

## آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی پهن باند جهت‌دار با شبکه تغذیه تزویج‌گر هایبرید

پژمان رضائی<sup>۱\*</sup>، زهرا موسوی راضی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۶/۰۴/۰۳، پذیرش: ۹۶/۰۷/۰۴)

**چکیده:** در این مقاله ساختار جدیدی از آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی پهن باند با بهره بالا که با شبکه تزویج‌گر هایبرید متقارن تغذیه شده، در باند C معرفی شده است. عنصر منفرد آرایه پیشنهادی به فرم نواری L شکل با پهنای کاهش یافته مخروطی شکل واقع در روبروی شکافی در صفحه زمین می‌باشد. براساس نتایج شبیه‌سازی، پهنای باند عنصر منفرد آرایه در بازه فرکانسی ۲/۵۲ GHz الی ۱۱/۳ GHz در حدود ۸/۷۹ می‌باشد که در مقایسه با عناصر آرایه گزارش شده پیشین از افزایشی در حدود ۵۰٪ برخوردار است. ساختار نهایی آنتن پیشنهادی شامل آرایه‌ای ۲×۲ می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که آنتن آرایه‌ای شکافی طراحی شده دارای پهنای باند امپدانس ۵۴٪ در بازه ۳/۵ GHz الی ۶/۵ GHz همراه با پهنای باند قطبش دایروی در حدود ۲۲٪ در بازه ۴/۴ GHz الی ۵/۴ GHz با بیشینه بهره ۱۲/۴۵ dBic در فرکانس ۵/۵ GHz می‌باشد. ساختار ساده، سبک، ابعاد فشرده، قطبش دایروی با خلوص قطبش مناسب و بهره بالا، این آنتن را گزینه مناسبی برای کاربردهای قطبش دایروی در باند C قرار داده است. نتایج اندازه‌گیری آنتن از تطابق مناسبی با نتایج شبیه‌سازی برخوردار می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** آنتن آرایه‌ای شکافی، قطبش دایروی، پهن باند، بهره بالا و تزویج‌گر هایبرید.

### ۱- مقدمه

آنتن‌های قطبش دایروی در مقایسه با آنتن‌های با قطبش خطی، مزایای متعددی از قبیل پروفایل بسیار نازک، وزن سبک و هزینه پایین را دارند. آنتن‌های قطبش دایروی به دلیل ویژگی‌های خاصی که دارند بسیار در سامانه‌های مخابراتی پیشرفته مورد توجه قرار گرفته است و به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای نظامی و تجاری مختلفی چون سامانه‌های راداری و ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته اند. در انتشار سیگنال‌های مخابراتی همواره اثر محوشدگی چندمسیره وجود دارد که با به‌کارگیری قطبش دایروی این امر در انتشار سیگنال‌ها مرتفع می‌شود، مضافاً این‌که در کاربردهای ماهواره‌ای به‌علت اثر چرخش فاراده ناچار به استفاده از این گونه قطبش می‌باشیم. در این فن به‌طور موثری نیاز به هم‌سویی فرستنده و گیرنده از بین می‌برد. ویژگی قطبش دایروی در حال تبدیل به یک فناوری کلیدی برای سیستم‌های بی‌سیم مختلف شامل ارتباطات ماهواره‌ای، ارتباطات سیار، سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS)<sup>۱</sup>، حسگرهای

بی‌سیم، شناسایی فرکانس رادیویی (RFID)<sup>۲</sup>، انتقال توان بی‌سیم، شبکه‌های محلی بی‌سیم (WLAN)<sup>۳</sup>، شبکه‌های خصوصی بی‌سیم (WPAN)<sup>۴</sup>، قابلیت همکاری جهانی برای دسترسی مایکروویو (WiMAX)<sup>۵</sup> و سیستم‌های دریافت تلویزیونی سرویس پخش مستقیم (DBS)<sup>۶</sup> می‌باشد [۱-۴]. در آنتن‌های مایکرواستریپ قطبش دایروی، پهنای باند امپدانس و نیز نسبت محوری<sup>۷</sup> قطبش دایروی، به صورت توأم مورد توجه می‌باشد.

آنتن‌های با قطبش دایروی می‌توانند دو نوع باشند. در نوع اول، قطبش دایروی پچ، شبیه شکل یک آنتن است که معمولاً حلزونی، مارپیچی و پچ‌های شکافی است. نوع دوم این آنتن‌ها نیز شامل یک آنتن با دو قطبش می‌باشد (با دو عنصر، با قطبش خطی عمود برهم) که دو دهانه آن با فاز عمود بر هم تغذیه می‌شوند که از انواع آن می‌توان به دو قطبی عمود بر هم همراه با یک تزویج‌گر ۹۰ درجه با دو قطبش اشاره نمود.

2 - Radio Frequency Identification (RFID)  
3 - Wireless Local Area Networks (WLAN)  
4 - Wireless Personal Area Networks (WPAN)  
5 - Worldwide Interoperability For microwave Access (WiMAX)  
6 - Direct Broadcasting Service (DBS)  
7 - Axial Ratio (AR)

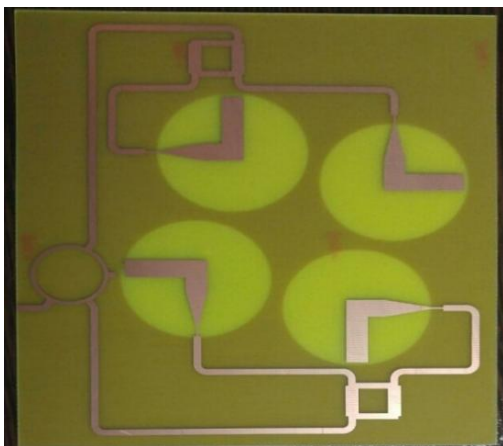
\* نویسنده پاسخگو: prezaei@semnan.ac.ir

1- Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

اصول طراحی و کاربردهای این نوع تغذیه در تحقیقات مراجع [۱۶-۱۵] به صورت خلاصه مطرح شده است. در مرجع [۱۷] تحلیل این روش برای اولین بار برای طراحی آنتن‌های پهن باند قطبش دایروی ارائه شده و نحوی چرخش این شبکه برای داشتن آنتن‌های پهن باند مطرح شده است.

تکنیک چرخش متوالی تغذیه، روش جالبی برای طراحی آنتن‌های آرایه‌ای قطبش دایروی می‌باشد که به منظور بهبود پرتوی اصلی، پهنای باند امپدانسی و خلوص قطبش آرایه استفاده شده است [۲۰-۱۸]. مرجع [۲۱] از تغذیه موجبر همسطح<sup>۳</sup> (CPW) و اتصالات T شکل و مرجع [۲۲] از شبکه تغذیه تزویج‌گر آبخاری<sup>۴</sup> جهت طراحی ساختار نهایی آنتن آرایه‌ای قطبش دایروی پهن باند استفاده شده است.

در این تحقیق، یک آنتن قطبش دایروی آرایه‌ای شکاف مربعی (۲×۲)، با هزینه کم، بهره بالا و با پهنای باند امپدانسی و نسبت محوری وسیع ارائه شده است. به منظور به دست آوردن پهنای باند نسبت محوری قطبش دایروی بهتر در این طرح، روش یافتن L- شکل با کاهش پهنای تدریجی مخروطی برای تحریک دو میدان تشعشی متعامد و با یک چهارم اختلاف فاز (اندازه یکسان، اختلاف فاز ۹۰ درجه) در عنصر منفرد آرایه مورد استفاده قرار گرفته است. پهنای باند امپدانسی این طراحی برای کاربردهای باند C، بین فرکانس‌های ۳/۵ GHz الی ۶/۱ GHz می‌باشد. در نتیجه ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختارهای آرایه‌ای پیشین در پارامترهای پهنای باند امپدانسی، نسبت محوری قطبش، تقارن تشعشع و بهره آنتن بهبود داشته است. نرم‌افزار تمام موج الکترومغناطیسی Ansoft HFSS برای شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی، به کار رفته است.



شکل (۱): آنتن آرایه‌ای قطبش دایروی پیشنهادی ساخته شده

این آنتن‌ها، می‌توانند هر دو قطبش دایروی راستگرد و چپگرد را با همان کیفیت قطبش بیضوی و خطی تولید کنند. پس آنتن‌های پیچ مایکرواستریپ با قطبش دایروی بر این اساس کار می‌کنند که دو مد تشدیدی پیچ با قطبش‌های عمود بر هم تشعشع می‌شوند و تحریک مناسبی را با اختلاف فازی ۹۰ درجه ایجاد می‌کنند [۷-۵].

روش معمول افزایش پهنای باند آنتن‌های قطبش دایروی، افزایش ضخامت و کاهش ثابت دی‌الکتریک زیرلایه می‌باشد. اگرچه، ممکن است اندوکتانس زیادی توسط مکانیزم تغذیه ایجاد شود. از این‌رو، برای حل این مساله، روش‌هایی مانند پروب L شکل [۸]، یا صفحه زمین با لایه هوا به‌عنوان زیرلایه آنتن [۹]، استفاده از دو عنصر تشدیدی قطبش دایروی در آنتن مایکرواستریپ با تزویج شکاف-حلقه<sup>۱</sup> [۱۰]، یا تزویج اندوکتانس پروب سری با ظرفیت خازنی موازی و شکاف داخلی پیچ حلقه-مربعی<sup>۲</sup> [۱۱]، بهبود ساختار صفحه زمین [۱۲-۱۳] در تحقیقات زیادی ارائه شده اند.

باید به این نکته توجه شود که در بیشتر آنتن‌ها، قطبش دایروی فقط در نزدیک جهت پرتو اصلی به‌صورت دایروی می‌ماند و نسبت محوری وقتی که از پرتو اصلی خارج می‌شویم عموماً خراب می‌شود. آرایه‌های قطبش دایروی را می‌توان با استفاده از تعدادی عنصر تشعشع کننده قطبش دایروی یا قطبش خطی، شکل داد. هر عنصر آنتن می‌تواند تک-تغذیه یا دو-تغذیه تریبیعی (با اختلاف فاز ۹۰ درجه) باشد. خلوص قطبش بهتر را می‌توان با استفاده از چهار تغذیه برای هر عنصر پیچ، به دست آورد؛ چرا که مدهای نامطلوب در پیچ را می‌توان سرکوب کرد. اگرچه، پیچ چهار تغذیه نیازمند شبکه تغذیه پیچیده‌تری برای ارائه چهار درگاه با اختلاف فاز ۰ درجه، ۹۰ درجه، ۱۸۰ درجه و ۲۷۰ درجه می‌باشد. در آرایه‌های قطبش دایروی بزرگ، شبکه‌های تغذیه، فضای زیادی را اشغال کرده که این منجر به افزایش پیچیدگی و هزینه بالا می‌گردد [۱۴].

در سال ۲۰۰۹ تقریباً اولین مقاله از آنتن‌های آرایه‌ای قطبش دایروی پهن باند با استفاده از شبکه تغذیه موجبر نامتقارن ارائه شد. به کمک این شیوه می‌توان از عناصر قطبش خطی در آنتن‌های آرایه‌ای استفاده کرد که با شیوه شبکه تغذیه موجبر نامتقارن در کل ساختار آنتن آرایه‌ای قطبش دایروی خواهیم داشت. بدیهی است که استفاده از شبکه تغذیه چرخشی متوالی پیچیدگی ساختار بیشتری نسبت به آنتن‌های قطبش دایروی پهن باند پیشین خواهد داشت.

3- Coplanar Waveguide (CPW)  
4- Cascade Coupler Feed

1- Ring-Slot Coupled  
2- Square-Ring Patch

## ۲- طراحی و تحلیل آنتن

### ۱-۲- نمای کلی ساختار آنتن طراحی شده

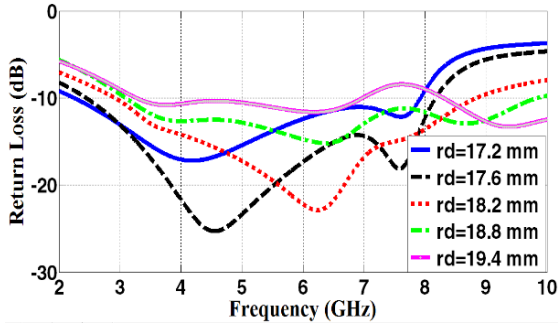
نمای کلی ساختار آنتن ارائه‌شده در شکل (۱) نشان داده شده است. شبکه تغذیه این آنتن متشکل از یک تزویج‌گر هابریده ۱۸۰ درجه می‌باشد که به دو تزویج‌گر ۹۰ درجه به منظور دستیابی به قطبش پهن باند متصل شده است.

### ۲-۲- طراحی تک عنصر آرایه

پیکربندی و هندسه تک عنصر آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی، در شکل (۲) نشان داده شده است. یک شکاف دایره‌ای در پشت صفحه زمین و زیر آرایه‌ها به منظور افزایش پهنای باند آنتن ایجاد شده است. عنصر آنتن شکاف دایروی پیشنهادی، بر روی یک زیرلایه از جنس FR4 با ضریب گذردهی نسبی (εr) ۴/۴، چاپ شده است. نوار L شکل چپ دست با سر نازک شده مخروطی، مستقیماً در مقابل شکاف دایروی قرار گرفته است. ایجاد شکاف در صفحه زمین باعث افزایش پهنای باند عنصر شده است.

از یک خط میکرواستریپ نازک به عنوان مبدل امپدانس بین خط میکرواستریپ ۵۰ اهم و مخروط سر نوار L شکل استفاده شده است [۱۸].

نتایج تغییرات افت برگشتی عنصر منفرد بر اساس تغییرات پارامترهای موثر در پهنای باند امپدانس، شامل پارامترهای rd شعاع شکاف دایروی روی صفحه زمین، L طول بازوی متصل به مخروط، Lf طول خط تغذیه و Lc طول مخروط باریک‌شونده، به ترتیب در شکل‌های (۳) الی (۶) نشان داده شده است. همچنین مقایسه مقادیر پهنای باند حاصل از تغییرات این پارامترها نیز در جدول‌های (۱) تا (۴) به ترتیب آمده است.



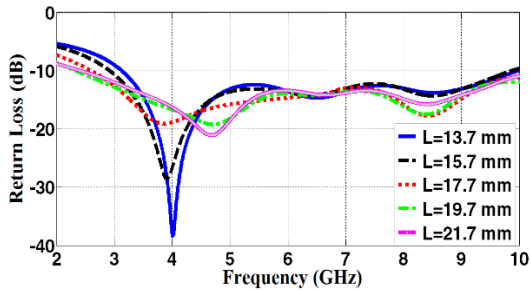
شکل (۳): نتایج افت برگشتی عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات پارامتر rd

جدول (۱): مقایسه پهنای باند عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات

پارامتر rd

(G= 45 mm, L=15mm, Lc=17.9mm, Lf=3.5mm, Wp=5.5mm, Lr=7mm, Wf=1.58mm)

rd (mm)	f1 (GHz)	f2 (GHz)	BW (GHz)
۱۷/۲	۲/۲۹	۷/۹۲	۵/۶۳
۱۷/۶	۲/۴۶	۸/۱۶	۵/۷
۱۸/۲	۲/۹۳	۸/۸۲	۵/۸۹
۱۸/۸	۳/۱۰	۹/۹۰	۶/۸
۱۹/۴	۳/۳	۶/۹۶	۳/۶۶



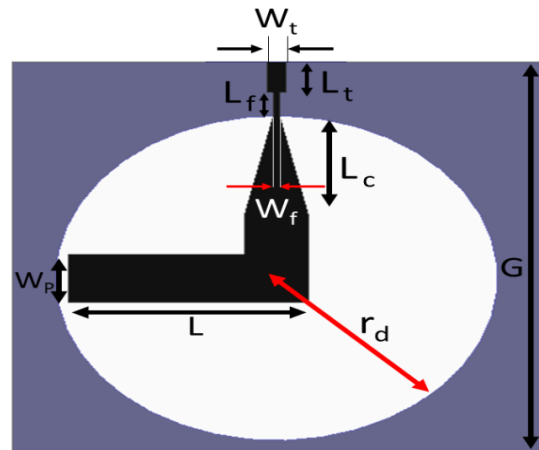
شکل (۴): نتایج افت برگشتی عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات پارامتر L

جدول (۲): مقایسه پهنای باند عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات

پارامتر L

(G= 45 mm, Lc=17.9mm, Lf=3.5mm, rd=18.8mm, Wp=5.5mm, Lr=7mm, Wf=1.58mm)

L (mm)	f1 (GHz)	f2 (GHz)	BW (GHz)
۱۳/۷	۳/۳۱	۹/۹	۶/۵۹
۱۵/۷	۲/۹۳	۹/۹۲	۶/۹۹
۱۷/۷	۲/۶	۱۰/۸۹	۸/۲۹
۱۹/۷	۲/۳	۱۰/۴	۸/۱
۲۱/۷	۲/۴	۱۰/۱۳	۷/۷۳



شکل (۲): پارامترهای ساختار عنصر منفرد آرایه پیشنهادی

و پهنای باندی بین بازه فرکانسی ۲/۵۲ GHz الی ۱۱/۳ GHz می‌باشد.

در جدول (۶) ابعاد و پهنای باند تعدادی از عناصر گزارش شده در کارهای مشابه، با طرح پیشنهادی مقایسه شده است. در مقایسه با دیگر انواع عناصر شکاف آرایه‌ای مشابه که بر روی همان زیرلایه ساخته می‌شوند، آنتن پیشنهادی دارای پهنای باند امیدانسی وسیع‌تری می‌باشد. همچنین عنصر منفرد ارائه‌شده دارای بهره قابل مقایسه با کارهای مشابه می‌باشد.

شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی بهره و پهنای باند نسبت محوری تک عنصر آرایه را نشان می‌دهد. مقدار نسبت محوری در آنتن‌های قطبش دایروی از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$E_{RHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{\theta} + jE_{\phi}), \quad E_{LHCP} = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{\theta} - jE_{\phi}), \quad (1)$$

$$AR = -\frac{(|E_{RHCP}| + |E_{LHCP}|)}{(|E_{RHCP}| - |E_{LHCP}|)} \quad (2)$$

$E_{RHCP}$ : میدان الکتریکی راست‌گرد

$E_{LHCP}$ : میدان الکتریکی چپ‌گرد

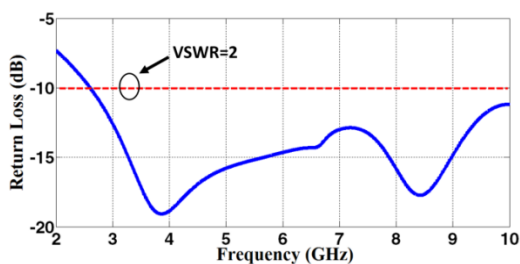
AR: نسبت محوری قطبش دایروی

طراحی عنصر منفرد آرایه به گونه‌ای صورت گرفته است که پهنای باند زیادی داشته باشد و دارای مقدار نسبت محوری و بهره قابل قبولی در کل بازه پهنای باند امیدانسی داشته باشد. نکته قابل توجه آنست که پارامترهای بهره و نسبت محوری بعد از طراحی آنتن آرایه اصلی نسبتاً افزایش خواهند یافت ولی پهنای باند امیدانسی آن به شدت کاهش می‌یابد. به همین دلیل در طراحی عنصر منفرد آرایه پهنای باند امیدانسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل استفاده از زیرلایه FR4 و عدم اطمینان به کارایی این زیرلایه در فرکانس‌های بیشتر از ۸ گیگاهرتز، منحنی در تمام شکل‌ها در بازه فرکانسی ۲ GHz الی ۱۰ GHz ارائه شده است.

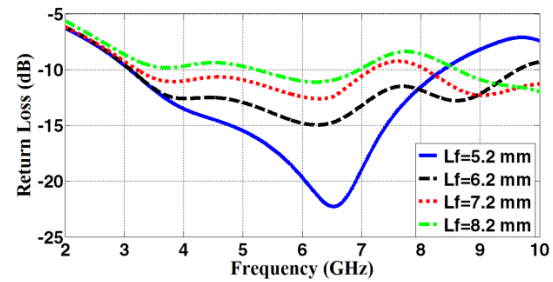
جدول (۵): مقایسه پهنای باند عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات

پارامتر  $L_c$

پارامتر	ابعاد (mm)	پارامتر	ابعاد (mm)
G	۴۵	$r_d$	۱۸/۸
L	۱۷/۷	$W_p$	۵/۵
$L_c$	۱۹/۹	$L_f$	۶/۲
$L_t$	۳/۵	$W_t$	۱/۵۸



شکل (۷): نمودار افت برگشتی عنصر منفرد آرایه شکاف

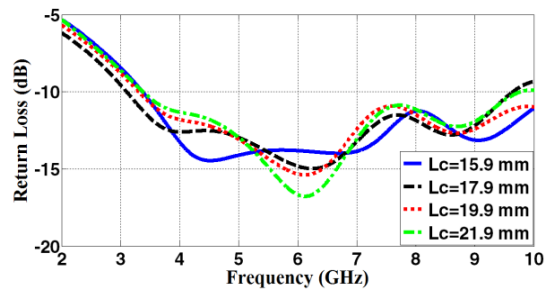


شکل (۵): نتایج افت برگشتی عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات پارامتر  $L_f$

جدول (۳): مقایسه پهنای باند عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات پارامتر  $L_f$

(G= 45 mm, L=17.7mm,  $L_c$ =17.9mm,  $L_f$ =3.5mm,  $r_d$ =18.8mm,  $W_p$ =5.5mm,  $W_t$ =1.58mm )

$L_f$ (mm)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	BW (GHz)
۵/۲	۳/۱۰	۸/۳۷	۵/۲۷
۶/۲	۳/۱۱	۹/۶۳	۶/۵۲
۷/۲	۳/۲۴	۷/۱۵	۳/۹۱
۸/۲	۵/۱۶	۷/۰۶	۱/۹



شکل (۶): نتایج افت برگشتی عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات پارامتر  $L_c$

جدول (۴): مقایسه پهنای باند عنصر منفرد آرایه بر اساس تغییرات پارامتر  $L_c$

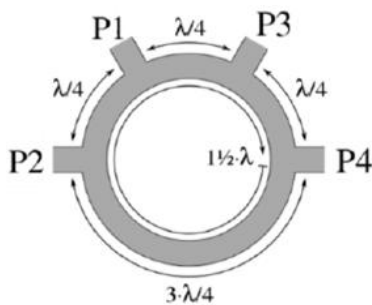
(G= 45 mm, L=17.7mm,  $L_f$ =3.5mm,  $r_d$ =18.8mm,  $W_p$ =5.5mm,  $L_c$ =6.2mm,  $W_t$ =1.58mm )

$L_c$ (mm)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	BW (GHz)
۱۵/۹	۳/۳۲	۱۰/۳	۶/۹۸
۱۷/۹	۳/۰۲	۹/۶۵	۶/۶۳
۱۹/۹	۳/۲۵	۱۱/۹	۸/۶۵
۲۱/۹	۳/۳۵	۹/۸۲	۶/۴۷

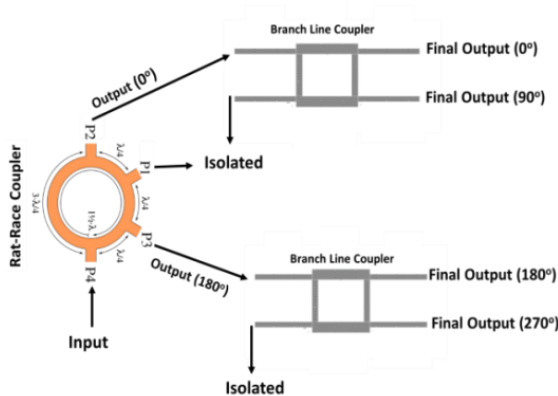
ابعاد نهایی عنصر منفرد آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی پیشنهادی به منظور دستیابی به بیشترین پهنای باند امیدانسی در جدول (۵) ارائه شده است. ابعاد بهینه‌سازی شده نهایی به تفکیک برابر با  $r_d=18.8$  mm,  $G=45$  mm,  $W_t=1.58$  mm,  $L_f=6.2$  mm,  $L_c=19.9$  mm,  $W_p=5.5$  mm,  $L=17.7$  mm می‌باشد که نتیجه پهنای باند امیدانسی شبیه‌سازی شده عنصر منفرد نیز با پارامترهای بهینه، در شکل (۷) ترسیم شده است. طراحی عنصر پیشنهادی، دارای ابعاد  $45\text{mm} \times 45\text{mm}$

نشان داده شده است جهت ایجاد اختلاف فاز ۹۰ درجه و تزویج‌گر Rat-Race مطابق شکل (۱۱) جهت ایجاد اختلاف فاز ۱۸۰ درجه به کار می‌رود.

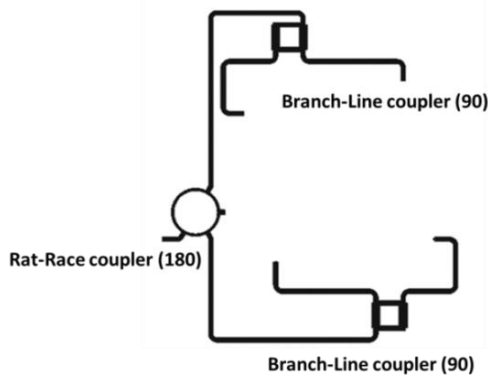
برای طراحی آنتن آرایه‌ای با ۴ عنصر آرایه نیاز به ۴ درگاه خروجی با دامنه برابر ولی ۹۰ درجه اختلاف فاز می‌باشد تا این اختلاف فازها قطبش دایروی پهن باند را ایجاد کنند. این ساختار را می‌توان با یک تزویج‌گر ۱۸۰ درجه و دو تزویج‌گر ۹۰ درجه همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، ایجاد نمود. نمای کلی تغذیه آنتن ارائه‌شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



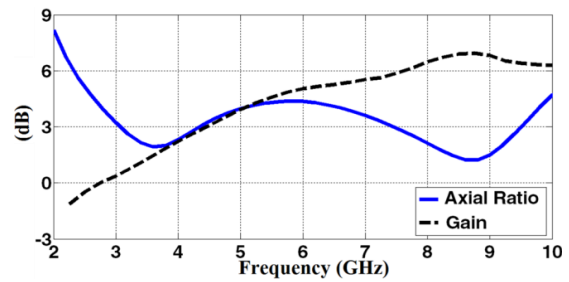
شکل (۱۱): تزویج‌گر ۱۸۰ درجه Rat-Race



شکل (۱۲): ساختار کلی جهت تغذیه ۴ عنصر آرایه آنتن با اختلاف فاز ۹۰ درجه



شکل (۱۳): نحوه تغذیه عناصر آرایه آنتن ارائه‌شده با ۹۰ درجه چرخش متوالی [۲۶]



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی بهره و نسبت محوری عنصر منفرد آرایه

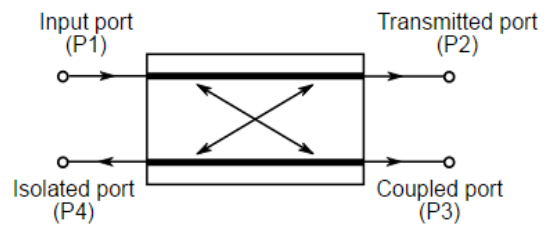
جدول (۶): مقایسه ابعاد و پهنای باند امپدانسی عنصر پیشنهادی با تحقیقات مشابه

مرجع	ابعاد (mm)	پهنای باند امپدانسی (GHz)
[۲۴]	۷۰×۷۰×۱/۶	۰/۸(۱/۶-۲/۴)
[۲۵]	۶۰×۶۰×۰/۷۶	۰/۸(۱/۷-۲/۵)
[۲۶]	۶۰×۶۰×۰/۷۴	۱/۴(۱/۶-۳)
[۱۸]	۴۰×۴۰×۰/۸	۶/۲(۴/۸-۱۱)
عنصر منفرد پیشنهادی	۴۵×۴۵×۰/۸	۸/۷۹(۲/۵۱-۱۱/۳)

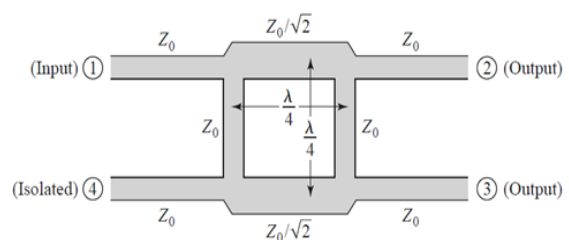
### ۳-۲- طراحی شبکه تغذیه

شبکه تغذیه ارائه شده همان‌طور که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است شامل یک تزویج‌گر هایبرید ۱۸۰ درجه rat-race و دو تزویج‌گر هایبرید ۹۰ درجه Branch-line می‌باشد [۲۷].

تزویج‌گرهای هایبرید در واقع یک قطعه ۴ درگاهی هستند که برای تقسیم توان ورودی به دو بخش با دامنه مساوی ولی اختلاف فاز ۹۰ یا ۱۸۰ درجه در دو درگاه خروجی استفاده می‌شود. شکل (۹) نمای کلی این تزویج‌گرها را نشان می‌دهد.



شکل (۹): نمای کلی تزویج‌گرهای هایبرید



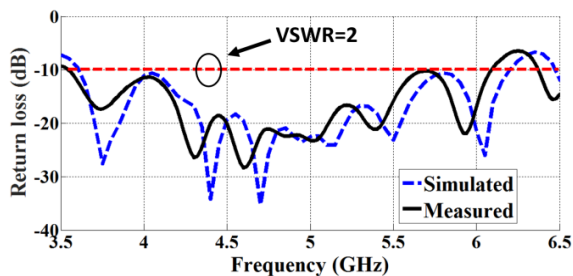
شکل (۱۰): تزویج‌گر ۹۰ درجه Branch-Line

همان‌طور که گفته شد، تزویج‌گرها، اختلاف فاز ۹۰ یا ۱۸۰ درجه ایجاد می‌نمایند. تزویج‌گر Branch-line که در شکل (۱۰)

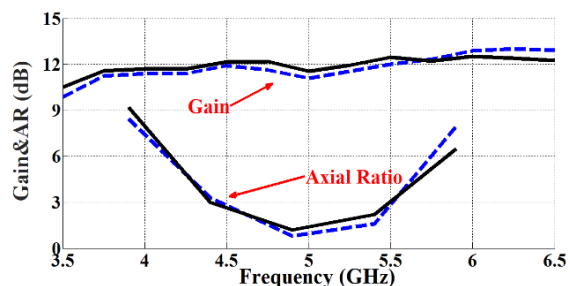
### ۳- نتایج و بحث

آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی پیشنهادی، با استفاده از تحلیلگر شبکه Agilent TM 8722ES اندازه‌گیری شده است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری افت برگشتی، بهره و نسبت محوری آرایه طراحی شده، به ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) ارائه شده است. پهنای باند امپدانسی اندازه‌گیری شده ( $-10$  dB) در حدود ۵۴٪ در بین بازه فرکانسی GHz ۳/۵۱ الی GHz ۶/۱ می‌باشد. پهنای باند نسبت محوری ( $< 3$  dB) اندازه‌گیری شده نیز حدود ۲۲٪ در بازه فرکانسی GHz ۴/۴ الی GHz ۵/۵ می‌باشد. کمترین مقدار نسبت محوری در فرکانس GHz ۴/۹ و در حدود ۱/۲ دسی‌بل می‌باشد.

جهت اندازه‌گیری قطبش دایروی و بهره آنتن از یک آنتن دوقطبی چرخشی استاندارد با قطبش خطی استفاده شده است. بیشینه بهره آنتن در فرکانس GHz ۵/۵ حدود ۱۲/۴۵ dBic می‌باشد. بهره آنتن در کل بازه فرکانسی GHz ۳/۵۱ الی GHz ۶/۱ بالاتر از ۱۰/۵ dBic می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده آنتن طراحی شده در گروه آنتن‌های قطبش دایروی پهن باند با بهره بالا قرار می‌گیرد. الگوهای تشعشی اندازه‌گیری شده نرمالیزه مربوط به آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی پیشنهادی در دو صفحه متعامد در ۵/۵ گیگاهرتز، در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۱۵): منحنی افت برگشتی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن آرایه پیشنهادی



شکل (۱۶): مقایسه نتایج ساخت و اندازه‌گیری بهره و نسبت محوری آنتن آرایه ارائه‌شده

به منظور افزایش پهنای باند آنتن محل ورود تغذیه هر ۴ عنصر نیز با چرخش متوالی ۹۰ درجه صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل (۱۳) مقاله نشان داده شده است؛ برای داشتن تطبیق بیشتر در تزویج‌گرها و همین‌طور اختلاف فاز ۹۰ درجه مورد نیاز در خروجی‌های تزویج‌گرها طول‌های الکتریکی دو بازوها در تزویج‌گر Rat-Race با یکدیگر و طول هر چهار بازوی تزویج‌گرهای Branch-Line نیز با یکدیگر کاملاً برابر طراحی شده‌اند. در محل اتصال بازوهای تزویج‌گر به تک‌عنصرهای آرایه نیز از یک خط تطبیق مستطیل شکل به ابعاد  $L_t=3.5$  mm و  $W_t=1.58$  mm استفاده شده است.

### ۴-۲- طراحی ساختار کلی آنتن

مطابق شکل (۱۴)، آنتن آرایه‌ای پیشنهادی، از ۴ عنصر شکافی قطبش دایروی با چرخش متوالی و یک شبکه تغذیه متشکل از تزویج‌گرهای هایبرید تشکیل شده است. از زیرلایه کم‌هزینه FR4 با ضخامت ۰/۸ mm، با ثابت دی‌الکتریک ۴/۴ و تانژانت تلفات ۰/۰۲ برای ساخت آنتن پیشنهادی، استفاده شده است. ابعاد نهایی ساختار آنتن ارائه‌شده  $97 \times 112$  mm<sup>2</sup> می‌باشد که نسبت به کارهای مشابه کاهش داشته است. شبکه تغذیه آرایه آنتن پیشنهادی، با کانکتور SMA ۵۰ اهمی، تغذیه می‌شود. از یک آنتن قطبش خطی در دو جهت افقی و عمودی، جهت اندازه‌گیری بهره‌های GTV و GTH استفاده شده است که به منظور به‌دست آوردن بهره کل از رابطه (۳) استفاده می‌شود [۱۸].

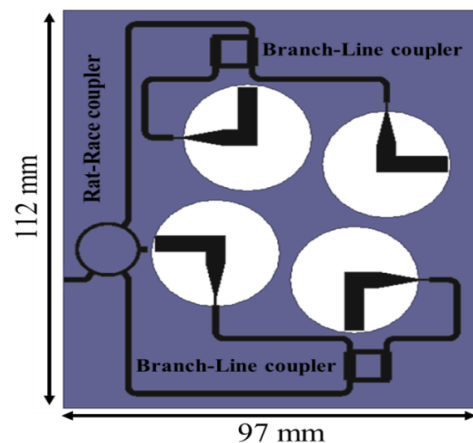
از آنجا که آنتن طراحی شده دو جهتی است، بهره آن در جهت مثبت Z ( $\theta=0$ ) با بهره در جهت منفی Z ( $\theta=180$ ) یکسان می‌باشد.

$$G_T = 10 \log(G_{TV} + G_{TH}) \text{ [dBic]} \quad (3)$$

GT: بهره کلی آنتن

GTV: بهره عمودی آنتن

GTH: بهره افقی آنتن



شکل (۱۴): ساختار آنتن آرایه‌ای ارائه‌شده در محیط شبیه‌سازی

جدول (۷): مقایسه پارامترهای ساختار آنتن آرایه‌ای ارائه شده با نتایج تحقیقات مشابه

مرجع	ابعاد (mm)	پهنای باند امیدانسی		پهنای باند نسبت محوری قطبش دایروی		بیشینه بهره (dB <sub>i</sub> )
		(GHz)	(%)	(GHz)	(%)	
[۸]	۲۲۰×۲۲۰×۱/۶	۰/۸(۱/۱-۱/۹)	۵۳	۰/۶(۱/۳-۱/۹)	۳۸	~ ۸
[۲۱]	۱۲۰×۱۲۰×۰/۸	۳/۸(۴/۲-۸)	۶۲	۱/۹(۴/۷-۶/۶)	۳۵	~ ۸/۷
[۱۹]	۹۲×۹۲×۰/۸	۲/۶(۴/۲-۶/۸)	۴۱	۱/۹(۵/۱-۷)	۳۱	~ ۷/۵
آنتن پیشنهادی	۱۱۲×۹۷×۰/۸	۲/۶(۳/۵-۶/۱)	۵۴	۱/۱(۴/۴-۵/۵)	۲۲	~ ۱۲/۴۵

زیرلایه دچار دگرگونی و تضعیف هر چند ناچیزی می‌گردد و لذا در نتیجه این امر در سمت +Z و -Z الگوی تشعشعی آنتن یکسان نمی‌باشد.

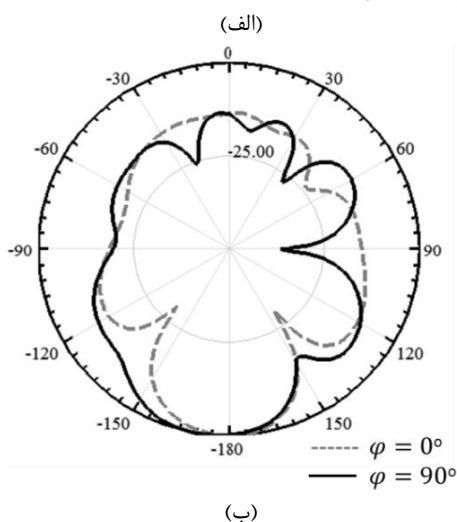
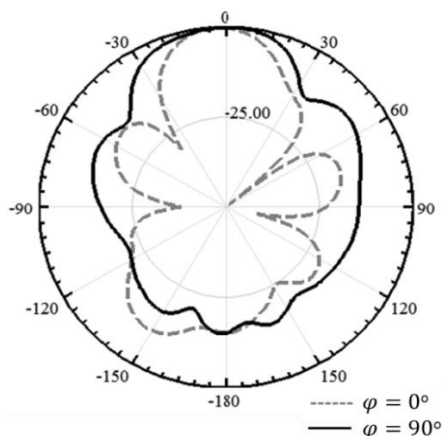
مقایسه بین طراحی پیشنهادی و ساختارهای آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی پیشین با شبکه تغذیه چرخشی متوالی در جدول (۷) نشان داده شده است. افزایش چشمگیری در بهره آنتن، نسبت به طراحی‌های مشابه، وجود دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک آنتن آرایه‌ای شکافی قطبش دایروی پهن باند با بهره تشعشعی بالا برای پوشش باند C ماهواره ارائه شده است. با بررسی و شبیه‌سازی پارامترهای تاثیرگذار در طراحی عنصر منفرد آرایه، در نهایت ابعاد ساختار به گونه‌ای طراحی شده است تا بیشترین مقدار پهنای باند امیدانسی در طراحی عنصر منفرد آرایه به دست آید. آنتن با آرایه ۲×۲ از عناصر منفرد بهینه با شبکه تغذیه متشکل از توزیع‌گرهای هابریده ۱۸۰ درجه و ۹۰ درجه طراحی شده است. ساختار پیشنهادی دارای پهنای باند امیدانسی در حدود ۵۴٪ در بازه فرکانسی ۳/۵۱ GHz الی ۶/۱ GHz و نیز پهنای باند قطبش دایروی در حدود ۲۲٪ می‌باشد. بهره تشعشعی آنتن در کل بازه فرکانسی بیش از ۱۰ dBic است و بیشینه بهره ۱۲/۴۵ dBic در فرکانس ۵/۵ GHz به دست آمده است. الگوی تشعشعی آنتن در هر دو قطبش راست‌گرد و چپ‌گرد از خلوص قطبش مناسبی برخوردار می‌باشد.

#### ۵- مراجع

- [1] Y. Haghian, S. H. Mohseni Armaki, and M. Kazerooni, "Design, Simulation and Realization of S band Circular Polarization Microstrip Array Antenna," Journal of Applied Electromagnetics, vol. 2, no. 1, 2014.
- [2] S. Gao, Q. Luo, and F. Zhu, "Circularly polarized antennas," John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2014.
- [3] M. pourhosseini and P. Rezaei, "Self-Polarizing Highly-Gain Fabry-Perot Cavity Antennas With EDR Unit Cell," The 3rd Iranian Conference on Engineering Electromagnetic (ICEEM), pp. 1-4, 2014.
- [4] J. Pourahmadazar and S. Mohammadi, "Compact Circularly-Polarised Slot Antenna for UWB Applications," Electronic Letters, vol. 45, no. 15, pp. 837-838, 2011.



شکل (۱۷): نتایج اندازه‌گیری الگوی تشعشعی آنتن آرایه‌ای پیشنهادی در فرکانس ۵/۵ GHz (الف) قطبش راست‌گرد (ب) قطبش چپ‌گرد

از آنجایی که آنتن آرایه‌ای چایی یک تشعشع کننده دو جهتی است، الگوهای تشعشعی در هر دو سمت آنتن، مشابه با قطبش آنتن می‌باشد. در این شکل، آنتن پیشنهادی تشعشع RHCP را در جهت محور +Z و تشعشع LHCP را در جهت محور -Z نشان می‌دهد.

آنتن پیشنهادی به دلیل شکافی بودن به سمت بالا +Z به صورت قطبش راست‌گرد و به سمت پایین -Z به صورت چپ‌گرد تشعشع می‌نماید. از طرف دیگر چون هنگام تشعشع از بیچ آنتن به سمت پایین زیرلایه از داخل زیرلایه، میدان الکترومغناطیسی را عبور می‌دهد. بنابراین، میدان در این شکاف با توجه به عبور از

- Applications,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp. 128-131, 2013.
- [20] Z. Mousavi, P. Rezaei, and V. Rafii, “Single Layer CPSSA Array With Change Polarization Diversity in Broadband Application,” International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 27, no. 4, pp. 1-8, 2017.
- [21] J. Pourahmadazar and V. Rafii, “Broadband Circularly Polarized Slot Antenna Array for L and S-Band Applications,” Electronics Letters, vol. 48, no. 10, pp. 542-543, 2012.
- [22] S. Karamzadeh, V. Rafii, M. Kartal, O. N. Ucan, and B. S. Virdee, “Circularly Polarised Array Antenna with Cascade Feed Network for Broadband Application in C-Band,” Electronics Letters, vol. 50, no. 17, pp. 1184-1186, 2014.
- [23] M. Fakharian, P. Rezaei, and A. Orouji, “Reconfigurable Multiband Extended U-Slot Antenna with Switchable Polarization for Wireless Applications,” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no. 2, pp. 194-202, 2015.
- [24] C. C. Chou, K. H. Lin, and H. L. Su, “Broadband Circularly Polarized Cross-Patch-Loaded Square Slot Antenna,” Electronics Lett. vol. 43, no. 9, pp. 485-486, 2007.
- [25] J.-Y. Sze, J.-C. Wang, and C.-C. Chang, “Axial-Ratio Bandwidth Enhancement of Asymmetric-CPW-Fed Circularly-Polarized Square Slot Antenna,” Electronics Lett., vol. 44, no. 18, pp. 1048-1049, 2008.
- [26] J.-Y. Sze and C.-C. Chang, “Circularly Polarized Square Slot Antenna with a Pair of Inverted-L Grounded Strips,” IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, vol. 7, pp. 149-151, 2008.
- [27] P. Mohammadi, and V. Rafii, “High Gain and Broadband Circularly Polarized Square Slot Antenna Array,” Progress in Electromagnetics Research Letters, Vol. 43, pp. 105-113, 2013.
- [5] M. pourhosseini and P. Rezaei, “Circularly Polarized Fabry Perot Antenna Using A Novel Design of Superstrate Structure,” 2nd Asian Symp. on Electromagnetics and Photonics Engineering, pp. 348-351, 2013.
- [6] M. Pourhosseini and P. Rezaei, “Design a Novel Structure of Circular Polarization Antenna Using Reflective Meta-Surface,” 3rd Iranian Conf. on Engineering Electromagnetic (ICEEM), pp. 1-4, 2014.
- [7] F. Yang, and Y. Rahmatsamii, “A Reconfigurable Patch Antenna Using Switchable Slots for Circular Polarization Diversity,” IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 12, no. 3, 2002.
- [8] S. Fu, S. Fang, Z. Wang, and X. Li, “Broadband Circularly Polarized Slot Antenna Array Fed By Asymmetric CPW for L-Band Application,” IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, vol. 8, pp. 1014-1016, 2009.
- [9] F. S. Chang, K. L. Wong, and T. W. Chiou, “Low-Cost Broadband Circularly Polarized Patch Antenna,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 10, pp. 3006-3009, 2003.
- [10] C.-W. Su and J.-S. Row, “Slot-Coupled Microstrip Antenna for Broadband Circular Polarization,” Electronics Letters, vol. 42, pp. 318-319, 2006.
- [11] T.-Y. Han and C.-Y.-D. Sim, “Probe-Feed Circularly Polarized Square Ring Microstrip Antennas with Thick Substrate,” Journal of Electromagnetics Waves and Applications, vol. 21, no. 1, pp. 71-80, 2007.
- [12] S. A. Mirmanafi and H. Khodabakhshi, “Design and Construction of Frequency Reconfigurable Micro-Strip UWB Antenna with Triple Controllable Notched Bands,” Journal of Applied Electromagnetics, vol. 3, no. 3, 2016.
- [13] L. Zhang, Y.-C. Jiao, Y. Ding, B. Chen, and Z.-B. Weng, “CPW-Fed Broadband Circularly Polarized Planar Monopole Antenna with Improved Ground-Plane Structure,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 9, pp. 4824-4828, 2013.
- [14] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, “Microstrip Antenna Design Handbook,” Boston, Ma: Artech House, 2000.
- [15] P. S. Hall, J. S. Dahele, and J. R. James, “Design Principles of Sequentially Fed, Wide Bandwidth, Circularly Polarised Microstrip Antennas,” Proc. Microwave Antennas Propagation, vol. 136, pp. 381-389, 1989.
- [16] P. S. Hall, “Application of Sequential Feeding To Wide Bandwidth, Circularly Polarised Microstrip Patch Arrays,” IEEE Proceedings-Microwave Antennas Propagation, vol. 136, pp. 390-398, 1989.
- [17] J. Huang, “A Technique For an Array To Generate Circular Polarization with Linearly Polarized Elements,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 9, pp. 1113-1119, 1986.
- [18] V. Rafii, J. Nourinia, J. Pourahmadazar, and F. Jalili, “Circularly Polarized Circular Slot Antenna Array Using Sequentially Rotated Feed Network,” Journal of Communication Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 37-45, 2012.
- [19] V. Rafii, J. Nourinia, Ch. Ghobadi, J. Pourahmadazar, and S. Virdee, “Broadband Circularly Polarized Slot Antenna Array Using Sequentially Rotated Technique for C-Band

## سپاس گذاری

این تحقیق با حمایت دانشگاه سمنان صورت گرفته است. از موسسه Premier Frequency Turkish Institute نیز برای همکاری در ساخت و اندازه گیری آنتن قدردانی می شود. این مقاله با حمایت مالی شرکت مهندسی پرسو الکترونیک انجام گرفته است. همچنین بدین وسیله از راهنمایی ارزشمند داوران محترم و نیز ویراستار مجله که با نظرات خود ما را در بهبود کیفیت مقاله یاری نمودند، صمیمانه قدردانی می شود.



---

**Broadband and High Gain Circularly Polarized Slot Array Antenna with Hybrid Coupler Feed Network**

**P. Rezaei\*, Z. Mousavi Razi**

**Semnan University**

(Received: 24/06/2017, Accepted: 26/09/2017)

**Abstract**

*In this paper, a new design of a broadband high gain circularly polarised slot array antenna (CPSSAA) is presented. The proposed antenna is fed by a symmetric hybrid coupler for C-band application. The designed single array element is excited by L-shaped strip with a tapered end, located along the circular-slot diagonal line in the back plan. From the single array element simulation results, the -10dB return loss bandwidth is around 8.79GHz (2.51GHz-11.3GHz). The designed single array element is 50% wider than the impedance bandwidth of a previous similar design. The proposed antenna is composed of  $2 \times 2$  Array elements. The measured results for The final structure of circularly polarised slot array antenna are about 54% (3.5GHz-6.5GHz) for return loss BW, 22% (4.4GHz-5.4GHz) for axial ratio and peak Gain around 12.45dBic at 5.5GHz. The simple structure, light weight, compact size, circular polarization with a very high polarization polarity and a high gain, make it a perfect match for C-band applications, in which a circular polarization antenna is required. The measured results corroborate well with the simulated results.*

**Keywords:** Slot Array Antenna, Circularly Polarised, Broadband, High Gain and Hybrid Coupler

---

\* Corresponding author E-mail: prezaei@semnan.ac.ir