

## به کارگیری ساختارهای EBG به منظور افزایش پهنای باند و دایرکتیویتهی آنتن میکرواستریپ

فرهاد خسروی افوسی<sup>۱</sup>، کارشناس ارشد، محمدنقی آذرمنش<sup>۲</sup>، استاد، جواد نوری نیا<sup>۳</sup>، دانشیار  
 ۱-دانشگاه آزاد اسلامی - واحد فریدن - گروه برق و کامپیوتر - اصفهان - ایران - f.khosravi2020@gmail.com  
 ۲-دانشکده مهندسی برق دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - m.azarmanesh@urmia.ac.ir  
 ۳-دانشکده مهندسی برق دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - j.nourinia@urmia.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله طرحی جدید از یک آنتن محفظه تشدیدی به همراه ساختار باند شکاف الکترومغناطیسی که به عنوان یک سطح انتخاب کننده فرکانس مورد استفاده قرار می گیرد معرفی می شود. تاثیر لایه سوپراستریپ بر روی تلفات برگشتی آنتن میکرواستریپ که توسط پروب تغذیه می شود مورد آزمایش قرار می گیرد. جهت افزایش بازده کل ساختار شامل آنتن میکرواستریپ و لایه سوپراستریپ باید تطبیق امپدانس مناسبی صورت پذیرد. با تغییر فاصله ما بین لایه سوپراستریپ و آنتن می توان به فرکانس های کاری متفاوتی دست یافت. در طرح نهایی پهنای باندی حدود ۱۲ درصد با دایرکتیویتهای بیش از ۱۴dB حاصل می شود.

**واژه های کلیدی:** باند شکاف الکترومغناطیسی، آنتن میکرواستریپ، سوپراستریپ، ساختار انتخاب کننده ی فرکانس، فرکانس معیوب.

## Using Electromagnetic Bandgap Structures to Enhance the Bandwidth and Directivity of Microstrip Antenna

F. Khosravi Afoosi, M. N. Azarmanesh, J. Nourinia

**Abstract:** In this paper, we present a new design of a high directive electromagnetic band gap (EBG) resonator antenna that utilizes a single layer of a taper compact uniplanar-compact EBG (UC-EBG) as a superstrate. The influence of EBG superstrates over return loss of the probe-fed micro strip antenna (PFMA) has been studied. It is required to have proper impedance matching to increase the efficiency of the whole structure, including the PFMA and EBG superstrate. The different operating frequencies by adjusting the distance of superstrate layer from printed patch antenna are obtained. The final design have a bandwidth of about 12% with directivity more than 14dB.

**Keywords:** Electromagnetic bandgap, microstrip antenna, superstrate, frequency selective surfaces, defect frequency.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۲/۱/۱۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۲/۷/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۷/۲۷

نام نویسنده ی مسئول: فرهاد خسروی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - اصفهان - داران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد فریدن - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

ساختارهای (EBG)، آرایه‌های پریودیکی هستند که از مواد دی‌الکتریک، فلزی و یا ترکیبی از فلز و دی‌الکتریک تشکیل می‌شوند. ساختارهای EBG از انتشار امواج در جهت خاص و فرکانس خاص جلوگیری می‌کنند، لذا می‌توانند در فیلتر کردن به کار گرفته شوند [۱]. این ساختارها به دلایل متفاوتی در آنتن‌ها به کار گرفته می‌شوند [۲]. در مواردی ساختارهای EBG دوبعدی به عنوان زیرلایه‌ی آنتن میکرواستریپ برای محدود کردن امواج سطحی تحت عنوان سطوح امپدانس بالا به کار گرفته می‌شوند [۳-۶]. سطوح مصنوعی همانند سطوح هادی مغناطیسی نیز به منظور کاهش عرض مقطع آنتن‌ها نوعی دیگر از نحوه‌ی به کارگیری ساختارهای EBG است [۷-۱۱]. استفاده در آنتن‌های رزونانوری با دایرکتیویته‌ی بالا نمونه‌ی دیگری از کاربرد ساختارهای EBG است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. اساس کار در این نمونه‌ی اخیر استفاده از فرکانس‌های معیوب ایجاد شده توسط ساختار EBG است. اگر منبع تشعشع اصلی توسط ساختار EBG احاطه شود تحت شرایط خاص امکان ایجاد پترن تشعشعی با دایرکتیویته‌ی بالا فراهم می‌شود. این نمونه در ساختار شکل (۱-الف) نشان داده شده است. آرایش‌های متفاوتی از ساختارهای EBG در طراحی آنتن‌های رزونانوری با بهره‌ی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن جمله می‌توان به صفحات چندلایه‌ی ساخته شده توسط میله‌هایی از جنس فلز و مواد دی‌الکتریک [۱۴-۱۲]، صفحات دی‌الکتریک چندلایه [۱۷-۱۵] و Frequency Selective Surfaces (FSS) که به صورت چند لایه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹ و ۱۸]، اشاره کرد.

سهولت به کارگیری FSS به عنوان سوپرستریپ برای آنتن‌های پیچ و دریچه‌ای قابل توجه است. هدف رسیدن هم‌زمان به بهره‌ی تشعشعی بالا به همراه تلفات برگشتی کم است و این امکان‌پذیر نیست مگر این که کل ساختار تطبیق مناسبی با تغذیه داشته باشد. انواع متنوعی از FSSها وجود دارد که می‌توان از آن‌ها به عنوان لایه‌ی سوپرستریپ استفاده کرد [۲]. استفاده از FSSهای حلقوی که قابلیت چندباندی را فراهم می‌کنند نیز مورد توجه قرار گرفته است [۲۲-۲۰]. تاثیر ابعاد حلقه‌های متفاوت و نیز مقایسه‌ای بین این نوع FSS با انواع دیگر نیز صورت گرفته است [۲۳]. تقارن در هندسه‌ی FSS خاصیتی است که باعث می‌شود، ساختار در برابر موج تابشی با پلاریزاسیون افقی و عمودی رفتار یکسانی نشان دهد.

در ادامه ابتدا برای رسیدن به یک بینش، کل ساختار را به عنوان یک محفظه‌ی تشدید در نظر گرفته و به تحلیل آن توسط مدل پرتوی نور پرداخته می‌شود. سپس با استفاده از نرم‌افزارهای HFSS و Ansoft Designer به طراحی سلول واحد و نحوه‌ی به کارگیری FSS جدیدی در نقش لایه‌ی سوپرستریپ پرداخته و در نهایت به بررسی کل ساختار به منظور طراحی نهایی می‌پردازیم.

## ۲- تحلیل

توسط مدل هندسی نوری ساده می‌توان عملکرد ساختار را به صورت محفظه‌ی تشدید تشریح کرد. تحلیل پرتوی نوری در تشریح ساختارهایی که شامل دو سطح منعکس کننده هستند قابل به کارگیری است [۲۴]. این تحلیل را می‌توان برای طراحی آنتن‌های بهره بالا نیز به کار گرفت. در گذشته آنتن‌های مسطح با دایرکتیویته‌ی بالا متشکل از صفحه‌ی زمین، سطح Partially Reflective Surface (PRS) به عنوان سوپرستریپ و منبع تشعشعی ساده با استفاده از این روش مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۶ و ۲۵]. در این موارد سطح بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود که این فرض باعث نادیده گرفتن اثر لبه‌ای و لذا صرف نظر از مدهای بالاتر تزویجی می‌گردد. اگرچه روش اشاره شده تقریبی است و لیکن درک با ارزشی در مورد عملکرد آنتن‌های بهره بالا داده و خط مشی برای طراحی موفق است. تحلیل به صورت مختصر در ادامه آمده است.

در شکل (۱-ب) مدل محفظه‌ی تشدید ساختار نشان داده شده است. محفظه‌ی تشدید از صفحه‌ی زمین و PRS که در فاصله‌ی  $d$  از زمین قرار دارد تشکیل شده است. PRS مسطح همگن فرض شده است. عملکرد آنتن را می‌توان با تعقیب مسیر امواج که به صورت انعکاس در محفظه‌ی تشدید است توضیح داد. تغییر فاز موج توسط طول مسیر، فاز صفحه‌ی زمین Perfect Electric Conductor (PEC) و فاز ضریب انعکاس لایه‌ی PRS ایجاد می‌شود. توان انتقالی را می‌توان ناشی از تداخل امواج انتقال یافته از PRS در نظر گرفت. بنابراین می‌توان دایرکتیویته‌ی محفظه‌ی تشدید را با استفاده از فرمول (۱) به دست آورد [۲۶ و ۲۵].

$$D = \frac{P_T}{P_i} = \frac{1-R^2}{1+R^2-2R\cos[\Delta\theta]} \quad (1)$$

که در آن  $R = \text{Re}^{j\theta_R}$  ضریب انعکاس مختلط PRS،  $P_T$  توان انتقالی و  $P_i$  توان منبع تحریک است. به آسانی می‌توان حالت تشدید را با اعمال شرط اختلاف فاز صفر یا ضرایب زوجی از  $\pi$  برای امواج انتقالی، ایجاد کرد. در رابطه (۱)  $\Delta\theta$  به صورت زیر می‌باشد:

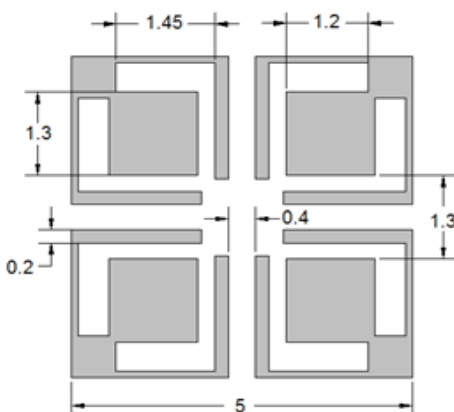
$$\Delta\theta = \theta_R - \pi - \frac{2\pi}{\lambda} 2d = 2N\pi, N = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

$$d = \left( \frac{\theta_R}{\pi} - 1 \right) \frac{\lambda}{4} + N \frac{\lambda}{2} \quad \text{یا}$$

در رابطه (۲)  $\theta_R$  فاز ناشی از PRS،  $\pi$  فاز PEC و  $\frac{2\pi}{\lambda} 2d$  اختلاف فاز ناشی از طول مسیر می‌باشد. دایرکتیویته‌ی بیشینه را می‌توان با قرار دادن رابطه‌ی (۲) در رابطه‌ی (۱) به صورت زیر به دست آورد.

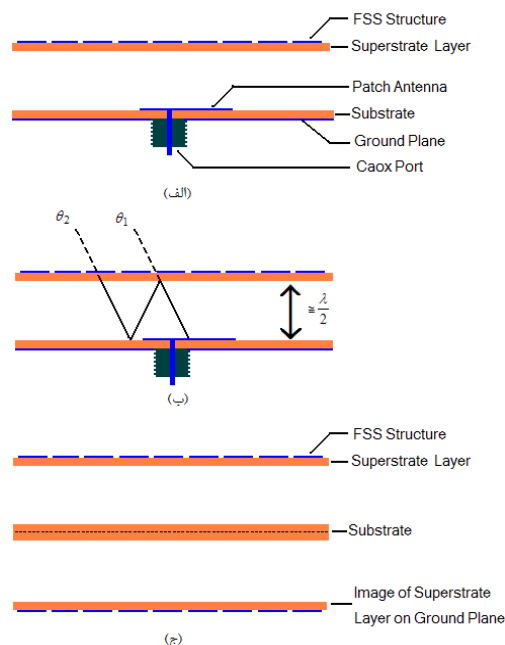
$$D_{\max} = \frac{1+R}{1-R} \quad (3)$$

باید مقدار ضریب انعکاس سطح PRS به مقدار واحد نزدیک باشد. در ضمن مشخص شد که این شرط با رعایت فاصله‌ی نصف طول موج مابین عنصر تشعشعی و لایه‌ی سوپراستریت ارضا می‌شود. در این قسمت با استفاده از تئوری تصویر و نرم‌افزار HFSS به بررسی دقیق این مورد پرداخته می‌شود. با در نظر گرفتن تصویر لایه‌ی سوپراستریت نسبت به صفحه‌ی زمین PEC می‌توان از صفحه‌ی زمین صرف‌نظر کرده و کل ساختار را مانند شکل (۱-ج) تصور کرد، لازم به ذکر است که در این شکل عنصر تشعشعی مشخص نشده است. حال برای بررسی مشخصات این ساختار به سراغ یک عنصر واحد از لایه‌ی FSS و اعمال شرایط مرزی پریودیک و شبیه‌سازی آن می‌رویم. همان گونه که اشاره شد ساختارهای FSS متنوعی وجود دارد که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد اما در این مقاله به ارائه ساختار جدیدی پرداخته می‌شود. یک سلول از این ساختار در شکل (۲) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن فرکانس کاری ۱۰/۵GHz، لایه‌ی FSS را در حدود ۱۴mm (نصف طول‌موج)، بالاتر از صفحه‌ی زمین بر روی زیرلایه‌ی RT/duroid5870 با ثابت دی‌الکتریک ۲/۳۳ و ضخامت ۱/۶mm قرار داده و جهت به دست آوردن منحنی‌های ضریب انتقال و ضریب انعکاس بر حسب فرکانس با در نظر گرفتن تئوری تصویر، از شبیه‌سازی با نرم‌افزار HFSS استفاده می‌کنیم. ضریب انتقال بر حسب فرکانس به ازای مقادیر متفاوت از d در شکل (۳) نشان داده شده است. با دقت در شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد که منحنی‌های مربوط به ضریب انتقال در فرکانس‌هایی به مقدار صفر نزدیک می‌شود. این فرکانس‌ها، همان فرکانس‌های معیوبی است که در بخش (۱) به آن اشاره شد. فرکانس‌های معیوب را با توجه به نحوه‌ی توزیع میدان الکتریکی در صفحه‌ی عمود بر سطح FSS به دو دسته‌ی مد زوج و مد فرد تقسیم می‌شوند. فرکانس‌های مد زوج با توجه به صفر بودن میدان الکتریکی در محل صفحه‌ی زمین مورد توجه قرار می‌گیرد. مدهای زوج و فرد در شکل (۳) مشخص شده‌اند. با دقت در نمودار ضریب انتقال با توجه به تمایل به کارگیری مدهای زوج نمودار مربوط به  $d = 14/5\text{mm}$  از لحاظ پهنای باند شرایط بهتری از خود نشان می‌دهد.



شکل (۲): ساختار FSS جدید، کلیه‌ی ابعاد بر حسب میلی‌متر

رابطه‌ی (۳) بیانگر این مورد است که، دایرکتیویته‌ی بیشینه تابعی از اندازه‌ی ضریب انعکاس PRS است. با توجه به تحلیل فوق برای تحقق دایرکتیویته‌ی بیشینه ضخامت محفظه‌ی تشدید باید حدود نصف طول موج در نظر گرفته شود. در این حالت ضریب انعکاس R نزدیک مقدار واحد شده و به دنبال آن مقدار دایرکتیویته‌ی بزرگی حاصل می‌شود.



شکل (۱): (الف) آنتن پیچ با تغذیه‌ی کوآکسیال به همراه لایه‌ی سوپراستریت (ب) مدل هندسی پرتوی انعکاسی درون محفظه‌ی تشدید (ج) استفاده از تئوری تصویر برای آنالیز ساختار EBG

### ۳- طراحی آنتن پیچ و ساختار FSS به عنوان لایه سوپراستریت به صورت جداگانه

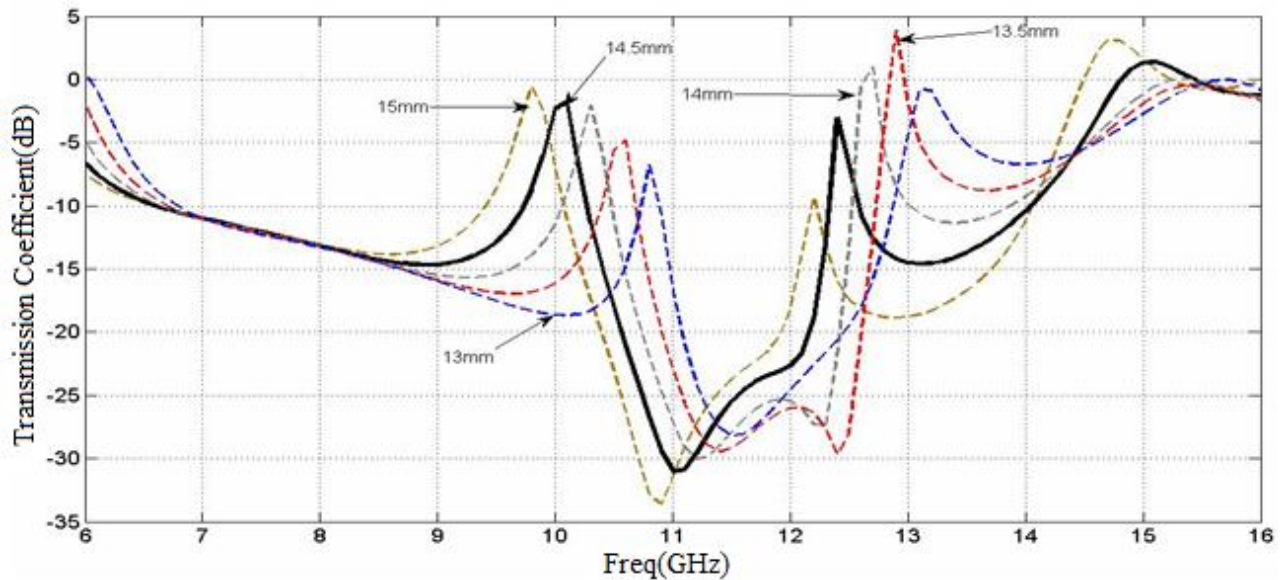
در این قسمت به ترتیب به طراحی لایه‌ی سوپراستریت و آنتن پیچ به صورت جداگانه پرداخته می‌شود. ضریب انتقال لایه‌ی سوپراستریت با استفاده از نرم‌افزار Ansoft Designer به منظور تعیین فرکانس‌های معیوب ایجاد شده توسط ساختار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه آنتن پیچ به صورت منفرد شبیه‌سازی شده و خصوصیات تشعشعی آن برای مقایسه مشخص می‌شود.

### ۳-۱- شبیه‌سازی و طراحی ساختار FSS

در بخش قبل این نتیجه حاصل شد که برای داشتن دایرکتیویته‌ی بیشینه

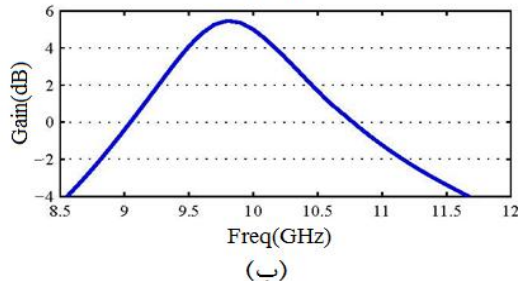
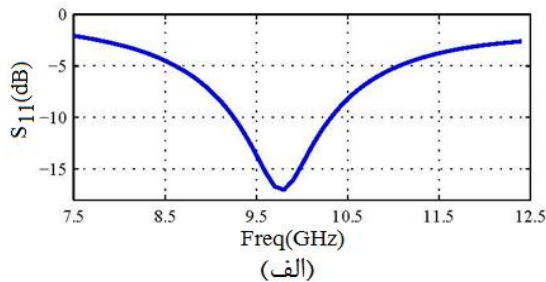
فرکانسی که در این شرایط فراهم شده  $10/2$  GHz است. برای مقایسه‌ی نتیجه شبیه‌سازی با نتیجه‌ای که با تحلیل به صورت مدل محافظه‌ی تشدید صورت گرفته، نمودار ضریب انعکاس این ساختار از طریق شبیه‌سازی با HFSS در شکل (۴) آورده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، مقدار ضریب انعکاس در نزدیک فرکانس

برای  $10/2$  GHz به مقدار واحد نزدیک است. پس می‌توان نتیجه گرفت آنچه از تحلیل به روش محافظه‌ی تشدید استنباط شد درست است. تاکنون ساختار FSS مطلوب و فاصله‌ی مناسب میان صفحه‌ی زمین با آن طراحی شده است. در قسمت بعد به طراحی عنصر تشعشعی اصلی که آنتن پچ مستطیلی است پرداخته می‌شود.



شکل (۳): نمودار ضریب انتقال بر حسب فرکانس به ازای مقادیر متفاوت d.

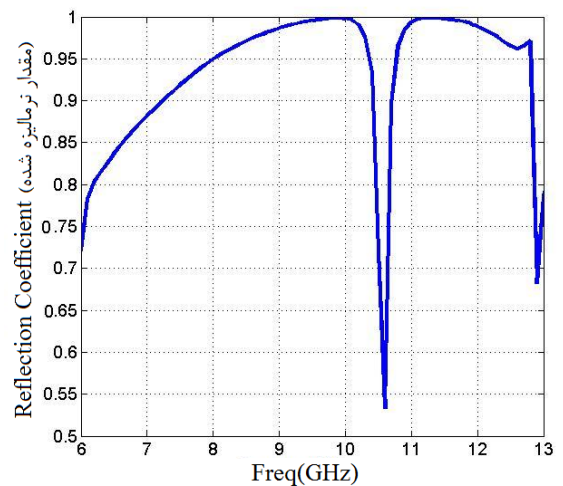
داده شده است. پهنای باند فرکانسی آنتن با معیار  $-10$  dB حدود ۴ درصد و بهره‌ی آن در فرکانس  $9/8$  GHz نزدیک به ۶ dB برای یک آنتن پچ قابل قبول است



شکل (۵): خصوصیات تشعشعی آنتن پچ مستطیلی (الف) تلفات برگشتی

#### ۴- تحلیل کل ساختار

ترکیب آنتن با لایه‌ی FSS-ای که به عنوان لایه‌ی سوپراستریت مورد استفاده قرار گرفته تشکیل یک آنتن رزونانوری با دایرکتیویته‌ی بالا

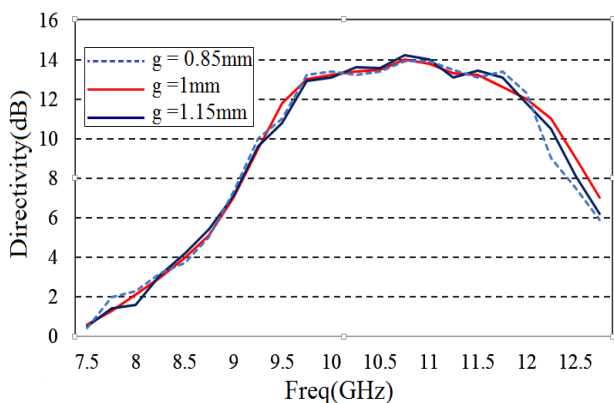


شکل (۴): ضریب انعکاس بر حسب فرکانس برای  $d=14/5$  mm

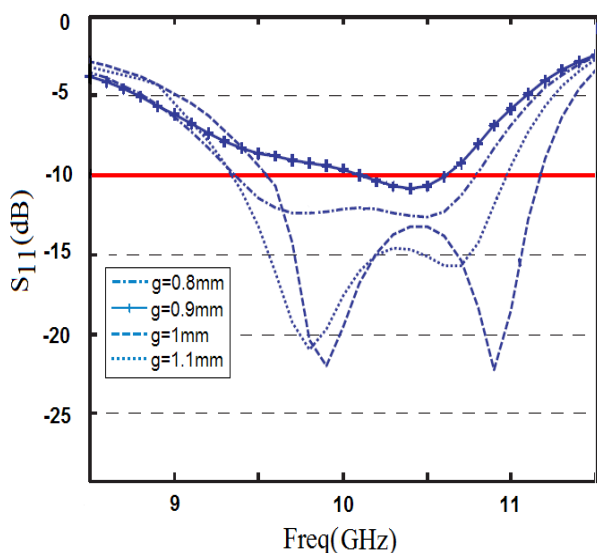
#### ۳-۲- آنتن پچ به عنوان عنصر تشعشعی اصلی

ابعاد آنتن مورد استفاده در این مقاله یک آنتن پچ مستطیلی با ابعاد  $7 \text{ mm} \times 8/9 \text{ mm}$  است. این آنتن بر روی زیرلایه‌ی از نوع RT/duroid5870 با ثابت دی‌الکتریک  $2/33$  و ضخامت  $1/6 \text{ mm}$  با تغذیه‌ی کواکسیال برای کار در فرکانسی نزدیک به  $10$  GHz طراحی شده است. پروب تغذیه در فاصله‌ی  $3/5 \text{ mm}$  از لبه‌ی پچ در راستای طول و  $3/5 \text{ mm}$  در راستای عرض آن قرار دارد. نمودار تلفات برگشتی و بهره‌ی آنتن که توسط نرم‌افزار Ansoft Designer به دست آمده در شکل (۵) نشان

بر روی دایرکتیویته‌ی آنتن بوده و می‌توان مقدار آن را مستقل از مکان پروب تغذیه فرض کرد. این مورد در شکل (۷) نشان داده شده است در این شکل فاصله‌ی پروب از مرکز پیچ با  $g$  نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای بررسی اثر مکان پروب در مقدار تلفات برگشتی در شکل (۸) نشان داده شده است.



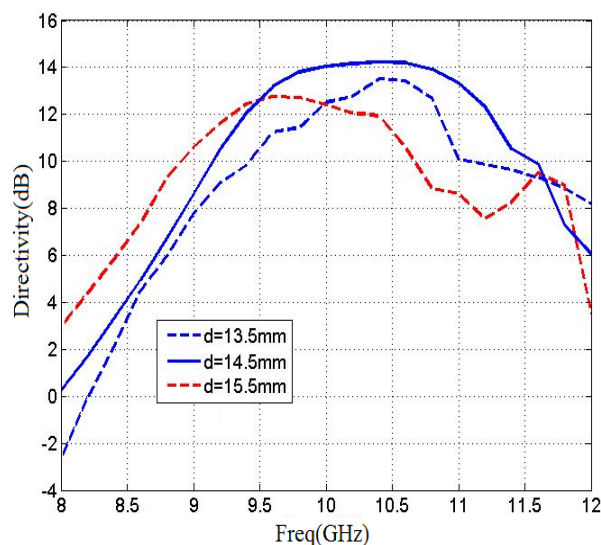
شکل (۷): نمودار دایرکتیویته‌ی آنتن با لایه‌ی سوپرستریت برای مقادیر متفاوت از  $g$



شکل (۸): تلفات برگشتی آنتن با لایه‌ی سوپرستریت برای مقادیر متفاوت از  $g$

در شکل (۸) تاثیر مقدار  $g$  در تلفات برگشتی مشهود است و با استفاده از آن می‌توان مقدار  $g=1\text{mm}$  را به عنوان گزینه‌ی مناسبی انتخاب کرد. چرا که با تلفات برگشتی کم، پهنای باندهای محدود  $14/5$  درصد با معیار  $-10\text{dB}$  را پشتیبانی می‌کند که در مقایسه با پهنای باندهای  $4$  درصدی آنتن منفرد قابل توجه است. در طرح نهایی برای  $g$ ، این مقدار در نظر گرفته شده است. مورد دیگری که در زمینه‌ی طراحی این نوع آنتن باید مورد توجه قرار گیرد ابعاد لایه‌ی سوپرستریت است. در طراحی قسمت قبل مشاهده شد که با انتخاب لایه‌ی سوپرستریت به ابعاد  $\lambda_{10\text{GHz}} \times \lambda_{10\text{GHz}}$  می‌توان به مقدار دایرکتیویته‌ای بهتر از  $14\text{dB}$  دست پیدا کرد. دایرکتیویته‌های بالاتر از این با افزایش ابعاد لایه‌ی سوپرستریت قابل دسترسی می‌باشد و این مورد را می‌توان به صورت زیر توجیه کرد. آنچه که تئوری آنتن در مورد افزایش

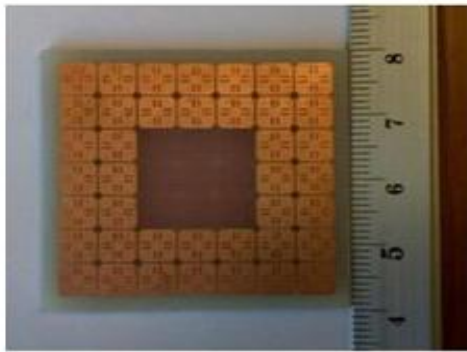
می‌دهد. در این قسمت لایه‌ی FSS را با ابعاد  $\lambda_{10\text{GHz}} \times \lambda_{10\text{GHz}}$  در بالای آنتن اضافه می‌شود. با تکیه بر نتایجی که تاکنون از شبیه‌سازی‌ها به دست آمده انتظار می‌رود که آنتن در فرکانسی حدود  $10\text{GHz}$  از خود تشدید نشان دهد. علت استفاده از لفظ حدود به دلیل تاثیر لایه‌ی سوپرستریت بر روی آنتن و تطبیق آن با خط تغذیه است. چرا که همان گونه که گفته شد، لایه‌ی سوپرستریت مشابه باری برای آنتن است و بر روی تطبیق امپدانس آن تاثیر می‌گذارد. نتایج شبیه‌سازی کل ساختار برای نشان دادن تاثیر لایه‌ی سوپرستریت و هم چنین مقادیر  $d$  در شکل (۶) ترسیم شده است. همان گونه که در شکل مشخص است نمودار خط پر که مربوط به  $d=14/5\text{mm}$  در مقایسه با دو نمودار دیگر از شرایط بهتری برخوردار است و نه تنها مقدار دایرکتیویته‌ی بیشتری را ایجاد کرده بلکه در گسترده‌ی وسیع‌تری نسبت به دو نمودار دیگر این حالت را حفظ کرده است. با مقایسه‌ی شکل‌های (۵) و (۶) می‌توان تاثیر لایه‌ی سوپرستریت، به صورت افزایش  $8\text{dB}$  در مقدار دایرکتیویته، را به وضوح مشاهده کرد. در بخش بعد به بررسی مقدار تلفاتی برگشتی آنتن در حضور لایه‌ی سوپرستریت پرداخته شده و با تغییر مکان پروب، محل مناسب جهت ایجاد تلفات برگشتی کم، مشخص می‌شود.



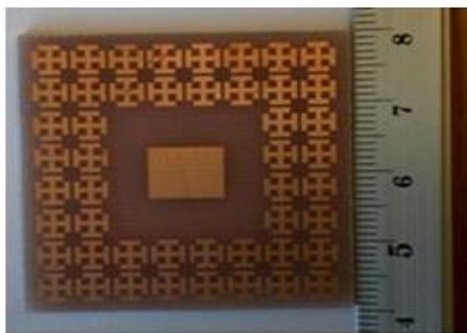
شکل (۶): نمودار دایرکتیویته‌ی آنتن با لایه‌ی سوپرستریت برای مقادیر متفاوت از  $d$

#### ۴-۱- اثر مکان پروب تغذیه بر روی پارامترهای تشعشی آنتن

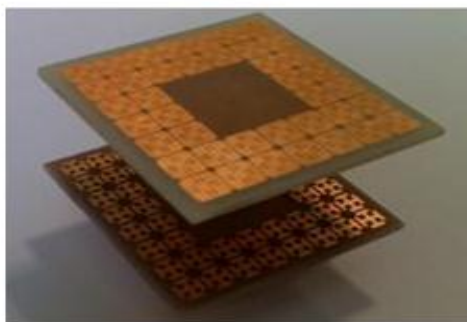
دایرکتیویته و تلفات برگشتی آنتن برای  $d=14/5\text{mm}$  و مکان‌های متفاوت پروب نسبت به مرکز پیچ برای محل تغذیه بررسی می‌شود. مشاهده می‌شود که با وجود دایرکتیویته‌ی قابل توجه به دلیل مقدار زیاد تلفات برگشتی، بازده تشعشی آنتن کم است و همین طور پهنای باند آنتن در مقایسه با حالت بدون لایه‌ی سوپرستریت تغییر چشم‌گیری نکرده است. به همین منظور با تغییر مکان پروب تغذیه ب این مشکل را حل کرد. نکته‌ی جالب توجه، تاثیر کم تغییر مکان پروب



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۹): نمایی از آنتن بهره بالای پیشنهادی ساخته شده (الف) سطح بالایی لایه سوپرستریت (ب) آنتن پیچ و ساختار متناوب اطراف آن قرار گرفته در لایه تحتانی (ج) نمایی از کل ساختار متشکل از لایه سوپرستریت و آنتن پیچ به همراه آرایه‌های FSS.

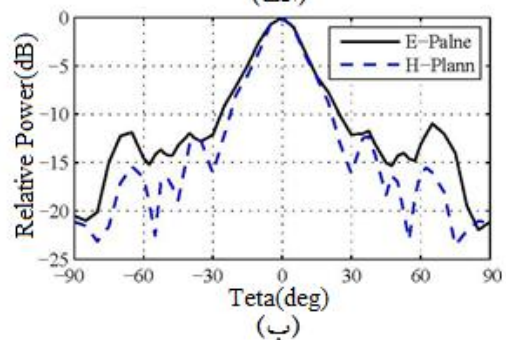
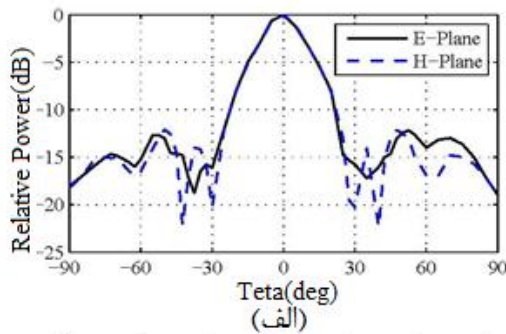
دایرکتیویته بیان می‌کند به این صورت است که افزایش سطح مقطع دریچه‌ی تشعشعی آنتن یکی از عوامل موثر در افزایش مقدار بهره و دایرکتیویته است، و لیکن در مسیر افزایش دایرکتیویته دو مانع خودنمایی می‌کنند. اولین مورد پهنای باند ساختار است که با افزایش دایرکتیویته، کاهش محسوسی در آن مشاهده می‌شود. در نتیجه در این زمینه باید مصالحه‌ای مابین مقدار دایرکتیویته و پهنای باند مورد نظر صورت پذیرد. دومین مورد قابل ذکر را می‌توان این گونه بیان کرد که با افزایش ابعاد لایه سوپرستریت بعد از گذشتن از مقداری مشخص تاثیر به سزایی در مقدار دایرکتیویته مشاهده نمی‌شود. این مقدار را می‌توان با بررسی میدان نزدیک ساختار در محل لایه سوپرستریت مشخص کرد. برای این منظور، پترن تشعشعی میدان نزدیک آنتن را ترسیم کرده، در محدوده‌ای که اندازه‌ی میدان کماکان مقدار قابل توجهی دارد افزایش اندازه‌ی لایه سوپرستریت باعث افزایش دایرکتیویته می‌شود.

## ۵- طرح نهایی

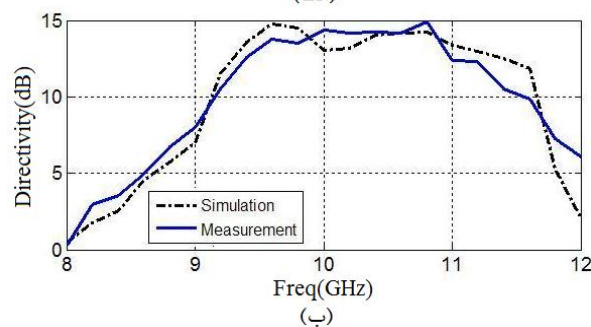
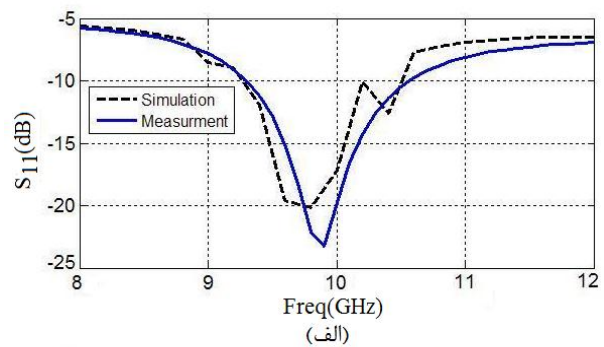
در این قسمت ساختار طراحی شده نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمای کلی ساختار در شکل (۹) نشان داده شده است. لایه FSS مشابه شکل (۲) با همان ابعاد به صورت آرایه  $7 \times 7$  بر روی زیرلایه RT/duroid5870 با ثابت دی‌الکتریک  $2/33$  و ضخامت  $1/6$ mm قرار گرفته است. با این انتخاب اندازه ابعاد لایه FSS حدود  $35\text{mm} \times 35\text{mm}$  می‌شود. آنتن مورد استفاده با ابعاد  $7\text{mm} \times 8/9\text{mm}$  یک آنتن پیچ مستطیلی است که بر روی زیرلایه RT/duroid5870 با ثابت دی‌الکتریک  $2/33$  و ضخامت  $1/6$ mm ساخته شده است. محل تغذیه کوکاسیال به مقدار  $1\text{mm}$  از وسط پیچ در راستای طول آن قرار گرفته است. تحت تاثیر تغییر مکان پروب مقدار d مناسب برابر  $14/3\text{m}$  انتخاب شده که به مقدار نصف طول موج نزدیک است. شبیه‌سازی کل ساختار توسط نرم‌افزار Ansoft Designer صورت گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی تلفات برگشتی و دایرکتیویته‌ی آنتن در شکل (۱۰) با نتایج اندازه‌گیری شده برای مقایسه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده‌ی تجربی توافق خوبی با هم دارند. اختلاف ناچیزی که مشاهده می‌شود را می‌توان ناشی از خطا در ساخت دانست، به خصوص که دو لایه‌ی تشکیل دهنده‌ی آنتن باید به طور کامل با هم موازی باشند که این امر به آسانی امکان پذیر نیست. با توجه به شکل (۱۰) مشخص می‌شود که نه تنها پهنای باند آنتن به حدود ۱۲ درصد رسیده، در این محدوده دایرکتیویته بیش از  $14\text{dB}$  است. شکل (۱۱) پترن‌های تشعشعی صفحه‌ی E- و صفحه‌ی H- را در فرکانس‌های  $9/8\text{GHz}$  و  $10/4\text{GHz}$  نشان می‌دهد. جدول (۱) که مقایسه‌ای مابین طرح پیشنهادی و موارد مشابه را نشان می‌دهد که کارآمد بودن طرح را آشکار می‌نماید.





شکل (۱۱): پترن تشعشعی صفحه E- و صفحه H- آنتن رزونانسی بهره بالا (الف) در فرکانس ۹/۸GHz (ب) ۱۰/۴GHz



شکل (۱۰): نتایج اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی شده تلفات برگشتی (الف) و دایرکتیویته (ب)

جدول (۱): مقایسه طرح پیشنهادی با طرح‌های مشابه

شماره	لایه سوپرستریت	ابعاد سلول واحد	ابعاد کل ساختار	فرکانس (GHz)	درصد پهنای باند	دایرکتیویته (dB)
۱	استوانه‌هایی دی‌الکتریک [15]	-	$3/73\lambda \times 2/73\lambda \times 1/36\lambda$	۱۲/۷	۶/۹	۱۷/۱
۲	FSS مربعی با زمین AMC [26]	$0/28\lambda \times 0/28\lambda$	$3/49\lambda \times 2/49\lambda \times 0/54\lambda$	۱۴/۳	۲	۱۹
۳	FSS حلقوی [20]	$0/23\lambda \times 0/23\lambda$	$1/12\lambda \times 1/12\lambda \times 0/51\lambda$	۱۴	۱۱	۱۴
۴	FSS حلقوی دو بانندی [22]	$0/28\lambda \times 0/28\lambda$	$1/73\lambda \times 1/73\lambda \times 0/52\lambda$	۱۴/۲ و ۱۱/۲	۶/۵ و ۵	۱۲/۵ و ۱۶/۵
۵	FSS پیشنهادی	$0/16\lambda \times 0/16\lambda$	$1/14\lambda \times 1/14\lambda \times 0/47\lambda$	۹/۸	۱۳/۳	۱۴

## ۶- نتیجه

در این مقاله مراحل طراحی آنتن رزونانسی، متشکل از آنتن میکرواستریپ تغذیه شده با پروب و لایه سوپرستریت مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نرم‌افزارهای HFSS و Ansoft Designer، FSS ای که به عنوان لایه سوپرستریت در نظر گرفته شد برای طرح نهایی، طراحی و شبیه‌سازی شد. در نهایت مشاهده شد که می‌توان با استفاده از لایه سوپرستریت نه تنها به دایرکتیویته‌ی بالایی رسید، بلکه می‌توان از آن به عنوان یک بار برای آنتن جهت تطبیق مناسب در تغذیه استفاده کرد. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده از هم‌خوانی خوبی برخوردار هستند. این روش را می‌توان در آنتن‌های میکرواستریپ تغذیه شده با خط میکرواستریپ و یا اسلات نیز به کار

گرفت. هم چنین به کارگیری لایه‌های متعدد سوپرستریت به منظور رسیدن به فرکانس‌های رزونانسی متفاوت جهت کاربردهای چندفرکانسی برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

## مراجع

- [1] A. Pirhadi, F. Keshmiri and M. Hakkak, "Design of dualband low profile high directive EBG resonator antenna, using single layer frequency selective surface superstrate," IEEE APS/USNC/U RSI International Symposium, Albuquerque, New Mexico, USA, July 9–14, 2006.
- [2] P. D. Maagt, R. Gonzalo, Y. C. Vardaxoglou and J. M. Baracco, "Electromagnetic bandgap antenna antennas and components for microwave and (sub) millimeter wave

- Optical Technology Letters, Vol. 47, No. 2, pp. 107–114, 2005.
- [18] S. Enoch, G. Tayeb, and B. Gralak, "The richness of dispersion relation of electromagnetic bandgap materials," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 10, pp. 2659–2666, 2003.
- [19] Y. J. U. Lee, J. Yeo, K. D. Ko, R. Mittra, Y. Lee and W. S. Park, "A novel design technique for control of defect frequencies of an electromagnetic bandgap (EBG) superstrate for dual-band directivity enhancement," Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 42, No. 1, pp. 25–31, 2005.
- [20] A. Pirhadi, M. Hakkak and F. Keshmiri, "Bandwidth enhancement of the probe fed microstrip antenna using frequency selective surface as electromagnetic bandgap superstrate," Progress In Electromagnetics Research, PIER 61, pp. 215–230, 2006.
- [21] A. Pirhadi, M. Hakkak, F. Keshmiri and M. Tayarani, "Analysis and design of dual band high directivity EBG resonator antenna using square loop FSS as superstrate layer," Progress In Electromagnetics Research, PIER 70, pp. 1–20, 2007.
- [22] A. Pirhadi, M. Hakkak, F. Keshmiri and R. Karimzadeh Baei, "Design of compact dual band High directive electromagnetic bandgap (EBG) resonator antenna using artificial magnetic conductor," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 6, 2007.
- [23] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra and W. S. Park, "Design of high directivity electromagnetic band gap (EBG) resonator antenna using a frequency selective surface (FSS) superstrate," Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 43, No. 6, pp. 462–467, 2004.
- [24] J. T. Verdeyen, *Laser Electronics*. Engle-wood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, pp. 123–131, 1989.
- [25] J. R. James, S. J. A. Kinany, P. D. Peel and G. Andrasic, "Leaky-wave multiple dichroic beamformers," Electronics Letters, Vol. 25, 1989.
- [26] A. P. Feresidis and J. C. Vardaxoglou, "High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces," IEEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 148, No. 6, pp. 345–350, 2001.
- application," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 10, pp. 2667–2677, 2003.
- [3] C. C. Chang, Y. Qian and T. Itoh, "Analysis and applications of uniplanar compact photonic bandgap structures," Progress In Electromagnetics Research, PIER 41, pp. 211–235, 2003.
- [4] K. Agi, M. Mojahedi, B. Minhas and K. J. Malloy, "The effects of an electromagnetic crystal substrate on a microstrip patch antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 50, No. 4, pp. 451–456, 2002.
- [5] H.-Y. D. Yang and J. Wang, "Surface waves of printed antennas on planar artificial periodic dielectric structures," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 49, No. 3, pp. 444–450, 2001.
- [6] R. F. J. Broas, D. F. Sievenpiper and E. Blonovitch, "An application of high impedance ground planes to phased array antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 4, pp. 1377–1381, 2005.
- [7] D. Sievenpiper, L. Zhang, F. J. Broas, N. G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2059–2074, 1999.
- [8] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 10, pp. 2691–2703, 2003.
- [9] H. Mosallaei and K. Sarabandi, "Antenna miniaturization and bandwidth enhancement using a reactive impedance substrate," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 9, pp. 2403–2414, 2004.
- [10] D. J. Kern, D. H. Werner, A. Monorchio, L. Lanuzza and M. J. Wilhelm, "The design synthesis of multiband artificial magnetic conductors using high impedance frequency selective surfaces," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 1, pp. 8–17, 2005.
- [11] C. R. Simovski and A. A. Sochava, "High-impedance surfaces based on self-resonant grids, Analytical modeling and numerical simulations," Progress In Electromagnetics Research, PIER 43, pp. 239–256, 2003.
- [12] C. Cheype, C. Serier, M. Thevenot, A. Reineix and B. Jecko, "An electromagnetic bandgap resonator antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 50, No. 9, pp. 1285–1290, 2002.
- [13] B.-I. Wu, W. Wang, J. Pacheco, X. Chen, T. Grzegorzcyk and J. A. Kong, "A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain," Progress In Electromagnetics Research, PIER 51, pp. 295–328, 2005.
- [14] Y. J. U. Lee, J. Yeo, R. Mittra, Y. Lee and W. S. Park, "Application of electromagnetic bandgap (EBG) superstrates with controllable defect for a class of patch antennas as spatial angular filters," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 1, pp. 224–235, 2005.
- [15] M. Thevenot, C. Cheype, A. Reineix and B. Jecko, "Directive photonic bandgap antennas," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2115–2122, 1999.
- [16] A. R. Weily, L. Horvath, K. P. Esselle, B. C. Sanders and T. S. Bird, "A planar resonator antenna based on a woodpile EBG material," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 1, pp. 216–223, 2005.
- [17] A. R. Weily, K. P. Esselle, B. C. Sanders and T. S. Bird, "High gain 1-D resonator antenna," Microwave and