

## طراحی و بهینه‌سازی سیرکولاتور موج‌بری سه دهانه‌ای

شایان مسعودی نژاد<sup>۱</sup>، ناصر منتصری<sup>۲\*</sup>، یعقوب قانع قره‌باغ<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۳- مربی، دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه شاهد

(دریافت: ۹۷/۰۳/۲۰، پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۳)

### چکیده

در این مقاله طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیرکولاتور موج‌بری سه دهانه‌ای برای کاربردهای ماکروویوی در باند فرکانسی X دارای حداقل تلفات عبوری بررسی شده است. برای عملکرد این سیرکولاتور در توان‌های بالا، طراحی بر اساس ساختار موج‌بری صورت گرفته است. طراحی فریت و مکان قرارگیری آن طوری صورت گرفته است که سیرکولاتور طراحی و ساخته شده پهنای باند بیشتری نسبت به ساختارهای مشابه خود داشته باشد. قابل ذکر است که مراحل طراحی و بهینه‌سازی سیرکولاتور به صورت کامل بررسی شده است. سیرکولاتور ساخته شده دارای دهانه‌های ورودی استاندارد WR-90 در فرکانس مرکزی ۹/۴ GHz با پهنای باند حدود ۴٪، حداقل ایزولاسیون ۲۰ dB و حداکثر تلفات عبوری 0.25 dB در تمام دهانه‌ها است. در انتها، نتایج شبیه‌سازی و ساخت با یکدیگر مقایسه شده و تطابق قابل قبولی بین آن‌ها مشاهده می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** سیرکولاتور موج‌بری سه دهانه‌ای، فریت

## Design and Optimization of a Three-Port Waveguide Circulator

S. Masoudinejad, N. Montaseri \*, Y. Qaneh Qarehbagh

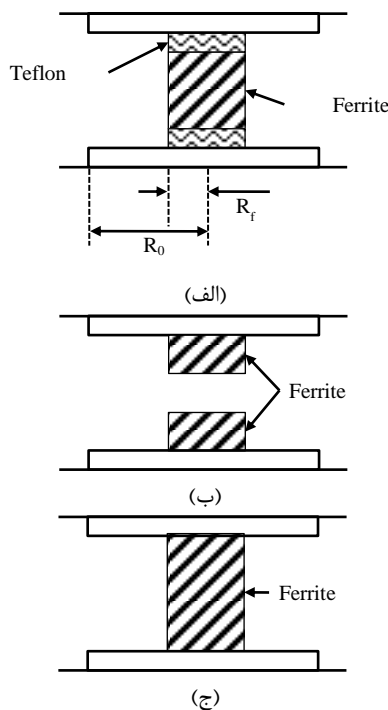
Shahed University

(Received: 10/06/2018; Accepted: 13/01/2019)

### Abstract

*In this paper, the design, simulation, and optimization of a three-port waveguide circulator for microwave applications in X-band frequency with low insertion and reflection losses are investigated. To operate this circulator in high power application, the design is based on the waveguide structure. The ferrite design and its location are outlined while designed and fabricated circulator has a wide band frequency range in comparison to the conventional structures. It should be noted that the design and optimization procedure are completely considered. The fabricated circulator has the input standard WR-90 flange at the center frequency of 9.4 GHz and the frequency band width, minimum isolation, and maximum insertion loss are about 4%, 20 dB, and 0.25 dB, respectively. Finally, the results of simulation and measurements are compared together and close accordance is observed between them.*

**Keywords:** Three-Port Waveguide Circulator, Ferrite



شکل ۲. ساختارهای قرارگیری فریت در سیرکولاتور فریتی [۵]

## ۲. سیرکولاتور فریتی

سیرکولاتور یک ابزار ماکروویوی غیر هم‌پاسخ سه یا چنددهانه‌ای است که می‌تواند در تمام دهانه‌ها تطبیق یافته و بی‌تلف باشد. ماتریس پراکندگی<sup>۲</sup> یک سیرکولاتور ایده‌آل سه دهانه‌ای و چهار دهانه‌ای [۶] به ترتیب برابر هستند با:

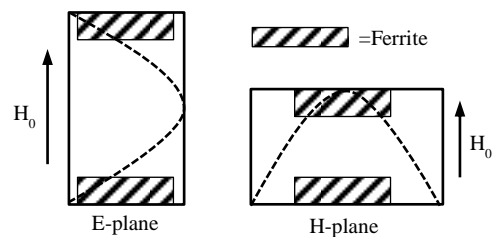
$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

همان‌طور که از معادله (۱) مشخص است در یک سیرکولاتور ۳ دهانه‌ای اگر توان از دهانه ۱ وارد شود، دهانه ۲ آن را کامل دریافت می‌کند و دهانه ۳ کاملاً ایزوله است و توانی به آن نمی‌رسد. به همین ترتیب اگر به دهانه ۲ توان اعمال شود دهانه ۳ تمام آن را دریافت می‌کند و توانی به دهانه ۱ نمی‌رسد و به اعمال توان به دهانه ۳، تمام توان به دهانه ۱ وارد می‌شود و به دهانه ۲ توانی نمی‌رسد. این ترتیب می‌تواند برعکس شود به‌طوری‌که اگر به دهانه ۱ توان اعمال شود دهانه ۳ آن را دریافت کند. ترتیب چرخش در سیرکولاتور مانند شکل (۳) به‌صورت ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد است که در سیرکولاتورهای فریتی به جهت میدان بایاس وابسته هست و با عوض کردن جهت میدان

## ۱. مقدمه

یکی از ادوات بسیار کاربردی در کاربردهای ماکروویوی و به‌خصوص رادارهای نظامی و صنعتی، سیرکولاتور<sup>۱</sup> است. در کاربردهای با استفاده از سیرکولاتور می‌توان تنها از یک آنتن برای فرستندگی و گیرندگی استفاده کرد. همچنین با قرار دادن بار تطبیق در یکی از دهانه‌های سیرکولاتور، از آن به‌عنوان ایزولاتور استفاده می‌شود. تاکنون تلاش‌های زیادی برای طراحی و بهینه‌سازی انواع سیرکولاتورها انجام شده است. در شکل (۱) دو آرایش E-Plane و H-Plane مربوط به سیرکولاتورهای موج‌بری نشان داده شده است [۱].



شکل ۱. آرایش E-plane و H-plane در سیرکولاتور موج‌بری [۱]

از طرفی می‌توان سیرکولاتورها را به دو نوع سه دهانه‌ای و چهار دهانه‌ای نیز تقسیم‌بندی کرد. در بسیاری از مقالات نشان داده شده است که اگر در مرکز یک اتصال متقارن چهار دهانه‌ای با آرایش H-plane یک فریت بایاس شده قرار داده شود، انتشار موج در ساختار دچار چرخش شده و به همه دهانه‌ها توان یکسانی نمی‌رسد [۲]. از طرف دیگر مشخص شده که با یک اتصال سه دهانه‌ای و با قرار دادن فریت در مرکز اتصال، سیرکولاتور حاصل می‌شود [۳]. از سال ۱۹۶۰ به بعد، سیرکولاتورهای فریتی به‌طور گسترده مورد بررسی و استفاده قرار گرفتند. از آن زمان تا به حال ساختارهای مختلفی از سیرکولاتورها بنا به ساختمان سیرکولاتور، شکل فریت و بایاس فریت، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند [۴]. سه ساختار استاندارد برای نحوه قرارگیری فریت در سیرکولاتورهای فریتی همانند شکل (۲) هستند که در ساختار اول از یک فریت در وسط سیرکولاتور با یک هسته آهنی مرکزی در فریت با قرارگیری به‌صورت ارتفاع کامل یا به‌صورت ارتفاع جزئی به همراه دو عایق برای نگه‌داشتن فریت در مرکز اتصال موج‌برها استفاده می‌شود. در ساختار دوم از دو فریت استفاده شده است که فریت‌ها در مرکز ساختار و به‌صورت متقارن در بالا و پایین موج‌بر قرار گرفته‌اند. ساختار سوم از یک فریت تیوبی شکل با ارتفاع کامل یا جزئی استفاده می‌شود که درون آن دی‌الکتریک است به‌نحوی که در مرکز سیرکولاتور قرار دارد.

<sup>2</sup> Sacttering

<sup>1</sup> Circulator

در حالتی که فریت بایاس شده باشد (شکل ۵-ب) توان از دهانه ۱ به دهانه ۲ می‌رود و دهانه ۳ ایزوله می‌شود.

در شکل (۴) چگونگی میدان‌ها در فریت دیسکی نشان داده شده است. در این شکل  $H_\theta$  یک میدان مغناطیسی ثابت است که اگر به‌طور مثال پورت یک تحریک شود این میدان به‌طور عرضی از دهانه ۱ تا دهانه ۲ وجود دارد و مابقی مکان‌ها و مرزها برابر صفر می‌شود. برای توجیه عملکرد سیرکولاتور، شناخت چگونگی عملکرد مدها در فریت لازم است [۵]. به‌صورت تقریبی در معادله (۴) نشان داده شده است که فرکانس رزونانس فریت بایاس نشده در مد غالب به‌صورت

$$\omega_0 = \frac{1.84}{R\sqrt{\epsilon\mu_e}} \quad (4)$$

و فرکانس‌های رزونانس فریت بایاس شده به‌صورت

$$\omega_{\pm} = \omega_0 \left( 1 \pm 0.42 \frac{\kappa}{\mu} \right) \quad (5)$$

هست. به‌صورت تجربی می‌توان مشاهده کرد که پهنای باند سیرکولاتور بین دو فرکانس رزونانس فریت قرار گرفته است. بنابراین، برای افزایش پهنای باند سیرکولاتور، می‌توان شعاع (R)، ارتفاع و میزان بایاس آن را تغییر داد. همچنین ایزولاسیون در سیرکولاتور موج‌بری دارای سه دهانه در یک فرکانس مشخص به دو پارامتر ابعاد فریت و میدان بایاس فریت وابسته است ولی برای حل مشکل پهنای باند کم، تعداد پارامترهای طراحی آن افزایش می‌یابد و طراحی این ابزار به‌طور قابل توجهی پیچیده‌تر می‌شود [۱۱-۱۳]. با توجه به کاربردهای زیاد سیرکولاتورها در مباحث ماکروویوی نیاز به طراحی و ساخت آن در فرکانس‌های مختلف ماکروویو از درجه اهمیت بالایی برخوردار است.

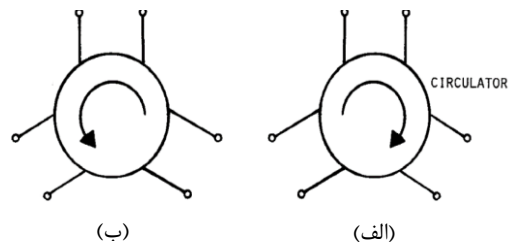
## ۲-۱. طراحی و شبیه‌سازی سیرکولاتور با فریت دایره‌ای

در این تحقیق، فرکانس مرکزی مورد نظر ۹/۴ GHz است و در طراحی‌ها و ساخت سیرکولاتور از فریت نوع YIG با  $4\pi M_s = 900 \text{ Gauss}$  استفاده شده است. از طرف دیگر، بر اساس فرکانس مرکزی از موج‌بر استاندارد WR-90 با ابعاد داخلی  $10.16 \text{ mm} \times 22.86 \text{ mm}$  استفاده شده است. و شبیه‌سازی‌های سیرکولاتور با استفاده از نرم‌افزار HFSS صورت گرفته است. پورت‌های تحریک سیرکولاتور با استفاده از ابزار waveport در نرم‌افزار انتخاب شده‌اند. همچنین در شبیه‌سازی فرض شده است که فریت به‌صورت یکنواخت توسط منبع DC بایاس شده است. برای طراحی سیرکولاتور ابتدا فریت دایره‌ای همانند شکل‌های (۶-الف و ب) مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای آن مثل میزان بایاس، قطر و مکان قرارگیری فریت در موج‌بر پاسخ بهینه شکل (۶-ج) حاصل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر ایزولاسیون حدود ۱۶ dB است که پاسخ مناسبی نیست.

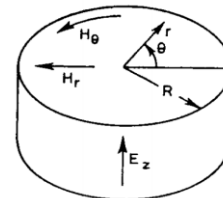
بایاس، جهت چرخش نیز عوض می‌شود [۶]. همان‌طور که گفته شد سیرکولاتورها انواع مختلفی دارند، ولی بر اساس مواد بکار رفته در آن‌ها می‌توان آن‌ها را به دو دسته اصلی سیرکولاتورهای فریتی و سیرکولاتورهای بدون فریت تقسیم‌بندی کرد. همچنین سیرکولاتورهای فریتی موج‌بری به دو گروه اصلی چهار دهانه‌ای و سه دهانه‌ای (Y-Junction) تقسیم می‌شوند. لازم به ذکر است که سیرکولاتورهای فریتی دارای تلفات عبوری کم، تلفات بازگشتی بسیار کم و پهنای باند بسیار پایینی هستند [۷-۱۰]. در شکل (۴) میدان‌های درونی یک فریت استوانه‌ای در مد غالب نشان داده شده است. با توجه به ساختار استوانه‌ای فریت در شکل (۴)، میدان الکتریکی درون فریت از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n J_n(\gamma r) e^{jn\theta} \quad (3)$$

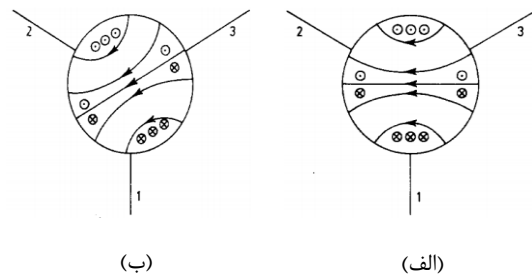
که  $\mu_e = (\mu^2 - \kappa^2) / \kappa$  و  $\gamma^2 = \omega^2 \epsilon \mu_e$  هست.



شکل ۳. جهت چرخش موج در سیرکولاتور (الف) چرخش ساعت‌گرد (ب) چرخش پادساعت‌گرد [۵]

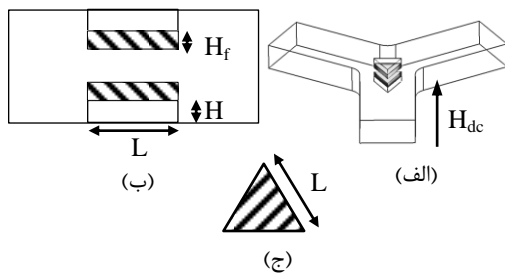


شکل ۴. نمایش میدان‌ها در فریت دیسکی [۵]



شکل ۵. مد  $TM_{110}$  در فریت دیسکی وابسته به دهانه‌ها یک سیرکولاتور (الف) مغناطیس شده (ب) مغناطیس نشده [۵]

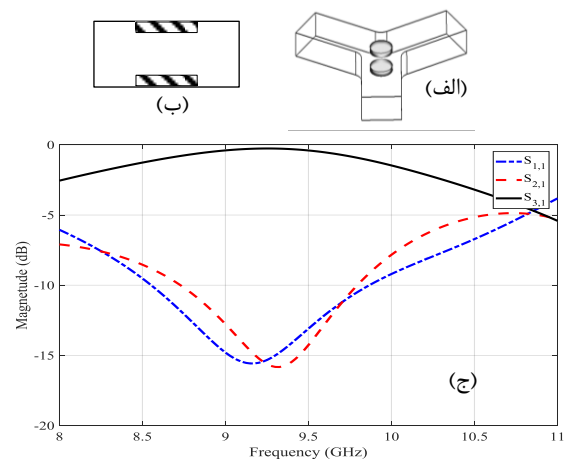
با توجه به شکل (۵) اگر در یک سیرکولاتور دهانه یک تحریک شود در صورتی که فریت تحت میدان مغناطیسی قرار نگرفته باشد، یعنی بایاس نشده باشد (شکل ۵-الف) توان به‌صورت برابر بین دو دهانه دیگر سیرکولاتور تقسیم می‌شود و



شکل ۸. سیرکولاتور با فریت و صفحه فلزی مثلثی

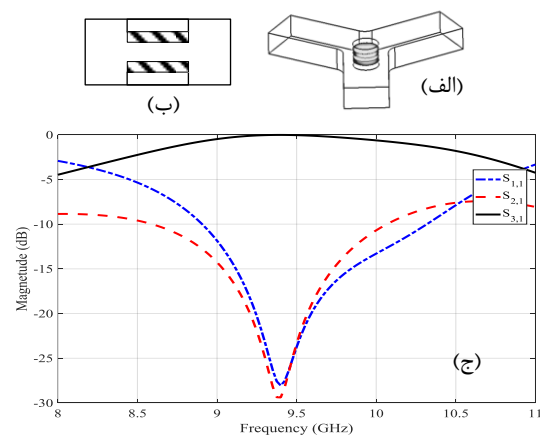
در شکل (۹) نمودار پارامترهای اسکاترینگ سیرکولاتور به ازای پارامترهای  $H_f = 2\text{mm}$ ،  $H = 2.2\text{mm}$  و  $L = 11.3\text{mm}$  و بایاس‌های مختلف  $H_{dc} = 100, 350, 10000e$  بررسی شده است. واضح است با افزایش بایاس خارجی فرکانس مرکزی سیرکولاتور (فرکانسی که در آن تطبیق و ایزولاسیون بهتر صورت می‌گیرد) افزایش می‌یابد. بنابراین، در طراحی سیرکولاتور می‌توان با تغییر ناچیز بایاس فریت، فرکانس کاری آن را تغییر داد. البته نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد بایاس فریت سبب کاهش ایزولاسیون و تطبیق ورودی می‌شود. به همین منظور برای طراحی یک سیرکولاتور مناسب، بهتر است از پارامترهای دیگر نیز برای بهبود عملکرد آن استفاده کرد. در شکل (۹) مشاهده می‌شود که میزان بایاس  $3500e$  بهترین حالت ممکن برای عملکرد سیرکولاتور در فرکانس  $9.4\text{ GHz}$  است.

در مرحله دوم در بهینه‌سازی اندازه فریت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل (۱۰) اثر تغییر ابعاد فریت ( $L$ ) به ازای پارامترهای  $H_f = 2\text{mm}$ ،  $H = 2.2\text{mm}$  و  $H_{dc} = 3500e$  نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد فریت فرکانس مرکزی سیرکولاتور به صورت چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. در واقع همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش حجم فریت فرکانس رزونانس آن کاهش می‌یابد و در نتیجه فرکانس کاری سیرکولاتور نیز کاهش می‌یابد. بنابراین، در طراحی این نوع از سیرکولاتور بایستی دو پارامتر بایاس و ابعاد فریت به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. با توجه به آنکه تغییرات فرکانسی به ازای تغییر ابعاد فریت بیشتر است، بنابراین، بهتر است که در مرحله شروع طراحی ابتدا ابعاد مناسب به ازای بایاس ثابت بررسی شود. لازم به ذکر است که پارامترهای  $H$  و  $H_f$  نیز در فرکانس کاری سیرکولاتور مؤثر هستند که در مراحل طراحی بایستی نکات پیاده‌سازی و توان قابل تحمل سیرکولاتور در آن‌ها لحاظ شود. به صورت خلاصه پارامترهای مهم در طراحی و بهینه‌سازی یک سیرکولاتور عبارت‌اند از شکل فریت، میزان فریت، ابعاد فریت، مکان قرارگیری فریت و ساختار کلی موج‌بر. در این مقاله نحوه انتخاب ابعاد فریت و میزان بایاس آن شرح داده شده است.



شکل ۶. الف) نمای سه‌بعدی و ب) نمای دوبعدی از قرارگیری فریت دایره‌ای در مرکز سیرکولاتور، ج) پاسخ بهینه سیرکولاتور

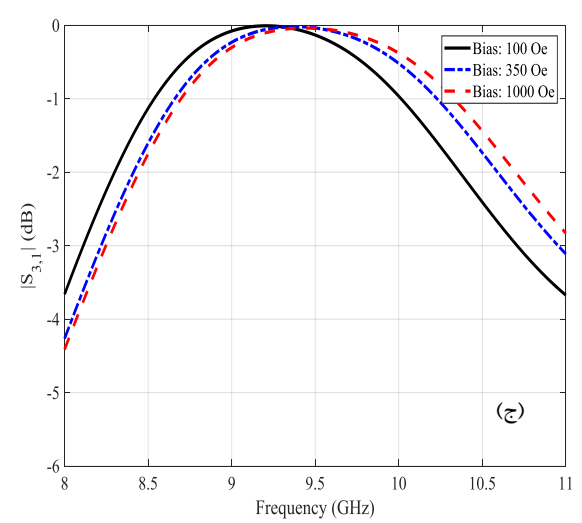
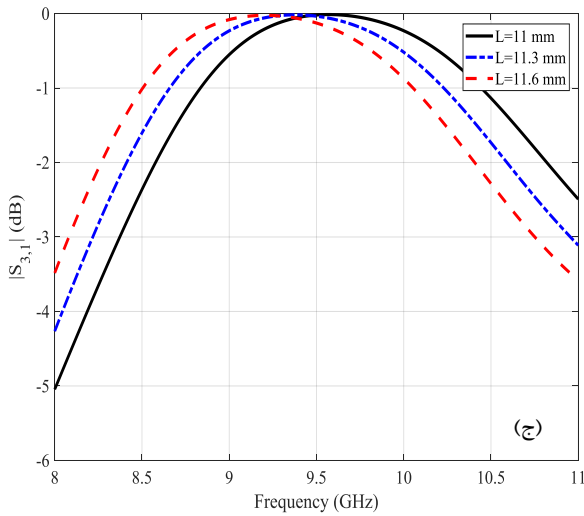
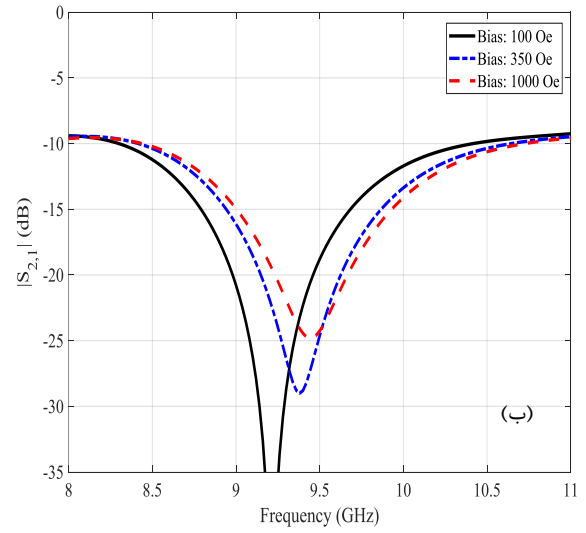
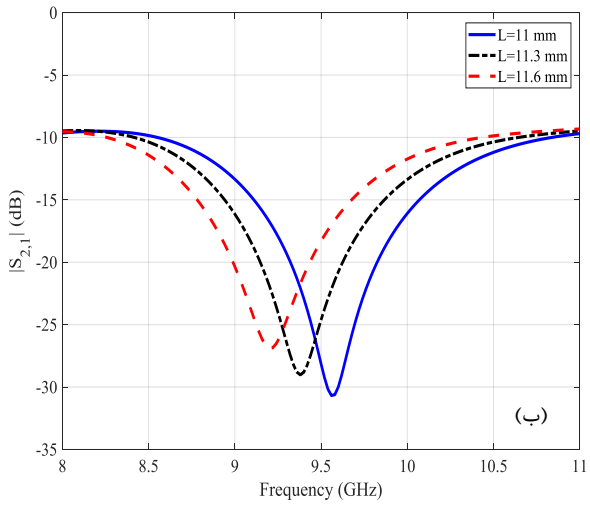
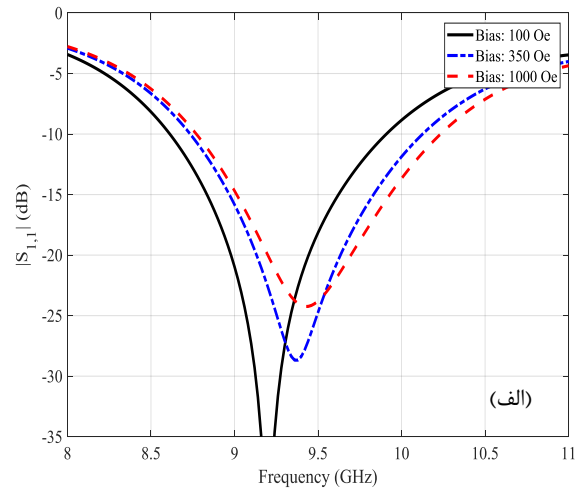
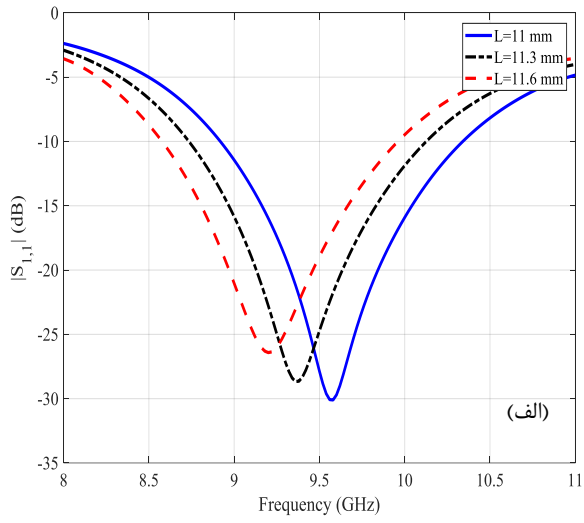
حال اگر همانند شکل‌های (۷-الف و ب) بین موج‌بر و فریت‌ها، دیسک‌های فلزی قرار گیرد، میزان پهنای باند و ایزولاسیون و تلفات عبوری بهتر می‌شود ولی بازهم از پاسخ مدنظر دور است. در شکل (۷-ج) می‌توان پاسخ بهینه این ساختار را نیز در بهترین حالت بهینه‌سازی مشاهده کرد. همان‌طور که مشخص است میزان ایزولاسیون و پهنای باند با اضافه کردن دیسک فلزی به‌طور چشم‌گیری بهبود پیدا کرد (یعنی پهنای باند حدود  $2.6\%$  در فرکانس مرکزی  $9.4\text{ GHz}$ ).



شکل ۷. الف) نمای سه‌بعدی و ب) نمای دوبعدی سیرکولاتور با فریت و صفحه فلزی دایره‌ای، ج) پاسخ بهینه سیرکولاتور

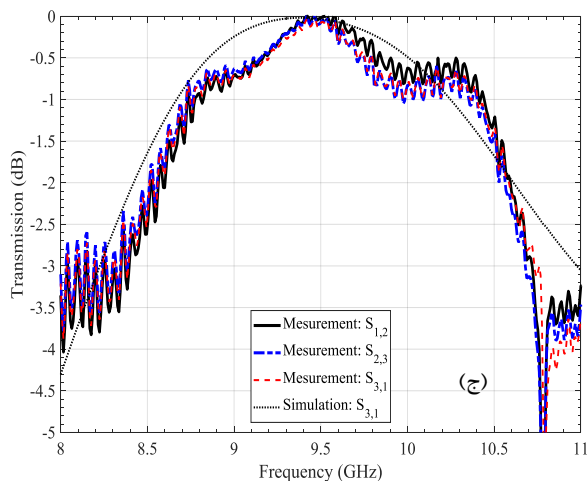
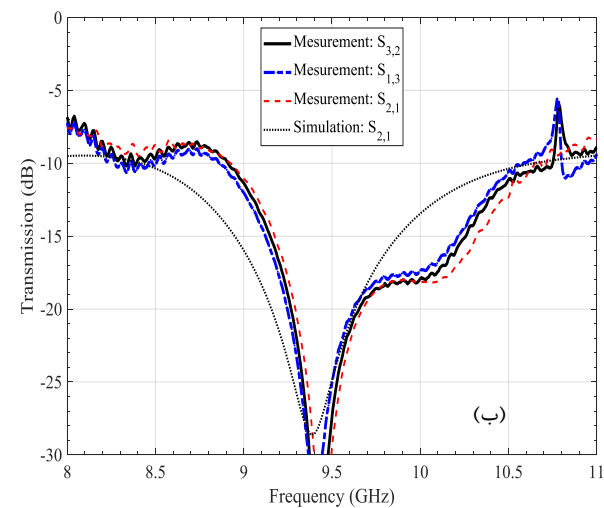
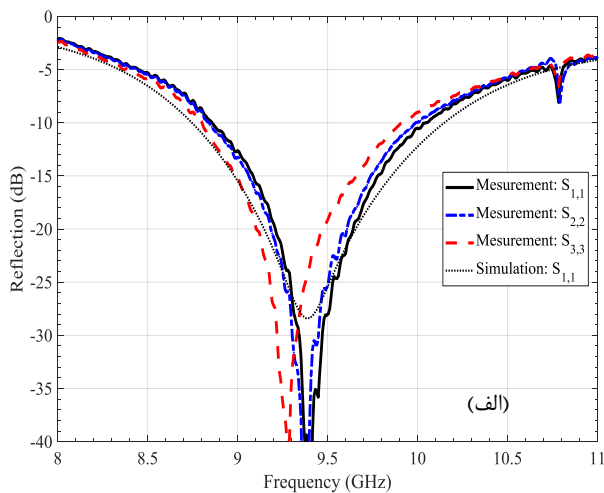
## ۲-۲. طراحی و شبیه‌سازی سیرکولاتور با فریت مثلثی

به‌منظور بهبود پاسخ مناسب، سیرکولاتور با فریت مثلثی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل (۸) نماهای مختلف از ساختار سیرکولاتور را نشان می‌دهد. پارامترهای مهم در طراحی و بهینه‌سازی سیرکولاتور عبارت‌اند از  $L$ ،  $H_f$ ،  $H$  و  $H_{dc}$ . برای شروع طراحی و بهینه‌سازی ابتدا میزان بایاس فریت ( $H_{dc}$ ) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰. نمودارهای  $S_{ij}$  سیرکولاتور به ازای  $H = 2.2\text{ mm}$  و مقادیر مختلف اندازه فریت  $H_{dc} = 3500\text{ Oe}$  و  $H_f = 2\text{ mm}$

شکل ۹. نمودارهای پارامترهای  $S_{ij}$  به ازای  $L = 11.3\text{ mm}$  و مقادیر بایاس مختلف  $H = 2.2\text{ mm}$  و  $H_f = 2\text{ mm}$



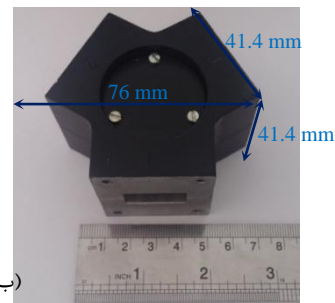
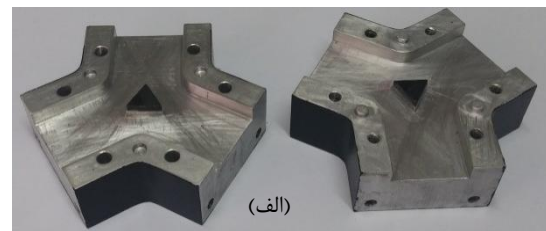
شکل ۱۲. مقایسه نتایج سیرکولاتور ساخته شده با نتایج شبیه‌سازی به ازای پارامترهای ازای  $H_{dc} = 3500e$ ,  $H_f = 2mm$ ,  $H = 2.2mm$  و  $L = 11.3mm$

### ۳-۲. آزمون توان و ست‌آپ اندازه‌گیری توان

برای آزمون توان سیرکولاتور سه کوپلر  $40 \pm 0.7dB$  استفاده شده است. منبع آزمون توان پالسی بوده و دارای پیک توان حدود

### ۳. ساخت و اندازه‌گیری

با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و بررسی پارامترهای مؤثر بر پاسخ سیرکولاتور، با بهینه‌سازی ابعاد فریت و مقدار بایاس اعمالی فریت طراحی نهایی به ازای پارامترهای  $L = 11.3mm$  و  $H_f = 2mm$ ,  $H = 2.2mm$ ,  $H_{dc} = 3500e$  به دست می‌آید. همچنین فریت مورد استفاده از نوع YIG با  $4\pi M_s = 900Gauss$  است. بنا به بررسی‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده در قسمت‌های قبل این نتیجه به دست می‌آید که برای ساخت سیرکولاتوری با پهنای باند خوب، ایزولاسیون بالا و تلفات عبوری قابل قبول، فریت به صورت مثلثی تراش خورده شود. از طرفی برش یک فریت مثلثی بسیار راحت‌تر از دایره‌ای است. بنابراین، یکی دیگر از مزایای استفاده از فریت مثلثی، سهولت ساخت آن است. در شکل (۱۱) نمایی از سیرکولاتور ساخته شده نشان داده شده است.



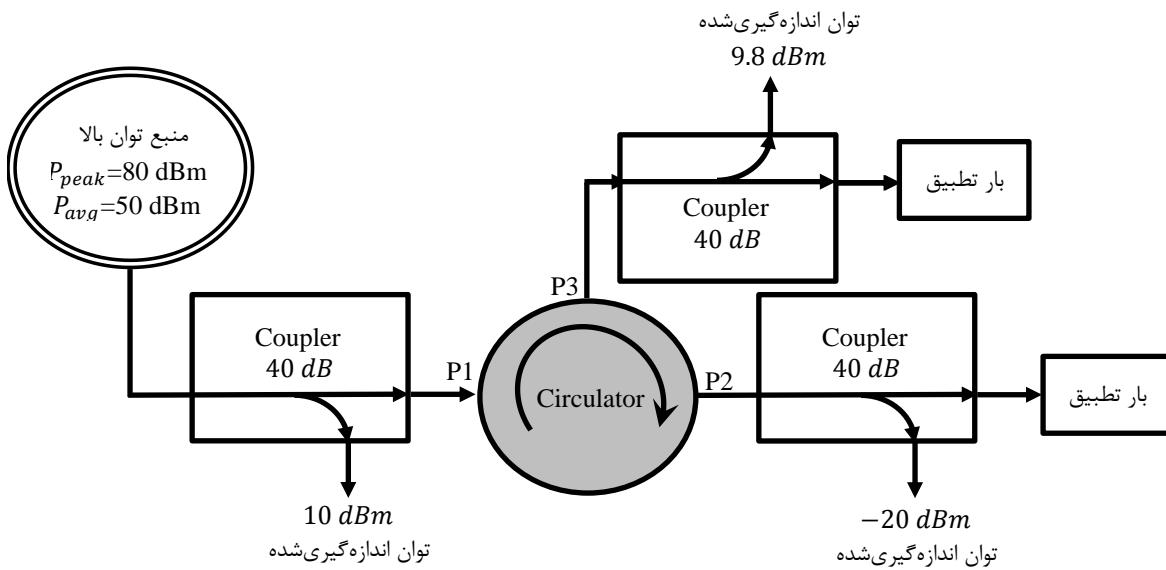
شکل ۱۱. سیرکولاتور ساخته شده

### ۳-۱. اندازه‌گیری پارامترهای اسکترینگ

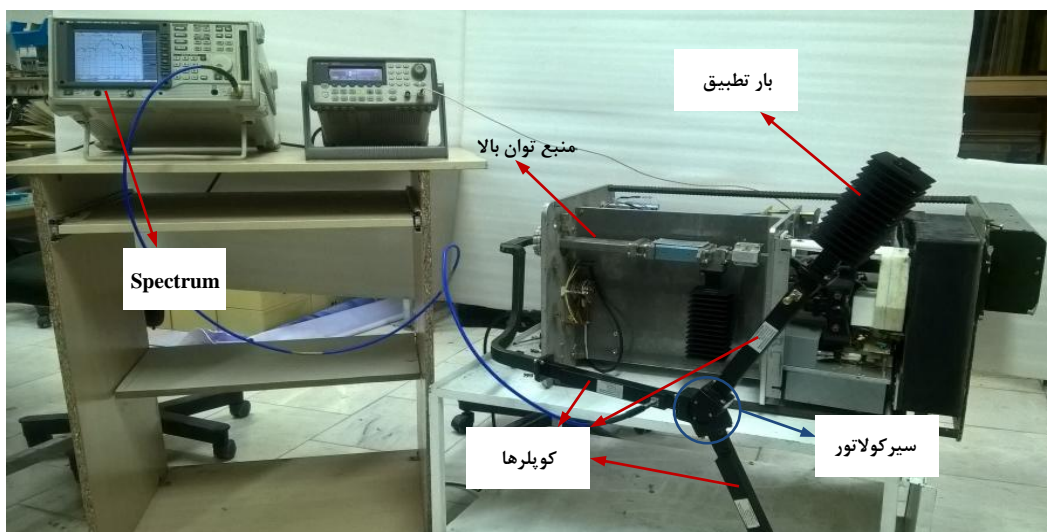
برای اندازه‌گیری پارامترهای اسکترینگ فریت از دستگاه نتورک برداری استفاده شده است. در شکل (۱۲) نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری سیرکولاتور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در باند فرکانسی بین نتایج ساخت و شبیه‌سازی اختلاف اندکی وجود دارد. دلیل اختلاف نتایج حاصل از: خطا در ساخت و برش فریت، اثر مبدل‌های کابل کوکسیال به موج‌بری، خطاهای ناشی از اندازه‌گیری و کالیبراسیون است. همچنین در شبیه‌سازی‌ها فرض شده است که میدان بایاس فریت به صورت یکنواخت است در حالی که در عمل فریت با آهنربا بایاس می‌شود که میدان بایاس غیریکنواختی دارد. به هر حال در باند فرکانس نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی دارای تطابق خوبی هستند.

در توان‌های زیاد نیز سیرکولاتور عملکرد مطلوبی بوده و تلفات ناشی از مسیر رفت (پورت ۱ به پورت ۲) ناچیز است. اندک اختلاف بین نتایج آزمون توان بالا با نتایج آزمون نتورک به خاطر دقت کوپلرها ( $\pm 40 \text{ dB} / 0.7$ ) است. همچنین توان دریافتی در پورت ۳ بسیار ناچیز و حدود  $16 \text{ dBm} - 40 \text{ dBm}$  است. این بدان معناست که دو پورت ۱ و ۳ حدود  $27 \text{ dB}$  از هم ایزوله هستند. در شکل (۱۴) ست آپ آزمون و اندازه‌گیری نشان داده شده است.

$100 \text{ KW}$  با سیکل  $1/0.1\%$  است. در نتیجه توان پیک ورودی معادل  $80 \text{ dBm}$  و توان متوسط حدوداً  $50 \text{ dBm}$  است. لازم به ذکر است که اسپکتروم مورد استفاده توان متوسط را اندازه‌گیری می‌کند. در شکل (۱۳) بلوک دیاگرام برای سناریوی آزمون توان نشان داده شده است. با توجه به اعداد اندازه‌گیری توسط اسپکتروم و با توجه به اینکه کوپلرها  $40 \text{ dB}$  هستند نتیجه می‌شود که توان متوسط ورودی به سیرکولاتور در پورت ۱ حدود  $40 \text{ dBm} + 11 \text{ dBm}$  و توان خروجی از آن (در پورت ۲) حدود  $40 \text{ dBm} + 10.7 \text{ dBm}$  است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۱۳. بلوک دیاگرام آزمون توان سیرکولاتور



شکل ۱۴. ست آپ آزمون توان سیرکولاتور

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله پارامترهای مؤثر در طراحی سیرکولاتور موج‌بری دارای سه دهانه بررسی شد. برای افزایش پهنای باند سیرکولاتور از یک جفت فریت مثلثی در مرکز سیرکولاتور استفاده شده است. با استفاده از نمودارهای شبیه‌سازی، میزان بایاس و ابعاد بهینه فریت برای سیرکولاتور محاسبه شده است. فریت استفاده شده به صورت مثلثی شکل است که برش آن نسبت به فریت دایره‌ای بسیار راحت‌تر است. سیرکولاتور ساخته شده دارای حداقل ایزولاسیون 20dB و حداکثر تلف عبوری 0.25dB در فرکانس مرکزی 9.4GHz با پهنای باند حدود ۴/۵٪ است. نتایج شبیه‌سازی و ساخت کاملاً بر یکدیگر منطبق بوده و صحت تمامی مراحل طراحی را تأیید می‌کند. همچنین آزمون توان بالای سیرکولاتور در توان پیک 100KW صورت گرفته است.

## ۵. مراجع‌ها

- [4] Davis, L. E.; Coleman, M. D.; Cotter, J. J. "Four-port Crossed Waveguide Junction Circulators"; IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1964, 12, 43-47.
- [5] Fuller, A. J. B. "Ferrites at Microwave Frequencies"; Peregrinus, 1987.
- [6] Pozar, D. M. "Microwave Engineering"; NY: John Wiley & Sons, 1988.
- [7] Bosma, H. "On Stripline Circulation at UHF"; IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1964, 12, 61-72.
- [8] Fay, C. E.; Comstock, R. L. "Operation of the Ferrite Junction Circulator"; IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1965, 13, 15-27.
- [9] Tanaka, S.; Shimomura, N.; Ohtake, K. "Active Circulators: The Realization of Circulators Using Transistors"; Proc. IEEE 1965, 53, 260-267.
- [10] Estep, N. A.; Sounas, D. L.; Alu, A. "Magnetless Microwave Circulators Based on Spatiotemporally Modulated Rings of Coupled Resonators"; IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2016, 64, 502-518.
- [11] Davies, J. B. "An Analysis of the M-port Symmetrical H-plane Waveguide Junction with Central Ferrite Post"; IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1962, 10, 596-604.
- [12] Davies, J. B. "Theoretical Design of Wideband Waveguide Circulators"; Electronics Letters 1965, 1, 60-61.
- [13] Davis, L. E. "Theoretical Design of Static and Latching Ferrite 3-Port and 4-Port Symmetrical Waveguide Circulators"; Symposium on Microwave, Palo Alto, 1966, 281-285.
- [1] Chait, H. N.; Curry, T. R. "A New Type Y-Circulator"; J. Appl. Phys. Suppl. 1959, 30, 1525-1535.
- [2] Hocine, H.; Caplin, M.; "Waveguide Circulator"; US Patent 7,746,189, 2010.
- [3] Chait, H. N.; Curry, T. R. "A New Type Y-Circulator"; J. Appl. Phys. Suppl. 1959, 30, 1525-1535.