

آنتن میکرواستریپ جهت دار با استفاده از رولایه سطوح انتخابگر فرکانسی در محفظه تشدید فبری پرو

زهرا موسوی رازی^۱، پژمان رضائی^{۲*} و نیلوفر بهادری^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: آنتن میکرواستریپ، جهت دهی، محفظه تشدید فبری پرو، صفحه بازتاب کننده ناقص، سلول واحد، فرامواد، حلقه های شکاف دار تشدید.</p>	<p>در سال های اخیر ساختارهای محفظه تشدید فبری پرو برای افزایش جهت دهی در آنتن ها مورد توجه قرار گرفته است. محفظه تشدید، از یک صفحه زمین به عنوان بازتابنده کامل و یک صفحه رولایه به عنوان بازتاب کننده ناقص تشکیل شده است. در این مقاله از سلول واحدهای فرامواد به عنوان صفحه بازتاب کننده ناقص و از آنتن میکرواستریپ به عنوان آنتن تشعشع کننده اصلی در محفظه تشدید فبری پرو بهره گرفته شده است. همچنین تاثیر استفاده از فرامواد در رولایه آنتن فبری پرو بر روی پارامترهای تشعشعی آنتن به صورت استفاده از چند رولایه مختلف در محفظه تشدید فبری پرو بررسی شده است. در نهایت به عنوان یک طرح جدید با کارایی تشعشعی بهتر آرایه ای از سلول واحدهای امگا برای رولایه پیشنهاد و طراحی شده است. سپس کارایی آنتن تشعشع کننده با این رولایه ای از سلول واحدهای پیچ و حلقه های شکاف دار تشدید مقایسه شده است. شبیه سازی ها با نرم افزار CST-Microwave Studio انجام شده و با استفاده از نرم افزار Ansoft HFSS صحت نتایج حاصل بررسی و تایید شده است.</p>

۱- مقدمه

طراحی این نوع آنتن ها، محفظه تشدید فبری پرو که در فیزیک اپتیک مورد استفاده بوده، معرفی شده است. در سال ۱۹۵۶ نخستین بار تارانتینی یک ساختار محفظه تشدید فبری پرو را به منظور افزایش جهت دهی آنتن ارائه نمود. از آن پس مطالعاتی بنیادین در این زمینه انجام شده است [۱-۳]. این روند طراحی با بهینه سازی پارامترهای ساختار فبری پرو از جمله محل قرارگیری تغذیه بین دو صفحه، طراحی نوع رولایه و ... برای افزایش جهت دهی بیشتر آنتن تا کنون پیگیری شده است [۴]. آنتن های فبری پرو در مقایسه با آنتن های آرایه ای دارای مزایای از جمله سادگی طرح، فشردگی ساختار و تلفات کمتر می باشند [۵]. به طور کلی یک آنتن فبری پرو از یک المان تشعشع کننده که بین یک صفحه زمین به عنوان یک صفحه بازتاب کننده کامل (برای کاهش تشعشع در پشت آنتن) و یک صفحه بازتاب کننده ناقص که به عنوان

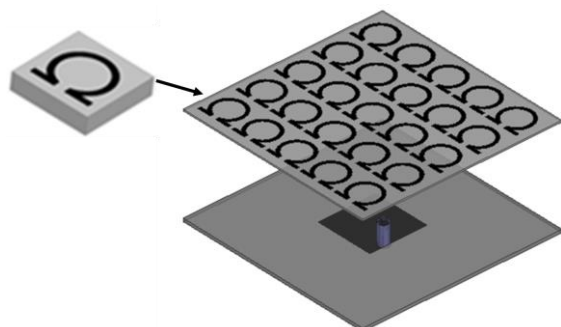
ارتباطات بی سیم با انتشار امواج الکترومغناطیس در فضای آزاد، نیازمند آنتن های جهت دار می باشد. در سال های اخیر طراحی آنتن هایی با جهت دهی بالا مورد توجه طراحان قرار گرفته است. در روش های سنتی، دستیابی به آنتن هایی با جهت دهی بالا اغلب توسط تکنیک تغذیه آرایه ای محقق شده است، این در حالی است که این روش، به منظور تقسیم توان بین آرایه ها، به ناچار تلفات و پیچیدگی ساخت را به دنبال خواهد داشت. در نتیجه دستیابی به آنتن با جهت دهی بالا در کنار سیستم تغذیه منفرد همواره در طراحی ها مورد توجه بوده است. در

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: prezaei@semnan.ac.ir

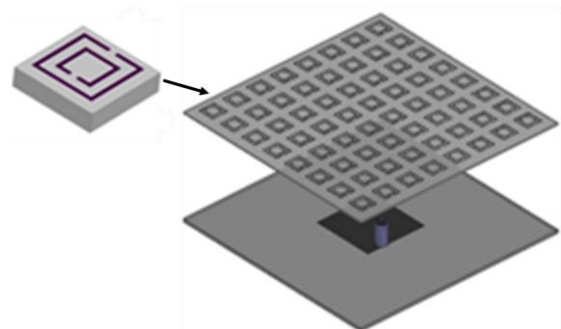
۱. کارشناس ارشد مهندسی برق مخابرات، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

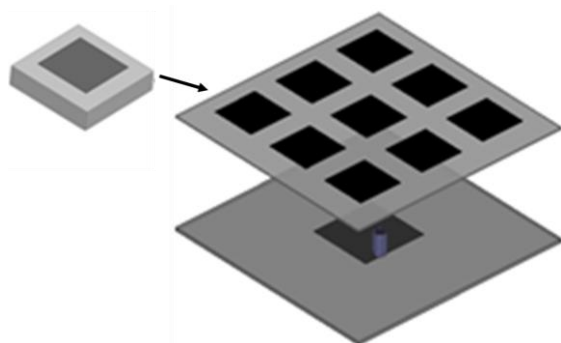
است، به میزان قابل توجهی برطرف گردد. همچنین میزان بهبود پارامترهای تشعشی آنتن با رولایه متشکل از این سلول واحد با دو سلول واحد متداول پیچ و حلقه‌های SRR در آنتن‌های فبری پرو مقایسه شده است. در شکل ۱ نمای کلی آنتن فبری پرو با رولایه امگا پیشنهادی، در کنار دو رولایه پیچ و SRR نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- نمای آنتن فبری پرو با رولایه‌های مختلف (الف) سلول واحد امگا پیشنهادی، (ب) سلول واحد پیچ و (ج) سلول واحد حلقه‌های شکافدار تشدید (SRR)

در تحقیقات سالهای اخیر، راهکارهای متعددی از جمله استفاده از ساختارهای چند لایه، زیرلایه ساختارهای باند ممنوعه، ساختارهای زمین ناقص و نیز استفاده از تغذیه آرایه‌ای برای جبران کاهش پهنای آنتن فبری پرو پیشنهاد و طراحی شده است.

رولایه در بالای آنتن تشعشع‌کننده اصلی قرار می‌گیرد، تشکیل شده است. المان تشعشی می‌تواند هر نوع روزه تشعشی باشد که داخل یا بیرون محفظه قرار می‌گیرد [۷،۶].

جهت‌دهی و پهنای باند آنتن به میزان فاز و اندازه ضریب بازتاب رولایه و همچنین فاصله میان صفحات بستگی دارد [۸]. امواج تشعشی در داخل محفظه دچار بازتاب‌های متوالی می‌گردند، تداخل هم‌فاز این امواج منجر به افزایش بازتاب از صفحه بازتاب‌کننده ناقص می‌شود که بر اساس نظریه اثر موج نشستی و شکل‌دهی اشعه منجر به افزایش جهت‌دهی آنتن می‌گردد [۹-۱۱]. وقتی فاصله بین صفحات مضربی از نیم موج باشد به دلیل تداخل هم‌فاز و سازنده امواج میزان افزایش جهت‌دهی آنتن، بیشینه می‌شود. این ساختارها در کنار کاهش پیچیدگی ساخت و افزایش جهت‌دهی، باعث کاهش پهنای باند آنتن می‌شوند. این کاهش به عنوان یکی از معایب اصلی آنتن فبری پرو به شمار می‌رود. تاکنون طرح‌های متفاوتی از صفحه بازتاب‌کننده جزئی ارائه شده است.

یکی از این طرح‌ها استفاده از سلول واحدهای فرامواد در طراحی رولایه می‌باشد [۱۲-۱۵]. فرامواد گروهی از مواد هستند که به سهولت در طبیعت یافت نمی‌شوند. این مواد دارای نظم همگونی هستند که خواص استثنایی را از خود نمایش می‌دهند. این خواص در واقع بیانگر پاسخی است که در کاربردشان در یک سیستم از خود نشان می‌دهند. برای مثال داشتن ضرایب مغناطیسی و الکتریکی منفی و یا متغیر با فرکانس، داشتن رفتار فیلتری در باند فرکانسی خاص و تبدیل امپدانس [۱۶-۱۸].

استفاده از این ساختارها به عنوان رولایه بازتاب بیشتری را ایجاد خواهد کرد. پیچ‌های مربعی شکل ساده و حلقه‌های شکافدار تشدید (SRR) از سلول واحدهای متداول فرامواد می‌باشند که در طراحی رولایه آنتن فبری پرو تاکنون استفاده شده است [۱۹-۲۸]. در این مقاله سلول واحد متفاوتی، به فرم امگا در طراحی رولایه معرفی و شبیه‌سازی گردیده است.

آرایه‌ای از این سلول واحد به عنوان رولایه بر روی محفظه تشدید فبری پرو قرار گرفته است. در طراحی این سلول واحد سعی شده تا علاوه بر افزایش جهت‌دهی، مشکل اصلی آنتن‌های فبری پرو که کاهش پهنای باند آنتن

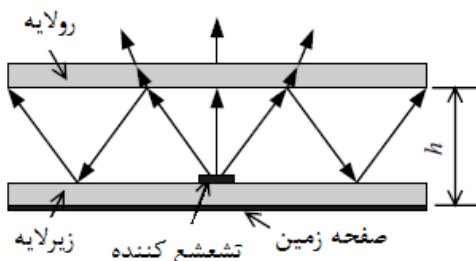
باند آنتن کاهش می‌یابد. با این وجود، این کاهش پهنای باند با طراحی رولایه مناسب کمینه خواهد شد [۳۰].
متغیر ψ_0 در رابطه ۳ مقدار زاویه فاز ضریب بازتاب برحسب درجه و $N=0, 1, 2, \dots$ می‌باشد، ماکزیمم بازتاب زمانی اتفاق خواهد افتاد که مقدار زاویه ψ_0 برابر با 180° درجه باشد که در این صورت کمترین مقدار فاصله بین صفحه زمین و رولایه $\lambda/2$ خواهد شد. بنابراین فاصله بین صفحه زمین و رولایه در طراحی‌های رولایه $\lambda/2$ انتخاب می‌شود تا مقدار زاویه ψ_0 برابر با 180° شده و ماکزیمم بازتاب در محفظه تشدید رخ دهد.

۳- طراحی آنتن

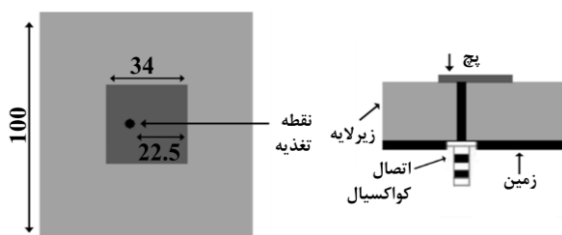
۳-۱- طراحی منبع تغذیه

برای تغذیه محفظه تشدید فبری پرو از آنتن پچ میکرواستریپ استفاده شده است. این آنتن برای کار در فرکانس $2/4$ گیگاهرتز طراحی شده است.

پچ میکرواستریپ بر روی زیرلایه دی‌الکتریک FR4 با ضریب گذردهی الکتریکی $4/4$ و ضخامت $1/6$ میلی‌متر قرار دارد. ابعاد پچ میکرواستریپ و صفحه زمین در شکل ۳ نشان داده شده است. پچ میکرواستریپ با کانکتور SMA 50Ω تغذیه شده است [۳۱]. در شکل ۴ نمودار افت برگشتی آنتن پچ میکرواستریپ طراحی شده و الگوهای تشعشی جهت‌دهی آن در صفحات E و H نشان داده شده است.



شکل ۲- نمای محفظه تشدید آنتن فبری پرو



شکل ۳- نمای آنتن میکرواستریپ (ابعاد: mm)

در تحقیقی از چهار رولایه برای افزایش پهنای آنتن فبری پرو استفاده شده است [۳۰]. استفاده از چند رولایه باعث به وجود آمدن ساختاری پیچیده و با ارتفاع زیاد شده است که آنتن مزیت کم ارتفاع بودن را از دست داده است. استفاده از زیرلایه باند ممنوع [۵ و ۲۲]، ساختارهای زمین ناقص [۲۰] و یا تغذیه آرایه‌ای [۱۹] نیز از جمله کارهای دیگری است که در مقالات مختلف به منظور افزایش پهنای باند آنتن فبری پرو انجام گرفته است. استفاده از این ساختارها علاوه بر افزایش پیچیدگی ساختار، تلفات را نیز به واسطه استفاده از شبکه تغذیه آرایه‌ای به همراه خواهد داشت. طرح پیشنهادی در این مقاله با استفاده از یک رولایه و بدون استفاده از زیرلایه باند ممنوعه و ... و با استفاده از تغذیه منفرد توانسته در کنار افزایش خوب جهت‌دهی آنتن تا حد زیادی کاهش پهنای باند آنتن را نیز جبران کند.

۲- مدل محفظه تشدید فبری پرو

مدل محفظه تشدید آنتن فبری پرو در شکل ۲ نشان داده شده است. در این ساختار منبع تغذیه بین دو صفحه بازتاب کننده جزئی (رولایه) و صفحه زمین (بازتاب کننده کامل) قرار می‌گیرد.

عملکرد آنتن فبری پرو بستگی به فرکانس کار و ضریب بازتاب صفحه بازتاب کننده جزئی دارد. معادلات بهره و پهنای باند آنتن فبری پرو در زیر آمده است. این دو معادله رابطه بین ضریب بازتاب را با بهره و پهنای باند آنتن بیان می‌کند [۲۹].

$$G = (1 + R) / (1 - R) \quad (1)$$

$$BW = (\lambda / 2\pi L_r) \times (1 - R) / \sqrt{R} \quad (2)$$

$$L_r = \left(\frac{\psi_0}{360} - 0.5 \right) \frac{\lambda}{2} + N \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

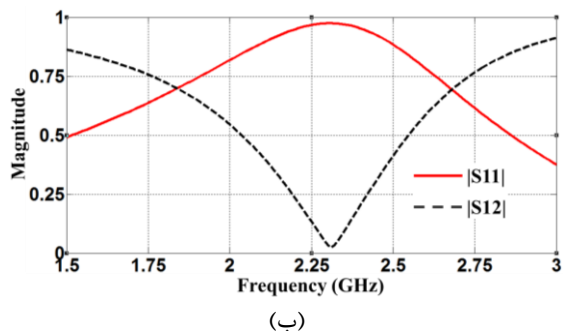
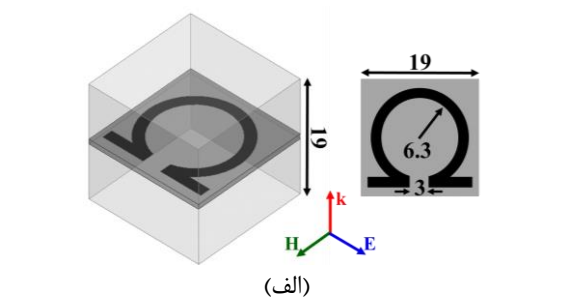
در این روابط G بهره آنتن، R ضریب بازتاب از بازتاب کننده جزئی، BW پهنای باند آنتن، λ طول موج فضای آزاد و L_r فاصله بین صفحه زمین و صفحه بازتاب کننده جزئی (رولایه) می‌باشد. طبق معادله ۱ افزایش بازتاب از صفحه بازتاب کننده جزئی (R)، باعث افزایش بهره آنتن خواهد شد و این در حالی است که طبق معادله ۲ پهنای

پیچ میکرواستریپ در نظر گرفته خواهد شد. در ادامه سلول واحدهای امگا، پیچ و SRR برای فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز طراحی شده است.

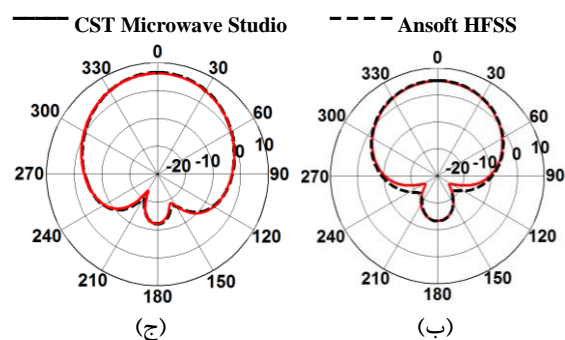
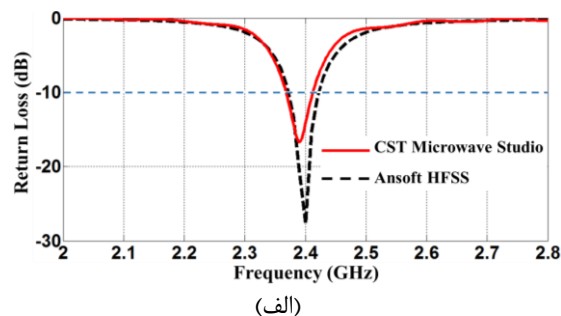
۳-۲-۱ رولایه با سلول واحد امگا

ساختار سلول واحد امگا در سال ۱۹۹۲ توسط سادو و انقطاع مطرح شد. این سلول واحد در دسته فرامواد DNG قرار می‌گیرد [۳۲]. ساختار این سلول واحد که به صورت قرارگیری فلزی به شکل Ω بر روی زیرلایه دی الکتریک FR4 با ارتفاع ۱/۶ میلی‌متر می‌باشد به همراه ابعاد بهینه آن در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سلول واحد امگا در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. در این شکل نمودارهای ضریب بازتاب و ضریب انتقال سلول واحد و محدوده فرکانس کاری آن به منظور رسیدن به $|S_{11}| > |S_{21}|$ نشان داده شده است.

اندازه ضریب بازتاب رولایه به ابعاد پیچ‌ها و همچنین دوره تناوب استقرار آن‌ها به روی رولایه بستگی دارد. مطابق نتایج شبیه‌سازی، محدوده کاری این سلول واحد بین ۱/۸ تا ۲/۶۵ گیگاهرتز می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده بود صفحه بازتاب‌کننده جزئی آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد امگا شامل آرایه 5×5 از این سلول واحد می‌باشد که در فاصله $\lambda/2$ از آنتن میکرواستریپ قرار داده شده است.



شکل ۵- (الف) سلول واحد امگا بهینه و (ب) نمودار اندازه ضریب بازتاب و ضریب انتقال سلول واحد امگا (ابعاد: mm)



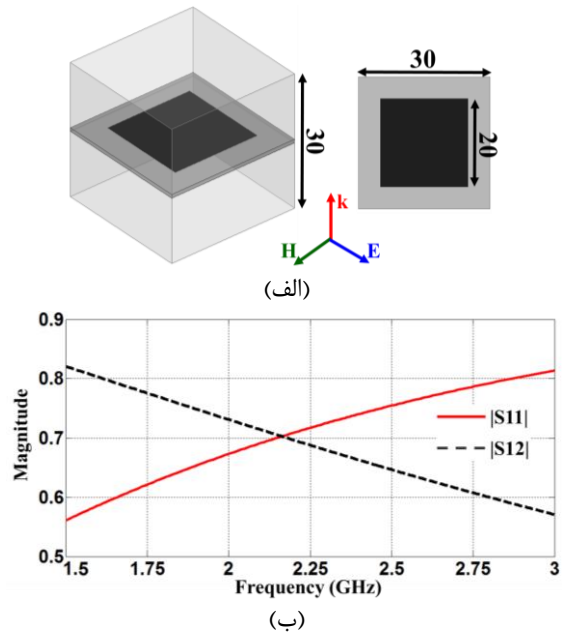
شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی آنتن میکرواستریپ با ۲ نرم افزار (الف) منحنی افت برگشتی، (ب) الگوی تشعشعی جهت‌دهی آنتن در صفحه E و (ج) الگوی تشعشعی جهت‌دهی آنتن در صفحه H

براساس آنچه از نتایج شبیه‌سازی آنتن پیچ میکرواستریپ بدست آمده است، پهنای باند آنتن میکرواستریپ بین فرکانس‌های ۲/۳۷۲ تا ۲/۴۲۲ گیگاهرتز در حدود ۲/۱٪ و حداکثر جهت‌دهی آنتن در فرکانس مرکزی ۲/۴ گیگاهرتز در حدود ۶/۲۲ dB می‌باشد.

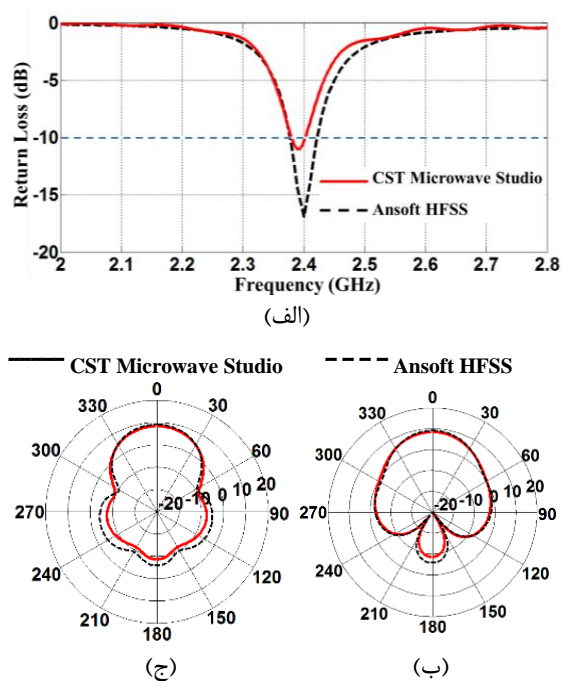
۳-۲- طراحی رولایه

صفحه بازتاب‌کننده جزئی شامل آرایه‌ای از سلول واحدهای فلزی است که بر روی زیرلایه دی‌الکتریک چاپ می‌شود که این صفحه در بالای آنتن تشعشع‌کننده اصلی واقع خواهد شد. طراحی این سلول واحدها مهم‌ترین قسمت در طراحی رولایه می‌باشد. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل ذکر شد، اندازه ضریب بازتاب نقش مهمی در میزان افزایش جهت‌دهی محفظه تشدید فبری پرو ایفا می‌کند. طراحی سلول واحد باید به گونه‌ای باشد که در فرکانس مورد نظر اندازه ضریب بازتاب رولایه از اندازه ضریب انتقال آن بزرگ‌تر باشد ($|S_{11}| > |S_{12}|$). همچنین به جهت افزایش جهت‌دهی بیشینه، فاصله میان این دو پارامتر باید بیشینه باشد. در حالت ایده‌آل ابعاد رولایه باید بی‌نهایت باشد، اما چون سعی بر آن است که ساختار کم ارتفاع باشد، ابعاد رولایه کاهش یافته و به اندازه زیرلایه

مطابق نتایج شبیه‌سازی، فرکانس کاری این سلول واحد از فرکانس ۲/۱۵ گیگاهرتز ($|S_{11}| > |S_{21}|$) شروع می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد پیچ در شکل ۸ نشان داده شده است. رولایه این آنتن شامل آرایه‌ای ۳×۳ از سلول واحد پیچ می‌باشد.

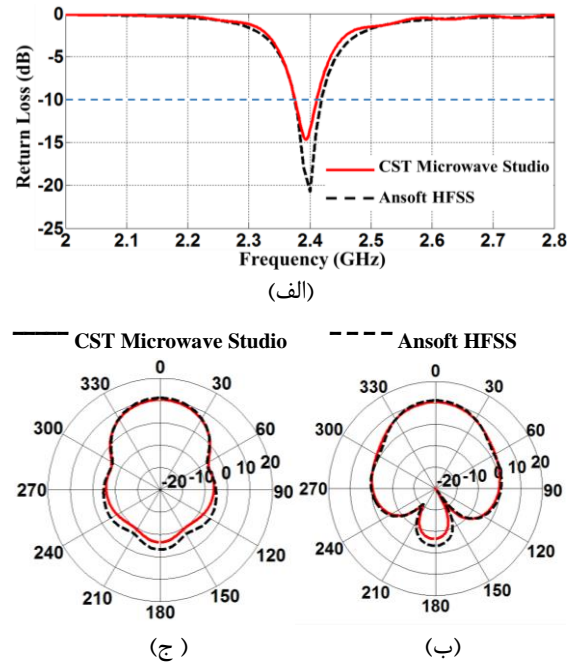


شکل ۷- الف) سلول واحد پیچ با ابعاد بهینه و ب) نمودار اندازه ضریب بازتاب و ضریب انتقال سلول واحد پیچ (ابعاد: mm)



شکل ۸- نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد پیچ الف) نمودار افت برگشتی، ب) الگوی تشعشعی جهت‌دهی آنتن در صفحه E و ج) صفحه H

در شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی آنتن فبری پرو با رولایه سلول واحد امگا، شامل افت برگشتی آنتن و الگوی تشعشعی جهت‌دهی آن در دو صفحه E و H نشان داده شده است.



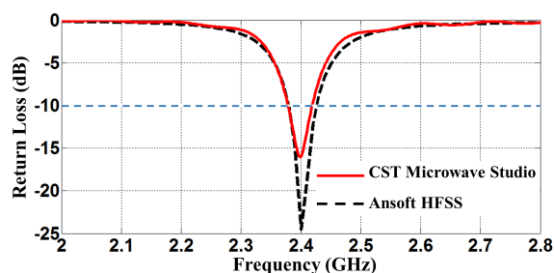
شکل ۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد امگا الف) نمودار افت برگشتی، ب) الگوی تشعشعی جهت‌دهی آنتن در صفحه E و ج) صفحه H

با توجه به شکل ۶ پهنای باند آنتن (بازه فرکانسی ۲/۳۷۴ تا ۲/۴۱۹ گیگاهرتز) در حدود ۱/۹٪ است. همچنین بیشینه جهت‌دهی آنتن در فرکانس مرکزی ۲/۴ گیگاهرتز حدود ۱۱ دسیبل می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده پهنای باند آنتن در حدود ۰/۲٪ نسبت به آنتن پیچ میکرواستریپ اولیه بدون رولایه شامل سلول واحد امگا کاهش و جهت‌دهی آن در حدود ۴/۸ dB افزایش یافته است.

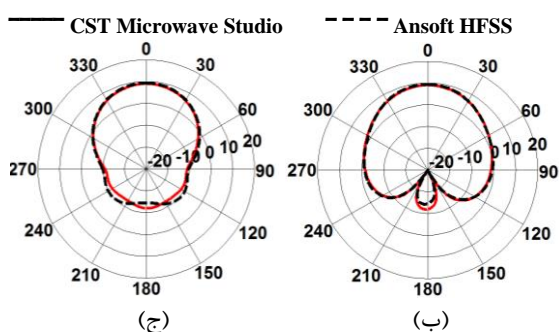
۳-۲-۲- رولایه با سلول واحد پیچ مربعی

این سلول واحد از استقرار پیچ مربعی فلزی بر روی زیرلایه دی‌الکتریک ایجاد می‌شود. استفاده از این سلول به دلیل سادگی ساخت و حساسیت کمی که نسبت به پلاریزاسیون دارد [۳۳]، در طراحی رولایه آنتن فبری پرو بسیار متداول می‌باشد. ساختار کلی این سلول واحد، ابعاد بهینه و نتیجه شبیه‌سازی آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

نمایی از این سلول واحد، ابعاد بهینه و نتیجه شبیه‌سازی اندازه ضریب بازتاب و اندازه ضریب انتقال آن در شکل ۹ نشان داده شده است. شبیه‌سازی این سلول واحد بیانگر آنست که بازه فرکانسی ۲/۳۰ تا ۲/۵۲ گیگاهرتز دارای شرط $(|S_{11}| > |S_{21}|)$ می‌باشد که محدوده کاری این سلول واحد می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی ساختار آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد SRR در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



(الف)



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد SRR (الف) نمودار افت برگشتی، (ب) الگوی جهت‌دهی آنتن در صفحه E و (ج) صفحه H

رولایه این آنتن شامل آرایه‌ای 8×8 از این سلول واحد می‌باشد. نمودار افت برگشتی بیانگر آنست که پهنای باند آنتن در بازه فرکانسی ۲/۳۷۹ تا ۲/۴۲۶ گیگاهرتز و در حدود ۱/۹۵٪ می‌باشد. بدین ترتیب پهنای باند آن حدود ۰/۱۵٪ نسبت به آنتن پیچ میکرواستریپ اولیه (بدون رولایه) کاهش یافته است.

الگوی تشعشعی جهت‌دهی این آنتن در فرکانس مرکزی ۲/۴ گیگاهرتز دارای حداکثر جهت‌دهی در حدود ۹/۵ دسیبل می‌باشد. به عبارتی در حدود ۳/۳ دسیبل نسبت به جهت‌دهی آنتن پیچ میکرواستریپ منفرد اولیه افزایش داشته است.

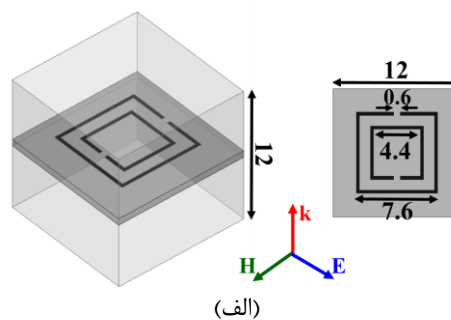
با توجه به شکل ۸ پهنای باند آنتن در بازه فرکانس‌های ۲/۳۷۷ تا ۲/۴۱۹ گیگاهرتز حدود ۱/۷۵٪ و جهت‌دهی آن در فرکانس مرکزی ۲/۴ گیگاهرتز حدود ۹ دسیبل است. در مقایسه با آنتن پیچ میکرواستریپ بدون رولایه، پهنای باند آنتن به مقدار ۰/۳۵٪ کاهش و جهت‌دهی آن به مقدار ۲/۷۸ دسیبل افزایش یافته است. این ساختار از نظر سادگی ساخت به سایر ساختارهای معرفی شده برتری دارد.

۳-۲-۳- رولایه با سلول واحد حلقه‌های شکاف‌دار

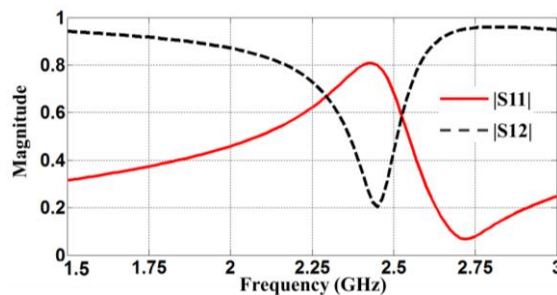
تشدید

برای نخستین بار پندری در ۱۹۹۸ برای دستیابی به موادی با ضریب نفوذپذیری منفی ساختار حلقه‌های هم‌مرکز که بر روی هر کدام شکافی قرار داشت (حلقه‌های شکاف‌دار تشدید) را پیشنهاد داد. ویژگی این نوع سلول واحد، شکل ساده و قابلیت تغییر مناسب، جهت طراحی دلخواه است.

شکل متداول این نوع سلول واحد از دو حلقه هم‌سطح ساخته شده که هر کدام در یک قسمت خود و در سمت مخالف یکدیگر دارای یک شکاف می‌باشند. وجود این شکاف‌ها تشکیل خازن داده و از سوی دیگر، طول حلقه‌ها نیز دارای مقدار سلفی می‌باشد [۳۴-۳۷]. در نهایت یک فرکانس تشدید ایجاد می‌شود که مقدار آن از روی مقدار سلف و خازن معادل سلول واحد معین می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۹- الف) سلول واحد SRR با ابعاد بهینه (ب) نمودار اندازه ضرایب بازتاب و انتقال سلول واحد SRR (ابعاد: mm)

تطابق مناسبی برخوردارند. یکسان نبودن نحوه تحلیل در این دو نرم‌افزار توجیه اختلاف جزئی بین نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور افزایش جهت‌دهی آنتن پچ میکرواستریپ از محفظه تشدید فبری پرو بهره گرفته شده است. در این محفظه نوع رولایه نقش به سزایی در افزایش جهت‌دهی آنتن دارد. در این تحقیق تاثیر استفاده از فرامواد در رولایه آنتن فبری پرو بر روی پارامترهای تشعشعی آنتن، از قبیل جهت‌دهی و پهنای باند آنتن بررسی شده است. چند رولایه مختلف از فرامواد طراحی، شبیه‌سازی و مقایسه شده است. در نهایت سلول واحد امگا به عنوان طراحی جدیدی از رولایه با کارایی تشعشعی بهتر پیشنهاد گردیده است. طراحی آنتن برای سیستم بلوتوث در فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز صورت گرفته شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، بکارگیری رولایه امگا علاوه بر افزایش جهت‌دهی به میزان مناسب در حدود ۴/۷۸ دسیبل، کاهش پهنای باند کمتری نسبت به سایر ساختارها را نیز در پی داشته است. با استفاده از این سلول واحد به عنوان رولایه تا حدودی مشکل اصلی ساختارهای فبری پرو که محدودیت پهنای باند آنتن است در کنار افزایش خوب جهت‌دهی آن، برطرف گردیده است.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت دانشگاه سمنان انجام گرفته است. بدین‌وسیله نویسندگان مقاله قدردانی خود را از نکات ارزشمند داوران محترم ابراز می‌دارند.

۴- بحث و مقایسه نتایج ساختارهای مختلف

در جدول ۱ عملکرد آنتن میکرواستریپ با سه رولایه مختلف مقایسه شده است. مطابق نتایج جدول، آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد امگا علاوه بر اینکه پهنای باند آنتن را به مقدار کمی کاهش داده دارای بیشترین مقدار جهت‌دهی در حدود ۴/۸ دسیبل، نسبت به سایر ساختارها می‌باشد.

از مزیت‌های سلول واحد پچ سادگی طرح و نداشتن حساسیت به تغییر پلاریزاسیون می‌باشد [۳۳]. این در حالی است که استفاده از این سلول واحد در محفظه تشدید فبری پرو باعث افزایش نسبی جهت‌دهی آنتن خواهد شد. کمترین کاهش پهنای باند برای آنتن فبری پرو با رولایه شامل حلقه‌های SRR بدست آمده است. این در حالی است که در این ساختار افزایش جهت‌دهی بهتری نیز نسبت به آنتن فبری پرو با رولایه شامل سلول واحد پچ بدست آمده است.

جدول ۱- مقایسه عملکرد آنتن فبری پرو با سه رولایه مختلف امگا، پچ و SRR

جهت‌دهی (dB)	پهنای باند (%)	ساختار آنتن
۶/۲۲	۲/۱	آنتن پچ میکرواستریپ بدون رولایه
۹	۱/۷۵	آنتن پچ میکرواستریپ با رولایه سلول واحد پچ
۱۱	۱/۹	آنتن پچ میکرواستریپ با رولایه سلول واحد امگا
۹/۵	۱/۹۵	آنتن پچ میکرواستریپ با رولایه سلول واحد SRR

نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته توسط دو نرم افزار عددی Ansoft HFSS و CST Microwave Studio از

۶- مراجع

- [1] G. V. Trentini, "Partially reflecting sheet array," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 4, pp. 666–671, 1956.
- [2] N. G. Alexopoulos and D. R. Jackson, "Fundamental superstrate effectson printed circuit antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 32, pp. 807-816, Aug. 1984.
- [3] K. Iizuka, "Elements of photonics," John Wiley & Sons, New York, vol. 1, 2002.

- [4] D. R. Jackson and N. G. Alexopoulos, "Gain enhancement method for printed circuit antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 33, pp. 976-987, Sep. 1985.
- [5] Z. C. Ge, W. X. Zhang, Z. G. Liu and Y. Y. Gu, "Broadband and high-gain printed antennas constructed from Fabry-Perot resonator structure using EBG or FSS cover," *Microwave Opt. Tech. Lett.* vol. 48, no. 7, pp. 1272-1274, 2006.
- [6] T. Akalin, J. Danglot, O. Vanbesien and D. Lippens, "A highly directive dipole antenna embedded in a Fabry-Perot type cavity," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 12, no. 2, pp. 48-50. 2002.
- [7] Y. Sun, Z. N. Chen, Y. Zhang, H. Chen, and T. S. P. See. "Subwavelength substrate-integrated Fabry-Perot cavity antennas using artificial magnetic conductor," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 1, pp. 30-35, 2012.
- [8] A. P. Feresidis, and J. C. Vardaxoglou, "High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces," *IEEE Proc-Microw. Antennas Propag.*, vol. 148, no. 6, pp. 345-350, Dec. 2001.
- [9] P. Deo, A. Mehta, D. Mirshekar-Syahkal and H. Nakano, "An HIS-Based spiral antenna for pattern reconfigurable applications," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 196-199, 2009.
- [10] L. O. Goldstone and A. A. Oliner, "Leakywave antennas I: Rectangular waveguides," *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 7, pp. 307-319, Oct. 1959.
- [11] A. Ghasemi, S. N. Burokur, A. Dhouibi and A. de Lustrac, "High beam steering in Fabry-Pérot leaky-wave antennas," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, 2013.
- [12] A. Pirhadi, M. Hakkak, F. Keshmiri and R. Karimzadeh Bae, "Design of compact dual band high directive electromagnetic bandgap (EBG) resonator antenna using artificial magnetic conductor," *IEEE Trans. Antenna Propag.*, vol. 55, no. 6, June 2007.
- [13] K. Mahdjoubi, T. H. Vu, A. C. Tarot and S. Collardey, "An overview of the design and properties of EBG antennas", *EUCAP 2010, Barcelona, Spain*, pp. 12-16, April 2010.
- [14] M. M. Fakharian, P. Rezaei, "Numerical analysis of mushroom-like and uniplanar EBG structures utilizing spin sprayed Ni (-Zn)-Co ferrite films for planar antenna," *European Journal of Scientific Research*, vol. 73, no. 1, pp. 41-51, 2012.
- [15] V. G. Veselago. "The electromagnetcis of substance with simultaeously negative values of ϵ , μ ," *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, pp. 509-514, 1968.
- [16] N. Engheta, R.W. Ziolkowski "Metamaterials physicscs and engineering exporations," *IEEE press*, 2006.
- [17] I. Arghand Lafmajani and P. Rezaei, "Miniaturized Rectangular Patch Antenna Loaded with Spiral/Wires Metamaterial," *European Journal of Scientific Research*, vol. 65, no. 1, pp. 121-130, 2011.
- [18] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Electromagnetic band gap structures in antenna engineering," *Cambridge University Press*, 2008.
- [19] A.R. Vaidya, R.K. Gupta, S. K. Mishra, and J. Mukherjee, "High-Gain low side lobe level fabry perot cavity antenna with feed patch array," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 28, pp. 223-238, 2012.
- [20] Z. Mousavi Razi, P. Rezaei and M. E. Zaman, "Improving the bandwidth of high gain Fabry-Perot antenna using EBG substrate," *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, vol.7, no. 2, pp. 85-88, 2013.
- [21] I. Arghand Lafmajani and P. Rezaei, "A novel frequency-selective metamaterial to improve helix antenna," *Journal of Zhejiang University Science C*, vol. 13, no. 4, pp. 365-375, April 2012.
- [22] D. B. Brito, A. G. d'Assunção, R. H. C. Maniçoba and X. Begaud, "Metamaterial inspired Fabry-Perot antenna with cascaded frequency selective surfaces," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 55, no. 5, pp. 981-985, 2013.
- [23] Z. Mousavi Razi, P. Rezaei and N. Bahadori, "Directivity Improvement of Microstrip Antenna with S Metamaterial Unit Cell as Fabry-Perot Cavity Superstrate," *2nd Asian Symposium on Electromagnetics and Photonics Engineering*, pp. 127-128, Iran, August 2013.
- [24] L. Long, L. Shuo and C. H. Liang, "Metamaterial based fabry perot resonator for ultra-low profile high gain antenna," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 54, no. 11, pp. 2620-2623, Nov. 2012.
- [25] Y. Sun, Z. N. Chen, Y. Zhang, H. Chen and T. S. P. See, "Subwavelength substrate-integrated Fabry-Pérot cavity antennas using artificial magnetic conductor," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 1, pp. 30-35, 2012.
- [26] Z. Mousavi Razi and P. Rezaei, "Design of Fabry Perot antenna and compensating bandwidth with defected ground structure," *IEEE AP-S Int. Symposium on Antennas and Propagation*, 2013.
- [27] Z. Mousavi Razi, N. Bahadori and P. Rezaei, "Implementation of SRR array as Fabry-Perot and uniplanar compact EBG," *IEEE AP-S Int. Symposium on Antennas and Propagation*, 2013.
- [28] W. Guo, L. He, B. Li, T. Teng, and X.-W. Sun, "A wideband and dual-resonant terahertz metamaterial using a modified SRR structure," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 134, pp. 289-299, 2013.

- [29] R. K. Gupta and J. Mukherjee, "Effect of superstrate material on a high gain antenna using array of parasitic patches," *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 52, pp. 82-88, 2010.
- [30] A. Vaidya, R. K. Gupta, J. Mukherjee and S.K. Mishra, "Low cost, efficient, high gain and wideband microstrip antenna fed yagi array in fabry perot cavity," *Progress In Electromagnetics Research symposium*, pp. 1841-1845, April 2012.
- [31] J.R. James and P.S. Hall, "Handbook of microstrip antennas," Peter Peregrinus Ltd., London, vol.1, 1989.
- [32] M. M. I. Saadoun and N. Engheta, "A reciprocal phase shifter using a novel pseudo-chiral or medium," *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 5, pp. 184-188, Apr. 1992.
- [33] Z. C. Ge, W. X. Zhang, Z. G. Liu, "Broadband high-gain printed antennas constructed from Fabry-Perot resonator structure using EBG or FSS cover," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 7, pp. 1272-1274, 2006.
- [34] Z. Mousavi Razi, P. Rezaei, A. Valizade, "A novel design of Fabry-Perot antenna using metamaterial superstrate for gain and bandwidth enhancement," *Int. Journal of Electronics and Communications*, vol. 69, no. 10, pp. 1525-1532, Oct. 2015.
- [35] I. Arghand Lafmajani, Z. Mousavi Razi and P. Rezaei, "Multifaceted frequency-selective split ring resonators (SRR)," *IEEE AP-S Int. Symposium on Antennas and Propagation*, July 2012.
- [36] Z. Mousavi Razi, N. Bahadori and P. Rezaei, "A Comparative Study on the Directivity Enhancement of the Patch, SRR and Omega Unit Cells as Fabry-Perot Superstrate," *The 2nd Asian Symp. on Electromagn. & Photon. Eng.*, pp. 147-148, Iran, August 2013.
- [37] J. B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins, and W.J. Stewart, "Low frequency plasmons in thin-wire structures," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 10, pp. 4785-4809, 1998.