

## طراحی تقسیم‌کننده توان بر مبنای فناوری موج‌بر شکافی به منظور استفاده در آنتن آرایه شکافی

## باند ۶۰ گیگاهرتز با سطح گلبزرگ کناری پایین

محمدصادق دهقانی<sup>۱</sup>، داود ظریفی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات، ۲- استادیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶)

## چکیده

در این مقاله یک نمونه تقسیم‌کننده توان موج میلی‌متری بر مبنای فناوری موج‌بر شکافی برای استفاده در شبکه تغذیه یک آنتن آرایه شکافی طراحی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی دارای پهنای باند تطبیق ورودی حدود ۱۰٪ در محدوده فرکانسی ۵۸ تا ۶۴ GHz است. مزیت بارز استفاده از فناوری موج‌بر شکافی در فرکانس‌های موج میلی‌متری دست‌یابی به ساختارهای موج‌بری با تلفات کم و بدون نیاز به اتصال فیزیکی لایه‌های مختلف ساختار به یکدیگر است که پیچیدگی و چالش‌های فرایند ساخت را کاهش می‌دهد. در نهایت با استفاده از تقسیم‌کننده توان طراحی شده، یک آنتن آرایه شکافی صفحه‌ای با سطح گلبزرگ کناری ۲۳ dB- در فرکانس مرکزی ۶۰ GHz با پهنای باند ۴/۱٪ طراحی می‌شود. بهره آنتن در محدوده فرکانسی ۵۸/۸ GHz تا ۶۱/۲۵ GHz بیشتر از ۲۱/۷ dB با بازدهی بالاتر از ۸۸٪ می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** تقسیم‌کننده توان، فناوری موج‌بر شکافی، آنتن آرایه شکافی، سطح گلبزرگ کناری پایین

## ۱. مقدمه

پیشرفت روزافزون مخابرات بی‌سیم، محققان را به سمت فرکانس‌های بالا مخصوصاً بانه امواج میلی‌متری سوق داده است. دلیل این امر را می‌توان انتقال امن داده، دست‌یابی به پهنای باند و سرعت انتقال داده بزرگ‌تر، عدم تداخل، کوچک‌شدن ابعاد فیزیکی آنتن و ادوات ارتباطی و ... دانست. توانایی تمرکز موج رادیویی، تابعی از اندازه آنتن و طول موج عملکرد است و برای یک آنتن با اندازه معین، توانایی تمرکز با کاهش طول موج، بهبود می‌یابد. برای نمونه در یک آنتن سهموی به قطر یک متر و بازدهی دهانه حدود ۶۰ درصد، با طراحی مناسب، پهنای باند نیم‌توان پرتو تشعشعی در فرکانس ۱ GHz حدود ۲۰ درجه است، در حالی که این مشخصه در فرکانس ۱۰ GHz فقط ۲ درجه خواهد شد. برای بهبود عملکرد یک سامانه مخابراتی بین دو نقطه، این نکته مهمی است که سیگنال فرستنده با تمرکز زیاد به طرف آنتن گیرنده جهت‌گیری نماید. این ویژگی مهم و کاربردی سبب شده است که سامانه‌های مخابراتی موج میلی‌متری برای کاربردهای تجاری توسعه یابند.

در سال‌های اخیر، باند فرکانسی ۶۰ GHz به عنوان یکی از باندهای موج میلی‌متری پرطرفدار مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. در حقیقت، توسعه و پیشرفت چشم‌گیر برخی از فناوری‌های

جدید در این باند فرکانسی، سبب توجه زیاد و روزافزون به کاربردهایی نظیر پخش ویدئویی، اینترنت داخلی پرسرعت، واسطه‌های چندرسانه‌ای، رادارهای اتومبیل و ... شده است. مشکل اساسی پیش روی این کاربردها، تضعیف شدید امواج الکترومغناطیسی به دلیل وجود اکسیژن در فضا و وجود تلفات زیاد عبور در این محدوده فرکانسی است. از این‌رو، یکی از عناصر کلیدی یک سامانه مخابراتی در این باند فرکانسی آنتن است که بایستی برای مقابله با این چالش اساسی دارای بهره بالا و بازده تشعشعی و پهنای باند قابل قبول باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که در باند فرکانسی ۶۰ GHz، برای ارسال و دریافت مناسب امواج الکترومغناطیسی در فواصل بزرگتر از ۱۰۰ متر، آنتن‌هایی با بهره بزرگتر از ۳۰ dB مناسب هستند [۲]. مسئله بسیار مهم دیگر برای کاهش هزینه، استحکام آنتن و سهولت مجتمع‌سازی با سایر اجزای سامانه بی‌سیم است.

با یک بررسی اجمالی در مقالات مختلف می‌توان دریافت که طراحی آنتن‌ها با بهره بالا برای استفاده در باند موج میلی‌متری، یکی از موضوعات گسترده و پر طرفدار در حوزه طراحی آنتن است. تاکنون انواع مختلفی از آنتن‌های پهن‌بند نظیر آنتن مایکرواستریپ، آنتن رفلکتوری سهموی، آنتن موج‌بر زیرلایه مجتمع‌شده (Substrated Integrated Waveguide) و آنتن آرایه شکافی طراحی شده‌اند.

آنتن‌های مایکرواستریپ علی‌رغم داشتن مزیت‌هایی همچون

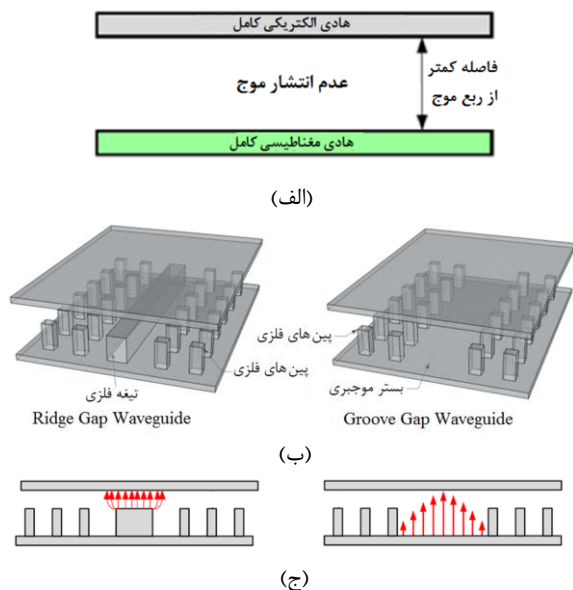
\* نویسنده پاسخگو: zarifi@kashanu.ac.ir

تشعشی بالا [۱۹-۱۵]، طراحی انواع ادوات میکروویو مانند فیلتر [۲۱-۲۰]، داپلکسر [۲۳-۲۲]، تقسیم‌کننده توان [۲۴]، کوپلر [۲۷-۲۵]، بسته‌بندی ادوات [۲۸] و غیره.

در این مقاله ابتدا به طراحی یک نمونه تقسیم‌کننده توان ۱ به ۸ موج میلی‌متری با سطوح توان خروجی متفاوت پرداخته می‌شود و پس از اطمینان از عملکرد مناسب آن، یک آنتن آرایه شکافی با سطح گلبیگ کناری پایین طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که آنتن پیشنهادی در باند فرکانسی ۶۰ GHz دارای ضریب انعکاسی پایین و سطح گلبیگ کناری بهتر از ۲۳ dB- است.

## ۲. فناوری موج‌بر شکافی

اصول فناوری موج‌بر شکافی را می‌توان در شکل (۱-الف) مشاهده کرد. در این ساختار، صفحه فلزی پایینی هادی مغناطیسی بوده و صفحه بالایی هم به صورت یک هادی الکتریکی است.



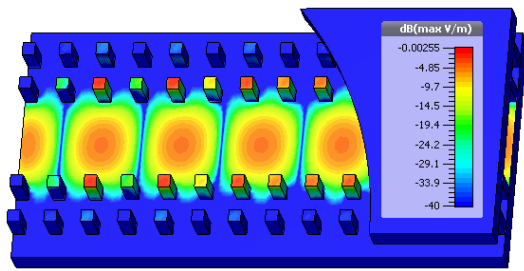
شکل (۱): (الف) ایده اولیه فناوری موج‌بر شکافی. (ب) ساختارهای موج‌بری Ridge و Groove. (ج) توزیع میدان الکتریکی.

در چنین شرایطی، اگر فاصله بین صفحه بالایی و پین‌ها کمتر از حدود یک چهارم طول موج باشد، ساختار مورد نظر مانند یک ساختار باند ممنوعه عمل کرده و اجازه انتشار موج را نمی‌دهد. صفحه هادی مغناطیسی را می‌توان با مجموعه‌ای از پین‌های فلزی پیاده‌سازی کرد. با طراحی و انتخاب مقدار مناسب برای ابعاد پین‌های فلزی و دوره تناوب آنها می‌توان محدوده فرکانسی باند ممنوعه دلخواه را به‌دست آورد [۱۲]. ارتفاع پین‌ها

ابعاد کوچک، وزن کم، ساخت آسان و قابلیت مجتمع‌سازی آسان با سایر ادوات فعال و غیرفعال سامانه‌های مخابرات بی‌سیم، از تلفات مهمی و عایقی و همچنین تشعشعات ناخواسته و تضعیف در قالب امواج سطحی در فرکانس‌های بالا رنج می‌برد [۴-۳]. آنتن‌های سهموی نیز علی‌رغم داشتن مشخصات تشعشی بسیار عالی، به دلیل وجود یک یا دو صفحه بازتابنده و شبکه تغذیه شامل میله‌های تغذیه، نسبت به آنتن‌های آرایه‌ای صفحه‌ای بزرگ‌تر و حتی سنگین‌تر هستند [۵]. علاوه بر این موضوع، آنتن رفلکتوری سهموی نیاز به اتصالات اضافی برای مونتاژ گیرنده و فرستنده نیز دارد. از طرف دیگر، آنتن‌های مبتنی بر فناوری SIW دارای بازده تشعشی به نسبت بالا در آرایه‌های کوچک هستند و می‌توانند به راحتی با دیگر مدارهای فعال تجمیع شوند. اگر چه تلفات مهمی و عایقی در موج‌برهای SIW پایین‌تر از ساختارهای میکرواستریپ است، اما تلفات کم در واحد طول یک موج‌بر SIW هم می‌تواند در آنتن‌های آرایه‌ای بزرگ مقدار قابل توجهی داشته باشد و بازدهی آنتن را کاهش دهد [۸-۶]. آنتن‌های آرایه شکافی موج‌بری، یکی از گزینه‌های مورد توجه در آنتن‌های صفحه‌ای پهن‌بند با بهره بالا برای بسیاری از کاربردها است [۱۱-۹]. این نوع آنتن‌ها نسبت به سایر آنتن‌های ذکر شده تلفات دی‌الکتریک و تشعشی کمتری دارد و برای بسیاری از کاربردهایی که نیازمند بهره بالا و بازدهی بالا هستند، مناسب‌اند. با این حال، چنین آنتن‌هایی نیازمند شبکه‌های تغذیه بزرگ و پیچیده هستند. هم چنین باید توجه داشته باشیم که در فرکانس‌های بالا که طول موج کوچک می‌شود، برقراری ارتباط الکتریکی خوب بین لایه‌های مختلف فلزی جدا از هم، بسیار دشوار است. بنابراین، در فرکانس‌های بالا ساخت این شبکه‌ها باید با دقت زیادی انجام شود که به‌طور طبیعی هزینه، زمان و پیچیدگی فرایند ساخت را افزایش می‌دهد.

فناوری موج‌بر شکافی که برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ معرفی شده و در طول چند سال اخیر به‌صورت چشم‌گیری گسترش یافته است، می‌تواند بخشی از مشکلاتی که در حوزه امواج میلی‌متری وجود دارد را بر طرف نماید [۱۳-۱۲]. اساس عملکرد این فناوری بر پایه هدایت میدان‌های الکترومغناطیسی در جهت مطلوب و جلوگیری از انتشار در جهت‌های نامطلوب است. بزرگ‌ترین مزیت استفاده از این فناوری در طراحی و ساخت آنتن‌ها و ادوات موج میلی‌متری، تلفات پایین و عدم نیاز به اتصال فیزیکی لایه‌های مختلف یک ساختار فلزی است. این ویژگی سبب می‌شود که پیچیدگی و چالش‌های فرایند ساخت ادوات موج میلی‌متری تا حد زیادی کاهش یابد [۱۴]. در سال‌های اخیر کاربردهای متنوعی برای این فناوری مطرح شده است، مانند: طراحی انواع آنتن‌های آرایه‌ای با بهره و بازدهی

الکترومغناطیسی مقید به بستر موج‌بری است.

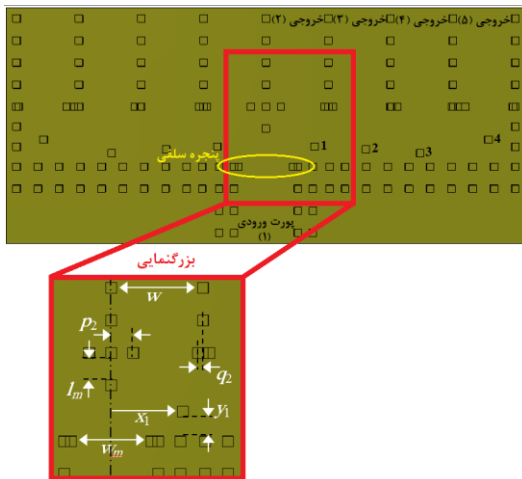


شکل (۳): توزیع میدان الکتریکی در فرکانس ۶۰ GHz

### ۳. طراحی و شبیه‌سازی

#### ۳-۱. طراحی و شبیه‌سازی تقسیم‌کننده توان

شکل (۴) ساختار یک نمونه تقسیم‌کننده توان با استفاده از موج‌بر شکافی را نشان می‌دهد. در این شکل، صفحه‌فلزی بالایی حذف شده است تا ساختار مورد نظر با جزئیات بهتری نمایش داده شود.

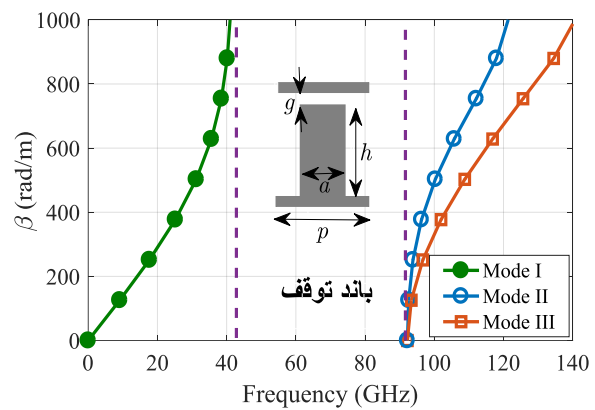


شکل (۴): تقسیم‌کننده توان ۱ به ۸ بر مبنای فناوری موج‌بر شکافی.

هدف طراحی تقسیم‌کننده‌ای است که توان ورودی را دریافت و در ۸ درگاهی خروجی تحویل دهد، به طوری که هرچه از مرکز به سمت کناره‌های ساختار پیش می‌رویم سطح توان کاهش یابد. در حقیقت می‌خواهیم در ادامه از این ساختار و ویژگی تغییرات تدریجی برای دست‌یابی به یک آنتن آرایه‌ای با سطح گلبزرگ کناری پایین استفاده کنیم. مشاهده می‌کنید که در ورودی ساختار از یک پنجره سلفی و یک پین فلزی در مرکز استفاده شده است تا بتوان با تنظیم مناسب پارامترهای ایجادشده، به ضریب انعکاس خوبی در ورودی دست یافت.

روش‌های متعددی برای تغذیه آرایه‌ها با ویژگی تغییرات تدریجی وجود دارد که از جمله مهم‌ترین و معروف‌ترین آنها

حدود ربع طول‌موج در فرکانس مرکزی باند توقف انتخاب می‌شود و فاصله هوایی بین انتهای پین‌ها و صفحه فلزی بالایی باید کمتر از ربع طول‌موج باشد تا از انتشار مدهای صفحات موازی جلوگیری شود [۱۴]. هرچه این مقدار کوچک‌تر از ربع طول‌موج باشد، پهنای باند قطع نیز عریض‌تر می‌شود. برای نمونه، نمودار پاشندگی ساختاری با ابعاد که برای باند ۶۰ GHz طراحی شده توسط نرم‌افزار CST محاسبه شده و در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): نمودار پاشندگی ساختار متناوب از پین‌های فلزی قرار گرفته بین صفحات فلزی. ابعاد ساختار برحسب میلی‌متر عبارتند از:  $g = 0.5$  و  $p = 1$ ,  $h = 1/3$ ,  $a = 0.5$

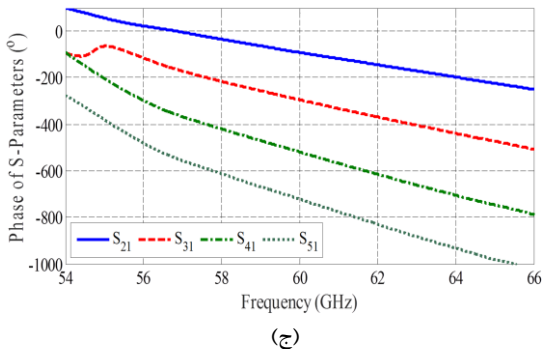
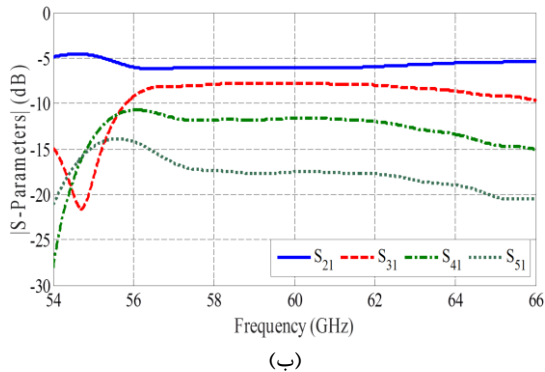
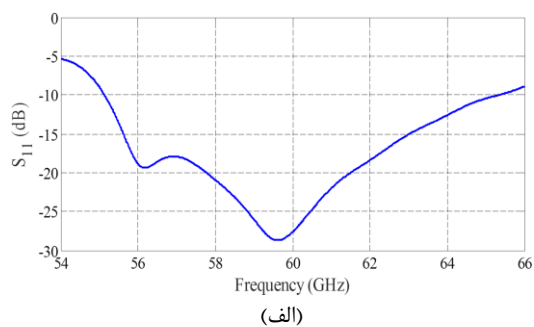
مشاهده می‌کنید که چنین ساختاری اجازه عبور موج با فرکانس حدود ۴۰ GHz تا ۹۰ GHz را نمی‌دهد.

اکنون اگر مطابق شکل (۱-ب) بین پین‌ها از فضای خالی مانند مسیر موج‌بری (Groove Gap Waveguide)، و یا از یک تیغه فلزی (Ridge Gap Waveguide) استفاده شود، امکان انتشار موج در باند فرکانسی مورد نظر ایجاد می‌شود. انتشار موج در ساختار اول به صورت مود  $TE_{10}$  و در ساختار دوم به صورت مود شبه عرضی خواهد بود، مطابق شکل (۱-ج) [۱۴]. بارزترین ویژگی چنین ساختاری که همان وظیفه موج‌بر معمولی را انجام می‌دهد، عدم اتصال فیزیکی صفحات بالایی و پایینی موج‌بر است که در این صورت چالش اساسی ساخت قطعات موج‌بری در فرکانس‌های موج میلی‌متری رفع می‌شود. توزیع میدان الکتریکی ساختار موج‌بری با عرض حدود  $3/8$  mm که بر اساس ابعاد موج‌بر استاندارد WR-15 انتخاب شده است، در فرکانس ۶۰ GHz در شکل (۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌کنید که در دیواره‌های موج‌بر و پس از طی دو ردیف از پین‌های فلزی، اندازه میدان الکتریکی حدود ۳۰ dB افت می‌کند؛ به عبارت دیگر موج

درگاهی‌های خروجی هم تقریباً مطابق با ضرایب مورد نظر است. اختلاف فاز دو موج بر خروجی مجاور در تقسیم‌کننده توان در فرکانس ۶۰ GHz حدود ۱۸۰ درجه است. این مشخصه تقسیم‌کننده را باید در قسمت بعد که طراحی آنتنی مد نظر است، لحاظ کنیم.

**جدول (۱):** مقادیر پارامترهای بهینه تقسیم‌کننده برحسب میلی‌متر. (پارامترهای  $x_i$  و  $y_i$  مربوط به پین‌های ۱ تا ۴ و پارامترهای  $p_i$  و  $q_i$  مربوط به دهانه ورودی موجبرهای خروجی هستند).

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$p_2$	۱/۰۱	$p_5$	۰/۸۳	$x_3$	۱۰/۲۷
$q_2$	۰/۲۵	$q_5$	۰/۱۴	$y_3$	۰/۴۲
$p_3$	۰/۳۰	$x_1$	۳/۰۷	$x_4$	۱۴/۹۲
$q_3$	۰/۰۵	$y_1$	۰/۸۷	$y_4$	۱/۳۵
$p_4$	۰/۴۵	$x_2$	۵/۵۶	$w_m$	۳/۲۳
$q_4$	۰/۰۵	$y_2$	۰/۶۸	$l_m$	۰/۹۸

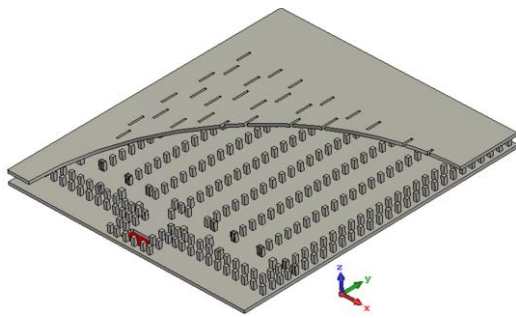


**شکل (۵):** پارامترهای پراکندگی تقسیم‌کننده توان. (الف) اندازه  $S_{11}$ ، (ب) اندازه پارامترهای پراکندگی و (ج) فاز پارامترهای پراکندگی.

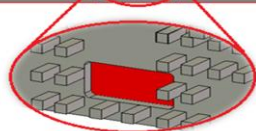
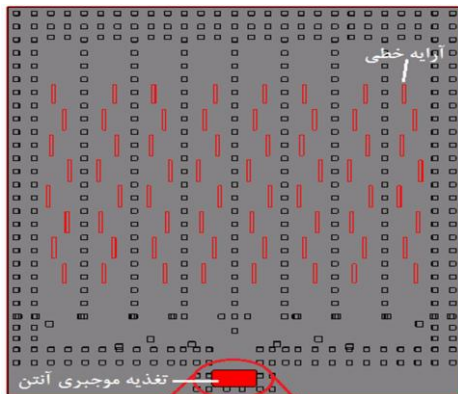
می‌توان به استفاده از ضرایب دو جمله‌ای و چبی شف اشاره کرد. در مراجع متعدد از جمله [۲۹] می‌توان دید که برای نمونه دست‌یابی به آنتنی با سطح گلبیگ کناری حدود ۲۵ dB با استفاده از ضرایب چبی شف، مستلزم طراحی تقسیم‌کننده‌ای با خروجی‌های ۶/۴ dB، ۷/۹ dB، ۱۱ dB و ۱۶ dB است. برای رسیدن به این هدف، در محل وارد شدن موج به هر یک از موجبرهای خروجی دو پین فلزی قرار داده شده است تا عرض ورودی موجبرها کنترل شود. هم‌چنین پین‌هایی نزدیک دیواره پایینی در مقابل ورودی موجبرهای خروجی در نظر گرفته شده است (پین‌های ۱ تا ۴ نشان‌دهنده در شکل (۴)) تا موج را به سمت خروجی‌های مورد نظر منحرف کند. برای عملکرد مناسب و دست‌یابی به تقسیم‌کننده‌ای با مشخصات مطلوب، باید موقعیت این پین‌ها را به‌گونه‌ای تعیین کنیم که در موجبرهای خروجی به ضرایب فوق دست پیدا کنیم که این کار را می‌توان با انجام بهینه‌سازی انجام داد. پین‌های تنظیم در ابتدای فرایند بهینه‌سازی در وسط هر موجبر و چسبیده به دیواره پایینی قرار داده می‌شوند. هم‌چنین دهانه ورودی موجبرها یکسان و بدون پیشروی پین‌ها در داخل آن قرار داده می‌شوند. سپس این پارامترها بهینه‌سازی می‌شوند تا تطبیق ورودی خوب، نسبت توان دلخواه و اختلاف فاز ۱۸۰ درجه موجبرهای خروجی مجاور در وسط باند فرکانسی به دست آید. لازم به ذکر است با توجه به نمونه‌های مشابه تقسیم‌کننده توان پیشنهادی در [۳۲-۳۱] و توضیحات ارائه‌شده، انتظار می‌رود اختلاف فاز موجبرهای مجاور خروجی در میانه باند فرکانسی مورد نظر حدود ۱۸۰ درجه باشد.

در اینجا به منظور تحلیل و بهینه‌سازی تقسیم‌کننده توان پیشنهادی از نرم‌افزار CST Microwave Studio و روش بهینه‌سازی Trust Region Framework آن استفاده شده است. هدف از بهینه‌سازی دست‌یابی به پرتو تشعشعی با سطح گلبیگ کناری پایین حوالی فرکانس ۶۰ GHz و هم‌چنین تطبیق خوب در دهانه‌ی ورودی آنتن در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها با یک کامپیوتر محاسباتی با مشخصات پردازشی CPU Intel Xeon E5-2690 v4 و رم ۱۲۸ GB انجام شده است؛ به طوری که زمان لازم برای هر شبیه‌سازی حدود ۲ دقیقه می‌باشد. ابعاد بهینه ساختار مورد نظر در جدول (۱) ارائه داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی این ساختار در شکل (۵) ارائه شده است. در این شبیه‌سازی درگاهی ورودی (۱) تحریک شده و پارامترهای پراکندگی ساختار محاسبه شده است. دقت می‌کنیم که با توجه به تقارن هندسی تقسیم‌کننده، فقط نیمه سمت راست در نظر گرفته شده و مشخصات نیمه سمت چپ دقیقاً مشابه نیمه سمت راست است. مشاهده می‌کنید که تقسیم‌کننده توان در محدوده فرکانسی ۵۸ GHz تا ۶۴ GHz دارای تطبیق ورودی مطلوب می‌باشد و در حوالی فرکانس ۶۰ GHz میزان توان



(الف)



(ب)

شکل (۷): (الف) نمای سه‌بعدی و (ب) نمای از بالای آنتن طراحی شده.

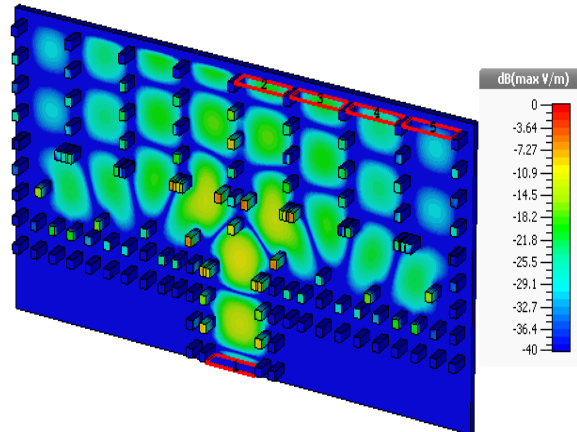
جدول (۲). مقادیر پارامترهای بهینه آنتن بر حسب میلی‌متر.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
طول شکاف ۱	۲/۱۳	آفست شکاف ۱	۰/۴۷
طول شکاف ۲	۲/۳۵	آفست شکاف ۲	۰/۴۲
طول شکاف ۳	۲/۳۷	آفست شکاف ۳	۰/۶۸
طول شکاف ۴	۲/۴۶	آفست شکاف ۴	۰/۹۱
عرض شکافها	۰/۲۸	فاصله ابتدایی	۵/۱۶
فاصله شکافها	۲/۹۱	فاصله انتهایی	۶/۲۲

نکته دیگری که باید در نظر گرفت این است که همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است، دو آرایه خطی مجاور (مثلاً خروجی دهانه‌های ۲ و ۳) به صورت تصویر آینه‌ای قرار داده شده‌اند تا اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای در گاهی‌های خروجی تقسیم‌کننده توان با این کار خنثی شود. اگر این کار انجام نشود دو ستون مجاور با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه تشعشع خواهند کرد که پرتو تشعشعی و بهره مناسبی حاصل نمی‌شود.

به منظور تغذیه آنتن توسط یک موجبر استاندارد، در صفحه زیری آنتن شکافی مستطیلی به اندازه  $3/8 \times 1/9 \text{ mm}^2$  که ابعاد موجبر استاندارد باند V (۷۵-۵۰ GHz) موسوم به WR-15 است ایجاد

توزیع میدان الکتریکی تقسیم‌کننده موج‌بری در فرکانس ۶۰ GHz در شکل (۶) نشان داده شده است. مشخص است که امواج، مقید به بسترهای موج‌بری بوده و توان امواج در خروجی‌های کناری نسبت به خروجی‌های نزدیک به مرکز کم‌تر است.



شکل (۶). توزیع میدان الکتریکی تقسیم‌کننده در فرکانس ۶۰ GHz.

### ۳-۲. طراحی و شبیه‌سازی ساختار کامل آنتن

در این قسمت بر مبنای تقسیم‌کننده توان مطرح شده در قسمت قبل، به طراحی یک آنتن آرایه شکافی صفحه‌ای با سطح گلبرگ کناری پایین می‌پردازیم. شکل (۷) ساختار کلی این آنتن که یک آرایه  $8 \times 8$  عنصری است را نشان می‌دهد. در شکل (۷-ب) صفحه فلزی بالایی حذف شده است تا جزئیات داخلی ساختار مشخص باشد. مشاهده می‌کنید که در هر خروجی تقسیم‌کننده توان، یک آرایه خطی با ۸ شکاف تشعشعی قرار داده شده است که مشخصات ۴ شکاف اول و ۴ شکاف آخر مشابه است.

طراحی و تعیین ابعاد شکافها و فاصله و میزان آفست آنها در مراجع مختلفی مطرح شده است. برای مثال در مرجع [۳۰] بر اساس اطلاعات متداول در موج‌برهای فلزی معمولی مانند استفاده از شکافها و فاصله بین آنها تقریباً برابر نیم طول موج، آنتنی در فرکانس ۳۷/۵ GHz طراحی شده است. با استفاده از تغییر مقیاس، می‌توان مقادیر اولیه مناسبی برای طراحی آنتن در فرکانس ۶۰ GHz در نظر گرفت. ابعاد بهینه آنتن که از بهینه‌سازی حاصل شده در جدول (۲) ارائه شده است.

با توجه به اینکه تقسیم‌کننده توانی در نظر گرفتیم که سطح توان خروجی از درگاه‌های میانی آن بیشتر از درگاه‌های کناری است، پس می‌توان انتظار داشت که آنتن آرایه صفحه‌ای سطح گلبرگ کناری بهتری از حالت تغذیه یکنواخت که  $-13/3 \text{ dB}$  است داشته باشد.

پرتو تشعشعی آنتن در فرکانس‌های ۵۹ GHz، ۶۰ GHz و ۶۱ GHz در شکل (۹) در صفحات E و H نشان داده شده است. پهنای بیم نیم‌توان آنتن در این صفحات به ترتیب حدود ۱۱ و ۱۵ درجه است. می‌توان دید که سطح گلبرگ کناری در صفحات E و H آنتن به حدود ۲۳ dB - رسیده که حدود ۹/۷ dB نسبت به حالت تحریک یکنواخت کاهش یافته است. البته طبق محاسبات نظری در طراحی تقسیم‌کننده توان، سطح گلبرگ کناری باید حدود ۲۵ dB - باشد که به نظر می‌رسد به دلیل تزویج متقابل و نزدیکی آرایه‌های خطی قرار گرفته در کنار هم و همچنین اثر متقابل تقسیم‌کننده توان و آرایه‌های شکافی خطی، سطح گلبرگ کناری به مقدار مورد نظر نرسیده است.

به منظور بررسی مشخصات و عملکرد آنتن پیشنهادی، مشخصات آن با چند نمونه آنتن مشابه در جدول (۳) مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که آنتن طراحی شده علاوه بر داشتن مزایای استفاده از فناوری موج‌بر شکافی که سبب رفع چالش‌های ساخت می‌شود، نسبت به نمونه‌های مشابه خود دارای پهنای باند، بهره، بازدهی و سطح گلبرگ کناری قابل قبولی است.

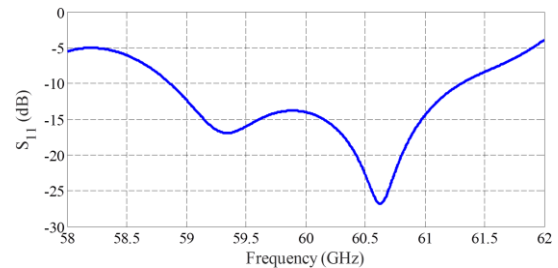
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا یک ساختار کلی برای طراحی تقسیم‌کننده‌های توان بر اساس فناوری موج‌بر شکافی ارائه شده و سپس به طراحی یک تقسیم‌کننده ۱ به ۸ پرداخته شده است. پس از اطمینان از عملکرد مناسب، با استفاده از ساختار پیشنهادی یک آنتن آرایه شکافی ۸×۸ با بهره حدود ۲۱/۷ dB پهنای باند ۴/۱ درصد و سطح گلبرگ کناری کمتر از ۲۳ dB - و بازدهی بیش از ۸۸ درصد طراحی شده است. پهنای بیم نیم‌توان آنتن هم در صفحات E و H به ترتیب حدود ۱۰ و ۱۵ درجه می‌باشد.

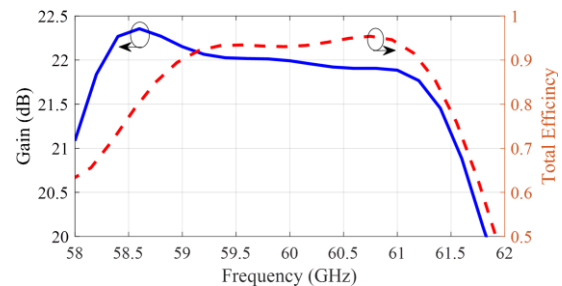
جدول (۳): مقایسه مشخصات آنتن پیشنهادی با نمونه‌های مشابه

آنتن	[۳۱]	[۳۲]	[۳۳]	[۳۴]	کار حاضر
فناوری	موج‌بر فلزی	SIW	SIW	SIW	موج‌بر شکافی
ابعاد (بر حسب λ)	۱۶×۱۳	۵×۴	۷×۶	۲۷×۱۰	۸×۷
فرکانس (GHz)	۲۵	۱۰	۱۰	۹۳	۶۰
پهنای باند (٪)	(/۰.۵)	(/۰.۴/۱)	(/۰.۲/۴)	(/۲/۱)	(/۰.۴/۱)
بهره (dB)	۳۰	۲۰	۲۱	۲۵	۲۲
بازدهی (٪)	۴۷	-	۹۰	۸۰	۹۴
SLL (dB)	-۱۵	-۲۵	-۳۰	-۲۰	-۲۳

شده و دهانه تحریک در آنجا قرار داده شده است. در حقیقت این قسمت مانند یک مبدل عمل کرده و انرژی از موج‌بر استاندارد تغذیه به بستر موج‌بری شکافی منتقل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌کنید که آنتن مورد نظر در بازه فرکانسی ۵۸/۸ GHz تا ۶۱/۲۵ GHz تطبیق خوبی دارد. همچنین بهره آنتن در این محدوده فرکانسی بیشتر از ۲۱/۷ dB و بازدهی کل آنتن هم بیشتر از ۸۸ درصد است.

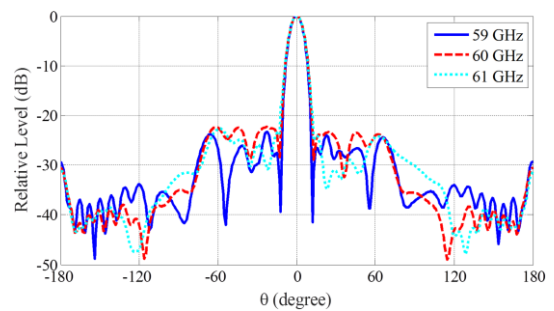


(الف)

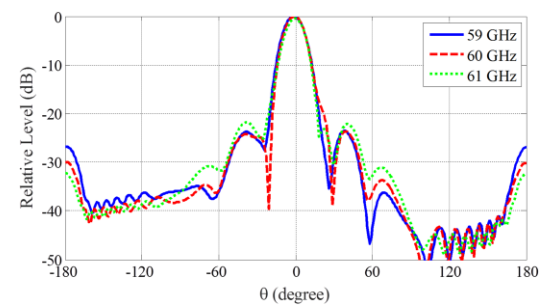


(ب)

شکل (۸): (الف) نمودار ضریب انعکاس، (ب) نمودار بهره و بازدهی آنتن بر حسب فرکانس



(الف)



(ب)

شکل (۹): پرتو تشعشعی نرمالیزه شده آنتن در (الف) صفحه E و (ب)

صفحه H

- Between Parallel Metal Plates,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 8, no. 4, pp. 84–87, Apr. 2009.
- [14] A. U. Zaman and P.-S. Kildal, “Gap waveguides,” in Handbook of Antenna Technologies, Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, and T. Zwick, Eds. Singapore: Springer, 2016, pp. 3273–3347.
- [15] A. U. Zaman and P.-S. Kildal, “Wide-Band Slot Antenna Arrays with Single-Layer Corporate-Feed Network in Ridge Gap Waveguide Technology,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 62, no. 6, pp. 2992–3001, Jun. 2014.
- [16] D. Zarifi, A. Farahbakhsh, A. U. Zaman, and P. S. Kildal, “Design and Fabrication of a High-Gain 60-GHz Corrugated Slot Antenna Array with Ridge Gap Waveguide Distribution Layer,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 64, no. 7, pp. 2905–2913, Jul. 2016.
- [17] D. Zarifi, A. Farahbakhsh and A. U. Zaman, “A Gap Waveguide-Fed Wideband Patch Antenna Array for 60-GHz Applications,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 65, no. 9, pp. 4875–4879, Sep. 2017.
- [18] A. Farahbakhsh, D. Zarifi and A. U. Zaman, “A mmWave Wideband Slot Array Antenna Based on Ridge Gap Waveguide With 30% bandwidth,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 2, pp. 1008–1013, Feb. 2018.
- [19] Z. Shaterian, A. K. Horestani and J. R. Mohassel, “Design of Slot Array Antenna in Groove Gap Waveguide Technology,” IET Microwave Antenna and Propagation, vol. 13, no. 8, pp. 1235–1239, June 2019.
- [20] B. Ahmadi and A. Banai, “Direct Coupled Resonator Filters Realized by Gap Waveguide Technology,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 63, no. 10, pp. 3445–3452, Oct. 2015.
- [21] D. Sun and J. Xu, “A Novel Iris Waveguide Bandpass Filter Using Air Gapped Waveguide Technology,” IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 26, no. 7, pp. 475–477, July 2016.
- [22] M. Rezaee and A. U. Zaman, “Realisation of Carved and Iris Groove Gap Waveguide Filter and E-Plane Diplexer for V-Band Radio Link Application,” IET Microwave Antenna and Propagation, vol. 11, no. 5, pp. 2109–2115, Oct. 2017.
- [23] D. Zarifi, A. R. Shater, A. Ashrafi and M. Nasri, “Design of Ku-Band Diplexer Based on Groove Gap Waveguide Technology,” International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, pp. 1–6, 2018.
- [24] A. Karimi Nobandegani and S. E. Hosseini, “Design and Simulation of a Ku-Band Array Antenna Feed Network Based on Novel Ridge-Gap Waveguide Technology,” Journal of Radar, vol. 6, no. 2, pp. 1–6, 2019 (in Persian)
- [25] S. I. Shams and A. Kishk, “Design of 3-dB Hybrid Coupler Based on RGW Technology,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 65, no. 10, pp. 3849–3855, Oct. 2017.
- [26] D. Zarifi and A. R. Shater, “Design of a 3-Db Directional Coupler Based on Groove Gap Waveguide Technology,” Microwave and Optical Technology Letters, vol. 59, no. 7, pp. 1597–1600, 2017.
- [27] D. Zarifi, A. Farahbakhsh and A. U. Zaman, “Design and Fabrication of Wideband Millimeter-wave Directional Couplers with Different Coupling Factors Based on Gap Waveguide Technology,” IEEE Access, vol. 7, pp. 88822–88829, 2019.
- [28] A.U. Zaman, T. Vukusic, Alexanderson, M., et al. “Gap Waveguide PMC Packaging for Improved Isolation of Circuit Components in High Frequency Microwave

مهم‌ترین ویژگی این آنتن عدم نیاز به اتصال الکتریکی لایه‌های فلزی است که موجب سهولت فرآیند ساخت در محدوده امواج میلی‌متری می‌شود. می‌توان ساختار مورد نظر را در فرکانس‌های بالاتر در محدوده امواج میلی‌متری هم با طراحی استفاده نمود.

## ۵. مراجع

- [1] P. Smulders, “Exploiting the 60 GHz Band for Local Wireless Multimedia Access: Prospects And Future Directions,” IEEE Commun. Mag., vol. 40, no. 1, pp. 140–147, Jan. 2002.
- [2] S. K. Yong and C.-C. Chong, “An Overview of Multigigabit Wireless Through Millimeter Wave Technology: Potentials and Technical Challenges,” EURASIP J. Wireless Commun. Netw., vol. 2007, p. 078907, 2007.
- [3] E. Levine, G. Malamud, S. Shtrikman, and D. Treves, “A Study of Microstrip Array Antennas with the Feed Network,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 37, no. 4, pp. 426–434, Apr. 1989.
- [4] M. Li and K.-M. Luk, “Low-Cost Wideband Microstrip Antenna Array for 60-GHz Applications,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 62, no. 6, pp. 3012–3018, Jun. 2014.
- [5] M. Nagasaka, S. Nakazawa, and S. Tanaka, “12/21GHz Dual-Band Feed Antenna for Satellite Broadcasting Receiving Reflector Antenna,” in Proc. ISAP, pp. 790–793, Oct./Nov. 2012.
- [6] S. Cheng, H. Yousef, and H. Kratz, “79 GHz Slot Antennas Based on Substrate Integrated Waveguides (SIW) in a Flexible Printed Circuit Board,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, no. 1, pp. 64–71, Jan. 2009.
- [7] J. Wu, Y. J. Cheng, and Y. Fan, “A Wideband High-Gain High-Efficiency Hybrid Integrated Plate Array Antenna for V-Band Inter-Satellite Links,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 63, no. 4, pp. 1225–1233, Apr. 2015.
- [8] Y. Li and K.-M. Luk, “60-GHz substrate integrated waveguide fed cavity-backed aperture-coupled microstrip patch antenna arrays,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 63, no. 3, pp. 1075–1085, Mar. 2015.
- [9] Y. Miura, J. Hirokawa, M. Ando, Y. Shibuya, and G. Yoshida, “Double-layer full-corporate-feed hollow-waveguide slot array antenna in the 60-GHz band,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 59, no. 8, pp. 2844–2851, Aug. 2011.
- [10] D. Kim, M. Zhang, J. Hirokawa, and M. Ando, “Design and fabrication of a dual-polarization waveguide slot array antenna with high isolation and high antenna efficiency for the 60 GHz band,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 62, no. 6, pp. 3019–3027, Jun. 2014.
- [11] G.-L. Huang, S.-G. Zhou, T.-H. Chio, H.-T. Hui, and T.-S. Yeo, “A Low Profile and Low Sidelobe Wideband Slot Antenna Array Fed by an Amplitude-Tapering Waveguide Feed-Network,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 63, no. 1, pp. 419–423, Jan. 2015.
- [12] P.-S. Kildal, “Three Metamaterial-Based Gap Waveguides Between Parallel Metal Plates for Mm/Submm Waves,” in Proc. 3rd Eur. Conf. Antennas Propag., Berlin, Germany, pp. 28–32, Mar. 2009.
- [13] P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, “Local Metamaterial-Based Waveguides in Gaps

- [32] Junfeng Xu, Wei Hong, Pang Chen, Ke Wu: "Design and Implementation of Low Sidelobe Substrate Integrated Waveguide Longitudinal Slot Array Antennas", IET Microw. Antennas Propag., Vol. 3, No.5, pp. 790-797, 2009.
- [33] H. Yang, "Improved Design of Low Sidelobe Substrate Integrated Waveguide Longitudinal Slot Array," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 14, pp. 237-240, 2015.
- [34] J. Wang, and Y. J. Cheng, "W-Band High Gain Slot Array Antenna with Low Sidelobe Level," IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, pp. 27-28, 2016.
- Modules", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., vol. 4, no. 1, pp. 16-25, 2014.
- [29] R. S. Elliot, Antenna Theory and Design, Wiley, New Jersey, 2003, pp. 141-147.
- [30] A. Khaleghi, Z. TalePour and M. Ramazan, "Resonant Slot Antenna Array on a Ridge Gap Waveguide," IET Microwaves Antennas Propag., vol. 11, no. 8, pp. 1092-1097, 2017.
- [31] S. Park, Y. Tsunemitsu, J. Hirokawa and M. Ando, "Center Feed Single Layer Slotted Waveguide Array," IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 54, No. 5, pp. 1474-1480, May 2006.



---

**Design of Power Divider Based on Gap Waveguide Technology for Use in Low Sidelobe Level 60-GHz Slot Array Antenna**

**M. S. Dehghani, D. Zarifi \***

**University of Kashan**

(Received: 13/11/2019, Accepted: 05/02/2020)

**Abstract**

*In this paper, a millimeter-wave power divider based on gap waveguide technology is designed for use in the feeding network of a slot array antenna. The simulation results demonstrate that the proposed structure has about 10% matching input bandwidth in the 58-64 GHz frequency range. The significant advantage of using gap waveguide technology is that there is no requirement of good electrical contact among different metallic parts of the low-loss structure which considerably simplifies the manufacturing processes and mechanical assembly at millimeter-waves applications. Finally, a planar slot array antenna is designed with sidelobe level of -23 dB and bandwidth of 4.1% at the center frequency of 60 GHz. The gain of antenna is higher than 21.7 dB over the operation bandwidth from 58.8 to 61.25 GHz, corresponding to efficiency larger than 88%.*

**Keywords:** Power Divider, Gap Waveguide Technology, Slot Array Antenna, Low Sidelobe Level

---

\* Corresponding author E-mail: zarifi@kashanu.ac.ir