. از آنجا که با اعمال پالسهای RF به ستون تخلیه می‌توان در مدت کوتاهی تولید پلاسما نمود و با قطع توان تحریک به سرعت به شرایط اول بازگشت، آنتن به سرعت خاموش و روشن می‌شود. هنگامی که آنتن خاموش است، ستون تخلیه هدایت الکتریکی ندارد. همچنین روی الگوی تشعشعی آنتن‌های مجاور اثری نخواهد داشت و تبدیل به یک محفظه دی‌الکتریک می‌شود که سطح مقطع راداری بسیار کمی دارد و چنانچه این محفظه درست طراحی شده باشد، از دید رادار محفوظ می‌ماند. آنتن تنها زمانی که لازم است ارتباط رادیویی صورت گیرد روشن می‌شود و از این رو به نام آنتن مخفی (stealth) معروف گردیده است. از عمده ترین کاربردهای چنین آنتنی استفاده از آنها در هواپیماهایی است که در مقابل دید رادار استتار شده‌اند و وجود آنتن فلزی می تواند استتار را از بین ببرد.

سطح مقطع راداری آنتن پلاسما در فرکانس ۳۰۰MHz و با تغییر میزان توان تحریک و فرکانس تحریک ثابت ۳۰۰MHz به روش FDTD مورد تحلیل قرار گرفت و در شکل ۱۵ در مقایسه با آنتن فلزی با ابعاد مشابه محفظه دی‌الکتریک و نیز محفظه بدون تحریک نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در زمانی که تحریک وجود ندارد، سطح مقطع راداری به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

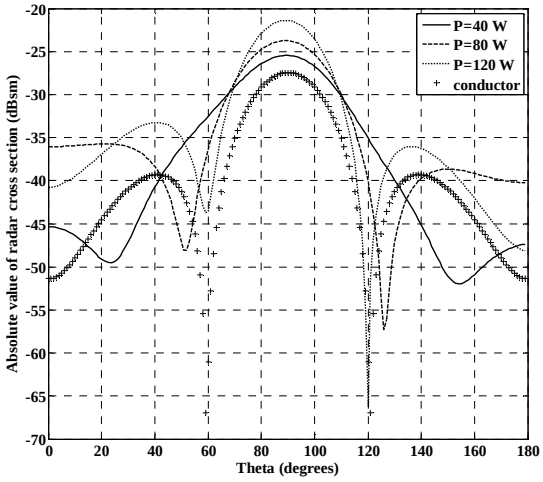
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013

شکل ۱۶ سطح مقطع راداری آنتنی با شرایط تحریک مشابه شکل قبل را در فرکانس MHz ۸۰۰ نشان می‌دهد.

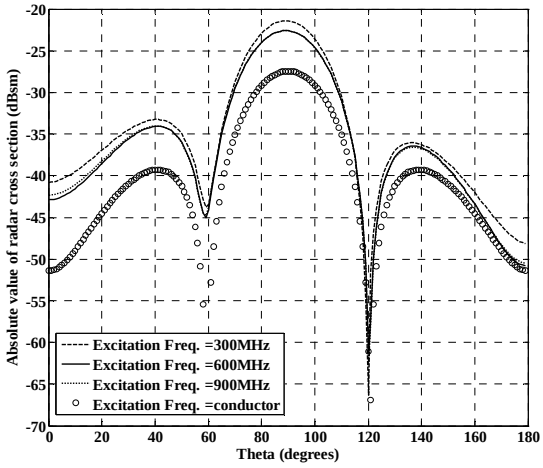


شکل (۱۵): سطح مقطع راداری آنتن پلاسما در فرکانس ۳۰۰MHz و فرکانس تحریک ۳۰۰MHz با تغییر میزان توان تحریک و مقایسه آن با آنتن فلزی و محفظه دی‌الکتریک فاقد پلاسما

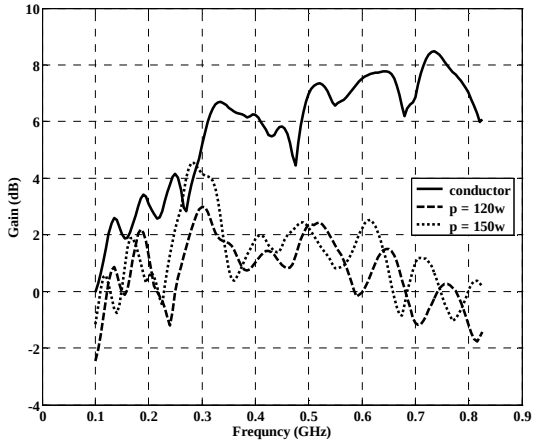


شکل(۱۶): سطح مقطع راداری آنتن پلاسما در فرکانس ۸۰۰MHz و فرکانس تحریک ۳۰۰MHz با تغییر میزان توان تحریک و مقایسه آن با آنتن فلزی

تغییر میزان فرکانس تحریک در توان ثابت نیز روی میزان سطح مقطع راداری تأثیر گذار است. نکته قابل ذکر آن است که کلیه تحلیل-های انجام گرفته در این بخش در فشار ثابت ۰/۴mb گاز آرگون یا به عبارت دیگر فرکانس برخورد MHz ۵۰۰ انجام گرفته است. در شرایط فیزیکی مذکور میزان بهره آنتن پلاسما در محدوده فرکانسی MHz ۱۰۰ تا ۸۰۰MHz شبیه‌سازی و با بهره آنتن فلزی مقایسه شده و نتیجه آن در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در فرکانسهای کمتر از فرکانس تحریک (۳۰۰MHz) میزان بهره تفاوت کمتری با آنتن فلزی دارد؛ حال آنکه افزایش فرکانس از فرکانس تحریک این مقدار را افزایش می دهد. با افزایش توان میزان بهره افزایش می‌یابد؛ لیکن پس از رسیدن به حد معینی دیگر افزایش نمی یابد. در شرایط فیزیکی که در بخشهای قبلی آنتن توصیف و شبیه سازی شد، حداکثر میزان بهره با افزایش توان تحریک از ۴/۵db کمتر است. آنچه برای کاربر اهمیت دارد، عملکرد آنتن مذکور در فرکانس مرکزی است که با عملکرد یک آنتن فلزی قابل قیاس بوده و نسبتاً قابل قبول است.



شکل(۱۷): سطح مقطع راداری آنتن پلاسما در فرکانس ۸۰۰MHz با تغییر مقدار فرکانس تحریک و توان تحریک ۱۲۰ وات و مقایسه آن با آنتن فلزی



شکل (۱۸): بهره آنتن پلاسما در فرکانس تحریک ۳۰۰MHz و توان تحریک ۱۲۰ وات و مقایسه آن با آنتن فلزی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آنتن پلاسمای ستونی با تحریک موج سطحی معرفی گردید. از آن‌جاکه الگوی تشعشعی و پارامترهای مربوط به پاشندگی در این آنتن عمدتاً به مشخصات فیزیکی گاز درون محفظه و نیز میزان توان و فرکانس تحریک پلاسما بستگی دارد، تأثیر برخی از این پارامترها را روی عملکرد آنتن بررسی نموده و خواص آنتن را مورد مطالعه قرار دادیم.

شبیه‌سازی آنتن تک قطبی پلاسما به‌وسیله سیمولاتور HFSS با

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

تحریک موج سطحی در چند فرکانس و در شرایط ثابت فیزیکی (توان و فرکانس برخورد ثابت) انجام گردید و الگوی تشعشعی به‌دست آمده با الگوی به‌دست آمده در سایر مقالات و نیز آنتن آلومینیومی با ابعاد مشابه مورد بررسی قرار گرفت و کلیه نتایج به‌دست آمده بیانگر صحت روش پیاده‌سازی شده در شبیه‌سازی می‌باشند.

در شبیه‌سازی آنتن تک قطبی پلاسما با روش FDTD، تغییر مشخصات تشعشعی آنتن و امپدانس ورودی با تغییر فرکانس تحریک و فرکانس برخورد الکترون مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش فرکانس تحریک همانند آنتن فلزی تعداد گلبرگ‌های فرعی افزایش یافته و نیز عمق نول‌ها بیشتر می‌شود. به‌علاوه کاهش فرکانس برخورد الکترونها باعث افزایش ضریب Q و نیز کاهش پهنای باند امپدانسی خواهد شد.

بررسی میزان سطح مقطع راداری آنتن‌های پلاسما به روش FDTD نشان می‌دهد که هنگامی که ستون پلاسما با فرکانسی کمتر از فرکانس پلاسما تحریک می‌شود میزان سطح مقطع راداری زیاد و با قطع توان تحریک به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این ویژگی آنتن‌های پلاسما بسیار مورد توجه قرار دارد. بهره آنتن پلاسما با افزایش توان تحریک زیاد می شود ولیکن افزایش تا حد معینی ادامه می یابد و پس از آن با افزایش توان تنها عملکرد آن در حوزه فرکانسی شیفت می یابد؛ زیرا طول و در نتیجه فرکانس مرکزی آنتن تغییر می کند.

مراجع

[1] Trivelpiece A.W. , Gould R.W. , "Space Charge Waves in clyndrical plasma columns," *J. Appl. Phys.* ***30****, 1784*, 1959.

[2] Moisan M, Shivarova A and Trivelpiece A W, "Experimental investigations of the propagation of surface waves along a plasma column," *Plasma Physics*, Vol. 24, No.11, pp. 1331-1400, 1982.

[3] J. P. Rayner, A. P. Whichello, A. D. Cheetham, "Physical Characteristics of Plasma Antennas," *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 32, No.1, pp. 269-281, Feb. 2004.

[4] Anderson, T. Alexeff, I. Farshi, E. Karnam, N. Pradeep, E.P. Pulsani, N.R. Peck, J. ," An operating intelligent plasma antenna, " *International conference on pulsed power plasma science*, June 2007.

[5] C. G. Borg, J. H. Harris, N. M. Martin, D. Thorncraft, R. Milliken, D. G. Miljak etc.," Plasmas as Antennas: Theory, Experiment and Applications, " *Phys. Plasmas*, Vol. 7, No.7, pp. 2198–2202, July 2000.

[6] Cerri, G. De Leo, R. Primiani and V.M. Russo, P., "Measurement of the Properties of a Plasma Column Used as a Radiating Element" *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 57, No. 2, pp. 242-247, Feb. 2008.

[7] D. Qian; D. Jun, G. Chen-Jiang, S. Lei, "On characteristics of a plasma column antenna," *International conference on microwave and millimeter wave technology*, vol.1, pp. 413-415, Sept. 2008.

[8] Sadeghi-kia F., Hodjat-Kashani F. and Rashed-Mohassel J., "Analysis of tapered column plasma using fullwave simulator," *Loughbrough Antenna and propagation conference*, pp. 301-304, Nov. 2009.

[9] F. Sadeghikia, F. Hodjat-Kashani, J. Rashed-Mohassel, and J. Ghayoomeh-Bozorgi, "Characterization of a surface wave driven plasma monopole antenna," J. of Electromagn. Waves and Appl., Vol. 26, 239–250, 2012.

[10] F. Sadeghikia, F. Hodjat-Kashani, J. Rashed-Mohassel, A. A. Lotfi ,and J. Ghayoomeh-Bozorgi, "A yagi-uda plasma monopole array," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 26, 885-894, 2012.

[۱۱] جلیل راشد محصل، رضا فرجی‌دانا، کریم محمدپور اقدم، "طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن مسطح سینوس با پلاریزاسیون دوگانه در محدوده فرکانس ۱۸-۲ GHz" مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران سال اول، شماره سوم زمستان ۱۳۸۳

[1] High Frequency Structure Simulator
[2] Finite Difference Time Domain
[3] Surface Wave Driven

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]