

طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن شیپوری پهن باند مبتنی بر تکنولوژی SIW

شکیبا پالودی^۱ نادر کمجانی^۲ مصطفی خنجریان^۳

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران
sh_paloudi@elec.iust.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران
n_komjani@iust.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران
m_khanjarian@elec.iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک آنتن شیپوری پهن باند مبتنی بر فناوری موجبر مجتمع شده در زیر لایه (SIW^1) با اندازه‌ای کوچک ($3.38\lambda_0 \times 2.65\lambda_0 \times 0.14\lambda_0$) طراحی شده، که با استفاده از ساختار موجبر هم‌صفحه دارای زمین ($GCPW^2$) تغذیه شده است. آنتن پیشنهادی با استفاده از دو لایه Rogers 6002 با ضخامت یکسان $1.524mm$ (ضخامت کل $0.14\lambda_0$ در فرکانس مرکزی $(3.048mm)$) و $\epsilon_r = 2.94$ ساخته شده است. آنتن شیپوری پیشنهادی، ابتدا در بخش تغذیه از انتقال پهن باند مناسب و سپس در بخش دهانه آنتن از یک انتقال فلزی چاپی روی دی‌الکتریک گسترش یافته پس از دهانه آنتن به همراه دو پست فلزی استفاده می‌کند. با استفاده از آنتن پیشنهادی، پهنای باند امیدانسی وسیعی بدون استفاده از ساختارهای دارای تیغه^۳ به دست می‌آید. آنتن طراحی شده در محدوده فرکانسی $8-19.5GHz$ دارای پارامتر نسبت ولتاژ موج ایستا ($VSWR^4$) کمتر از $2/5$ بوده و در همان محدوده فرکانسی الگوهای تشعشی قابل قبول و پایداری را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: آنتن شیپوری، فناوری SIW، ساختار GCPW

DOI: 10.29252/jiaeee.18.3.965

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر نادر کمجانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - میدان رسالت - خیابان هنگام - خیابان دانشگاه - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

آنتن‌های شیبوری به دلیل داشتن ویژگی‌هایی همچون الگوهای تشعشعی پایدار، بهره نسبتاً بالا، پهنای باند گسترده و نیز ساخت آسان دارای کاربردهای بسیار وسیعی هستند اما هندسه بزرگ این آنتن‌ها ساخت آن‌ها را به فرم مسطح غیر ممکن ساخته است. معرفی فناوری موجبر مجتمع شده در زیرلایه (SIW)، این مشکل را حل می‌کند [۱]. ساخت مدارهای مجتمع مایکروویوی و میلیمتری با درجه فشردگی بالا و هزینه کم با استفاده از فناوری SIW امکان‌پذیر می‌باشد. عناصر متعددی با استفاده از این فناوری قابل ساخت هستند. به عنوان نمونه- ای از این عناصر می‌توان به پیوندهای ارائه شده با استفاده از فناوری SIW در [۲] اشاره نمود.

آنتن شیبوری SIW به عنوان یک نوع از آنتن‌های مسطح به‌کار رفته و دارای مزایایی همچون ساخت ساده‌تر، مجتمع‌سازی آسان با دیگر مدارات مسطح و غیره می‌باشد. با وجود ساختار هندسی مسطح، الگوهای تشعشعی پایدار و بازدهی بالای آنتن همچنان حفظ می‌شود. با قرار دادن وایهای فلزی به جای دیواره کامل در زیرلایه، آنتن شیبوری مسطح پدید می‌آید که می‌تواند به آسانی روی برد مدار چاپی (PCB) ساخته شود [۳].

برای بهبود بهره آنتن‌های شیبوری SIW نیز معمولاً از لنز در مقابل آنتن استفاده می‌شود. یک آنتن شیبوری SIW در [۴] طراحی و ساخته شده که در آن به منظور افزایش بهره آنتن از لنز لوببرگ استفاده شده است.

عدم تطبیق بین زیرلایه در دهانه آنتن و فضای آزاد پهنای باند امپدانس آنتن شیبوری SIW را بسیار باریک می‌سازد. تا کنون آنتن- های شیبوری SIW زیادی گزارش شده است که در آن‌ها سعی شده بر این مشکل غلبه شود. در [۵]، با گسترش دی‌الکتریک به‌کار رفته در قسمت جلوی آنتن، پهنای باند نسبی ۱/۸ درصدی حاصل شده است. استفاده از انتقال‌های فلزی چاپی روی دی‌الکتریک گسترش یافته پس از دهانه آنتن نیز سبب افزایش پهنای باند می‌شود، به طوری که استفاده از پیچ‌های مثلی شکل، برای انتقال چاپی روی دی‌الکتریک، همانطور که در [۶] گزارش شده، باعث به دست آمدن پهنای باند ۱۹ درصدی می‌گردد. در [۷] و [۸] نیز با سوراخ کاری کردن دی‌الکتریک گسترش یافته پس از دهانه آنتن با قطرهای مختلف، ثابت دی‌الکتریک زیرلایه به تدریج کاهش یافته و تطبیق امپدانس آنتن شیبوری مسطح به طور موثر بهبود پیدا می‌کند، به طوری که پهنای باند امپدانس ۴۰ درصد حاصل شده است. با معرفی آنتن‌های شیبوری مبتنی بر فناوری موجبر مجتمع شده در زیرلایه تیغه‌ای (RSIW^۶)، پهنای باند امپدانس به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در آنتن شیبوری پیشنهاد شده در [۱]، از تیغه‌ای با ۹ پله استفاده شده و پهنای باند نسبی ۷۶ درصد به دست آمده است. یک آنتن شیبوری مبتنی بر RSIW با تیغه سه پله‌ای نیز در [۹] ارائه شده که پهنای باند

نسبی آن ۹۳ درصد می‌باشد. مشابه با آنتن ارائه شده در [۹]، یک آنتن شیبوری مبتنی بر RSIW دارای تیغه‌های سه پله‌ای از بالا و پایین به همراه دی‌الکتریک گسترش یافته سوراخ کاری شده در دهانه آنتن، پهنای باند نسبی ۱۰۰ درصد ایجاد کرده است [۱۰]. آنتن شیبوری معرفی شده در [۱۱] نیز با به‌کار بردن تیغه سه پله‌ای و نیز شکاف- هایی در امتداد بازشدگی دهانه آنتن در باند فرکانسی ۶/۱ گیگاهرتز تا ۱۹ گیگاهرتز دارای VSWR کمتر از ۲/۵ بوده و پهنای باند نسبی ۱۰۳ درصد حاصل شده است. مشاهده شد که با استفاده از تیغه در آنتن شیبوری SIW، پهنای باند نسبی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

در این مقاله، یک آنتن شیبوری SIW پهن باند بدون استفاده از تیغه که با یک ساختار GCPW تغذیه شده، معرفی می‌کنیم. آنتن ارائه شده در [۳] نیز از ساختار GCPW به همراه یک زمین اضافی در لایه وسط به عنوان تغذیه استفاده می‌کند و دارای اندازه‌ای کوچک $(0.27\lambda_0 \times 3.77\lambda_0 \times 1.47\lambda_0)$ می‌باشد. آنتن طراحی شده با اندازه کوچک $(0.14\lambda_0 \times 2.65\lambda_0 \times 3.38\lambda_0)$ نسبت به آنتن ارائه شده در [۳] پهنای باند بسیار وسیع‌تری دارد. ضخامت کل آنتن پیشنهادی 3.048mm ($0.14\lambda_0$ در فرکانس مرکزی) است. آنتن پیشنهادی متشکل از دو لایه یکسان بوده و زیرلایه‌های به‌کار رفته در آن دارای ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 2.94$ با ضخامت 1.524mm می‌باشند. بخش‌های مختلف آنتن شیبوری SIW پیشنهادی و نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نمونه ساخته شده ارائه شده است. پهنای باند آنتن طراحی شده از فرکانس ۸ گیگاهرتز تا ۱۹/۵ گیگاهرتز بوده و پهنای باند نسبی آن ۸۴ درصد است.

۲- طراحی آنتن شیبوری SIW

۲-۱- پیکربندی ساختار

ساختار آنتن شیبوری SIW پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. L و W به ترتیب طول و عرض آنتن و L_g و W_g نیز به ترتیب طول و عرض زمین واقع در زیر آنتن هستند. A عرض دهانه آنتن، a عرض SIW، d قطر وایهای فلزی و S نیز فاصله بین دو وای مجاور می‌باشد. پارامترهای $\pm x_1$ و y_1 موقعیت دو پست فلزی واقع در دهانه آنتن و d_1 قطر آن‌ها را نشان می‌دهد.

آنتن پیشنهادی شامل بخش‌های زیر می‌باشد: تغذیه GCPW به همراه انتقال پهن باند آن، آنتن شیبوری قطاعی صفحه H و یک صفحه زمین بزرگ. پهنای باند کاری در موجبر SIW به پهنای باند تک مود محدود شده است. پهنای باند تک مود در موجبر SIW بین فرکانس قطع مود TE_{10} به عنوان فرکانس پایین و فرکانس قطع مود TE_{20} به عنوان فرکانس بالا در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از تیغه، فرکانس قطع پایین کمتر شده و فرکانس قطع بالا تغییر زیادی نمی‌کند، به همین دلیل است که با استفاده از تیغه، پهنای باند افزایش

$$a = w - 1.08 \frac{d^2}{w} + 0.1 \frac{d^2}{w} \quad (2)$$

که در آن w عرض موجبر SIW و a عرض موجبر مستطیلی معادل پر شده با دی‌الکتریک می‌باشد.

برای حداقل‌سازی تلفات نشتی از فاصله بین وایهای مجاور در یک موجبر SIW، باید شرایط زیر برقرار باشند.

$$d < \lambda_g / 5, \quad S \leq 2d \quad (3)$$

که در آن λ_g طول موج هدایت شده است و به صورت زیر می‌باشد.

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{(\epsilon_r \omega^2 / c^2) - (\pi/a)^2}} \quad (4)$$

در محاسبه مقدار ω موجود در رابطه فوق از حداکثر فرکانس کاری استفاده می‌شود، به عبارت دیگر ω طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\omega = 2\pi f_{\max} \quad (5)$$

این رابطه توسط رابطه تعریف شده برای به‌دست آوردن طول موج هدایت شده در یک موجبر مستطیلی حاصل می‌شود که به صورت زیر می‌باشد.

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \quad (6)$$

برای مود غالب TE_{10} در یک موجبر مستطیلی پر شده با دی-

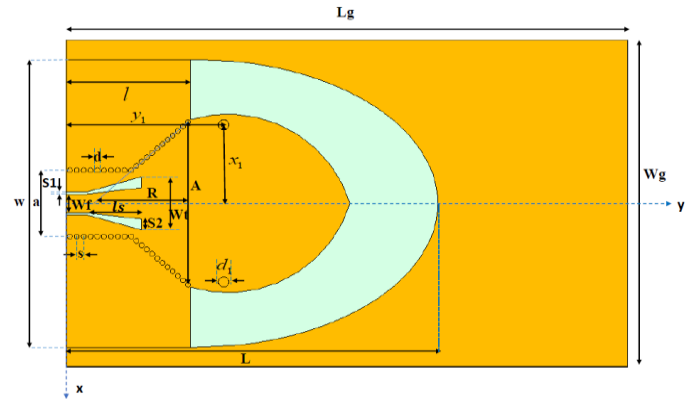
الکتریک با قرار دادن $f_c = \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_r}}$ ، $\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}f}$ در رابطه (۶)،

طول موج هدایت شده در رابطه (۴) به دست می‌آید که همان طول موج هدایت شده در موجبر SIW می‌باشد. همانطور که قبل‌تر نیز اشاره شد یک موجبر SIW معادل با یک موجبر پر شده با دی‌الکتریک می‌باشد در صورتی که رابطه (۲) بین عرض موجبرها برقرار باشد.

همانطور که در بخش (۲-۱) نیز اشاره شد، پهنای باند تک مود در موجبر SIW به فاصله فرکانسی بین فرکانس قطع مدهای اول و دوم محدود می‌شود، لذا جهت افزایش پهنای باند، باید این فاصله فرکانسی افزایش یابد. در این مقاله به استفاده از ساختار GCPW به همراه انتقال‌های مثلی شکل با ابعاد مناسب، پهنای باند تک مود افزایش یافته است.

آنتن‌های شیپوری SIW ارائه شده تا کنون، از تغذیه‌های مختلفی همچون پراب کواکسیال، مایکرواستریپ، GCPW و غیره استفاده کرده‌اند. آنتن طراحی شده در این مقاله نیز از تغذیه GCPW استفاده می‌کند. با به‌کارگیری شکاف‌های مثلی شکل به عنوان مبدل امپدانس، یک انتقال GCPW به SIW پهن‌بند محقق می‌شود [۱۳]. ساختار GCPW به همراه انتقال مثلی شکل بین SIW و GCPW

می‌یابد. در این مقاله به جای استفاده از تیغه در موجبر، با به‌کار بردن تغذیه GCPW به همراه یک انتقال پهن‌بند، پهنای باند تک مود وسیعی حاصل شده و اندازه ساختار $(3.38\lambda_0 \times 2.65\lambda_0 \times 0.14\lambda_0)$ می‌باشد.



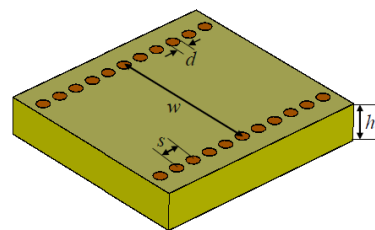
شکل (۱): ساختار آنتن SIW پیشنهادی

استفاده نکردن از تیغه در ساختار آنتن پیشنهادی، ساخت آن را تا حد زیادی آسان کرده است. ضخامت کوچک آنتن پیشنهادی منجر به تطبیق ضعیفی بین دهانه آنتن و فضای آزاد می‌گردد و تشعشع به عقب ناخواسته ایجاد می‌کند. به منظور غلبه بر این مشکل، مشابه با آنچه برای آنتن معرفی شده در [۹] ارائه شده، از یک انتقال فلزی چاپ شده روی دی‌الکتریک گسترش یافته در مقابل آنتن استفاده کرده‌ایم. به علاوه دو پست فلزی در دهانه آنتن جهت بهبود تطبیق امپدانس بین دهانه آنتن و فضای آزاد به کار رفته‌اند.

۲-۲- ساختار GCPW

به طور کلی یک موجبر SIW را می‌توان با موجبر مستطیلی معمولی پر شده با دی‌الکتریک مدل‌سازی کرد. اگر یک موجبر مستطیلی پر شده با دی‌الکتریک با عرض a ، ارتفاع b و ثابت دی‌الکتریک ϵ_r را در نظر بگیریم که در آن مود TE_{10} منتشر شود، فرکانس قطع آن طبق رابطه زیر قابل محاسبه است.

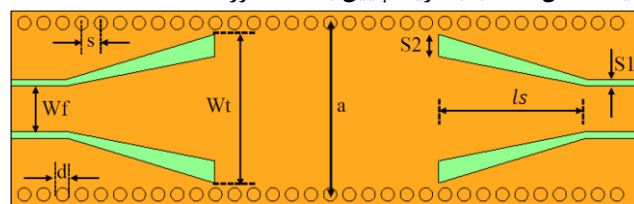
$$f_c = \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$



شکل (۲): ساختار موجبر SIW

برای آن که موجبر SIW نیز دارای همان فرکانس قطع باشد، از معادل‌سازی استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، رابطه‌ای بین عرض موجبر مستطیلی پر شده با دی‌الکتریک و عرض موجبر SIW برقرار است. رابطه عرض معادل با توجه به شکل (۲) به صورت زیر است [۱۲].

در شکل (۳) نشان داده شده است. با استفاده از این ساختار می‌توان یک انتقال مناسب با هزینه پایین به دست آورد.



شکل (۳): ساختار موجبر GCPW به همراه انتقال آن

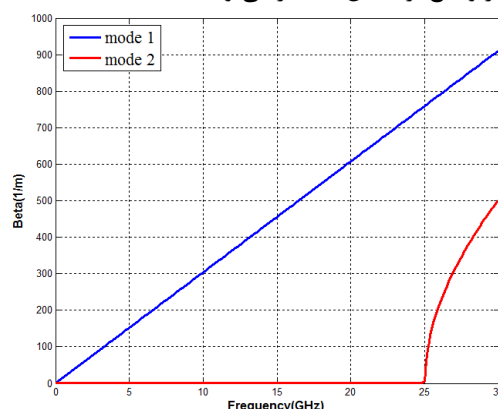
ابعاد وایا از طریق بالاترین فرکانس کاری تعیین می‌شود. بر اساس (۳)، $d = 1\text{mm}$ و $S = 1.5\text{mm}$ انتخاب شده است. فاصله‌های W_f و S_1 نیز باید طوری طراحی شوند که خط GCPW دارای امپدانس مشخصه 50Ω باشد. طول شکاف مثلثی شکل نیز $\lambda/4$ در فرکانس مرکزی می‌باشد که در آن $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ است. نمونه ای از موجبر نشان داده شده در شکل (۳)، طراحی و شبیه‌سازی شده است. مقادیر ابعاد نشان داده شده در این شکل پس از بهینه‌سازی بر حسب میلی‌متر در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): ابعاد ساختار موجبر GCPW طراحی شده (ابعاد mm)

W_f	S_1	S_2	l_s	W_t	a
3.3	0.48	1.78	10.55	10.37	13.16

از آن جایی که پهنای باند ساختار بخش موجبر قبل از دهانه آنتن در پهنای باند کل آنتن محدودیت ایجاد می‌کند، لذا باید در این بخش ساختاری در نظر گرفته شود که دارای پهنای باند کاری گسترده‌ای باشد. از طرفی پهنای باند کاری بخش موجبر بین فرکانس قطع اول و دوم در نظر گرفته می‌شود و این پهنای باند تک‌مود می‌باشد.

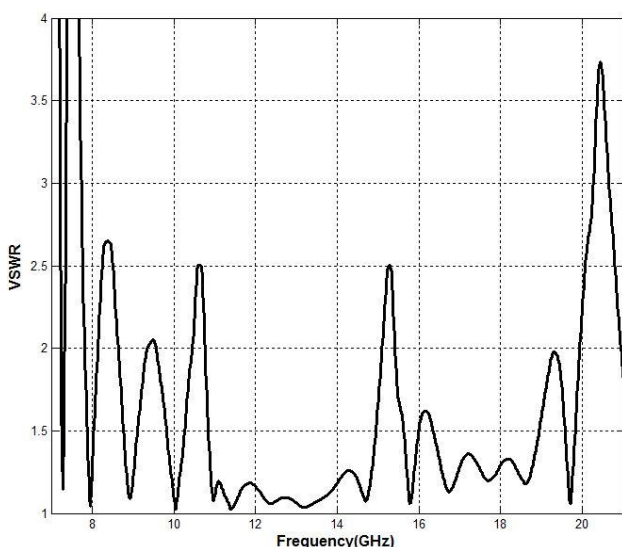
ثابت انتشار دو مود اول بر حسب فرکانس برای ساختار نشان داده شده در شکل (۳) توسط نرم‌افزار HFSS رسم شده و در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، از فرکانس صفر تا ۲۵ گیگاهرتز تنها یک مود قابلیت انتشار دارد. بنابراین یک پهنای باند تک‌مود بسیار وسیع برای این ساختار می‌تواند به دست آید.



شکل (۴): ثابت انتشار دو مود اول بر حسب فرکانس برای ساختار

شکل (۳)

در واقع ابتدا سعی شده محدودیتی که توسط بخش موجبر به کل ساختار اعمال می‌شود برطرف شود و ساختاری قبل از باز شدن دهانه آنتن قرار گیرد که دارای پهنای باند کاری (پهنای باند تک مود) وسیعی باشد؛ سپس بعد از برطرف کردن این محدودیت برای تطبیق دهانه آنتن با فضای آزاد از انتقال فلزی چاپی روی دی‌الکتریک گسترش یافته در دهانه آنتن استفاده می‌شود.



شکل (۵): VSWR شبیه‌سازی شده موجبر نشان داده شده در شکل (۳)

۲-۳- آنتن شیبوری قطاعی صفحه H

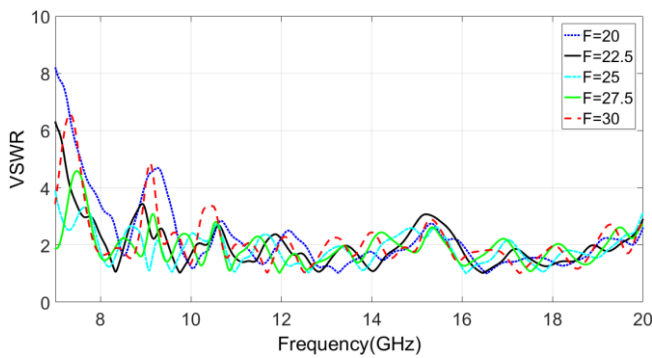
بازشدگی ابعاد موجبر مستطیلی در جهت میدان مغناطیسی H با ثابت نگه داشتن سایر ابعاد، یک آنتن شیبوری قطاعی صفحه H را پدید می‌آورد. برای یک آنتن شیبوری معمولی رابطه‌ای بین طول محوری R و عرض دهانه آنتن A وجود دارد. بر اساس رابطه زیر توزیع فاز در امتداد صفحه H تقریباً می‌تواند یکنواخت باشد و یک بهره بهینه به دست آید [۱۴].

$$A = \sqrt{3\lambda R} \quad (7)$$

رابطه فوق می‌تواند جهت تخمین زدن ابعاد دهانه آنتن شیبوری SIW به کار رود.

امپدانس ورودی آنتن به امپدانس مرجع ۵۰ اهم تطبیق شده است. در واقع ابعاد ساختار GCPW طوری تعیین می‌شود که دارای امپدانس مشخصه 50Ω باشد.

برای تطبیق امپدانس بهتر بین ساختار SIW و دهانه آنتن شیبوری، دهانه آنتن کمی قبل از اتمام انتقال مثلثی شکل، آغاز شده است. با این کار انتقال نرم‌تری بین دو پله امپدانس صورت گرفته و پهنای باند امپدانس افزایش یافته است.

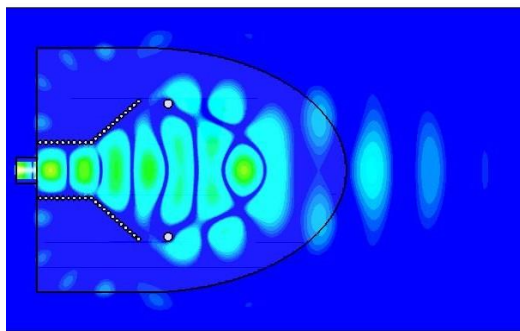


شکل (۸): بررسی اثر پارامتر F بر روی VSWR

سپس با توجه به مطالعه پارامتری انجام شده برای y_0 و F مقدار مناسبی را به عنوان مقدار اولیه انتخاب می‌کنیم. مقدار اولیه x_0 نیز با توجه به رابطه (۸) و جایگذاری نقاط x_p و y_p به دست می‌آید. در نهایت پس از بهینه‌سازی پارامترها به صورت زیر به دست آمده‌اند.

$$x_0 = 7.3\text{mm}, y_0 = 32\text{mm}, F = 25.2\text{mm}$$

انتقال فلزی چاپ شده روی دی‌الکتریک گسترش یافته در مقابل دهانه آنتن برای به دست آوردن انتقالی آرام از دهانه هورن به فضای آزاد و VSWR پایین در محدوده فرکانسی وسیع به کار رفته است. با استفاده از این انتقال، توزیع میدان در دهانه آنتن تغییر کرده و پارامتر نسبت تشعشع جلو به عقب ($FTBR^7$) الگوی تشعشعی بهبود می‌یابد. به عنوان نمونه توزیع میدان الکتریکی در دهانه آنتن در فرکانس 12GHz در شکل (۹) نشان داده شده است. دو پست فلزی به کار رفته در دهانه آنتن نیز به عنوان المان‌های تطبیق عمل می‌کنند و معادل المان‌های راکتانسی هستند که اندوکتانس آن‌ها وابسته به پارامترهای موقعیت و قطر پست‌ها می‌باشد که این پارامترها از طریق شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به دست آمده‌اند.



شکل (۹): نمونه توزیع میدان الکتریکی در فرکانس 12GHz

دی‌الکتریک به کار رفته در آنتن نیز همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده به صورت یک نصف بیضی با قطرهای $W/2$ و d_2 ادامه می‌یابد. مقادیر بهینه شده برای این پارامترها به صورت زیر هستند.

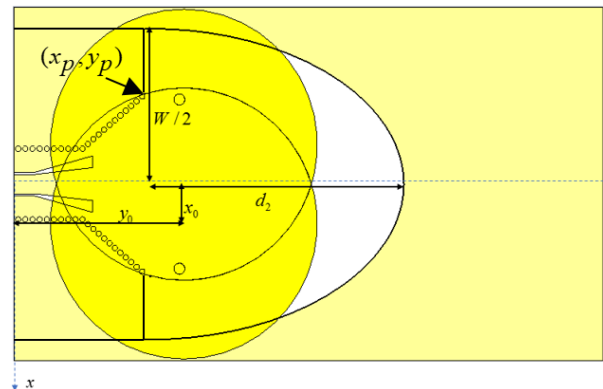
$$W/2 = 28.9\text{mm}, d_2 = 47.9\text{mm}$$

آنتن شیپوری SIW طراحی شده روی یک صفحه زمین بزرگ قرار گرفته است. چنین آنتن‌هایی مناسب برای هواپیماها، موشک‌ها، وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین و غیره می‌باشند. ابعاد بهینه شده

شکل (۶)، هندسه انتقال فلزی منحنی شکل چاپی روی دی‌الکتریک گسترش یافته پس از دهانه آنتن را نشان می‌دهد. این شکل، مشابه انتقال چاپی ارائه شده در [۹]، از تقاطع دو دایره با شعاع F به دست آمده است. مراکز دایره‌ها در $\pm x_0$ و y_0 قرار دارند و در رابطه زیر صدق می‌کنند.

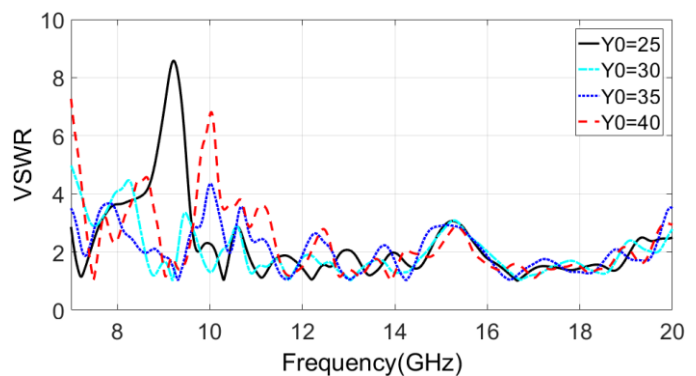
$$(x \mp x_0)^2 + (y - y_0)^2 = F^2 \quad (۸)$$

این پارامترها (x_0 , y_0 , F)، به گونه‌ای تعیین شده‌اند که بخش منحنی شکل در نزدیکی آخرین وایهای موجود در ساختار به بخش مستطیلی شکل متصل شود. از این رو، نقاطی با مختصات معلوم (انتهای آخرین وایهای موجود در دهانه آنتن) روی دایره‌ها در نظر می‌گیریم. مختصات نقاط معلوم $x_p = a/2 + d/2 + 11S \sin \alpha$ و $y_p = l = 9S + 11S \cos \alpha + 1.25d$ می‌باشد که در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. که در آن α زاویه باز شدگی آنتن بوده و پارامترهای a و S و d روی شکل (۱) مشخص شده‌اند. در واقع بخش منحنی شکل در نقاط $\pm x_p$ و y_p به بخش مستطیلی شکل متصل می‌شود و این نقاط روی دایره‌های تشکیل دهنده بخش منحنی شکل قرار دارند.



شکل (۶): هندسه انتقال چاپی روی دی‌الکتریک گسترش یافته

ابتدا تاثیر ابعاد انتقال فلزی منحنی شکل روی آنتن بررسی شده است. اثر تغییرات پارامترهای y_0 و F روی تطبیق امپدانس آنتن به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



شکل (۷): بررسی اثر پارامتر y_0 بر روی VSWR

برای آنتن پیشنهادی بر حسب میلی‌متر در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): ابعاد آنتن پیشنهادی (ابعاد mm)

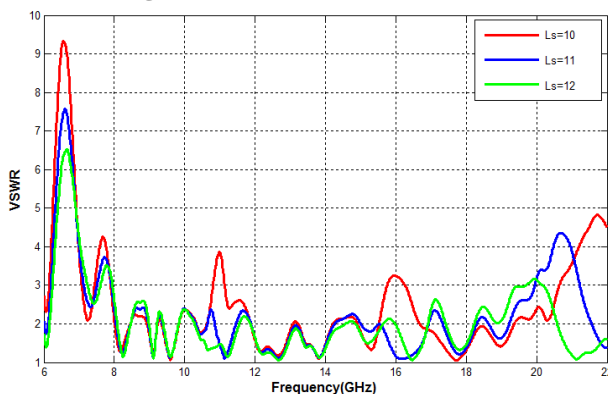
W_f	S_1	S_2	l_s	W_t	a
3.6	0.4	2.19	10.91	10.52	13.16
S	d	A	R	l	x_1
1.35	1	32.58	18.86	24.65	15.74
y_1	d_1	W	L	Wg	Lg
31.2	2.09	57.82	73.62	65.82	111.2

۳- نتایج به دست آمده

۳-۱- بررسی اثر پارامترهای مختلف

قبل از انجام بهینه‌سازی، جهت بررسی اثر قسمت‌های مختلف آنتن طراحی شده به بررسی پارامترهای مختلف پرداخته‌ایم تا مقدار مناسبی را به عنوان مقدار اولیه مربوط به پارامترها در نظر بگیریم. در این بخش به دو نمونه اشاره می‌کنیم.

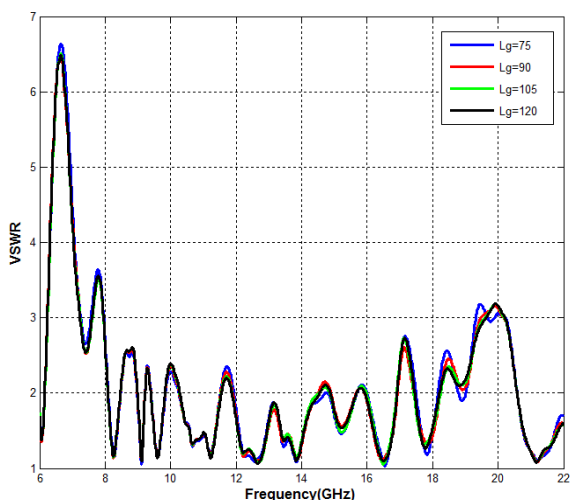
یکی از بخش‌های مهم در تطبیق امپدانس همانطور که قبل‌تر به آن اشاره شد، انتقال مثلثی شکل می‌باشد. بدین منظور اثر تغییرات پارامتر l_s ، که به عنوان طول انتقال مثلثی شکل تعریف شده، بر روی تطبیق امپدانس در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود با انتخاب مقدار $l_s = 11mm$ تطبیق امپدانس مناسب در پهنای باند وسیع‌تری به دست می‌آید. (این مقدار به عنوان مقدار اولیه در نظر گرفته می‌شود و سپس بهینه‌سازی انجام می‌شود. پس از بهینه‌سازی مقدار $l_s = 10.91mm$ به دست می‌آید).



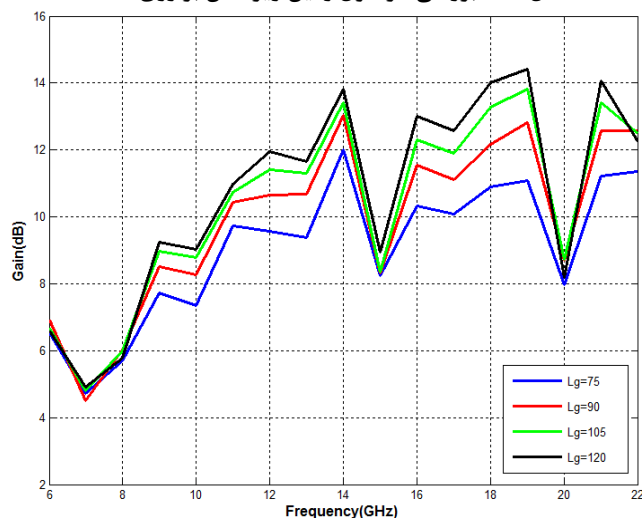
شکل (۱۰): بررسی اثر پارامتر l_s بر روی VSWR

اثر اندازه صفحه زمین بر روی پهنای باند امپدانس و حداکثر بهره بررسی شده و به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود اندازه صفحه فلزی زیر آنتن تاثیر زیادی روی VSWR ندارد، تنها با افزایش زیاد طول صفحه زمین مقدار VSWR کمی افزایش می‌یابد. اما همانطور که از شکل (۱۲) استنباط می‌شود، با افزایش طول صفحه زمین زیر آنتن، حداکثر بهره آن افزایش می‌یابد. از این رو، با توجه به نتایج به دست آمده در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) $l_g = 120mm$ به عنوان مقدار اولیه

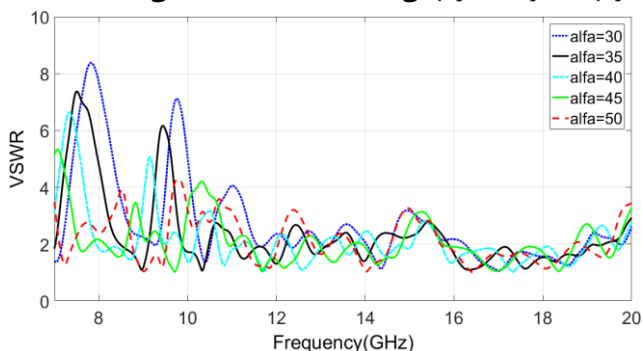
انتخاب شده و سپس بهینه‌سازی انجام می‌شود. پس از بهینه‌سازی مقدار $l_g = 111.2mm$ برای ساختار پیشنهادی به دست می‌آید.



شکل (۱۱): بررسی اثر طول زمین زیر آنتن بر روی VSWR



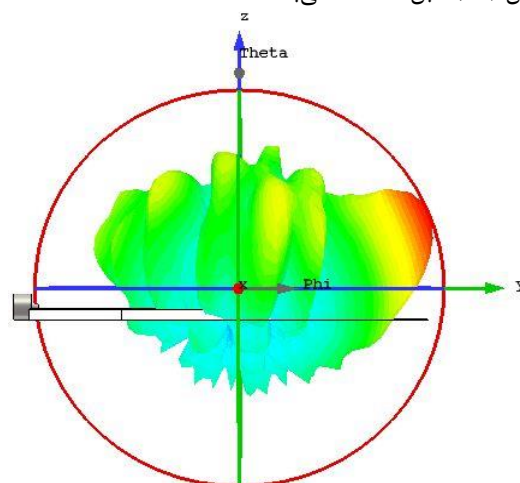
شکل (۱۲): بررسی اثر طول زمین زیر آنتن بر روی حداکثر بهره آنتن اثر تغییرات زاویه بازشدگی آنتن پیشنهادی روی تطبیق امپدانس آنتن در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به بررسی پارامتری مقدار مناسبی به عنوان مقدار اولیه در نظر گرفته می‌شود سپس پس از بهینه‌سازی مقدار نهایی ($\alpha = 40.8^\circ$) به دست می‌آید.



شکل (۱۳): بررسی اثر زاویه بازشدگی آنتن بر روی VSWR

استفاده از صفحه زمین بزرگ در زیر آنتن، سبب انحراف پرتو اصلی با زاویه‌ای حدود ۳۵ درجه نسبت به صفحه XY شده است.

نمونه‌ای از الگوی تشعشی سه بعدی که این انحراف را نشان می‌دهد، در شکل (۱۴) قابل مشاهده می‌باشد.



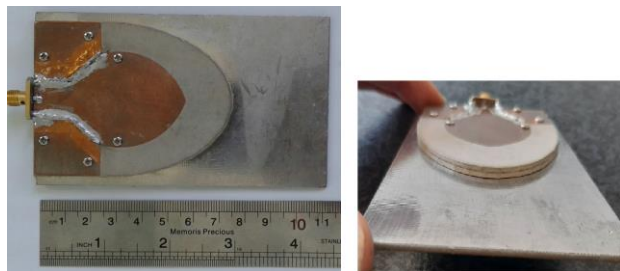
شکل (۱۴): نمونه الگوی تشعشی سه بعدی در فرکانس 15GHz

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

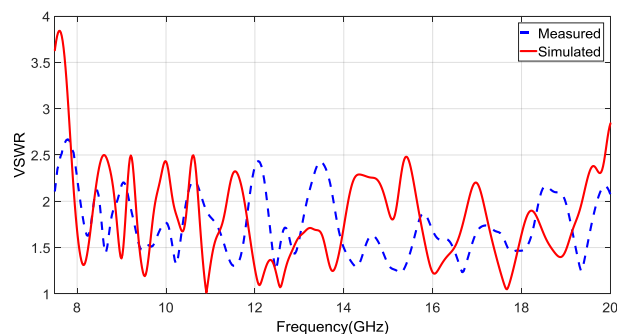
آنتن طراحی شده همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، دارای اندازه $W \times L = 57.8mm \times 73.6mm$ می‌باشد. این آنتن توسط نرم افزار CST شبیه‌سازی و با استفاده از دو لایه راجرز ۶۰۲ با $\epsilon_r = 2.94$ و ضخامت $1.524mm$ ساخته شده است. نمونه آنتن ساخته شده از نمای بالا و روبرو در شکل (۱۵) قابل مشاهده است. شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، آنتن پیشنهادی در باند فرکانسی ۸ تا ۱۹/۵ گیگاهرتز دارای VSWR کمتر از ۲/۵ می‌باشد. در نتیجه، آنتن طراحی شده بدون استفاده از تیغه، تطبیق امپدانس خوبی را در پهنای باند وسیعی ایجاد کرده است. الگوهای تشعشی نرمالیزه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن شیپوری SIW پیشنهادی در هر دو صفحه H و E در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

نمودار حداکثر بهره شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بر حسب فرکانس نیز در شکل (۱۸) و نمودار شبیه‌سازی راندمان آنتن پیشنهادی در شکل (۱۹) قابل مشاهده است.

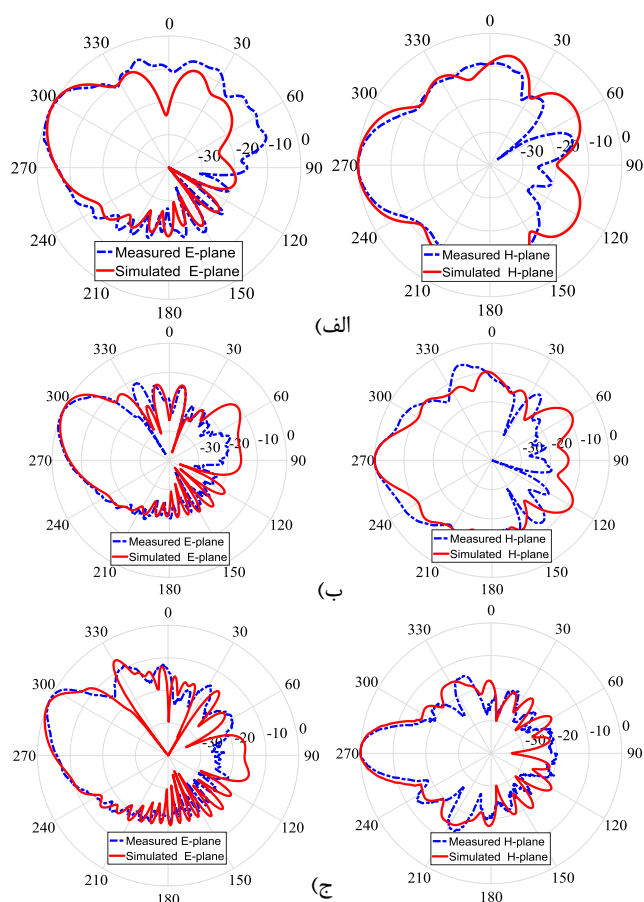
آنتن شیپوری SIW معرفی شده در این مقاله، بدون استفاده از تیغه دارای پهنای باند بسیار وسیعی می‌باشد. پهنای باند نسبی آنتن ۸۴ درصد است، در حالی که در آنتن‌های شیپوری بدون تیغه ای که تاکنون گزارش شده، پهنای باند نسبی کمتر از ۴۰ درصد است، حتی در [1]، با استفاده از ۹ پله تیغه ۷۶ درصد پهنای باند نسبی حاصل شده است. ساخت این آنتن نیز نسبت به آنتن‌های شیپوری SIW دارای تیغه بسیار ساده‌تر است. مقایسه بین پهنای باند نسبی، به همراه ضخامت زیرلایه به کار رفته در آنتن‌های گزارش شده با آنتن پیشنهادی و نیز تعداد پله‌های موجود در زیرلایه، در جدول (۳) قابل مشاهده است.



شکل (۱۵): نمونه آنتن ساخته شده از نمای بالا و روبرو



شکل (۱۶): VSWR: شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی



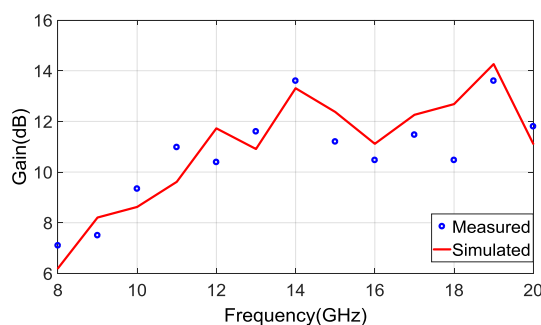
شکل (۱۷): الگوهای تشعشی نرمالیزه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی (الف) 10GHz (ب) 14GHz (ج) 18GHz

هستند، پهنای باند وسیعی حاصل می‌شود. آنتن طراحی شده بدون استفاده از تیغه در باند فرکانسی ۸ گیگاهرتز تا ۱۹/۵ گیگاهرتز دارای VSWR کمتر از ۲/۵ بوده و پهنای باند نسبی آن ۸۴ درصد است. ساخت آنتن پیشنهادی نسبت به ساختارهای دارای تیغه بسیار آسان‌تر می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که حداکثر بهره در کل پهنای باند بیش از ۶/۲ دسیبل می‌باشد. همچنین، آنتن پیشنهادی الگوهای تشعشعی پایداری را در محدوده فرکانسی به دست آمده، نشان می‌دهد.

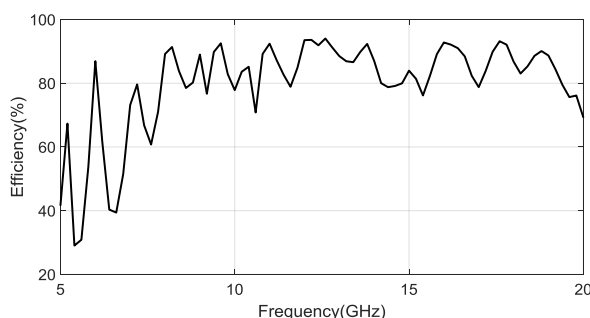
از آن جایی که ایده مقاله استفاده از تغذیه GCPW با انتقال مثلثی شکل آن در آنتن شیپوری SIW می‌باشد، برای بهبود بیشتر می‌توان وایه‌های بخش موجبری را در امتداد بخش مثلثی شکل قرار داد. با این کار پهنای باند بیشتری حاصل می‌شود. همچنین از آرایه‌ای از این آنتن می‌توان استفاده نمود.

مراجع

- [1] A. R. Mallahzadeh and S. Esfandiarpour, "Wideband H-plane horn antenna based on ridge substrate integrated waveguide (RSIW)," IEEE antennas and wireless propagation letters, vol. 11, pp. 85-88, 2012.
- [۲] عریضی، سلامی کناری، چاپچی‌زاده، "بهینه‌سازی و افزایش پهنای باند پیونده خط شاخه‌ای موجبری مجتمع شده در زیرلایه به روش حداقل مربعات"، مجله برق و الکترونیک ایران، جلد (۲) ۱۲، ۸۵-۹۴، ۱۳۹۴.
- [3] Y. Cai, Z. Qian, W. Cao, Y. Zhang, J. Jin, L. Yang, et al., "Compact wideband SIW horn antenna fed by elevated-CPW structure," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, pp. 4551-4557, 2015.
- [۴] حسینی، کمجانی، "طراحی و ساخت آنتن شیپوری SIW با استفاده از لنز لوبیگ"، مجله برق و الکترونیک ایران، جلد (۲) ۱۵، ۹۷-۱۰۵، ۱۳۹۷.
- [5] H. Wang, D.-G. Fang, B. Zhang, and W.-Q. Che, "Dielectric Loaded Substrate Integrated Waveguide (SIW) H-Plane Horn Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, pp. 640-647, 2010.
- [6] M. Esquius-Morote, B. Fuchs, J.-F. Zürcher, and J. R. Mosig, "Novel thin and compact H-plane SIW horn antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, pp. 2911-2920, 2013.
- [7] Y. Zhang, Y. Cai, H. Zhang, T. Yang, W. Ni, and J. Jin, "Broadband implementation of SIW horn antenna with air-via dielectric slab," in Antennas and Propagation (APCAP), 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on, 2015, pp. 563-567.
- [8] Y. Cai, Y. Zhang, Z. Qian, W. Cao, and L. Wang, "Design of compact air-vias-perforated SIW horn antenna with partially detached broad walls," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, pp. 2100-2107, 2016.
- [9] Y. Zhao, Z. Shen, and W. Wu, "Wideband and low-profile H-plane ridged SIW horn antenna mounted on a large conducting plane," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, pp. 5895-5900, 2014.
- [10] J. Li, Y. Huang, R. Wang, Y. Wang, G. Wen, and H. Zhang, "Wideband SIW H-plane dual-ridged end-fire



شکل (۱۸): نمودار حداکثر بهره شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی



شکل (۱۹): نمودار راندمان شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی

جدول (۳): مقایسه آنتن‌های شیپوری SIW

مرجع	فرکانس مرکزی (GHz)	ضخامت آنتن	تعداد پله های تیغه	پهنای باند نسبی (درصد)	محدوده حداکثر بهره (dB)
[5]	27	$0.23\lambda_0$	0	1.8	11.68
[6]	14.8	$0.10\lambda_0$	0	19	6.4-8
[3]	20.7	$0.27\lambda_0$	0	32	8-10.4
[7]	20	$0.31\lambda_0$	0	40	8-9.8
[6]	22.7	$0.32\lambda_0$	0	40	8-10.4
[1]	29	$0.25\lambda_0$	9	76	5-10
ساختار پیشنهادی	13.75	$0.14\lambda_0$	0	84	6.2-14.4
[9]	12.3	$0.13\lambda_0$	3	93	2.8-15
[10]	12	$0.25\lambda_0$	3(dual)	100	7-13
[11]	12.55	$0.13\lambda_0$	3	103	5.5-14

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله یک آنتن شیپوری مبتنی بر فناوری موجبری مجتمع شده در زیرلایه (SIW) ارائه کرده که توسط GCPW تغذیه شده است. آنتن پیشنهادی متشکل از دو لایه یکسان با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 2.94$ و ضخامت 1.524mm می‌باشد که با استفاده از زیرلایه راجرز ۶۰۰۲ ساخته شده است. ضخامت کل آنتن 3.048mm بوده و اندازه آنتن پیشنهادی $(3.38\lambda_0 \times 2.65\lambda_0 \times 0.14\lambda_0)$ می‌باشد. با به‌کار بردن انتقال‌های مناسب بین بخش‌هایی که دارای جهش‌های امپدانسی

- antenna for conformal application," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 59, pp. 286-292, 2017.
- [11] Y. Zhao, Z. Shen, and W. Wu, "Conformal SIW H-plane horn antenna on a conducting cylinder "IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 14, pp. 1271-1274, 2015.
- [12] Z. Mansouri, M. Kishihara, F. Zarrabi, F. Geran, and T. Hesarak, "Broadband half mode substrate integrated waveguide cruciform coupler," in The Second Iranian Conference on Engineering Electromagnetics (ICEEM 2014), 2014, pp. 595-599.
- [13] S. Lin, S. Yang, A. E. Fathy, and A. Elsherbini, "Development of a novel UWB Vivaldi antenna array using SIW technology," Progress In Electromagnetics Research, vol. 90, pp. 369-384, 2009.
- [14] C. A. Balanis, Antenna theory: analysis and design: John Wiley & Sons, 2016.

زیر نویس‌ها

- ¹ Substrate Integrated Waveguide
- ² Grounded Co-Planar Waveguide
- ³ Voltage Standing Wave Ratio
- ⁴ Ridged structures
- ⁵ Printed Circuit Board
- ⁶ Ridge Substrate Integrated Waveguide
- ⁷ Front To Back Ratio