

# آرایه خطی از آنتن پلاسما با کاربرد فضایی

فاطمه صادقی کیا<sup>۱\*</sup>، فرخ حجت کاشانی<sup>۲</sup>، جلیل راشد محصل<sup>۳</sup> و سید جواد قیومه بزرگی<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۴ - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳ - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تهران

\*تهران، نارمک، فرجام

sadeghikia@ee.iust.ac.ir

آرایه دوتایی از المان‌های تک‌قطبی پلاسمایی با تحریک موج سطحی با روش عددی *FDTD* مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. با تغییر توان تحریک المان‌های پلاسمایی، آرایه‌ای حاصل می‌شود که می‌تواند برای فرکانس‌های کاری مختلف مجدداً تغییر شکل دهد. المان‌های پلاسمایی با توان RF در فرکانس ۵۰۰ مگاهرتز و فشار گاز آرگون ۰/۴ میلی‌بار از طریق تقسیم‌کننده توان هم‌فاز و هم‌دامنه تغذیه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات توان تحریک می‌تواند فرکانس تشدید آرایه را بین ۱۲۰ مگاهرتز تا ۵۰ مگاهرتز تغییر دهد و در این حالت در فرکانس تشدید جدید مقدار بهره و جهت‌داری آرایه در فرکانس تشدید جدید تقریباً بدون تغییر باقی بماند. با توجه به اهمیت مقدار راندمان تشعشعی یک آنتن، راندمان تشعشعی آرایه در محدوده حداقل و حداکثر توان تحریک مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. حداکثر مقدار راندمان تشعشعی به آرایه‌ای اختصاص دارد که طراحی اولیه بر مبنای آن انجام گرفته و فاصله میان المان‌ها ربع طول موج است. حال آن‌که در سایر مقادیر، در ناحیه فرکانس تشدیدشان، مقدار راندمان تشعشعی تقریباً یکسان است. با استفاده از این ساختار در وسایل نقلیه هوایی و فضایی می‌توان از یک آرایه برای چند منظور مختلف و در چند فرکانس غیرهمسان استفاده کرد تا از تداخل ناشی از هم‌جواری آنتن‌ها اجتناب کرد.

واژه‌های کلیدی: آنتن پلاسما، امپدانس ورودی، امپدانس متقابل، بهره، جهت‌داری و راندمان

## علائم و اختصارات

$\mu_0$	قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد		
$\vec{J}$	چگالی جریان پلاسما	$f_p$	فرکانس تشدید پلاسما (Hz)
$h$	طول آنتن	$N$	چگالی الکترون
$P_0$	توان RF تحریک	$\nu$	فرکانس برخورد (هرتز)
		$m_e$	جرم الکترون (کیلوگرم)
		$\epsilon_0$	قابلیت گذردهی فضای آزاد (فاراد بر متر)
		$\vec{H}, \vec{E}$	میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی

## مقدمه

با توجه به فضای محدود روی وسایل نقلیه هوایی و فضایی و نیز مطالبات روزافزون برای افزایش سیستم‌های مخابراتی در این سامانه‌ها، عملکرد این سیستم‌ها به دلیل ایجاد اثر تداخلی بین آنتن‌های هم‌جوار کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش تعداد آنتن‌ها روی سیستم سبب افزایش وزن و درگ در این سیستم‌ها می‌شود [۱]. بهترین روش برای حل چنین مشکلاتی کاهش تعداد آنتن‌های روی بدنه است تا بتوان از یک آنتن برای چند منظور استفاده کرد. انگیزه استفاده چندمنظوره

۱. دکتری (نویسنده مخاطب)

۲. استاد

۳. استاد

۴. پژوهشگر

کاهش سطح مقطع راداری آنتن در مواقع لزوم به اندازه سطح مقطع راداری یک محفظه دی‌الکتریک اشاره کرد [۵].

آنتن پلاسما، در صورت طراحی دقیق و مناسب، می‌تواند در مدت کوتاهی، تا حد چند میلی‌ثانیه، خاموش و روشن شود [۱۰ و ۲ و ۱]. پژوهشگران مختلفی به صورت آزمایشگاهی به بررسی آنتن پلاسما تک‌قطبی با تحریک موج سطحی (SWD)<sup>۵</sup> پرداخته‌اند [۱۲-۱۰ و ۲]. با توجه به آن که ابعاد مختلف فناوری آنتن پلاسما هنوز به صورت جامع شناخته نشده است، و نیز با توجه به محدودیت‌هایی که ممکن است از نظر اقتصادی برای تست آزمایشگاهی این آنتن وجود داشته باشد، مقرون به صرفه‌ترین راه برای شناخت آن استفاده از تحلیل‌های نرم‌افزاری است. با استفاده از این تحلیل‌ها می‌توان آنتنی با مشخصات قابل قبول طراحی کرد. در پژوهش‌های پیشین، مشخصات آنتن پلاسما تک‌قطبی، با تغییر عوامل تحریک و نیز مشخصات فیزیکی محفظه حاوی پلاسما، بررسی شد [۱۳ و ۵]. این تحلیل‌ها نشان دادند که در صورت افزایش توان تحریک، به دلیل آن که طول ستون یونیزه شده افزایش می‌یابد، فرکانس تشدید آنتن به سمت فرکانس‌های پایین‌تر منتقل می‌شود و این درحالی است که راندمان تشعشعی با افزایش قابلیت هدایت الکتریکی در همان ستون افزایش می‌یابد. در مرحله بعد، مشخصات آرایه تک‌قطبی یاگی اوادی پلاسمایی، مورد تحلیل و شناسایی قرار گرفت [۱۳]. در ادامه این پژوهش‌ها، در این مقاله مشخصات تشعشعی آرایه خطی از المان‌های پلاسمایی تک‌قطبی با تحریک هم‌فاز و هم‌دامنه ارائه خواهد شد.

در این مجموعه، تحلیل عددی آرایه خطی پلاسمایی با تمرکز بر روی مشخصه امیدانسی، بهره و راندمان تشعشعی و جهت‌داری ارائه شده است. در بخش دوم از این مجموعه، روش عددی منتخب در تحلیل آنتن پلاسما تشریح می‌شود و صحت این روش تحلیل ارزیابی می‌شود. در بخش سوم یک نمونه آرایه خطی پلاسمایی طراحی شده و نتایج تحلیل آن ارائه می‌شوند. در بخش پایانی، مقاله به صورت مختصر جمع‌بندی می‌شود.

## معرفی روابط

موج سطحی نوعی موج الکترومغناطیسی است که بین مرز مشترک چند محیط می‌تواند منتشر شود. تمرکز ما در این مجموعه بر روی مودهایی از موج سطحی است که تشعشع نمی‌کنند. برای تحلیل مکانیزم برخورد بین موج الکترومغناطیسی و پلاسما از روش انتگرال‌گیری مستقیم (DI)<sup>۶</sup> استفاده می‌شود [۱۴] و فرض می‌کنیم

از یک آنتن با قابلیت شکل‌گیری مجدد می‌تواند ما را به سمت استفاده از فناوری نوظهور آنتن پلاسما سوق دهد.

با استفاده از این فناوری، آنتن‌هایی که در زمان‌های مشخص مورد استفاده قرار نمی‌گیرند سیگنال‌های ناخواسته با آن‌ها را به گیرنده‌های مجاورشان منتقل نمی‌کنند و بدین ترتیب، از یک سو ساختار الکترونیکی گیرنده‌ها ساده‌تر شده [۲] و از سوی دیگر قابلیت اطمینان سیستم‌ها، به‌ویژه در مقابل تهدیدات جنگ الکترونیک، افزایش می‌یابد.

عبارت آنتن‌های پلاسما، به‌طور کلی به مجموعه‌ای از آنتن‌ها اطلاق می‌شود که به نوعی از محیط یونیزه به‌عنوان هادی استفاده می‌کنند. پلاسمایی که به خوبی یونیزه شده باشد هادی خوبی محسوب می‌شود؛ بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان خط انتقالی برای هدایت امواج یا سطح تشعشعی آنتن در نظر گرفت. پژوهش در زمینه آنتن پلاسما به صورت عمده از سال ۱۹۹۳ در آمریکا و استرالیا آغاز شد؛ لیکن در حال حاضر در بخش‌های زیادی از جهان دنبال می‌شود. با افزایش این پژوهش‌ها در آینده، به‌نظر می‌رسد کاربرد این فناوری در صنعت هوافضا عمومیت بیشتری پیدا کند و موانع موجود در پیاده‌سازی آن مرتفع شود.

با توجه به آن که آنتن‌های پلاسما به‌دلیل برخورداری از قابلیت‌های فشردگی، تغییر سریع فرکانسی، سطح مقطع راداری محدود و بسیار کم، برقراری لینک ارتباطی با قابلیت اطمینان بالا و قابلیت شکل‌گیری سریع، می‌توانند جایگزین ارزشمندی برای فلزات در کاربردهای فعلی محسوب شوند، سرمایه‌گذاری‌های بسیاری در زمینه تحقیق و پژوهش روی مشخصات آن‌ها در کشورهای پیشرفته جهان انجام می‌گیرد. با استفاده از ستون پلاسما به عنوان آنتن، طول آنتن، با تغییر مشخصات فیزیکی تحریک پلاسما، به سرعت قابل تغییر است و به‌این ترتیب، با تنظیم سریع مشخصات فیزیکی آن، می‌توان آنتنی برای فرکانس جدید طرح کرد. آزمایش‌ها و تحلیل‌ها نشان داده‌اند که چنین آنتن‌هایی راندمان نسبتاً خوبی (بیش از ۵۰٪) دارند و می‌توانند نویز کمی در باندهای فرکانسی HF (۳۰-۳ مگاهرتز) و VHF (۳۰-۳۰۰ مگاهرتز) تولید کنند [۶-۲].

بررسی‌های مویسان<sup>۳</sup> [۷] نشان داد که محفظه حاوی پلاسما می‌تواند به‌طور مستقیم از یک انتها به‌وسیله موج سطحی تحریک شود. نتایج این پژوهش‌ها اساس پژوهش‌های بسیاری در زمینه تحریک آنتن پلاسما با موج سطحی قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به پژوهش بورگ<sup>۴</sup> [۹ و ۸] اشاره کرد. استفاده از موج سطحی برای تحریک آنتن پلاسما می‌تواند خواص شگفت‌آوری در آنتن پلاسما به همراه داشته باشد که از آن جمله می‌توان به قابلیت

5. Surface Wave Discharge  
6. Direct integration

3. Moisan  
4. Borg

بررسی‌های آزمایشگاهی در اندازه‌گیری چگالی الکترون در طول ستون پلاسما با پروب‌های لانگمیر<sup>۹</sup> نشان داده است که چگالی الکترون، به صورت خطی از محل تحریک تا نقطه انتهایی ستون کاهش می‌یابد و شیب این تغییرات متناسب با فشار گاز درون محفظه است [۲۰ و ۱۹، ۱۱، ۲]. اندازه‌گیری‌های رینر<sup>۱۰</sup> [۲] نشان داده است، چنانچه آنتن در راستای محور z در نظر گرفته شده باشد، چگالی پلاسما در هر نقطه از آن برابر است با:

$$n(z, p) = n_{critical} + kv(h - z) \quad (5)$$

که در آن  $k$  و  $v$  در فشار ثابت برای گاز مشخص مقداری ثابت دارند و برای گاز آرگون در فشار ۰/۴ میلی‌بار،  $k = 5 \times 10^9$  مترمربع بر ثانیه و  $v = 5 \times 10^8$  هرتز هستند.  $h$  طول آنتن است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$h = \frac{n_0 L_0}{n_{critical}} - L_0 \quad (6)$$

و  $L_0 = \frac{n_{critical}}{kv}$  حداقل طولی است که با آن ستون پلاسما تبدیل به آنتن می‌شود و می‌تواند ارسال و دریافت داشته باشد و  $n_0$  چگالی پلاسما در محل تحریک است و مقدار آن برابر خواهد بود با:

$$n_0 = A(p) \sqrt{P_0} \quad (7)$$

که  $P_0$  توان RF تحریک است و  $A(p)$  که مقدار آن در [۲] اندازه‌گیری شده است، در فشار ثابت مورد نظر ۰/۴ میلی‌بار برابر با  $A(p) = 0.28 \times 10^{18} m^{-3} W^{1/2}$  خواهد بود.

$n_{critical}$  چگالی نقطه انتهایی آنتن است و مقدار آن برابر است با:

$$n_{critical} = \frac{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}{e^2} f^2 (1 + \epsilon_d) \quad (8)$$

$f$  فرکانس تحریک و  $\epsilon_d$  ضریب دی‌الکتریک ستون پلاسما است و بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته در [۵] جنس محفظه را کوآرتز ( $\epsilon_d = 3.75$ ) در نظر گرفتیم.

### تشریح ساختار آنتن پلاسما

در شکل (۱) ساختاری از آنتن پلاسما با تحریک موج سطحی که شبیه‌سازی می‌شود نشان داده شده است. آنتن پلاسما از یک محفظه کوآرتز با شعاع ۱۲ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر در یک جعبه فلزی با ابعاد ۴۰×۴۰×۴۰۰ میلی‌متر تشکیل شده است. برای پرتاب موج سطحی از حلقه‌ای مسی دور تا دور محفظه کوآرتز استفاده می‌شود که ارتفاع و ضخامت آن به ترتیب ۲۵ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر است و به فاصله ۴

پلاسمای سرد و ایزوتروپیک داخل محفظه دی‌الکتریک از جنس کوآرتز ( $\epsilon = 3.75$ ) قرار گرفته است و چگالی پلاسما، همانند آنچه در عمل واقعاً رخ می‌دهد، داخل ستون، از محل تحریک تا انتهای ستون، به صورت خطی تغییر می‌کند. فرض می‌کنیم پلاسما از قبل یونیزه شده است و به همین دلیل اثرات حالت گذرای برخورد موج الکترومغناطیسی با پلاسما [۱۵] را در نظر نمی‌گیریم. قابلیت گذردهی مختلط پلاسما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)}\right) \quad (1)$$

که در آن  $\omega_p = 2\pi f_p = \sqrt{Ne^2 / m_e \epsilon_0}$  است و  $f_p$  فرکانس تشدید پلاسما (Hz)،  $N$  چگالی الکترون،  $\nu$  فرکانس برخورد (هرتز)،  $m_e$  جرم الکترون (کیلوگرم) و  $\epsilon_0$  قابلیت گذردهی فضای آزاد (فاراد بر متر) است.

در این تحلیل عددی، ترکیب معادلات ماکسول با یک معادله دیفرانسیلی که چگالی جریان را به شدت میدان الکتریکی مرتبط می‌سازد اساس روابط مورد نیاز را تشکیل می‌دهند. این روابط عبارتند از:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} + \nu \vec{J} = \epsilon_0 \omega_p^2 \vec{E} \quad (4)$$

در روابط بالا،  $\vec{E}$  و  $\vec{H}$  به ترتیب میدان‌های الکتریکی (ولت بر متر) و مغناطیسی (آمپر بر متر) هستند،  $\mu_0$  قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد (هانری بر متر) و  $\vec{J}$  چگالی جریان پلاسما است. معادله (۴) بین معادلات ماکسول و چگالی جریان ارتباط برقرار می‌کند.

برای تحلیل پلاسما به صورت عددی، پس از تقسیم ساختار مورد نظر به اجزای  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  و  $\Delta z$  در گام‌های زمانی  $\Delta t$  معادلات را با استفاده از روش بی [۱۷ و ۱۶] حل می‌کنیم. برای محاسبه میدان‌های تشعشی دور از تبدیل میدان‌های دور به میدان‌های نزدیک روی مرز استفاده می‌شود [۱۸]. با استفاده از روش FDTD<sup>۱۱</sup> منابع جریان الکتریکی و مغناطیسی معادل آن‌ها روی سطح بسته هویگنس محاسبه شده و پس از محاسبه پتانسیل‌های برداری، میدان الکتریکی پراش یافته در میدان‌های دور در مختصات کروی محاسبه می‌شوند [۱۸-۱۶]. با استفاده از تحلیل به روش FDTD امپدانس ورودی آنتن با تقسیم مقادیر ولتاژ محل تحریک به جریان آن در حوزه فرکانس قابل محاسبه است.

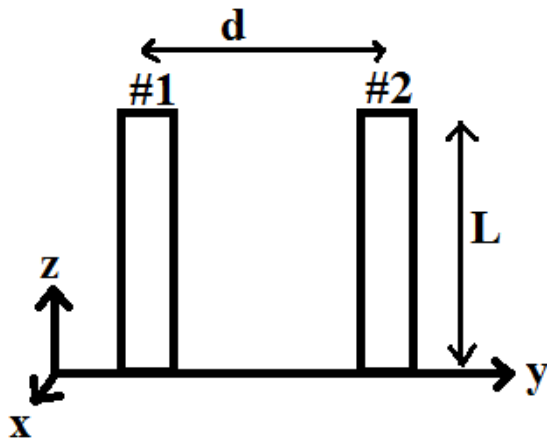
9. Langmuir  
10. Rayner

7. Yee  
8. Finite Difference Time Domain

فرکانس‌های کاری مختلف و در شرایط فرکانس برخورد ۵۰۰ مگاهرتز در گاز آرگون که چگالی پلاسمای آن به صورت خطی تغییر می‌کند با نتایج حاصل شده از تحلیل به روش ممان [۲] مقایسه شده است و نتایج آن در شکل‌های الف-۲ و ب-۲ نشان داده شده است. این مقایسه بیانگر تطابق قابل قبول بین دو روش تحلیل است. قابل توجه است که نتایج تحلیل به روش ممان در [۲] با مقادیر اندازه‌گیری شده نیز مقایسه شده است.

### ساختار شبیه‌سازی شده

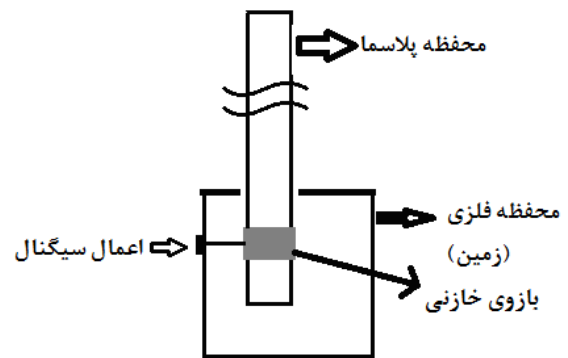
در کارهای پیشین، آنتن پلاسمای تک‌قطبی و نیز آرایه یاگی- اودای پلاسمایی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند [۱۳ و ۵]. در این پژوهش، آرایه خطی با دو المان تک‌قطبی پلاسمایی مورد تحلیل قرار می‌گیرد در حالی که عمده روابط همان روابطی است که برای کارهای پیشین بیان شد. ساختاری که مورد تحلیل قرار دادیم در شکل (۳) نشان داده شده است.



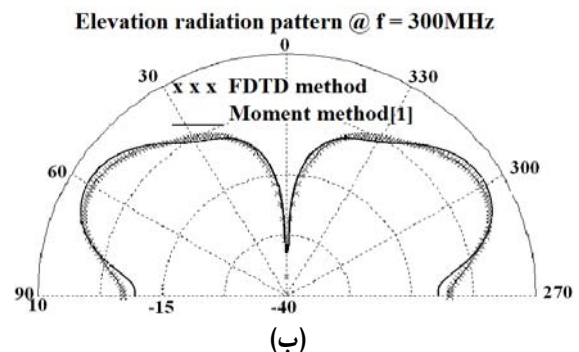
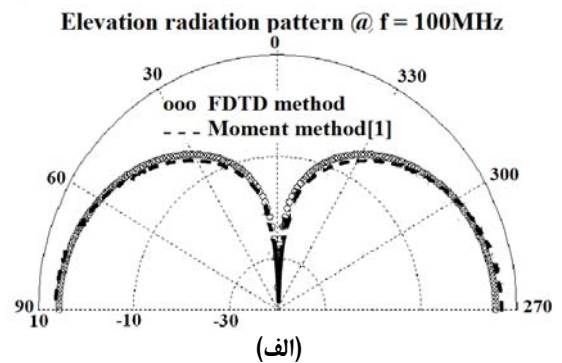
شکل ۳- ساختار شبیه‌سازی شده از آرایه خطی پلاسمای

دو المان تک‌قطبی پلاسمایی #۱ و #۲ روی سطح زمین و به فاصله  $d$  از یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر المان از یک محفظه کوارتز با شعاع ۱۲ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر تشکیل شده است که با گاز آرگون با فشار ۰/۴ میلی‌بار پر می‌شود و لازم است با پرتاب موج سطحی تحریک شود تا یونیزه شود. برای اعمال سیگنال پیام نیز از ساختاری مشابه با ساختار پرتاب‌گر موج سطحی استفاده می‌شود. بنابراین، در شرایط آزمایشگاهی آنتن پلاسمای نیاز به دو سیگنال متفاوت دارد. ساختار فنی آرایه پلاسمایی در شکل (۴) نشان داده شده است. مدارات تحریک از یک منبع سیگنال تشکیل می‌شود که توان آن در فرکانس حدود ۵۰۰ مگاهرتز تقویت می‌شود و با استفاده از یک تقسیم‌کننده توان مقدار توان آن بین دو آنتن به صورت مساوی تقسیم می‌شود. بخش مربوط اعمال سیگنال پیام نیز مشابه مدارات تحریک است.

میلی‌متر پایین‌تر از ضلع بالایی جبهه فلزی قرار دارد. فرض می‌کنیم که محفظه کوارتز از پلاسمایی با فشار ۰/۴ میلی‌بار پر شده است که معادل با فرکانس برخورد ۵۰۰ مگاهرتز است [۲]. آنتن پلاسمای با اتصال مغزی کواکسیال به حلقه مسی و هادی بیرونی آن به جبهه فلزی تحریک می‌شود. حلقه مسی همانند بازوی خازنی سبب ایجاد میدان الکتریکی شدیدی میان حلقه و جبهه می‌شود و در نتیجه بیشتر خطوط میدان تبدیل به موج سطحی شده و سبب تولید و حفظ پلاسمای می‌شود.

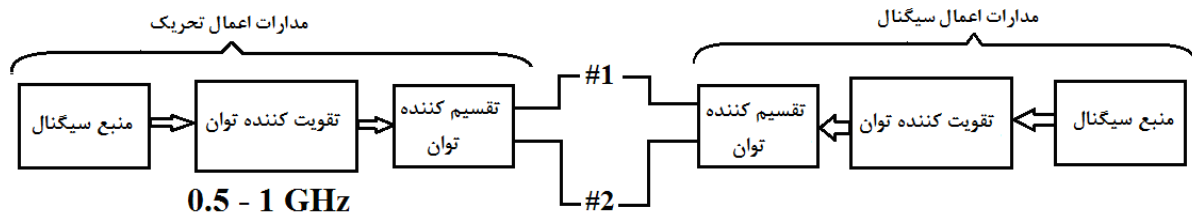


شکل ۱- ساختار آنتن پلاسمای

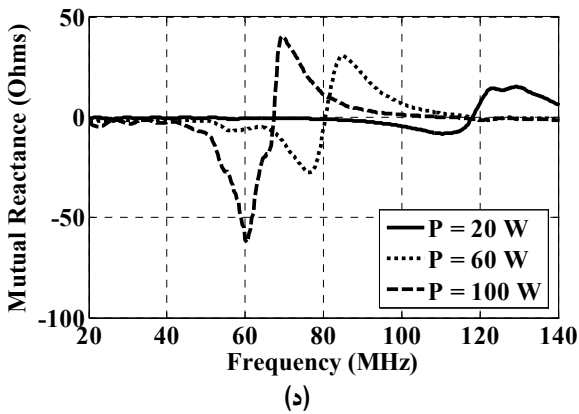


شکل ۲- مقایسه الگوی تشعشعی محاسبه شده به وسیله روش FDTD و مقایسه آن با نتایج به دست آمده در [۲] به روش ممان: (الف) ۱۰۰ مگاهرتز و (ب) ۳۰۰ مگاهرتز

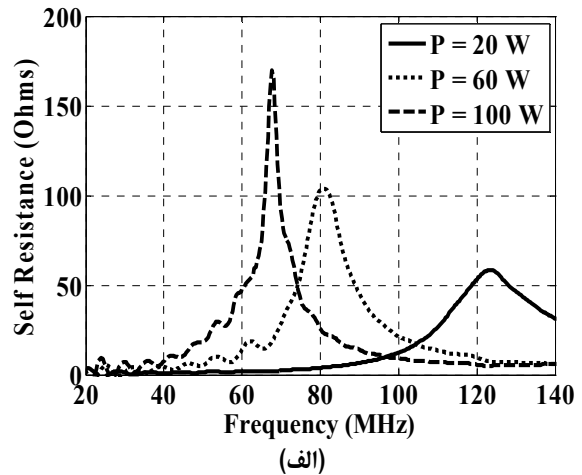
به منظور بررسی صحت نرم‌افزار فراهم شده برای تحلیل آنتن پلاسمای، الگوی تشعشعی آنتن پلاسمای تک‌قطبی به طول ۱ متر در



شکل ۴- ساختار آرایه خطی از المان‌های تک قطبی پلاسمایی



(د)



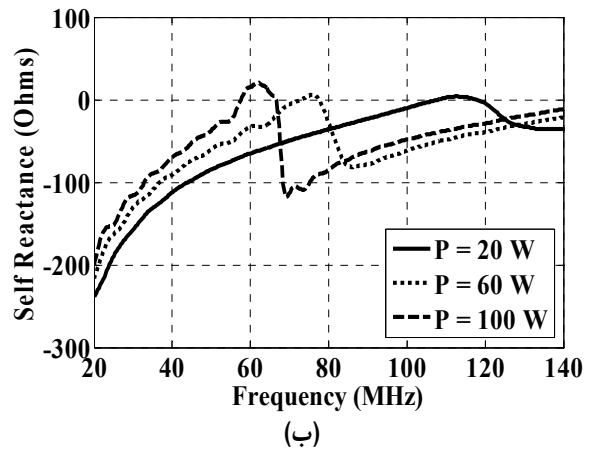
(الف)

شکل ۵- تغییرات میزان امپدانس خودی و متقابل با تغییر توان تحریک در آرایه خطی پلاسمایی، (الف) قسمت حقیقی امپدانس خودی، (ب) قسمت موهومی امپدانس خودی، (ج) قسمت حقیقی امپدانس متقابل و (د) قسمت موهومی امپدانس متقابل

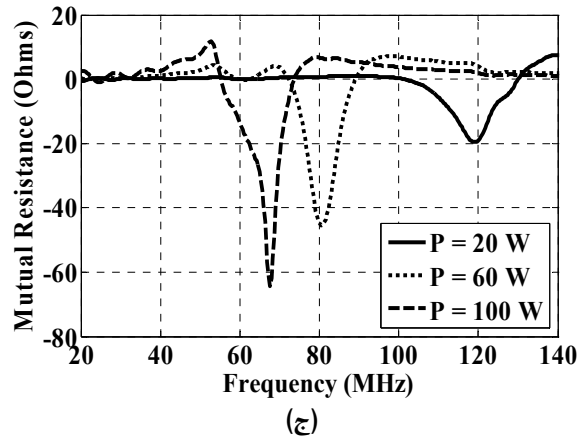
با توجه به آن که در این تحلیل، پلاسما یونیزه شده فرض شده و از تأثیرات حالت گذرای برخورد موج الکترومغناطیسی با پلاسما صرف نظر می‌شود، در شبیه‌سازی با روش عددی تنها ساختار پرتاب موج سطحی برای اعمال سیگنال پیام در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که پلاسما از قبل یونیزه شده است. سپس با استفاده از رابطه (۵) چگالی پلاسما در طول ستون محاسبه می‌شود.

ساختار مورد نظر برای شبیه‌سازی را برای فرکانس مرکزی ۸۷ مگاهرتز، که معادل با طول موج ۳/۴۴۶۸ متر است طراحی می‌کنیم. توان مورد نیاز برای حصول آنتنی با ربع طول موج در این فرکانس، با توجه به معادلات (۵) تا (۸) برابر با ۶۰ وات است. فاصله بین دو المان نیز ربع طول موج، یعنی ۸۶۱/۷ میلی‌متر، در نظر گرفته می‌شود.

تغییر توان تحریک در فشار گاز ثابت ۰/۴ میلی‌بار و فرکانس تحریک ثابت ۵۰۰ مگاهرتز، با ثابت فرض کردن فاصله بین دو المان، سبب حصول آرایه پلاسمایی با قابلیت تغییر شکل می‌شود. در شکل (۵) تغییر میزان امپدانس خودی و متقابل آرایه مذکور با تغییر توان تحریک نشان داده شده است. افزایش توان تحریک



(ب)



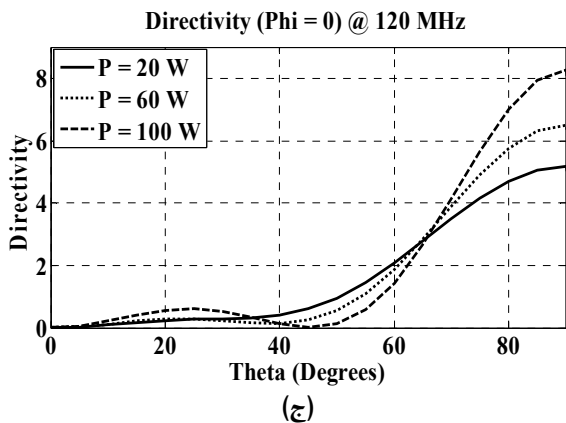
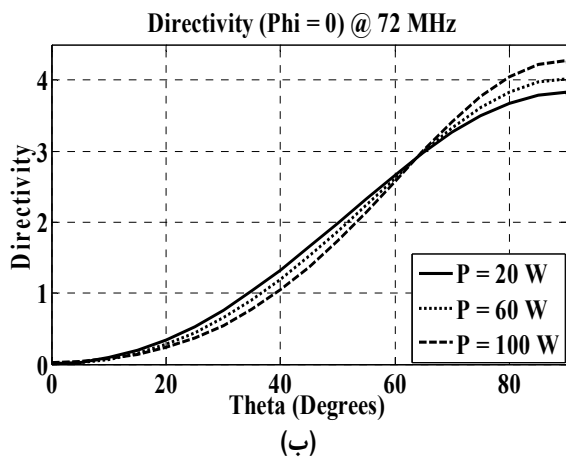
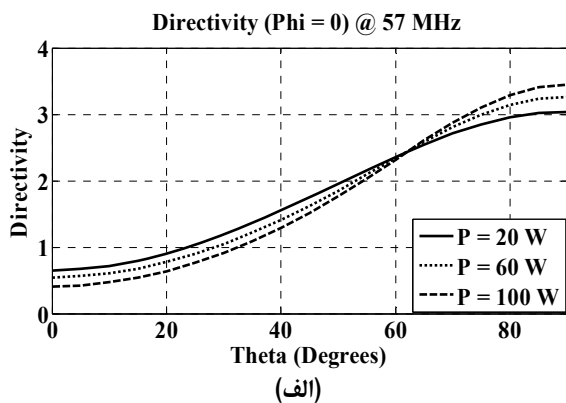
(ج)

اختصاص دارد که با توان ۶۰ وات، توانی که آرایه بر حسب آن طراحی شده و فاصله بین دو المان ربع طول موج است، تحریک می‌شود. دلیل اصلی کم بودن راندمان در آرایه پلاسمایی، کوچک بودن مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در ستون پلاسمای نسبت به آرایه فلزی است. علاوه بر این، مقدار قابلیت هدایت در ستون پلاسمای، متناسب با کاهش چگالی پلاسمای در ستون، کاهش می‌یابد. با این وجود، برای حصول قابلیت‌های بالای استفاده از پلاسمای به عنوان المان تشعشی، ناگزیریم برخی رخدادهای نامطلوب، از جمله کاهش راندمان تشعشی را بپذیریم.

سبب انتقال منحنی‌های امیدانسی از فرکانس‌های بالاتر به سمت فرکانس‌های پایین‌تر می‌شود. دلیل این انتقال افزایش طول آنتن است که منجر به کاهش فرکانس تشدید آن می‌شود. افزایش توان تحریک نه تنها سبب انتقال فرکانس کاری آرایه می‌شود، بلکه پهنای باند امیدانسی را نیز کاهش داده و حد اکثر مقدار امیدانسی خودی و متقابل را نیز تغییر می‌دهد. بنابراین، با استفاده از المان‌های پلاسمایی، می‌توان آرایه خطی با قابلیت تغییر شکل مجدد به صورت دینامیک ایجاد کرد که در آن بهترین نقطه کاری آنتن با تغییر توان تحریک و حداقل میزان تغییرات در عملکرد آن قابل حصول است. در جدول (۱) مقدار فرکانس تشدید آرایه در صورت تحریک شدن با توان‌های مختلف نشان داده شده است و ستون انتهایی جدول بیانگر مقدار طول هر المان در هر حالت است.

جدول ۱- مشخصات آرایه با تغییر توان تحریک

طول هر المان (میلی‌متر)	توان تحریک هر المان (وات)	فرکانس تشدید (مگاهرتز)
۴۹۵	۲۰	۱۱۶/۲
۷۰۲/۵	۴۰	۸۵/۱۱
۸۶۱/۷	۶۰	۷۱/۹۵
۱۱۱۴/۱	۱۰۰	۵۷/۲۱



در شکل (۶) تغییر میزان جهت‌داری آرایه در محدوده  $0 < \theta < 90$  در فرکانس‌های ۵۷ مگاهرتز، ۷۲ مگاهرتز، ۱۲۰ مگاهرتز و ۲۰۰ مگاهرتز در صفحه  $\phi = 0$  نشان داده شده است. در فرکانس‌های کاری کمتر از ۱۲۰ مگاهرتز، افزایش توان تحریک سبب افزایش میزان جهت‌داری و نیز باریک‌تر شدن پرتو در جهت جانبی<sup>۱</sup> می‌شود. این در حالی است که در فرکانس‌های کاری بالاتر از ۱۲۰ مگاهرتز، همان‌گونه که در شکل (۶-د) نشان داده شده است، سبب افزایش تعداد لوب‌های فرعی و نیز کاهش مقدار جهت‌داری آنتن می‌شود. در محدوده فرکانس کاری بین ۴۰ مگاهرتز تا ۱۴۰ مگاهرتز، حداکثر مقدار بهره و جهت‌داری به آرایه‌ای اختصاص دارد که با حداکثر توان، یعنی ۱۰۰ وات، تحریک می‌شود.

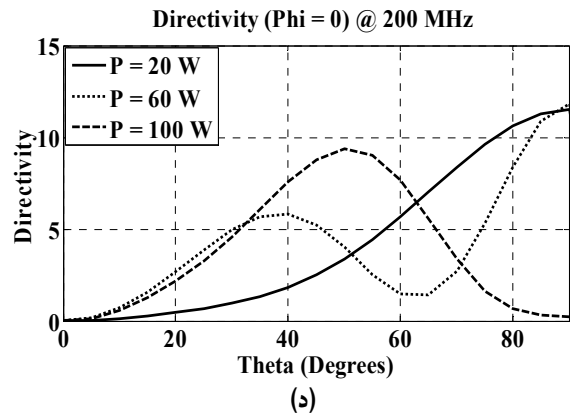
از آن‌جا که راندمان آنتن در سیستم‌های مخابراتی اهمیت بالایی دارد، راندمان آرایه پلاسمایی در محدوده حداقل و حداکثر توان تحریک مورد تحلیل قرار گرفته است و نتایج آن در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. نکته جالب در آن است که تغییر توان تحریک سبب می‌شود راندمان تشعشی آرایه در فرکانس تشدید جدید تقریباً ثابت (کمتر از ۷۰٪) باشد؛ حال آن‌که حداکثر مقدار راندمان به آرایه‌ای

1. Broadside

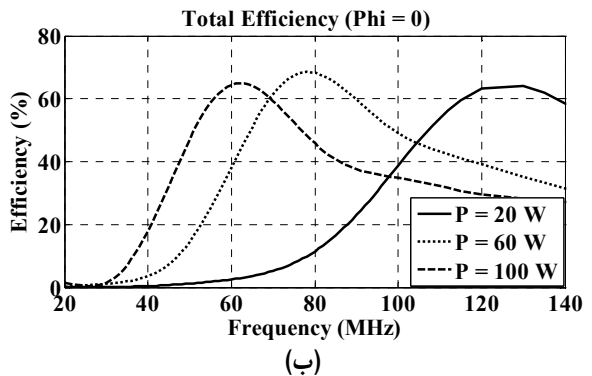
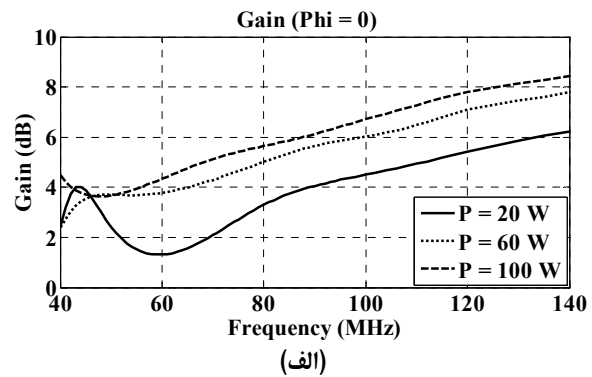
FDTD نشان داده شد که تغییرات توان تحریک المان‌های پلاسمایی سبب تغییر فرکانس تشدید آرایه می‌شود در حالی که مقدار بهره و راندمان تشعشی آن، در فرکانس تشدید جدید، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. برخورداری از این قابلیت انعطاف بالا، هرچند به قیمت کاهش راندمان تشعشی نسبت به آنتن فلزی می‌شود، می‌تواند توانمندی چشمگیری در تحقق سیستم‌های مخابراتی و اجتناب از تداخل فرستنده‌ها و گیرنده‌های روی بدنه محموله داشته باشند.

## مراجع

- [1] Fujimoto, K., *Mobile Antenna Systems Handbook*, Artech House, June, 2008.
- [2] Rayner, J. P., Wichello, A. P. and Cheetham, A. D., "Physical Characteristics of Plasma Antennas," *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 32, No. 1, February, 2004, pp. 269-281.
- [3] Kumar, R. and Bora, D., "A Reconfigurable Plasma Antenna," *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, No.5, 2010, pp. 053303-1-053303-9.
- [4] Kumar, R. and Bora, D. "Wireless Communication Capability of a Reconfigurable Plasma Antenna," *Journal of Applied Physics*, Vol. 109, No.6, 2011, pp. 063303-1 - 063303-9.
- [5] Sadeghikia, F., Hodjat-Kashani, F., Rashed-Mohassel, J., and Ghayoomeh-Bozorgi, J., "Characterization of a Surface Wave Driven Plasma Monopole Antenna," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 26, No. 2-3, 2012, pp. 239-250.
- [6] Cerri, G., Leo, R. D., Primiani, V. M., and Russo, P., "Measurement of The Properties of a Plasma Column Used as a Radiating Element," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 2, 2008, pp. 242-247.
- [7] Moisan, M. and Zakrzewski, Z., "Plasma Sources Based on the Propagation of Electromagnetic Surface Waves," *Journal of Physics. D: Applied Physics*, Vol. 24, No.7, 1991, pp. 1025-1048.
- [8] Borg, G.G., Harris, J. H., Miljak, D. G., Martin, N. M., "Application of Plasma Columns to Radio frequency Antennas", *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 22, 1999, pp. 3272-3274.
- [9] Borg, G. G., Harris, J. H., Martin, N. M., Thorncraft, D., Milliken, R., Miljak, D. G., Kwan, B., Ng, T. and Kircher, J., "Plasmas as Antennas: Theory, Experiment and Applications", *Physics of Plasmas*, Vol. 7, No. 5, May 2000, pp. 2198-2202.
- [10] Cerri G., Leo R. D., Primiani V. M., and Russo P., "Measurement of The Properties of a Plasma Column Used as a Radiating Element," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 2, 2008, pp. 242-247.
- [11] Anderson, T., Alexeff, I., Farshi, E. and Karnam N., "An Operating Intelligent Plasma Antenna," *16<sup>th</sup> IEEE International Conference on Pulsed Power*, Albuquerque, New Mexico USA, Vol. 1, No. 1, June, 2000, pp. 353-356.



شکل ۶- تغییر میزان جهت‌داری آرایه خطی پلاسمایی با تغییر توان تحریک (الف) فرکانس ۵۷ مگاهرتز و (ب) ۷۲ مگاهرتز (ج) ۱۲۰ مگاهرتز و (د) ۲۰۰ مگاهرتز.



شکل ۷- اثرات تغییر توان تحریک در آرایه خطی پلاسمایی بر بهره آنتن پلاسما و (ب) راندمان تشعشی آنتن پلاسما در محدوده فرکانسی کمتر از ۱۴۰ مگاهرتز.

## نتیجه‌گیری

به منظور استفاده چندمنظوره از آنتنی که روی وسیله نقلیه هوایی و فضایی نصب می‌شود، آرایه خطی پلاسمایی پیشنهاد و مورد تحلیل قرار گرفت. هدف از این طرح، پیشنهاد روشی برای کاهش تعداد آنتن‌ها روی بدنه این سامانه‌هاست. با استفاده از تحلیل به روش

- [17] Taflove, A., *Computational Electromagnetics: The Finite Difference Time Domain Method*, Artech House, Boston, FL, 1995.
- [18] Luebbers, R. J., Kunz, K. S., Schneider, M. and Hansberger, F., "A Finite Difference Time Domain Near to Far Zone Transformation," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 39, No. 4, April, 1991, pp. 429-433.
- [19] Naz, M. Y. and Ghaffar, A., Rehman, N. U., Naseer, S. and Zakaullah, M., "Double and Triple Langmuir Probes Measurements in Inductively Coupled Nitrogen Plasma," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 114, 2011, pp.113-128.
- [20] Naz, M. Y., Ghaffar, A., Rehman, N. U., Azam, M., Shukrullah, S. and Qayyum, A., "Symmetric and Asymmetric Double Langmuir Probes Characterization of Radio Frequency Inductively Coupled Nitrogen Plasma," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 115, 2011, pp.207-221.
- [12] Popov Oleg, A., *High Density Plasma Sources: Design, Physics and Performance*, Noyes publication, Park Ridge, New Jersey, 1995.
- [13] Sadeghikia, F., Hodjat-Kashani, F., Rashed-Mohassel, J., and Ghayoomeh-Bozorgi, J., "A Yagi-Uda Plasma Monopole Array," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 25, No. 7, 2012, pp. 885-894.
- [14] Nickisch, L. J., and Franke, P. M., "Finite Difference Time Domain Solution of Maxwell's Equations For the Dispersive Ionosphere," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 34, No. 5, 1992, pp. 33-39.
- [15] Russo, P., Cerri, G., and Vecchioni, E., "Self-Consistent Analysis of Cylindrical Plasma Antennas," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 59, No. 5, 2011, pp. 1503-1511.
- [16] Kunz, K. S. and Luebbers, R. J., *The Finite Difference Time Domain Method For Electromagnetics*, CRC press, Boca Raton, FL, 1993.