

طراحی، شبیه سازی و مقایسه دو نوع جمع کننده پرتوان در باند VHF برای تقویت کننده های ترانزیستوری مورد نیاز شتابدهنده سیکلوترون ۱۰ MeV

دھقان، محسن^(۱) - عباسی دوانی، فریدون^{*}^(۱) - قاسمی، فرشاد^(۲) - عزیزی، حبیب^(۱)

(۱) دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه کاربرد پرتوها

(۲) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده فیزیک و شتابکرها

چکیده:

در این مقاله، مقایسه بین عملکرد دو جمع کننده توان ویلکینسون^۱ و گایسل^۲ استریپ لاین^۳ در باند VHF، بر مبنای تحلیل پارامترهای پراکنده^۴ و محدودیت های پیاده سازی، با استفاده از نرم افزار های ADS و HFSS گزارش شده است. طراحی بر اساس تئوری خط انتقال و شبیه سازی بر مبنای تئوری خط انتقال و تحلیل تمام موج صورت گرفته است. هر دو ساختار دو به یک بوده و مقدار تلف عبوری و برگشتی برای گایسل به ترتیب برابر با -30.9 dB و -36.9 dB در فرکانس مرکزی 85 MHz بودست آمدند که نتایج بهتری را در مقایسه با نوع ویلکینسون نشان می دهند.

کلمات کلیدی: (ترکیب کننده توان ویلکینسون، جمع کننده توان استریپ لاین، Gysel power combiner)

مقدمه:

پیشرفت های فراینده در ارتقای ترانزیستورهای فرکانس بالای پرتوان، باعث افزایش کاربرد مولدها و تقویت کننده های مبتنی بر آن ها به خصوص در شتابدهنده های ذرات شده است. هم زمان با پیشرفت تقویت کننده ها، توسعه جمع کننده های پرتوان، پر بازده و کوچک در حال رشد است [1]. هر جمع کننده توان در واقع یک خط انتقال است و در میان خطوط انتقال رایج، خط استریپ لاین دارای قابلیت تحمل توان بالا، پیاده سازی ساده تر و خنک سازی مناسب می باشد. جمع کننده های ویلکینسون و گایسل دو ساختار رقیب در کاربری پر توان فرکانس بالا می باشند و مقایسه بین آن ها به انتخاب گزینه بهینه در کاربردهای خاص کمک می کند.

تلف عبوری اندک، تلف ایزولاسیون کم، ایزولاسیون بالا بین پورت های ورودی و تلف برگشتی پایین مهمن ترین مواردی است که باید در طراحی و ساخت یک جمع کننده توان فرکانس بالا به آن ها توجه کرد [2]. انواع گسترده ای از جمع کننده های توان مایکروویو، در دهه ۴۰ میلادی در دانشگاه MIT ایجاد شدند؛ این ترکیب کننده ها بیشتر شامل ساختارهای موجبری و کواکسیال بودند. در میانه دهه ۵۰ میلادی بسیاری از این

Wilkinson power combiner^۱

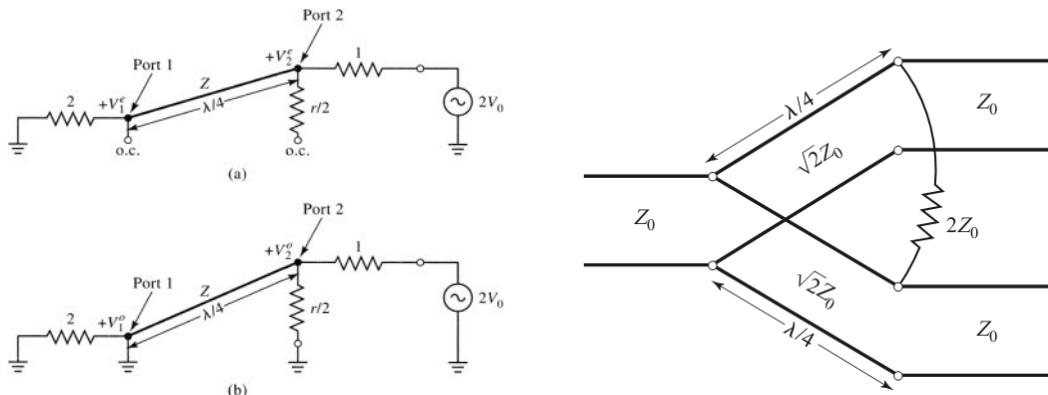
Gysel power combiner^۲

Strip line^۳

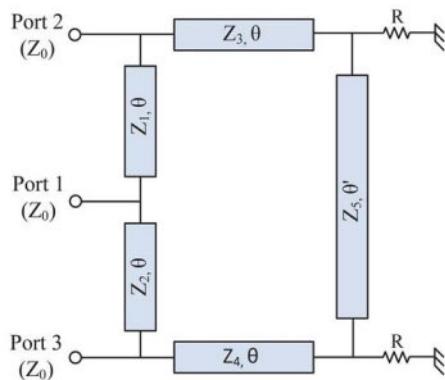
ساخтарها با جایگزینی خطوط انتقال میکرواستریپ و استریپ لاین باز طراحی شدند. تقاضای زیاد برای استفاده از ساختارهای انتقال صفحه ای موجب توسعه انواع بهینه تری از جمع کننده ها با ویژگی های مطلوب تر همچون ترکیب کننده ویلکینسون [3] و سپس گایسل [4] گردید [5]. پروژه طراحی و ساخت سیکلوترون 10 MeV از سال ۹۱ به صورت پروژه کلان ملی، زیر نظر شورای عالی عتف در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به عنوان دانشگاه محوری و با همکاری دانشگاه شهید بهشتی، دانشگاه تهران و دانشگاه SKKU کره جنوبی آغاز شده است و تاکنون فاز طراحی مفهومی و مهندسی آن به پایان رسیده است. هدف اصلی این سیکلوترون کوچک، ایجاد باریکه پروتون جهت تولید رادیوایزوتوپ های مورد استفاده در دستگاه PET می باشد. تقویت کننده اصلی RF این شتابدهنده، لامپ ترود می باشد که برای تغذیه آن از ترکیب چند تقویت کننده ترانزیستوری فرکانس بالا استفاده می شود که این کار به وسیله جمع کننده پرتوان RF انجام می شود [6]. در این مقاله ابتدا ۲ جمع کننده توان بالای دو به یک استریپ لاین به ترتیب از نوع ویلکینسون و گایسل ، برای دستیابی به توان خروجی 3 kw موج پیوسته (cw) در باند VHF (فرکانس مرکزی 85 MHz) طراحی شدند. سپس عملکرد ترکیب کننده ها از نظر پارامترهای پراکندگی، محدودیت های پیاده سازی و ابعاد کلی، مقایسه و نوع مناسب برای هدف مورد نظر پیشنهاد شد. مزیت طراحی های صورت گرفته نسبت به ساختارهای رقیب، ساخت ساده و قیمت تمام شده کمتر و در عین حال قابلیت اطمینان بیشتر می باشد.

روش کار :

ساخtar ویلکینسون (WPC) در زمرة جمع کننده های توان راکتیو [7] قرار می گیرد و تلف عبوری کم، ایزولاسیون خوب بین پورت های خروجی ، ابعاد کوچک از ویژگی های آن است. این ساختار، در صورت انتخاب خط انتقال مناسب، تحمل توان خوبی نیز دارد. اما برای کاربردهای توان بالا به علت داشتن مقاومت ایزولاسیون درونی چندان مناسب نیست. در این ساختار یک شبکه 3 دهانه تلف دار، برخلاف انواع بی اتلاف، توانایی تطبیق امپدانس هر سه دهانه را داشته و همچنین در تقابل با ترکیب کننده های مقاومتی، ایزولاسیون خوبی را نیز بین دهانه های خروجی فراهم می آورد و تنها توان برگشتی در آن تلف می شود. در شکل ۱-الف شمای کلی یک جمع کننده دو به یک توان ویلکینسون نشان داده شده است. مقادیر مقاومت ایزولاسیون و امپدانس مشخصه خط انتقال با استفاده از روش تحلیل مذووج-فرد به ترتیب برابر با $2Z_0$ و $\sqrt{2}Z_0$ بدست می آیند [5]. در شکل ۱-ب نمایی از تحریک مذووج و مذفرد نشان داده شده است.



شکل ۱-الف: ترکیب کننده توان ورودی برابر ویلکینسون [5] شکل ۱-ب: تحلیل ساختار ویلکینسون در مد (a) زوج، (b) فرد [5] برخلاف ترکیب کننده ویلکینسون، جمع کننده گایسل (GPC) با جایگزین کردن مقاومت های ایزولاسیون خارجی زمین شده به جای ساختار مقاومتی ستاره، تحمل توان بالاتر و قابلیت پیاده سازی آسان تری داشته و امکان خنک سازی راحت تری را فراهم می سازد [8]. این جمع کننده، با بسط طرح ویلکینسون و جهت مرتفع کردن معایب آن، در سال ۱۹۷۵ توسط گایسل از موسسه تحقیقاتی استنفورد پیشنهاد گردید [4]. در شکل ۲ شمای کلی یک جمع کننده دو به یک گایسل نشان داده شده است.



شکل ۲ ترکیب کننده توان برابر گایسل [2]

در نمای بالا، مقادیر θ و θ' برابر 90° درجه ($l = \lambda/4$) می باشد؛ با در نظر گرفتن فاکتور k^2 به عنوان نسبت توان های ورودی، مقادیر امپدانس های مشخصه به صورت رابطه ۱ بدست می آیند:

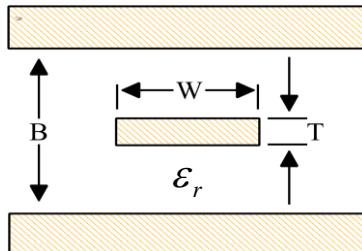
$$Z_1 = Z_0 \frac{\sqrt{1+k^2}}{k}, \quad Z_2 = Z_0 \sqrt{1+k^2}, \quad Z_3 = \sqrt{Z_0 R \frac{1+k^2}{2}}, \quad Z_4 = \sqrt{Z_0 R \frac{1+k^2}{2k^2}} \quad \text{رابطه ۱ :}$$

مقدار Z_5 دلخواه بوده و هرچه کمتر باشد، پهنای باند بیشتر خواهد شد. با در نظر گرفتن $k^2 = 1$ (حالت توان های برابر ورودی) و $R = Z_0$ خواهیم داشت: [2] $Z_3 = Z_4 = Z_0$ و $Z_1 = Z_2 = Z_0 \sqrt{2}$

در طراحی های انجام شده رساناها از جنس مس بوده و مقدار استاندارد $Z_0 = 50\Omega$ در نظر گرفته شده است؛ جهت اطمینان از تحمل توان بالای ۳kw موج پیوسته (cw)، از ساختار استریپ لاین استفاده شده

است. پارامترهای استریپ لاین با رجوع به افرونه محاسباتی شرکت Rogers و با توجه به توان مورد نیاز، نوع خط انتقال، زیر لایه دی الکتریک و فرکانس کاری مطابق جدول ۱ بدست آمدند.

جدول ۱ : پارامترهای خط انتقال استریپ لاین استفاده شده



مقدار	کمیت خط استریپ لاین
۲/۱	ϵ_r (تفلون)
۴/۸۱۳۱ mm	ضخامت نوار رسانای داخلی (T)
۲۵ mm	ضخامت زیر لایه دی الکتریک (B)

مقادیر طول و عرض نوار رسانای داخلی با استفاده از حسابگر خط انتقال نرم افزار ADS مطابق جدول ۲ محاسبه شد.

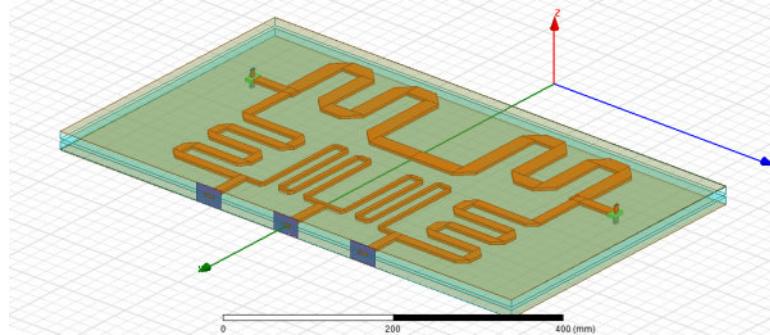
جدول ۲ : مقادیر طول و عرض نوار رسانای داخلی خط انتقال استریپ لاین استفاده شده

عرض نوار	طول نوار	ϵ_r	طول الکتریکی	امپدانس مشخصه	فرکانس کاری
۱۲/۴۱۸۱ mm	۶۰۸/۴۶ mm	۲/۱	۹۰ درجه	۵۰ Ω	۸۵MHz
۱۲/۴۱۸۱ mm	۶۷/۶۰۶۷ mm	۲/۱	۱۰ درجه	۵۰ Ω	۸۵MHz
۴/۹۶۳۵۱ mm	۶۰۸/۴۶ mm	۲/۱	۹۰ درجه	۷۰/۷۱ Ω	۸۵MHz
۲۰ mm	۶۰۸/۴۶ mm	۲/۱	۹۰ درجه	۳۸/۶۷۱۳ Ω	۸۵MHz

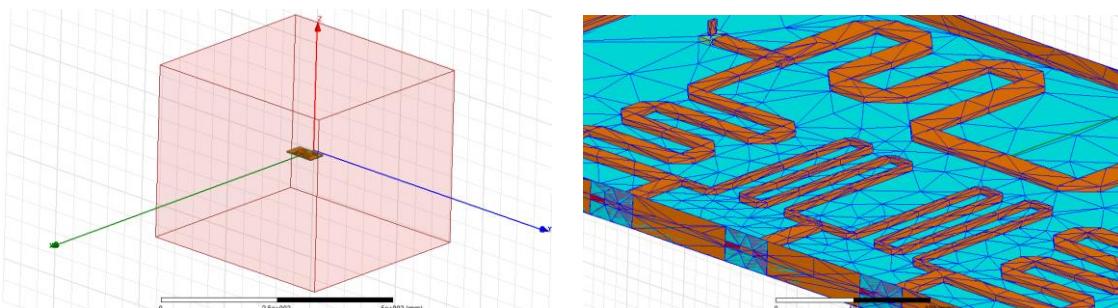
نتایج :

طراحی ها نخست در ADS انجام گرفته و پس از تحلیل مداری (تحلیل حاصل از حل معادلات مداری KVL و KCL که در واقع از حل تقریبی و ساده سازی قوانین ماکسول بدست آمده اند) و حصول اطمینان از درستی عملکرد مدار، در نرم افزار HFSS رسم شده و تحلیل تمام موج (آنالیز ساختار با حل عددی معادلات ماکسول) انجام شده است. محیط HFSS از روش Finite Element Method (FEM) یا به اختصار FEM برای حل مسئله استفاده می کند که روشی عددی در حوزه زمان بر پایه گسسته سازی ساختار است. این روش دقیق بالایی دارد و برای ساختارهای تشعشعی بسته مناسب است. مش بنده ساختار در روش FEM به صورت پیش فرض tetrahedrons می باشد. این روش مش بنده برای تحلیل ساختارهایی که نیاز به تحلیل فرکانسی (و نه تحلیل پالسی و حالت گذرا) دارند، مناسب تر می باشد. در بخش نوع حل مسئله نیز به دلیل نوع اطلاعات مورد نیاز ما که پارامترهای شبکه بودند، از Driven modal و سپس Network Analysis استفاده گردیده است. ساختار در میان یک Region خلا مکعب شکل به ابعاد یک برابر طول موج کاری مدار (۸۵

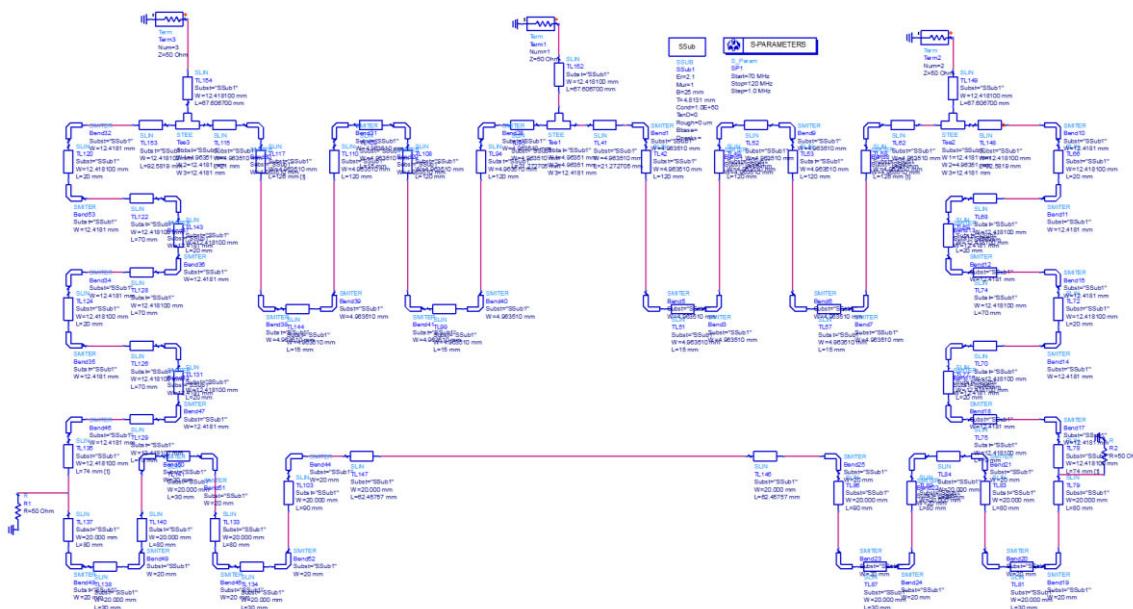
مگاهرتز) قرار داده شده و شرایط مرزی دور تا دور محیط بیرونی Region E=0 می باشد. جمع کننده گایسل طراحی شده و نتایج بدست آمده از ADS و HFSS به ترتیب در شکل ۳، ۴ و جدول ۳ آورده شده است.



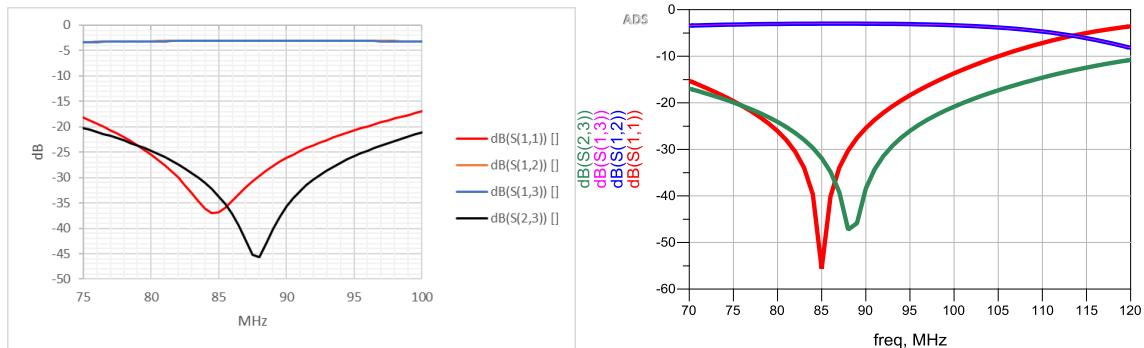
شکل ۳-الف: جمع کننده گایسل طراحی شده در HFSS



شکل ۳-ب: مش بندی به روش FEM ساختار طراحی شده در HFSS



شکل ۳-ه: جمع کننده گایسل طراحی شده در ADS



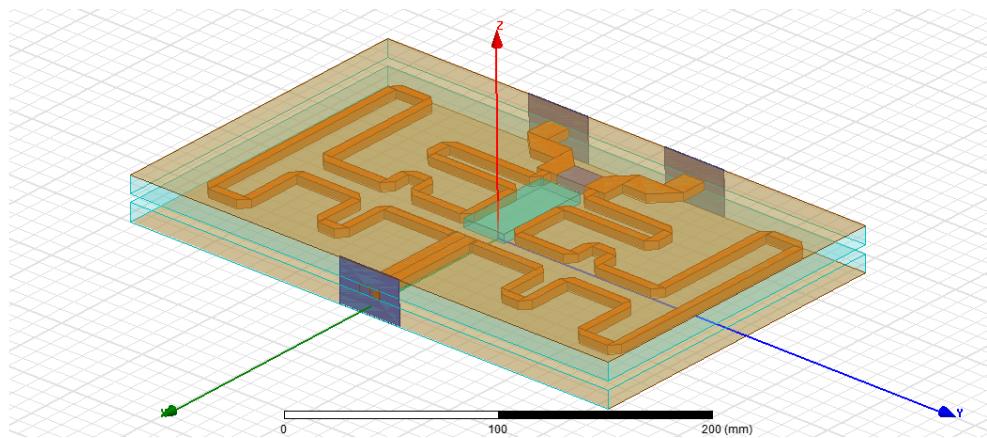
شکل ۴-ب: تحلیل مداری جمع کننده گایسل بوسیله HFSS

شکل ۴-الف: تحلیل مداری جمع کننده گایسل بوسیله ADS

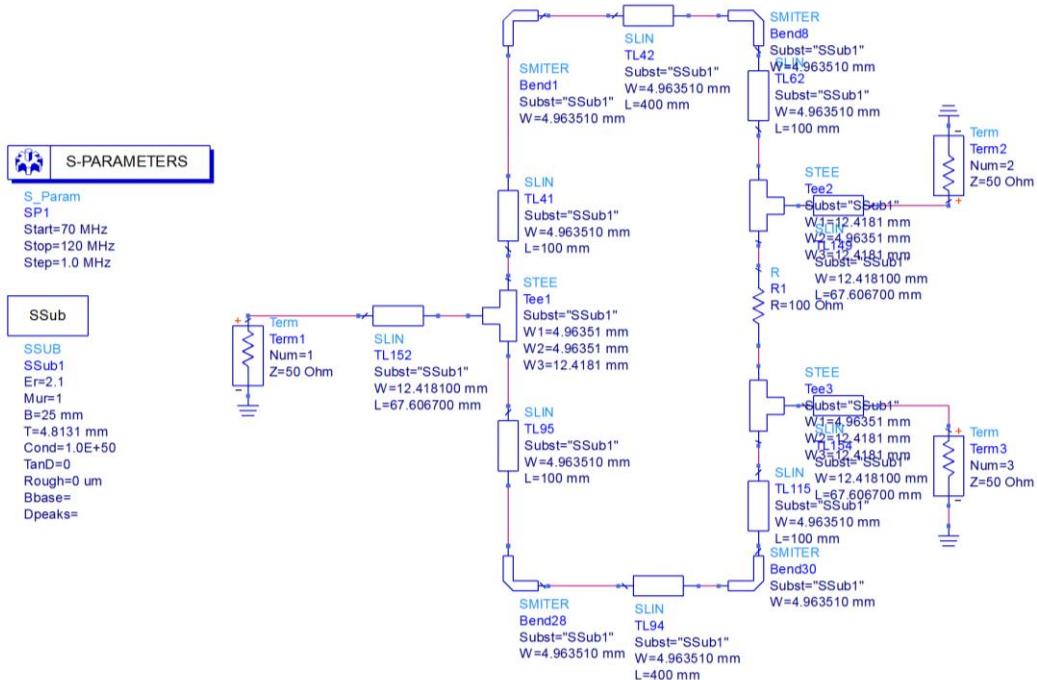
جمع کننده توان ویلکینسون و نتایج بدست آمده از HFSS و ADS در شکل ۵ و جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳ : پارامترهای پراکندگی بدست آمده از تحلیل ساختار گایسل در ADS و HFSS

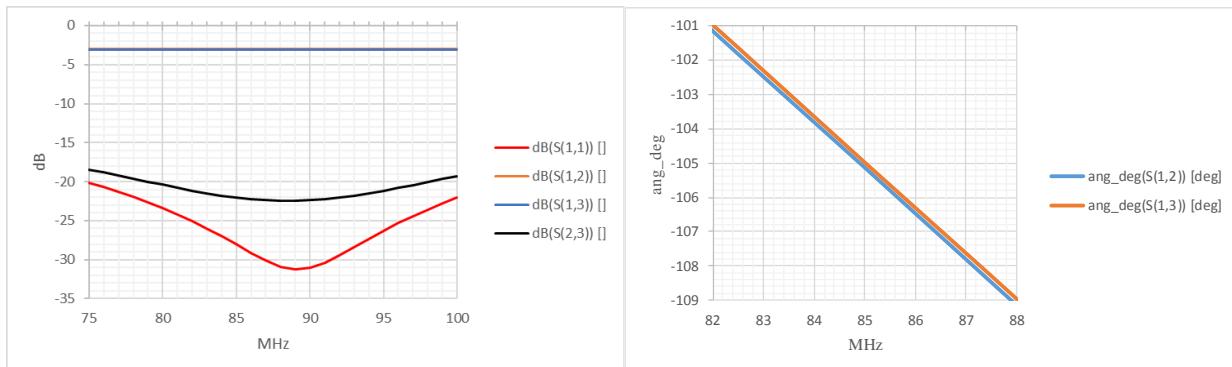
فرکانس کاری	پارامتر پراکندگی	شرح پارامتر	مقدار در ADS	مقدار در HFSS	ابعاد مدار
۸۵MHz	S_{11}	تلف برگشتی	-۵۵/۶۰۶ dB	-۳۶/۹۱۶۱ dB	$400 \times 250 mm^2$
	S_{12}	تلف عبوری	-۳/۰۱۸ dB	-۳/۰۹۸۹ dB	
۸۵MHz	S_{13}	تلف عبوری	-۳/۰۱۸ dB	-۳/۰۹۸۵ dB	$ S_{13} - S_{12} $
۸۵MHz	S_{23}	ایزولاسیون	-۳۱/۸۸۷ dB	-۳۳/۶۵۲۴ dB	۰/۰۰۰۴ dB



شکل ۵-الف: جمع کننده ویلکینسون طراحی شده در HFSS



شکل ۵-ب: جمع کننده ویلکینسون طراحی شده در ADS



شکل ۶-ب: تحلیل تمام موج جمع کننده ویلکینسون در HFSS
جدول ۴: پارامترهای پراکندگی بدست آمده از تحلیل ساختار ویلکینسون در ADS و

فرکانس کاری	پارامتر پراکندگی	شرح پارامتر	مقدار در ADS	مقدار در HFSS	ابعاد مدار
۸۵MHz	S_{11}	تلف برگشتی	-۶۳/۷۱۵ dB	-۲۸/۰۱۱۹ dB	$185 \times 300\text{ mm}^2$
	S_{12}	تلف عبوری	-۳/۰۱۰ dB	-۳/۰۰۰۲ dB	
۸۵MHz	S_{13}	تلف عبوری	-۳/۰۱۰ dB	-۳/۰۷۴۳ dB	$ S_{13} - S_{12} $
۸۵MHz	S_{23}	ایزولاسیون	-۴۶/۱۰۹ dB	-۴۲/۰۳۹۰ dB	۰/۰۷۴۱ dB

پاسخ‌های ADS(Advanced Design System) که تنها ناشی از بررسی مداری ساختار بوده، از واقعیت فاصله داشته و پاسخی ایده‌آل را به نمایش می‌گذارد، به عبارت دیگر استفاده از آن، تنها برای تایید شماتیک مداری طرح بوده است؛ اما پاسخ‌های HFSS که مبتنی بر پیش‌بینی رفتار الکترومغناطیسی ساختارها در فرکانس‌های بالاست، دقیق‌تر بوده و بر اساس یک قاعده سر انگشتی بین مهندسین RF با تقریب کم‌تر از ۱۰٪ در واقعیت اجرا خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که اختلاف فاز بین پورت‌های ورودی جمع‌کننده‌ها بسیار اندک بوده (کمتر از ۱ درجه) و قابل قبول است.

بحث و نتیجه گیری :

با مقایسه مقادیر بدست آمده پارامترهای پراکندگی، مشاهده شد که جمع کننده نوع گایسل به طور خاص در تلف برگشتی و ایزولاسیون، عملکرد بهتری را در مقایسه با نوع ویلکینسون ارائه می‌دهد. از نظر ابعاد، ساختار ویلکینسون نسبت به گایسل کوچک‌تر است اما این پارامتر در کاربری مورد نظر ما چندان مهم نیست، به خصوص این که با تکنیک‌های جدید طراحی می‌توان ابعاد گایسل را نیز تا حد قابل قبولی کاهش داد. به علت ساختار مقاومتی ستاره در نوع ویلکینسون، پیاده سازی این ساختار به ویژه در بستر استریپ لاین و به خصوص در انواع بیش از ۳ پورت کاری سخت می‌باشد؛ اما در ساختار گایسل مقاومت‌ها زمین شده اند و به راحتی قابل پیاده سازی هستند. مزیت‌های ساختار گایسل، آن را انتخاب بهتری برای هدف مورد نظر می‌کند. بر این اساس مقادیر S_{11} , S_{12} , S_{13} و S_{23} برای جمع کننده گایسل طراحی شده به ترتیب dB ۳۶/۹۱۶۱، -۳/۰۹۸۹، -۳/۰۹۸۵ و dB ۳۳/۶۵۲۴ بدست آمده است. پارامتر $|S_{12} - S_{13}|$ که میزان amplitude unbalance را نشان می‌دهد و معیاری برای صحت سنجی طراحی به شمار می‌رود، نیز مقدار ۰/۰۰۰۴ dB (کمتر از حد مجاز ۰/۴ dB) شده است.

مراجع :

- [1] S. Akhilesh Jain, "Design of high power radio frequency radial combiner for proton," *Review of Scientific Instruments*, vol. 80, no. 1, p. 016106, 2009.
- [2] K. Afrooz, S. Kouhpayeh-Zadeh, "A 10:1 unequal gysel power divider/combiner," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 11, p. 2689–2692, 2016.
- [3] E. J. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider," *IRE Trans. Mi-crow. Theory Techn.*, Vols. MTT-8, no. 1, p. 116–118, 1960.
- [4] U. H. Gysel, " A new n way divider/combiner suitable for high-power applications," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, p. 116–118, 1975.

- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Massachusetts: John Wiley & Sons, 2012.
- [6] راحله. صلح جو. حسین آفریده. میترا قرقره چی. جانگ سو چای, "طراحی شبکه‌هندۀ سیکلوترون ۱۰ مگاالکترون ولت", "مجله پژوهش فیزیک ایران", جلد ۱۵, شماره ۲, pp. 226-234, ۱۳۹۴.
- [7] "www.wirelessteamgroup.com," Microlab, 2016. [Online].
- [8] A. Malakooti, M. Hayati, "A Novel Design of Triple-Band Gysel Power Divider," *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. 61, no. 10, pp. 3558-3567, 2013.