



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی برق

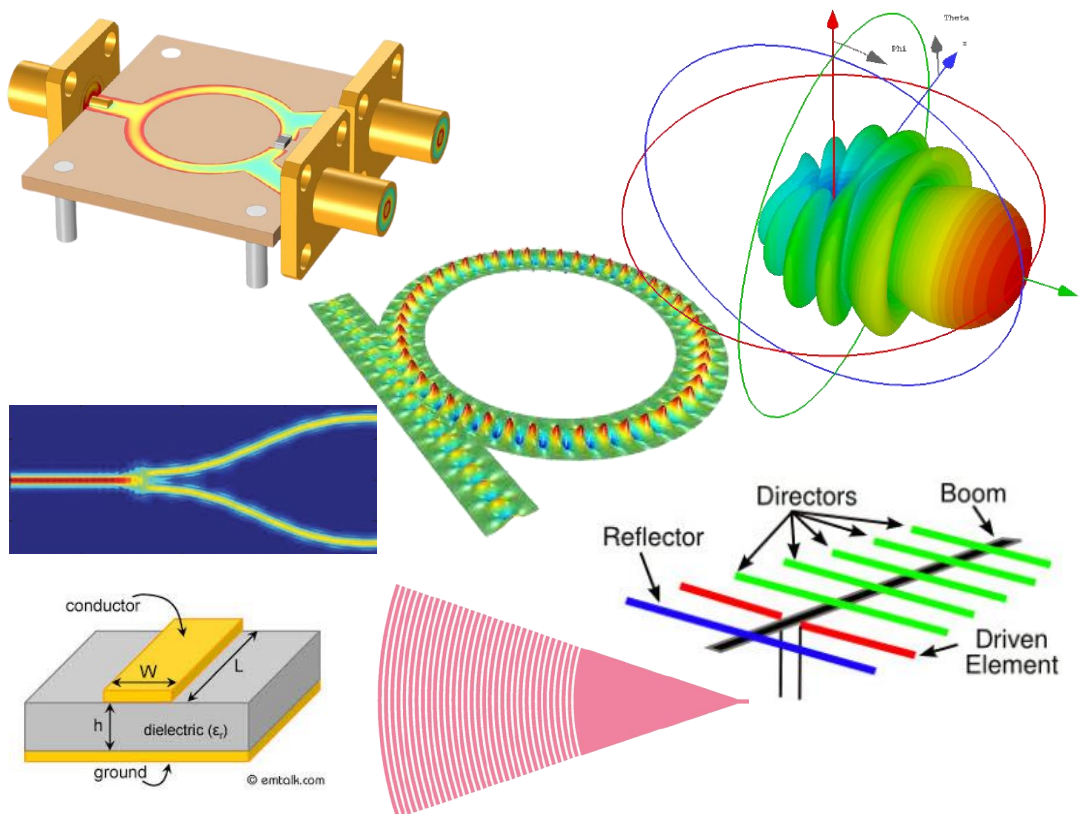
دستور کار

# آزمایشگاه شبیه سازی در الکترومغناطیس

زیر نظر استاد: دکتر محمد معماریان

ارائه دهنده: سمیه بشگری

دستیاران درس: خانم بابارحمتیان، خانم نیکدست، آقای غلامی، آقای آقا رفیعی، آقای جعفری زاده



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
دو	فهرست مطالب
۱	فصل اول : پروژه پایانی
۲	۱-۱ قسمت اول: طراحی تقویت کننده در ADS
۲	۱-۱-۱ شبیه سازی تقویت کننده توان PMA-5451
۲	۱-۱-۲ طراحی هیبرید ۹۰ درجه
۳	۱-۱-۳ طراحی تقویت کننده متوازن
۳	۱-۱-۴ بخش امتیازی
۴	۲-۱ قسمت دوم: طراحی فیلتر در ADS
۴	۱-۲-۱ طراحی فیلتر
۷	۲-۲-۱ شبیه سازی فیلتر در محیط شماتیک
۸	۲-۲-۳ شبیه سازی تمام موج فیلتر
۸	۳-۱ قسمت سوم: طراحی آنتن در HFSS
۱۰	۴-۱ قسمت چهارم: تجميع ساختار در ADS
۱۱	۵-۱ نکاتی در رابطه با تحویل پروژه

# فصل اول

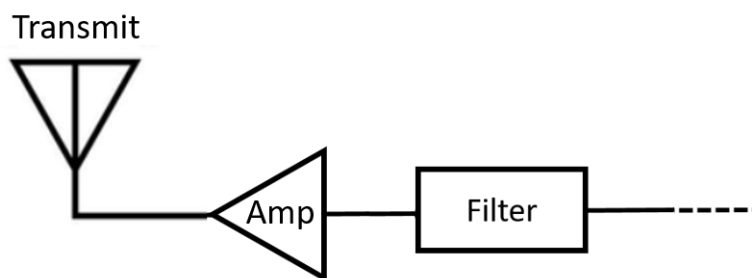
## پروژه پایانی

هدف از پروژه آزمایشگاه این است که با استفاده از قابلیت نرم افزارهایی که فرا گرفتید، یک پروژه کاربردی را شبیه سازی کرده با بخشی از چالش هایی که در پروژه های طراحی عملی وجود دارد، مواجه شوید.

موضوع پروژه طراحی بخشی از سیستم فرستنده یک دستگاه موبایل است. در فرستنده یک دستگاه موبایل، سیگنال باند پایه بعد از انتقال به باند رادیویی وارد مداری شامل تقویت کننده و فیلتر می شود. مداری که در این پروژه طراحی خواهید کرد بخشی از یک سیستم فرستنده است که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. تقویت کننده در این سیستم، یک تقویت کننده از نوع متوازن<sup>۱</sup> که در قسمت اول به طراحی آن خواهید پرداخت. سپس یک فیلتر میان گذر مایکرواستریپ را طراحی و شبیه سازی می کنید. آنتنی که در این دستگاه استفاده میشود یک آنتن PIFA (Planar F-inverted Antenna) است که به دلیل قابلیت مجتمع شدن در سیستم های مخابرات بی سیم مانند موبایل، روتر های وای-فای و ماژول های بلوتوث کاربردهای زیادی دارد و قادر به دریافت سیگنال های باند فرکانسی GSM موبایل می باشد. در قسمت سوم به طراحی این آنتن خواهید پرداخت و در انتها ساختار تجمیع شده را شبیه سازی خواهید کرد.

---

<sup>۱</sup>Balanced Amplifier

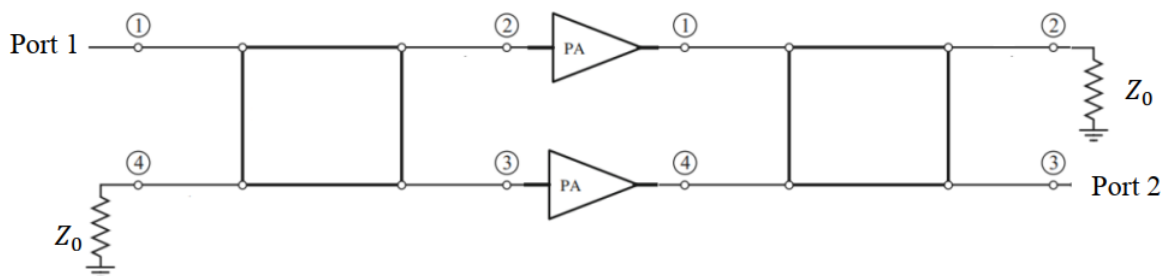


شکل ۱-۱: بخشی از سیستم فرستنده سیستم موبایل

در این پروژه فرکانس مرکزی در تمام قطعات از جمله تقویت کننده و فیلتر و آنتن را مطابق جدول ۱-۱ در انتهای فایل در نظر بگیرید.

## ۱-۱ قسمت اول: طراحی تقویت کننده در ADS

فایل s2p تقویت کننده PMA-5451 به شما داده شده است. در این قسمت می خواهیم با استفاده از مداری که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، یک تقویت کننده متوازن بسازیم. با استفاده از ساختار تقویت کننده متوازن می توانید یک تقویت کننده غیرمنطبق را منطبق کرد.



شکل ۱-۲: تقویت کننده متوازن

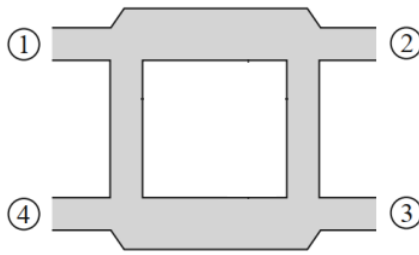
### ۱-۱-۱ شبیه سازی تقویت کننده توان PMA-5451

الف) ابتدا فایل تقویت کننده PMA-5451 را وارد محیط شماتیک ADS کنید و پارامترهای  $S_{11}$  و  $S_{22}$  تقویت کننده را روی یک نمودار رسم کنید.

ب) پارامتر  $S_{21}$  تقویت کننده را رسم کنید.

### ۱-۱-۲ طراحی هیبرید ۹۰ درجه

یک هیبرید ۹۰ درجه به شکل ۱-۳ را در فرکانس  $f_0$  (مطابق جدول) با خطوط ورودی و خروجی ۵۰ اهم طراحی کنید.



شکل ۱-۳: هیبرید ۹۰ درجه

در طراحی خود فرض کنید زیرلایه مورد استفاده RO3006 با ارتفاع 1.27 mm ثابت دی الکتریک 6.15 و  $\tan\delta = 0.0025$  باشد. ضخامت لایه فلز را ۱۸ میکرومتر در نظر بگیرید.

شماتیک مدار را در نرم افزار ADS شبیه سازی و نمودارهای زیر را گزارش کنید. بازه فرکانسی رسم را 2 GHz حول فرکانس  $f_0$  در نظر بگیرید.

راهنمایی: در صورتی که فرکانس کاری هیبرید مقدار خواسته شده نبود، با استفاده از ابزار Tuning فرکانس کاری را تنظیم کنید.

(ج) شماتیک ساختار ترسیم شده را گزارش کنید.

(د) منحنی های اندازه  $S_{ii}$  به ازای  $i = 1, \dots, 4$  را روی یک نمودار رسم کنید.

(ه) منحنی های اندازه  $S_{21}$  و  $S_{31}$  را روی یک نمودار رسم کنید.

(و) منحنی های فاز  $S_{21}$  و  $S_{31}$  را روی یک نمودار رسم کنید.

(ز) نمودار اندازه  $S_{41}$  را رسم کنید.

### ۳-۱-۱ طراحی تقویت کننده متوازن

حال مدار تقویت کننده متوازن به شکل ۱-۲ را رسم کرده و شبیه سازی را انجام دهید.

(ح) نمودارهای  $S_{11}$  و  $S_{22}$  مدار تقویت کننده متوازن را روی یک نمودار رسم کنید.

(ط) پارامتر  $S_{21}$  مدار تقویت کننده متوازن را رسم کنید. پارامتر  $S_{21}$  تقویت کننده اصلی را نیز به نمودار اضافه کنید.

(ی) با مقایسه نمودارهای قسمت (الف-ب) و نمودارهای (ح) و (ط) چه نتیجه ای می گیرید.

### ۴-۱-۱ بخش امتیازی

(ک) آیا می توان برای مدار قسمت قبل، شبیه سازی ممان انجام داد؟ چطور؟ در صورتی که جواب مثبت است آن را انجام دهید و نمودارهای قسمت (ح) و (ط) را به همراه ساختار شبیه سازی شده گزارش کنید.

(ل) حال با استفاده از یکی از مدارات تطبیقی که در درس یاد گرفتید، یک مدار تطبیق ۵۰ اهم در فرکانس  $f_0$  (مطابق

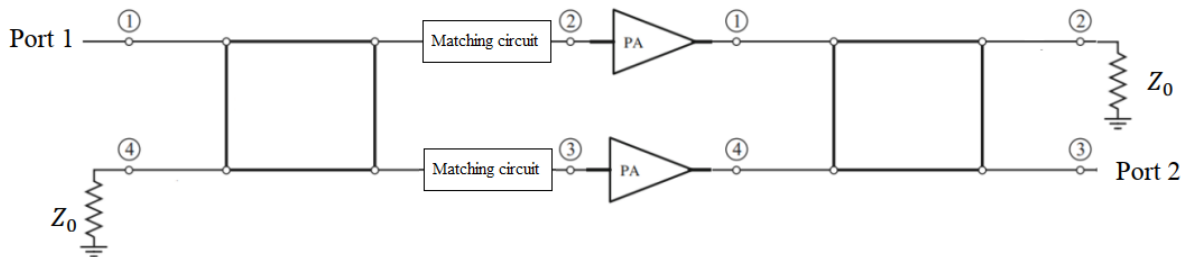
جدول) برای تقویت کننده PMA-5451 طراحی کنید. شماتیک مدار تطبیق را گزارش کنید.

(م) پارامتر  $S_{11}$  مدار تطبیق را رسم کنید.

(ن) حال مدار تطبیق را به شکل ۴-۱ در مدار تقویت کننده متوازن قرار دهید و شبیه سازی مدار را انجام دهید. شماتیک

مدار را گزارش کنید.

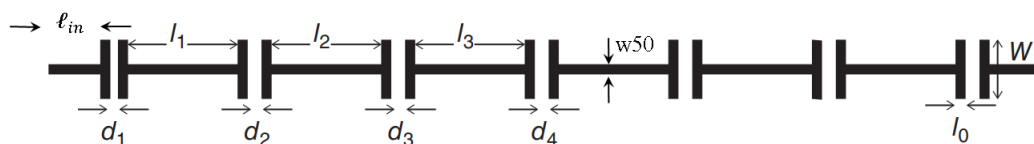
(س) پارامترهای  $S_{11}$  و  $S_{22}$  و  $S_{21}$  را روی یک نمودار رسم کنید و با نمودارهای قسمت (ح) و (ط) مقایسه کنید.



شکل ۴-۱: تقویت کننده متوازن تطبیق شده

## ۲-۱ قسمت دوم: طراحی فیلتر در ADS

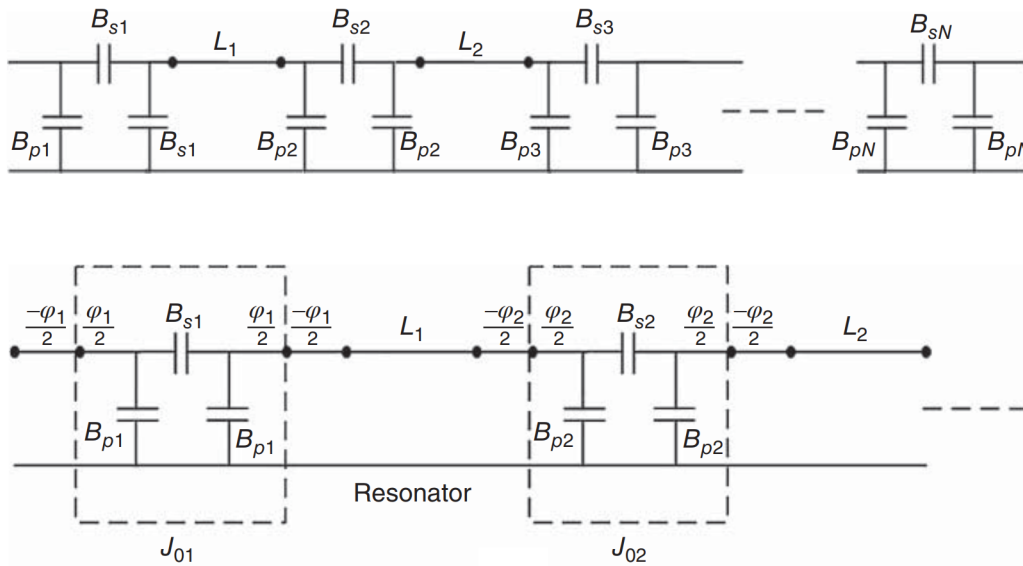
در این قسمت هدف طراحی یک فیلتر مایکرواستریپ مرتبه ۶ به شکل ۵-۱ است که تعدادی رزوناتور با استفاده از شکاف های مایکرواستریپی به هم متصل شده اند. روند طراحی فیلتر در ادامه توضیح داده شده است.



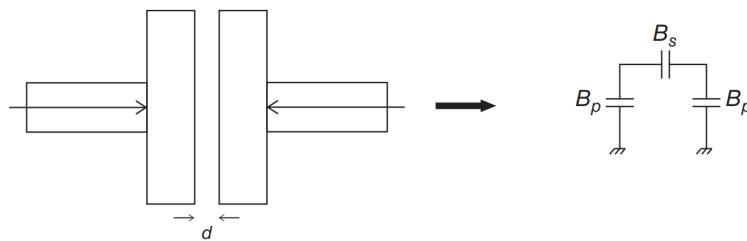
شکل ۵-۱: فیلتر

### ۱-۲-۱ طراحی فیلتر

فیلتر نشان داده شده در شکل ۵-۱ با مدار به شکل ۶-۱ معادل می شود. بدین ترتیب شکاف مایکرواستریپ ۷-۱ با مدار معادلش نشان داده است. برای طراحی فیلتر کافی است مقادیر  $J_{iz}$  و طول  $L_{iz}$  را محاسبه کرد که روند طراحی در ادامه شرح داده شده است.



شکل ۱-۶: مدار معادل فیلتر



شکل ۱-۷: مدار معادل ناپیوستگی

برای طراحی فیلتر چبی شیف با فرکانس مرکزی  $f_0$  و درصد پهنای باند  $FBW = BW/f_0$  و سطح ریل مشخص داده شده و امپدانس مشخصه  $Z_0$ ، ابتدا با استفاده از جدول ۱-۸ مقادیر  $g_i, i = 0, \dots, n+1$  را محاسبه می‌کنیم (دقت کنید برای فیلتر با هر مرتبه‌ای  $g_0 = 1$ ). سپس با استفاده از روابط

$$\begin{aligned}
 J_{01} &= Y_0 \sqrt{\frac{\pi FBW}{2g_0g_1}} \\
 J_{i,i+1} &= \frac{Y_0 \pi FBW}{2\sqrt{g_i g_{i+1}}}, \quad i = 1, \dots, n-1 \\
 J_{n,n+1} &= Y_0 \sqrt{\frac{\pi FBW}{2g_n g_{n+1}}}
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

مقادیر  $J$  را محاسبه می‌کنیم.  $Y_0$  ادmittانس متناظر با امپدانس مشخصه فیلتر است.

For passband ripple  $L_{Ar} = 0.04321$  dB

$n$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$g_7$	$g_8$	$g_9$	$g_{10}$
1	0.2000	1.0								
2	0.6648	0.5445	1.2210							
3	0.8516	1.1032	0.8516	1.0						
4	0.9314	1.2920	1.5775	0.7628	1.2210					
5	0.9714	1.3721	1.8014	1.3721	0.9714	1.0				
6	0.9940	1.4131	1.8933	1.5506	1.7253	0.8141	1.2210			
7	1.0080	1.4368	1.9398	1.6220	1.9398	1.4368	1.0080	1.0		
8	1.0171	1.4518	1.9667	1.6574	2.0237	1.6107	1.7726	0.8330	1.2210	
9	1.0235	1.4619	1.9837	1.6778	2.0649	1.6778	1.9837	1.4619	1.0235	1.0

شکل ۸-۱: جدول مقادیر  $g$ 

برای طراحی فیلتر طول خطوط رزوناتور  $l_j$  و فاصله شکاف ها  $d_j$  مجهول اند. برای محاسبه فواصل شکاف  $d_j$  رابطه مستقیمی برای محاسبه  $d$  از روی  $J$ ، وجود ندارد. اما برای یک  $d$  مفروض روابطی وجود دارند که می توان  $J$  متناظر با آن فاصله شکاف را محاسبه کرد. برای این منظور برای هر شکاف یک  $d_j$  ( $d_j, j = 1, \dots, n+1$ ) دلخواه را فرض کرده و پارامترهای پراکندگی متناظر با آن شکاف را استخراج می کنیم. مطابق شکل ۷-۱ شکاف بین دو خط مایکرواستریپ با مداری متشکل از  $B_p$  و  $B_s$  ها مدل می شود. با استفاده از پارامترهای پراکندگی شکاف دو خط مایکرواستریپ می توان مقادیر  $B_p$  و  $B_s$  را از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \frac{jB_p}{Y_0} &= \frac{1 - S_{12} - S_{11}}{1 + S_{11} + S_{12}} \\ \frac{jB_s}{Y_0} &= \frac{2S_{12}}{(1 + S_{11})^2 - S_{12}^2} \end{aligned} \quad (۲-۱)$$

حال مقادیر  $J_{ij}$  و  $\Phi_j$  از روابط زیر محاسبه می شوند.

$$\begin{aligned} \frac{J}{Y_0} &= \left| \tan \left( \frac{\phi}{2} + \arctan \frac{B_p}{Y_0} \right) \right| \\ \phi &= -\arctan \left( 2 \frac{B_s}{Y_0} + \frac{B_p}{Y_0} \right) - \arctan \frac{B_p}{Y_0} \end{aligned} \quad (۳-۱)$$

دقت کنید ما می خواهیم به مقادیری که در ۱-۱ به دست آوردیم برسیم، اما فواصل  $d_j$  را نمی دانیم. همانطور که گفته شد، برای پیدا کردن این فواصل کافی است یک شکاف به شکل ۷-۱ با  $d$  دلخواه را در ADS شبیه سازی کرده و پارامترهای پراکندگی آن را محاسبه کنیم و از طریق دو رابطه ۲-۱ و ۳-۱ به مقدار  $J$  متناظر با آن را حساب می کنیم. سپس با تغییر فاصله  $d$  کاری می کنیم که  $J$  موردنظر طبق اعداد محاسبه شده از رابطه ۱-۱ به دست آید.

بعد از پیدا کردن فواصل  $d$  و  $\Phi$  متناظر با هر ناپیوستگی می توان از رابطه زیر برای به دست آوردن طول خطوط  $l_j$  استفاده کرد.

$$l_j = \frac{\lambda_{g0}}{2\pi} \left[ \pi + \frac{1}{2} (\phi_j + \phi_{j+1}) \right], \quad j = 1, \dots, n \quad (۴-۱)$$

که  $\lambda_{g0}$  طول موج متناظر با موج انتشاری در خط مایکرواستریپ در فرکانس مرکزی است.



(الف) برای یک فیلتر چبی شف مرتبه ۶ با امپدانس مشخصه ۵۰ اهم با فرکانس مرکزی  $f_0$  (مطابق جدول) و درصد پهنای باند  $FBW = 0.02$  و سطح ریپل برابر 0.04321 dB مقادیر  $J_{ij}$  را محاسبه و گزارش کنید.

(ب) شماتیک ناپیوستگی مایکرواستریپی به شکل ۷-۱ را در نرم افزار ADS رسم کنید.  
 زیرلایه مورد استفاده RO3006 با ارتفاع 1.27 mm ثابت دی الکتریک 6.15 و  $\tan\delta = 0$  باشد. ضخامت لایه فلز را ۱۸ میکرومتر در نظر بگیرید. دقت کنید تلف زیرلایه را در این قسمت صفر در نظر گرفتیم.  
 $l_0$  را برابر عرض خط ۵۰ اهم و  $W = 5w_{50}$  در نظر بگیرید. با تغییر  $d$  می توان مقادیر  $J$  گزارش شده در قسمت الف را محقق کرد. طراحی را طوری انجام دهید که حداقل فاصله بین خطوط مایکرواستریپ  $d_j$  برابر 0.01mm باشد.  
 راهنمایی: در صورتی که با تغییر فاصله دو خط مایکرواستریپ به اعداد مورد نظر  $J$  نمی رسید می توانید با تغییر کوچکی در  $W$  آن را محقق کنید.

فواصل  $d_j$  را طوری طراحی کنید که مقادیر  $J_{ij}$  گزارش شده در قسمت (الف) را محقق کنند. دقت کنید به ازای هر ناپیوستگی در شکل ۵-۱ یک  $d$  به دست می آید. مقادیر به دست آمده برای  $d_j, j = 1, \dots, 7$  را به همراه  $\Phi_j, j = 1, \dots, 7$  ها گزارش کنید.

(ج) با استفاده از رابطه ۴-۱ طول خطوط  $l_j, j = 1, \dots, 6$  را محاسبه و گزارش کنید.

## ۲-۲-۱ شبیه سازی فیلتر در محیط شماتیک

حال می خواهیم فیلتری که طراحی کردیم را شبیه سازی کنیم.

### شبیه سازی با زیرلایه بدون تلف

(د) با استفاده از مقادیر به دست آمده در قسمت های (ب) و (ج) شماتیک فیلتر به شکل ۵-۱ را رسم کرده و شبیه سازی را انجام دهید. شماتیک مدار را گزارش کنید. زیرلایه را RO3006 با مشخصات داده شده در قسمت (ب) در نظر بگیرید.  
 (ه) پارامترهای  $S_{11}$  و  $S_{21}$  فیلتر طراحی شده را گزارش کنید. در صورتی که پاسخی که انتظار داشتید نشد، از بهینه سازی کمک بگیرید و پاسخ را تا حد امکان بهینه کنید.

### شبیه سازی با زیرلایه با تلف

(و) حال یک بار تمامی مراحل طراحی فیلتر قسمت (الف) را برای زیرلایه RO3006 با تلف  $\tan\delta = 0.0025$  انجام دهید و مقادیر طراحی فیلتر شامل  $d_j, j = 1, \dots, n+1$  و  $l_j, j = 1, \dots, n$  را گزارش کنید.

(ز) شماتیک فیلتر را رسم کرده و شبیه سازی را انجام دهید.

(ح) پارامترهای  $S_{11}$  و  $S_{21}$  فیلتر طراحی شده با در نظر گرفتن تلف را گزارش کنید.

### ۳-۲-۱ شبیه‌سازی تمام موج فیلتر

لی‌اوت فیلتر با زیرلایه RO3006 بدون تلف را در نرم‌افزار ADS رسم کرده و شبیه‌سازی تمام موج انجام دهید.  
(ط) پارامترهای  $S_{11}$  و  $S_{21}$  شبیه‌سازی تمام موج را گزارش کنید و با نتایج شماتیک مقایسه کنید.

### ۳-۱ قسمت سوم: طراحی آنتن در HFSS

در این قسمت می‌خواهیم یک آنتن PIFA مطابق با شکل ۹-۱ در فرکانس  $f_0$  (مطابق جدول) طراحی کنیم. آنتن از یک خط مایکرواستریپ به شکل F تشکیل شده که بر روی یک زیرلایه قرار گرفته‌است و استاب بالایی آن مطابق شکل به زمین متصل شده‌است. دقت کنید زمین ساختار تا ابتدای خط تغذیه آنتن ادامه دارد و زیر آنتن صفحه زمین وجود ندارد.

ابعاد آنتن شامل طول  $L_2$  و عرض  $W_a$ ، و ابعاد تغذیه شامل Antenna Offset و Feed Offset را مطابق جدول پارامترهای آنتن در نظر بگیرید. طول اولیه  $L_1$  طوری طراحی کنید که  $L_1 + L_2 = \lambda_0/4$  باشد که  $\lambda_0$  طول موج در فضای آزاد است. عرض خط تغذیه  $W_f$  را طوری در نظر بگیرید خط ۵۰ اهم باشد. طول و عرض زیرلایه  $Y_s$  و  $X_s$  را به اندازه کافی بزرگ در نظر بگیرید طوری که تغذیه خیلی به آنتن نزدیک نباشد و آنتن از دو طرف زیرلایه فاصله کافی داشته باشد. ( $Y_s = 5L_2$  و  $X_s = 2L_1$ )

زیر لایه را RO3006 با ارتفاع 1.27 mm ثابت دی الکتریک 6.15 و  $\tan\delta = 0.0025$  و ضخامت لایه فلز را ۱۸ میکرومتر در نظر بگیرید.

الف) آنتن را طراحی کنید و آن را در نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی کنید. پارامترهای طراحی شده و شکل ساختار ترسیم‌شده را گزارش کنید.

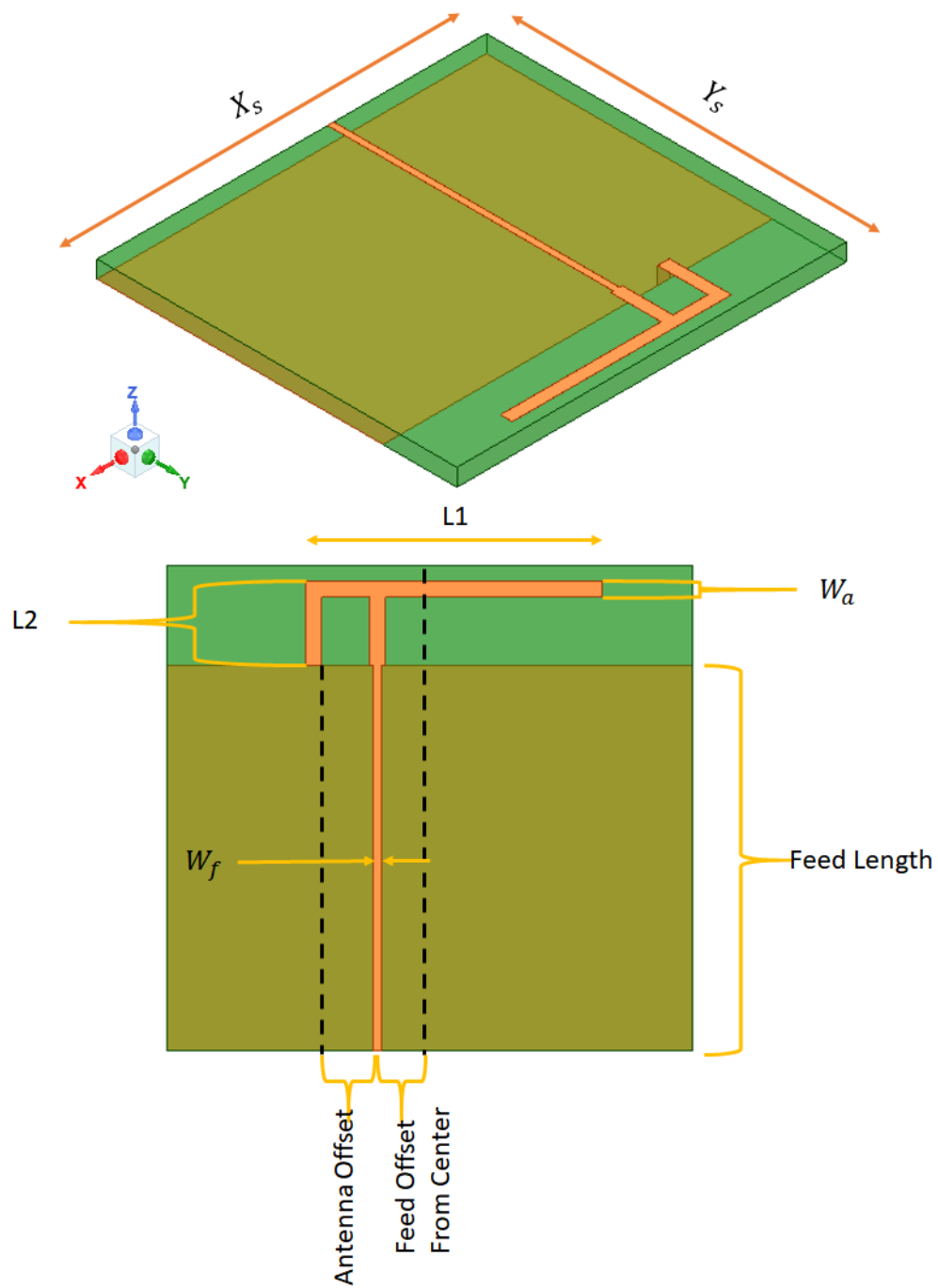
ب) آنتن را شبیه‌سازی کرده و فرکانس کاری آنتن را بیابید. در صورتی که فرکانس آنتن بعد از شبیه‌سازی مطابق با فرکانس موردنظر (مطابق جدول) نبود، لازم است با تغییر  $L_1$  طراحی را طوری تغییر دهید که فرکانس کاری آنتن همان فرکانس موردنظر باشد. با تغییر عرض خط تغذیه  $W_f$  طراحی طوری تغییر دهید که درصد پهنای باند 20 dB آنتن بیشتر از ۳ درصد شود.

ج) نمودار اندازه  $S_{11}$  را برای ساختار بهینه در بازه فرکانسی 1 GHz حول فرکانس تشدید آنتن رسم کنید.

د) پترن تشعشعی Realized Gain آنتن را برای ساختار بهینه در فرکانس تشدید به صورت سه بعدی برحسب dB رسم کنید.

و) پترن تشعشعی Realized Gain را در دو صفحه  $\phi = 0^\circ$  و  $\phi = 90^\circ$  برحسب dB رسم کنید.

ز) (امتیازی) با طراحی یک مدار تطبیق پهن‌بند، پهنای باند آنتن را به بیش از ۱۰ درصد برسانید. شبیه‌سازی را انجام



شکل ۱-۹: آنتن PIFA

داده و نتایج قسمت های (الف) تا (و) را گزارش کنید.

## ۴-۱ قسمت چهارم: تجميع ساختار در ADS

حال ميخواهيم ساختار متشكل از سه قسمت قبل به شكل ۱-۱ را شبیه سازی کنیم. پارامتر  $S_{11}$  آنتن را به صورت يك فایل slp استخراج کنید.

با تركيب شبیه سازی های قبل، ساختار تجميع شده را در محیط شماتيك ADS رسم کرده و شبیه سازی را انجام دهید.

الف) پارامتر پراکندگی  $S_{11}$  ساختار را رسم کنید. آیا فرکانس طراحی درست است؟

## ۵-۱ نکاتی در رابطه با تحویل پروژه

گروه‌بندی مطابق جدول ۱-۱ است.

جدول ۱-۱: گروه‌بندی

شماره گروه	اعضای گروه	$f_0(\text{MHz})$
۱	حسن واحدی نژاد - دانا همتی	900
۲	آرتین صفائی اسلخ زیر - علی توکلی	1200
۳	هومان افصحی - حدیث روحانی	1400
۴	دانیال راستی جونفانی - ملیکا رجبی	1600
۵	میثم اسدی ولیلو - محمدحسن شریفی	1800
۶	دانیال سلطانی - محمدحسین راغی دهنقی	2100
۷	امیرصدرا پیشکاری - رضا رحمانی	2300

ابعاد آنتن برای گروه‌های مختلف در جدول ۲-۱ آورده شده است.

جدول ۲-۱: پارامترهای آنتن

شماره گروه	L2 (cm)	$W_a(\text{cm})$	Antenna Offset (cm)	Feed Offset (cm)
۱	1.9	0.36	1.07	1.19
۲	1.39	0.26	0.78	0.87
۳	1.17	0.22	0.66	0.73
۴	1.01	0.19	0.57	0.63
۵	0.88	0.17	0.5	0.55
۶	0.74	0.14	0.42	0.46
۷	0.67	0.13	0.38	0.42

به نکات زیر در خصوص تحویل دقت کنید:

۱- فایل‌های شبیه‌سازی بدون نتایج را به همراه گزارش در سامانه بارگذاری کنید (هر گروه یک فایل zip تحویل

دهد). لطفا حتما برای فایل‌های هر بخش نام‌های با مسما انتخاب کنید.

۲- بخشی از نمره پروژه به گزارش تعلق خواهد گرفت. بنابراین نکات مربوط به نگارش را رعایت کنید و گزارش

را مختصر و مفید بنویسید.

۳- محورهای مختصات و مقیاس آن‌ها در نمودارهایی که رسم می‌کنید، مشخص باشند و عکس‌های با کیفیت

مناسب قرار دهید.