

# تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن‌باند کوچک با کم‌ترین خطای دامنه و بیشترین جداسازی

ناصر ناصری<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد؛ زهرا قطان کاشانی<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - n.nasari@ee.kntu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - z.ghatan@kntu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله یک تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن‌باند طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. در این ساختار به جای مبدل ربع طول موج در تقسیم‌کننده‌ی توان ویلکینسون معمولی، از خط میکرواستریپ باریک‌شونده‌ی نمایی استفاده شده است. از آنجایی که خط باریک‌شونده در همه‌ی فرکانس‌ها یک انتقال امپدانس ثابتی ایجاد می‌کند، اختلاف بیشترین و کم‌ترین مقدار در ضریب انتقال بسیار کم و برابر با ۰/۵dB و مقدار افت بازگشتی بسیار خوب و بهتر از ۱۵dB در یک پهنای باند بسیار وسیع به دست آمده است. با بهینه‌سازی مکان دو مقاومت استاندارد اضافی که در طول خط باریک‌شونده اضافه شده‌اند، افت بازگشتی و جداسازی بین دهانه‌های خروجی بهبود یافته است. نتایج شبیه‌سازی با تحلیل تمام موج مبتنی بر روش المان محدود به دست آمده است و نتایج اندازه‌گیری حاکی از عملکرد خوب مدار پیشنهادی است. افت بازگشتی دهانه‌های خروجی در باند فرکانسی ۶-۱۶GHz بهتر از ۱۵dB و جداسازی بین دهانه‌های خروجی بهتر از ۲۰dB است. در انتها یک مقایسه بین تقسیم‌کننده‌های توان فرایه‌ن‌باند انجام شده است. به راحتی می‌توان دریافت که تقسیم‌کننده‌ی توان پیشنهادی از نظر ویژگی‌های مهم مطرح‌شده، عملکرد خوبی نسبت به سایر تقسیم‌کننده‌های توان فرایه‌ن‌باند دارد.

**واژه‌های کلیدی:** تقسیم‌کننده‌ی توان، فرایه‌ن‌باند، خطای دامنه، جداسازی.

## Compact Ultra Wideband Power Divider with Low Amplitude Imbalance and High Isolation

N. Naseri<sup>1</sup>, MSc; Z. Ghattan Kashani<sup>2</sup>, Assistant Professor<sup>2</sup>

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: n.nasari@ee.kntu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: z.ghatan@kntu.ac.ir

**Abstract:** In this paper an ultra-wideband power divider has been designed, simulated and fabricated. In this structure, the quarter-wave transformer in the conventional Wilkinson power divider, is replaced by an exponentially tapered microstrip line. Since the tapered line provides a consistent impedance transformation across all frequencies, very low amplitude ripple of 0.5dB peak-to-peak in the transmission coefficient and superior input return loss better than 15dB are achieved over an ultra-wide bandwidth. By optimizing the physical locations of the two additional standard resistors added along the tapered line, the output return loss and isolation are improved. The simulation results achieved by full wave analysis based on Finite Element Method (FEM) and the measured results confirm the good performance of the proposed circuit. The return loss of the output ports is better than 15dB and the isolation between the output ports is better than 20dB across the band 6-16GHz. Finally a comparison between ultra-wideband power dividers is provided. It is clear that the proposed divider in terms of the aforementioned important features, has a good performance related to the other ultra-wideband power dividers.

**Keywords:** Power divider, ultra wideband, amplitude imbalance, isolation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶ و ۱۳۹۸/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۳

نام نویسنده مسئول: زهرا قطان کاشانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان شریعتی، سید خندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه مخابرات

## ۱- مقدمه

از سال ۲۰۰۲ که کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا FCC قوانین مربوط به استفاده از باند فرکانسی ۳/۱-۱۰/۶ GHz را برای استفاده در سیستم فرایه‌پهن‌بند (UWB) تصویب کرد، مجال جدیدی برای مهندسان و طراحان به وجود آمد که بتوانند توانایی‌ها و استعدادشان را در ارائه‌ی ساختارها و طرح‌های مختلف نشان دهند [۱]. وسیع بودن پهنای باند نه تنها موجب سادگی مدارها و کاهش توان مصرفی سیستم‌های UWB شده، بلکه لینک‌های مخابراتی را در مقابل تداخل‌گرهای موجود در محیط‌های با انعکاس بالا مقاوم می‌سازد [۲].

با پیشرفت سیستم‌های بی‌سیم فرایه‌پهن‌بند، طراحی مدارات پهن‌بند مایکروویوی مانند تقسیم‌کننده‌ی توان اهمیت فراوان دارد. تقسیم‌کننده‌های توان ادوات پسیوی هستند که به‌طور گسترده در سیستم‌های مایکروویو مورد استفاده قرار می‌گیرند. تقسیم‌کننده‌ی توان، توان سیگنال ورودی را بین دو یا چند دهانه‌ی خروجی تقسیم می‌کند. در تقسیم‌کننده‌ی توان علاوه بر افت عبوری پایین، ریپل دامنه‌ی کم، افت بازگشتی بالا و جداسازی زیاد در کل باند فرکانسی اهمیت دارد. تقسیم‌کننده‌ی توان T، ساده‌ترین تقسیم‌کننده‌ی توان است. برای تطبیق امپدانس دهانه‌های خروجی به امپدانس بار استاندارد، یک مبدل ربع طول موج نیاز است. با وجود این به دلیل جداسازی پایین و پهنای باند کم جهت دستیابی به افت بازگشتی بهتر از ۱۵dB، به‌ندرت در مدارات مایکروویو پیشرفته از مبدل ربع طول موج استفاده می‌شود. ویلکینسون با قراردادن یک مقاومت بین دهانه‌های خروجی، مساله‌ی جداسازی پایین را حل کرد [۳]. این موضوع یک پیشرفت بزرگ در طراحی یک تقسیم‌کننده‌ی توان بود. اما به دلیل محدودیت مبدل ربع طول موج، تقسیم‌کننده‌ی توان تنها در یک فرکانس خاص کار می‌کند. با توجه به این که طول خط دقیقاً برابر با یک چهارم طول موج در فرکانس مرکزی است، پهنای باند کاری محدود است. برای بهبود پهنای باند، می‌توان چندین مبدل ربع طول موج را به‌صورت سری به هم متصل کرد که این موضوع باعث افزایش اندازه‌ی مدار می‌شود [۴]. در این حالت به خاطر ناپیوستگی‌های موجود در گام‌های امپدانس، ریپل‌هایی در ضریب انتقال ظاهر می‌شود. بسیاری از روش‌ها برای کاهش اندازه‌ی تقسیم‌کننده‌ی توان پیشنهاد شده‌اند؛ اما دارای عملکرد الکتریکی مناسبی نیستند [۵]. تغییرات زیادی روی تقسیم‌کننده‌ی توان ویلکینسون برای بهبود پهنای باند کاری و جداسازی انجام شده است [۶].

از سال ۲۰۰۲ که کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا FCC قوانین مربوط به استفاده از باند فرکانسی ۳/۱-۱۰/۶ GHz را برای استفاده در سیستم فرایه‌پهن‌بند (UWB) تصویب کرد، مجال جدیدی برای مهندسان و طراحان به وجود آمد که بتوانند توانایی‌ها و استعدادشان را در ارائه‌ی ساختارها و طرح‌های مختلف نشان دهند [۱]. وسیع بودن پهنای باند نه تنها موجب سادگی مدارها و کاهش توان مصرفی سیستم‌های UWB شده، بلکه لینک‌های مخابراتی را در مقابل تداخل‌گرهای موجود در محیط‌های با انعکاس بالا مقاوم می‌سازد [۲].

با پیشرفت سیستم‌های بی‌سیم فرایه‌پهن‌بند، طراحی مدارات پهن‌بند مایکروویوی مانند تقسیم‌کننده‌ی توان اهمیت فراوان دارد. تقسیم‌کننده‌های توان ادوات پسیوی هستند که به‌طور گسترده در سیستم‌های مایکروویو مورد استفاده قرار می‌گیرند. تقسیم‌کننده‌ی توان، توان سیگنال ورودی را بین دو یا چند دهانه‌ی خروجی تقسیم می‌کند. در تقسیم‌کننده‌ی توان علاوه بر افت عبوری پایین، ریپل دامنه‌ی کم، افت بازگشتی بالا و جداسازی زیاد در کل باند فرکانسی اهمیت دارد. تقسیم‌کننده‌ی توان T، ساده‌ترین تقسیم‌کننده‌ی توان است. برای تطبیق امپدانس دهانه‌های خروجی به امپدانس بار استاندارد، یک مبدل ربع طول موج نیاز است. با وجود این به دلیل جداسازی پایین و پهنای باند کم جهت دستیابی به افت بازگشتی بهتر از ۱۵dB، به‌ندرت در مدارات مایکروویو پیشرفته از مبدل ربع طول موج استفاده می‌شود. ویلکینسون با قراردادن یک مقاومت بین دهانه‌های خروجی، مساله‌ی جداسازی پایین را حل کرد [۳]. این موضوع یک پیشرفت بزرگ در طراحی یک تقسیم‌کننده‌ی توان بود. اما به دلیل محدودیت مبدل ربع طول موج، تقسیم‌کننده‌ی توان تنها در یک فرکانس خاص کار می‌کند. با توجه به این که طول خط دقیقاً برابر با یک چهارم طول موج در فرکانس مرکزی است، پهنای باند کاری محدود است. برای بهبود پهنای باند، می‌توان چندین مبدل ربع طول موج را به‌صورت سری به هم متصل کرد که این موضوع باعث افزایش اندازه‌ی مدار می‌شود [۴]. در این حالت به خاطر ناپیوستگی‌های موجود در گام‌های امپدانس، ریپل‌هایی در ضریب انتقال ظاهر می‌شود. بسیاری از روش‌ها برای کاهش اندازه‌ی تقسیم‌کننده‌ی توان پیشنهاد شده‌اند؛ اما دارای عملکرد الکتریکی مناسبی نیستند [۵]. تغییرات زیادی روی تقسیم‌کننده‌ی توان ویلکینسون برای بهبود پهنای باند کاری و جداسازی انجام شده است [۶]. طرح ارائه‌شده در [۶] دارای افت بازگشتی ورودی بهتر از ۱۵ dB در پهنای باند کاری ۳-۱۸ GHz و اختلاف بیشترین و کم‌ترین مقدار ضریب انتقال در کل باند برابر با ۰/۴ dB است. با وجود این افت بازگشتی و جداسازی خروجی بدتر از ۱۵ dB است. در [۷] یک تقسیم‌کننده‌ی توان فوق پهن‌بند طراحی شده است. در این ساختار با قراردادن مقاومت جداسازی، جداسازی به‌دست‌آمده دارای مقادیری بین ۱۵-۱۰ dB است. افت بازگشتی برای دهانه‌های ورودی و خروجی در پهنای باند کاری

در این مقاله یک تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌پهن‌بند ارائه شده است. مبدل ربع طول موج در تقسیم‌کننده‌ی توان ویلکینسون معمولی جایگزین خط میکرواستریپ معمولی شده است. به دلیل این که خط باریک‌شونده در تمام فرکانس‌ها انتقال امپدانس ثابتی ایجاد می‌کند [۱۰]، ریپل دامنه در ضریب انتقال و افت بازگشتی ورودی بهبود یافته است. جهت بهبود جداسازی و افت بازگشتی خروجی، دو مقاومت دیگر در طول خط باریک‌شونده قرار داده شده است. این تقسیم‌کننده‌ی توان نسبت به سایر تقسیم‌کننده‌های توان فرایه‌پهن‌بند دارای افت بازگشتی، افت عبوری و جداسازی بهتر بوده و ابعاد کوچک‌تری دارد.

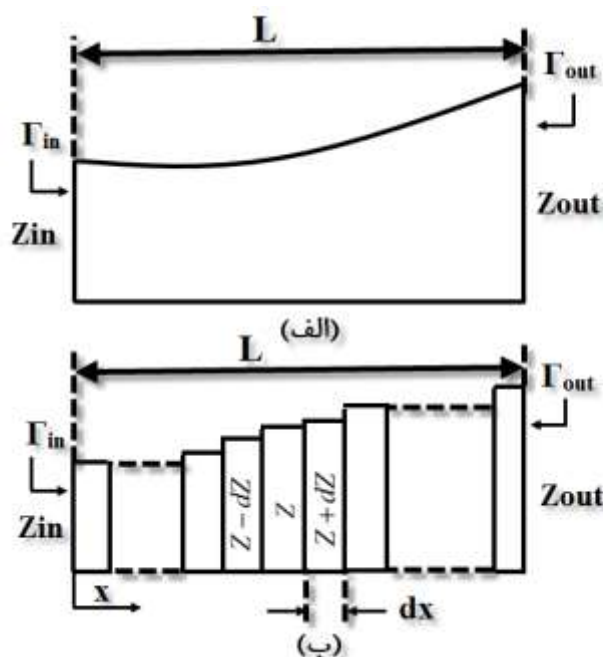
در بخش دوم خطوط باریک‌شونده به‌عنوان المان‌های تطبیق پهن‌بند معرفی شده و ساختار تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌پهن‌بند طراحی شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تقسیم‌کننده‌ی توان طراحی شده ارائه شده و در انتها نیز تقسیم‌کننده‌های توان فرایه‌پهن‌بند مختلف با تقسیم‌کننده‌ی توان طراحی شده مقایسه شده است.

## ۲- تقسیم‌کننده‌ی توان فوق پهن‌بند

به‌منظور افزایش پهنای باند تقسیم‌کننده‌ی توان، می‌توان از سری کردن چندین مبدل امپدانس ربع طول موج، (مبدل امپدانس چند بخشی) یا خطوط باریک‌شونده استفاده کرد. استفاده از مبدل امپدانس چندبخشی باعث افزایش اندازه‌ی ساختار شده و به‌علت وجود ناپیوستگی در گام‌های امپدانس، ریپل ضریب انتقال افزایش می‌یابد. استفاده از خط باریک‌شونده‌ی نمایی باعث کاهش اندازه‌ی ساختار شده و به‌علت ایجاد انتقال امپدانس ثابت در تمامی فرکانس‌ها، ریپل دامنه در ضریب انتقال کاهش می‌یابد. در این مقاله جهت افزایش پهنای باند تقسیم‌کننده‌ی توان، از خطوط باریک‌شونده استفاده شده است.

## ۲-۱- خطوط باریک‌شونده به‌عنوان المان‌های تطبیق پهن‌بند

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، خط باریک‌شونده یک خط انتقال محدود است که امپدانس مشخصه‌ی آن به‌طور پیوسته در طول آن تغییر می‌کند. یک خط باریک‌شونده را می‌توان به‌صورت یک خط انتقال N قسمتی به طول  $\Delta x$ ، در نظر گرفت. بنابراین طول کلی خط باریک‌شونده  $L = N \Delta x$  است. امپدانس خط باریک‌شونده به‌طور پیوسته به‌صورت تابعی از x، از مقدار  $Z_{in}$  به  $Z_{out}$  تغییر می‌کند.



شکل ۱: (الف) خط باریک‌شونده پیوسته، (ب) مدل ساده‌شده‌ی خط باریک‌شونده

مشخص شدن  $Z(x)$  افت بازگشتی به دست می‌آید. تابع نمایی، مثلی و کلیفمنشتاین<sup>۲</sup> از جمله توابع معروف برای  $Z(x)$  هستند. رایج‌ترین خط باریک‌شونده، خط باریک‌شونده‌ی نمایی است که در (۴) فرمول  $Z(x)$  این خط نشان داده شده است.

$$Z(x) = Z_{in} e^{ax} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{Z_{out}}{Z_{in}}\right)$$

که  $L$  طول کلی خط باریک‌شونده است. افت بازگشتی خط باریک‌شونده‌ی نمایی در رابطه‌ی (۵) نشان داده شده است [۱۱].

$$\Gamma = \frac{\ln\left(\frac{Z_{out}}{Z_{in}}\right)}{2} e^{-j\beta L} \frac{\sin \beta L}{\beta L} \quad (5)$$

اگر در رابطه‌ی (۵)  $\beta L = k\pi$  باشد، اندازه‌ی ضریب انعکاس برابر با صفر می‌شود. بنابراین با ترسیم اندازه‌ی ضریب انعکاس بر حسب  $\beta L$ ، ضریب انعکاس دارای قله‌هایی است که با افزایش  $\beta L$  دامنه‌ی این قله‌ها کاهش می‌یابد و در مضارب  $\pi$  برابر با صفر می‌شود. با افزایش طول خط باریک‌شونده‌ی نمایی اندازه‌ی ضریب انعکاس کاهش می‌یابد و جهت کاهش عدم تطبیق در فرکانس‌های پایین باید  $\beta L > \pi$  باشد یا طول خط باریک‌شونده‌ی نمایی بزرگ‌تر از  $\lambda/2$  در نظر گرفته شود [۱۲].

## ۲-۲- ساختار تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن‌باند

در این مقاله هدف طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک تقسیم‌کننده‌ی توان ۱:۲ فرایه‌ن‌باند از فرکانس ۶-۱۶GHz با پهنای باند کاری ۱۰GHz

در این حالت  $Z(L)=Z_{out}$  و  $Z(0)=Z_{in}$  است. هدف کاهش افت بازگشتی به صورت تابعی از  $Z(x)$  است.

جهت یافتن  $Z(x)$  مناسب باید افت بازگشتی کلی حاصل از هر قسمت در طول خط باریک‌شونده محاسبه گردد. در رابطه‌ی (۱) انعکاس جزئی نشان داده شده است.

$$\Delta\Gamma = \frac{(Z + \Delta Z) - Z}{(Z + \Delta Z) + Z} \cong \frac{\Delta Z}{2Z} \quad (1)$$

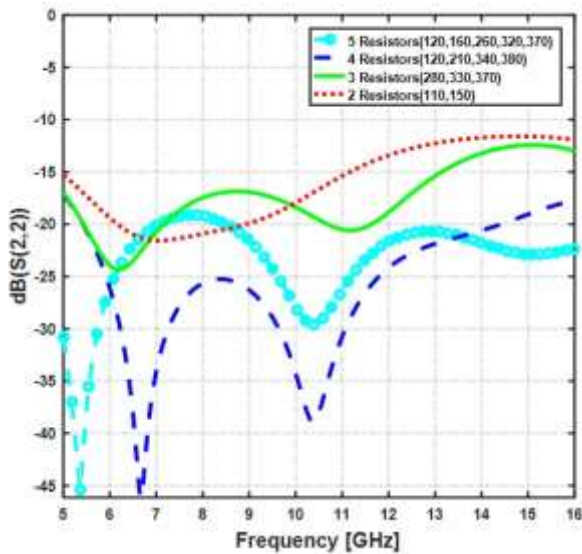
که  $\Delta Z$  تغییر امپدانس و  $\Delta\Gamma$  مقدار بازگشتی در اثر تغییر امپدانس برای هر قسمت به طول  $\Delta x$  در مکان  $x$  است. در رابطه‌ی (۲) دیفرانسیل افت بازگشتی نشان داده شده است.

$$d\Gamma = \frac{dZ}{2Z} = \frac{1}{2} \frac{d\left(\ln\frac{Z}{Z_{in}}\right)}{dx} dx \quad (2)$$

با استفاده از تئوری انعکاس جزئی، افت بازگشتی کلی در دهانه‌ی ورودی مطابق رابطه‌ی (۳) است.

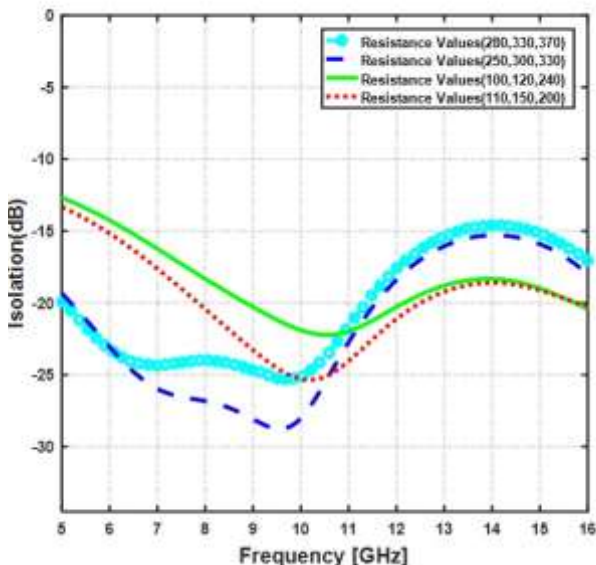
$$\Gamma(\theta) = \frac{1}{2} \int_{x=0}^L e^{-2j\beta x} \frac{d}{dx} \ln\left(\frac{Z(x)}{Z_{in}}\right) dx \quad (3)$$

که  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  عدد موج و  $\theta = 2\beta L$  برابر با طول الکتریکی خط باریک‌شونده نمایی با در نظر گرفتن مسیر رفت و برگشت موج است. با



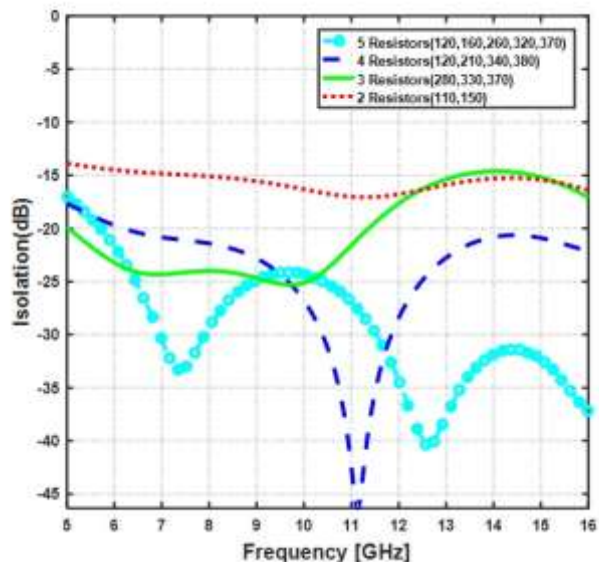
شکل ۳: افت بازگشتی دهانه خروجی تقسیم‌کننده‌ی توان فراپهن باند با قراردادن ۲، ۳، ۴، ۵ مقاومت در طول خط باریک شونده (مقادیر مقاومت‌ها برحسب اهم هستند).

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، با افزایش تعداد مقاومت‌ها افت بازگشتی دهانه‌ی خروجی بهتر می‌شود. در مرحله‌ی دوم فاصله‌ی بین مقاومت‌ها همان مقدار ۱/۷ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده و مقدار سه مقاومت تغییر یافته‌است. در شکل ۴ جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی برای چهار حالت مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴: جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی با تغییر مقدار مقاومت‌ها در چهار حالت مختلف (مقادیر مقاومت‌ها برحسب اهم هستند). همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی با مقدار مقاومت‌های ۱۱۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ اهم و ۱۰۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ اهم نسبت به دو نمودار دیگر در کل باند بهتر است. با توجه به

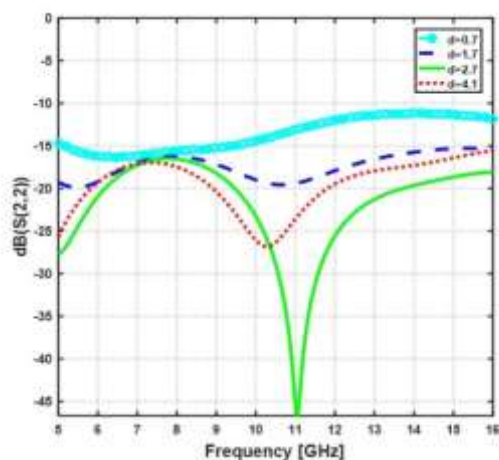
است. توان ورودی به‌طور مساوی بین دو دهانه‌ی خروجی تقسیم می‌شود. جهت دستیابی به عرض باند مورد نظر از خطوط باریک‌شونده‌ی نمایی استفاده شده است. برای آن که توان به‌طور مساوی بین دو دهانه‌ی خروجی تقسیم گردد، مطابق رابطه‌ی (۵) باید  $Z_{in}$  را برابر با ۱۰۰ اهم و  $Z_{out}$  را برابر با ۵۰ اهم در نظر گرفته و مسیر ورودی تا خروجی‌ها یکسان در نظر گرفته‌شود. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، جهت کاهش اندازه‌ی ضریب انعکاس باید  $\beta L > \pi$  باشد یا طول خط باریک‌شونده‌ی نمایی بزرگ‌تر از  $\lambda/2$  در نظر گرفته‌شود. با قراردادن مقاومت در طول خط باریک‌شونده و تغییر تعداد، مقدار و مکان آن‌ها می‌توان افت بازگشتی خروجی و جداسازی ساختار را تغییر داد. جهت دستیابی به جداسازی بهتر از ۲۰ dB در کل باند ابتدا باید تعداد مقاومت‌ها تعیین شود. بدین منظور فاصله‌ی بین مقاومت‌ها را برابر با مقدار ثابت ۱/۷ میلی‌متر در نظر گرفته و شبیه‌سازی با ۲، ۳، ۴ و ۵ مقاومت مختلف انجام شده‌است. جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی با تغییر تعداد مقاومت‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



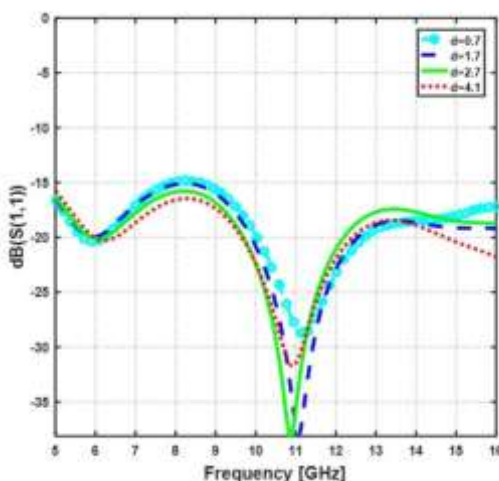
شکل ۲: جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی با قراردادن ۲، ۳، ۴، ۵ مقاومت در طول خط باریک شونده (مقادیر مقاومت‌ها برحسب اهم هستند).

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، با افزایش تعداد مقاومت‌ها جداسازی بهتر می‌شود. بنابراین به‌نظر می‌رسد بهتر است در طراحی ساختار از ۵ مقاومت و یا بیشتر استفاده گردد. اما با توجه به اینکه فرکانس کاری ساختار زیاد است، کوچک‌ترین تغییر در مکان مقاومت‌ها و نیز میزان لحیم استفاده‌شده جهت نصب مقاومت‌ها ممکن است پاسخ ساختار را دچار تغییر کند. بنابراین بهتر است با کم‌ترین تعداد مقاومت، جداسازی بهتر از ۲۰ dB به‌دست‌آید. از شکل ۲ مشخص است که با دو مقاومت نمی‌توان به این مهم دست یافت. از میان ۳، ۴ و ۵ مقاومت، تعداد ۳ مقاومت انتخاب شده‌است. افت بازگشتی در خروجی ساختار با تغییر تعداد مقاومت‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

مقاومت‌ها برابر با ۲/۷ میلی‌متر، جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی در کل باند بهتر از ۲۰dB است. در شکل ۷ افت بازگشتی دهانه‌ی خروجی ساختار نشان داده شده است.



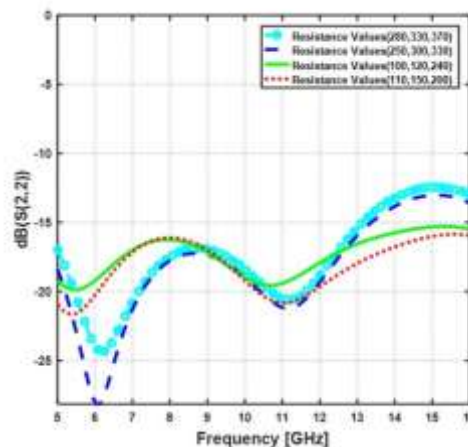
شکل ۷: افت بازگشتی دهانه‌ی خروجی با تغییر فاصله‌ی بین مقاومت‌ها در چهار حالت مختلف (مقادیر مقاومت‌ها برحسب اهم هستند). همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، با قراردادن فاصله‌ی بین مقاومت‌ها برابر با ۲/۷ میلی‌متر افت بازگشتی خروجی دارای بهترین مقدار است. تغییر تعداد، مقدار و فاصله‌ی بین مقاومت‌ها تأثیری روی افت بازگشتی دهانه‌ی ورودی ساختار ندارد. در شکل ۸ افت بازگشتی دهانه‌ی ورودی ساختار با تغییر فاصله‌ی بین مقاومت‌ها نشان داده شده است.



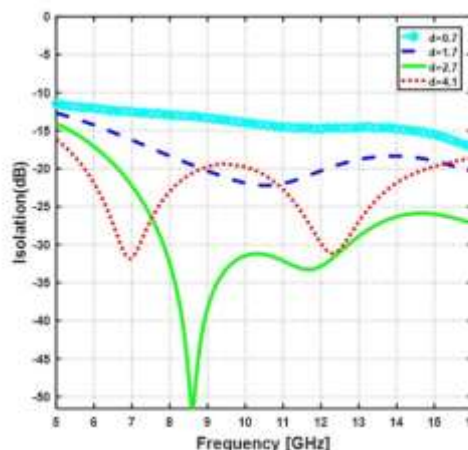
شکل ۸: افت بازگشتی دهانه‌ی ورودی با تغییر فاصله‌ی بین مقاومت‌ها در چهار حالت مختلف (مقادیر مقاومت‌ها برحسب اهم هستند).

همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، تغییر فاصله‌ی بین مقاومت‌ها تأثیر چندانی روی افت بازگشتی دهانه‌ی ورودی ساختار ندارد. در شکل ۹ تصویر این ساختار پس از بهینه‌سازی در نرم افزار HFSS نشان داده شده است.

اینکه مقاومت‌های مورد استفاده در طراحی باید استاندارد باشند، مقدار مقاومت‌ها برابر با ۱۰۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ اهم در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ افت بازگشتی خروجی ساختار با تغییر مقدار مقاومت‌ها نشان داده شده است.

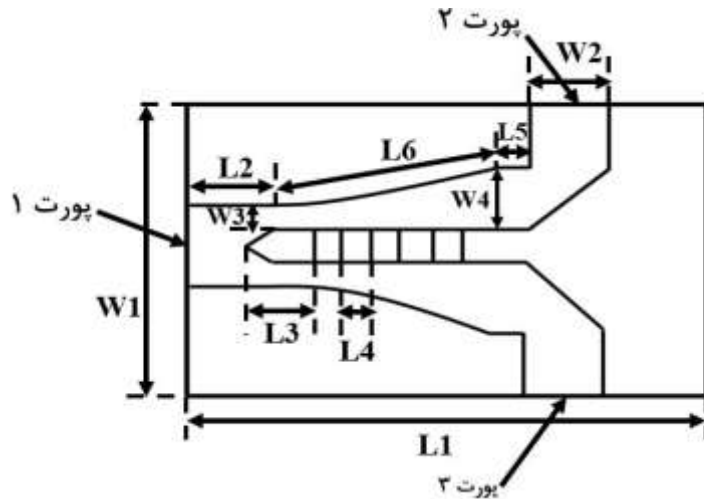


شکل ۵: افت بازگشتی خروجی ساختار با تغییر مقدار مقاومت‌ها در چهار حالت مختلف (مقادیر مقاومت‌ها برحسب اهم هستند). همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، با تغییر مقدار مقاومت‌ها افت بازگشتی خروجی ساختار تغییر می‌کند و با انتخاب مقاومت‌های ۱۰۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ اهم افت بازگشتی خروجی در کل باند بهتر از ۱۵dB است. در مرحله‌ی سوم، مقدار مقاومت‌ها برابر مقدار ثابت ۱۰۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ اهم در نظر گرفته شده و فاصله‌ی بین آن‌ها تغییر یافته است. در شکل ۶ جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی با تغییر فاصله‌ی بین مقاومت‌ها در چهار حالت مختلف نشان داده شده است.



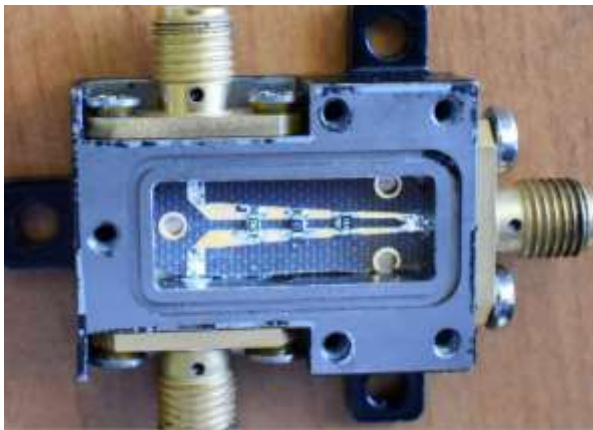
شکل ۶: جداسازی بین دو دهانه‌ی خروجی با تغییر فاصله‌ی بین مقاومت‌ها در چهار حالت مختلف (مقادیر مقاومت‌ها برحسب اهم هستند).

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، با تغییر فاصله‌ی بین مقاومت‌ها می‌توان جداسازی ساختار را تغییر داد و با انتخاب فاصله‌ی بین



شکل ۹: تقسیم‌کننده‌ی توان طراحی‌شده در نرم افزار HFSS در ابعاد  $L_1=3\text{mm}$ ،  $L_2=5\text{mm}$ ،  $L_3=4/5\text{mm}$ ،  $L_4=2/7\text{mm}$ ،  $L_5=1\text{mm}$ ،  $L_6=14\text{mm}$ ،  $W_1=6/4\text{mm}$ ،  $W_2=2/3\text{mm}$ ،  $W_3=1/4\text{mm}$ ،  $W_4=8/75\text{mm}$ ،

تقسیم‌کننده‌ی توان پس از ساخت در درون یک جعبه‌ی مکانیکی قرارداده شده است. تصویر این تقسیم‌کننده‌ی توان در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن باند بدون درپوش

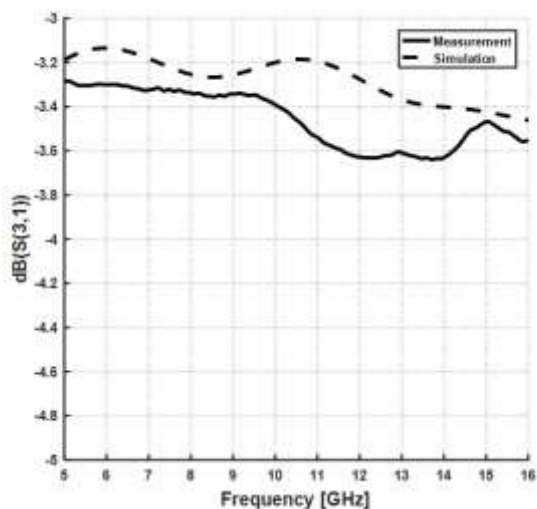
این تقسیم‌کننده‌ی توان با تحلیل‌گر شبکه‌ی ۸۵۱۰C تست شده است. در شکل ۱۱ افت بازگشتی دهانه‌ی ورودی نشان داده شده است.

پس از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار به‌منظور دستیابی به جداسازی بهتر از ۲۰dB در کل باند به‌ترتیب از سه مقاومت نصب سطحی استاندارد ۰۶۰۳ با مقادیر ۱۰۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ اهم و با فاصله‌ی ۲/۷ میلی‌متر از یک‌دیگر در طول خط باریک‌شونده از سمت ورودی به خروجی استفاده شده است. طول هر کدام از مقاومت‌ها برابر با ۰/۷۵ میلی‌متر و عرض آن‌ها برابر با ۰/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار تمام موج HFSS انجام شده و در طراحی ساختار از زیرلایه‌ی RT/duroid۵۸۷۰ با ضخامت ۰/۵۰۸mm، گذردهی نسبی ۲/۳۳ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۱۲ استفاده شده است. جهت برقراری تطبیق امپدانس و نیز کاهش اندازه‌ی ضریب انعکاس، باید طول خط باریک‌شونده‌ی نمایی برابر با  $16/3\text{mm}$  ( $\lambda/2$ ) در فرکانس ۶GHz در نظر گرفته‌شود. با بهینه‌سازی ساختار، در طراحی طول خط باریک‌شونده‌ی نمایی مقدار ۱۴mm در نظر گرفته شده است.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

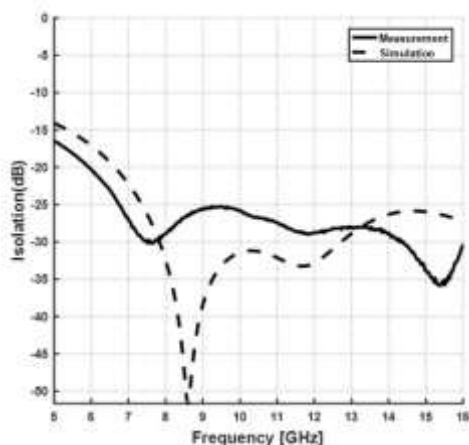


شکل ۱۱: افت بازگشتی دهانه‌ی ورودی تقسیم‌کننده‌ی توان ساخته‌شده هنگام اتصال به تحلیل‌گر شبکه (هر خانه معادل ۱۰dB است).



شکل ۱۴: نتایج حاصل از تست و شبیه‌سازی افت عبوری دهانه‌ی سوم تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن‌باند

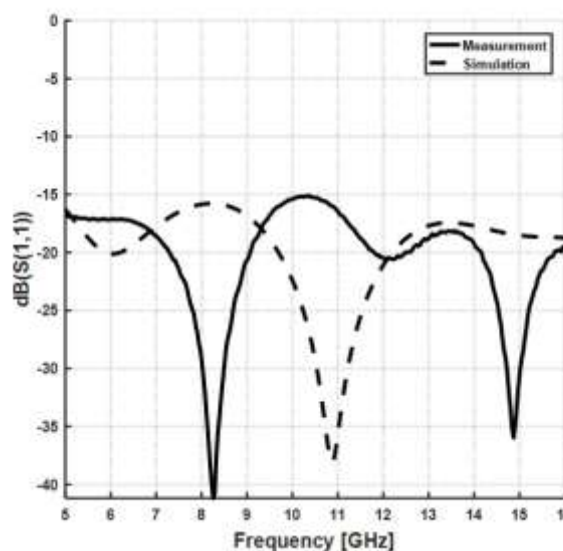
همان‌طور که از شکل ۱۴ مشخص است، تقسیم توان ۳dB در دهانه ی سوم برقرار است و اختلاف بین بیشترین مقدار و کم‌ترین مقدار در ضریب انتقال از فرکانس ۶-۱۶GHz برای این دهانه برابر با ۰/۳dB است. در شکل ۱۵ جداسازی بین دهانه‌های دو و سه نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نتایج حاصل از تست و شبیه‌سازی جداسازی بین دهانه‌های دو و سه تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن‌باند

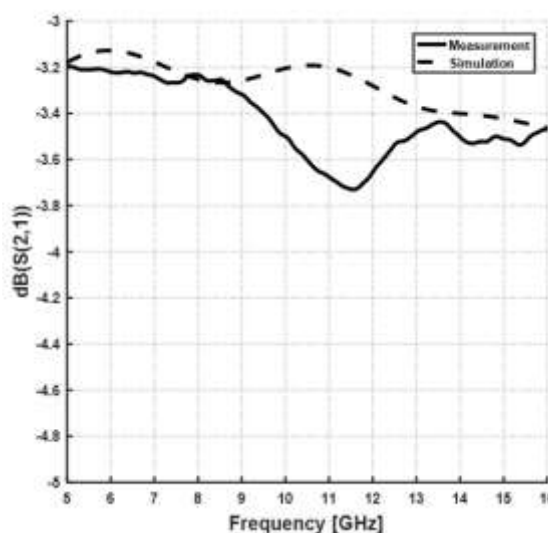
همان‌طور که از شکل ۱۵ مشخص است، جداسازی بین دهانه‌های دو و سه از فرکانس ۶-۱۶GHz بهتر از ۲۰dB است. در جدول ۱ یک مقایسه بین تقسیم‌کننده‌های توان فرایه‌ن‌باند انجام شده است. این تقسیم‌کننده‌های توان از نقطه نظرهای مختلف از جمله پهنای باند، افت بازگشتی، افت عبوری، جداسازی، تعداد مقاومت‌ها، نوع زیرلایه و اندازه‌ی ساختار با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شایان ذکر است که بیشترین پهنای باند امپدانس و بیشترین فرکانس کاری در تقسیم‌کننده‌های توان ذکر شده به ترتیب برابر با ۸GHz و ۱۱GHz، و در تقسیم‌کننده‌ی توان طراحی شده برابر با ۱۰GHz و ۱۶GHz است.

در شکل ۱۲ نتایج حاصل از تست و شبیه‌سازی افت بازگشتی تقسیم‌کننده‌ی توان در دهانه‌ی ورودی نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نتایج حاصل از تست و شبیه‌سازی افت بازگشتی دهانه‌ی ورودی تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن‌باند

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است، با توجه به تفاوت اندکی که بین محل نصب مقاومت‌ها در شبیه‌سازی و ساخت وجود دارد، مکان دره‌ها جابه‌جا شده است. با وجود این محدوده‌ی افت بازگشتی از فرکانس ۶-۱۶GHz در هر دو حالت بهتر از ۱۵dB است. در شکل ۱۳ پارامتر  $S_{21}$  ساختار نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نتایج حاصل از تست و شبیه‌سازی افت عبوری دهانه‌ی دوم تقسیم‌کننده‌ی توان فرایه‌ن‌باند

همان‌طور که از شکل ۱۳ مشخص است، اختلاف بیشترین و کم‌ترین مقدار در ضریب انتقال از فرکانس ۶-۱۶GHz برابر با ۰/۵dB است. در شکل ۱۴ پارامتر  $S_{31}$  ساختار نشان داده شده است.

جدول ۱: مقایسه‌ی تقسیم‌کننده‌های توان فرایه‌ن باند مختلف

مرجع	اندازه ساختار (میلی متر مربع)	نوع زیرلایه	تعداد مقاومت‌ها	جداسازی (dB)	افت عبوری (dB)	افت بازگشتی (dB)	پهنای باند نسبی	نوع
[۵]	۴۰×۹۰	TLX	بدون مقاومت	-۱۲	-۰/۹	-۱۵	۱۱۴%	برای کاربرد فضایی
[۷]	۲۰×۳۰	RO4003C	۱	-۱۰	-۰/۸	-۱۰	۱۰۹%	برای تکنولوژی چند لایه
[۸]	۲۰×۳۲	RT/duroid 5870	۳	-۱۵/۳۶	-۰/۷	-۱۴/۷۲	۱۰۹%	با استفاده از میدل امپدانس دوجمله‌ای سه بخشی
[۹]	۱۵/۵×۱۵/۵	RT/duroid 5880	۱	-۱۱	-۰/۶	-۱۱	۱۰۹%	با استفاده از خطوط انتقال باریک‌شونده
تقسیم‌کننده‌ی توان پیشنهادی این مقاله	۸/۷۵×۳۰	RT/duroid 5870	۳	-۲۰	-۰/۷	-۱۵	۹۱%	تقسیم‌کننده‌ی توان طراحی شده

دوبانده و ارزیابی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی»، مجله‌ی مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۸، شماره ۱، صفحات ۵۴-۶۰، ۱۳۹۷. [۲] فرشاد گوزل پور، امیر حبیب‌زاده شریف و اسماعیل نجفی اقدم، «طراحی یک فرستنده IR-UWB با چگالی طیفی توان تطبیق‌پذیر در محدوده‌ی ۱/۴-۰/۰۲ Gpps»، مجله‌ی مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۸، شماره ۳، صفحات ۱۳۵۰-۱۳۶۳، ۱۳۹۷.

- [3] E. J. Wilkinson, "An N-way power divider," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 8, pp. 116-118, Jan 1960.
- [4] S. B. Cohn, "A class of broadband three-port TEM-mode hybrids," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 16, no. 2, pp. 110-116, Feb 1968.
- [5] Z. Lin and Q. X. Chu, "A novel compact UWB power divider for spatial power combining," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 23, no. 13, pp. 1803-1812, 2009.
- [6] J. Zhuanghong, Z. Qinglin and A. Faliang, "A 2-way broad-band microstrip matched power divider," Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems, vol. 4, pp. 2592-2596, Jun 2006.
- [7] A. M. Abbosh, "Ultra wideband in-phase power divider for multilayer technology," IET Microwave, Antenna and Propagation, vol. 3, no. 1, pp. 148-153, 2009.
- [8] B. Mishra, A. Rahman, S. Shaw, M. Mohd, S. Mondal and P. P. Sarkar, "Design of an ultra-wideband Wilkinson power divider," Automation, Control, Energy and Systems (ACES), pp. 1-4, Feb. 2014.
- [9] F. Razzaz, M. A. Alkanhal and A. F. Sheta, "UWB Wilkinson power divider using tapered transmission lines," PIERS Proceedings, pp. 882-884, 2012.
- [10] R. P. Hecken, "A near-optimum matching section without discontinuities," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 20, no. 11, pp. 734-739, Nov 1972.
- [11] O. Ünlü, *Ultra Wideband Tapered Power Combiner/Divider, M.s.c. Thesis, Bilkent Univ*, Oct 2014.
- [12] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley Publishing, 2011.

از جدول ۱ به راحتی می‌توان دریافت که تقسیم‌کننده‌ی توان پیشنهادی از نظر ویژگی‌های مهم مطرح‌شده، عملکرد خوبی نسبت به سایر تقسیم‌کننده‌های توان فرایه‌ن باند دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تقسیم‌کننده‌ی توان ویلکینسون فرایه‌ن باند طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. با استفاده از خط‌نمایی باریک‌شونده به جای مبدل ربع طول موج معمولی، اختلاف بیشترین و کم‌ترین مقدار دامنه در ضریب انتقال برابر با ۰/۵dB و افت بازگشتی بهتر از ۱۵dB در یک پهنای باند وسیع از فرکانس ۱۶GHz-۶ به دست آمده است. با اضافه کردن دو مقاومت جداسازی علاوه بر مقاومت موجود در تقسیم‌کننده‌ی توان معمولی، افت بازگشتی در دهانه‌های خروجی بهتر از ۱۵dB و جداسازی بهتر از ۲۰dB به دست آمده است. با بهینه‌کردن محل قرارگیری مقاومت‌ها، مقادیر استاندارد سه مقاومت انتخاب شده است. از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری می‌توان دریافت که تقسیم‌کننده‌ی توان پیشنهادی گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در سیستم‌های فرایه‌ن باند است.

#### مراجع

- [۱] یاشار زهفروش، مهدی سفیدی و علی شادمند، «طراحی یک آنتن مسطح تک‌قطبی نوین برای کاربردهای UWB با مشخصه‌ی فیلترینگ

#### زیرنویس‌ها

<sup>1</sup> Federal Communication Commission

<sup>2</sup> Ultra Wideband

<sup>3</sup> Klopfenstein