

## آنتن پچ بهره بالا، پهن باند با پلاریزاسیون دایروی برای کاربردهای رادارهای دریایی

حبیب قربانی نژاد

ghorbaninejad@guilan.ac.ir

استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه گیلان

### چکیده

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی آنتن پچی با ساختار فشرده همراه با بهره بسیار بالا، پهنای باند مناسب و همچنین قابلیت پلاریزاسیون دایروی مبادرت شده است. آنتن پیشنهادی به علت دارا بودن پلاریزاسیون دایروی با بهره بالا برای کاربردهای رادارهای دریایی (۵۵۷۰ تا ۵۶۵۰ مگاهرتز) که در آن‌ها تداخلات چند مسیره و انعکاس امواج از سطوح دریا مشکل‌زا است مناسب است. همچنین این آنتن به طور همزمان قابلیت استفاده در کاربردهای راداری هواشناسی (۵۳۵۰ تا ۵۴۵۰ مگاهرتز)، کاربردهای نظامی و رادیوسنجی تشخیص نقاط (۵۴۷۰ تا ۵۵۷۰ مگاهرتز) را داراست. در اینجا برای افزایش بهره آنتن از قضیه فبری پرو مبتنی بر استفاده از یک رولایه به ابعاد یک طول موج در بالای ساختار آنتن و به فاصله نصف طول موج از صفحه زمین در زیر ساختار آنتن استفاده شده است. ضمن اینکه برای افزایش هرچه بیشتر بهره، پهنای باند و نسبت محوری آنتن از دیواره‌های فلزی در اطراف ساختار استفاده شده که با حفظ کوچک بودن ساختار مقدار بهره را به صورت قابل توجهی بهبود داده است. نتایج حاصل از آنتن شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که حداکثر بهره آنتن پیشنهادی و پهنای باند ۱ dB بهره به ترتیب برابر با ۱۵ dB و ۱۸٫۷٪ است. همچنین پهنای باند امیدانسی و نسبت محوری به ترتیب برابر ۱۸٫۷٪ و ۱۱٪ (در حالت تنها استفاده از رولایه) است. ضمن اینکه الگوهای چپ‌گرد و راست‌گرد آنتن نشانگر راست‌گرد بودن آنتن در جهت برودساید و همچنین بیشترین گلبرگ کناری ۱۰ dB است.

واژگان کلیدی: آنتن پچ، رادار دریایی، بهره بالا، قضیه فبری پرو.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۱/۰۴

## ۱- مقدمه

رادارهای دریایی سنسورهای ذاتی‌ای هستند که برای آشکارسازی و اعلان خطرات و موانع از قبیل خط ساحلی، کشتی‌های مجاور، توده‌های یخ به کمک دریاوردان جهت اتخاذ تصمیم آنی می‌آیند. اخیراً چندین باند فرکانسی برای کاربردهای راداری دریایی معرفی شده است که شامل باندهای S، X و Ku است. آنتن به عنوان عنصر اصلی از هر سیستم ارتباطی در زمینه رادارهای دریایی نیز عنصر مهمی بوده و بر عملکرد کلی این نوع سیستم‌ها تأثیر بسزایی دارد. آنتن مورد استفاده در سیستم‌های دریایی باید از ویژگی‌هایی همچون بهره بالا، ساختار فشرده و انعطاف‌پذیری مناسب برخوردار باشد [۱]. همچنین این آنتن‌ها از دید تابشی باید دارای مشخصه‌هایی همچون سطح گلبگ کناری مناسب، نسبت جلو به پشت خوب و پلاریزاسیون و پهنای پرتو اصلی ایده‌آل باشند [۲-۳].

علاوه بر تابش مستقیم به اهداف، امواج الکترومغناطیسی فرستاده شده بوسیله آنتن راداری دریایی به صورت غیر مستقیم نیز به اهداف از طریق انعکاس از سطوح دریا تابش خواهند داشت [۴]. از اینرو از دید اهداف، امواج الکترومغناطیسی انعکاسی از سطوح دریا باعث احساس وجود یک آنتن به صورت آینه‌وار در زیر سطح دریا می‌شود. به طور مشابه امواج الکترومغناطیسی انعکاسی از اهداف همچنین بازتاب‌هایی از طریق انعکاس غیر مستقیم از سطح دریا متفاوت از بازتاب‌های مستقیم به آنتن خواهد داشت.

در اینجا نیز با در نظر گرفتن بازتاب‌های سطح دریا یک هدف آینه‌وار در زیر سطح دریا از دید آنتن وجود خواهد داشت. بازتاب‌های از مسیرهای مختلف در عنصرهای دریافتی رادار جمع شده و در نهایت بازتاب کلی بوسیله رادار را سبب خواهند شد. انرژی بازتابی کلی بوسیله اختلاف‌های دامنه و فازی بین چندین نوع از بازتاب‌های راداری از مسیرهای مختلف حاصل خواهد شد. شرایطی از جمله ارتفاع عمودی آنتن‌ها و ارتفاع هدف، نسبت فاز بین بازتاب‌های مسیرهای مختلف را تغییر داده که در نهایت بر روی دامنه سیگنال کلی تأثیر خواهد گذاشت [۵].

وقتی دامنه سیگنال بازتاب کلی کوچک یا نزدیک صفر باشد هدف در رادار قابل مشاهده نخواهد بود که این مهم منطقه کور آشکارسازی ایجاد شده بوسیله تأثیر چند مسیره را سبب

خواهد شد. همانگونه که پوشش منطقه کور به ارتفاع عمودی آنتن رادار بستگی دارد وقتی چندین رادار دریایی در داخل کشتی نصب شود، منطقه کور رادارهای مختلف می‌تواند بوسیله افزایش معقولانه ارتفاع‌های عمودی آنتن‌های راداری مختلف مکمل شود. بنابراین در این روش ناحیه کور بهبود یافته و عملکرد کلی سیستم راداری دریایی تکمیل خواهد شد [۶].

زمانی که به یک آنتن با حجم کم و وزن سبک نیاز داشته باشیم اندازه به عنوان عامل چالش‌برانگیز مطرح خواهد بود. در گذشته، تحقیقاتی برای کاهش اندازه آنتن با استفاده از مواد دی‌الکتریکی صورت گرفته است، با وجود این، مواد دی‌الکتریکی اغلب دارای تلف بالا بوده و باعث کاهش بهره آنتن خواهند شد. آنتن‌های تشدید کننده فبری پرو<sup>۱</sup> با ویژگی‌های مناسب از قبیل بهره بالا، حجم کم و تغذیه ساده برای سال‌های متمادی مورد توجه بوده‌اند، این آنتن‌ها از یک تابش-کننده اولیه که بین یک صفحه زمین فلزی و یک صفحه قسمتی انعکاسی واقع است؛ تشکیل می‌شوند. وقتی فاصله بین این دو صفحه مضرب فردی از نصف طول موج فضای آزاد باشد، انرژی آزاد شده از آنتن تغذیه، بین صفحه زمین و رولایه چندین بار انعکاس یافته و سپس بهره آنتن با استفاده از مفهوم هم‌فازی می‌تواند به صورت قابل توجه افزایش یابد. اخیراً نشان داده شده که استفاده از سطوح انتخاب‌گر فرکانس و صفحات دی‌الکتریکی به عنوان رولایه در آنتن‌های فبری پرو به صورت قابل توجهی بهره و جهت‌دهی آنتن اولیه را افزایش می‌دهد. این ویژگی‌ها باعث قابلیت استفاده این آنتن‌ها در کاربردهای میکروویوی و موج میلی‌متری بهره بالا می‌شود.

بر اساس ویژگی‌های پلاریزاسیون دایروی، آنتن‌های پلاریزه شده دایروی عنصری بسیار مفید برای کاربردهای متعددی از جمله ارتباطات دریایی، ماهواره‌ای، سنسورهای بی‌سیم هستند. بواسطه مشخصه‌های پلاریزاسیون دایروی، این نوع آنتن‌ها نسبت به آنتن‌های با پلاریزاسیون خطی دارای چندین مزیت می‌باشند که این مزایا عبارتند از اینکه آنتن-های پلاریزه شده دایروی در مقابله با تداخلات چند مسیره که چالش اصلی در حوزه ارتباطات دریایی است، بسیار موثر عمل می‌کنند ضمن اینکه این آنتن‌ها اثرات چرخش فارادی را به شدت کاهش می‌دهند. همچنین به عنوان مزیت دیگر

<sup>۱</sup> Fabry Perot

استفاده نشده است در حالی که در کارهای صورت گرفته در حوزه آنتن‌های فبری پرو از مواد دی‌الکتریک به عنوان رو لایه استفاده می‌شود [۹] و از آنجا که فلز نسبت به این مواد دی‌الکتریک از لحاظ هزینه ارزان‌تر و دسترسی‌اش بسیار ساده‌تر است از این رو آنتن پیشنهادی هزینه ساخت بسیار پایین‌تری خواهد داشت. ضمن اینکه برای دستیابی به چنین بهره‌ای در سایر انواع آنتن‌های فبری پرویی از رولایه‌های پیچیده همچون ساختارهای سطوح انتخاب‌گر فرکانس<sup>۱</sup> و یا فراماده‌ها<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند که بالطبع باعث افزایش پیچیدگی ساختار سیستم ارتباطی خواهد شد.

به عنوان نمونه در [۱۰] از ساختاری سطوح انتخاب‌گر فرکانسی پیچیده برای دستیابی به بهره‌ای در حدود ۱۳ دسی‌بل استفاده شده است این در حالی است که ساختار پیشنهادی با ساختاری به مراتب ساده‌تر بهره ۱۵ دسی‌بلی ارائه می‌دهد. در [۱۱] نیز از دو لایه سطوح انتخاب‌گر فرکانس برای بهبود بهره آنتن پچ پلاریزه شده دایروی استفاده شده است این در حالی است که با این دو لایه بهره ساختار نهایی در حدود ۱۴ دسی‌بل است که در مقایسه با ساختار پیشنهادی ۱ دسی‌بل کمتر است.

## ۲- طراحی

در شکل (۱) ساختار آنتن پچ محافظه‌ای فبری پرویی پیشنهادی به همراه ابعادش نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود آنتن پیشنهادی از یک آنتن پچ معمولی با ابعاد گسترش یافته، صفحه فلزی به عنوان رولایه در بالای ساختار پچ و دیواره‌های فلزی در ۴ طرف پچ گسترش یافته تشکیل شده است. در این ساختار ابعاد رولایه و صفحه زمین به ترتیب  $۵۹ \times ۵۹$  میلی‌متر مربع و  $۱۲۰ \times ۱۲۰$  میلی‌متر مربع بوده و رولایه به صورت متقارن در بالای ساختار آنتن قرار گرفته به گونه‌ای که فاصله صفحه فلزی به عنوان رولایه تا صفحه زمین مطابق با تئوری قضیه فبری پرو باید نصف طول فرکانس کاری باشد که در عمل با در نظر گرفتن شرایط واقعی برای این ساختار، این فاصله در حدود مقدار تئوری و برابر با ۳۱ میلی‌متر است.

برای ایجاد پلاریزاسیون دایروی در آنتن‌های پچ تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که اکثراً پیچیده بوده و یا از تغذیه‌های دو گانه استفاده می‌کنند.

هنگام استفاده از آنتن‌های پلاریزه دایروی جهت گیری خیلی شدیدی بین فرستنده و گیرنده سیستم ارتباطی نیاز نیست. آنتن‌های پچ نیز دارای مزایایی همچون ساختار فشرده و ساده‌ای بوده و از انعطاف پذیری بالایی برخوردارند. امروزه تکنولوژی آنتن پچ بر روی فشرده‌گی و کوچک بودن ساختار همراه با بهره و پهنای باند بیشتر متمرکز شده است. هر آنتن پچ مایکرواستریپی دارای یک پچ تابشی، زیرلایه دی‌الکتریک و یک صفحه زمین است. بهره و پهنای باند پایین از جمله معایب آنتن پچ است که در گذشته برای حل این مشکل معمولاً از آرایه‌ای از پچ‌ها در کنار هم استفاده می‌شد اما استفاده از آرایه، حجم و اندازه ساختار آنتن را شدیداً بزرگ می‌کند.

در این مقاله به طراحی آنتن پچی با بهره و پهنای باند بالا و با پلاریزاسیون دایروی برای کاربردهای رادارهای دریایی باند ۵۵۷۰ تا ۵۶۵۰ مگاهرتز مبادرت کرده‌ایم. آنتن پیشنهادی جز آنتن‌های محافظه‌ای تشدید فبری پرویی بوده بدین صورت که از یک لایه فلزی ساده به عنوان رولایه ساختار فبری پرو برای افزایش بهره، پهنای باند و نسبت محوری استفاده شده است. ضمن اینکه برای بهبود هر چه بیشتر بهره و نسبت محوری، دیواره‌های فلزی در اطراف ساختار آنتن به کار گرفته شده است. این آنتن دارای بیشترین بهره ۱۵ دسی‌بل و پهنای باند  $۱۸,۷$  درصد بوده و در بازه فرکانسی  $۵,۲$  تا  $۵,۸$  گیگاهرتز از پلاریزاسیون دایروی برخوردار است. از مزایای این آنتن در مقایسه با سایر آنتن‌های مشابه برای کاربردهای راداری می‌توان به سادگی و پیچیده نبودن ساختار آنتن و عدم استفاده از آرایه پچ اشاره داشت. به عنوان نمونه در [۷] از آرایه‌ای از آنتن‌های پچ برای بهبود بهره آنتن استفاده شده است به طوری که با ساختاری آرایه‌ای و پیچیده بهره‌ای در حدود ۱۵ دسی‌بل حاصل شده است، در حالی که در اینجا با استفاده از تنها یک عنصر پچ چنین بهره‌ای به دست آمده است.

در مقایسه با [۸] نیز که آنتن پچ پلاریزه شده دایروی جهت استفاده به عنوان عنصری از سیستم ارتباطی برای کاربردهای راداری طراحی شده است؛ آنتن پیشنهادی دارای ۸ دسی‌بل بهبود بهره است. همچنین در مقایسه با سایر انواع آنتن‌های فبری پرو می‌توان به این نکته اشاره داشت که در آنتن مورد طراحی از هیچ‌گونه مواد دی‌الکتریک به عنوان رو لایه

<sup>2</sup> Electromagnetic Band Gap

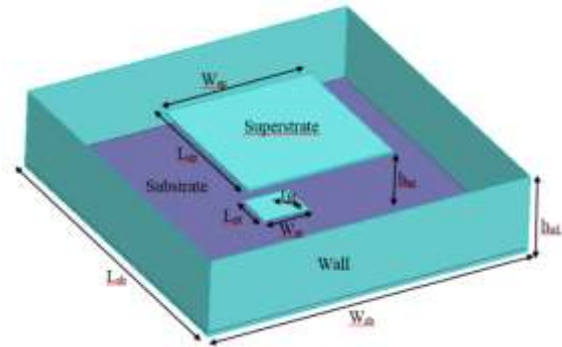
<sup>1</sup> Frequency Selective Surface

دیواره‌های فلزی احاطه‌کننده، افزایش بیشتر بهره حاصل از قضیه فبری پرو است. در ادامه و در بخش‌های دیگر به تاثیرات این دیواره‌ها خواهیم پرداخت. بر اساس قضیه فبری پرو ارتفاع رولایه از سطح زمین در این نوع آنتن‌ها از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۳]:

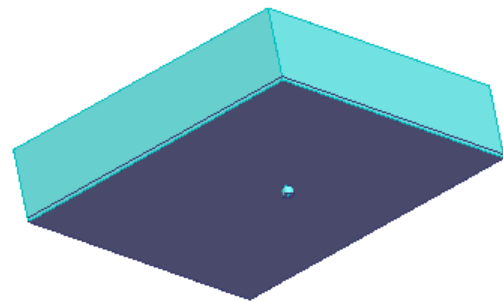
$$h_{sp} = \frac{nc}{2f_0} \quad (1)$$

در این رابطه  $\lambda_0$  طول موج فضای آزاد،  $f_0$  فرکانس تشدید،  $c$  سرعت نور در فضای آزاد و  $n$  عدد صحیح است. از اینرو با در نظر گرفتن اینکه هدف طراحی آنتن در فرکانس حوالی  $5/6$  گیگاهرتز است بنابراین با در نظر گرفتن فرکانس  $5/6$  گیگاهرتز به عنوان فرکانس تشدید به محاسبه ارتفاع محفظه تشدید فبری پرو می‌پردازیم. با در نظر گرفتن  $n=1$  و  $f_0=5.6$  GHz خواهیم داشت  $h_{sp}=26.7$  mm که مقدار ایده‌آل ارتفاع رولایه حاصل از تئوری است. اما از آنجا که در عمل صفحه زمین دارای ابعاد بی‌نهایت نیست؛ این مقدار تئوری در حالت واقعی تغییر خواهد داشت. حال برای آنکه اهمیت استفاده از قضیه فبری پرو و البته دیواره‌های فلزی احاطه‌کننده را نشان دهیم به بررسی بهره، پهنای باند و البته نسبت محوری در سه حالت بدون استفاده از رولایه و دیواره‌ها، استفاده از رولایه فقط، و استفاده همزمان از رولایه و دیواره با هم می‌پردازیم:

همانگونه که در شکل (۲) (الف) دیده می‌شود به ازای استفاده از رولایه پهنای باند نسبت به حالت مرسوم (بدون استفاده از رولایه) افزایش چشمگیری دارد و پهنای باند از ۵ درصد به ۱۸/۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در حالت استفاده همزمان از رولایه و دیواره‌های فلزی نیز شاهد ۱۸/۷ درصد پهنای باند خواهیم بود که ۰/۵ درصد نسبت به استفاده تکی از رولایه دارای بهبود می‌باشیم. از نقطه نظر تاثیرات بر روی بهره آنتن نیز طبق شکل در حالت استفاده همزمان از رولایه و دیواره‌های کناری شاهد بیشترین بهره در حدود ۱۵ دسی‌بل هستیم در حالی که در حالت مرسوم یعنی بدون استفاده از رولایه و دیواره کناری بیشترین بهره در حدود ۷ دسی‌بل است. ضمن اینکه در حالت استفاده تنها از رولایه نیز بیشترین بهره ۱۱ دسی‌بل است.



(الف)



(ب)

شکل (۱) ساختار آنتن پچ بهره بالا و با پلاریزاسیون دایروی (الف) نمای کناری (ب) نمای از پایین.

ابعاد:

$$L_{sb}=W_{sb}=120\text{mm}, \\ L_{sp}=W_{sp}=59\text{mm}, h_{sp}=30\text{mm}, L_{pt}=15.4\text{mm}, W_{pt}=18\text{mm}, \\ x_{feed}=5\text{mm}, y_{feed}=6.5\text{mm}$$

ما در اینجا برای سادگی و فشردگی بودن ساختارمان از تکنیک تغذیه تکی استفاده می‌کنیم بدین صورت که در این ساختار به منظور ایجاد تابش با پلاریزاسیون دایروی نقطه تغذیه پچ بر روی قطر آن و گوشه پچ انتخاب شده است [۱۲].

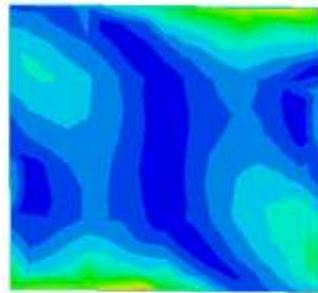
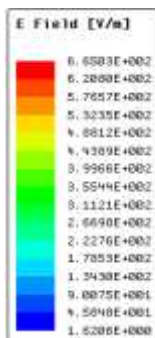
فاصله نقطه تغذیه کابل کوکسیال تا مرکز پچ مستطیلی به صورت  $6/5$  و  $5$  میلی‌متر است. در ساختار آنتن پیشنهادی پچ به عنوان تابش‌کننده اولیه و صفحه فلزی رولایه به عنوان تابش‌کننده ثانویه عمل می‌کند. در اینجا محفظه تشدید شامل دو سطح است، سطح زمین گسترش داده شده در زیر ساختار و سطح رولایه با ابعاد مشخص در بالای ساختار. صفحه زمین گسترده شده در واقع از لحاظ تئوری صفحه زمین بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود ولی چون در عمل دستیابی به ابعاد بی‌نهایت امکان‌پذیر نیست ابعاد این صفحه را تا جایی که می‌توان بزرگ در نظر گرفته‌ایم. همچنین برای ابعاد صفحه فلزی رولایه نیز مطابق با قضیه فبری پرو اندازه ابعاد را در حدود یک طول موج فرکانس کاری در نظر می‌گیریم. ضمن اینکه دلیل استفاده از

بیشترین باند نسبت محوری خواهیم بود. ضمن اینکه در این دو حالت نسبت به حالت مرسوم یعنی بدون استفاده از رولایه و دیواره نسبت محوری به صورت قابل توجهی بهبود داشته است.

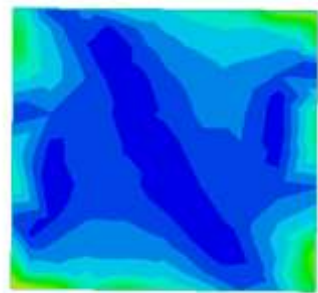
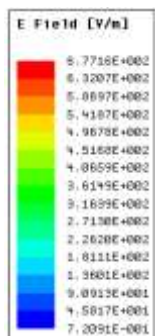
در اینجا برای درک بهتر تاثیرات دیواره کناری بر روی نتایج آنتن از جمله بهره به بررسی میدان الکتریکی بر روی رولایه آنتن می‌پردازیم. شکل (۳) دامنه میدان الکتریکی بر روی رولایه را به ازای دو حالت وجود و عدم وجود دیواره‌های فلزی کناری نشان می‌دهد. طبق شکل (۳) در حالت استفاده از دیواره‌های احاطه کننده فلزی دامنه میدان الکتریکی بخصوص در لبه‌ها که وظیفه اصلی تابش را بر عهده دارند قوی‌تر از حالت عدم استفاده از این دیواره‌هاست و با توجه به رابطه بین اندازه میدان الکتریکی و بهره از اینرو بهره بهتری را نتیجه خواهد داد که این مهم هم مطابق با نتایج شکل (۲) تصدیق شده است.

### ۳- بررسی پارامتری

در این بخش به بررسی پارامترهای تاثیرگذار در نتایج آنتن پرداخته و نتایج حاصل از هر کدام از این پارامترهای ابعادی را بر روی بهره و پهنای باند را مورد تجزیه قرار می‌دهیم.

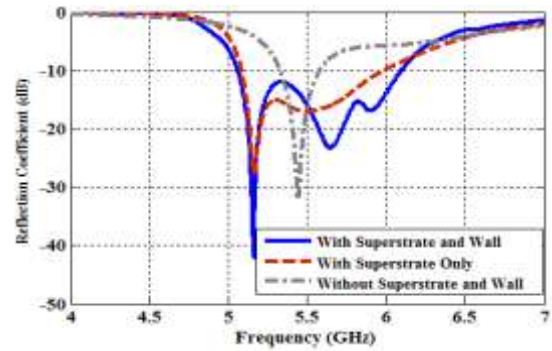


(الف)

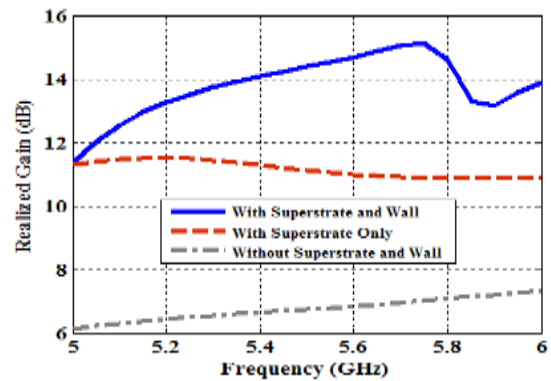


(ب)

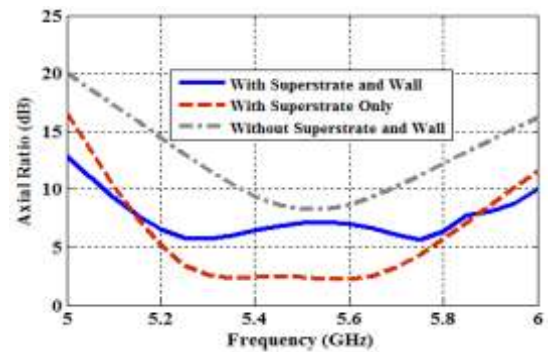
شکل (۳) میدان الکتریکی بر روی رولایه در ساختار آنتن (الف) بدون دیواره فلزی (ب) با دیواره فلزی.



(الف)



(ب)



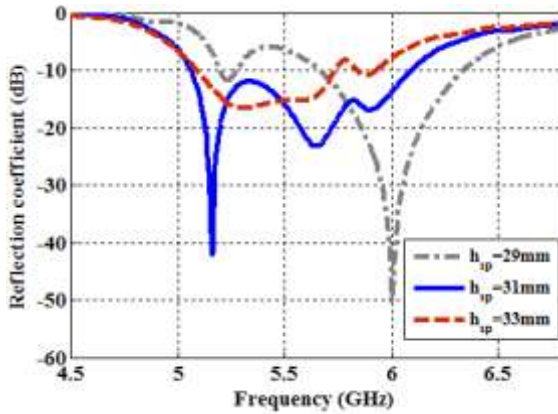
(ج)

شکل (۲) نتایج آنتن در سه حالت استفاده همزمان از رولایه و دیواره، فقط رولایه و بدون رولایه و دیوار (الف) ضریب انعکاسی (ب) برودساید ( $\theta=0$ ) (ج) نسبت محوری.

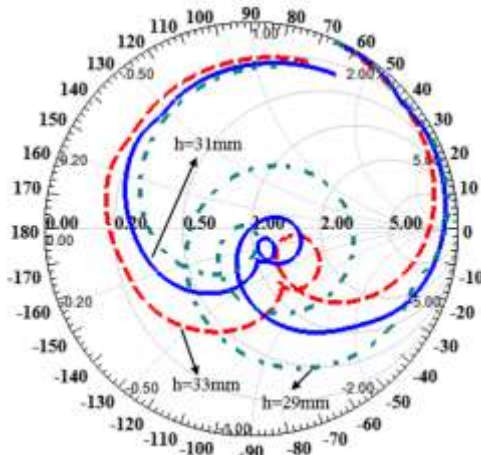
بنابراین استفاده از قضیه فبری پرو بهره آنتن را بصورت چشمگیری افزایش خواهد داد و استفاده از دیواره فلزی نیز بهره را نسبت به حالت مرسوم ۸ و نسبت به حالت قضیه فبری پرو تنها ۴ دسی‌بل افزایش می‌دهد. از اینرو استفاده از دیواره‌های احاطه کننده کناری بسیار تاثیرگذار و توجیه پذیر است. از منظر ایجاد پلاریزاسیون دایروی نیز با توجه به نمودارهای نسبت محوری موجود در شکل بالا گرچه در حالت استفاده از رولایه به صورت تکی شاهد بهترین کیفیت نمودار نسبت محوری می‌باشیم اما با استفاده از همزمان از رولایه و دیواره‌های کناری شاهد

## ۳-۱- ارتفاع رولایه

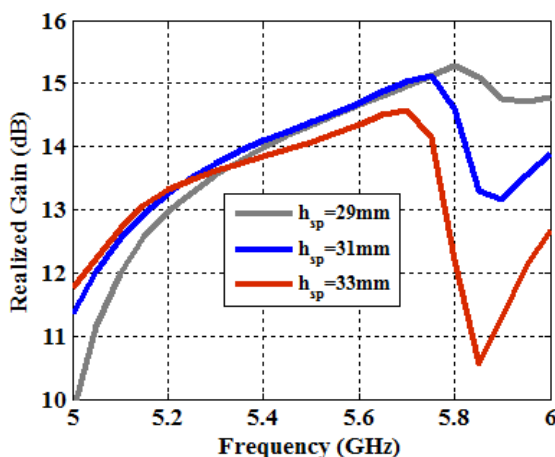
آنتن محفظه‌ای شناخته می‌شود. طبق قضیه فبری پرو ابعاد رولایه دارای اندازه یک طول موج یعنی در اینجا ۵۳ میلی‌متر باید باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴) نتایج حاصل از آنتن به ازای یک مجموعه از مقادیر ارتفاع رولایه (الف) ضریب برگشتی (ب) نمودار اسمیت (ج) بهره بردساید ( $\theta=0$ )

ارتفاع رولایه به عنوان پارامتر بسیار تاثیرگذار بر روی نتایج آنتن مطرح است. همانطور که قبلا گفته شد مطابق با قضیه فبری پرو و طبق روابط تئوری که ارتفاع را نصف طول موج فرکانس کاری یعنی در این ساختار ۲۶/۷ میلی‌متر معرفی می‌کند اما در عمل به علت غیر ایده‌آل بودن ابعاد صفحات زمین و رولایه این مقدار ۳۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. این مقدار بهینه نیز مطابق شکل‌های زیر از طریق بهینه‌سازی‌های حاصل از شبیه‌سازی HFSS نتیجه شده است. شکل (۴) تغییرات مشخصه‌های آنتن شامل ضریب برگشتی، نمودار اسمیت و بهره را نسبت به یک سری از مقادیر ارتفاع نشان می‌دهد.

طبق شکل ضریب برگشتی و نمودار اسمیت چارت ملاحظه می‌شود که در حالت ارتفاع ۳۱ میلی‌متری دارای بهترین کیفیت ضریب برگشتی بوده و همچنین پهنای باند در حالت ارتفاع ۳۳ میلی‌متری بیشترین مقدار خود را دارد. ضمن اینکه نکته دیگری که از شکل (۴) (الف) و (ب) می‌توان دریافت این است که تغییرات ارتفاع بیشترین اثر و جابجایی را بر روی فرکانس تشدید دوم یعنی  $f=5.65\text{GHz}$  دارد و در فرکانس تشدید نخست یعنی  $f=2.25\text{GHz}$  جابجایی تاثیرگذاری دیده نمی‌شود این موارد نشان دهنده این است که فرکانس تشدید نخست ناشی از خود آنتن پیچ بوده و فرکانس تشدید دوم نتیجه رولایه یا محفظه تشدیدی است. همچنین شکل (۴) (ج) بهره آنتن را نسبت به تغییرات ارتفاع نشان می‌دهد همانطور که دیده می‌شود در بازه فرکانسی مورد نیاز ما یعنی کاربردهای دریایی (۵۵۷۰ تا ۵۶۵۰ مگاهرتز) به ازای تغییرات ارتفاع تغییرات کمی در بهره آنتن حاصل شده است اما با دقت در شکل می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع از ۲۹ به ۳۳ میلی‌متر بهره کاهش یافته است. بنابراین با توجه به این سه نمودار می‌توان پی برد که افزایش در ارتفاع پهنای باند آنتن را افزایش داده اما به طور همزمان سبب کاهش بهره آنتن خواهد شد با در نظر گرفتن این مهم و طبق نتایج ما برای ایجاد تعادل بین پهنای باند و بهره ارتفاع آنتن را ۳۱ میلی‌متر انتخاب می‌کنیم.

## ۳-۲- طول و عرض رولایه

طول و عرض رولایه نیز به عنوان پارامتر تاثیرگذار بر نتایج

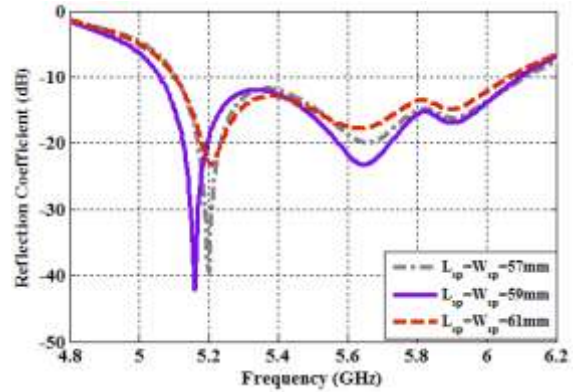
نشان می‌دهد. مطابق با نتایج حاصله در نمودارهای شکل (۵) (الف) و (ب) می‌توان مشاهده کرد که به ازای ابعاد رولایه ۵۹ میلی‌متری دارای بهترین حالت ضریب برگشتی هستیم ضمن اینکه در اینجا نیز جابجایی فرکانس تشدید دوم با تغییرات ابعاد رولایه قابل توجه‌تر است که نشان از آن دارد که این فرکانس تشدید ناشی از محفظه فبری پروبی است. همچنین در شکل (۵) (ج) نمودار بهره نشان می‌دهد که بهره در سه حالت در باند فرکانسی مورد نیاز ما تقریباً برابر بوده ولی در حالت ابعاد ۵۹ میلی‌متری کمی این مقدار در فرکانس‌های پایین‌تر بهتر است.

### ۳-۳- طول و عرض زیرلایه و صفحه زمین

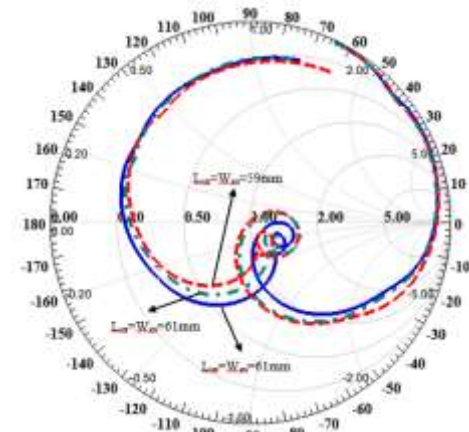
مطابق با قضیه فبری پرو برای دستیابی به بیشترین انعکاس ابعاد صفحه زمین باید بی‌نهایت باشد اما همانطور که گفته شد در عمل ایجاد ابعاد بی‌نهایت امکان‌پذیر نیست. از اینرو در طراحی باید این ابعاد را تا جایی که امکان‌پذیر است بزرگ در نظر بگیریم تا شرایط انعکاس بالا را طبق قضیه فبری پرو برآورده کند. شکل (۶) زیر تغییرات مشخصه‌های آنتن شامل ضریب برگشتی، نمودار اسمیت و بهره را نسبت به یک سری از مقادیر طول و عرض صفحه زمین نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل‌های (۶) (الف) و (ب) می‌توان مشاهده کرد به اندازه‌ی صفحه زمین ۱۳۰ میلی‌متری ضریب برگشتی دارای بهترین کیفیت است اما در عین حال به ازای ابعاد کوچکتر صفحه زمین دارای پهنای باند بیشتری بوده و اینکه با افزایش اندازه ابعاد پهنای باند آنتن کم می‌شود اما با در نظر گرفتن نمودار بهره در شکل (۶) (ج) به ازای ابعاد بالاتر صفحه زمین دارای بهره بیشتر می‌باشیم. در واقع به عبارتی با افزایش ابعاد صفحه زمین پهنای باند کاهش و بهره افزایش می‌یابد بنابراین در اینجا برای دستیابی به تعادل در بهره و پهنای باند، ابعاد صفحه زمین و زیرلایه را ۱۳۰ میلی‌متر در نظر می‌گیریم.

### ۴- محاسبه فرکانس‌های تشدید بر اساس مدل محفظه‌ای

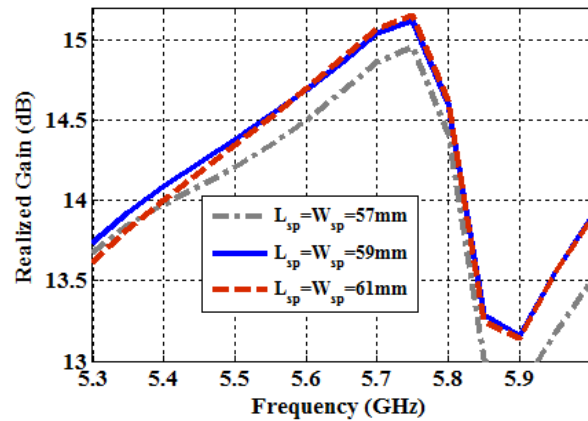
در اینجا شرایطی تشدید داخلی محفظه فبری پرو برای محاسبه فرکانس‌های تشدید بر اساس روابط تئوری مورد ملاحظه قرار می‌دهیم.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵) نتایج حاصل از آنتن به ازای یک مجموعه از مقادیر طول و عرض رولایه (الف) ضریب برگشتی (ب) نمودار اسمیت (ج) بهره برودساید ( $\theta=0$ )

اما همانگونه که گفته شد به علت غیر ایده‌آل ساختار این مقدار در عمل طبق بهینه‌سازی‌های صورت گرفته ۵۹ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. شکل (۵) زیر تغییرات مشخصه‌های آنتن شامل ضریب برگشتی، نمودار اسمیت و بهره را نسبت به یک سری از مقادیر طول و عرض رولایه

که در آن  $c$  سرعت نور در خلا،  $h$  ارتفاع تشدید،  $\varphi_H$  فاز انعکاسی از رولایه و  $\varphi_g$  فاز انعکاسی زمین گسترش یافته و همچنین  $n$  عدد صحیح است. روابط بالا در شرایطی صادق است که ابعاد جانبی آنتن بسیار بزرگ بوده و دیواره‌های کناری وجود نداشته باشند [۱۵]. اما در ساختار پیشنهادی ما به دلیل وجود دیواره‌های کناری فلزی رابطه (۲) باید بهبود یابد. در این حالت از [۱۶] روابط جدیدی با در نظر گرفتن دیواره‌های کناری حاصل شده است:

$$(m\pi/L_{sp})^2 + (n\pi/W_{sp})^2 + (2\pi f_h/c)^2 = (2\pi f_r/c)^2 \quad (۳)$$

در این ساختار صفحه زمین بزرگ به دلیل ایجاد حداکثر تابش فاز انعکاسی  $\pi$  خواهد داشت اما صفحه فلزی رولایه علاوه بر فلزی بودنش به علت ابعاد کوچکترش در مقایسه با صفحه زمین از فاز انعکاسی  $0.9\pi$  برخوردار خواهد بود. بنابراین با فرض این شرایط و روابط (۲) و (۳) و با در نظر گرفتن  $L_{sp}=W_{sp}=59\text{mm}$  و  $\varphi_g = \pi$  و  $\varphi_H = 0.9\pi$  خواهیم داشت:

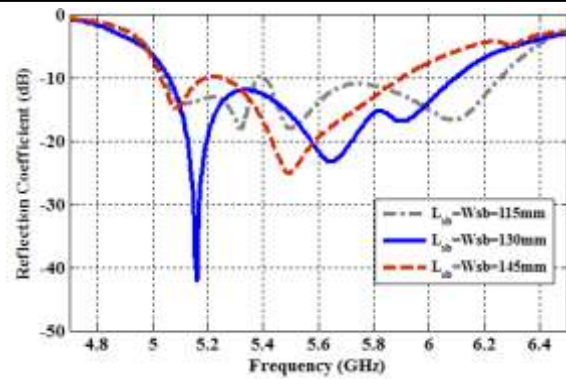
$$f_h = \frac{c}{2h} [0.9\pi] \quad (۴)$$

$$f_r = \frac{c}{2} \sqrt{(m/L_{sp})^2 + (n/W_{sp})^2 + (0.9/h)^2} \quad (۵)$$

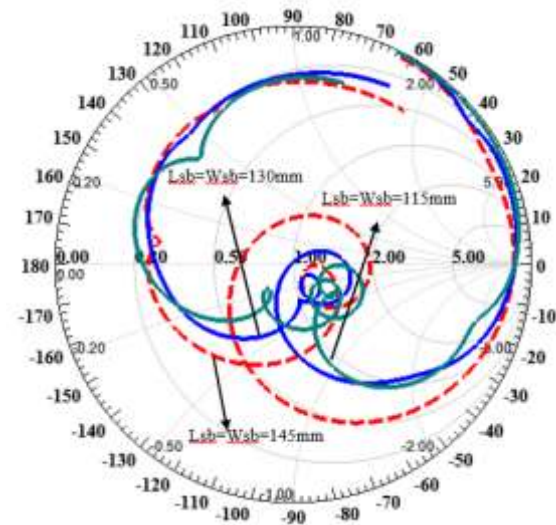
همانگونه که در بخش‌های قبل گفته شد فرکانس تشدید دوم ناشی از محفظه فبری پرویی، متشکل از رولایه، آنتن پچ و صفحه زمین گسترش یافته است. با در نظر گرفتن مد تابشی  $TM_{11}$  برای ساختار محفظه، از طریق رابطه (۵) که برای فرکانس تشدید حاصل از محفظه است؛ به محاسبه فرکانس تشدید برای سه حالت ارتفاع رولایه طبق بخش ۳-۱ پرداخته و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی طبق نمودار شکل (۲-الف) مقایسه می‌کنیم. طبق جدول بالا می‌توان دریافت که نتایج فرکانس تشدید حاصل از شبیه‌سازی و تئوری تقریباً با هم برابر بوده و این نشان از تقریب دقیق روابط ذکر شده است.

جدول (۱) مقایسه نتایج فرکانس تشدید آنتن پیشنهادی حاصل از شبیه‌سازی و تئوری.

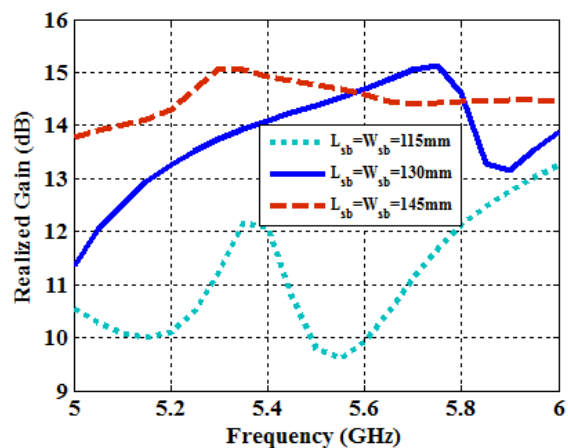
h(mm)	$f_{r(\text{Cavity})}$ (m=1, n=1) (GHz)	
	Theory	Simulation
29	5.89	6
31	5.65	5.7
33	5.44	5.5



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۶) نتایج حاصل از آنتن به ازای یک مجموعه از مقادیر طول و عرض زیرلایه (الف) ضریب برگشتی (ب) نمودار اسمیت (ج) بهره بردساید ( $\theta=0$ )

به طور کلی ارتفاع تشدید ساختار بوسیله شرایط حاصل از کار صورت گرفته در [۱۴] محاسبه می‌شود:

$$f_h = \frac{c}{2h} \left[ \frac{\varphi_H + \varphi_g}{2\pi} + n \right], \quad n=0,1,\dots \quad (۲)$$



## ۵- الگو تابشی

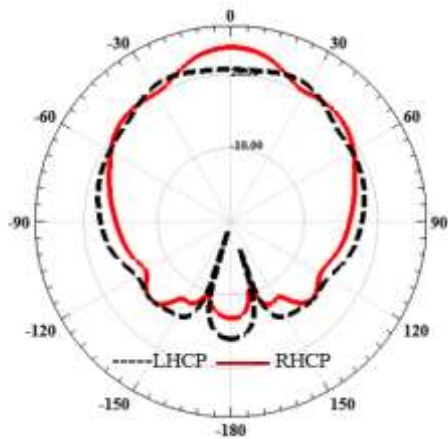
در شکل (۷)، (۸) و (۹) زیر الگوهای تابشی راست گرد و چپ گرد آنتن به ازای ۳ نقطه فرکانسی در باند فرکانسی آنتن که نقاط ابتدا و انتهای بازه را شامل می شود، نشان داده شده است. از روی این شکل ها می توان دید که الگوی راست گرد از الگوی چپ گرد در جهت برودساید یعنی صفر درجه از دامنه بالاتری برخوردار است بنابراین آنتن مورد نظر دارای پلاریزاسیون دایروی راست گرد است.

نکته دیگری که از روی شکل های الگو شکل های بالا می توان مشاهده کرد این است که آنتن مورد نظر دارای بیشترین گلبرگ کناری در حدود ۸ دسی بل در فرکانس ۵٫۶۵ گیگاهرتز است. ضمن اینکه طبق این نمودارها با افزایش فرکانس مقدار گلبرگ کناری افزایش خواهد داشت. طبق همین نمودارها در بازه فرکانس هدف ما که با نقطه فرکانسی ۵٫۶ گیگاهرتز بررسی کرده ایم.

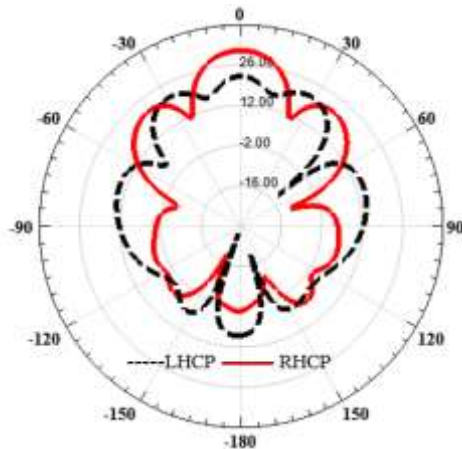
آنتن دارای بیشترین گلبرگ کناری ۱۰ دسی بل است که این مقدار گلبرگ نشان از عملکرد مطلوب آنتن در این بازه کاری دارد.

## ۶- نتیجه گیری

در رادارهای دریایی به علت انعکاسات چندگانه از سطوح دریا و تداخلات چند مسیره کیفیت سیستم ارتباطی تحت شعاع قرار می گیرد. از اینرو از آنجا که آنتن های پلاریزه شده دایروی در مقابله با تداخلات چند مسیره که چالش اصلی در حوزه ارتباطات دریایی است، بسیار موثر عمل می کنند، در این مقاله به طراحی و شبیه سازی آنتن بهره بالا با پلاریزاسیون دایروی بر اساس قضیه فبری پرو برای کاربردهای رادارهای دریایی (۵۵۷۰ تا ۵۶۵۰ مگاهرتز) پرداخته شده است.

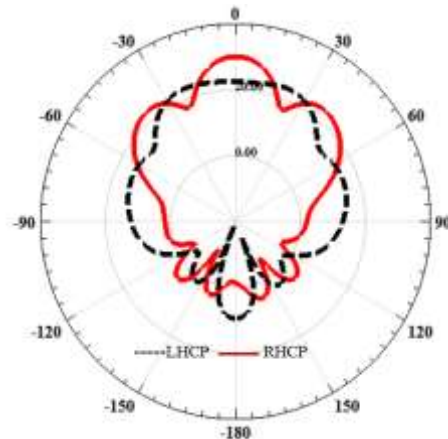


(الف)

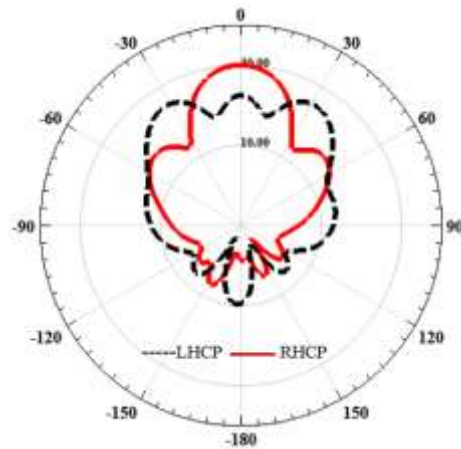


(ب)

شکل (۸) الگوهای تابشی راست گرد و چپ گرد در فرکانس ۵٫۴ گیگاهرتز (الف) در صفحه xz (H) (ب) در صفحه yz (E).



(الف)



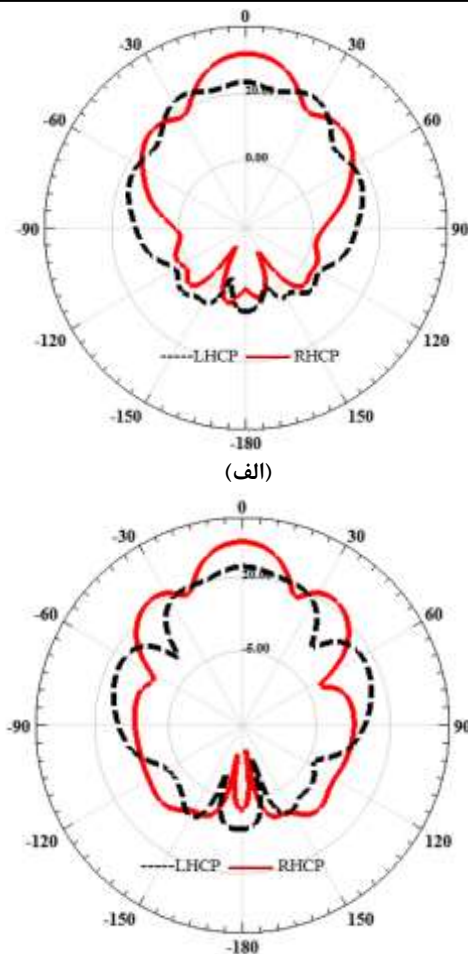
(ب)

شکل (۷) الگوهای تابشی راست گرد و چپ گرد در فرکانس ۵٫۲۵ گیگاهرتز (الف) در صفحه xz (H) (ب) در صفحه yz (E).

دی الکتریک یا ساختارهای سطوح انتخاب‌گر فرکانس پیچیده اشاره داشت که کاهش هزینه‌ها را در پی خواهد داشت. این در حالیست که در سایر آنتن‌های بهره‌بردار عمدتاً از رولایه‌های پر هزینه و پیچیده همچون انواع دی الکتریک‌ها با ثابت بالا و یا فراماده‌ها استفاده می‌کنند.

#### ۵- مراجع

- [1] Skolnik, M. I. Radar Handbook. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1970.
- [2] Briggs, J. N. Target Detection by Marine Radar. London, U.K.: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [3] Kuo, F. Y., and Hwang, R. B., "High-Isolation X-band Marine Radar Antenna Design", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.62, No.5, pp.2331-2337, 2014.
- [4] Watts, S., Baker, C. J., Ward, K. D., "Maritime Surveillance Radar. II. Detection Performance Prediction in Sea Clutter", IEE Proc. F: Radar and Signal Processing, Vol.137, No.2, pp.63-72, 1990.
- [5] Sinha, A., Bar-Shalom, Y., Blair, W. D., Kirubarajan, T., "Radar Measurement Extraction in the Presence of Sea Surface Multipath", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol.39, No.2, pp.550-567, 2003.
- [6] Yang, Z. Z. H., Wei, Y., Liu Y., and Yang C., "Marine Radar Antenna Height Design Under Multi-Path Effect", IET International Radar Conference, pp.290-294, 2013.
- [7] Aulia, D., Kim, J., Jeon, S.Y., Kim S., and Ka, M. H., "Gain and Side-Lobe Improvement of W-Band Microstrip Array Antenna with CSRR for Radar Applications", Electronics Letters, Vol.53, No.11, pp.702-704, 2017.
- [8] Li, R. M. B., Li, C. X., Su, Y. D., and Zheng, C. R., "A Wide Dual-Band Circularly Polarized Antenna for GPS High-Precision Survey", In Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), IEEE Chinese, pp.30-32, 2016.
- [9] Wang, N., Li, J., Wei, G., Talbi L., Zeng Q., and Xu J., "Wideband Fabry-Perot Resonator Antenna with two Layers of Dielectric Superstrates", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.14, pp.229-232, 2015.
- [10] Liu, Z. G., Cao Z. X., and Wu L.N., "Compact Low-Profile Circularly Polarized Fabry-Perot Resonator Antenna Fed by Linearly Polarized Microstrip Patch", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.15, pp.524-527, 2016.
- [11] Wang, N., Liu, Q., Wu C., Talbi L., Zeng, Q. and Xu J., "Wideband Fabry-Perot Resonator Antenna with Two Complementary FSS Layers", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.62, No.5, pp.2463-2471, 2014.



شکل (۹) الگوهای تابشی راست‌گرد و چپ‌گرد در فرکانس ۵/۷۵ گیگاهرتز (الف) در صفحه xz (H) (ب) در صفحه yz (E).

در اینجا یک آنتن بیج مرسوم به عنوان آنتن تغذیه و یک رولایه فلزی جهت ایجاد قضیه فبری پرو استفاده شده است. ضمن اینکه برای بهبود بیشتر بهره آنتن پیشنهادی از دیواره‌های فلزی در چهار طرف آنتن استفاده شده است. از مزایای این آنتن در مقایسه با سایر انواع آنتن‌های مشابه می‌توان به برآورده‌سازی بهره بالا تنها با استفاده از تعدادی صفحه فلزی و بدون استفاده از هیچ گونه ماده دی الکتریک اشاره داشت. این آنتن بهره‌ای در حدود ۱۵ دسی‌بل و پهنای باند ۱۸/۷ درصدی ارائه می‌دهد ضمن اینکه از نسبت محوری‌ای در حدود ۱۱ درصد برخوردار است. همچنین از منظر الگوهای تابشی، آنتن مورد نظر در بازه فرکانسی هدف یعنی حوالی فرکانس ۵/۶ گیگاهرتز دارای بیشترین گلبزرگ کناری ۱۰ دسی‌بلی است که نشان از عملکرد مطلوب آنتن دارد. از مزایای آنتن پیشنهادی نسبت به سایر کارهای صورت گرفته در گذشته می‌توان به افزایش قابل توجه بهره و نسبت محوری آنتن مرجع بدون استفاده از هیچ‌گونه ماده

- 
- [12] Luo, Q. and Zhu F. Circularly Polarized Antennas, John Wiley & Sons, 2013.
- [13] Trentini, G. V., "Partially Reflecting Sheet Array". IRE Trans. Antennas Propagation, Vol.4, pp.666-671, 1956.
- [14] Moustafa, L. and Jecko, B., "EBG Structure with Wide Defect Band for Broadband Cavity Antenna Applications", IEEE Antennas Wireless Propag Lett, Vol.7, pp.693-696, 2008.
- [15] Kim, D.H., and Yeo J.H., "A New Resonance Prediction Method of Fabry-Perot Cavity (FPC) Antennas Enclosed with Metallic Side Walls", Journal of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.11, pp.220-226, 2011.
- [16] Ju J., Kim, D., and Choi, J., "Fabry-Perot Cavity Antenna with Lateral Metallic Walls for WiBro Base Station Applications", Electron Lett, Vol.45, pp.141-142, 2009.