

# طراحی آنتن میکرواستریپ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی جهت کاربرد در آنتن رادار روزنه مصنوعی

مرضیه نصیریان<sup>۱</sup>    ذاکر حسین فیروزه<sup>۲</sup>    محسن مداح علی<sup>۳</sup>    غلامرضا عسکری<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

[m.nasirian@ec.iut.ac.ir](mailto:m.nasirian@ec.iut.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

[zhfirouzeh@cc.iut.ac.ir](mailto:zhfirouzeh@cc.iut.ac.ir)

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

[maddahali@cc.iut.ac.ir](mailto:maddahali@cc.iut.ac.ir)

۴- مربی- پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

[askarigh@cc.iut.ac.ir](mailto:askarigh@cc.iut.ac.ir)

**چکیده:** این مقاله ابتدا به استخراج مشخصات لازم برای آنتن راداری روزنه مصنوعی با مشخصات سیستمی معلوم پرداخته و با توجه به نیاز به بهره زیاد و پهنای باند امپدانس وسیع، طراحی آرایه‌ای از المان‌های میکرواستریپ از نوع پیچ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی را مد نظر قرار داده است. ابتدا توسط یک بررسی پارامتری برای چنین المانی، پارامترهای اصلی در طراحی استخراج گردیده و سپس المانی با پهنای باند بیش از ۱۶ درصد طراحی شده و نتایج شبیه سازی با اندازه‌گیری مقایسه شده است. در انتها طراحی اولیه‌ای برای ابعاد و توزیع دامنه جریان کل آرایه‌ای صفحه‌ای از این المان مطرح می‌شود تا به صورت تئوری دستیابی به مشخصات مطلوب برای کل آنتن فراهم گردد.

**کلمات کلیدی:** آنتن میکرواستریپ، باند وسیع، شکاف U شکل، تغذیه تزویج مجاورتی، رادار روزنه مصنوعی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۹/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۷/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۸/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول: مرضیه نصیریان

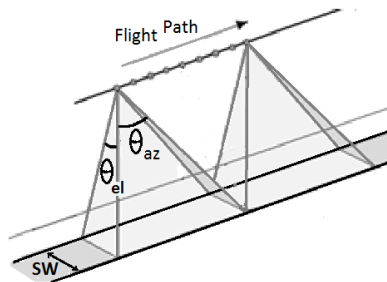
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

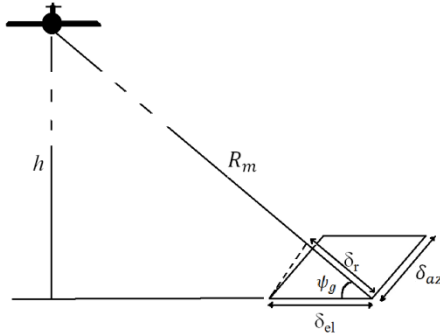
امروزه رادارهای روزنه مصنوعی SAR از مرسوم‌ترین ابزارهای تصویربرداری از طریق سکوه‌های متحرک هوایی هستند که به واسطه تکنیک پردازشی خاص، معادل یک آنتن بسیار بزرگ را به‌طور مصنوعی سنتز کرده و تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا را میسر می‌نمایند [۱]. مانند هر رادار دیگری، در SAR نیز، آنتن آن وظیفه‌ی ارسال و دریافت سیگنال را به عهده دارد. انواع مختلفی از آنتن‌ها از جمله آنتن‌های رفلکتوری، هورن، موجبر شکافدار، میکرواستریپ و غیره در SAR به کار می‌روند؛ اما در-هرحال مشخصات لازم برای این آنتن، باید از پارامترهای مربوط به تصویربرداری SAR استخراج شود. در بخش بعد مشخصات مورد نیاز آنتن رادار روزنه مصنوعی که مشخصات مربوط به تصویربرداری آن معلوم است، به طور تقریبی محاسبه می‌گردد. سپس در بخش‌های بعدی، آنتن از نوع آرایه میکرواستریپ برای حصول مشخصات فوق انتخاب می‌شود و ابتدا به طراحی یک المان تکی و سپس طراحی اولیه برای کل آرایه می‌پردازیم. همچنین در فرآیند طراحی تک المان آنتن، با مطالعه‌ی پارامتری، چگونگی وابستگی رفتار فرکانسی آنتن میکرواستریپ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی را نسبت به پارامترهای مختلف ابعاد ساختار، مورد بررسی قرار داده و با توجه به نتایج شبیه‌سازی روندی کلی برای طراحی چنین آنتنی پیشنهاد می‌کنیم.

## ۲- استخراج تقریبی پارامترهای آنتن از مشخصات سیستمی SAR

آنتن مورد نظر در این مقاله، برای راداری در مود تصویربرداری نواری و برای نصب روی یک هواپیمای بدون سرنشین پیش‌بینی شده است که در ارتفاع ( $h$ ) تقریبی  $3/5$  کیلومتر پرواز می‌کند. در شکل ۱ پهنای نوار رصد شونده توسط رادار بر روی زمین ( $SW$ ) تقریباً  $800$  متر و در شکل ۲، زاویه‌ی پویش  $\psi_g$ ، حدود  $45$  درجه است. در اینصورت فاصله‌ی مرکز این نوار تا رادار ( $R_m$ )، حدود  $5$  کیلومتر خواهد بود. همچنین قدرت تفکیک مطلوب در هر دو جهت سمت<sup>۳</sup> و ارتفاع<sup>۴</sup> ( $\delta_{az}$  و  $\delta_{el}$ )، برابر با  $0/5$  متر است. در ادامه به استخراج پارامترهای طراحی آنتن، با توجه به داده‌های مذکور پرداخته می‌شود.



شکل (۱): هندسه مسیر تصویربرداری و زوایای پرتو نیم توان آنتن



شکل (۲): هندسه کوچکترین قطعه قابل تفکیک

## ۲-۱- فرکانس کار آنتن

انتشار و بازتاب امواج الکترومغناطیسی در اتمسفر، به شدت به فرکانس آنها بستگی دارد. اگرچه ضریب انتقال اتمسفر برای باندهای فرکانسی  $X$ ،  $C$  و  $L$  بیشترین مقدار بوده و این فرکانس-ها در رادارهای هواپرد بسیار معمول اند [۲]، اما اهداف ساخت بشر، در باند فرکانسی  $Ku$ ، دارای سطح مقطع راداری بالا بوده و قابلیت تفکیک خوبی دارند. همچنین، با توجه به محدودیت ابعاد فضای قابل اختصاص به آنتن به علت ملاحظات آئرونامیکی، هر چه فرکانس کار بالاتر باشد، به علت کوچک شدن آنتن، بهره<sup>۵</sup> قابل حصول از آنتنی با این ابعاد، بیشتر می‌شود. همچنین برای هر محدوددهی فاصله و ارتفاع معلوم و برای هر شرایط جوی خاص، منحنی‌هایی برای نسبت سیگنال به نویز<sup>۶</sup> بر حسب فرکانس وجود دارد، که باند فرکانسی بهینه برای دستیابی به بیشترین SNR را به ما می‌دهد [۳]. طبق این نمودارها، می‌توان دید که در محدوده‌ی مورد نظر در این مقاله، باند فرکانسی  $Ku$ ، انتخاب مناسب است.

## ۲-۲- پهنای پرتو آنتن در سمت و ارتفاع

برای رادار SAR در مود تصویربرداری نواری، با فرض اینکه پرتو آنتن در جهت سمت، به‌خوبی (و یکنواخت) تمام قطعه‌ی مورد نظر را روشن کند، یک رابطه‌ی کلی برای پهنای پرتو نیم توان آنتن در جهت سمت ( $\theta_{az}$ )، به‌صورت زیر است [۳]:

$$\theta_{az} = \frac{\lambda_0}{2\delta_{az}} \quad (1)$$

اما در عمل به دلیل شکل پترن آنتن و افت ۳ دسیبلی در دو لبه ی قطعه ای که در پهنای پرتو نیم توان آنتن قرار می گیرد، در رفت و برگشت در مجموع یک افت به میزان ۶ دسیبیل خواهیم داشت. بنابراین باید در عمل  $\theta_{az}$  از آنچه در رابطه ی فوق بیان شده است، بیشتر انتخاب شود [۴]. در مسئله ی موردنظر، رابطه ی (۱)،  $\theta_{az}$  را حدود ۱ درجه بدست می دهد. اما با استدلال فوق و همچنین برای ملاحظات مربوط به جبران خطاهای حرکتی، این زاویه ۲/۶ درجه هدف گذاری می شود. پهنای پرتو نیم توان آنتن در جهت ارتفاع ( $\theta_{el}$ )، برابر است با [۵]:

$$SW \cong \frac{\theta_{el} R_m}{\sin \psi_g} \quad (2)$$

در اینصورت  $\theta_{el}$ ، حدود ۶/۵ درجه بدست می آید که در هدف گذاری مقدار ۷ درجه برای آن در نظر گرفته می شود.

### ۲-۳- پهنای باند فرکانسی

در SAR، با استفاده از تکنیک فشرده سازی پالس، قدرت تفکیک ارتفاع به این صورت بدست می آید [۶]:

$$\delta_{el} = c / 2B \cos \psi_g \quad (3)$$

که در آن  $c$ ، سرعت نور در خلأ و  $B$ ، پهنای باند مؤثر سیگنال با جاروب فرکانسی<sup>۷</sup> است.

با توجه به مقادیر پارامترها در رابطه (۳)، پهنای باند  $B$ ، حداقل باید حدود ۴۲۵ مگاهرتز باشد. اما در عمل به علت مزایای استفاده از پهنای باند زیاد، از جمله امکان بکارگیری تکنیک های مفیدی همچون جهش فرکانسی<sup>۸</sup> یا کاربرد نظارت چندگانه<sup>۹</sup> برای SAR و همچنین امکان توسعه ی سیستم در آینده، پهنای باند مطلوب بیش از ۱۰ درصد (بیش از 1.67 GHz در فرکانس مرکزی 16.7 GHz) در نظر گرفته می شود.

### ۲-۴- بیشترین سطح گلبزرگ های کناری پترن (SLL)

به طور کلی و در یک تقریب اجمالی، اگر برای تغییرات RCS<sup>۱۰</sup> هدف،  $A$  دسیبیل و برای انواع نویزهای مؤثر در مسیر سیگنال،  $B$  دسیبیل منظور شود و بخواهیم سیگنال دریافتی از هدف، نسبت به سیگنال دریافتی از کلاتر های اطراف، حداقل  $C$  دسیبیل قویتر باشد، لازم است که ( با توجه به تاثیر SLL به صورت دوبرابر،

هم در سیگنال ارسالی از آنتن و هم در دریافت سیگنال بازتابی از هدف)، SLL حداکثر  $(A+B+C)/2$  - دسیبیل باشد. در این طراحی  $A$ ،  $B$  و  $C$  هر کدام حدود ۱۰ دسیبیل بوده و بنابراین SLL باید حداکثر ۱۵- دسیبیل باشد تا در مجموع سیگنال های مزاحم را ۳۰ دسیبیل تضعیف کرده و تشخیص سیگنال هدف را با مشکل مواجه نکند.

### ۵-۲- نوع آنتن

نیاز به حجم و وزن کم (در کاربرد نصب روی UAV)، ما را به انتخاب آنتن میکرواستریپ در طراحی، هدایت می کند. اما از آنجایی که میکرواستریپ ها ذاتا پهنای باند باریکی دارند، از تکنیک هایی برای افزایش پهنای باند باید سود جست. همچنین، با توجه به بهره زیاد موردنظر برای آنتن (۳۰ dB)، بایستی از آنتن های آرایه ای میکرواستریپ با ابعاد بزرگ استفاده شود.

### ۳- طراحی المان آنتن

گام اول، طراحی یک المان با پهنای باند وسیع است. به طور کلی دو رویکرد عمده برای افزایش پهنای باند امپدانس در یک سیستم وجود دارد: یکی افزایش تطبیق امپدانس در بازه فرکانسی مورد نظر با استفاده از تکنیک های مختلف و دیگری استفاده از چند رزوناتور با فرکانس های نزدیک به هم، که اصطلاحاً عناصر پارازیتی<sup>۱۱</sup> نام دارند [۷]؛ استفاده از یک شکاف رزونانسی در پیچ، مثالی از رویکرد دوم است (اگرچه از شکاف روی پیچ بمنظور تشعشع در چند باند فرکانسی نیز استفاده می شود [۸] اما با نزدیک کردن این باندها به یکدیگر می توان به مشخصه ای پهن باند دست یافت). همچنین علاوه بر بکارگیری ساختارهایی همچون tapered slot [۹] و غیره، پارامترهای ساختاری و روش های مختلف تغذیه نیز می توانند برای افزایش پهنای باند آنتن به کار روند، که از آن جمله می توان به تغذیه تزویج مجاورتی و یا تغذیه تزویج روزه ای اشاره نمود. هوین<sup>۱۲</sup> و لی<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۹۵، اولین بار از یک شکاف U شکل در پیچی با تغذیه کواکسیال، به منظور افزایش پهنای باند استفاده کردند [۱۰]. سه سال بعد این روش به همراه تغذیه تزویج مجاورتی به کار گرفته شد، که در آن از استاب  $\Pi$  شکل در خط تغذیه برای تزویج بیشتر و نیز تنظیم تطبیق امپدانس استفاده شده بود [۱۱]. سپس در کارهای مشابه بمنظور جاسازی کامل استاب های خط تغذیه در زیر پیچ و ایجاد درجات آزادی بیشتر در ایجاد تطبیق امپدانس، یک یا چند شاخه دیگر به استاب  $\Pi$  شکل

جدول (۱): مقادیر نامی پارامترها

Name	Value	Unit
w1	0.45	mm
w2	0.45	mm
Ls1	4.11	mm
Ls2	3.52	mm
L2	3.33	mm
d2	2.04	mm
x1	0.36	mm
x2	0.36	mm
x3	0.61	mm
x4	1	mm
h1	20	mil
B	5.3	mm
A	5.92	mm
h2	31	mil
x5	0.36	mm
H	0.82	mm

### ۲-۳- بررسی پارامتری

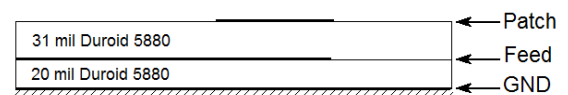
ابعاد اولیه‌ی ارائه شده در جدول ۱، از روند طراحی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، به دست آمده‌اند. در بررسی پارامتری، هر بار مقدار یکی از متغیرها حول مقدار نامی تغییر داده شده و بقیه، مطابق با مقادیر اولیه در نظر گرفته می‌شوند و به این ترتیب تأثیر پارامترهای مختلف بصورت جداگانه، در مشخصه فرکانسی آنتن به دست می‌آید. به طور کلی، با توجه به وجود دو رزوناتور پیچ و شکاف U شکل، مشخصه‌ی فرکانسی آنتن شامل دو رزونانس نزدیک به هم می‌باشد. شکل ۵ برای نمونه، نمودارهای مربوط به بررسی پارامتری را برای چهار پارامتر مهم نشان می‌دهد. شبیه سازی‌ها توسط نرم افزار تجاری HFSS انجام شده‌اند. نتایج بررسی همه‌ی پارامترها، بطور خلاصه در جدول گردآوری شده است؛  $f_1$  و  $f_2$  به ترتیب فرکانس اولین و دومین رزونانس در نمودار S11 بوده و  $f_c$ ، فرکانس مرکزی در باند عبور 10dB- است. عبارت تلفات بازگشتی "Return loss level" نیز، بیانگر سطح تطبیق امپدانس در باند عبور می‌باشد. در این بررسی مقدار همه پارامترها، به نسبت یکسان، حول مقدار نامی تغییر داده شده و تأثیر افزایش هر پارامتر بر کاهش (-)، افزایش (+)، یا عدم تغییر (0) مشخصه‌ی موردنظر، در این جدول بیان شده است. "++" و "--"، نشان‌دهنده افزایش و کاهش زیاد مشخصه-ی مربوطه بوده و "0(+)" و "0(-)" بیانگر افزایش و کاهش، به میزان کم هستند. با بررسی داده‌های بدست آمده در جدول، چهار پارامتر اصلی، شناسایی می‌شوند که عبارتند از: طول پیچ (B)، پهنا پیچ (A)، طول استاب‌های عمودی رو به پایین تغذیه (L2) و طول بازوهای عمودی شکاف U شکل (Ls2)؛ که در این

افزوده شد که همچنان متضمن پهنای باند وسیع در ساختارهایی در باندهای فرکانسی X و Ku بودند [۱۲] و [۱۳].

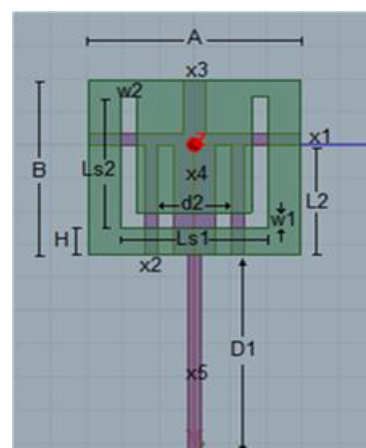
در [۱۴]، بررسی‌های دقیقی بر روی چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف ساختار، بر مشخصه فرکانسی آنتنی تک لایه با شکاف U شکل در پیچ و با تغذیه کواکسیال انجام شده است، اما با تغییر نوع تغذیه به تزویج مجاورتی، تعداد زیادی پارامتر جدید به مسئله وارد می‌شود که به علت تزویج‌های متعدد بین استاب-های تغذیه و شکاف U شکل، تحلیل دقیق رفتار رزونانسی را عملاً غیرممکن می‌سازد؛ اما در عین حال با بررسی‌های پارامتری می‌توان پارامترهای تأثیرگذارتر در مشخصه فرکانسی آنتنی با چنین ساختار را شناسایی نموده و بدین ترتیب روندی کلی برای طراحی استخراج نمود. در این مقاله، بررسی مذکور برای آنتن پیچ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی در بخش بعد انجام می‌شود و نتایج آن ارائه می‌گردد.

### ۱-۳- ساختار آنتن

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ساختار آنتن میکرواستریپ موردنظر با تغذیه تزویج مجاورتی، بصورت دو لایه بوده و شامل دو زیرلایه از جنس Duroid 5880 با ضخامت‌های 31mil و 20mil است. پیچ شامل شکاف U شکل، روی زیرلایه بالایی و خط تغذیه‌ی شامل استاب‌ها، روی زیرلایه پایینی قرار می‌گیرد. همچنین لایه‌ی زیرین زیرلایه پایینی، به عنوان زمین ساختار در نظر گرفته می‌شود. نمای آنتن از بالا به همراه پارامترهای تعیین‌کننده ابعاد، در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

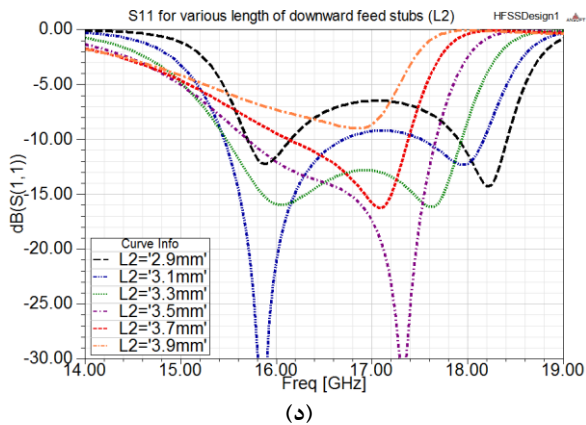


شکل (۳): ساختار دو لایه آنتن



شکل (۴): نمای آنتن از بالا به همراه پارامترهای متناظر با ابعاد شکل





شکل (۵): تأثیر پارامترهای مهم بر رفتار رزونانسی المان

میکرواستریپ: الف) طول پچ (B)، ب) پهنای پچ (A)، ج) طول بازوهای عمودی شکاف U شکل (Ls2) و د) طول استاب‌های روبه-پایین تغذیه (L2).

جدول (۲): چگونگی وابستگی پاسخ فرکانسی به تغییر پارامترها

Parameter	$f_1$	$f_2$	$f_c$	$f_2 - f_1$	Return loss level
A+	-	--	-	-	-
B+	--	--	--	++	++
d2+	+	+	+	0	0(+)
H+	0	0(+)	+	0(+)	0(+)
L2+	+	--	+	--	++
Ls1+	+	0(+)	0	-	0
Ls2+	0(-)	--	-	--	-
w1+	0	0	0	0	0
w2+	0	0	0	0	0(+)
x1+	0(-)	0(-)	0	0	0(+)
x2+	0	+	0	+	+
x3+	0(-)	0	0	0(+)	0(+)
x4+	+	0(-)	0	-	-
x5+	-	0	0	+	+

برخی دیگر از نتایج بدست آمده از این جدول، به این شرح است:

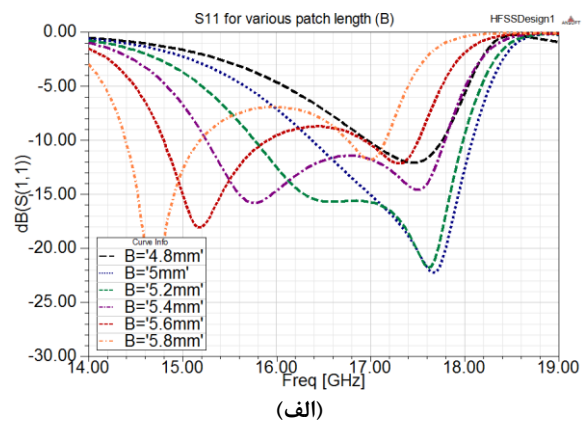
اولین فرکانس رزونانس ( $f_1$ )، بیش از همه، تابع طول پچ است و می توان گفت به‌طور غالب از رزونانس پچ تأثیر می پذیرد.

فرکانس رزونانس دوم ( $f_2$ )، به‌شدت تحت تأثیر ابعاد پچ، L2 و Ls2 بوده و d2 و x2 نیز در تعیین این فرکانس موثرند. این فرکانس را می توان بیشتر متأثر از رزونانس شکاف U شکل دانست، زیرا پارامتر Ls2، مستقیماً به طول بازوی شکاف مربوط است و L2، d2 و x2 نیز که به‌ترتیب طول استاب‌های روبه-پایین تغذیه، محل قرارگیری و پهنای این استاب‌ها هستند، مبین چگونگی جای‌گیری تغذیه در زیر شکاف بوده و با تنظیم

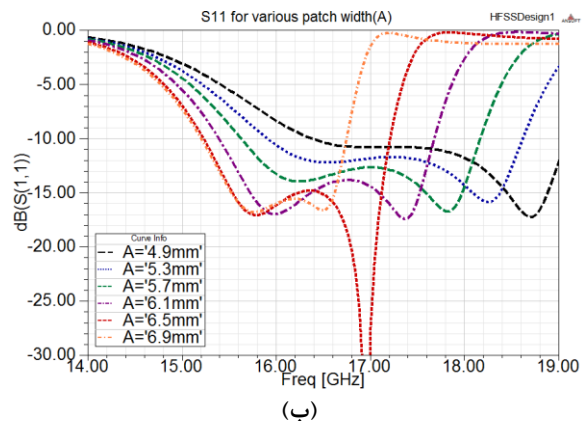
میان طول پچ (B)، در تعیین کل رفتار آنتن، از همه‌ی پارامترها تأثیرگذارتر است.

سایر پارامترهای مهم عبارتند از: فاصله افقی بین دو استاب رو به پایین تغذیه (d2)، میزان فاصله شکاف U شکل از لبه پچ (H)، طول شکاف افقی U (Ls1) و همچنین پهنای قسمت‌هایی از خطوط تغذیه (x2، x4، x5).

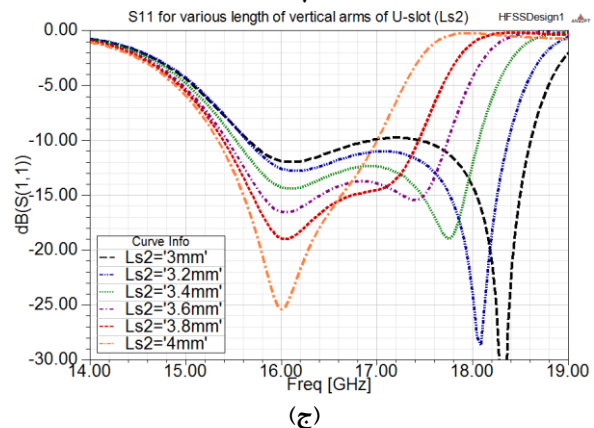
دیگر پارامترها مانند پهنای شکاف‌ها و استاب‌های افقی و روبه‌بالای تغذیه، در تعیین رفتار امپدانسی آنتن، تقریباً بی-تأثیرند.



الف)

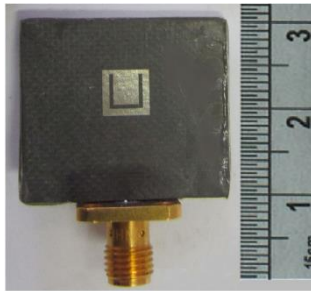


ب)

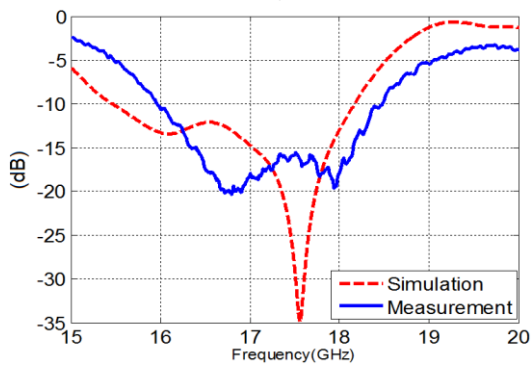


ج)

جابجایی فرکانس مرکزی و سطح تطبیق می‌تواند به علت ایجاد یک شکاف هوا بین دو زیرلایه در اثر جاسازی کانکتور بین دو لایه باشد. پهنای باند به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی،  $2/71$  GHz بوده که معادل  $16/7\%$  فرکانس مرکزی  $16/7$  GHz می‌باشد. در اندازه‌گیری، مقدار این پارامتر،  $2/45$  GHz به‌دست آمده است. در شکل ۸ توزیع جریان روی آنتن در سه فرکانس مختلف مشاهده می‌شود.



شکل (۶): نمای آنتن ساخته شده از روبرو



شکل (۷): نمودار  $S_{11}$  برای یک المان آنتن

ساختار این آنتن بصورت سه بعدی در شکل ۹ ارائه شده است. در این شکل، صفحه  $XZ$  همان صفحه  $E$  و صفحه  $YZ$ ، صفحه  $H$  این آنتن بوده و با در نظر گرفتن دستگانه مختصات کروی، در صفحه  $E$ ، مولفه همسوی میدان همان  $E_\theta$  و مولفه متعامد میدان،  $E_\phi$  بوده و در صفحه  $H$  بالعکس است. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی پترن تشعشعی در دو فرکانس متفاوت، در شکل ۱۰ تا ۱۳ قابل مشاهده‌اند. پهنای پرتو نیم توان در صفحات  $E$  و  $H$ ، در فرکانس  $16/7$  GHz، به ترتیب برابر با  $88^\circ$  و  $79^\circ$  درجه بوده و بهره‌ی نرمالیزه شده‌ی آنتن، روی محور تقارن،  $7/16$  dB اندازه‌گیری شده است.

همان‌گونه که در نمودارهای پترن مشاهده می‌شود، وجود کانکتور اضافه شده برای تست، باعث نوعی عدم تقارن در پترن صفحه‌ی  $E$  آنتن می‌شود، که ناشی از این است که بدنه فلزی کانکتور، مانند یک بازتابنده عمل می‌کند و باعث لوچی پترن و فشردگی آن به سمت مقابل می‌گردد؛ اثر کانکتور، با توجه به

میزان کوپلینگ میان تغذیه و شکاف، عملاً طول موثر شکاف و در نتیجه فرکانس رزونانس ناشی از شکاف را تعیین می‌کنند. تأثیرپذیری زیاد تلفات بازگشتی از طول پیچ و  $L2$ ، موید وابستگی شدید سطح تطبیق امپدانسی به طول استاب‌های تغذیه است؛ زیرا  $L2$ ، مستقیماً به طول استاب‌های روبه‌پایین تغذیه مربوط بوده و تفاضل  $B-L2$  نیز تعیین‌کننده‌ی طول استاب بالایی می‌باشد.

با استفاده از این نتایج، روند کلی طراحی چنین آنتنی به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

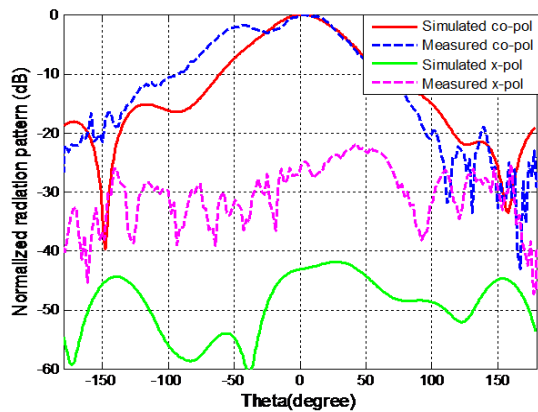
ابتدا با توجه به فرکانس مرکزی و با استفاده از قواعد ابتدایی طراحی آنتن پیچ و احتمالاً با در نظر گرفتن محدودیت ابعاد المان در آرایه‌سازی، ابعاد پیچ تعیین شده و برای سایر پارامترها، مقادیر اولیه، با لحاظ کردن حداقل دقت ساخت انتخاب شوند. با این ابعاد اولیه، یک پاسخ ابتدایی برای مشخصه‌ی آنتن بدست می‌آید؛ سپس پارامترهای اصلی، طبق داده‌های جدول ۲، در جهت مناسب برای بهبود مشخصه‌های پاسخ، تغییر داده شوند. از آنجا که طول پیچ (B)، کلیدی مشخصات آنتن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، ترجیحاً در این مرحله، هر بار یکی از پارامترهای  $A$ ،  $L2$  و  $Ls2$  تغییر داده شوند (و B ثابت بماند)؛ این مرحله در صورت لزوم، تا رسیدن به یک جواب نسبتاً قابل قبول تکرار شود. در گام بعدی با تغییر پارامترهای تأثیرگذار دیگر (مانند  $d2$ ،  $H$ ،  $Ls1$ ) می‌توان پاسخ را بهبود داد؛ اولویت آن است که برای بهبود یک مشخصه، از پارامتری استفاده شود که تأثیر آن بر سایر مشخصه‌های پاسخ، بسیار کم (0 یا  $0(\pm)$  در جدول) باشد. سرانجام، تنظیم نهایی می‌تواند با سایر پارامترهای کم‌تأثیرتر صورت پذیرد.

### ۳-۳- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

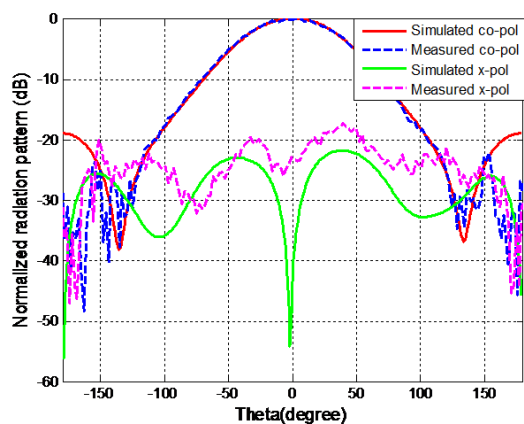
برای تست عملی المان طراحی شده‌ی آنتن، باید المان به یک کانکتور  $50\ \Omega$  اهم متصل شود؛ برای جلوگیری از تلفات ناشی از عدم تطبیق امپدانسی، ابتدا آنتن توسط مبدل امپدانسی ربع موج  $1/4$ ، به خط میکرواستریپ  $50\ \Omega$  اهم تطبیق داده می‌شود.

آنتن ساخته شده، به‌همراه کانکتور  $50\ \Omega$  اهم در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در شکل ۷، نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی  $S_{11}$  برای المان تکی با هم مقایسه شده است. با توجه به بالا بودن فرکانس کار و حساسیت زیاد ابعاد آنتن (مخصوصاً خطوط نازک تغذیه) به خطای ساخت و نیز حساسیت بالای نتایج به چگونگی لحیم‌کاری کانکتور به آنتن، می‌توان گفت که نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تطابق نسبتاً خوبی دارند. علاوه بر این

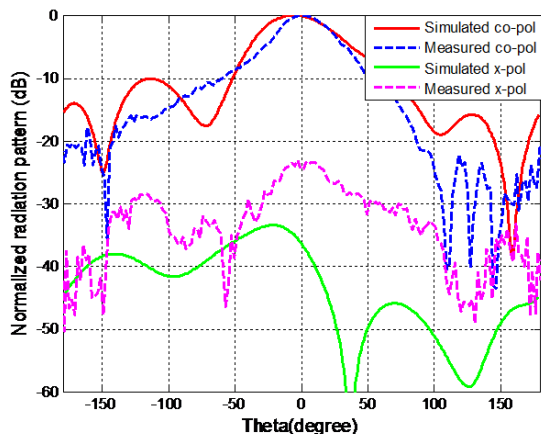




شکل (۱۰): پترن تشعشعی صفحه‌ی E در فرکانس ۱۶/۷ GHz



شکل (۱۱): پترن تشعشعی صفحه‌ی H در فرکانس ۱۶/۷ GHz

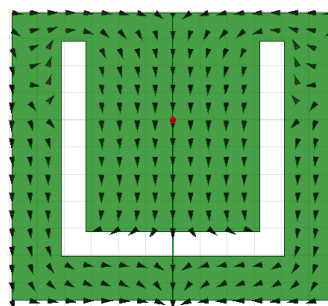
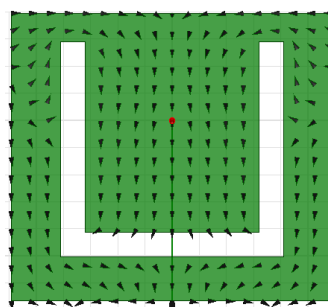
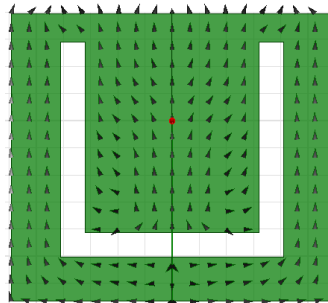


شکل (۱۲): پترن تشعشعی صفحه‌ی E در فرکانس ۱۸ GHz

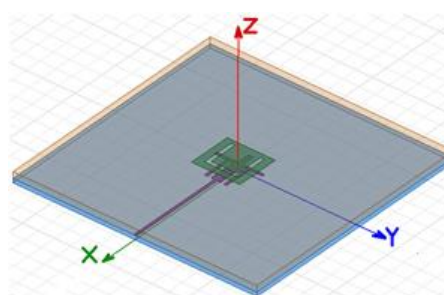
#### ۴- طرح کلی آنتن آرایه‌ای

بهره مطلوب برای آنتن موردنظر در این مقاله، ۳۰ دسیبل است. برای دستیابی به چنین بهره‌ای، به آرایه بزرگ نیاز است؛ از طرفی به علت پهن بودن پترن یک المان میکرواستریپ، بهره کل آنتن، عمدتاً توسط فاکتور آرایه تعیین می‌شود و به‌طور تجربی

بزرگ بودن ابعاد آن نسبت به ساختار، قابل توجه است، اما در آرایه بزرگ، با کوچک شدن ابعاد کانکتور نسبت به ساختار، این مشکل بسیار کمتر خواهد بود و چون در آنجا کانکتور نزدیک به تعداد کمی از المان‌ها می‌باشد، اثر آن محدود است.



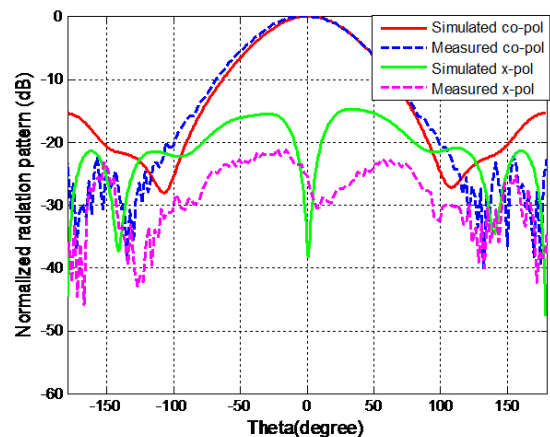
شکل (۸): توزیع جریان روی آنتن (از بالا به پایین به ترتیب برای فرکانس‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ گیگاهرتز)



شکل (۹): ساختار سه بعدی آنتن

ضمن اینکه اگر از کانکتوری با بدنه کوچکتر استفاده شود، نتایج بهتری حاصل خواهد شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در صفحه‌ی H که چنین عاملی وجود نداشته است، پترن تا حد زیادی تقارن خود را حفظ کرده است.

نیز در آرایه های بزرگ، تأثیر بهره المان فقط حدود ۲ تا ۳ دسیبل است. از این رو در طرح اولیه، فرض می شود بهره المان، تقریباً جبران کننده تلفات کل (راندمانی که در دایرکتیویتی ضرب می شود تا بهره بدست آید) بوده و اثر آن را در بهره کل آنتن فقط به صورت فوق لحاظ کرده و سعی می شود از فاکتور آرایه، دایرکتیویتی برابر با بهره مطلوب مسئله (۳۰ دسیبل) بدست آید.



شکل (۱۳): پترن تشعشعی صفحه‌ی H در فرکانس ۱۸ GHz

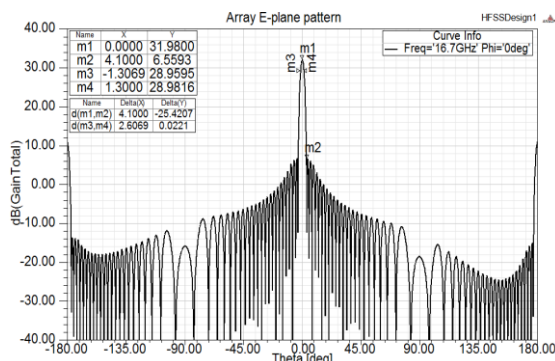
از سوی دیگر، اگرچه دستیابی به SLL نهایی به میزان حداکثر ۱۵- دسیبل، مطلوب است، اما با در نظر گرفتن خطاهای اجتناب ناپذیر در ساخت و نیز با توجه به این نکته که در آرایه‌های میکرواستریپ عوامل مزاحمی مانند کوپلینگ عناصر آرایه و نیز تشعشعات ناخواسته از خطوط تغذیه، خصوصاً در آرایه های بزرگ، باعث افزایش شدید SLL می شوند، برای یک پاسخ مطمئن تر، در طراحی توزیع مناسب برای جریان المان‌های آرایه SLL، حداکثر ۲۵- دسیبل هدف گذاری می گردد.

با توجه به پهلوتاب<sup>۱۵</sup> بودن پترن مطلوب، برای اجتناب از ایجاد گلبرگ توری<sup>۱۶</sup>، فاصله گذاری عناصر آرایه باید از طول موج در فضای آزاد ( $\lambda_0$ ) کمتر باشد؛ از طرفی کم بودن این فاصله به افزایش کوپلینگ بین المان‌ها منجر می شود. در یک انتخاب معمول، این فاصله حدود  $0.75\lambda_0$  در نظر گرفته می شود [۱۵].

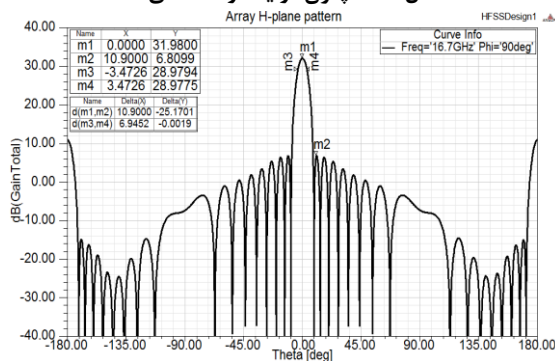
با در نظر گرفتن توزیع تفکیک پذیر برای آرایه صفحه‌ای، به منظور دستیابی به SLL مطلوب، بایستی از توزیع غیریکنواخت برای دامنه جریان المان‌ها استفاده کرد (به علت پهلوتاب بودن پترن، جریان همه المان‌ها باید هم فاز باشند). از بین توزیع هایی که به کاهش SLL می انجامند، بهترین گزینه توزیع تیلور است، چراکه بهره آنتن را بخاطر کاهش SLL به میزان نسبتاً کمی کاهش می دهد و در عین حال نسبت به توزیع چبی شف،

مخصوصاً وقتی پارامتر  $\bar{n}$  بزرگ انتخاب شود، دارای شیب تغییرات نرم تر بوده و از نظر امکان پیاده سازی تغذیه (از نظر حداکثر نسبت تقسیم توان عملی در مقسم‌های توان سه پورتی) خوش رفتارتر است [۱۵].

با کدنویسی در نرم افزار متلب<sup>۱۷</sup>، می توان دید که با توزیع تیلوری با  $\bar{n} = 4$  و  $SLL = -25dB$ ، برای آرایه‌ای صفحه‌ای با ابعاد  $12 \times 32$  و با فاصله گذاری  $0.72\lambda_0$  در هر دو راستا، فاکتور آرایه‌ی حاصل، علاوه بر SLL مناسب، به دایرکتیویتی مطلوب برای پترن نیز منجر می گردد. با فرض قرارگیری المانی با مشخصات المان طراحی شده در بخش قبل به جای عناصر ایزوتروپیک در چنین آرایه‌ای، توسط نرم افزار HFSS، پترن کل آرایه طراحی شده، بدون در نظر گرفتن کوپلینگ عناصر و نیز تلفات شبکه تغذیه، مطابق با شکل ۱۴ و ۱۵ بدست می آید. در هر دو راستا بهتر از  $-25dB$  است و پهنای پرتو نیم توان در صفحات E و H به ترتیب  $2/6$  و  $6/94$  درجه و مطابق با مقادیر مطلوب است. همچنین بهره بدست آمده حدود  $32dB$  است که البته بدون در نظر گرفتن تلفات ناشی از شبکه تغذیه بوده و در صورتیکه این تلفات حدود  $40\%$  باشد، بهره به  $30dB$  خواهد رسید.



شکل (۱۴): پترن آرایه در صفحه‌ی E



شکل (۱۵): پترن آرایه در صفحه‌ی H

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، پس از استخراج مشخصات لازم برای آنتن، یک آنتن آرایه میکرواستریپی برای کاربرد در رادار روزنه مصنوعی در نظر گرفته شد و یک المان میکرواستریپ با شکاف U شکل و تغذیه تزویج مجاورتی، مورد بررسی پارامتری قرار گرفته و رفتار فرکانسی آن بر حسب ابعاد مختلف ساختار بصورت کیفی بدست آمد. نتایج شبیه سازی و اندازه گیری المان طراحی شده، تطبیق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. همچنین، آرایه‌ای  $۳۲ \times ۱۲$  از المان طراحی شده، با توزیع غیریکنواخت تیلور پیشنهاد و نتایج طراحی اولیه ارائه گردید؛ که نتایج بدست آمده از آن، با مقادیر مطلوب برای مشخصات آنتن رادار موردنظر، که در ابتدا استخراج شد، تطابق دارند.

## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات دانشگاه صنعتی اصفهان، به خاطر حمایت از این پژوهش قدردانی نمایند.

## مراجع

- [1] K. Tomiyasu, "Tutorial review of Synthetic Aperture Radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface," Proc. IEEE, 1978, Vol. 66, pp. 563-583.
- [2] Berens, P., "Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)," Research Institute for High-Frequency Physics and Radar Techniques, Wachtberg, 2003.
- [3] A. W. Doerry, "Performance Limits for Synthetic Aperture Radar," SAR Applications Department Sandia National Laboratories, 2006.
- [4] A. W. Doerry, "Optimal antenna beamwidth for stripmap SAR," Proc. SPIE 8021, Radar Sensor Technology XV, 2011.
- [5] A. Freeman, "The myth of the minimum SAR antenna area constraint," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, Vol. No.38, pp. 320-324.
- [6] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and Fung A.K., Microwave Remote Sensing, Artech House, 1986.
- [7] Z. N., Chia, M. Chen, Broadband planar antennas, Wiley, 2006.

[۸] مرادی، نیک مهر، "طراحی و ساخت آنتن مایکرواستریپ سه بانده و دوپلاریزه برای BTS"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد دهم، شماره اول، صفحه ۱ تا ۶، بهار و تابستان ۱۳۹۲.

[۹] کمجانی، رجبی، "شبیه سازی آنتن Tapered Slot با استفاده از روش ماتریس خط انتقال سه بعدی"، نشریه مهندسی برق و

الکترونیک ایران، سال سوم، شماره دوم، صفحه ۱۴ تا ۲۳، پائیز و زمستان ۱۳۸۵.

- [10] T., Lee, K. F. Huynh, "Single-Layer Single-Patch Wideband Microstrip Antenna," Electronics Letters, 1995, Vol. 31, No. 16, pp. 1310-1312.
- [11] C.L. Mak, K.M. Luk, and K.F. Lee, "Proximity-coupled U-slot patch antenna," Electronics Letters, Apr 1998, Vol. 34, No. 8, pp. 715-716.
- [12] C. Kidder, M. Li, and K. Chang, "Broad-band U-slot patch antenna with a proximity-coupled double /spl Pi/-shaped feed line for arrays," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2002, Vol. 1, No. 1, pp. 2 - 4.
- [13] B. Strassner, "Lightweight, Wideband, Amplitude-Tapered, Linearly-Polarized, Dual-Axis Monopulse, Ku-Band Patch Antenna Array for SAR," Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007, pp. 4409 - 4412.
- [14] S. Huff, G. Pan, K. Bernhard, J.T. Weigand, "Analysis and Design of Broad-Band Single-Layer Rectangular U-Slot Microstrip Patch Antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat, 2003, Vol. 51, No. 3, pp. 457-468.
- [15] D. G. Fang, Antenna theory and microstrip antennas, CRC Press Taylor and Francis Group, 2010.

## زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup> Swath width
- <sup>2</sup> Grazing angle
- <sup>3</sup> Azimuth
- <sup>4</sup> Elevation
- <sup>5</sup> Gain
- <sup>6</sup> SNR
- <sup>7</sup> Chirp
- <sup>8</sup> Frequency Agility
- <sup>9</sup> Multi-Look
- <sup>10</sup> Radar Cross Section
- <sup>11</sup> Parasitic elements
- <sup>12</sup> Huynh
- <sup>13</sup> Lee
- <sup>14</sup> Quarter wave transformer
- <sup>15</sup> Broad side
- <sup>16</sup> Grating lobe
- <sup>17</sup> Matlab