

طراحی و شبیه‌سازی آنتن شیپوری ESIW صفحه H با بهره بالا و پهنای باند بهبودیافته

سید حسین حقیرالسادات و محمدحسن نشاطی

ویژگی‌های خاصی را دارا هستند. روش جدید در طراحی موجبرهای مسطح، فناوری موجبر مجتمع شده با زیرلایه بدون عایق^۳ (ESIW) است که در آن بخش عمده‌ای از دی‌الکتریک ساختار به طور کامل حذف می‌شود. استفاده از این نوع SIW در عمل باعث کاهش تلفات موجبر شده و بازده انتقال را افزایش می‌دهد. در آنتن‌های پیاده‌سازی شده با این فناوری نیز مشخصات تشعشی نسبت به نمونه معمولی مشابه SIW بهبود می‌یابند [۳] تا [۶].

آنتن‌های شیپوری از پرکاربردترین آنتن‌ها در محدوده فرکانس‌های مایکروویو و امواج میلی‌متری هستند. دارا بودن مزایایی از جمله بهره نسبتاً بالا، پهنای باند زیاد و الگوی تشعشی متقارن باعث شده که طراحی و بهینه‌سازی مشخصات تشعشی این آنتن‌ها همواره مورد توجه قرار داشته باشد. آنتن‌های شیپوری به طور گسترده‌ای در زمینه تغذیه آنتن‌های بازتابنده، ردیابی ماهواره‌ها و سیستم‌های مخابراتی کاربرد دارند [۷]. به کمک فناوری SIW می‌توان موجبری را چنان طراحی کرد که علاوه بر مسطح بودن، تمام خصوصیات یک موجبر معمولی فلزی را داشته باشد. این اساس می‌توان برخی از آنتن‌ها که بخش اصلی آنها را یک موجبر تشکیل می‌دهد، با استفاده از فناوری SIW پیاده‌سازی کرد. به همین جهت طراحی آنتن شیپوری صفحه H که از طریق بازشدن دهانه موجبر مستطیلی در جهت میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود، با فرایند SIW امکان‌پذیر است. در این صورت ساختار حجیم آنتن شیپوری با حفظ مشخصات تشعشی، به ساختاری صفحه‌ای تبدیل می‌شود [۳].

الگوی تشعشی پهن در صفحه E و پهنای باند فرکانسی محدود، از معایب اصلی آنتن شیپوری با فناوری SIW می‌باشد [۷]. تا کنون پژوهش‌های زیادی در زمینه بهبود مشخصات این آنتن‌ها انجام شده است. در [۸] برای شرایط کاملاً یکسان، پارامترهای پراکندگی و تشعشی یک آنتن شیپوری صفحه H مبتنی بر دو فناوری SIW و ESIW با هم مقایسه شده‌اند. حذف دی‌الکتریک درون ناحیه شیپوری آنتن باعث بهبود تطبیق امپدانس و افزایش بهره در فرکانس کاری شده است. هرچند بارگذاری دی‌الکتریک در انتهای آنتن شیپوری توخالی، منجر به بهبود بهره شده است؛ اما این روش می‌تواند بازده تشعشی را به طور محسوسی کاهش دهد [۹]. در [۱۰] برای بهبود الگوی تشعشی آنتن در صفحه E از دوقطبی‌های الکتریکی در دهانه ساختار استفاده شده است. در واقع تشعشعات حاصل از دهانه و تشعشع دوقطبی‌های الکتریکی ساختار با نسبت مناسبی با یکدیگر ترکیب شده، به طوری که بهره آنتن در فرکانس کاری نسبت به آنتن شیپوری معمولی افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. پیاده‌سازی آنتن شیپوری با تکنولوژی ESIW در [۱۱] منجر به بهبود

چکیده: در این مقاله با استفاده از شکاف تشعشی، الگوی تابشی آنتن شیپوری SIW صفحه H با کاهش پهنای پرتو نیم‌توان در صفحه E بهبود یافته است. این شکاف‌ها می‌توانند علاوه بر حفظ ابعاد ساختار، تأثیر بسزایی بر روی مشخصات آنتن داشته باشند. قرارگرفتن صفحه بازتابنده در فواصل مناسبی از دهانه و شکاف‌ها نیز منجر به بهبود سطح پرتوهای فرعی و تشعشع آنتن در جهت معکوس می‌شود. سپس برای بهبود تطبیق امپدانس و افزایش پهنای باند امپدانس آنتن، دی‌الکتریک ساختار به طور کامل حذف گردیده و شکاف‌های غیر تشعشی در صفحه‌های بالا و پایین به آنتن اضافه می‌شوند. حذف عایق باعث افزایش پهنای باند آنتن نسبت به پهنای باند آنتن معمولی شیپوری SIW شده و اضافه کردن شکاف‌های تشعشی، بهره آنتن را نیز بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که آنتن پیشنهادی این مقاله، محدوده فرکانسی ۲۷٫۲ GHz تا ۲۸٫۳ GHz را پوشش داده و بهره آن نیز در این بازه بین ۱۰٫۱ dBi تا ۱۵٫۳ dBi با بازده تشعشی ۹۸٪ تغییر می‌کند. در انتها به منظور افزایش بهره آنتن، یک آرایه دوبعدی از آنتن پیشنهادی در صفحه H با ساختار تغذیه مناسب طراحی شده است.

کلیدواژه: آنتن شیپوری، موجبر مجتمع شده در زیرلایه، شکاف تشعشی، شکاف غیر تشعشی، صفحه بازتابنده.

۱- مقدمه

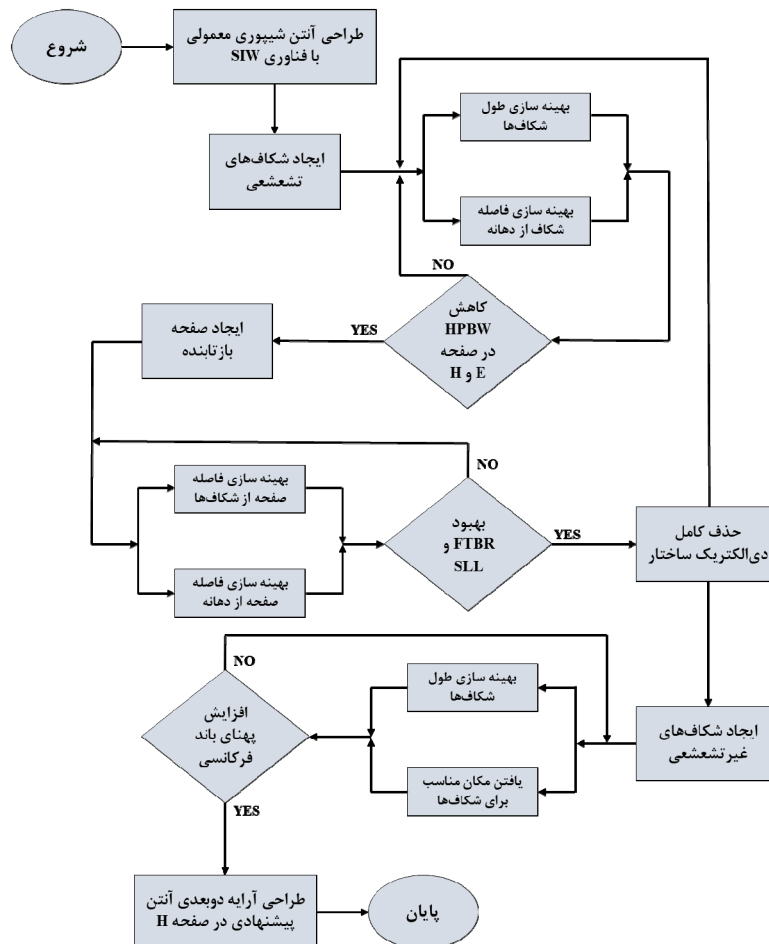
برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ میلادی، خط انتقال جدیدی به نام موجبر مجتمع شده در زیرلایه^۱ (SIW) برای کار در فرکانس‌های مایکروویو و امواج میلی‌متری معرفی شده است. این نوع موجبر، تلفیقی از خط انتقال ریزنوار^۲ و موجبر فلزی است. این ترکیب به گونه‌ای است که مزایای این دو خط انتقال در ساختار نهایی لحاظ و معایب آنها نیز حذف شده باشد. موجبر SIW از لحاظ ظاهری مانند یک خط ریزنوار است و ساختاری مسطح دارد و همچنین مانند موجبر فلزی عمل می‌کند. کاربرد این خط انتقال در طراحی آنتن‌ها و ادوات مایکروویوی از جمله مقسم توان، دوپلکسر، تزویج‌کننده جهتی و موارد دیگر است [۱] و [۲]. امروزه انواع مختلفی از خانواده این موجبرها معرفی و استفاده شده‌اند و هر یک

این مقاله در تاریخ ۱۳ شهریور ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

سید حسین حقیرالسادات، فارغ‌التحصیل رشته مهندسی برق - مخابرات، گرایش میدان و امواج، گروه مهندسی برق، دانشگاه مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، (email: haghrosadat.toranjii@gmail.com)

محمدحسن نشاطی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشگاه مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، (email: neshat@um.ac.ir)

1. Substrate Integrated Waveguide
2. Microstrip Line



شکل ۱: مراحل طراحی آنتن پیشنهادی به همراه نتایج به دست آمده در هر بخش.

ساختار در ناحیه موجبری و ناحیه بازشدگی آنتن شیپوری منجر به افزایش ۱/۸ برابری پهنای باند فرکانسی آنتن نسبت به یک آنتن شیپوری SIW با شکاف‌های تشعشی می‌شود. شکاف‌های غیر تشعشی نیز با قرارگیری در مکانی مناسب توانسته‌اند که پهنای باند فرکانسی آنتن را به بیشتر از ۲/۵ برابر افزایش دهند. در انتهای این مقاله به منظور کاهش HPBW در صفحه H، یک آرایه دوعنصری از آنتن پیشنهادی در این صفحه طراحی و شبیه‌سازی شده است. تمامی طراحی‌ها و شبیه‌سازی‌های مربوط به آنتن جدید پیشنهادی این مقاله با استفاده از نرم‌افزار HFSS انجام شده و به منظور افزایش اطمینان و بالابردن دقت شبیه‌سازی، نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار CST Studio Suit نیز صحت‌سنجی شده است.

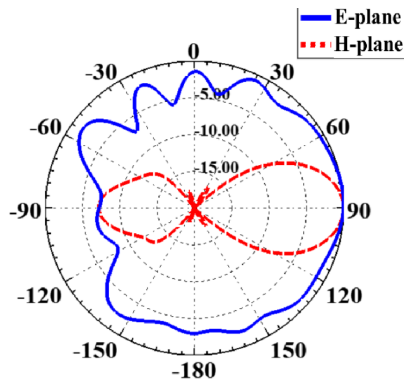
۲- ساختار آنتن پیشنهادی

شکل ۱ مراحل طراحی آنتن پیشنهادی را به همراه اهداف طراحی هر مرحله به صورت خلاصه نشان می‌دهد. در بخش اول، آنتن معمولی شیپوری SIW صفحه H به عنوان آنتن مرجع با ابعاد مناسب در محدوده فرکانسی ۲۸ GHz طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. در مرحله بعد با اضافه کردن شکاف‌های تشعشی در صفحه بالایی و پایینی ساختار، بهره آنتن افزایش می‌یابد. سپس با اضافه کردن صفحه بازتابنده به ضخامت ۰.۵ mm، سایر مشخصات تشعشی آنتن بهبود پیدا می‌کند. در ادامه به منظور بهبود تطبیق امپدانس و افزایش پهنای باند فرکانسی، دی‌الکتریک ساختار به طور کامل حذف شده و شکاف‌های غیر تشعشی به آنتن اضافه می‌شوند. در انتها نیز یک آرایه دوبعدی از آنتن پیشنهادی در صفحه H طراحی شده است.

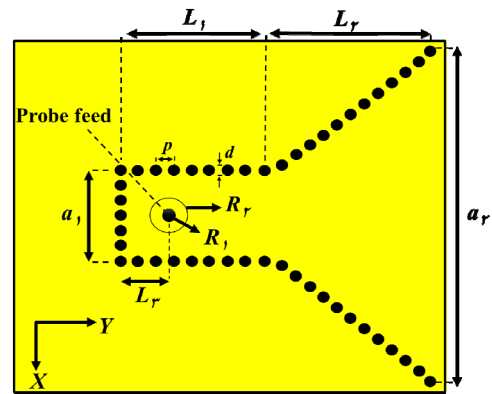
مشخصات تشعشی شده و استفاده از شکاف غیر تشعشی در ناحیه موجبری این آنتن، پهنای باند فرکانسی را بیش از شش برابر افزایش داده است. در [۱۲] با پیکسل‌بندی سطوح بالا و پایین آنتن شیپوری و حذف فلز مس در بعضی از این پیکسل‌ها بر اساس الگوریتم ژنتیک، برخی از مشخصات تشعشی نظیر بهره و نسبت تشعشع در جهت مستقیم به تشعشع در جهت معکوس بهبود یافته‌اند. همچنین استفاده از صفحه بازتابنده در دهانه شیپوری آنتن موجب بهبود الگوی تشعشی آنتن شیپوری از طریق کاهش سطح پرتوهای جانبی (SLL) و بهبود FTBR شده است [۱۳].

در این مقاله، مشخصات تشعشی آنتن شیپوری صفحه H در مراحل مختلفی به صورت مجزا بهبود می‌یابد. به طور کلی در آنتن‌های شیپوری معمولی، تشعشع تنها از طریق دهانه آنتن صورت می‌گیرد. اضافه کردن شکاف‌های تشعشی با طول و محل مناسب روی صفحات آنتن شیپوری، باعث می‌شود که تشعشع حاصل از شکاف‌ها با تشعشع مربوط به دهانه ساختار ترکیب شده و در نتیجه مشخصات آنتن بهبود پیدا کند. نشان داده می‌شود که شکاف‌های اضافه شده می‌توانند در مجموع پهنای پرتو نیم‌توان (HPBW)^۲ را در صفحه E، ۶۶ درجه و در صفحه H، ۲۲ درجه کاهش دهند. همچنین صفحه بازتابنده در فاصله مناسب از دهانه تشعشی آنتن قرار داده شده تا FTBR و سطح پرتو فرعی بهبود پیدا کنند و نهایتاً بهره آنتن افزایش یابد. علاوه بر این، حذف دی‌الکتریک

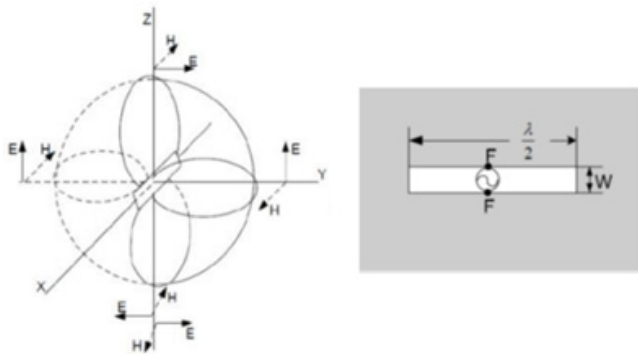
1. Side Lobe Level
2. Half Power Beam Width



شکل ۴: الگوی تشعشی آنتن مرجع شیپوری در دو صفحه E و H.



شکل ۲: آنتن معمولی شیپوری SIW صفحه H، ($a_1 = 7.6 \text{ mm}$ ، $a_r = 26 \text{ mm}$)، $L_1 = 9 \text{ mm}$ ، $L_2 = 15.4 \text{ mm}$ ، $L_r = 3 \text{ mm}$ ، $p = 1.25 \text{ mm}$ ، $d = 0.8 \text{ mm}$ ، $R_1 = 0.35 \text{ mm}$ و $R_2 = 1.15 \text{ mm}$.



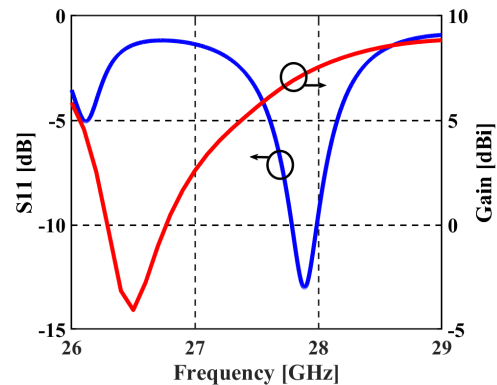
شکل ۵: آنتن شکافدار و میدان‌های تشعش یافته آن.

زمانی که شکاف‌های تشعشی بر روی آنتن شیپوری SIW اضافه می‌شوند، تشعش ساختار، علاوه بر دهانه از شکاف‌ها نیز انجام می‌گیرد. در واقع لازم است که تشعش حاصل از دهانه و شکاف‌های تشعشی با دامنه و فاز مناسب با هم ترکیب شوند تا مشخصات تشعشی آنتن در دو صفحه E و H بهبود پیدا کند. از آنجایی که هدف در این مرحله، بهبود الگوی تابشی آنتن در صفحه E است، پس بهتر است که این صفحه برای دهانه و شکاف‌های تشعشی مشترک باشد. بر همین اساس، طبق شکل ۲ تمامی شکاف‌ها در صفحه XY به صورت عرضی انتخاب می‌شوند.

به منظور این که تأثیر شکاف‌های تشعشی بر روی الگوی تابشی آنتن نسبت به دهانه به صورت کاملاً مجزا بررسی شود، در محیط شبیه‌سازی، دهانه تشعشی آنتن شیپوری به طور کامل با سطح فلزی مسدود شده و با اضافه کردن شکاف‌ها، تشعش آنها بررسی می‌شود. از آنجا که قرار است شکاف‌ها در فرکانس تشدید آنتن از نوع تشعشی باشند، پس لازم است که طول آنها (L_{sr}) نصف طول موج و مطابق (۱) تعیین شود [۷] که در آن λ_g طول موج، ϵ_r ثابت دی‌الکتریک، f فرکانس کاری آنتن، c سرعت نور فضای آزاد و a عرض موجبر تغذیه است

$$L_{sr} = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{\pi}{\sqrt{\epsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (1)$$

برای شروع این مرحله و انتخاب محل قرارگرفتن شکاف‌های تشعشی بر روی آنتن، لازم است که توزیع جریان سطحی آنتن بررسی شود. بر این اساس می‌توان بهترین مکان‌ها را برای ایجاد شکاف‌های تشعشی انتخاب نمود. شکل ۶ توزیع جریان سطحی را قبل از ایجاد شکاف‌های تشعشی به همراه مکان‌های پیشنهادی برای شکاف‌ها نشان می‌دهد. طبق این شکل، مکان‌های پیشنهادی برای شکاف‌ها در نقاطی است که توزیع جریان سطحی در آنجا نسبتاً ضعیف‌تر است. با قرارگرفتن شکاف‌ها در مراکز تجمع جریان سطحی، بیشتر توان موجود از محل این شکاف‌ها



شکل ۳: تغییرات S_{11} و بهره آنتن مرجع بر حسب فرکانس.

۲-۱ آنتن معمولی شیپوری SIW صفحه H

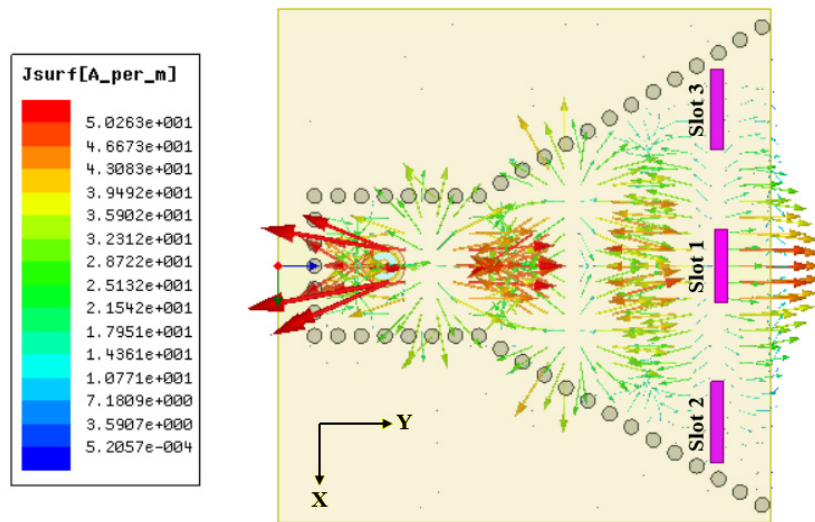
شکل ۲ ساختار هندسی آنتن معمولی شیپوری SIW صفحه H را به عنوان آنتن مرجع نشان می‌دهد. این آنتن بر روی زیرلایه TLY-062 با ضخامت 1.578 mm ، ثابت دی‌الکتریک 2.2 و تانژانت تلفات 0.001 طراحی شده است.

شکل ۳ تغییرات پارامتر S_{11} و بهره آنتن را بر حسب فرکانس نشان می‌دهد. این آنتن در فرکانس 27.8 GHz با حداکثر بهره 6.45 dBi کار می‌کند. الگوی تشعشی شبیه‌سازی شده آنتن در دو صفحه E و H نیز در شکل ۴ مشاهده می‌شود. پهنای پرتو نیم‌توان این آنتن در صفحه E، 119 درجه و در صفحه H، 44 درجه است. بالا بودن HPBW در دو صفحه E و H، مقادیر نامناسب FTBR و SLL و پهنای باند فرکانسی کم از مشکلات عمده این آنتن است.

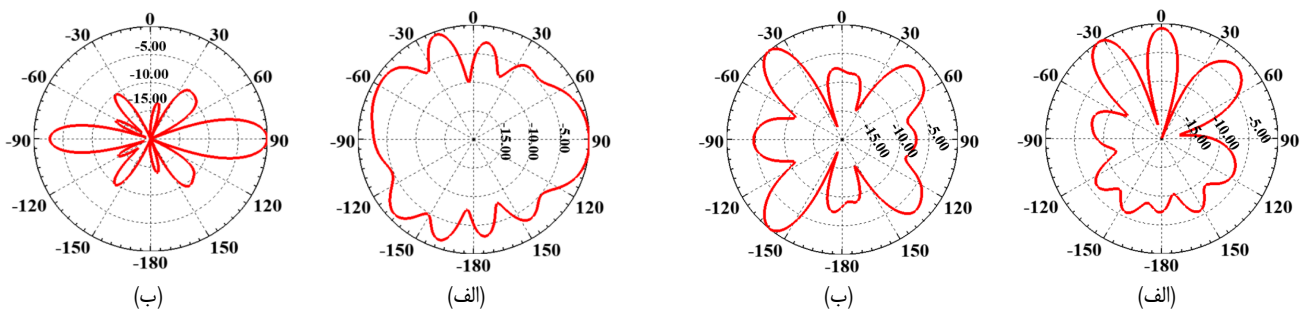
برای آنتن معمولی شیپوری SIW صفحه H، تشعش از طریق دهانه آنتن صورت می‌گیرد. از آنجایی که آنتن شیپوری با فناوری SIW در صفحه H پیاده‌سازی می‌شود، لذا الگوی تشعشی آنتن در این صفحه از طریق تغییر ابعاد دهانه قابل کنترل است. اما الگوی تشعشی این آنتن در صفحه E قابل کنترل نیست و HPBW زیادی دارد.

۲-۲ اضافه کردن شکاف‌های تشعشی

شکل ۵ یک آنتن شکافدار و میدان‌های تشعش یافته از آن را نشان می‌دهد. بنا بر اصل باینیت، دوقطبی مغناطیسی دوگان دوقطبی الکتریکی است. بر این اساس، میدان‌های الکتریکی ناشی از دوقطبی‌های مغناطیسی همواره در راستای عرض شکاف و میدان‌های مغناطیسی نیز در راستای طول شکاف در حال تغییر هستند [۷].



شکل ۶: توزیع جریان سطحی در فرکانس مرکزی آنتن، قبل از ایجاد شکاف‌های تشعشی به همراه مکان‌های پیشنهادی برای شکاف‌ها.



شکل ۸: الگوی تشعشی آنتن شیپوری با شکاف‌های تشعشی دوم و سوم در فرکانس کاری، (الف) صفحه yz و (ب) صفحه xy .

شکل ۷: الگوی تشعشی آنتن شیپوری با شکاف تشعشی اول در فرکانس کاری، (الف) صفحه yz و (ب) صفحه xy .

فاصله مناسب از شکاف اول در صفحات بالایی و پایینی آنتن قرار گرفته‌اند. در واقع با ترکیب مناسب پرتوهای جانبی حاصل از شکاف‌های اول تا سوم، راستای اصلی تشعشع از محور z به محور y منتقل می‌شود. شکل ۸ الگوی تشعشی آنتن را در صفحات E و H بعد از اضافه‌شدن شکاف‌های دوم و سوم در فرکانس کاری نشان می‌دهد.

۲-۲-۳ ترکیب تشعشعات حاصل از دهانه و شکاف‌های تشعشی

در این بخش، تشعشع حاصل از دهانه و شکاف‌های تشعشی با هم ترکیب شده و الگوی تابشی نهایی به دست می‌آید. زمانی که تشعشع تنها از طریق دهانه آنتن صورت می‌گیرد، پهنای پرتو نیم‌توان در دو صفحه E و H بسیار بزرگ است. با مسدودکردن دهانه و ایجاد شکاف‌های تشعشی، پهنای پرتو نیم‌توان آنتن در دو صفحه E و H به شدت کاهش پیدا می‌کند؛ اما SLL و FTBR مقادیر مناسبی ندارند. بنابراین دهانه و شکاف‌های تشعشی به تنهایی دارای مزایا و معایبی برای الگوی تابشی آنتن هستند و ترکیب این دو المان می‌تواند مزایای آنها را حفظ و معایب ساختار را حذف کند. شکل ۹ تغییرات S_{11} و بهره آنتن شیپوری را با شکاف‌های تشعشی بر حسب فرکانس نشان می‌دهد. آنتن در فرکانس ۲۷/۴ GHz با حداکثر بهره ۱۱/۸ dBi کار می‌کند که نسبت به آنتن شیپوری معمولی، مقدار بهره ۵/۴ dBi افزایش یافته است. شکل ۱۰ نیز الگوی تشعشی این آنتن را در دو صفحه E و H در فرکانس کاری نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، پهنای پرتو نیم‌توان آنتن با ایجاد شکاف‌های تشعشی در صفحه E ، ۶۶ درجه و در صفحه H ، ۲۲ درجه نسبت به یک آنتن شیپوری معمولی کاهش یافته است. SLL نیز در وضعیت مناسبی قرار دارد، اما تشعشع در جهت معکوس زیاد و FTBR مقدار کمی است.

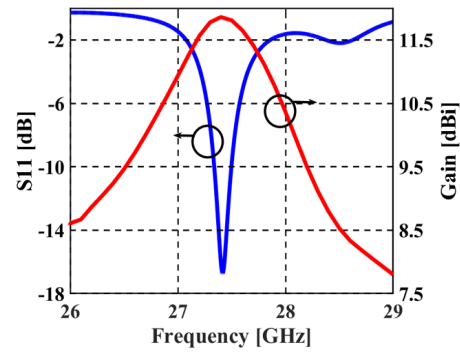
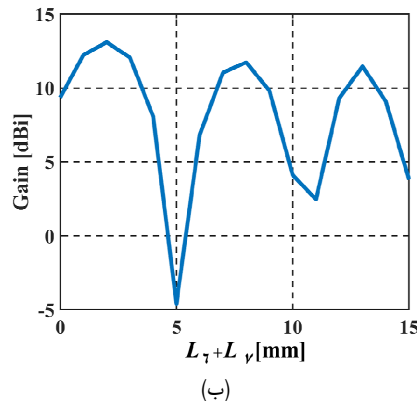
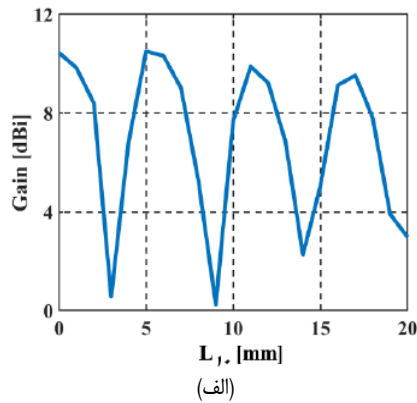
تشعشع یافته و توان رسیده به دهانه تشعشی کاهش می‌یابد. در این صورت، شکاف‌ها باعث کاهش تأثیر دهانه تشعشی در الگوی تابشی آنتن خواهند شد. پس بر این اساس لازم است تا شکاف‌ها در نقاطی قرار بگیرند که توزیع جریان سطحی ضعیف است. در ادامه تأثیر هر کدام از شکاف‌های تشعشی بر روی الگوی تابشی آنتن به صورت جداگانه بررسی خواهد شد. بر اساس بهینه‌سازی‌های انجام‌شده، بهترین نتیجه از نظر بهره آنتن زمانی حاصل می‌شود که طول شکاف‌های تشعشی $L_{sr} = 4.5 \text{ mm}$ انتخاب شود.

۲-۲-۲ شکاف تشعشی اول

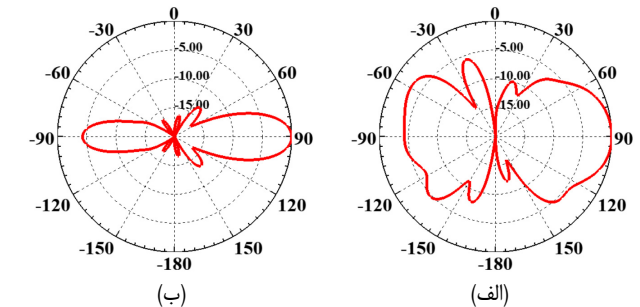
در این قسمت با ایجاد اولین شکاف تشعشی در مکان پیشنهادی، مشخصات آنتن بررسی می‌شود. باید توجه داشت که دهانه آنتن کاملاً مسدود است و تشعشع تنها از طریق شکاف اول انجام می‌گیرد. از آنجایی که آنتن شیپوری دارای الگوی متقارن در صفحه E است، لازم است که شکاف‌ها به صورت متقارن در صفحات بالایی و پایینی ساختار قرار گیرند. شکل ۷ الگوی تشعشی آنتن را در فرکانس مرکزی در دو صفحه E و H و بعد از اضافه‌شدن شکاف تشعشی اول نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، با اضافه‌شدن این شکاف، راستای اصلی تشعشع نسبت به یک آنتن شیپوری معمولی ۹۰ درجه به سمت عقب چرخیده و در جهت Broadside، محور z ، تشعشع می‌کند. بنابراین لازم است که برای بهبود مشخصات آنتن، با ایجاد شکاف‌های بیشتر راستای اصلی تشعشع در جهت Endfire، محور y ، تغییر کند.

۲-۲-۲ شکاف‌های تشعشی دوم و سوم

شکاف‌های دوم و سوم به صورت کاملاً متقارن نسبت به محور x در



شکل ۹: تغییرات S_{11} و بهره آنتن شیپوری SIW صفحه H با شکاف‌های تشعشی بر حسب فرکانس.



شکل ۱۰: الگوی تشعشی آنتن شیپوری SIW با شکاف‌های تشعشی در فرکانس کاری، (الف) صفحه E و (ب) صفحه H.

شکل ۱۱: تغییرات بهره به ازای فواصل مختلف صفحه بازتابنده با ارتفاع ۷٫۸ mm در فرکانس ۲۷٫۴ GHz از (الف) دهانه تشعشی آنتن و (ب) شکاف‌های تشعشی.

آنتن نهایی هستند (شکل ۲۱). نتایج این بررسی‌ها در شکل ۱۱ رسم شده است. مطابق این شکل، بهره آنتن در فواصل مختلف صفحه بازتابنده از دهانه و شکاف‌های تشعشی به صورت متناوب تغییر می‌کند و دارای بیشینه و کمینه در بعضی از نقاط است. مطابق بررسی‌های انجام شده، در مکان‌هایی که بهره به شدت افت می‌کند، صفحه بازتابنده باعث افزایش سطح پرتوهای فرعی شده است. بنابراین هنگامی صفحه بازتابنده می‌تواند موجب بهبود مشخصات تشعشی آنتن شود که فاصله آن از شکاف‌ها $(L_r + L_v)$ و دهانه تشعشی (L_r) بر اساس (۲) و (۳) تعیین شود

$$L_r + L_v \approx \frac{n\lambda}{4}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2)$$

$$L_r \approx \frac{m\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

بر اساس روابط بالا، در آنتن شیپوری SIW صفحه H با شکاف‌های تشعشی، صفحه بازتابنده باید در مکانی قرار بگیرد تا توانایی بهبود مشخصات تشعشی حاصل از دهانه و شکاف‌ها را به طور هم‌زمان داشته باشد. بنابراین مطابق جدول ۱، دو مکان برای صفحه بازتابنده به ازای دهانه تشعشی و شکاف‌های اول تا سوم محاسبه شده است. طبق جدول، برای هر کدام از قسمت‌های تشعشی آنتن، فاصله صفحه بازتابنده از دهانه به دست آمده است. بنابراین زمانی صفحه بازتابنده می‌تواند مفید ظاهر شود که فاصله آن از دهانه آنتن در بازه ۵٫۸ mm تا ۱۰٫۹ mm تغییر کند. شکل ۱۲ تغییرات بهره آنتن را بر حسب فاصله صفحه بازتابنده از دهانه در بازه مطرح شده نشان می‌دهد. در این صورت بهترین مکان برای صفحه بازتابنده انتخاب می‌شود و زمانی که صفحه بازتابنده در آن محل قرار گیرد، بیشترین بهره حاصل می‌شود.

همان طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، بهره در $L_r = 9.3 \text{ mm}$ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین صفحه بازتابنده در این نقطه بیشترین

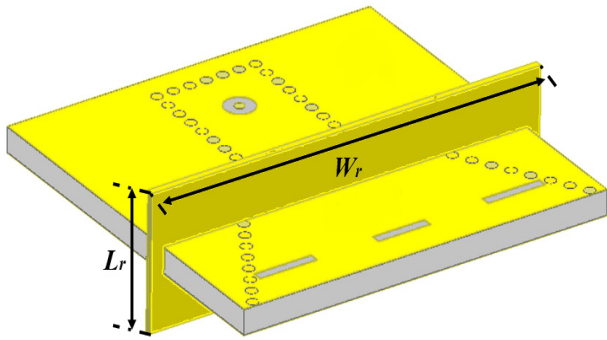
جدول ۱: تعیین فاصله صفحه بازتابنده از دهانه آنتن به ازای دهانه تشعشی، شکاف‌های اول تا سوم.

المان‌های تشعشی	فاصله از دهانه (mm)	فاصله از المان تشعشی (mm)
شکاف‌ها	5.8	$L_r + L_v \approx \frac{n\lambda}{4} \xrightarrow{n=1} L_r + L_v \approx \frac{\lambda}{4} \approx 2.7$
دهانه	10.9	$L_r \approx \frac{m\lambda}{2} \xrightarrow{m=2} L_r \approx \lambda \approx 10.9$

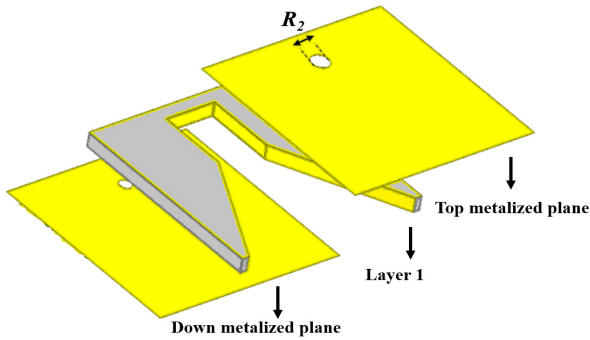
۲-۳ اضافه کردن صفحه بازتابنده

آنتن پیشنهادی دارای تشعشع زیادی در جهت معکوس است. این مطلب باعث می‌شود که علی‌رغم باریک‌بودن پهنای پرتو نیم‌توان و وضعیت مناسب SLL در هر دو صفحه E و H، بهره آنتن مقدار کمی باشد. استفاده از یک صفحه بازتابنده حوالی دهانه تشعشی آنتن موجب بهبود FTBR و SLL می‌شود. در این بخش نیز می‌توان با استفاده از این روش، مشخصات تشعشی آنتن را بهبود داد.

یکی از نکات مهم که باید به آن دقت کرد، محل قرارگرفتن صفحه بازتابنده است. در [۱۳]، این صفحه در دهانه آنتن قرار داده شده است؛ اما در این طراحی با وجود شکاف‌های تشعشی، امکان پیاده‌سازی این صفحه در دهانه آنتن امکان‌پذیر نیست. زیرا زمانی که این صفحه در دهانه آنتن قرار بگیرد، عملاً تأثیر شکاف‌های تشعشی به طور کامل حذف خواهد شد. بنابراین لازم است صفحه بازتابنده قبل از شکاف‌های تشعشی قرار بگیرد. برای بررسی کامل ابعاد این موضوع، قبل از ایجاد شکاف‌های تشعشی، تغییرات بهره به ازای فواصل مختلف صفحه بازتابنده از دهانه آنتن (L_r) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مطابق بخش‌های قبل، با مسدودکردن دهانه آنتن، بهره به ازای فواصل مختلف صفحه بازتابنده از شکاف‌ها $(L_r + L_v)$ به دست آمده است. قابل ذکر است که این پارامترها $(L_r, L_v, L_r + L_v)$ این پارامترها مربوط به



شکل ۱۵: نمای سه بعدی آنتن پیشنهادی با صفحه بازتابنده.



شکل ۱۶: نحوه طراحی آنتن مرجع با فناوری ESIW.

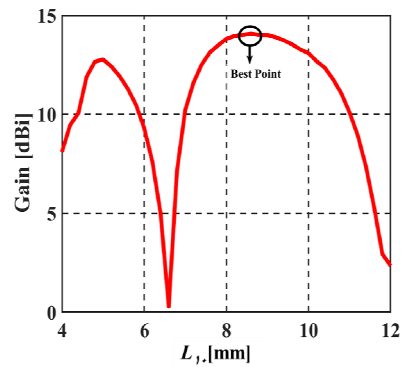
است. در این بخش برای اولین بار با حذف کامل دی الکتریک ساختار، پهنای باند فرکانسی آنتن بهبود می‌یابد. در این روش که فناوری موجبر مجتمع شده در زیرلایه فاقد عایق نام دارد، بخش عمده‌ای از دی الکتریک ساختار حذف شده و امواج الکترومغناطیس درون هوا منتشر می‌شوند. برای طراحی آنتن مرجع، مطابق شکل ۱۶ ابعاد آنتن شیپوری صفحه H درون زیرلایه ۱ برش داده شده و دیواره‌های جانبی و صفحات بالا و پایین برای محدود کردن موج متالیزه می‌شوند. در واقع محدود کردن موج با این روش موجب کاهش تلفات تشعشی می‌شود. تغذیه این آنتن نیز مشابه آنتن SIW توسط یک کابل هم‌محور با شعاع داخلی R_1 و شعاع خارجی R_2 انجام می‌شود.

همان گونه که بیان شد، یکی از معایب آنتن‌های شیپوری SIW پهنای باند فرکانسی محدود است. به طور کلی، رابطه (۴) یک تقریب بسیار خوب برای امپدانس مشخصه ساختارهای SIW و TE_{10} اصلی است که در آن k عدد موج، η امپدانس محیط، h ضخامت زیرلایه، β ثابت انتشار، f_c فرکانس قطع موجبر و W عرض ساختار SIW است [۱۴]

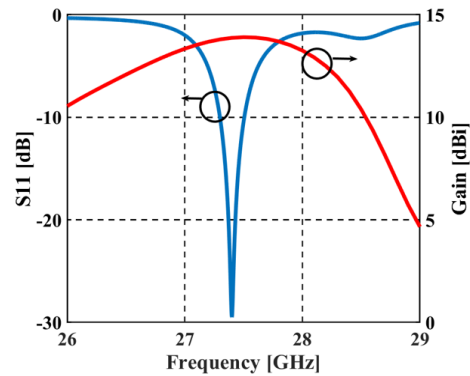
$$Z_{SIW} = \frac{K\eta h}{\beta W} = \frac{\eta h}{W \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (4)$$

اختلاف زیاد میان امپدانس مشخصه ساختار SIW و امپدانس فضای آزاد (377Ω) در دهانه آنتن منجر به کاهش پهنای باند فرکانسی می‌شود. از آنجا که در فناوری ESIW دی الکتریک ساختار حذف می‌شود، Z_{SIW} افزایش می‌یابد و به امپدانس فضای آزاد نزدیک می‌شود [۱۵]. به همین علت استفاده از فناوری ESIW به جای SIW منجر به افزایش پهنای باند فرکانسی خواهد شد.

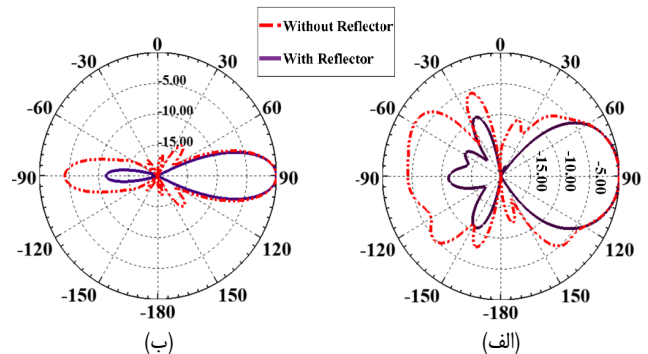
با توجه به حذف عایق در این قسمت، طول شکاف‌ها و مکان قرارگرفتن آنها نسبت به بخش قبل کمی تغییر کرده است، ولی آرایش قرارگرفتن آنها ثابت مانده است. در شکل ۱۷ تغییرات S_{11} آنتن‌های



شکل ۱۲: تغییرات بهره آنتن شیپوری SIW صفحه H با شکاف‌های تشعشی بر حسب فاصله صفحه بازتابنده از دهانه آنتن در فرکانس ۲۷/۴ GHz.



شکل ۱۳: تغییرات S_{11} و بهره آنتن پیشنهادی با صفحه بازتابنده بر حسب فرکانس.



شکل ۱۴: الگوی تشعشی آنتن، قبل و بعد از اضافه شدن صفحه بازتابنده، (الف) صفحه E و (ب) صفحه H.

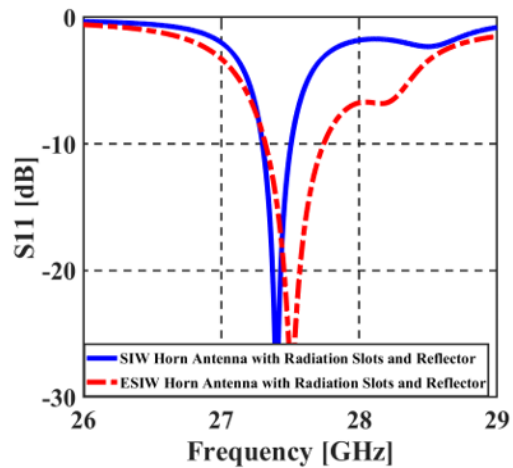
تأثیر را بر روی پارامترهای تشعشی آنتن خواهد گذاشت. تغییرات بهره نسبت به ارتفاع صفحه بازتابنده تا $L_r = 7.8 \text{ mm}$ روند افزایشی دارد و بعد از آن تغییر خاصی در بهره ایجاد نخواهد شد. شکل ۱۳ نیز تغییرات S_{11} و بهره آنتن پیشنهادی را بر حسب فرکانس نشان می‌دهد. آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲۷/۴ GHz با حداکثر بهره ۱۴/۱ dBi کار می‌کند. شکل ۱۴ نیز الگوی تشعشی این آنتن را قبل و بعد از اضافه شدن صفحه بازتابنده در دو صفحه E و H نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود، در صفحه E، ۸ dB و در صفحه H، ۱۱ dB کاهش پیدا کرده است. همچنین تشعشع در جهت معکوس به شدت کم شده و FTBR نیز به اندازه ۸ dB بهبود دارد. نهایتاً با اضافه شدن صفحه بازتابنده به آنتن، بهره ۲/۳ dBi افزایش می‌یابد. شکل ۱۵ نمایی سه بعدی از آنتن پیشنهادی با صفحه بازتابنده را نشان می‌دهد.

۲-۴ حذف دی الکتریک ساختار

آنتن طراحی شده در بخش قبل دارای پهنای باند فرکانسی بسیار کمی

جدول ۲: ابعاد آنتن پیشنهادی با فناوری ESIW (کلیه پارامترها بر حسب میلی‌متر است).

مقدار	پارامتر	ساختار	مقدار	پارامتر	ساختار
۳	L_{snr}	شکاف‌های غیر تشعشی	۷٫۶	a_1	SIW
۲٫۵	L_x		۲۶	a_2	
۲٫۹	L_y		۹	L_1	
۱۲	L_h		۱۵٫۴	L_2	
۸٫۸	L_3		۴٫۲	L_4	
۷٫۸	L_r	صفحه بازتابنده	۴٫۵	L_{sr}	شکاف‌های تشعشی
۲۹	W_r		۳٫۷	L_e	
۹٫۳	L_5		۳٫۴	L_6	



شکل ۱۷: مقایسه تغییرات S_{11} دو آنتن طراحی‌شده با فناوری‌های SIW و ESIW.

جدول ۳: مقایسه برخی از مشخصات هر دو آنتن پیشنهادی با فناوری SIW و ESIW در مراحل مختلف طراحی و در فرکانس کاری آنها.

پارامترها	SIW		ESIW		شکاف‌های تشعشی / صفحه بازتابنده / شکاف‌های غیر تشعشی
	معمولی	شکاف‌های تشعشی / صفحه بازتابنده	معمولی	شکاف‌های تشعشی / صفحه بازتابنده	
پهنای باند فرکانسی (%)	۱٫۲۲	۰٫۷۸	۲٫۸	۱٫۴۵	۳٫۹۶
فرکانس کاری (GHz)	۲۷٫۸	۲۷٫۴	۲۸٫۷	۲۷٫۵	۲۷٫۵
بهره (dBi)	۶٫۴	۱۴٫۱	۸٫۶	۱۵	۱۵٫۳
HPBW _E (degree)	۱۱۹	۵۳	۱۰۷	۴۴	۴۵
HPBW _H (degree)	۴۴	۲۲	۲۱	۲۱	۲۰
SLL _H (dB)	-۱۶٫۷	-۲۵٫۱	-۱۲٫۵	-۲۳٫۳	-۱۶٫۴
FTBR (dB)	۵٫۵	۱۱٫۲۵	۴٫۶	۱۰٫۲	۱۴٫۱

مطابق این دو شکل، آنتن پیشنهادی دارای مشخصات بهتری نسبت به نمونه SIW با عایق است. در واقع ترکیب شکاف‌های تشعشی و غیر تشعشی در این بخش باعث شده که علاوه بر مشخصات تابشی، پهنای باند فرکانسی آنتن نیز بهبود پیدا کند. از آنجایی که شکاف‌های اول تا سوم صرفاً برای بهبود مشخصات تشعشی آنتن در باند فرکانسی اول طراحی شده‌اند، لذا میزان بهره در این باند نسبت به باند دوم بیشتر خواهد بود. نهایتاً این آنتن محدوده فرکانسی ۲۷٫۲ GHz تا ۲۸٫۳ GHz را پوشش داده و بهره آن در این بازه بین ۱۰٫۱ dBi تا ۱۵٫۳ dBi تغییر می‌کند.

شکل ۲۱ ساختار هندسی آنتن پیشنهادی را به همراه تمامی پارامترهای اساسی آن نشان می‌دهد و در جدول ۲ ابعاد آنتن پیشنهادی با فناوری ESIW آمده است. در این جدول، L_{sr} طول تمامی شکاف‌های تشعشی و L_{snr} طول تمامی شکاف‌های غیر تشعشی می‌باشد. همچنین عرض تمامی شکاف‌ها یکسان و ۰٫۵ mm انتخاب شده است. به منظور بررسی هر کدام از تکنیک‌های ایجادشده بر روی مشخصات آنتن پیشنهادی، جدول ۳ برخی از پارامترهای مهم آنتن طراحی‌شده را در مراحل مختلف نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، مشخصات آنتن در دو بخش SIW و ESIW بررسی شده که تنها تفاوت این دو ساختار در حضور یا عدم حضور عایق و همچنین شکاف‌های غیر تشعشی می‌باشد. این جدول به طور کلی تأثیرات مثبت شکاف‌های تشعشی، صفحه بازتابنده، حذف دی‌الکتریک و شکاف‌های غیر تشعشی را بر مشخصات آنتن پیشنهادی نشان می‌دهد.

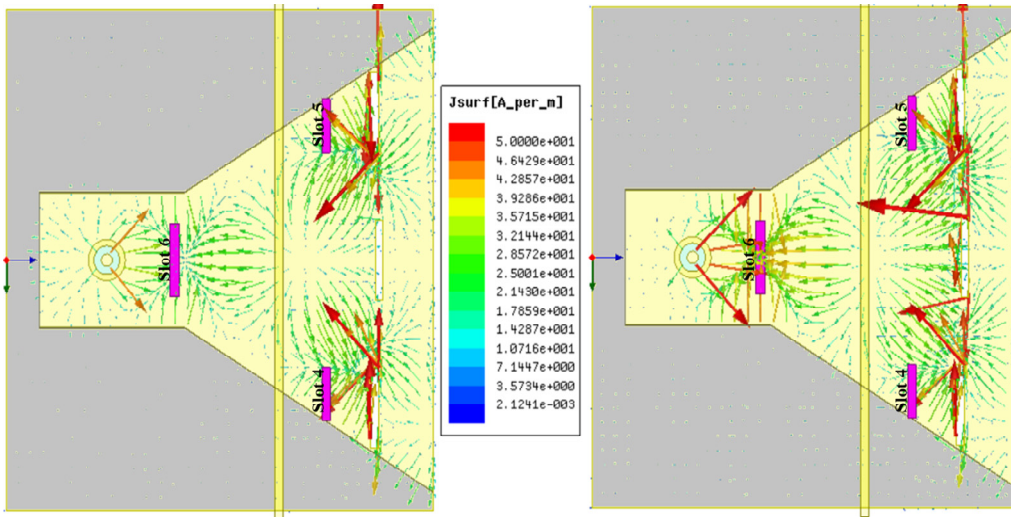
پیشنهادی با فناوری SIW و ESIW بر حسب فرکانس مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که در این مقایسه هر دو آنتن با شکاف‌های تشعشی و صفحه بازتابنده خود ظاهر شده‌اند.

۲-۵ اضافه کردن شکاف‌های غیر تشعشی

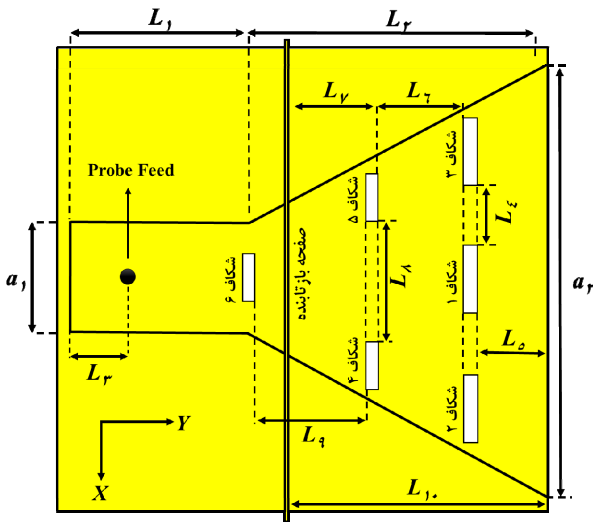
مطابق شکل ۱۷، پهنای باند فرکانسی آنتن پیشنهادی با فناوری ESIW نسبت به نمونه SIW خود تقریباً دو برابر شده و تطبیق امپدانس در بازه فرکانسی ۲۷٫۸ GHz تا ۲۸٫۵ GHz افزایش یافته است. یکی از راه‌های افزایش پهنای باند فرکانسی آنتن شیپوری صفحه H، ایجاد شکاف‌های غیر تشعشی به ساختار است. بنابراین لازم است طول این شکاف‌ها کمتر از نصف طول موج انتخاب شده و مکان قرارگرفتن آنها نیز مطابق توزیع جریان سطحی تعیین شود [۱۱].

به منظور یافتن مکان مناسب برای شکاف‌های غیر تشعشی، توزیع جریان سطحی آنتن در فرکانس‌های ۲۷٫۵ GHz و ۲۸٫۲۵ GHz به همراه محل‌های پیشنهادی برای این شکاف‌ها در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. بر اساس این شکل، در ابتدای ناحیه بازشدگی آنتن و همچنین قبل از شکاف‌های تشعشی اول تا سوم، جریان سطحی دارای توزیع نسبتاً مناسبی است. بنابراین می‌توان با ایجاد شکاف‌های غیر تشعشی چهارم تا ششم در این نواحی، علاوه بر بهبود تطبیق امپدانس در پهنای باند موجود، یک باند فرکانسی دیگر در بازه ۲۸ GHz تا ۲۸٫۵ GHz به مشخصات آنتن اضافه نمود.

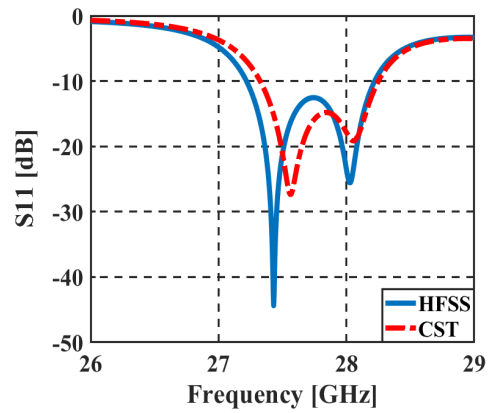
شکل ۱۹ و شکل ۲۰ به ترتیب تغییرات S_{11} و بهره آنتن پیشنهادی با فناوری ESIW را بر حسب فرکانس بر اساس خروجی نرم‌افزارهای CST و HFSS نشان می‌دهند.



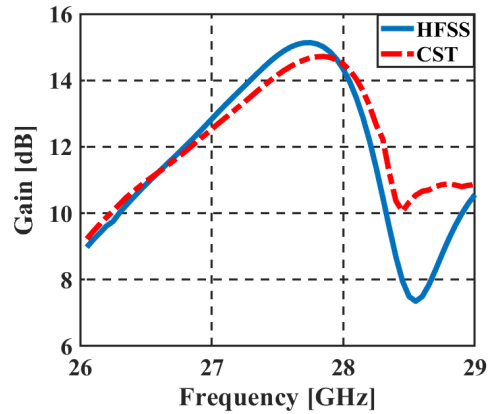
شکل ۱۸: توزیع جریان سطحی قبل از ایجاد شکاف‌های غیر تشعشی به همراه مکان‌های پیشنهادی برای شکاف‌ها، (الف) فرکانس ۲۷٫۵ GHz و (ب) فرکانس ۲۸٫۲۵ GHz.



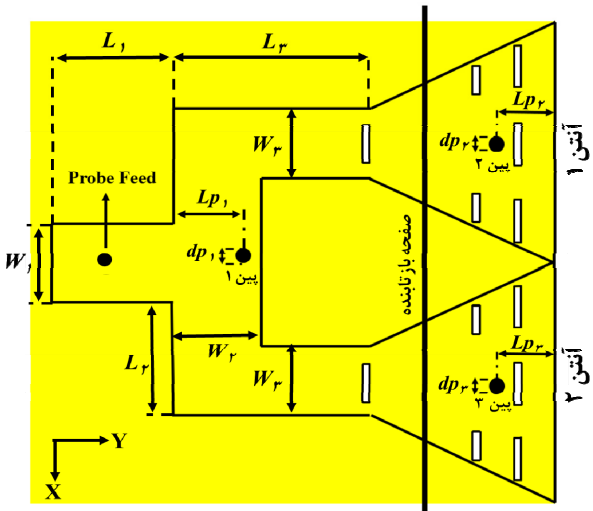
شکل ۲۱: ساختار آنتن پیشنهادی با فناوری ESIW.



شکل ۱۹: تغییرات S_{11} آنتن پیشنهادی با نرم‌افزارهای HFSS و CST.



شکل ۲۰: تغییرات بهره آنتن پیشنهادی با نرم‌افزارهای HFSS و CST.

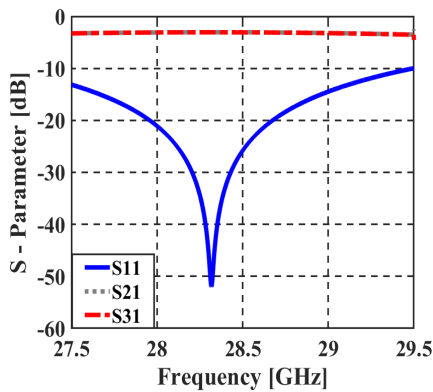


شکل ۲۲: ساختار آرایه دوعنصری آنتن پیشنهادی با فناوری ESIW.

می‌یابد. شکل ۲۲ ساختار آرایه دوعنصری آنتن پیشنهادی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، آنتن ارائه شده در این قسمت از یک مقسم توان T، دو عدد آنتن شیپوری ESIW صفحه H با شکاف‌های تشعشی و غیر تشعشی، صفحه بازتابنده و سه عدد پین تشکیل شده است. جدول ۴ نیز ابعاد این آنتن را نشان می‌دهد.

۶-۲ آرایه خطی دوعنصری آنتن پیشنهادی با فناوری ESIW

یکی از راه‌های بالابردن بهره در آنتن‌های شیپوری، آرایه‌سازی عناصر تشعشع‌کننده است. آرایه‌کردن در کنار بهبود مشخصات تشعشی آنتن‌ها، مشکلاتی از قبیل پیچیدگی در طراحی، بالارفتن هزینه‌ها برای ساخت و همچنین بزرگ شدن ابعاد ساختار را در پی خواهد داشت. در این قسمت سعی شده که آنتن پیشنهادی به صورت یک آرایه خطی دوعنصری در صفحه H پیاده‌سازی شود. در این صورت با ترکیب تشعشعات حاصل از این دو آنتن، مشخصات تشعشی نسبت به حالت تک‌عنصری بهبود



شکل ۲۵: تغییرات پارامترهای S مقسم توان بعد از نهایی شدن ابعاد.

جدول ۴: ابعاد آنتن آرایه با فناوری ESIW (کلیه پارامترها بر حسب میلی‌متر است).

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
W_1	۸٫۴۵	L_{p1}	۶٫۵
W_r	۷٫۶	d_{p1}	۰٫۵
W_r	۷٫۶	L_{pr}	۵
L_1	۱۲٫۱	d_{pr}	۰٫۵
L_r	۱۲٫۴	L_{pr}	۵
L_r	۱۶٫۶	d_{pr}	۰٫۵

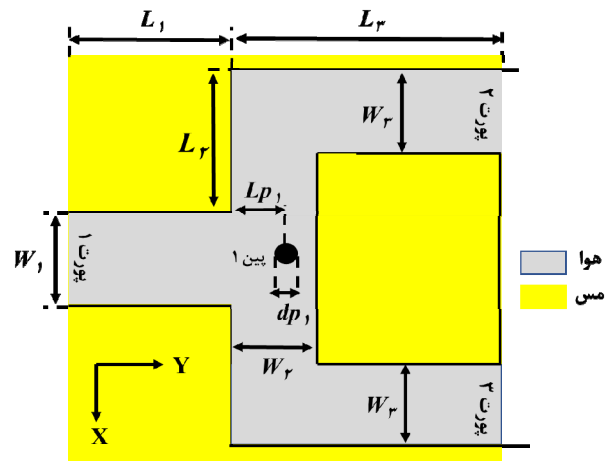
شکل ۲۵ نیز تغییرات پارامترهای S هر سه دهانه مقسم توان را بعد از نهایی شدن ابعاد بر حسب فرکانس نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، توان رسیده به خروجی هر یک از پورت‌ها مساوی است و در این صورت ساختار برای تحریک آنتن‌ها آماده می‌شود.

شکل ۲۶ توزیع میدان الکتریکی را در فرکانس تشدید ساختار نشان می‌دهد و در نتیجه، تأثیر پین اول در تقسیم توان ورودی کاملاً مشهود است.

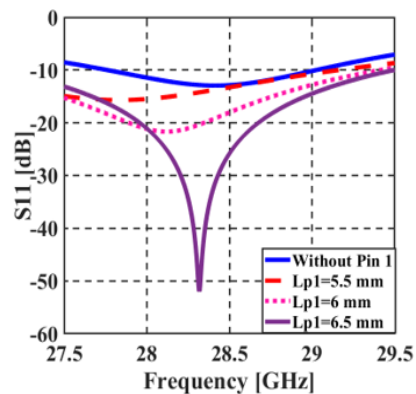
۲-۶-۲ بین‌های دوم و سوم

بعد از طراحی ساختار تغذیه برای آنتن، امکان تحریک هر دو عنصر آرایه فراهم می‌شود. شکل ۲۷ الگوی تشعشی آنتن را در دو صفحه E و H قبل از اضافه شدن بین‌های دوم و سوم در فرکانس کاری نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، پهنای پرتو نیم‌توان آنتن در صفحه H بسیار باریک است، اما بزرگ بودن گلبرگ‌های فرعی و هم‌سطح بودن آنها با پرتوی اصلی در این صفحه باعث کاهش بهره آنتن آرایه در فرکانس کاری شده است. در واقع هر کدام از دو آنتن آرایه، یک پرتو جانبی نسبتاً بزرگ در صفحه H تولید می‌کنند که منجر به تضعیف مشخصات آنتن در این صفحه می‌شود. به همین منظور دو عدد پین به قطر ۰٫۵ mm و به فاصله ۵ mm از دهانه تشعشی هر دو آنتن ایجاد شده‌اند. این دو عدد پین در مسیر پرتوهای جانبی قرار گرفته و می‌توانند تأثیر مخرب آنها را بر روی بهره آنتن خنثی کنند. شکل ۲۸ الگوی تشعشی آنتن آرایه در صفحه H را قبل و بعد از اضافه شدن بین‌های دوم و سوم در فرکانس کاری نشان می‌دهد.

با اضافه شدن بین‌های دوم و سوم به آنتن آرایه، پرتوهای جانبی تضعیف شده‌اند و به دو پرتو کوچک دیگر با سطح پایین تبدیل خواهند شد. استفاده از این روش می‌تواند با بهبود الگوی تشعشی در صفحه H و ثابت ماندن آن در صفحه E باعث بهبود مشخصات تشعشی نظیر بهره آنتن آرایه شود. نهایتاً با آرایه کردن آنتن، پهنای پرتو نیم‌توان در صفحه H نسبت به حالت تک‌عنصری، ۱۰ درجه کاهش می‌یابد. شکل ۲۹ تغییرات



شکل ۲۳: مقسم توان T با فناوری ESIW.



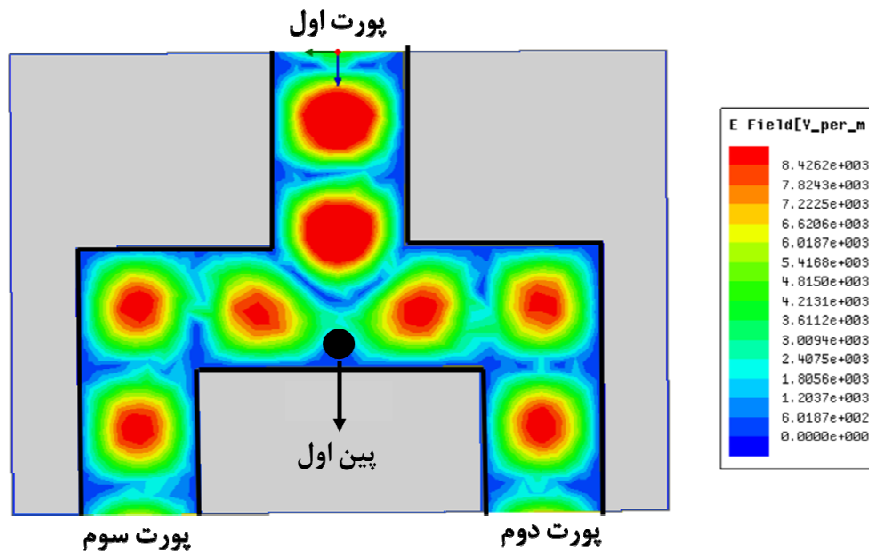
شکل ۲۴: تغییرات S_{11} مقسم توان به ازای مقادیر مختلف L_{p1} .

لازم به ذکر است که ابعاد آنتن شیپوری ESIW صفحه H به همراه شکاف‌های تشعشی و غیر تشعشی و صفحه بازتابنده مشابه حالت تک‌عنصری بوده و تغییری نکرده است. در ادامه، قسمت‌های مختلف ساختار بررسی شده و تأثیر هر کدام از آنها بر مشخصات آنتن آرایه‌ای ارائه خواهد شد.

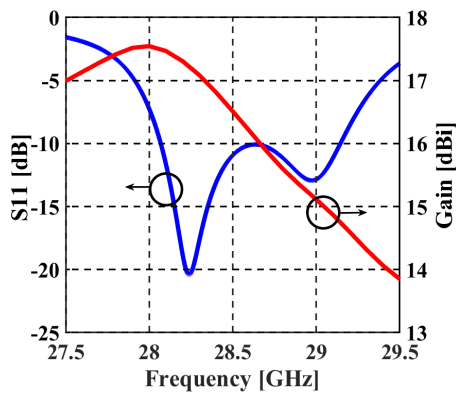
۲-۶-۱ معرفی ساختار تغذیه آرایه

یکی از موضوعات مهم در زمینه آرایه کردن آنتن‌ها، استفاده از ساختار تغذیه مناسب می‌باشد. در حالت کلی لازم است که توان موجود با نسبت‌های مشخص بین تمامی اجزای آرایه تقسیم شود. مقسم توان T یکی از مبدل‌های سه‌دهانه‌ای است که توانایی تقسیم و یا ترکیب توان را دارد. از آنجا که قرار است آرایه کردن آنتن با فناوری ESIW انجام شود، لذا لازم است که شبکه تغذیه آن نیز با این فناوری پیاده‌سازی شود. شکل ۲۳ یک مقسم توان T را به همراه دو خم ۹۰ درجه با فناوری ESIW نشان می‌دهد. در واقع خم‌های ۹۰ درجه وظیفه انتقال توان تقسیم‌شده از خروجی مقسم توان به ورودی آنتن‌ها را دارند. در این شکل نیز یک پین با قطر d_{p1} و با فاصله L_{p1} از پورت اول دیده می‌شود. در دهانه ورودی مقسم توان، تلفات بازگشتی در وضعیت مناسبی قرار ندارد، لذا این پین می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی این پارامتر بگذارد.

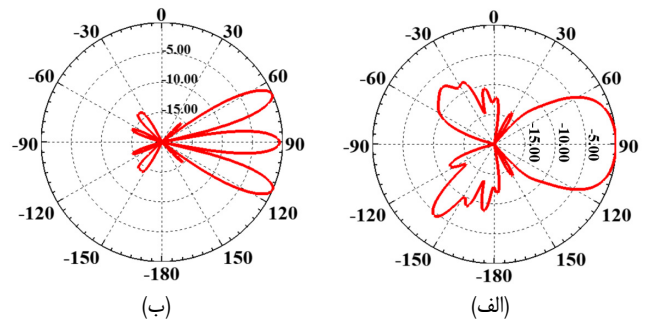
شکل ۲۴ تغییرات پارامتر S_{11} مقسم توان طراحی شده را قبل و بعد از اضافه شدن پین اول به همراه مقادیر مختلف L_{p1} در دهانه ورودی بر حسب فرکانس نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، قبل از اضافه شدن پین اول، پارامتر S_{11} از وضعیت مناسبی برخوردار نبود. با اضافه شدن پین و تغییر فاصله آن، تلفات بازگشتی ساختار به مرور بهبود یافت و برای $L_{p1} = ۶٫۵$ mm بهترین نتیجه به دست آمد.



شکل ۲۶: توزیع میدان الکتریکی در فرکانس رزونانس مقسم توان T.



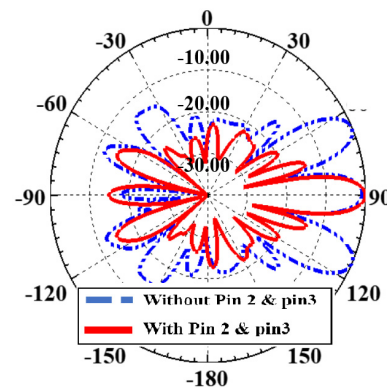
شکل ۲۹: تغییرات S_{11} و بهره آنتن آرایه دوعنصری با پین‌های دوم و سوم بر حسب فرکانس.



شکل ۳۰: الگوی تشعشی آنتن آرایه، قبل از اضافه شدن پین‌های دوم و سوم، (الف) صفحه E و (ب) صفحه H.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از شکاف‌های تشعشی و غیر تشعشی، مشخصات آنتن شیپوری SIW صفحه H بهبود یافته است. استفاده از آرایه‌های دوقطبی مغناطیسی در صفحات بالایی و پایینی آنتن علاوه بر حفظ ابعاد ساختار، HPBW را ۶۶ درجه در صفحه E کاهش داده و بهره را افزایش می‌دهد. حذف دی‌الکتریک و اضافه شدن شکاف‌های غیر تشعشی نیز موجب بهبود تطبیق و افزایش پهنای باند فرکانسی شده است. همچنین انتشار امواج در داخل ساختار فاقد عایق، می‌تواند به طور محسوسی تلفات دی‌الکتریک را کاهش داده و بازده تشعشی را افزایش دهد. به طور کلی حذف عایق به همراه شکاف‌های غیر تشعشی که طولی کمتر نسبت به شکاف‌های تشعشی دارند، باعث می‌شوند پهنای باند فرکانسی آنتن با ثابت ماندن مشخصات تشعشی آن، تا پنج برابر افزایش یابد. آنتن پیشنهادی در این مقاله بازه فرکانسی ۲۷/۲ GHz تا ۲۸/۳ GHz را با پهنای باند نسبی ۳/۹۶٪ و بازده تشعشی ۹۸٪ و همچنین ماکسیمم بهره ۱۵/۳ dBi پوشش می‌دهد. یک آرایه دوبعدی از آنتن پیشنهادی در صفحه E نیز طراحی و ارائه شده که موجب کاهش HPBW در صفحه H شده و بهره را به اندازه ۲/۲ dBi نسبت به آنتن تک‌عنصری افزایش داده است.



شکل ۳۱: الگوی تشعشی آنتن آرایه در صفحه H، قبل و بعد از اضافه شدن پین‌های دوم و سوم.

S_{11} و بهره آنتن آرایه دوعنصری با پین‌های دوم و سوم را بر حسب فرکانس نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، آنتن طراحی شده محدوده فرکانسی ۲۸/۱ GHz تا ۲۹/۲ GHz را پوشش داده و بهره آن در این بازه بین ۱۵ dBi تا ۱۷/۵ dBi تغییر می‌کند.

جدول ۵ مشخصات آنتن پیشنهادی در این مقاله را با سایر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه بهبود مشخصات آنتن شیپوری SIW مورد مقایسه قرار داده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، آنتن پیشنهادی نسبت به سایر آنتن‌ها دارای بهره بیشتری بوده و پهنای باند فرکانسی آن نیز قابل قبول است. قابل ذکر است که در این جدول اعداد بیان‌شده نتایج شبیه‌سازی آنتن‌ها هستند.

جدول ۵: مقایسه مشخصات آنتن‌های طراحی شده با پژوهش‌های صورت گرفته و نتایج شبیه‌سازی سایر مقالات.

مقالات	ابعاد آنتن (λ ^۲)	فرکانس کاری		بهره آنتن (dBi)	FTBR (dB)
		GHz	FBW (%)		
[۹]	۲,۴×۲,۶×۰,۱۶	۳۳,۱۵	۳۲,۹	۹-۱۳	۱۰-۲۵
[۱۰]	۲,۲×۱,۵×۰,۵۸	۲۰,۹	۵	۱۴,۱	۲۰
[۱۱]	۲,۴×۲,۶×۰,۱۶	۳۰,۵	۱۶,۳۹	۷,۳-۱۱,۷	۱۶
[۱۲]	۲,۳×۱,۶×۰,۲۵	۳۰,۲	۰,۶۶	۱۰,۱۱	۲۱,۲
[۱۶]	۱,۴×۳,۳×۰,۳	۳۰,۲۵	۴۱,۳۲	۶,۵-۱۰,۵	۱۲
[۱۷]	۷,۶×۳,۸×۰,۱۲	۲۴,۱۵	۴,۶	۹	۱۳
[۱۸]	۲,۱×۳,۸×۲,۱۶	۲۵,۸	۵	۱۰,۴	۲۱
آنتن پیشنهادی	۲,۲۵×۲,۴۱×۰,۷۲	۲۷,۷۵	۳,۹۶	۱۰,۱-۱۵,۳	۱۴-۳۰
آرایه آنتن پیشنهادی	۴×۴,۹۶×۰,۷۲	۲۸,۶۵	۳,۸۳	۱۵-۱۷,۵	۱۵

- [13] E. Rahimi and M. H. Neshati, "Development of an enhanced substrate integrated waveguide H-plane horn antenna using thin substrate," *IJE Trans. B: Applications*, vol. 29, no. 8, pp. 1062-1067, Aug. 2016.
- [14] F. Ishihara and S. Iiguch, "Equivalent characteristic impedance formula of waveguide and its applications," *Electrical and Communications in Japan*, vol. 75, no. 5, pp. 54-66, Jan. 1992.
- [15] Y. Cai, Y. Zhang, and L. Wang, "Design of compact air-vias perforated SIW horn antenna with partially detached broad walls," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 6, pp. 2100-2107, Jun. 2016.
- [16] M. Reshadatmand, H. R. Hassani, and S. M. A. Nezhad, "A compact wideband dielectric loaded H-plane sectoral ridged SIW horn antenna," *Advanced Electromagnetics*, vol. 9, no. 2, pp. 1-6, 28 Aug. 2020.
- [17] Y. Yin, B. Zarghooni, and K. Wu, "A compact substrate integrated waveguide circularly polarized horn antenna" in *Proc. IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation, ISAP'16*, pp. 394-395, Okinawa, Japan, 24-28 Oct. 2016.
- [18] H. Kumar and G. Kumar, "Cavity backed substrate integrated waveguide horn antenna with enhanced gain for 5G applications," in *Proc. IEEE Indian Conf. on Antennas and Propagation, InCAP'18*, 4 pp., Hyderabad, India, 16-19 Dec. 2018.

سید حسین حقیرالسادات در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه بیرجند دریافت و در سال ۱۳۹۹ موفق به اخذ مدرک کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- مخابرات از دانشگاه فردوسی مشهد با سهمیه استعداد درخشان شده است. نامبرده از سال ۱۴۰۱ به عنوان کارشناس مهندسی در گروه صنعتی پارت لاستیک مشغول به فعالیت شده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل شبیه‌سازی انواع آنتن‌های مایکرواستریپ و شیپوری، کاربرد فناوری ESIW در طراحی موجبرها و آنتن‌ها، تجزیه و تحلیل انواع مدارهای الکترونیکی است.

محمدحسن نشاطی دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه صنعتی امیرکبیر به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۶۸ اخذ نموده است. همچنین نامبرده در سال ۱۳۸۰ موفق به دریافت مدرک دکتری خود از دانشگاه منچستر انگلستان (UMIST) شده است. ایشان پس از ۱۸ سال خدمت در دانشگاه سیستان و بلوچستان، در سال ۱۳۸۷ به دانشگاه فردوسی مشهد منتقل و به عنوان دانشیار گروه مهندسی برق در این دانشگاه مشغول به فعالیت است. زمینه‌های تحقیقاتی وی شامل تئوری الکترومغناطیس، تحلیل و طراحی انواع آنتن‌ها و همچنین طراحی مدارهای فعال و غیرفعال مایکروویو است.

مراجع

- [1] G. Q. Luo, W. Hong, *et al.*, "Dualband frequency selective surfaces using substrate integrated waveguide technology," *IET Microw. Antennas and Propag.*, vol. 1, no. 2, pp. 408-413, Apr. 2007.
- [2] B. Liu, W. Hong, and Z. Kuai, "Substrate integrated waveguide (SIW) monopulse slot antenna array," *IEEE Trans. Antenna Propag.*, vol. 57, no. 1, pp. 275-279, Jan. 2009.
- [3] S. H. Haghirosadat, Design and Simulation of H-Plane Horn Antenna Using Empty Substrate Integrated Waveguide Technology to Improve Radiation Characteristics, MSc. Dissertation Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 2020.
- [4] A. Belenguer, H. Estebanm, A. L. Borja, and V. E. Boria, "Empty SIW technologies," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 24-45, Mar. 2019.
- [5] A. Belenguer, H. Eseban, and V. E. Boria, "Novel empty substrate integrated waveguide for high-performance microwave integrated circuits," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 62, no. 4, pp. 832-839, Apr. 2014.
- [6] A. A. Khan, M. K. Mandal, and R. Shaw, "Compact and wideband SMA connector to empty substrate integrated waveguide (ESIW) transition," in *Proc. IEEE Int. Microwave and RF Conf. , IMaRC'15*, pp. 246-248, Hyderabad, India, 10-12 Dec. 2015.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 4 ed, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [8] A. Kumar, N. Muchhal, A. Chakraborty, and S. Srivastava, "Analysis of empty substrate integrate waveguide H-plane horn antenna for K band application," In: *Rawat, B., Trivedi, A., Manhas, S., Karwal, V. (eds) Advances in Signal Processing and Communication . Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 526, pp. 95-106, Springer, Singapore, 2019.
- [9] Z. Qi, X. Li, J. Xiao, and H. Zhu, "Dielectric-slab-loaded hollow substrate-integrated-waveguide H-plane horn antenna array at Ka-band," *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1751-1755, Sept. 2019.
- [10] H. Jamshidi-Zarmehri and M. H. Neshati, "Design and development of high-gain SIW H-plane horn antenna loaded with waveguide, dipole array, and reflector nails using thin substrate," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 4, pp. 2813-2818, Apr. 2019.
- [11] S. H. Haghirosadat and M. H. Neshati, "Development a wideband ESIW H-plane horn antenna with improved radiation performance," in *Proc. 28th Iranian Conf. on Electrical Engineering, ICEE'20*, 5 pp., Tabriz, Iran, 4-6 Aug. 2020.
- [12] M. M. Paraastoo, S. Mohammad-AliNezhad, and S. Saviz, "Field-matching at the compact SIW horn antenna aperture using genetic algorithm," *Int J. Numer Model El*, vol. 33, no. 5, pp. 1-10, Sept. 2020.