



## طراحی مفهومی، ساخت و بررسی آنتن پلاسمایی دو قطبی با قابلیت تغییر بسامدی در باند VHF

مهدی امیری و ناصر سپهری جوان

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

پست الکترونیکی: sepehri\_javan@uma.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰)

### چکیده

در این مقاله به شبیه‌سازی و ساخت آنتن پلاسمایی دو قطبی که بسامد آن در ناحیه VHF قابل تغییر است می‌پردازیم. محیط رسانای آنتن، پلاسمای ناشی از تخلیه الکتریکی مستقیم در یک لوله شیشه‌ای است. برای تحریک آنتن از یک جفت کننده استوانه‌ای از جنس آلومینوم واقع در مرکز لوله پلاسمای استفاده می‌شود. با تغییر میزان فشار گاز، امپدانس ورودی مدار و نیز اختلاف پتانسیل دو سر محیط پلاسمای، می‌توان ناحیه کاری آنتن را در محدوده بسامدی چند صد مگا هرتز تغییر داد. شبیه‌سازی و محاسبات عددی برای آنتنی به طول ۷۶ سانتی‌متر و شعاع ۲ سانتی‌متر که تحت تأثیر اختلاف پتانسیل ۱۵ کیلوولت در فشار ۰/۸ بار بود انجام گرفت. در فشار ثابت به وسیله مقاومت‌هایی که به صورت موازی با آنتن در مدار قرار می‌گیرند، امپدانس مدار تخلیه تغییر داده شده و به نوعی چگالی پلاسمای تنظیم می‌شود. برای بسامد پلاسمای  $\omega_p = 1 \times 10^4 \text{ Hz}$  و  $\omega_p = 9/5 \times 10^4 \text{ Hz}$  با استفاده از روابط نیمه تجربی، شبیه‌سازی نشان دهنده تشدید به ترتیب در دو ناحیه  $250 \text{ MHz}$  و  $311 \text{ MHz}$  است که اندازه‌گیری‌های تجربی با توافق خوب نشان دهنده تشدید در دو ناحیه  $217 \text{ MHz}$  و  $272 \text{ MHz}$  است. همچنین برای مقایسه، شبیه‌سازی برای یک آنتن فلزی با هندسه مشابه صورت گرفته است که ناحیه کاری آن در بسامد  $184 \text{ MHz}$  مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: آنتن پلاسمایی، پلاسمای، بسامد پلاسمایی، آنتن دو قطبی، شبیه‌سازی آنتن پلاسمایی، CST

### ۱. مقدمه

قرار می‌گیرند. آنتن‌های پلاسمایی نوع جدیدی از آنتن‌ها هستند که در دهه‌های اخیر پیشنهاد شده و هم‌اکنون در صنعت ارتباطات به خصوص در زمینه‌های نظامی به دلیل برخی مزایای آن از قبیل قابلیت پیکربندی دوباره<sup>۱</sup> و حفاظت آسان در برابر تهاجم دشمن مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱].

آنتن دستگاهی برای انتقال یا دریافت انرژی الکترومغناطیسی و ارتباط دهنده فضای آزاد و منبع امواج است. هر بخشی از یک رسانا که شامل الکترون‌های آزاد است، می‌تواند به عنوان یک آنتن استفاده شود. آنتن‌های فلزی به دلیل کم هزینه بودن و سادگی هم‌اکنون نیز در صنعت ارتباطات مدرن مورد استفاده

۱. Reconfigurability

اینجا ما به شبیه‌سازی و ساخت آنتن پلاسمایی با قابلیت تغییر بسامد کاری از طریق پارامترهای پلاسمای ایجاد شده در داخل یک لوله شیشه‌ای می‌پردازیم. با تغییر فشار گاز و نیز امپدانس مدار می‌توان ناحیه کاری آنتن را بدون تغییر در هندسه آن در محدوده چند صد مگا هرتزی تغییر داد. در بخش‌های بعدی، ابتدا به مطالعه نظری آنتن‌های پلاسمایی پرداخته و نتایج شبیه‌سازی آنتن پلاسمایی دو قطبی را مورد بررسی قرار داده و با آنتن‌های معمول مقایسه خواهیم کرد. سپس با ساخت آنتن پلاسمایی بررسی شده، نتایج تجربی و شبیه‌سازی را مقایسه می‌کنیم.

## ۲. تئوری آنتن پلاسمایی

برای محیط‌های مختلف پاسخگویی اجزاء محیط به میدان‌های الکترومغناطیسی یا پاشندگی متفاوت است. برای یک پلاسمای سرد برخوردی رابطه پاشندگی امواج الکترومغناطیسی به صورت زیر است [۲۷ و ۲۸]:

$$k^z e^z = \omega^z \left( 1 - \frac{\omega_p^z}{\omega(\omega - i\nu)} \right), \quad (1)$$

که در آن  $k$  عدد موج،  $c$  سرعت نور،  $\nu$  بسامد برخورد،  $\omega$  بسامد موج الکترومغناطیسی فرودی و  $\omega_p$  بسامد پلاسمای است و به صورت  $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e}$  تعریف می‌شود که  $n_e$  چگالی الکترون،  $e$  بار الکترون،  $m_e$  جرم الکترون و  $\epsilon_0$  گذردهی خلأ است. وجود برخورد در پلاسمای سبب اتلاف انرژی و میرا شدن موج الکترومغناطیسی می‌شود ولی حتی با صرف نظر کردن از بسامد برخورد در رابطه (۱)، اگر  $\omega > \omega_p$  باشد، در این صورت  $k$  یک عدد موهومی خالص خواهد بود و انتشار امواج الکترومغناطیسی در داخل پلاسمای میسر نخواهد بود و به عبارتی پلاسمای مانند یک رسانا عمل خواهد کرد. اما اگر  $\omega < \omega_p$  باشد،  $k$  عدد حقیقی بوده و موج الکترومغناطیسی در پلاسمای امکان انتشار خواهد داشت و پلاسمای مانند یک دی‌الکتریک عمل می‌کند. ضریب دی‌الکتریک در پلاسمای به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷ و ۲۸]:

در پلاسمای که یک گاز یونیزه است، الکترون‌های نسبتاً آزاد همان نقش الکترون‌ها در فلزات را ایفا می‌کنند، بنابراین جایگزینی پلاسمای و فلز در آنتن منجر به نتایج مشابه خواهد شد [۱]. آنتن پلاسمایی نوعی از آنتن است که در آن اجزاء فلزی با پلاسمای جایگزین شده است [۲]. اولین پیشنهاد نظری از کاربرد آنتن پلاسمای در ارتباطات توسط هتینگر در سال ۱۹۱۹ ارائه شد [۳]. پس از کشف انتشار موج سطحی بین ستون پلاسمای و محفظه دی‌الکتریک اطراف آن در سال ۱۹۵۹ [۴]، کاربرد آزمایشگاهی آنتن‌های پلاسمایی و بهبود آنها توسط چندین گروه در ایالات متحده و استرالیا آغاز شد و بعداً به سایر نقاط جهان گسترش یافت. آزمایشگاه تحقیقات دریایی در ایالات متحده، تحت نظارت مانهیم و همکارانش، آنتن پلاسمای انعکاسی را با عنوان آینه چابک توسعه داد [۵ و ۶]. به دنبال تحقیقات موسین و همکاران [۷] که منجر به ایجاد پلاسمای تحریک سطحی گاز با امواج RF با استفاده از تنها یک الکتروود شد، بورگ و همکاران از چنین سازوکاری جهت ساخت آنتن پلاسمایی تک الکتروودی استفاده کردند [۸ و ۹]. با انجام برخی از محاسبات تئوری، تولید آنتن و موجبرهای پلاسمایی توسط اندرسون و الکسیف در ایالات متحده انجام شد [۱۰ و ۱۱]. در مجموعه‌ای از کارهای عملی که بعداً توسط آنها انجام گرفت با کاهش توان یونیزاسیون گاز (یونش بیشتر با ولتاژ پایین‌تر) آنتن‌های پلاسمایی بهینه با چگالی الکترونی بالا طراحی شدند [۱۲-۱۴]. همچنین معرفی آنتن پلاسمای تودرتو [۱۵]، کار بر روی کاهش تداخل‌های مزاحم [۱۶] و نیز کاهش نوفه حرارتی [۱۷ و ۱۸] و توسعه آنتن پلاسمایی هوشمند [۱۹ و ۲۰] از دیگر تحقیقات این دو نفر بود. اگرچه در سال ۱۹۹۷ اولین آنتن پلاسمای RF به طور آزمایشی معرفی و ثبت شد [۲۱] اما در دهه گذشته، بسیاری از مطالعات انجام شده برای بهبود این آنتن‌ها همچنان متمرکز بوده است [۲۲-۲۵]. در یک کار تحقیقاتی که در ایران انجام گرفته [۲۶] از لوله یک لامپ مهتابی معمولی به عنوان محیط پلاسمای استفاده قرار گرفته و با تعبیه یک جفت کننده استوانه‌ای در مرکز آن، یک آنتن پلاسمایی دو قطبی در ناحیه VHF مورد استفاده قرار گرفت. در

تولیدی در داخل کاواک جفت کننده قابل تحریک است منشأ تابش الکترومغناطیسی آنتن است. البته در حالت گیرندگی آنتن، امواج رسیده به پلاسما سبب تحریک جریان‌های سطحی و ایجاد امواج نوسانی داخل جفت کننده می‌شود. اگر  $E$  بردار میدان الکتریکی محرک داخل جفت کننده باشد، از رابطه زیر چگالی جریان قابل محاسبه است [۱]:

$$\frac{\partial J}{\partial t} + vJ = \frac{\omega_p^2}{4\pi} \left( E(r,t) - \nabla\phi(r,t) - \frac{1}{c} \frac{\partial A(r,t)}{\partial t} \right), \quad (6)$$

در رابطه (۶) که بنیادی‌ترین رابطه در حوزه آنتن پلاسمایی است،  $\phi$  پتانسیل نرده‌ای و  $A$  پتانسیل برداری امواج سطحی روی آنتن پلاسمایی،  $J$  چگالی جریان الکترونی و  $v$  بسامد برخورد الکترون با یون است. با توجه به این رابطه در حالت فرستندگی (در صورت اعمال موج الکترومغناطیسی معلوم  $E$ ) چگالی جریان القایی قابل محاسبه بوده و از روی آن میدان‌های تابشی قابل حصول است. در صورت گیرنده بودن آنتن نیز میدان‌های تابشی رسیده سبب تحریک امواج سطحی و بروز جریان سطحی در پلاسما و سبب تولید میدان‌های الکترومغناطیسی در داخل کاواک جفت کننده می‌شود. به عبارتی، انتقال و دریافت در آنتن پلاسمایی به وسیله جفت کننده استوانه‌ای انجام می‌شود. جفت کننده، محفظه فلزی است که لوله پلاسما را احاطه می‌کند. سیگنال به جفت کننده با یک درگاه اعمال می‌شود و حذف عامل تداخل الکترومغناطیسی نیز با یک جعبه فلزی زمین شده استوانه‌ای یا مکعبی می‌تواند صورت پذیرد.

با اعمال سیگنال الکتریکی به جفت کننده، چگالی الکترونی یکنواخت سطح پلاسما دچار نوسان شده و این نوسانات چگالی در سطح پلاسما منتشر می‌شود. در سطح پلاسما با صرف نظر کردن از حرکت یون‌های سنگین، برای حرکت الکترون در یک بعد، در حضور میدان الکتریکی تحریکی جفت کننده به صورت  $Ee^{i\omega t}$  داریم:

$$m \left( \frac{dV}{dt} + vV \right) = -e \left( Ee^{i\omega t} - \nabla\phi \right), \quad (7)$$

لازم به ذکر است که فرض شده است که اعمال میدان الکتریکی تحریکی تنها سبب تحریک یک مد سطحی بار-فضا با پتانسیل

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu)}, \quad (2)$$

تغییر بسامد پلاسما مثل تغییر طول یا نوع رسانا در آنتن‌های معمولی بوده و می‌تواند در بسامد تشدید اثر گذار باشد. قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک عامل اتلاف و قسمت حقیقی مربوط به عبور یا بازتاب است. تغییر در بسامد برخورد که با تغییر فشار گاز امکان‌پذیر است در اتلاف تأثیرگذار است. مشاهده می‌شود که تغییر پارامترهای پلاسما باعث تغییر در پارامترهای آنتن بدون تغییر هندسه آن می‌شود که به آن قابلیت پیکربندی دوباره در آنتن پلاسمایی گویند [۱].

پارامترهای پلاسما به روش تولید پلاسما بستگی دارد که در اینجا، تخلیه تابناک DC بوده و برای برآورد چگالی الکترونی پلاسما که جهت محاسبه بسامد پلاسما لازم است، می‌توان از رابطه نیمه تجربی زیر استفاده کرد [۲۹]:

$$n_e = \frac{I\Delta\phi}{ea\mu_e E(\gamma K_B T_e + \varepsilon_* + \varepsilon_i)}, \quad (3)$$

که در آن  $K_B$ ،  $\Delta\phi$  و  $I$  به ترتیب ثابت بولتزمن، ولتاژ و جریان اعمالی به گاز،  $a$  سطح مقطع لوله،  $E = \Delta\phi/d$  میدان الکتریکی ( $d$  فاصله کاتد و آند است)،  $\mu_e$  تحرک پذیری الکترون،  $\varepsilon_*$  انرژی لازم برای تولید هر جفت الکترون-یون که بسته به نوع گاز بین ۴۰ الی ۹۰ الکترون‌ولت است و  $\varepsilon_i$  متوسط انرژی اتلافی توسط یون در هر یونش برخوردی است. همچنین برای محاسبه  $T_e$  که دمای الکترون است می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۳۰]:

$$\left( \frac{e\Delta\phi}{K_B T_e} \right) \exp\left( -\frac{e\Delta\phi}{K_B T_e} \right) = 1/0.3 \times 10^{-6} ([\alpha\Delta\phi^2 b^+ p]^2 pR)^{-1/2}, \quad (4)$$

که در آن  $p$  فشار محفظه برحسب بار،  $R$  شعاع لوله تخلیه،  $\alpha$  یک ثابت و  $b^+$  تحرک پذیری یون مثبت است. در ضمن بسامد برخورد نیز از رابطه زیر قابل حصول است [۲۹]:

$$\nu = Kp \times 10^9 \text{ Hz}, \quad (5)$$

که در آن  $K$  ضریب ثابتی وابسته به نوع گاز است. بعد از محاسبه پارامترهای مربوط به پلاسما، لازم است که رفتار زمانی چگالی جریان الکترونی در ستون پلاسما محاسبه شود. مانند آنتن‌های معمولی این جریان متناوب که از طریق میدان‌های

$$\tilde{n} = \frac{ien_0}{\omega(\nu - i\omega)} \left( \frac{\partial E}{\partial z} e^{i\omega t} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right), \quad (13)$$

همچنین با استفاده از قانون گاوس در یک بعد می توان نوشت:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 4\pi en_0, \quad (14)$$

با این فرض که لوله پلاسما به صورت آنتن تغذیه مرکزی است (این فرض با قراردادن جفت کننده در وسط لوله تخلیه محتمل می شود)، ممان دو قطبی دستگاه با استفاده از رابطه

$$\Pi = \int \mathbf{r} \tilde{n}(\mathbf{r}) d^3 r$$

به صورت زیر برای آنتن تغذیه مرکزی با جریان سطحی مثلی پیشنهاد می شود [۳۱]:

$$\Pi = a \frac{e^2 n_0 E_0 d}{2m[\omega(\omega + i\nu) - \omega_p^2]}, \quad (15)$$

که در آن  $a$  سطح مقطع آنتن و  $d$  طول آنتن است. حال توان تابشی کل در آنتن های دو قطبی از رابطه زیر به دست می آید [۳۲]:

$$P_{rad} = \frac{\pi k^2 \omega^2}{3c} |\Pi|^2, \quad (16)$$

با جایگذاری رابطه ۱۵ در رابطه ۱۶، توان تابشی کل آنتن پلاسمایی دو قطبی با جریان سطحی مثلی (در مرکز آنتن جریان سطحی بیشترین مقدار و به صورت متقارن در دو انتها به کمترین مقدار می رسد) به صورت زیر خواهد بود:

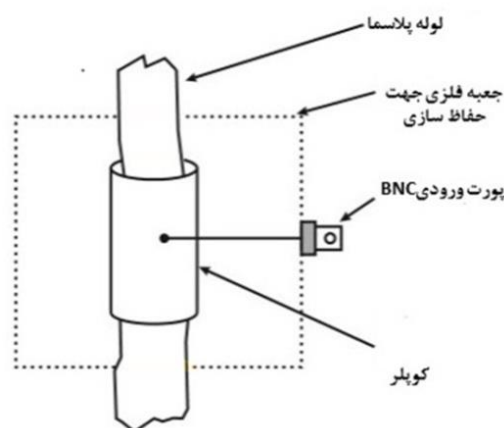
$$P_{rad} = \left( \frac{a^2}{144\pi^2 c} \right) (kd)^2 \omega_p^2 \frac{(\omega E)^2}{[(\omega^2 - \omega_p^2)^2 + \nu^2 \omega^2]}, \quad (17)$$

که در آن  $k$  عدد موج کاری آنتن است. محاسبات لازم جهت حصول توان تابشی کل برای آنتن دو قطبی فلزی تغذیه مرکزی با جریان مثلی در منابع مختلف درسی آورده شده است و از رابطه زیر قابل حصول است [۳۲]:

$$P_{rad} = \left( \frac{I_0^2}{144\pi^2 c} \right) (kd)^2, \quad (18)$$

با فرض  $I_0 = Ea\sigma$  و با تعریف رسانندگی در مدل درود<sup>۱</sup> به صورت  $\sigma = \frac{\omega_p^2}{\nu - i\omega}$  برای آنتن فلزی می توان نوشت [۳۳]:

$$P_{rad} = \left( \frac{a^2}{144\pi^2 c} \right) (kd)^2 \omega_p^2 \frac{E^2}{|\nu - i\omega|^2}, \quad (19)$$



شکل ۱. سازوکار تحریک آنتن پلاسمایی [۵].

نرده ای  $\phi$  می شود که چگالی الکترونی مختل شده آن به صورت  $n = n_0 + \tilde{n}$  است، که  $\tilde{n}$  چگالی اختلالی است. با جایگذاری چگالی فوق در معادله پیوستگی  $\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla(nV) = 0$

و همچنین با فرض حرکت یک بعدی ذرات، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial(n_0 + \tilde{n})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} [(n_0 + \tilde{n})V] = 0, \quad (8)$$

که با فرض همگن بودن چگالی زمینه ( $\frac{\partial n_0}{\partial z} = 0$ ) می توان نوشت:

$$\frac{\partial \tilde{n}}{\partial t} + n_0 \frac{\partial V}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

با مشتق گیری نسبت به مختصه مکانی  $z$  معادله (۷) به صورت زیر خواهد بود:

$$m \left( \frac{\partial^2 V}{\partial z \partial t} + \nu \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -e \left( \frac{\partial E}{\partial z} e^{i\omega t} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right), \quad (10)$$

همچنین با مشتق گیری زمانی از رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z \partial t} = -\frac{1}{n_0} \frac{\partial^2 \tilde{n}}{\partial t^2}, \quad (11)$$

با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۱۰) داریم:

$$\frac{\partial^2 \tilde{n}}{\partial t^2} + \nu \frac{\partial \tilde{n}}{\partial t} = \frac{en_0}{m} \left( \frac{\partial E}{\partial z} e^{i\omega t} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right), \quad (12)$$

با فرض نوسانات تناوبی چگالی الکترون به شکل  $\tilde{n} = ne^{i\omega t}$

می توان نوشت  $\frac{\partial \tilde{n}}{\partial t} = i\omega \tilde{n}$  و  $\frac{\partial^2 \tilde{n}}{\partial t^2} = -\omega^2 \tilde{n}$  که استفاده از این

روابط در رابطه (۱۲) منجر به رابطه زیر خواهد شد:

استفاده از توان تشعشعی آنتن می‌توان تمام پارامترهای آنتن (بهره<sup>۱</sup>، جهت‌داری<sup>۲</sup>، بازده آنتن<sup>۳</sup> و ...) را به دست آورد [۳۲]. در نتیجه تفاوت در توان تابشی دو آنتن باعث تفاوت تمام پارامترهای آنتن پلاسمایی با آنتن فلزی خواهد شد.

حال به بررسی پارامتر مهم دیگر که امپدانس ورودی آنتن است، می‌پردازیم. با حل پتانسیل برداری در مختصات استوانه‌ای، مؤلفه<sup>۴</sup>  $z$  پتانسیل برداری در قانون هلمهولتز در داخل پلازما صدق می‌کند که برای میدان مغناطیسی  $H_z$  و الکتریکی  $E_z$  ناشی از آن، با فرض این که پتانسیل برداری فقط در راستای  $z$  است و همچنین در نظر گرفتن وابستگی زمانی به صورت  $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$ ، می‌توان نوشت:

$$H_z = -\frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (۲۰. الف)$$

$$E_z = -\frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (۲۰. ب)$$

از این رو می‌توان با در دست داشتن ولتاژ  $\Delta\phi = E_z l$  که  $l$  طول آنتن است) و جریان  $(I = \pi a^2 H)$  برای آنتن دو قطبی با سطح مقطع دایره‌ای، امپدانس آنتن را به صورت زیر تعریف کرد:

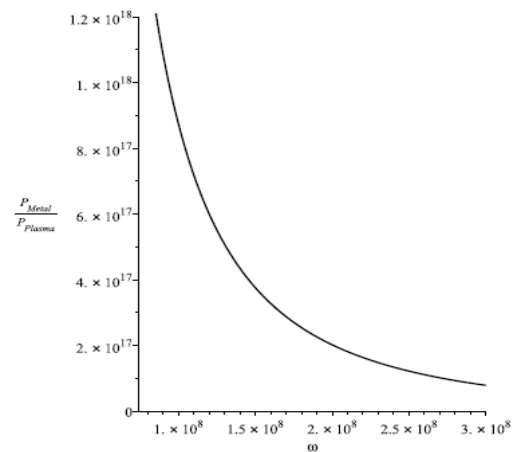
$$Z = \frac{\Delta\phi}{I} = \frac{i\omega A_z}{\pi a^2 \frac{\partial A_z}{\partial r}} \quad (۲۱)$$

از طرفی می‌دانیم جواب‌های پیشنهادی برای پتانسیل برداری از آنجایی که در معادله هلمهولتز در مختصات استوانه‌ای صدق می‌کنند به صورت  $A_{zv} = j_v(kr)$  است که  $j_v(kr)$  تابع بسل کروی است و  $k$  نیز عدد موج در داخل پلازما است که به

صورت  $k = -ik_0 \sqrt{\left(\frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu)} - 1\right)}$  تعریف می‌شود. با

جایگذاری در رابطه (۲۱) و با کمک روابط حاکم بر جواب‌های معادله بسل، برای امپدانس آنتن پلاسمایی دو قطبی خطی می‌توان نوشت:

$$Z = \frac{i\omega I_0(k, \gamma r)}{\pi a^2 k_0 \gamma I_1(k, \gamma r)} \quad (۲۲)$$



شکل ۲. نسبت توان تابشی در آنتن دو قطبی پلاسمایی با بسامد پلاسمایی  $\omega_p = 1 \times 10^8 \text{ Hz}$  و بسامد برخورد  $\nu = 5 \times 10^4 \text{ Hz}$  به توان تابشی آنتن دو قطبی فلزی از جنس آلومینیوم.

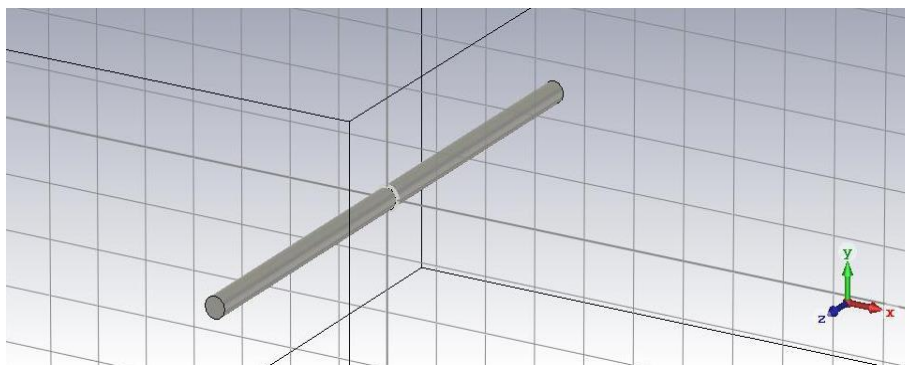
با مقایسه روابط (۱۷) و (۱۹) مشاهده می‌شود که توان تابشی در آنتن پلاسمایی به بسامد برخورد و بسامد پلازما با آنتن فلزی تفاوت اساسی دارد. در شکل ۲، به ازای پارامترهای فیزیکی معمول در تخلیه الکتریکی مستقیم برای آنتن پلاسمایی با بسامد پلاسمایی  $\omega_p |_{\text{plasma}} = 1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$  و بسامد برخورد  $\nu_{\text{plasma}} = 5 \times 10^4$  آن با  $\omega_p |_{\text{metal}} = 3/7 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ،  $\nu_{\text{metal}} = 1/44 \times 10^8$ ، تغییرات نسبت توان تابشی فلز به توان تابشی پلازما یعنی عبارت  $\frac{\omega_p |_{\text{metal}} [(1 - \omega_p |_{\text{plasma}} / \omega)^2 + \nu_{\text{plasma}}^2]}{\omega_p |_{\text{plasma}} |\nu_{\text{metal}} - i\omega|^2}$  برحسب بسامد کاری در ناحیه VHF آورده شده است.

مشاهده می‌شود که در ابعاد یکسان برای آنتن فلزی و پلاسمایی، توان تابشی کل برای آنتن پلاسمایی همواره خیلی کمتر از آنتن فلزی است و این به سبب چگالی کم الکترون‌ها در پلازما نسبت به فلز است. البته با انتخاب بسامدهای پلاسمایی بالاتر، توان تابشی آنتن پلازما نیز قابل ارتقا است. در اینجا ما داده‌های مربوط به پلاسمای کم یونیده و کم چگال مربوط به آزمایش خودمان را گذاشته‌ایم، هر چند در کارهای مرسوم مربوط به تخلیه‌های الکتریکی ولتاژ مستقیم، چگالی پلاسمای تولیدی در همین گستره است. همچنین بدیهی است با

۱. Gain

۲. Directivity

۳. Efficiency



شکل ۳. نمایی از آنتن دو قطبی فلزی در نرم افزار CST Microwave Studio Suite 2018.

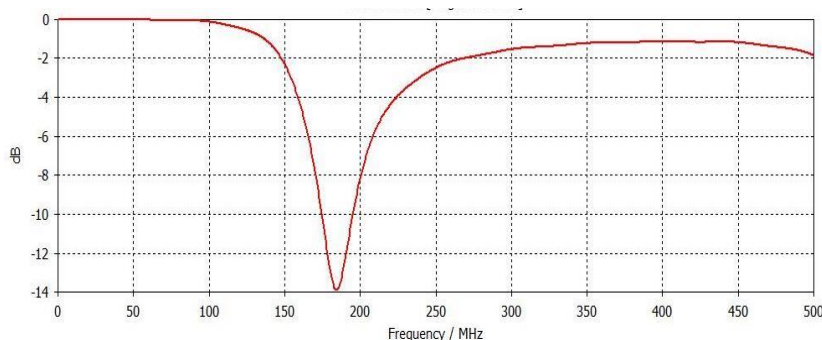
کلی آنتن دو قطبی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین مشخصات آنتن شبیه سازی شده عبارت است از: شعاع میله ها ۲ سانتی متر، طول کل آنتن ۷۶ سانتی متر، امپدانس ورودی ۵۰ اهم و نوع ماده آنتن، رسانای الکترونی کامل یا فلز ایده آل است. الگوی تابش آنتن دو قطبی فلزی در شکل ۴. الف نشان داده شده است. همان طور که انتظار داشتیم آنتن دارای الگوی تابشی نسبتاً همگنی داشته و به عبارتی تابش به صورت یکسان در تمام جهات پخش می شود. البته در زوایای صفر و ۱۸۰ درجه که امتداد میله آنتن را نشان می دهد توان تابشی صفر است. نتایج حاصل از پارامتر پراکندگی  $S_{11}$  نیز در شکل ۴. ب نشان داده شده است. این پارامتر میزان انعکاس از درگاه ورودی را نشان می دهد و متناسب با لگاریتم نسبت توان انعکاسی به توان ورودی است. از این رو هرچه مقدار این پارامتر کمتر باشد نشان دهنده جذب انرژی ورودی بیشتر توسط آنتن در همان محدوده بسامدی بوده و در نتیجه آنتن بیشترین انرژی تابشی و یا انرژی جذبی از اتمسفر را در بسامد مذکور خواهد داشت. به طور معمول میزان استاندارد این پارامتر  $-10\text{ dB}$  است. با توجه به شکل ۴. ب مشاهده می شود که تشدید (کمترین مقدار پارامتر  $S_{11}$ ) در در بسامد  $184\text{ MHz}$  در محدوده  $VHF$  اتفاق می افتد و مقدار آن  $-14\text{ dB}$  است.

حال به شبیه سازی آنتن دو قطبی پلاسمایی با ابعادی یکسان با آنتن فلزی بررسی شده مطابق شکل ۵ می پردازیم. با استفاده از رابطه ۲۲ امپدانس ورودی برای آنتن پلاسمایی در حدود

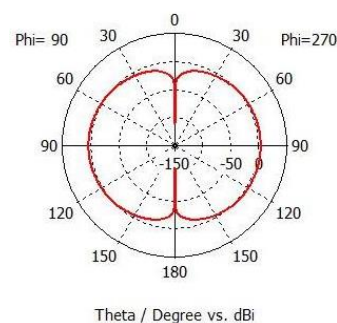
که در آن  $\gamma = \sqrt{\left(\frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu)} - 1\right)}$  است. ملاحظه می شود امپدانس آنتن پلاسمایی وابسته به پارامترهای پلازما و بسامد کاری است که در فلزات به این صورت نیست. محاسبات عددی نشان می دهد که برای آنتن پلاسمایی، امپدانس ورودی به مراتب بیشتر از نوع فلزی است.

### ۳. شبیه سازی

در این قسمت به شبیه سازی آنتن دو قطبی فلزی و پلاسمایی خواهیم پرداخت. شبیه سازی توسط CST Microwave Studio Suite انجام خواهد گرفت. این نرم افزار، نرم افزاری کاربردی و مناسب برای شبیه سازی در حوزه آنتن ها و امواج الکترومغناطیسی است که در حل مسائل از روش المان محدود بهره می برد. برای مدل سازی محیط پلازما و حصول رابطه پاشندگی نیز از مدل درود مطابق رابطه (۱) کمک می گیریم که در آن لازم است برای توصیف محیط بسامد پلاسمایی ( $\omega_p$ ) و بسامد برخورد ( $\nu$ ) مشخص شود. بررسی های عملی و نظری را محدود به آنتن دو قطبی خطی می کنیم که ساده ترین و محبوب ترین نوع آنتن است و هم اکنون نیز کاربردهای بسیاری در فناوری ارتباطات دارد. سادگی و نیز کاربرد فراوان این آنتن موجب این شده است که به اولین گام برای آموزش و بررسی آنتن ها در صنعت مخابرات بدل شود. در این بخش ابتدا به شبیه سازی آنتن دو قطبی فلزی و سپس مدل مشابه پلاسمایی خواهیم پرداخت. مشخصات و طرحواره

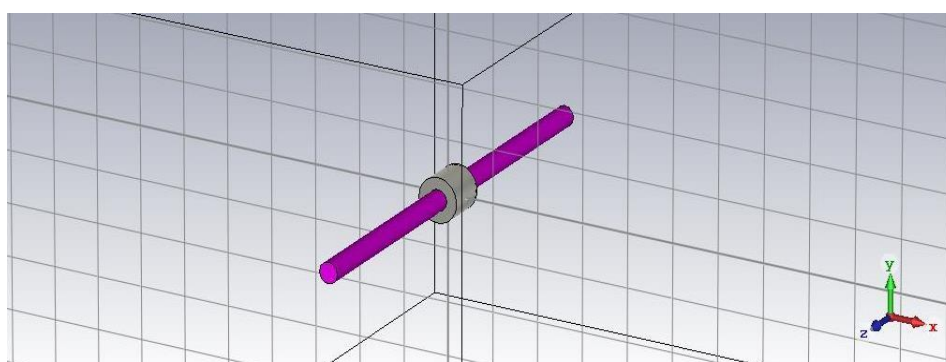


(ب)



(الف)

شکل ۴. (الف) الگوی تابش و (ب) پارامتر پراکندگی برای آنتن دو قطبی فلزی.



شکل ۵. نمایی از آنتن دو قطبی فلزی در نرم‌افزار CST Microwave Studio Suite 2018.

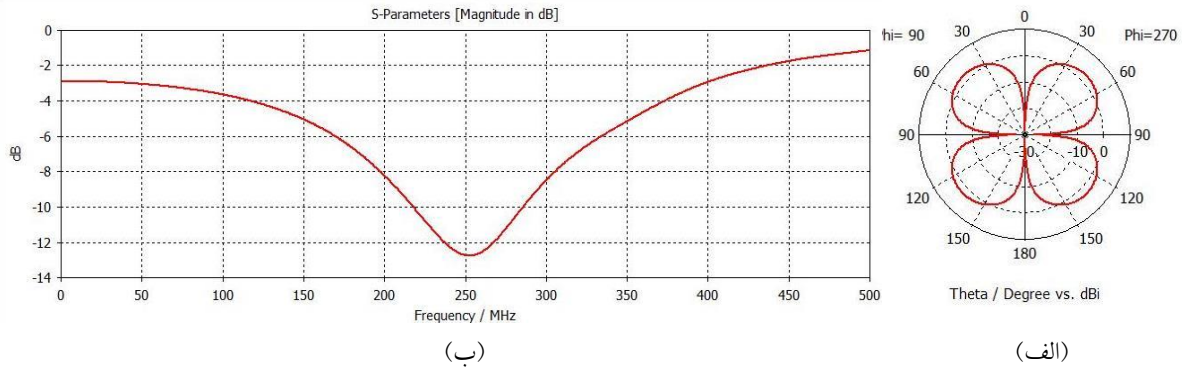
به عبارتی الگوی تابش آنتن پلاسمایی آورده شده است. در مقایسه با حالت مشابه آنتن فلزی، توزیع ناهمگن تر است. این ناهمگنی خصوصاً در اطراف زوایای صفر  $0^\circ$ ،  $90^\circ$  و  $270^\circ$  قابل مشاهده است. در شکل ۶. ب پارامتر پراکندگی  $S_{11}$  برای آنتن دو قطبی پلاسمایی آورده شده است. مشاهده می‌شود که تشدید در ناحیه  $250 \text{ MHz}$  در محدوده  $VHF$  اتفاق می‌افتد که مقدار پارامتر پراکندگی در این بسامد تشدید  $12/74 \text{ dB}$  است و نشانگر آن است که توان تابشی کمتر از آنتن فلزی مشابه است. این انتظاری است که می‌توانستیم از مقایسه روابط (۱۷) و (۱۹) داشته باشیم.

در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی با افزایش بسامد پلاسمایی به مقدار  $\omega_p = 9/5 \times 10^4 \text{ Hz}$  و ثابت نگه داشتن بسامد برخورد در  $\omega = 5 \times 10^4 \text{ Hz}$  آورده شده است. همان طور که در بخش عملی خواهیم دید، این کار با تغییر مقاومت دستگاه پلاسمایی از طریق استفاده از مقاومت موازی در فشار و ولتاژ ثابت

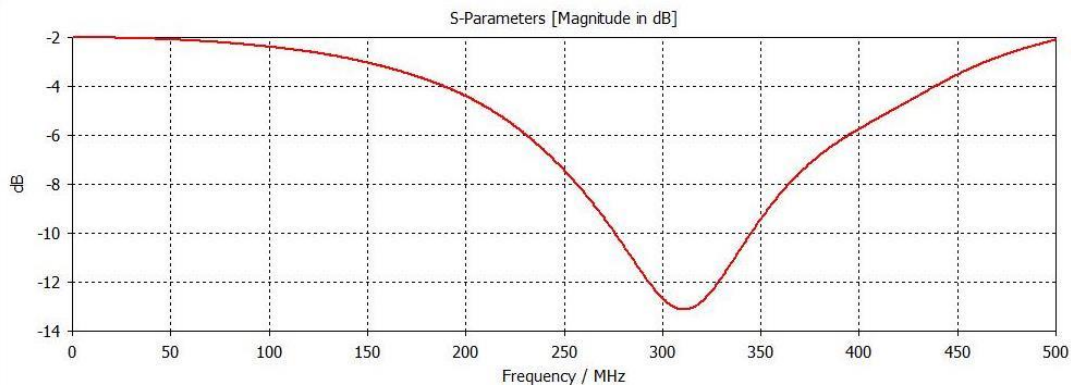
$280 \text{ Ohm}$  در نظر گرفته می‌شود. البته لازم به ذکر است که تغییر بسامد کاری می‌تواند منجر به تغییر در امپدانس ورودی شود که در ناحیه  $VHF$  این تغییرات قابل اغماض است. مشخصات جفت کننده طراحی شده برای این آنتن: شعاع داخلی جفت کننده داخلی ۲ سانتی‌متر، شعاع خارجی جفت کننده داخلی  $2/1$  سانتی‌متر، ارتفاع جفت کننده داخلی  $0/2$  سانتی‌متر، شعاع داخلی جفت کننده خارجی  $4/3$  سانتی‌متر، شعاع خارجی جفت کننده خارجی  $4/8$  سانتی‌متر و ارتفاع جفت کننده خارجی ۶ سانتی‌متر است.

برای آنتن مذکور با استفاده از رابطه نیمه تجربی (۳)، مقدار چگالی الکترونی پلاسمایی محاسبه شده که متناظر با بسامد پلاسمایی  $\omega_p = 1 \times 10^4 \text{ Hz}$  است. همچنین در فشار کاری  $0/8$  بار، بسامد برخورد  $\omega = 5 \times 10^4 \text{ Hz}$  از رابطه (۵) به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۶ آورده شده است.

در شکل ۶. الف، توزیع فضایی تابش الکترومغناطیسی و یا



شکل ۶. (الف) الگوی تابش و (ب) پارامتر پراکندگی برای آنتن دو قطبی پلاسمایی با بسامد پلاسمایی  $\omega_p = 1 \times 10^4 \text{ Hz}$  و بسامد برخورد  $\nu = 5 \times 10^4 \text{ Hz}$ .



شکل ۷. پارامتر پراکندگی برای آنتن دو قطبی پلاسمایی با بسامد پلاسمایی  $\omega_p = 9 / 5 \times 10^4 \text{ Hz}$  و بسامد برخورد  $\nu = 5 \times 10^4 \text{ Hz}$ .

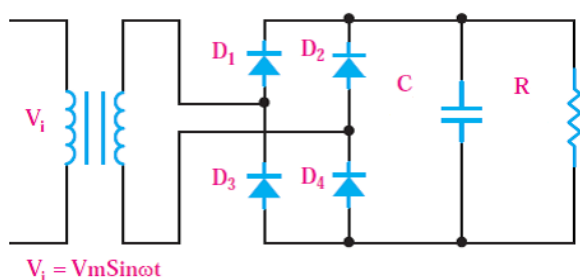
الکتریکی آن در شکل ۸. ب نشان داده شده است. گام بعدی ساخت لوله تخلیه است؛ به این منظور از لوله کوارتز استفاده می‌کنیم. دلیل برتری استفاده از لوله کوارتز نسبت به لوله پیرکس این است که جنس پیرکس برای بسامد-های کاری مورد نظر کدر بوده و از تشعشع امواج جلوگیری می‌کند. اتصالات لوله کوارتز با الکترودها را با استفاده از روغن سیلیکون به منظور عایق‌سازی در دستگاه خلأ آندود می‌کنیم. به منظور ایجاد خلأ در لوله تخلیه از پمپ تخلیه روتوری استفاده می‌شود که در تخلیه با استفاده از این پمپ فشار گاز به  $0.8$  بار رسید. لازم به ذکر است که گاز زمینه همان هوا است. شکل ۹ نمونه ساخته شده از لوله تخلیه و جفت کننده را نشان می‌دهد. بر طبق شبیه‌سازی، یک جفت کننده استوانه‌ای به ارتفاع جفت کننده ۶ سانتی‌متر با شعاع  $4/8$  سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر از جنس آلومینیوم ساخته شد. برای تغذیه آنتن از یک

انجام خواهد گرفت. در شکل ۷ پارامتر پراکندگی در این حالت آورده شده است که نشان دهنده تشدید در  $311 \text{ MHz}$  بوده و مقدار پارامتر  $S_{11}$  در این بسامد  $-13/11 \text{ dB}$  نشان می‌دهد که عملکرد آنتن نسبت به حالت قبل بهبود یافته است.

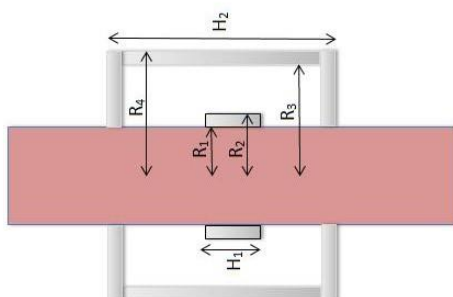
#### ۴. ساخت آنتن پلاسمایی دو قطبی

در این بخش ساخت و بررسی نتایج تجربی مطالعه خواهد شد. آنتن پلاسمایی از قسمت‌ها و تجهیزات مختلفی نظیر لوله تخلیه، منبع ولتاژ بالا جهت ایجاد تخلیه، جفت کننده و پمپ تخلیه تشکیل شده است. در این پژوهش به منظور ایجاد پلاسمای از روش تخلیه تابناک DC استفاده شده است، به همین منظور نیاز به یک منبع تغذیه DC با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت حس شد و از یک سوساز پل به همراه صافی خازنی مناسب برای ساخت این منبع استفاده شد. منبع تغذیه مذکور در شکل ۸. الف و مدار





شکل ۸. (الف) منبع ولتاژ بالا ساخته شده توسط پژوهشگر و (ب) مدار صافی خازنی و یکسوساز پل دیودی در منبع ولتاژ بالا.

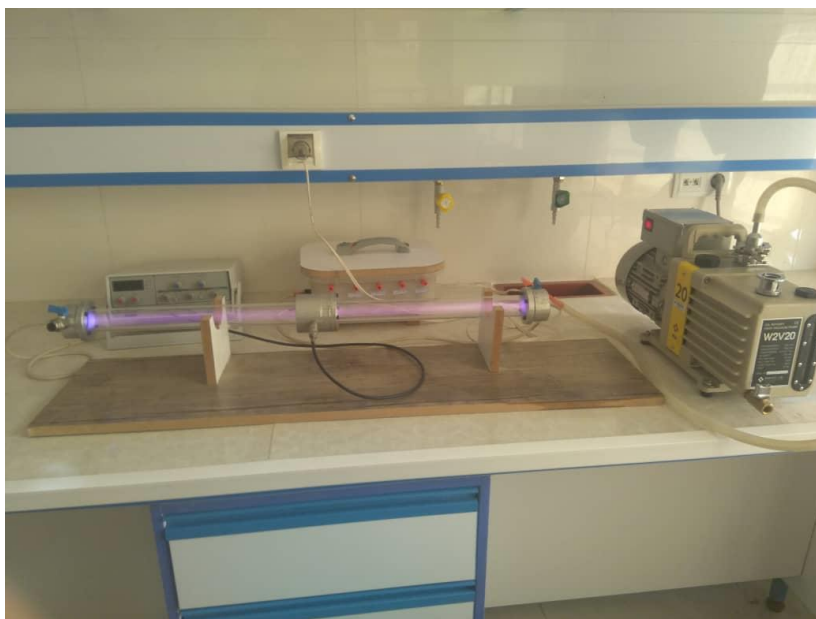


شکل ۹. لوله تخلیه ساخته شده برای آنتن دو قطبی خطی به همراه جفت کننده (بالا)، همچنین قطعات باز شده جفت کننده (وسط) و نیز طرحواره جفت کننده (پایین) که در آن  $R_1$  شعاع داخلی جفت کننده داخلی،  $R_2$  شعاع خارجی جفت کننده داخلی،  $H_1$  ارتفاع دیواره داخلی،  $R_3$  شعاع داخلی جفت کننده خارجی،  $R_4$  شعاع خارجی جفت کننده خارجی و  $H_2$  ارتفاع جفت کننده خارجی است.

قرن نوزدهم میلادی ابداع شده است، یک رابط بسامدی رادیویی کابل هم محور است و در صنعت مخابرات استفاده از

درگاه<sup>۱</sup> SMA لحیم شده بین استوانه بیرونی و داخلی استفاده کردیم. لازم به ذکر است که درگاه SMA که در دهه شصت

۱. SubMiniature version A



شکل ۱۰. نمای کلی از دستگاه آنتن پلاسمایی.

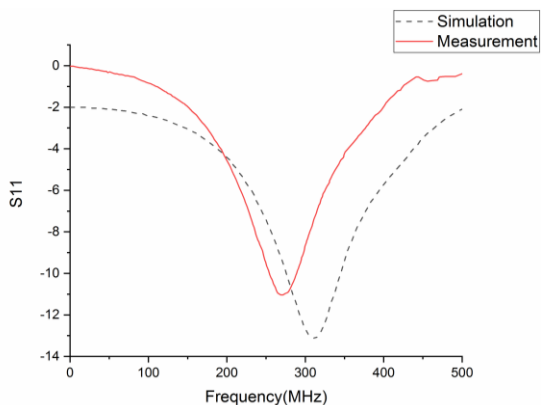
۱۰/۷۶- به ۱۱/۲۲- است که مطابق با پیش‌بینی انجام گرفته در شبیه‌سازی است. همان‌طور که انتظار داشتیم مقداری جابه‌جایی در بسامدهای تشدید داریم که با افزایش بسامد پلاسما توسط بالا بردن جریان، جبران می‌شود.

### ۵. بحث و نتیجه‌گیری

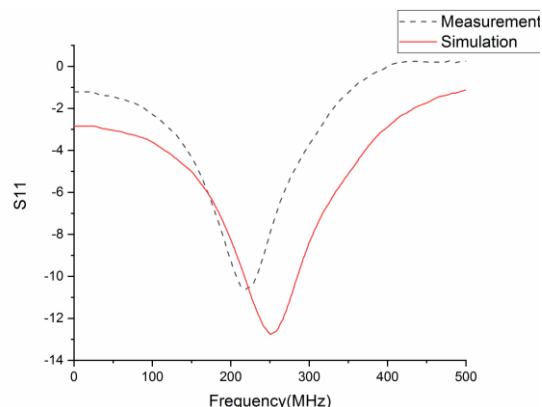
در این مقاله آنتن پلاسمایی دو قطبی خطی با قابلیت پیکربندی دوباره که در ناحیه بسامدی VHF کار می‌کند، شبیه‌سازی و ساخته شد. محیط آنتن، پلاسما ناشی از تخلیه تابان جریان مستقیم داخل لوله شیشه‌ای به قطر ۴ سانتی‌متر و طول ۷۶ سانتی‌متر انتخاب شد که در فشار ۰/۸ بار تحت ولتاژ ۱۵ کیلوولت ایجاد شد. برای تغییر بسامد کاری آنتن از تغییر چگالی الکترون‌ها که به واسطه تغییر در مقاومت دستگاه یونش آنتن صورت می‌گرفت، استفاده شد. در جریان‌های کاری ۱۵ و ۲۵ میلی‌آمپر بسامدهای تشدید ۲۱۷/۳۲ و ۲۷۲/۹۵ مگا هرتز ناشی شدند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج ناشی از آزمایش‌های اتاق آنتن توافق خوبی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج آنتن پلاسمایی با آنتن‌های فلزی مشابه مقایسه شدند که بسامد تشدیدشان در ناحیه VHF واقع هستند.

آن بسیار مرسوم است. شکل ۱۰، نمای کلی دستگاه آنتن پلاسمایی را در آزمایشگاه نمایش می‌دهد.

بعد از یونش و تغذیه آنتن پلاسمایی، آنتن پلاسمایی آماده تست نهایی است. تست آنتن در آزمایشگاه اتاق آنتن انجام می‌پذیرد و برای دو توان ورودی متفاوت انجام گرفته، کنترل توان ورودی آنتن با استفاده از تغییر در مقاومت بار دستگاه انجام می‌گیرد. در شکل ۱۱، نحوه تغییرات پارامتر پراکندگی  $S_{11}$  بر حسب بسامد کاری برای توان ورودی ۲۲۵ وات آورده شده است. منحنی توپر نتیجه شبیه‌سازی با نرم‌افزار ST Microwave Studio Suite است و منحنی نقطه‌چین حاصل داده‌های اتاق آنتن است. ناحیه تشدید در بسامدی نزدیک ۲۱۰ مگا هرتز واقع شده است. اما مطلب مهم دریافت و انتقال سیگنال توسط آنتن پلاسمایی است که تأیید می‌کند آنتن پلاسمایی ما عملکرد مناسبی دارد و با همه شبیه‌سازی‌ها مطابقت دارد. حال در شکل ۱۲، با کاهش مقاومت الکتریکی در مدار یونش آنتن پلاسمایی، توان ورودی را افزایش می‌دهیم و جریان الکتریکی در دستگاه به ۲۵ میلی‌آمپر افزایش یافته و توان ورودی نیز به ۳۷۵ وات افزایش می‌یابد. نتایج نشان دهنده افزایش بسامد تشدید از ۲۱۷/۳۲ به ۲۷۲/۹۵ مگا هرتز و مقدار



شکل ۱۲. مقایسه پارامتر پراکندگی برای نمونه شبیه‌سازی با بسامد پلاسمای  $\omega_p = 9/5 \times 10^4 \text{ Hz}$  و بسامد برخورد  $U = 5 \times 10^4 \text{ Hz}$  و ساخته شده در فشار ۰/۸ بار، ولتاژ ۱۵ کیلو ولت و جریان ۲۵ میلی‌آمپر.



شکل ۱۱. مقایسه پارامتر پراکندگی برای نمونه شبیه‌سازی با بسامد پلاسمای  $\omega_p = 1 \times 10^4 \text{ Hz}$  و بسامد برخورد  $U = 5 \times 10^4 \text{ Hz}$  و ساخته شده در فشار ۰/۸ بار، ولتاژ ۱۵ کیلو ولت و جریان ۱۵ میلی‌آمپر.

## ۶. پیوست

### پارامترهای پراکندگی آنتن

شکل ۱۳ طرحواره کلی یک شبکه دو درگاه را نمایش می‌دهد که در آن پارامترهای پراکندگی، رابطه ورودی و خروجی بین درگاه‌ها را در یک دستگاه الکتریکی توصیف می‌کنند. به عنوان مثال،  $S_{12}$  نشان دهنده توان انتقالی از درگاه ۲ به درگاه ۱ است،  $S_{21}$  نشان دهنده توان انتقالی از درگاه ۱ به درگاه ۲ و در حالت کلی برای یک شبکه چند درگاهی،  $S_{NM}$  نشان دهنده توان انتقالی از درگاه M به درگاه N است. به طور کلی پارامترهای پراکندگی تابع بسامد هستند.

اگر یک توان یا موج ورودی  $a_1$  را به درگاه ۱ اعمال کنیم، ممکن است به صورت موج انتقالی  $b_1$  از درگاه ۲ و موج انعکاسی  $b_1$  از درگاه ۱ خارج شود. همچنین اگر توان ورودی به درگاه ۲ نیز با  $a_2$  نمایش داده شود، داریم:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad (پ-۱)$$

که  $S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$  را ماتریس پراکندگی می‌نامند و درایه‌های آن به شرح زیر توصیف می‌شوند:

$S_{11}$ : ضریب انعکاس در درگاه ورودی

$S_{12}$ : بهره تقویت ولتاژ معکوس

$S_{21}$ : بهره تقویت ولتاژ مستقیم

$S_{22}$ : ضریب انعکاس در درگاه خروجی.

ویژگی‌های زیادی از شبکه‌ها مانند بهره، تلفات بازگشت، نسبت موج ایستان ولتاژ (VSWR)، ضریب بازتاب و غیره، بر حسب پارامترهای پراکندگی قابل بیان است. بهره و تلفات بازگشت به صورتی که بیان شد با پارامترهای پراکندگی رابطه مستقیم دارند و اتلاف انعکاسی در درگاه ورودی و خروجی در زیر بیان شده است:

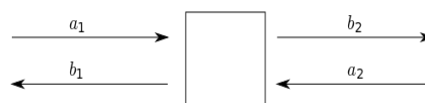
$$RL_{in} = -20 \log_{10}(S_{11}), \quad (پ-۲)$$

$$RL_{out} = -20 \log_{10}(S_{22}),$$

که در آن  $RL_{in}$  اتلاف انعکاسی در درگاه ورودی و  $RL_{out}$  اتلاف انعکاسی در درگاه خروجی است. پس بدیهی است هر چه اتلاف انعکاسی در یک درگاه کمتر باشد، میزان بیشتری از توان اعمالی به آنتن انتقال یافته و تبدیل به تابش می‌شود و در اتاق آنتن، برای محاسبه عملی پارامتر  $S_{11}$  جهت استفاده در محاسبه بهره یک آنتن در یک بازه بسامدی خاص، با اعمال یک توان ورودی، این پارامتر را در آن بازه محاسبه کرده و هرچه این مقدار منفی‌تر باشد، آنتن در آن بسامد بازدهی عملی بیشتری دارد. طرحواره کلی یک اتاق آنتن در شکل ۱۴ آورده شده است. جهت حذف انعکاسات الکترومغناطیسی و جذب هر گونه تابشی، دیواره‌های اتاق با قطعات مخروطی شکل فلزی پوشانده شده است. شکل و ابعاد این قطعات طوری طراحی



شکل ۱۴. طرحواره کلی یک اتاق آنتن جهت اندازه‌گیری پارامترهای آنتن و نیز سطح مقطع راداری هر جسم.



شکل ۱۳. نمایش یک شبکه دو درگاهی.

۳۶۰ درجه می‌کند تا الگوی تابش و دیگر پارامترهای آن توسط دستگاه ثبت شود.

می‌شود که طیف الکترومغناطیسی مربوط به ناحیه کاری آنتن به مقدار زیادی جذب شود. آنتن در فاصله حدود یک متری از دستگاه اندازه‌گیری امواج قرار داده می‌شود و شروع به چرخش

## مراجع

- (2008).
19. T Anderson, U.S. Pat.No. 5,963,169 (1999).
20. T Anderson, U.S. Pat.No. 6,870,517 (2005).
21. E G Norris, D W O'Bryant, U.S. Pat.No. 5594456 (1997).
22. Harris, U.S. Pat.No. 6492951 (2002).
23. J P Rayner, A Ph Whichello and A D Cheetham. *IEEE Transactions on Plasma Science* **32** (2004) 269.
24. T Anderson and I Alexeff, U.S. Patent No. 6,624,719 (2003).
25. T Anderson and I Alexeff, U.S. Patent No. 6,812,895 (2004).
۲۶. پ. درویش، ب. ذاکری، ا. گرجی. *مجله علمی پژوهشی رادار*. ۲، ۴ (۱۳۹۳) ۳۱.
27. N A Krall and A W Trivelpiece, "Principles of Plasma Physics", McGraw-Hill Book company, USA (1973).
28. A A Rukhadze, A F Alexandrov and L S Bogdankevich, "Principles of Plasma Electrodynamics", MOSCOW: URSS (2013).
29. J R Roth, "Industrial Plasma Engineering", IOP Publishing Ltd, UK (1995).
30. K Chandrakar, *BRIT. J. APPL. PHYS.* **16** (1965) 449.
31. C A Balanis, "Antenna theory analysis and design", Wiley, New Jersey (2005).
32. J D Jackson, "Classical Electrodynamics", Wiley, New York (1999).
33. J R Reitz, F J Milford, and R W Christy, "Foundations of Electromagnetic Theory", Addison-Wesley Publishing Company, USA (2008).
1. T Anderson, "Plasma Antenna", USA: Artech House, (2011).
2. P H Yoon and J LaBelle, *JGR: Space Physics* **110** (2005) A11308.
3. J Hettinger, "hettinger", U.S. Pat. No. 1309031 (1919).
4. A W Trivelpiece and R W Gould, *Appl. Phys.* **30** (1959) 1784.
5. W Manheimer, *IEEE Transactions on Plasma Science* **19** (1993) 1228.
6. J Mathew, et al., IEEE International Radar Conference (1995).
7. M Moisan, A. Shivarova, and A W Trivelpiece, *Plasma Phys.* **24** (1982) 1331.
8. G Borg, et al., *Physics of Plasmas* **7** (2000) 2198.
9. G Borg, et al., *Appl. Phys. Lett.* **74** (1999) 3272.
10. I Alexeff, T Anderson, S Parameswaran, E P Pradeep, J Hulloli and P Hulloli, *IEEE Transactions on Plasma Science* **34** (2006) 166.
11. I Alexeff, T Anderson, E Farshi, N Karnam, and N R Pulasani, *Physics of Plasmas* **15** (2008) 166.
12. T Anderson, U.S. Pat. No. 6,169,520, (2001).
13. T Anderson, I. Alexeff, 33<sup>rd</sup> AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, (2002).
14. T Anderson, R Aiksnoras, U.S. Pat. No. 6,650,297, (2003).
15. T Anderson, U.S. Pat. No. 7,453,403. (2008).
16. T Anderson and F Dyer, Antennas and Propagation Society International Symposium, 366-367 (2014).
17. T Anderson, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (2002).
18. T Anderson and I Alexeff, "High SNR Plasma Antenna", Application Serial Number 12/324,876