

# طراحی و ساخت آنتن شیپوری SIW با استفاده از لنز لوبنبرگ

سید محمد حسینی<sup>۱</sup> نادر کمجانی<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران

[sm\\_hosseini@elec.iust.ac.ir](mailto:sm_hosseini@elec.iust.ac.ir)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت - تهران- ایران

[n\\_komjani@iust.ac.ir](mailto:n_komjani@iust.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله، یک آنتن شیپوری<sup>۱</sup> SIW طراحی و ساخته شده که در آن به منظور افزایش بهره‌ی آنتن، از لنز لوبنبرگ استفاده شده است. استفاده از یک ساختار انتقالی در دهانه تشعشعی آنتن، نسبت جلو به عقب را افزایش داده و منجر به تطبیق امپدانس دهانه آنتن شیپوری با امپدانس فضای آزاد شده است. علاوه بر این با استفاده از این ساختار انتقالی آنتن پیشنهادی کاملاً صفحه‌ای شده است. بدین ترتیب آنتن با استفاده‌ی همزمان از لنز لوبنبرگ و ساختار انتقالی دارای دو ویژگی مهم «صفحه‌ای بودن» و «بهره‌ی بیشینه» می‌باشد. فرکانس کاری آنتن 14.5 GHz و باند فرکانسی آن Ku می‌باشد. آنتن با استفاده از نرم افزار CST شبیه سازی شده و نمونه اولیه آن ساخته شده است. بهره‌ی آنتن در فرکانس 14.5 GHz حدود 10.5 dB است. پهنای باند امپدانس آنتن حدود 14% می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** آنتن شیپوری، لنز لوبنبرگ<sup>۲</sup>، سطوح پیشرفته الکترومغناطیسی<sup>۳</sup>، آنتن جهتی، آنتن صفحه‌ای<sup>۴</sup>، موج سطحی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر نادر کمجانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - نارمک - خیابان حیدر خانی - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده‌ی برق

امروزه سطوح پیشرفته‌ی الکترومغناطیسی، به‌طور روزافزون در ساختارهای مختلف مایکروویو و آنتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این سطوح می‌تواند با رویکردهای مختلفی انجام گیرد. گزینش باند فرکانسی مشخص برای عبور یا عدم عبور موج، ایجاد باند قطع الکترومغناطیسی، دست‌یابی به سطوح با امپدانس بالا و کنترل موج از جمله مهم‌ترین کاربردهای سطوح پیشرفته هستند.

مشخصات انتشاری امواج الکترومغناطیسی عبوری از روی سطوح پیشرفته به منظور کنترل امواج سطحی و یا نشت موج در [۳،۱] مورد بررسی قرار گرفته است. سطوح متناوب یک بعدی [۴]، دو بعدی [۵،۲] و همچنین سطوح دو بعدی ناهمسانگرد<sup>۵</sup> [۷،۶] به منظور کنترل امواج الکترومغناطیسی بررسی شده‌اند. در [۸] آنتن لنز لونیبرگ با استفاده از سطوح امپدانس طراحی شده است که در آن با استفاده از تغییرات امپدانس سطحی در نقاط مختلف ساختار، مشخصات انتشاری موج به منظور دست‌یابی به مشخصه‌ی لنز لونیبرگ، تغییر داده شده‌اند. بدین ترتیب بهره‌آنتن با استفاده از لنز لونیبرگ افزایش داده شده است. با این حال، به دلیل کم بودن ضخامت آنتن، عملکرد آنتن به شدت افت پیدا می‌کند. مهم‌ترین مشکل این آنتن عدم تطبیق دهانه‌ی آنتن با فضای آزاد است. مشکل دیگر آن کاهش نسبت جلوه‌به-عقب<sup>۶</sup> آنتن است. روش‌های مختلفی برای برطرف ساختن این مشکل وجود دارد که بعضی از آن‌ها [۸] از افزایش ابعاد دهانه آنتن و بعضی دیگر [۱۳،۹] از ساختارهای غیر چاپی به منظور تطبیق دهانه‌ی آنتن استفاده می‌کنند که فرایند ساخت را پیچیده می‌سازد و موجب غیرصفحه‌ای شدن آنتن می‌گردد. آنتن‌های صفحه‌ای به دلیل امکان مجتمع شدن با دیگر ادوات صفحه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در کاربردهایی که تابش آنتن در جهت پهلوتاب<sup>۷</sup> باشد، استفاده از آنتن‌های شیپوری صفحه‌ی H، رایج می‌باشد [۹-۱۲]. روش دیگر تطبیق دهانه آنتن که ساختار صفحه‌ای آنتن را نیز حفظ می‌کند، استفاده از لنز دی‌الکتریک در دهانه‌ی آنتن به منظور بهبود تطبیق امپدانس می‌باشد [۱۱،۱۰]. موروته<sup>۸</sup> و همکارانش در [۱۴] روشی به منظور بهبود همزمان تطبیق امپدانس دهانه‌ی آنتن و نسبت جلوه‌به-عقب آنتن ارائه کرده‌اند که در آن از ساختاری انتقالی که روی همان دی‌الکتریک آنتن چاپ می‌شود، استفاده شده است. در این مقاله ما با استفاده از ایده قراردادن لنز لونیبرگ در آنتن که در [۸] بیان شده است به دنبال دستیابی به حداکثر بهره و همچنین استفاده از ایده تطبیق دهانه آنتن [۱۴] به منظور رفع مشکل غیرصفحه‌ای شدن آنتن هستیم.

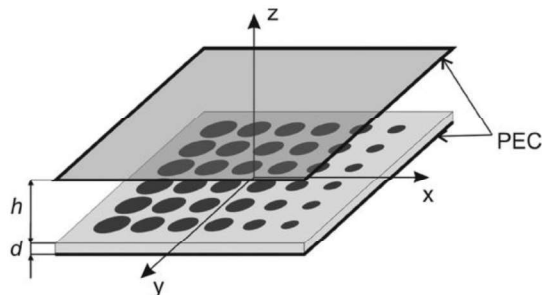
بخش‌های مختلف مقاله‌ی پیش‌رو مطابق زیر است:

در بخش دوم به توضیح روش تحقق لنز و چگونگی دست‌یابی به مشخصات انتشاری مطلوب در ناحیه‌ای از ساختار می‌پردازیم و ارتباط بین تحلیل پراکنندگی عناصر چاپی که به یافتن امپدانس

سطحی می‌انجامد و مشخصات انتشاری ساختار را بیان می‌کنیم. سپس نمودارهای پاشندگی به‌دست آمده را با نتایج تحلیل تمام‌موج مقایسه می‌کنیم. در بخش سوم به ساختار کلی آنتن، تغذیه، استفاده از SIW، تطبیق دهانه‌ی آنتن با فضای آزاد، مشکلات پیش‌روی آن و راه‌حل آن‌ها خواهیم پرداخت. در بخش چهارم نتایج مربوط به شبیه-سازی آنتن را ارائه خواهیم کرد. بخش چهارم نیز به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

## ۲- تحقق لنز لونیبرگ

برای «تحقق لنز» یا به‌طور کلی ایجاد یک ثابت فاز مشخص در یک ساختار روش‌های گوناگونی وجود دارد. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش تشدید عرضی و روش حل عددی مدهای ویژه اشاره کرد. روش تشدید عرضی، روشی عمومی است که برای محاسبه کمیت‌های مختلفی نظیر عدد موج ساختارهای پیچیده‌ی موجبری و همچنین برای به دست آوردن فرکانس تشدید حفره‌های تشدید، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کار با استفاده از معادله‌ی تشدید عرضی، TRE انجام می‌گیرد. برای توضیح روش تشدید عرضی شکل (۱) را در نظر بگیرید. هرکدام از عناصر چاپی در یک سلول واحد قرار دارند. می‌توان هر سلول واحد را در راستای عرضی، معادل یک خط انتقال مشابه شکل (۲) در نظر گرفت که دو سر آن اتصال کوتاه شده است و ادمیتانس عناصر چاپی در میان آن قرار گرفته است.



شکل (۱): عناصر چاپ شده روی دی‌الکتریک در موجبر دو صفحه موازی؛ تغییر ابعاد عناصر چاپی مشخصات انتشاری در محل آن عنصر را تغییر می‌دهد. [۸]

تشدید عرضی بیان می‌دارد که مجموع ادمیتانس دیده شده از دو طرف، در هر مقطع یک خط انتقال برابر صفر می‌باشد. بنابراین با توجه به شکل (۲) می‌توان رابطه‌ی زیر را برقرار دانست:

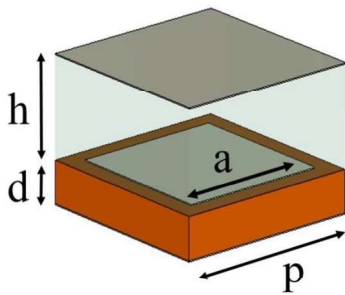
$$Y_{in1} + Y_{in2} + Y_{sheet} = 0 \quad (1)$$

که در آن  $Y_{sheet}$ ، ادمیتانس سطحی یک عنصر چاپی و  $Y_{in1}$  و  $Y_{in2}$  به ترتیب ادمیتانس دیده شده از بالا و پایین عنصر چاپی هستند که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. با فرض این‌که در این ساختار مد TM تحریک و منتشر شود می‌توان روابط (۲) تا (۵) را برقرار دانست [۱۶،۱۷]:



که در آن  $\beta_{eff}$ ، ثابت فاز مؤثر،  $r$  فاصله ی شعاعی از مرکز لنز و شعاع لنز می باشد. ثابت فاز مؤثر، ناشی از قرار گرفتن دو دی الکتریک مختلف در ساختار می باشد.

در این قسمت، طراحی لنز را با استفاده از روش تطبیق صفر و قطب [۱۵] و روش حل عددی مدهای ویژه مورد بررسی قرار خواهیم داد. سلول واحد مورد استفاده برای طراحی لنز لونیبرگ در شکل (۳) نشان داده شده است. زیرلایه ی پایین RO 3010 با ضخامت  $d=25$  mil، زیر لایه ی بالا RO 4003 با ضخامت  $h=60$  mil،  $\epsilon_{r,2}=10.2$ ،  $\epsilon_{r,1}=3.55$  و تناوب سلول واحد  $p=3.15$  mm می باشد.



شکل (۳): نمایش سلول واحد مورد استفاده برای طراحی لنز لونیبرگ؛ در این جا از پچ مربعی به عنوان عنصر چابی برای طراحی لنز استفاده شده است.

شکل (۴) نمودارهای پاشندگی برای مد اول انتشاری در ساختار شکل (۳) را نشان می دهد که با استفاده از روش تطبیق قطب و صفر بدست آمده و با حل تمام موج مورد تایید قرار گرفته شده است. ناحیه زرد رنگ در نمودار شکل (۴) ناحیه ای را نشان می دهد که ثابت انتشار لنز لونیبرگ را در بر می گیرد. همان طور که مشخص است فرکانس 14.6 GHz پایین ترین فرکانسی است که ثابت فازهای مناسب برای طراحی لنز لونیبرگ، توسط ثابت فازهای قابل دست یابی توسط پچ های مربعی، پوشش داده می شود. بنابراین همین فرکانس برای طراحی لنز مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که فرکانس های بالاتر به هیچ وجه برای طراحی لنز مناسب نیستند چرا که نمودارهای پاشندگی برای پچ های مربعی با ابعاد بزرگ (حدود 3mm) حداکثر فرکانس هایی تا حدود 15 GHz را پوشش می دهند و برای فرکانس های بالاتر از آن انتشاری نداریم و همین موضوع سبب افت شدید عملکرد آنتن می شود. از طرفی در فرکانس های پایین تر، ثابت فاز های قابل دستیابی توسط پچ ها، محدوده ثابت فاز های مناسب لنز لونیبرگ را به طور کامل پوشش نمی دهند.

$$Y_{in} = -jY_{0z}^{TM} \cot(\beta_z^{TM} h) \quad (2)$$

$$Y_{0z1}^{TM} = \eta_1^{-1} \frac{\beta_{01}}{\beta_{z1}^{TM}} = \eta_0^{-1} \frac{\beta_0}{\beta_{z1}^{TM}} \epsilon_{r1} \quad (3)$$

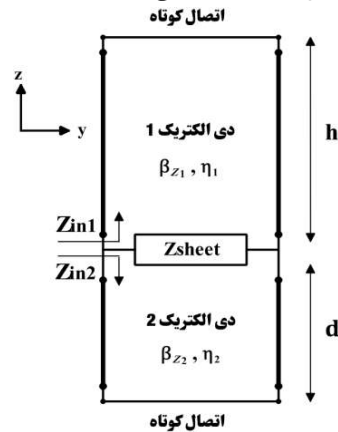
$$Y_{0z2}^{TM} = \eta_2^{-1} \frac{\beta_{02}}{\beta_{z2}^{TM}} = \eta_0^{-1} \frac{\beta_0}{\beta_{z2}^{TM}} \epsilon_{r2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \beta_z &= \sqrt{\beta_d^2 - \beta_t^2} = \beta_d \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_t}{\beta_d}\right)^2} \\ &= \beta_d \sqrt{1 - n^2} \end{aligned} \quad (5)$$

با توجه به روابط (۲) تا (۵) و رابطه ی (۱) می توان نوشت:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\eta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_t}{\beta_{01}}\right)^2} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} \tan(\beta_{01} \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_t}{\beta_{01}}\right)^2} h)} \\ & + \frac{1}{j\eta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_t}{\beta_{02}}\right)^2} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} \tan(\beta_{02} \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_t}{\beta_{02}}\right)^2} d)} \\ & + Y_{sheet}(\beta_t) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

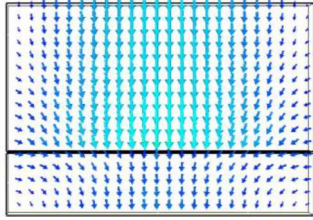
رابطه ی (۶) معادله ی پاشندگی مربوط به این ساختار می باشد. همان طور که در این رابطه مشخص است به ازای هندسه ی مشخصی از ساختار در یک فرکانس مشخص، می توان ثابت فاز در راستای مماسی را تابعی از ادمیتانس پچ دانست. بدین ترتیب می توان با انتخاب  $Y_{sheet}$  مناسب، به ثابت فاز مناسب دست یافت. نکته ی مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که  $Y_{sheet}(\beta_t)$  تابعی از  $\beta_t$  است و در فرکانس های بالا این تابعیت بیشتر می شود.



شکل (۲): مدل خط انتقالی ساختار لنز از مقطع عرضی یک سلول واحد

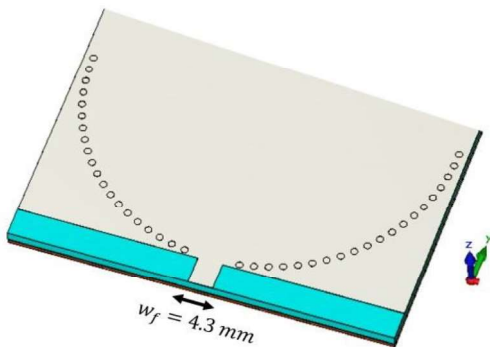
برای به دست آوردن ثابت فاز مناسب لنز لونیبرگ در هر نقطه می توان از رابطه ی زیر استفاده کرد:

$$\beta_t = \beta_{eff} \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (7)$$

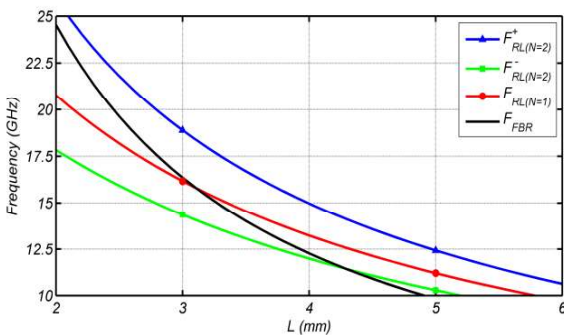


شکل (۶): نمایش میدان‌های الکتریکی مربوط به مد اول انتشاری در ساختار شکل (۳) در صفحه‌ی  $\psi=0$ ؛ میدان‌های الکتریکی در هر دو لایه هم‌فاز هستند و بنابراین تغذیه‌ی مناسب برای تحریک این مد می‌تواند از نوع کابل هم‌محور و یا خط ریزنوار باشد.

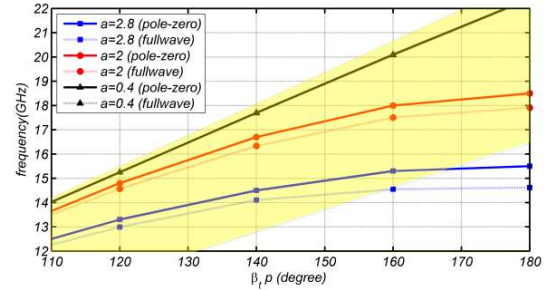
ما برای تغذیه‌ی آنتن از خط ریز نوار استفاده کردیم که علت انتخاب این نوع تغذیه در این ساختار، تطبیق امپدانس بهتر آن می‌باشد. شکل (۷) ابعاد تغذیه و همچنین ساختار SIW را نشان می‌دهد. شعاع  $0.6 \text{ mm}$  و فاصله‌ی مرکز تا مرکز آن ها  $2.4 \text{ mm}$  می‌باشد و روی یک مسیر نیم دایره ای قرار دارند. برای تکمیل طراحی آنتن، باید دهانه‌ی تشعشع را با امپدانس فضای آزاد تطبیق کنیم. برای تطبیق دهانه‌ی تشعشعی آنتن از روش بیان شده در [۱۸،۱۴] استفاده می‌کنیم. بنابر این روش باید از یک ساختار انتقالی برای تطبیق دهانه‌ی آنتن با فضای آزاد استفاده کرد.



شکل (۷): نمایش تغذیه‌ی آنتن با استفاده از خط ریزنوار و همچنین محل قرارگیری SIW؛ استفاده از این نوع تغذیه منجر به تحریک مد اول انتشاری می‌شود.

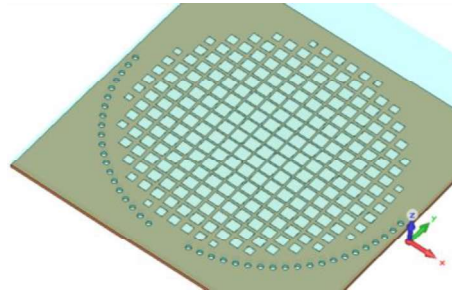


شکل (۸): نمودار فرکانس‌های تشدید و فرکانس بهترین نسبت جلو به عقب بر حسب طول بلوک‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار انتقالی؛ ابعاد و مشخصات ساختار:  $\epsilon_{\text{eff}} = 4.23, s = 0.2 \text{ mm}, h = 2.16 \text{ mm}$



شکل (۴): نمودارهای پاشندگی برای مد اول انتشاری در ساختار شکل (۳) به ازای ابعاد مختلف پیج مربعی با استفاده از روش تطبیق صفر و قطب و روش تمام موج به همراه ناحیه‌ی مناسب برای طراحی لنز لونیبرگ

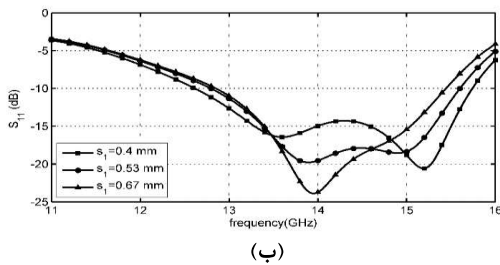
با استفاده از نمودار پاشندگی شکل (۴)، می‌توان رابطه‌ی بین ابعاد پیج مربعی و ثابت فاز مورد نیاز برای تحقق لنز لونیبرگ را به دست آورد. با استفاده از نمودارهای شکل (۴) و رابطه‌ی (۷)، لنز لونیبرگ نشان داده شده در شکل (۵) طراحی شده است.



شکل (۵): لنز لونیبرگ طراحی شده با استفاده از نمودارهای شکل (۴) و رابطه‌ی (۷)؛ ساختار لنز بین دو لایه دی الکتریک چاپ شده است. در شکل بالا، تنها زیرلایه‌ی پایین (RO3010) و لنز روی آن نشان داده شده است.

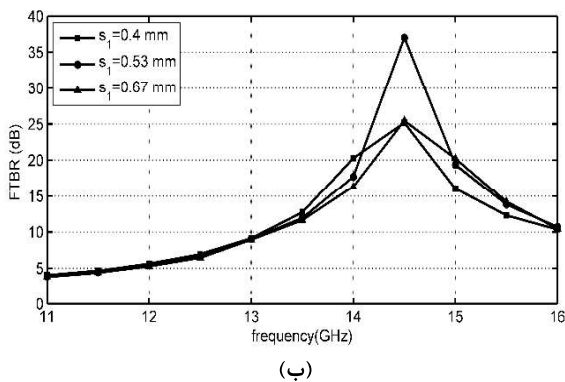
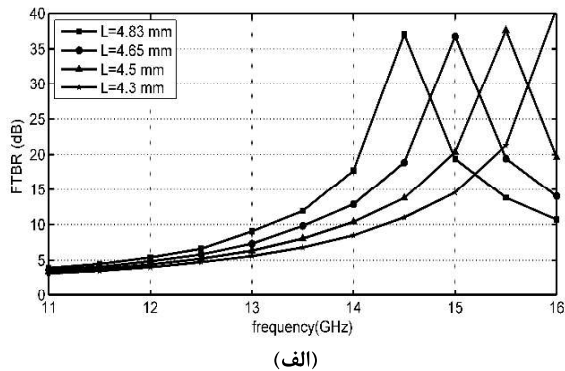
### ۳- ساختار کلی آنتن

در این بخش به ساختار کلی آنتن می‌پردازیم. آنتن طراحی شده، یک آنتن شیپوری صفحه‌ی H است که به منظور جلوگیری از نشت موج از اطراف آنتن و ایجاد گلبرگ‌های فرعی، از تکنولوژی موجبر زیرلایه‌ای مجتمع در آن استفاده شده است. در ابتدا تغذیه‌ی مناسبی برای آنتن طراحی می‌کنیم. میدان‌های الکتریکی مربوط به مد اول انتشاری در این ساختار در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است میدان‌های الکتریکی در هر دو لایه هم‌فاز هستند و بنابراین تغذیه‌ی مناسب برای تحریک این مد می‌تواند از نوع کابل هم‌محور و یا خط ریزنوار باشد.



شکل (۱۰): بررسی پارامتری ابعاد مختلف ساختار انتقالی؛ الف) تغییرات  $S_{11}$  به ازای  $s_1=0.53$  mm و مقادیر مختلف  $L$ ، ب) تغییرات  $S_{11}$  به ازای  $L=4.83$  mm و مقادیر مختلف  $s_1$

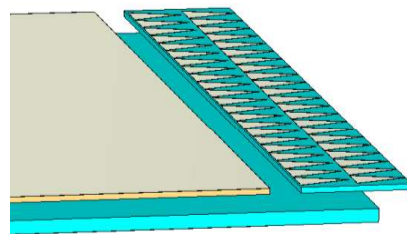
شکل (۱۰ الف) نشان می‌دهد که  $L$  بیشترین تأثیر را در تعیین فرکانس کاری آنتن دارد و در شکل (۱۰ ب) می‌بینیم که افزایش  $s_1$  به افزایش تطبیق آنتن کمک می‌کند. در شکل (۱۱) تغییرات نسبت جلوه‌عقب آنتن بر حسب تغییرات ابعاد ساختار انتقالی نشان داده شده است. شکل (۱۱ الف) نشان می‌دهد که افزایش  $L$  باعث کاهش فرکانسی می‌شود که در آن شاهد بیشترین مقدار FBR هستیم و در شکل (۱۱ ب) می‌بینیم که به ازای  $s_1=0.53$  mm، FBR آنتن در یک فرکانس مشخص بیشینه می‌شود و با دور شدن  $s_1$  از این مقدار، FBR کاهش می‌یابد.



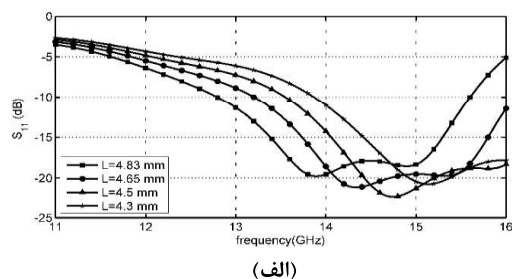
شکل (۱۱): بررسی پارامتری ابعاد مختلف ساختار انتقالی؛ الف) تغییرات FTBR به ازای  $s_1=0.53$  mm و مقادیر مختلف  $L$ ، ب) تغییرات FTBR ازای  $L=4.83$  mm و مقادیر مختلف  $s_1$

نمودار شکل (۸) که با استفاده از روابط بیان شده در [۱۸] بدست آمده است، فرکانس تشدید ساختار انتقالی را برای یک بلوک  $(F_{RL(N=1)})$ ، دو بلوک  $(F_{RL(N=2)}^+$  و  $F_{RL(N=2)}^-)$  و فرکانس بهترین نسبت جلوه‌عقب آنتن  $(F_{FBR})$  را بر حسب طول ساختار انتقالی نشان می‌دهد. بر اساس نمودار شکل (۸)، برای اینکه ساختار انتقالی در فرکانس 14.6 GHz تشدید کند طول بلوک‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار انتقالی باید حدود 4.1 mm باشد. باید توجه شود طول بدست آمده مقداری تقریبی بوده و در ادامه با بهینه سازی، طول دقیق بلوک بدست خواهد آمد.

تقارن آنتن در لبه‌ی تشعشی از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد چراکه شکاف‌های تشعشع در بالا و پایین آنتن با دی‌الکتریک‌های مختلفی پر شده‌اند و این، باعث تفاوت اندازه‌ی میدان‌های الکتریکی در این شکاف‌ها می‌شود. در نتیجه الگوی تشعشع آنتن در جهت نامطلوب قرار می‌گیرد. برای حل این مشکل از یک تکه زیرلایه‌ی RO 4003 با ضخامت  $h = 25$  mil در بخش ساختار انتقالی، به جای امتداد زیر لایه‌ی RO 3010 استفاده می‌کنیم. مطابق آنچه در [۱۴] آمده است برای افزایش پهنای باند و همچنین دست‌یابی همزمان به بهترین تطبیق امپدانس و بهترین نسبت جلوه‌عقب بلوک‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار انتقالی را مثلثی‌شکل در نظر می‌گیریم. این ساختار انتقالی در شکل (۹) نشان داده شده است. برای تکمیل طراحی ساختار انتقالی، با توجه به روش بیان شده در [۱۴]، ابعاد مختلف ساختار انتقالی را مورد مطالعه‌ی پارامتری قرار می‌دهیم. شکل (۱۰) تغییرات ضریب بازگشتی از آنتن را به ازای تغییرات ابعاد ساختار انتقالی نشان می‌دهد. ابعاد بررسی شده در این مطالعه‌ی پارامتری در شکل (۱۲) نشان داده شده اند.

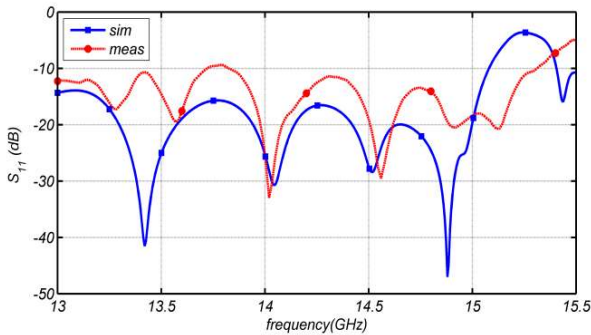


شکل (۹): نمایش ساختار انتقالی آنتن برای تطبیق دهانه با امپدانس فضای آزاد؛ به منظور ایجاد تقارن در بخش تشعشع آنتن، یک تکه زیرلایه‌ی RO 4003 با ضخامت  $h=25$  mil در بخش ساختار انتقالی، به جای امتداد زیر لایه‌ی RO 3010 استفاده شده است.



#### ۴- نتایج اندازه‌گیری‌ها

نتایج مربوط به شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های آنتن پیشنهادی در ادامه آورده شده است. شکل (۱۴) نمودار  $S_{11}$  آنتن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، آنتن از فرکانس‌های حدود 13 GHz تا 15.1 GHz تطبیق شده است و پهنای باند امپدانس حدود 2 GHz است. شکل (۱۵) نمونه آنتن ساخته شده به همراه نتایج اندازه‌گیری ضریب بازگشتی را نشان می‌دهد.

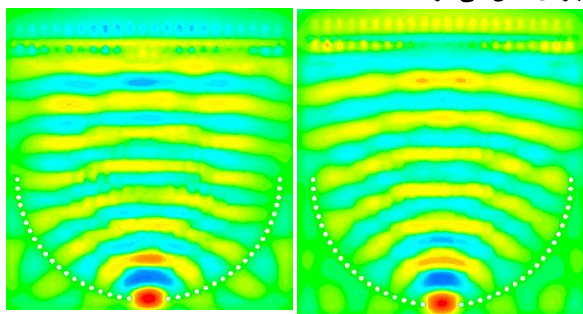


شکل (۱۴): نمودار ضریب بازگشتی آنتن؛ پهنای باند امپدانسی آنتن حدود 2 GHz می‌باشد.



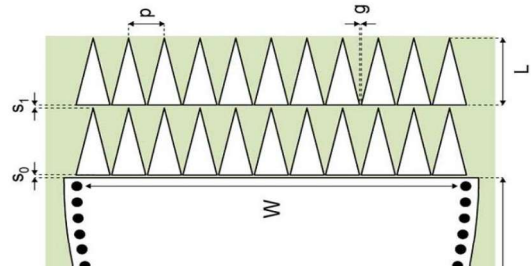
شکل (۱۵): نمونه آنتن ساخته شده به همراه نتایج اندازه‌گیری ضریب بازگشتی

شکل (۱۶) توزیع میدان‌های الکتریکی در صفحه‌ی  $z = 1.5 \text{ mm}$  را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد به طوری که صفحه زمین پایینی در  $z = 0$  در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشخص است جبهه‌ی موج پس از عبور از لنز کاملاً هم‌فاز شده است که منجر به افزایش بهره‌ی آنتن می‌شود.



(ب)

(الف)



شکل (۱۲): نمایش ساختار انتقالی مورد استفاده برای تطبیق دهانه‌ی آنتن؛ ابعاد پارامترهای مورد بررسی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده

اند. [۱۴]

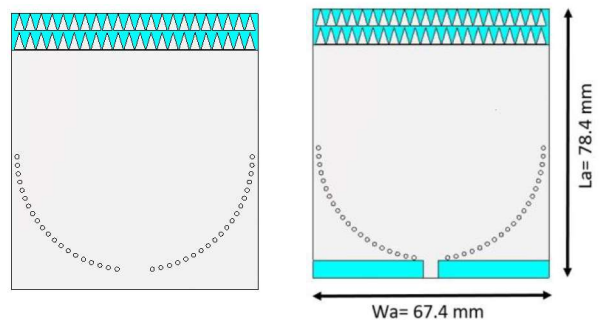
با توجه به نمودارهای شکل (۱۰) و شکل (۱۱) و به‌منظور دستیابی به مناسب‌ترین تطبیق امپدانس و نسبت جلو به عقب به‌طور هم‌زمان، ابعاد ساختار انتقالی مطابق جدول (۱) به‌دست آمده‌اند.

جدول (۱): ابعاد ساختار انتقالی و به‌منظور دستیابی به مناسب‌ترین تطبیق امپدانس و نسبت جلو به عقب به‌طور هم‌زمان

$L(\text{mm})$	$s_1(\text{mm})$
4.83	0.53

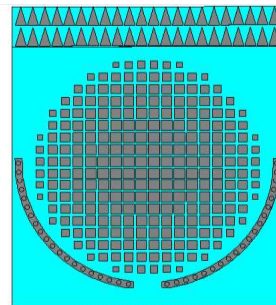
شکل (۱۳) ساختار نهایی آنتن را نشان می‌دهد. نتایج

شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری در ادامه آورده شده است.



(ب)

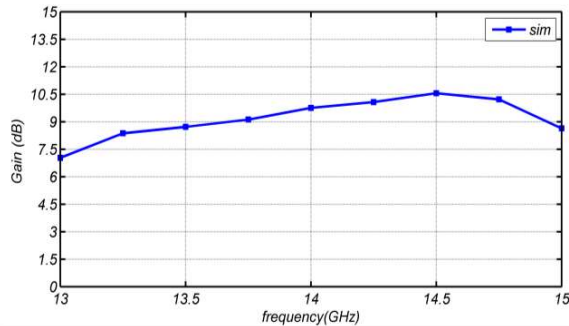
(الف)



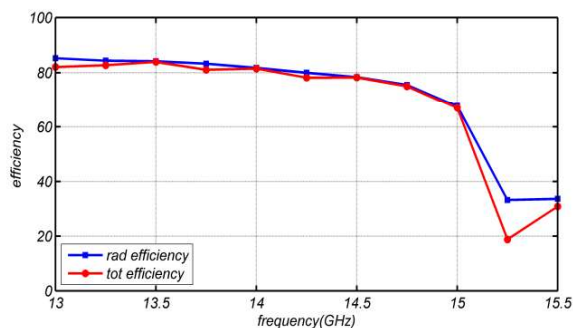
(ج)

شکل (۱۳): نمایش ساختار نهایی آنتن شبیه‌وری SIW با استفاده دو لایه دی‌الکتریک مختلف؛ (الف) نمای بالا (ب) نمای پایین (ج) نمای لایه میانی که لنز روی آن چاپ شده است.

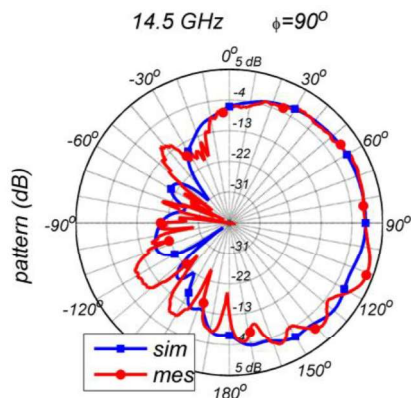
الکترومغناطیسی عمل می‌کند و اساساً موج نمی‌تواند از روی لنز عبور کند.



شکل (۱۸): نمودار بهره‌ی محقق شده آنتن را در فرکانس‌های مختلف

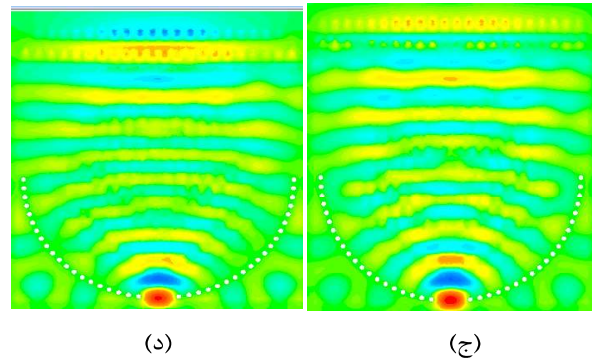


شکل (۱۹): نمودارهای بازده تشعشع و بازده کل آنتن؛ عملکرد آنتن از فرکانس 15 GHz به بعد به شدت کاهش می‌یابد



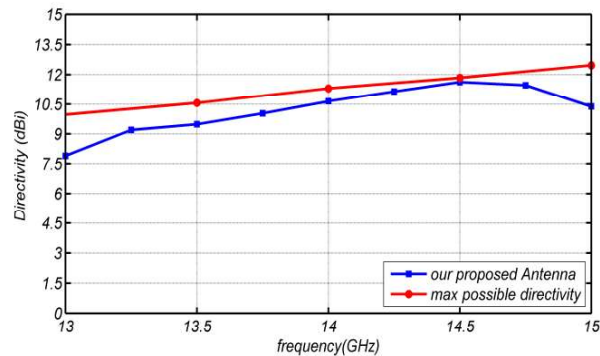
شکل (۲۰): الگوی تشعشعی آنتن در صفحه‌ی  $\phi=90$  در 14.5 GHz

نمودارهای الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس‌های مختلف در صفحه‌ی  $\phi=90$  در شکل (۲۰) نشان داده شده است. هم‌چنین نمودارهای الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس‌های مختلف در صفحه‌ی  $\theta=90$  در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۶): توزیع میدان الکتریکی روی لنز در صفحه‌ی  $z=1.5$  mm در فرکانس‌های الف (13.5 GHz، ب) 14 GHz، ج) 14.5 GHz، د) 14.75 GHz

حداکثر جهت‌دهی ممکن برای این آنتن با استفاده از شبیه‌سازی ساختار با استفاده از تحریک دهانه موجبری<sup>۱</sup> به دست می‌آید. در واقع به جای این که قبل از ساختار انتقالی از لنز برای هم‌فاز کردن موج استفاده کنیم از تحریک دهانه موجبری که معادل لنز ایده‌آل می‌باشد استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است که استفاده از این نوع تحریک، تنها در شبیه‌سازی ممکن است و در عمل باید به طرق مختلفی از جمله استفاده از لنز جبهه‌ی موج در دهانه‌ی تشعشع را هم‌فاز کرد. شکل (۱۷) نشان می‌دهد که جهت‌دهی آنتن در فرکانسی که لنز برای آن طراحی شده است به حداکثر جهت‌دهی ممکن، بسیار نزدیک می‌شود.

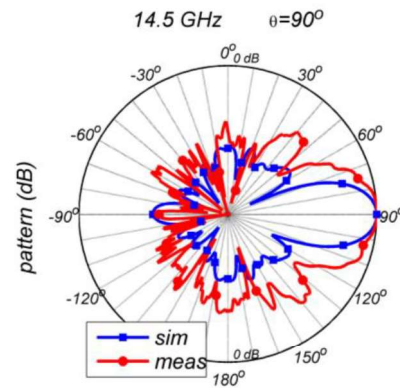


شکل (۱۷): نمودار مقایسه‌ی جهت‌دهی آنتن طراحی شده و حداکثر جهت‌دهی قابل دستیابی در جهت  $\theta=90$  و  $\phi=90$  جهت‌دهی آنتن در فرکانسی که لنز در آن طراحی شده است به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

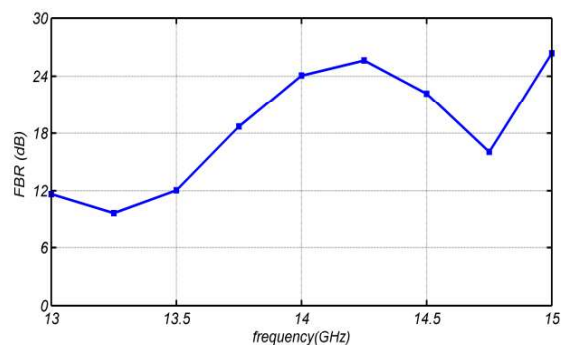
شکل (۱۸) نمودار بهره‌ی آنتن را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. بهره‌ی آنتن در فرکانس 14.5 GHz حدود 10.5 dB است. نمودارهای بازدهی تشعشعی و بازده کل نیز در شکل (۱۹) نشان داده شده‌اند. نمودارهای بازده نشان می‌دهند که عملکرد آنتن از فرکانس 15 GHz به بعد به شدت کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در نمودارهای پاشندگی شکل (۴) جست‌وجو کرد. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است، ساختار لنز برای فرکانس‌های بیش از 15 GHz و برای مد تحریک‌شده همانند یک باند قطع

[۲] کمجانی نادر، رجیبی مهدی. شبیه سازی آنتن Tapered Slot با استفاده از روش ماتریس خط انتقال سه بعدی. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۸۵؛ ۳ (۲): ۱۴-۲۳

- [3] R. E. Collin and F. J. Zucker, *Antenna Theory, Part 2*. McGraw-Hill, 1969.
- [4] A. Oliner and A. Hessel, "Guided waves on sinusoidally-modulated reactance surfaces," *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 7, no. 5, pp. 201–208, Dec. 1959.
- [5] R. B. Hwang and S. T. Peng, "Guidance characteristics of two-dimensionally periodic impedance surface," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 12, pp. 2503–2511, 1999.
- [6] H. J. Bilow, "Guided waves on a planar tensor impedance surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 10, pp. 2788–2792, Oct. 2003.
- [7] B. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visher, and D. F. Sievenpiper, "Scalar and Tensor Holographic Artificial Impedance Surfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 10, pp. 3212–3221, Oct. 2010.
- [8] M. Bosiljevac, M. Casaletti, F. Caminita, Z. Sipus, and S. Maci, "Non-Uniform Metasurface Luneburg Lens Antenna Design," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 9, pp. 4065–4073, Sep. 2012.
- [9] Z. Li, X.-P. Chen, and K. Wu, "A Surface Mountable Pyramidal Horn Antenna and Transition to Substrate Integrated Waveguide," in *2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics*, 2007, pp. 607–610.
- [10] W. Che, B. Fu, P. Yao, Y. L. Chow, and E. K. N. Yung, "A compact substrate integrated waveguide H-plane horn antenna with dielectric arc lens," *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 473–479, Sep. 2007.
- [11] H. Wang, D.-G. Fang, B. Zhang, and W.-Q. Che, "Dielectric Loaded Substrate Integrated Waveguide (SIW) H-Plane Horn Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 3, pp. 640–647, Mar. 2010.
- [12] R. Suga, H. Nakano, Y. Hirachi, J. Hirokawa, and M. Ando, "Cost-Effective 60-GHz Antenna Package With End-Fire Radiation for Wireless File-Transfer System," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 58, no. 12, pp. 3989–3995, Dec. 2010.
- [13] M. Yousefbecki, A. A. Domenech, J. R. Mosig, and C. A. Fernandes, "Ku-band dielectric-loaded SIW horn for vertically-polarized multi-sector antennas," in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2012, pp. 2367–2371.
- [14] M. Esquius-Morote, B. Fuchs, J.-F. Zurcher, and J. R. Mosig, "Novel Thin and Compact H-Plane SIW Horn Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 6, pp. 2911–2920, Jun. 2013.
- [15] S. Maci, M. Caiazzo, A. Cucini, and M. Casaletti, "A pole-zero matching method for EBG surfaces composed of a dipole FSS printed on a grounded dielectric slab," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 70–81, Jan. 2005.
- [16] A. M. Patel and A. Grbic, "A Printed Leaky-Wave Antenna Based on a Sinusoidally-Modulated Reactance Surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 6, pp. 2087–2096, Jun. 2011.
- [17] A. M. Patel and A. Grbic, "Effective Surface Impedance of a Printed-Circuit Tensor Impedance Surface (PCTIS)," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*,



شکل (۲۱): الگوی تشعشع آنتن در صفحه‌ی  $\theta=90^\circ$  در فرکانس 14.5 GHz



شکل (۲۲): نمودار FBR آنتن در فرکانس‌های مختلف؛ FBR آنتن در فرکانس‌های مختلف بیش از 10 dB است و در نزدیکی‌های فرکانس طراحی آنتن به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

سطح گلبیگ‌های کناری الگوی تشعشع در صفحه‌ی  $\theta=90^\circ$  و در فرکانس 14.5 GHz حدود 19.8 dB می‌باشد. با توجه به الگوهای تشعشعی آنتن می‌توان انتظار داشت که نسبت جلو به عقب آنتن بسیار مطلوب باشد. نمودار نسبت جلو به عقب آنتن در فرکانس‌های مختلف در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یکی از آنتن‌های شبیه‌ساز SIW با استفاده از لنز لونیبرگ، در باند Ku و در فرکانس 14.5 GHz طراحی و شبیه‌سازی شده است. این آنتن از دایره‌ی الکتریک مختلف تشکیل شده و صفحه‌ای می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که لنز لونیبرگ در فرکانس طراحی، بهره‌ی آنتن را به حداکثر بهره‌ی قابل دست‌یابی از دهانه‌ی آنتن، بسیار نزدیک می‌کند.

## مراجع

- [۱] صادقی کیا فاطمه، حجت کاشانی فرخ، راشد محصل جلیل. تحلیل آنتن پلاسمای ستونی با تحریک موج سطحی. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۲؛ ۱۰ (۱): ۷-۱۶

- vol. 61, no. 4, pp. 1403–1413, Apr. 2013.
- [18] M. Esquiús-Morote, B. Fuchs, J.-F. Zürcher, and J. R. Mosig, “A Printed Transition for Matching Improvement of SIW Horn Antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 4, pp. 1923–1930, Apr. 2013.

## زیر نویس ها

---

- <sup>1</sup> substrate integrated waveguide
- <sup>2</sup> Luneburg Lens
- <sup>3</sup> Meta surface
- <sup>4</sup> Planar Antenna
- <sup>5</sup> Anisotropic
- <sup>6</sup> Front to back ratio
- <sup>7</sup> End Fire
- <sup>8</sup> Morote
- <sup>9</sup> Waveguide port

