

طراحی و ساخت آنتن شکافدار موجبری راداری بر اساس روش تحریک جدید مبتنی بر استفاده از آیریس در داخل موجبر

مجید افصحی^۱ حسن زمینی^۲ حمیدرضا دلیلی اسکویی^۳

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان - سمنان- ایران

m_afsahi@semnan.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران

h.zamini@semnan.ac.ir

۳- دانشیار- دانشکده تحصیلات تکمیلی- دانشگاه هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

oskouei@ssau.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک آنتن آرایه موجبری با شکاف غیرمورب در دیواره باریک، با روش تحریک جدید توسط عناصر مستطیلی شکل که آیریس نامیده می‌شوند، آرایه شده است. این روش علاوه بر بهبود مشخصات امپدانسی و تشعشعی نسبت به روشهای قبلی، دارای فرایند ساخت راحت تر بوده و همچنین به دلیل استفاده از شکافهای غیرمورب دارای سطح پلاریزاسیون متقاطع پایینی نیز می‌باشد. در این مقاله بعد از بررسی روش جدید تحریک شکافها بصورت تک عنصر، یک آنتن آرایه خطی با ۱۳۶ عنصر براساس توزیع تیلور جهت کاربردهای مراقبتی در باند S، با استفاده از نرم افزار HFSS طراحی و شبیه سازی گردیده است. در انتها بعد از بهینه سازی، آنتن ساخته شده و مورد تست قرار گرفته است و نتایج حاصله از تست آنتن با نتایج شبیه سازی دارای تطبیق مورد قبولی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنتن شکافی موجبری، آرایه شکافی موجبری نوع موج رونده، موجبر مستطیلی، جاروب فرکانسی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.3.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید افصحی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سمنان - روبروی پارک سوکان - پردیس شماره یک - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر -

کد پستی: ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱

۱- مقدمه

سابقه تاریخی ایجاد شکاف در موجبرهای مستطیلی و استفاده از آن به عنوان عنصر تشعشع کننده، به جنگ جهانی دوم [۱] برمی گردد. محققان دریافتند که اگر شکاف کوچکی در دیواره‌ی موجبر ایجاد نمایند، امواج الکترومغناطیسی به فضای خارج از موجبر تابیده می‌شود. یکی از ویژگیهای مهم آرایه‌های شکافی موجبری آن است که توزیع جریان لازم برای تحریک آرایه به راحتی به وسیله‌ی محل شکاف و نحوه قرار گرفتن آن کنترل می‌شود. از دیگر ویژگیهای آرایه‌های شکافی موجبری می‌توان به قابلیت حمل و انتشار توانهای زیاد، بازدهی خوب، وزن کم و استحکام مکانیکی آنها اشاره نمود. به دلیل این ویژگیها با وجود طراحی و ساخت انواع آنتن‌های جدید، همچنان در بسیاری از کاربردها از آنتن‌های شکافی موجبری استفاده می‌شود و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است [۲-۴]. آنتن‌های آرایه-ای موجبری شکافدار، در ساختار بیشتر رادارها و ماهواره‌ها استفاده می‌شوند. خصوصاً زمانی که توان بالا، هزینه ساخت پایین و قابلیت اسکن الکترونیکی مد نظر باشد. همچنین هدایت پرتوهای الکترونیکی با استفاده از این نوع آنتن‌ها به سادگی امکان پذیر است. با توجه به مزایای فوق، علیرغم سابقه این نوع از آنتن‌ها، کماکان تحقیقات در زمینه بهبود خواص تشعشعی آنتن‌های شکافدار ادامه دارد [۶-۱۰]. به غیر از مزایای الکتریکی آنتن‌های موجبری از لحاظ مکانیکی نیز بادوام بوده و می‌توانند در شرایط مختلف مقاوم باشند. داشتن سطح گلبرگ کناری پایین و کارایی پایدار نیز از دیگر ویژگی‌های این نوع آنتن‌ها می‌باشد. استفاده از آنتن‌های شکافدار در دیواره پهن موجبر، باعث افزایش ارتفاع آنتن در آنتن‌های صفحه‌ای می‌شود. لذا در سیستم‌های جدید راداری از شکاف‌های دیواره باریک موجبر استفاده می‌شود. در مورد آنتن‌های شکافدار کج، با توجه به کج بودن شکاف، پلاریزاسیون متقاطع ناخواسته به مقدار قابل توجهی زیاد می‌شود که برای رفع این مشکل از روش صفحات بافلی (Baffle) استفاده می‌شود [۵] که این روش باعث افزایش فاصله بین موجبرها شده و به دنبال آن، گلبرگ مزاحم (Grating Lobe) در زاویه اسکن کوچکتر ایجاد می‌شود. همچنین این آنتن‌ها (خصوصاً نوع رزونانسی) در مقایسه با آنتن‌های دیگر دارای پهنای باند فرکانسی کمتری می‌باشند.

در این مقاله یک روش جدید مبتنی به استفاده از عناصر مستطیلی شکل در داخل موجبر در کنار شکاف‌ها آرایه شده است. جهت بررسی روش جدید ابتدا به بررسی خواص امپدانس و تشعشعی یک عنصر (یک شکاف به همراه آیریسها) پرداخته و در ادامه یک آرایه خطی بر اساس روش معرفی شده، طراحی و شبیه سازی شده و پس از بررسی نتایج شبیه سازی، یک ردیف ۱۳۶ عنصره ساخته و مورد تست قرار گرفته است.

۲- معرفی یک شکاف غیر مایل در دیواره باریک

موجبر مستطیلی

همانگونه که گفته شد، استفاده از شکاف‌های کج در دیواره باریک موجبر مستطیلی، باعث ایجاد پلاریزاسیون متقاطع می‌گردد. لذا برای برطرف کردن این ایراد باید از شکاف غیر مایل (صاف) در دیواره باریک موجبر استفاده کرد. ولی با توجه به مولفه‌های جریان روی دیواره باریک موجبر، شکاف غیر مایل مولفه‌های جریان را قطع نکرده و هیچ گونه تشعشعی حاصل نمی‌شود. جهت تحریک شکاف‌های غیر مایل در دیواره باریک موجبری، چندین روش در مقالات آرایه شده است از جمله استفاده از میله در دهانه شکاف [۱۱] و استفاده از عایق [۱۲].

روش استفاده از میله برای تحریک شکاف‌های لبه‌ای عرضی در عمل مشکلات زیادی دارد. ایجاد سوراخ‌های مورب در دیواره‌های موجبر به صورت دقیق و جوشکاری میله‌ها سخت و پرهزینه است و از طرف دیگر تنظیم محل و طول میله‌ها بعد از ساخت عملاً غیر ممکن است. علاوه بر موارد فوق، استفاده از این میله‌ها باعث بوجود آمدن ایرادات عمده و قابل ملاحظه‌ای در عملکرد مایکروویوی می‌شود. همچنین تحریک بوسیله میله فلزی موجب افزایش پهنای شکافها و در نتیجه ایجاد سطحی از پلاریزاسیون متقاطع می‌شود که ممکن است مشکلاتی را برای کاربردهای خاص بوجود آورد.

روش تحریک بوسیله پرکردن شکاف توسط دی الکتریک به صورت کامل توسط آقای حیدری در مرجع شماره [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. ایشان در ادامه‌ی کار خود، راه حلی برای افزایش هدایت شکاف‌های غیر تشدیدی ارائه کرده‌اند. او با تحلیل شکاف‌های غیر تشدیدی که به وسیله عایق پر شده‌اند نشان داد که نه تنها کنداکتانس شکاف افزایش می‌یابد، بلکه می‌توان شکافی که طول آن محدود به دیواره‌ی باریک موجبر است را به حالت تشدید درآورد. علاوه بر مزایای استفاده از شکاف‌های پر شده با عایق، این ساختار محدودیت‌هایی نیز دارد. مثلاً پرکردن شکاف با عایق، پهنای باند شکاف را کاهش می‌دهد و سبب مشکل کردن ساخت و تنظیم آرایه می‌شود.

در این مقاله یک روش جدید مبتنی به استفاده از عناصر مستطیلی شکل در داخل موجبر در کنار شکاف‌ها آرایه شده است. جهت بررسی روش جدید ابتدا به بررسی خواص امپدانس و تشعشعی یک عنصر (یک شکاف به همراه آیریسها) پرداخته شده است.

در این روش، برای تحریک شکاف از صفحات مستطیلی موسوم به آیریس در داخل موجبر استفاده شده است. یعنی این نوع شکاف، همانند شکل ۱، شامل یک شکاف استاندارد است که توسط دو آیریس مستطیلی شکل تحریک می‌شود (شکل ۱-الف).

همانگونه که در شکل ۱ (ب) مشاهده می‌شود، آیریس‌های اضافه شده، با ایجاد تغییر مسیر در جریان‌های دیواره باریک، باعث هدایت این جریان‌ها و تشعشع از شکاف می‌شوند. در این روش چندین متغیر در میزان تشعشع شکافها موثر است که می‌توان به طول، ارتفاع،

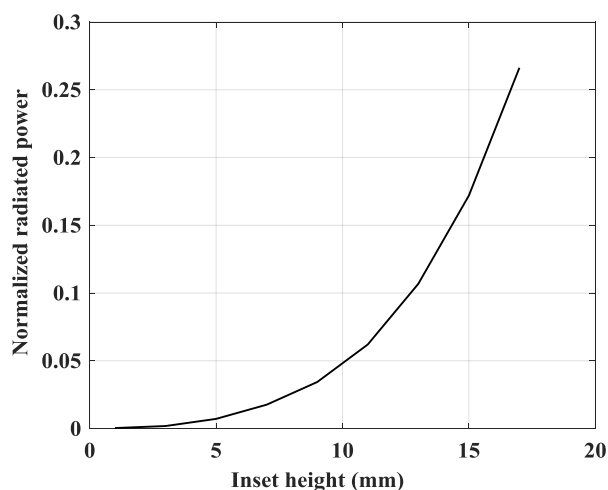
۱-۳- تاثیر ارتفاع آیریس

روی دیواره باریک موجبر مستطیلی مد نظر، یک شکاف با مشخصات زیر ایجاد شده است:

- عرض شکاف $s = 6\text{mm}$
- عمق شکاف $p = 8.4\text{mm}$
- ضخامت آیریس $w = 2\text{mm}$
- فاصله لبه آیریس تا وسط شکاف $d/2 = 13\text{mm}$
- طول آیریس $l = 18\text{mm}$

ارتفاع آیریس (h)، از 1mm تا 17mm متغیر در نظر گرفته شده و با اجرای برنامه HFSS به بررسی نتایج پرداخته شده است.

نمودار تغییرات دامنه توان تشعشعی نسبت به ارتفاع آیریس، در شکل (۲) نشان داده شده است. با بررسی نمودار مشاهده می‌شود که دامنه تشعشعی با تغییر ارتفاع آیریس با نسبت مستقیم تغییر می‌کند. یعنی با تغییر ارتفاع آیریس می‌توان به دامنه تشعشعی بالا و پایین دست یافت. فاز تشعشعی مستقل از تغییر ارتفاع آیریس است.

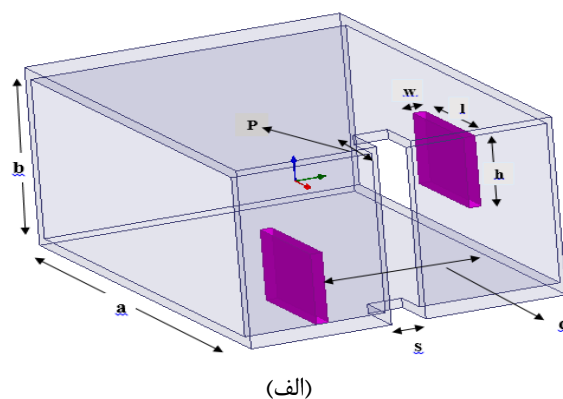


شکل (۲): نمودار توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب ارتفاع آیریس

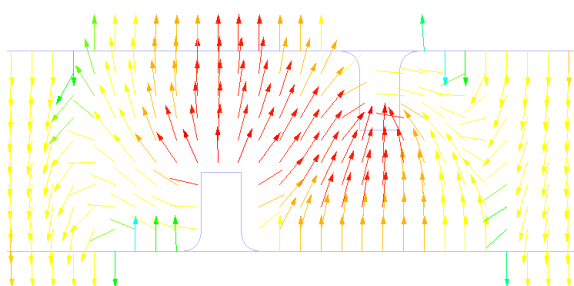
۲-۳- تاثیر طول آیریس

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر تشعشع شکاف طول آیریس (l) می‌باشد. پارامترهای دیگر شکاف همانند قبل، ثابت نگه داشته و طول آیریس از 12mm تا 36mm متغیر گرفته شده است.

تغییرات دامنه توان تشعشع شده نرمالیزه بر حسب طول آیریس در شکل (۳) رسم شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود دامنه تشعشعی وابسته به طول آیریس بوده ولی از یک حدی به بالا (حدوداً 30mm به بالا) ثابت می‌ماند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فاز تشعشعی مستقل از طول آیریس می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل (۱): مدل تک عنصر پیشنهادی شبیه سازی شده توسط نرم افزار HFSS. (ب) نحوه هدایت جریان توسط آیریس‌ها

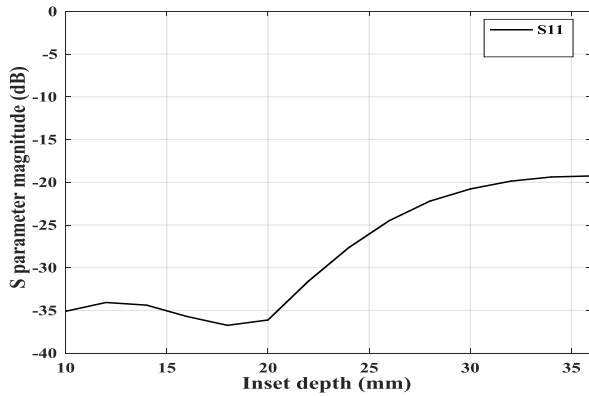
ضخامت آیریس، فاصله آنها از دهنه شکاف، عرض دهانه شکاف و غیره اشاره کرد. از آنجائیکه این تحقیق در نهایت قرار است منجر به ساخت گردد و در صنایع نظامی و فرودگاهی مورد استفاده قرار گیرد، بهترین ملاحظات جهت ساخت آن در نظر گرفته شده است. پس برای ساده شدن ساخت این آنتن، تنها پارامتر ارتفاع آیریس که موثرترین پارامتر می‌باشد، متغیر در نظر گرفته شده تا بهره، عرض پرتو، سطح گلبیگ کناری، S_{11} ، S_{21} و غیره مورد نیاز حاصل گردد.

۳- بررسی پارامتریک خواص تشعشعی تک شکاف

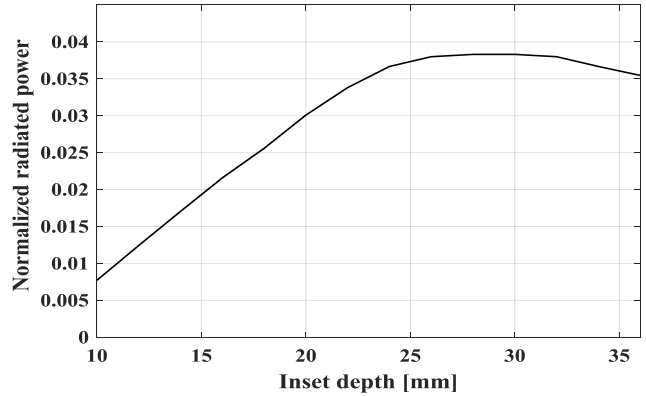
جهت بررسی خصوصیات تشعشعی شکاف مطرح شده، یک موجبر مستطیلی (WR284) به ابعاد $a=72\text{mm}$ و $b=34\text{mm}$ با یک شکاف عمودی در دیواره باریک مطابق شکل (۱)، در فرکانس $۲/۹$ گیگا هرتز شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. (ضخامت دیواره موجبر ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است). در دو طرف موجبر دهنه تشعشعی (wave port) قرار داده شده، شرایط مرزی مورد نیاز تعریف شده و پارامترهای پراکندگی بدست آورده شده است.

بعد از محاسبه پارامترهای پراکندگی S_{11} و S_{21} ، توان تشعشعی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

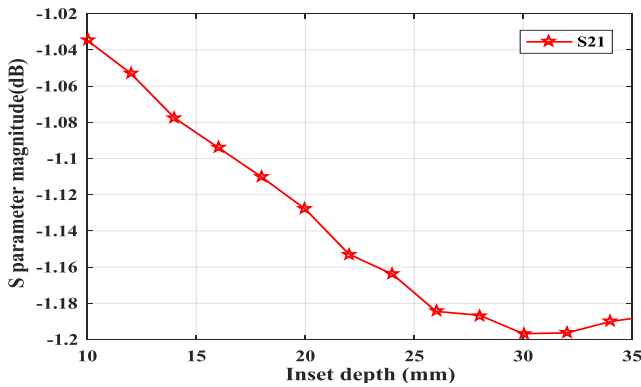
$$P_r = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2}{|S_{21}|^2} \quad (1)$$



(الف)

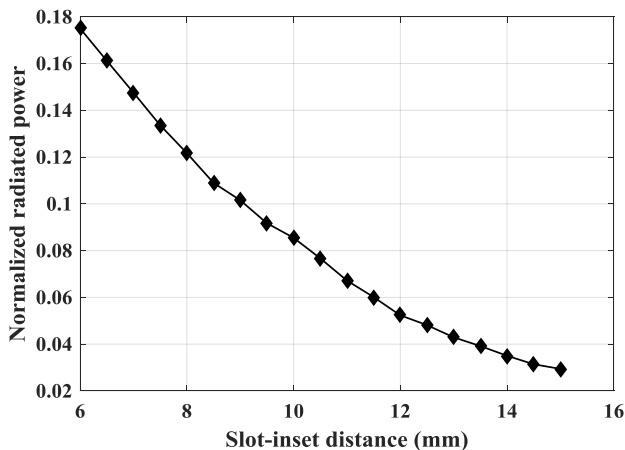


شکل (۳): نمودار توان تشعشی نرمالیزه بر حسب طول آیریس



(ب)

شکل (۵): (الف) اندازه S_{11} (ب) اندازه S_{21} (بر حسب طول iris)



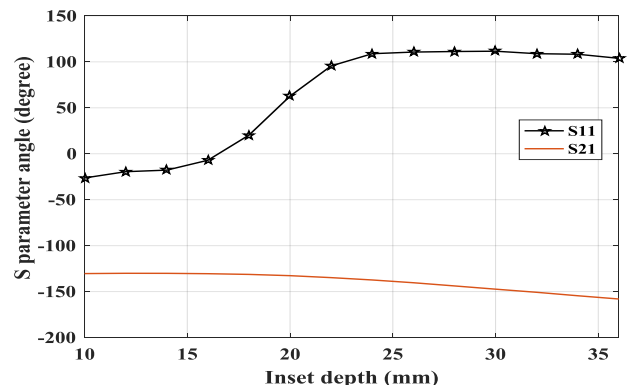
شکل (۶): نمودار توان تشعشی نرمالیزه بر حسب فاصله آیریس از مرکز شکاف

۳-۴- تاثیر عمق و عرض شکاف

بررسی بعدی روی پارامتر عمق شکاف (p) انجام می‌گیرد. پارامترهای شکاف همانند قبل ثابت نگه داشته و عمق شکاف (تورفتگی شکاف) از 5mm تا 15mm تغییر داده شده است.

نمودار دامنه توان تشعشی نسبت به عمق شکاف در شکل (۷) رسم شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، دامنه تشعشی

به غیر از موارد گفته شده، تغییر طول آیریس تاثیرات دیگری روی پارامترهای پراکندگی شکاف دارد. همان گونه که از شکل (۴) مشاهده می‌شود، طول آیریس به طور قابل توجهی روی فاز S_{11} شکاف تاثیر گذاشته در حالی که فاز S_{21} ثابت می‌ماند. همچنین، همانگونه که از شکل (۵) مشاهده می‌شود طول آیریس روی اندازه S_{11} نیز تاثیر می‌گذارد. برای آنتن‌های آرایه‌ای از نوع موج رونده، مناسب‌تر است که از S_{11} خیلی پایین استفاده شود. با توجه به شکل (۵)، در طراحی نهایی جهت رسیدن به S_{11} پایین، طول آیریس ۱۸ میلی‌متر انتخاب شده است. همچنین در شکل (۵-ب) دیده می‌شود که مقدار S_{21} و بطبع آن توان تشعش یافته با تغییر طول آیریس تغییر می‌یابد.



شکل (۴): فاز پارامترهای پراکندگی بر حسب طول آیریس

۳-۳- تاثیر فاصله آیریس تا مرکز شکاف

بررسی دیگر روی فاصله آیریس‌ها (d) از هم دیگر نیز انجام شده است. پارامترهای دیگر شکاف ثابت می‌ماند و ارتفاع آیریس 16mm در نظر گرفته شده تا حداکثر تحریک را داشته باشد. فاصله لبه آیریس تا وسط شکاف از 6mm تا 15mm متغیر می‌باشد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با افزایش این فاصله، تحریک ضعیف می‌شود. علت این پدیده به خاطر این است که جریان سطحی روی دیواره موجبر کمتر می‌شود. در طراحی نهایی فاصله آیریس تا وسط شکاف ۱۳ میلی‌متر انتخاب شده است.

تحریک کننده شکاف، بیشتر شده و شکاف کمتر تحریک می‌شود. در طراحی نهایی عرض شکاف ۶ میلی‌متر انتخاب شده است. کاهش توان تشعشعی با افزایش پهناى شکاف دو تاثیر عمده در طراحی آرایه دارد:

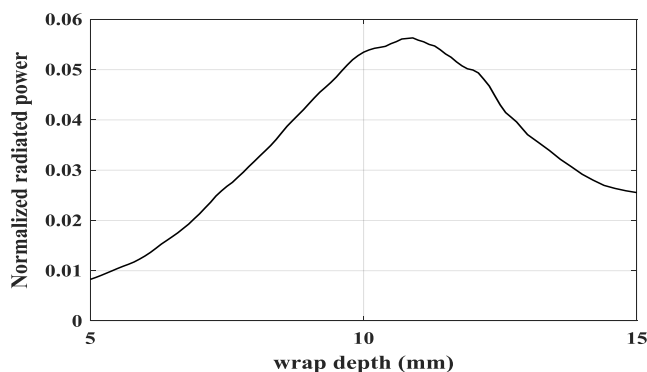
۱. محدود کردن ماکزیمم توانی که می‌تواند از هر شکاف در آرایه تشعشع شود. این یک ایراد ویژه جهت آرایه‌های کوچک است. زیرا در این آرایه‌ها، مطلوب است که، کمترین توان انتقالی، به بار تطبیق یافته برسد و بیشتر توان تشعشع شود. در نتیجه داشتن ماکزیمم توان قابل تشعشع کوچکتر، باعث کاهش بهره آرایه می‌شود و توان بیشتری به بار تطبیق شده می‌رسد.
۲. افزایش عرض شکاف باعث ایجاد یک خطای مکانیکی شبیه آنچه که در مورد افزایش فاصله آیریس‌ها اتفاق می‌افتاد، می‌شود.

۴- تاثیر تزویج متقابل

بدیهی است که بین شکاف‌های مختلف داخل آرایه، تزویج متقابل وجود دارد. دو روش عمده برای مدل‌سازی دقیق یا تقریبی این تزویج متقابل وجود دارند. در روش اول که هر شکاف از سایر شکاف‌های آرایه مجزا می‌شود، سپس امیدانس‌های تزویج متقابل آن به تنهایی محاسبه گردیده و پارامترهای تکی با استفاده از روابط تزویج متقابل مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این روش توسط ایلویوت ارائه شد [۲] و به طور وسیع برای شکاف‌های دیواره پهن موجبری تشعشع کننده در فضای آزاد استفاده می‌گردد. اگر استفاده از این تقریب اولی ممکن نباشد، تخمین تزویج متقابل بین دو شکاف ایجاد شده در دیواره باریک موجبر، برای طراحی آرایه بسیار دشوار و خسته کننده خواهد بود. روش دوم (روش مورد استفاده در این مقاله) مبتنی بر در نظر گرفتن شکاف در داخل آرایه می‌باشد. در این روش، متغیرهای پراکندگی و تشعشعی شکاف حاوی تزویج متقابل، بدست می‌آید. این روش بیشتر جهت طراحی آرایه‌های بزرگ متشکل از شکاف‌های دیواره باریک موجبری استفاده می‌شود که تکنیک هدایت پیشرفته نامیده می‌شود. به هر حال تکنیک هدایت پیشرفته شامل شبیه‌سازی یا ساخت می‌باشد و تعداد زیادی از پارامترهای موجبر با شکاف ایجاد شده در دیواره باریک را اندازه‌گیری می‌کند.

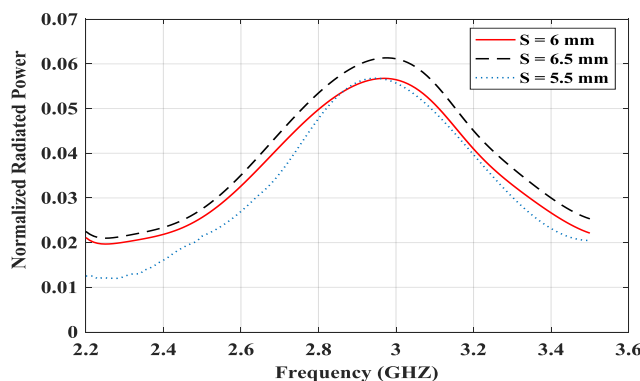
۵- طراحی آرایه

آنتن‌های جهتی که سطح گلبه‌های فرعی آنها پایین باشد، به دلیل کاهش تداخل کاربردهای وسیعی دارند. آنتن‌های آرایه‌ای، بدلیل امکان تنظیم توزیع دامنه عنصرها و انتخاب مناسب وزن‌دهی، برای چنین منظوری مناسبند. برای شکل‌دادن میدان تشعشعی کل، الگوی هر عنصر و ضریب آرایه دخیل است. به منظور طراحی یک آرایه خطی با خصوصیات مورد نظر باید موارد زیر در نظر گرفته شود:



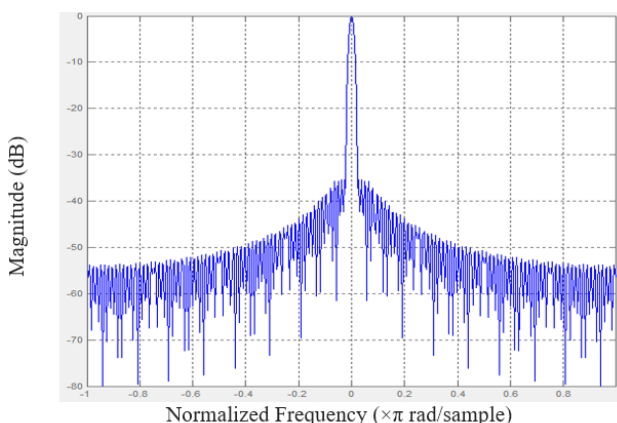
شکل (۷): نمودار توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب عمق شکاف

نیز با تغییر عمق شکاف تغییر می‌کند اما حداکثر دامنه بدست آورده شده بسیار اندک است. بنابراین عمق شکاف متغیری برای کنترل فاز تشعشعی است نه برای کنترل دامنه تشعشعی. در طراحی نهایی عمق شکاف حدود ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. بررسی نهایی روی تاثیر عرض شکاف تشعشعی (S) انجام شده است. مشاهده می‌شود که عرض شکاف، تاثیر عمده‌ای روی پهناى باند شکاف‌ها دارد. بنابراین شبیه‌سازی جهت شکاف‌هایی با عرض متفاوت در باند فرکانسی S، انجام شده است. نمودار توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب فرکانس برای عرض شکاف‌های متفاوت در شکل (۸) رسم شده است.



شکل (۸): نمودار توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب فرکانس برای عرض شکاف متفاوت

همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، توان تشعشعی با فرکانس تغییر می‌کند و در یک فرکانس معین به بیشترین حد خود می‌رسد (که به دیگر متغیرهای شکاف نیز وابسته است) و نیز هر چه عرض شکاف کوچکتر می‌شود، دامنه تغییرات توان تشعشعی نسبت به فرکانس، میل به افزایش دارد. بنابراین اگر در آرایه نهایی پهناى باند مورد استفاده بزرگی نیاز باشد، استفاده از شکاف عریض تر توصیه می‌گردد. با این وجود، تاثیرات تزویج متقابل، بیشتر پهناى باند شکاف‌ها را تحت الشعاع قرار می‌دهد و پهناى باند افزایش یافته، مشاهده شده در شکل (۸)، ناشی از عریض تر شدن شکاف، جهت آرایه نهایی مطلوب نمی‌باشد. تاثیر دیگر افزایش عرض شکاف، کاهش توان تشعشعی از شکاف می‌باشد. هر چه شکاف عریض تر شود، فاصله بین آیریس‌های



شکل (۱۰): نمودار فاکتور آرایه توزیع دامنه تیلور با ۱۳۶ عنصر

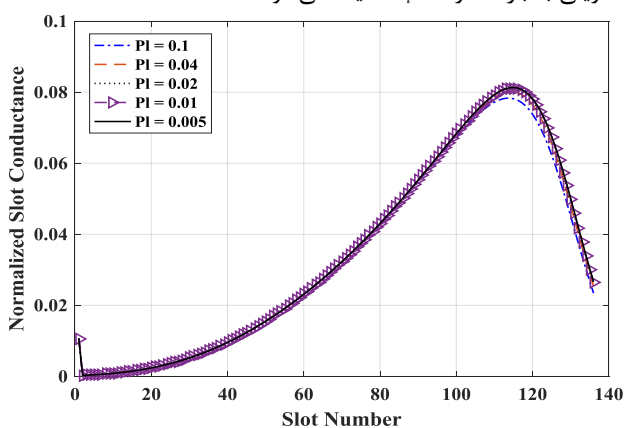
۵-۲- ماکزیمم هدایت مورد نیاز برای هر شکاف

بیشترین مقدار هدایت مجاز و توان داده شده به بار، باید با هم تعیین شوند زیرا این دو شدیداً به هم وابسته هستند. اگر توان تحویلی به بار و توزیع دامنه مورد نیاز را داشته باشیم، آن گاه ادمیتانس مورد نیاز شکاف را با استفاده از رابطه (۲) می‌توان بدست آورد که یکی از روابط طراحی آنتن موجبری شکافدار نوع موج رونده می‌باشد. [۱۴].

$$g_n = \frac{P_n}{P_l + \sum_{k=n+1}^N P_k} \quad (2)$$

در رابطه بالا، g_n هدایت n امین شکاف، P_n توان نرمالیزه تشعشع شده بوسیله n امین شکاف، P_l توان تلف شده در بار تطبیق یافته و N تعداد کل شکافها در یک ردیف می‌باشند.

در شکل (۱۱)، توزیع هدایت بین شکافها برای مقادیر توان تحویلی به بار متفاوت (P_l) دیده می‌شود.



شکل (۱۱): نمودار توزیع هدایت شکافها برای مقادیر توان تحویلی به بار متفاوت (P_l)

همانگونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، هر چه مقدار P_l انتخابی بزرگتر باشد، مقدار حداکثر هدایت به دست آمده کاهش می‌یابد. همچنین از آنجاییکه ادمیتانس شکافها با انحراف از فرکانس مرکزی تمایل به کاهش دارند، انتخاب P_l بزرگ، باعث پایین آمدن

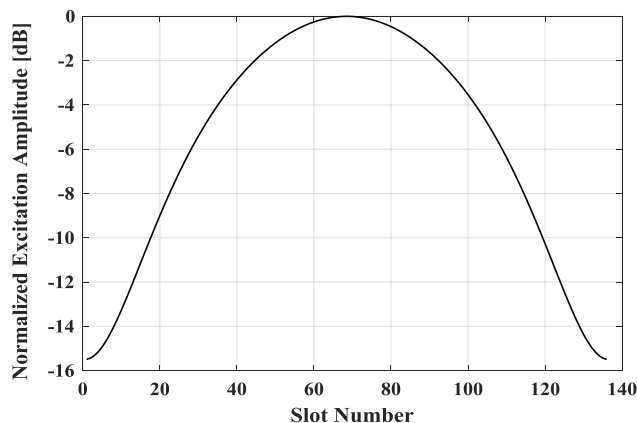
۱- توزیع دامنه مطلوب، ۲- حداکثر هدایت مورد نیاز برای هر شکاف، ۳- توان داده شده به بار تطبیق یافته در فرکانس مرکزی.

۵-۱- توزیع دامنه تحریک

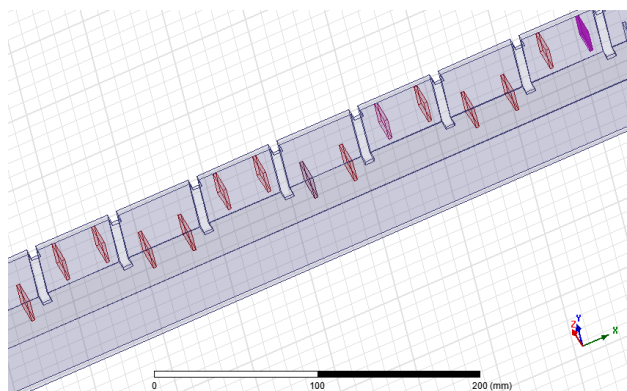
طراحی آرایه دولف-چیپشیف، گلبرگ‌های فرعی با دامنه یکسان را نتیجه می‌دهد [۱۳] در حالی که توزیع تیلور نسبت به چیپشیف پهنای بیم بهتری را نتیجه می‌دهد و دامنه گلبرگهای فرعی الگوی منتجه از آن رفتار بهتری دارند. به عبارت دیگر توزیع تیلور یک الگو تولید می‌کند که گلبرگ‌های فرعی درونی آن در یک تراز ثابت نگه داشته می‌شود و سایر گلبرگ‌های فرعی به طور یکنواخت کاهش می‌یابد. برای برخی کاربردها، مانند رادار و سیستم‌های کم نویز، بهتر است اندکی پهنای پرتو و گلبرگ‌های فرعی درونی پایین را از دست دهیم تا همه گلبرگ‌های فرعی وقتی زاویه در هر طرف پرتو اصلی افزایش می‌یابد، محو شوند. در کاربردهای راداری این موضوع اولویت دارد، چون سیگنالهای مزاحم یا غیر واقعی زمانی که تلاش می‌کنند از طریق گلبرگ‌های فرعی در حال زوال وارد شوند، کاهش می‌یابند. بنابراین هر مشارکت قابل توجه سیگنال‌های مزاحم، از طریق الگو و در مجاورت گلبرگ اصلی می‌باشد و تشخیص این که آن قبیل سیگنال‌ها، هدف-های نادرست هستند، امکان دارد.

یکی از مقاصد هر روش، استفاده از آن در یک طراحی است. برای روش تیلور مانند سایر روش‌های دیگر آرایه غیر یکنواخت، یکی از نیازمندیها، ضرایب تحریک دامنه برای یک تعداد عنصر معلوم است. این کار با کد نویسی در نرم افزار متلب با دستور $w = \text{Taylorwin}(136, 4, -35)$ انجام گردیده است. سایر پارامترهای ارزیابی عملکرد آرایه، پهنای پرتو نیم توان و تراز گلبرگ کناری است. طراحی تیلور الگویی را نتیجه می‌دهد که یک مصالحه بین پهنای پرتو و تراز گلبرگ کناری است. به دلیل اینکه در طراحی آرایه رسیدن به سطح گلبرگ کناری (SLL) پایین مدنظر می‌باشد، از توزیع تیلور استفاده شده است.

توزیع دامنه تحریک مطلوب، برای ۱۳۶ عنصر با سطح گلبرگ کناری -۳۵ دسی بل در شکل (۹) نشان داده شده است. ضریب آرایه این توزیع نیز در شکل (۱۰) رسم شده است.

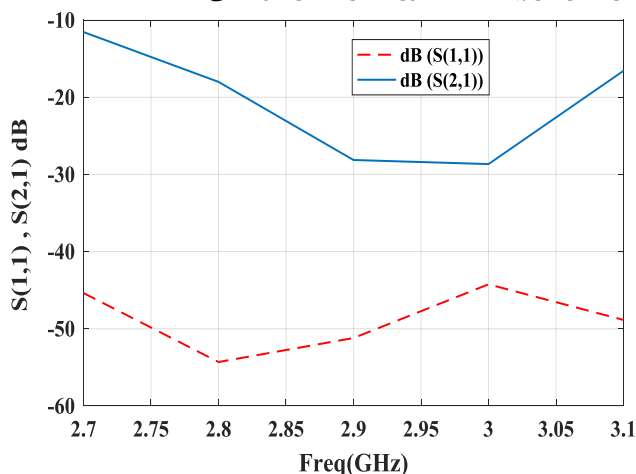


شکل (۹): نمودار توزیع دامنه تیلور با ۱۳۶ عنصر و $sll = -35\text{dB}$



شکل (۱۳): قسمتی از آنتن آرایه‌ای خطی شکافدار موجبری

در شکل (۱۴)، پارامترهای پراکندگی آنتن طراحی شده در فرکانس مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده $(S_{11} < -40 \text{ dB}, S_{21} < -10 \text{ dB})$ این شکل بیانگر این است که راندمان آنتن در پهنای باند مورد نظر بسیار خوب می‌باشد.



شکل (۱۴): پارامترهای پراکندگی آنتن طراحی شده

بعد از طراحی و شبیه‌سازی آرایه خطی نهایی، اگر دامنه مطلوب بدست نیامد، میزان خطای تحریک برای هر شکاف محاسبه می‌شود و تغییر و اصلاحات کوچکی روی شکاف‌ها، جهت جبران خطاهای محاسبه شده انجام می‌گیرد. به عنوان مثال، اگر دامنه‌ای بیشتر از مقدار مورد نظر باشد، ارتفاع آیریس مربوط به آن شکاف را کاهش داده و سپس شبیه‌سازی جهت آرایه جدید تکرار شده است. اگر الگوی تشعشعی مطلوب هنوز بدست نیامده باشد، مراحل قبل تکرار می‌شود. الگوی تشعشعی مطلوب عموماً بعد از پنج تا شش بار تکرار، حاصل می‌شود.

در جدول (۱) مقادیر تمامی پارامترهای آنتن شبیه‌سازی شده آورده شده است.

بهره آرایه می‌شود. بنابراین برای اینکه بهره آرایه در باند فرکانسی مورد نظر ۰/۹ باشد، مقدار P_1 ، ۰/۰۱ انتخاب شده است.

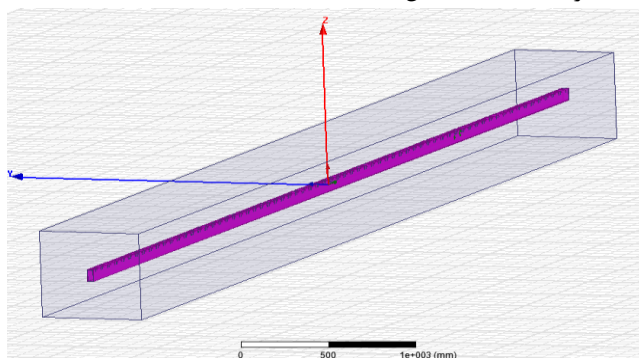
با معلوم بودن مقدار هدایت مورد نیاز هر شکاف، ارتفاع مد نظر برای آیریس آن شکاف، جهت تشدید در فرکانس مرکزی انتخاب می‌شود. از آنجائیکه توان موجود در موجبر در شکاف دوم نسبت به شکاف اول کمتر است، پس برای رسیدن به میزان تزویج مطلوب، ارتفاع آیریس باید بیشتر شود. به همین دلیل دیگر حداکثر ارتفاع آیریس در وسط موجبر نخواهد بود. سایر پارامترهای شکاف، مطابق قبل می‌باشد و همانطور که توضیح داده شد، جهت بالا بردن پهنای باند آرایه انتخاب می‌شوند.

۳-۵- ریدوم

یکی از مواردی که در رادارها باید در نظر گرفته شود طراحی ریدوم می‌باشد تا موجبر را از باران، خاک و غیره محافظت کند، برای این کار از یک پوشش عایق از جنس PTFE که در بازار به راحتی قابل دسترس می‌باشد و ارزان است استفاده شده است. در واقع با بکارگیری PTFE، مقدار تو رفتگی شکاف در دیواره باریک نیز کاهش یافته است. که این امر باعث کاهش هر چه بیشتر پلاریزاسیون متقاطع شده است. در واقع با این روش، علاوه بر استفاده از ریدوم، پلاریزاسیون متقاطع کمتری نیز حاصل شده است.

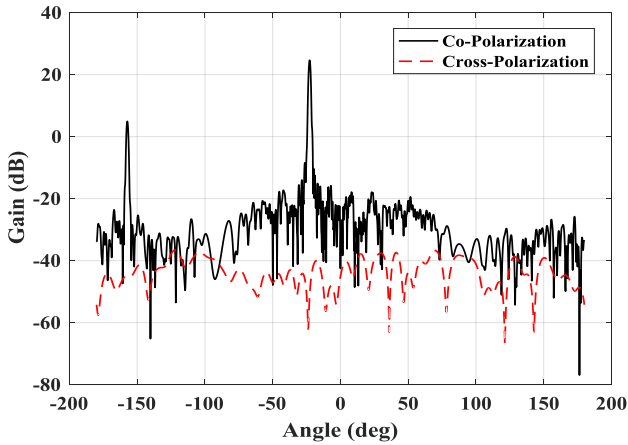
۶- نتایج شبیه‌سازی

بعد از محاسبه و به دست آوردن پارامترهای هر شکاف، آنتن آرایه خطی با مشخصات مورد نظر با استفاده از نرم افزار HFSS در یک سرور با پردازشگر Xeon دو هسته‌ای و حافظه داخلی ۶۴ گیگا بایت شبیه‌سازی شده است. شکل (۱۲).



شکل (۱۲): آنتن آرایه‌ای خطی شکافدار موجبری طراحی شده با ۱۳۶ عنصر

در شکل (۱۳) قسمتی از آنتن شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.



شکل (۱۷): الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۳/۱

گیگاهرتز

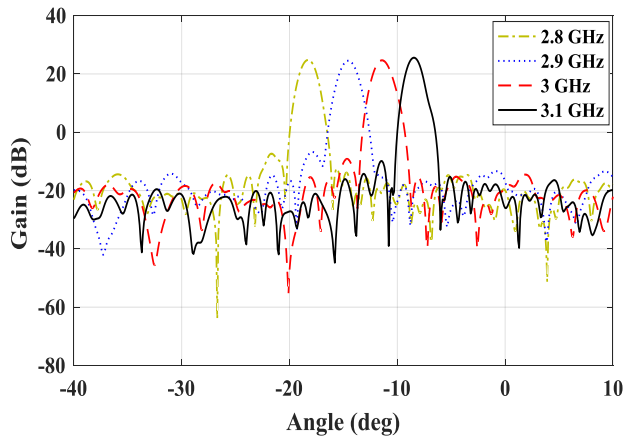
در شکل (۱۷)، الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۳/۱ گیگاهرتز نشان داده شده است.

مشخصات الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس ۲/۷ تا ۳/۱ گیگاهرتز در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مشخصات الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس ۲/۷ تا ۳/۱ گیگاهرتز

Freq (GHz)	Gain (dB)	HPBW (deg.)	SLL (dB)	Cross Polarization (dB)
۲/۷	۲۴/۶	۱/۲	-۳۴	-۶۰
۲/۹	۲۴/۲	۱/۲	-۳۰/۷	-۶۱
۳/۱	۲۵/۶	۱/۲	-۳۳/۲	-۵۹/۴

در شکل (۱۸) الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانسهای ۲/۸ تا ۳/۱ گیگاهرتز نشان داده شده است.



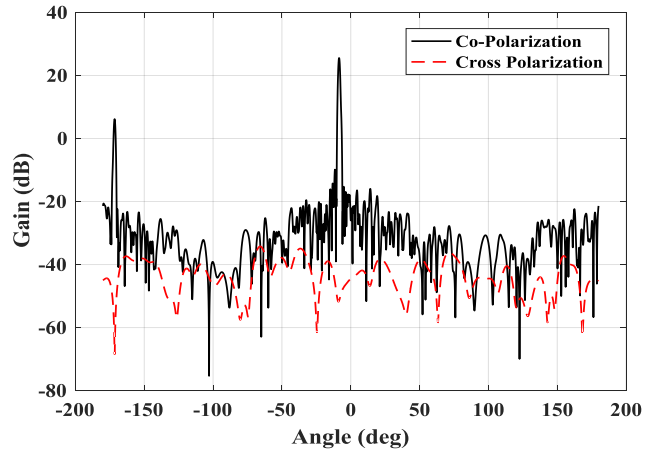
شکل (۱۸): الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانسهای مختلف

جدول (۱): مقادیر پارامترهای ابعادی آنتن شبیه‌سازی شده

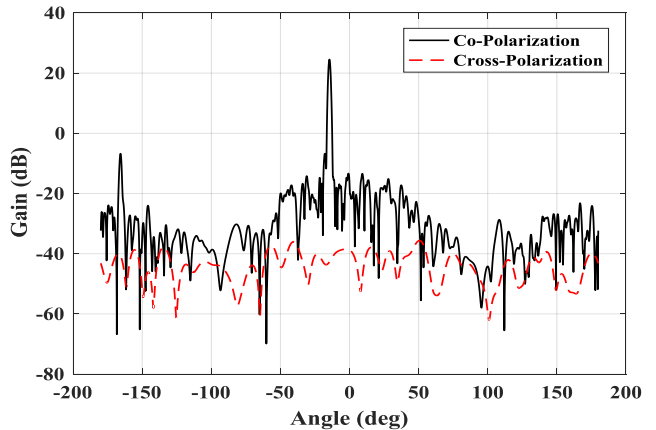
اندازه (میلی متر)	پارامتر
۶ میلی متر	عرض شکاف
۱۰ میلی متر	تورفتگی (عمق) شکاف
۱۸ میلی متر	طول آیریس
۱۳ میلی متر	فاصله آیریس تا مرکز شکاف
۷۲*۳۴ (میلی متر)	ابعاد دهانه موجبر
۷۵۰۰ میلی متر	طول آنتن

شکل‌های زیر، الگوی تشعشعی آنتن را در فرکانس‌های ۲/۷ تا ۳/۱ گیگاهرتز، نشان می‌دهد.

در شکل (۱۵)، الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۲/۷ گیگاهرتز نشان داده شده است.



شکل (۱۵): الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۲/۷ گیگاهرتز



شکل (۱۶): الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۲/۹ گیگاهرتز

در شکل (۱۶)، الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۲/۹ گیگاهرتز نشان داده شده است.

۷- نتایج ساخت

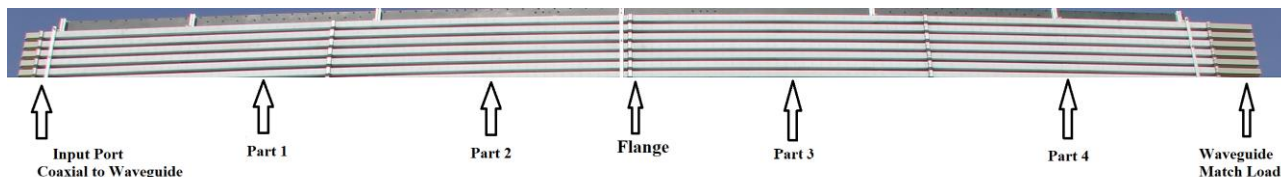
در شکل (۱۹) تصویر داخلی موجبر ساخته شده، شکاف ایجاد شده روی دیواره باریک موجبر و نحوه اتصال آیریس‌ها به بدنه موجبر توسط پیچ نشان داده شده است. جنس موجبر و آیریس‌ها از فلز آلومینیوم بوده و محل آیریس مطابق شکل دقیقاً منطبق بر دیواره بالا و پایین موجبر می‌باشد. در هنگام ساخت آیریس توسط دو پیچ به دیواره‌ها متصل می‌شود. ابعاد دهانه موجبر ۳۴×۷۲ میلی‌متر و طول نهایی آنتن ساخته شده، ۷۵۰۰ میلی‌متر ($۷/۵$ متر) می‌باشد.

آنتن طراحی شده در قسمت قبلی که دارای ۱۳۶ شکاف تشعشعی می‌باشد، در یک ردیف ۴ قسمتی که توسط فلنج FDP14 به هم متصل شده‌اند، مطابق شکل (۲۰) ساخته شده و مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. برای دهانه ورودی از یک میدل کواکسیال به موجبر و در انتهای هر ردیف از یک بار تطبیق موجبری استفاده شده است.

نتایج تست VSWR و الگوی تشعشعی به ترتیب در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) ارائه شده است. قابل ذکر است که با توجه به ابعاد بزرگ آنتن از روش اندازه‌گیری فضای آزاد و تجهیزات اندازه‌گیری الگوی تشعشعی (RASS-S Tools , Radar Field Analyser) ساخته شده توسط شرکت Intersoft Electronics کشور بلژیک استفاده شده است.



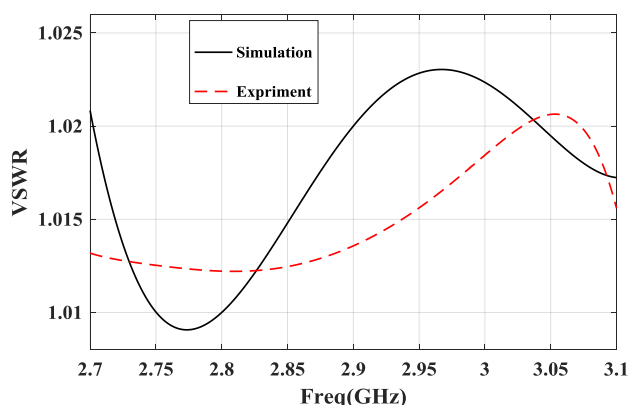
شکل (۱۹): تصویر داخلی موجبر، شکاف و آیریس



لایه‌های آنتن ساخته شده در ۴ قسمت که توسط فلنج به هم وصل شده اند

شکل (۲۰): نمایی از آنتن ساخته شده

VSWR شبیه سازی و اندازه‌گیری شده برای آنتن در شکل (۲۱) نشان داده شده است. نمودار نقطه چین، VSWR اندازه‌گیری شده و نمودار خط ممتد، VSWR آنتن شبیه‌سازی شده به کمک نرم افزار HFSS می‌باشد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است آنتن پیشنهادی در باند فرکانسی دارای VSWR کمتر از $۱/۵$ می‌باشد. مقایسه نمودارهای شکل (۲۱) نشان می‌دهد که VSWR اندازه‌گیری شده مشابه شبیه‌سازی بوده و نتایج تطبیق بسیار خوبی دارند.

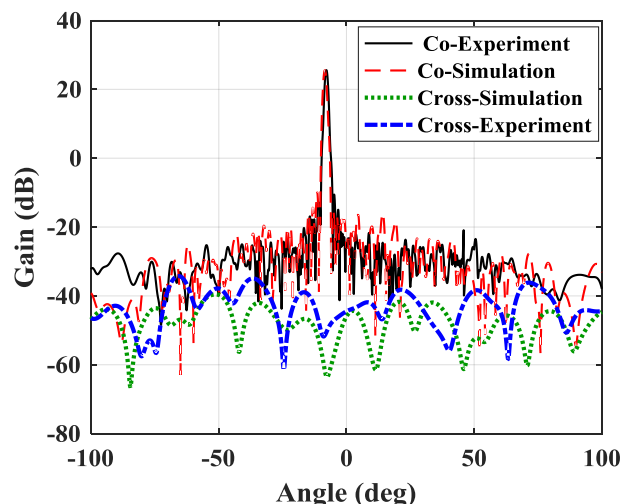


شکل (۲۱): VSWR شبیه سازی و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی

و سطح گلبرگ کناری کمتر از ۳۰ دسی بل، با استفاده از توزیع تیلور، تحقق یافته است.

مراجع

- [1] A. F. Stevenson, "Theory of slots in rectangular waveguides," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, pp. 24-38, 1948.
- [2] S. R. Rengarajan, L. G. Josefsson, and R. S. Elliott, "waveguide-fed slot antennas and arrays: A review," *Electromagnetics*, vol. 19, No. 1, pp. 3-22, 1999.
- [۳] سید علی کیوان، همایون عریضی، " آنتن آرایه شکافی ۶۴ المانی با حفره پشتی و تکنولوژی ساخت SIW و با استفاده از تحریک موده‌های مرتبه بالاتر"، *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، شماره ۳، دوره ۱۸، (۴-۱۴۰۰) صفحات ۴۲-۳۷.
- [۴] یعقوب قانع قره باغ، مجید اخوت، " چرخش پرتو آنتن فلزی دندانه‌ای موج نشستی در فرکانس ثابت با استفاده از تغییر امپدانس سطحی"، *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، شماره ۴، دوره ۱۶، (۹-۱۳۹۸).
- [5] K. Forooghi, P.S. Kildal, "Reduction of Second-Order Beams in Slotted Waveguide Arrays Using Baffles," *IEEE 7th International Conference on Antennas Propagation*, pp. 725, Apr 1991.
- [6] M. H. Moradi, H. Abiri, and R. Basiri. "Accurate design of slot array with low side lobes and low cross polarization." In 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1746-1750. IEEE, 2016.
- [7] Lubis, Moh Amanta KS, Derry Permana Yusuf, Catur Apriono, and Eko Tjipto Rahardjo. "The effect of flange connectors on the radiation performance of narrow wall slotted waveguide antenna at X-band frequency." In 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-2. IEEE, 2017.
- [8] Lubis, Moh Amanta KS, Derry P. Yusuf, Fitri Y. Zulkifli, and Eko T. Rahardjo. "Bandwidth improvement with narrow wall slotted waveguide antenna." In 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), pp. 93-95. IEEE, 2017.
- [9] Rao, Yuru, Hongtao Zhang, and Guilin Sun. "Shared Aperture Dual-band Waveguide Slot antenna." In 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, pp. 693-694. IEEE, 2020.
- [10] Ma, Li, Muiyang Li, Peng Chen, Hui Zhang, and Xutao Yu. "Design of Low Sidelobe Waveguide Slot Antenna Arrays." In 2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimeter-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), pp. 1-3. IEEE, 2020.
- [11] S. Hashemi-Yeganeh and R. S. Elliot, "Analysis of untilted edge slots excited by tilted wires," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-38, pp. 1737-1745, Nov.1990.
- [12] A. A. Heidari, K. Forooghi, and M. Hakkak, "Reducing resonant length of sidewall-inclined slots in a rectangular waveguide," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 37, pp. 222-226, May 5, 2003.
- [13] Wang, Nannan, and Huohong Chen. "Design of a Ka-band Low Sidelobe Slotted Waveguide Array." In 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), pp. 1-3. IEEE, 2021. R.A. Gilbert (chapter author), John L. Volakis (editor), *Antenna Engineering Handbook*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2007.



شکل (۲۲): مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ساخت در فرکانس ۳ گیگاهرتز

نتایج شبیه‌سازی و تست آنتن در فرکانس ۳ گیگاهرتز در شکل (۲۲) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نمودار نقطه چین، الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده و نمودار خط ممتد، الگوی تشعشعی آنتن شبیه‌سازی شده به کمک نرم افزار HFSS می‌باشد. مقایسه نمودارهای شکل (۲۲) نشان می‌دهد که الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده مشابه الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده است و نتایج تطبیق بسیار خوبی دارند.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی، ساخت و تست نوع خاصی از آنتن‌های آرایه موجبری شکافدار برای کاربردهای مراقبتی ارائه شده است. با توجه به مزایای زیاد و قابل توجهی که آنتن‌های آرایه‌ای شکافی موجبری دارند از این آنتن‌ها به طور وسیع و گسترده‌ای در رادار، سیستم‌های مخابراتی و نظامی استفاده می‌شود. استفاده از آنتن‌های شکافدار در دیواره پهن، باعث افزایش ارتفاع آنتن در آنتن‌های صفحه‌ای می‌شود. لذا در سیستم‌های جدید راداری از شکاف‌های مورب در دیواره باریک استفاده می‌شود تا بتوان مساحت آنتن را کاهش داد. ولی در این نوع آنتن‌ها، با توجه به کج بودن شکاف، پلاریزاسیون ناخواسته به مقدار قابل توجهی زیاد می‌شود. لذا در این مقاله یک آنتن آرایه موجبری با شکاف عمودی غیرمورب در دیواره باریک، تحریک شده توسط عناصر داخل موجبر ارائه شده است. این روش علاوه بر بهبود مشخصات امپدانس و تشعشعی نسبت به روش‌های قبلی، دارای پروسه ساخت راحت‌تری نیز می‌باشد. در این مقاله بر اساس روش جدید آرایه شده، یک آنتن آرایه خطی با ۱۳۶ عنصر براساس توزیع تیلور طراحی، شبیه‌سازی و ساخته گردیده است. خوشبختانه نتایج تست آنتن با نتایج شبیه‌سازی بدست آمده، تطبیق بسیار خوبی داشته است. آنتن طراحی شده دارای ۱۳۶ شکاف عمودی غیر مورب در دیواره باریک موجبر مستطیلی در باند S، با گین ۲۴ dB، پهنای بیم برابر ۱/۲ درجه