

"به نام خدا"

پروژه ی نهایی درس ماکروویو

استاد:دکتر کمره ای

چیف :مهندس جمال کزازی

طراحی:

محمدرضا آرانی

810196405

محمد مظفری

810196588

دانشگاه تهران

1399/11/20

محاسبات تئوری:

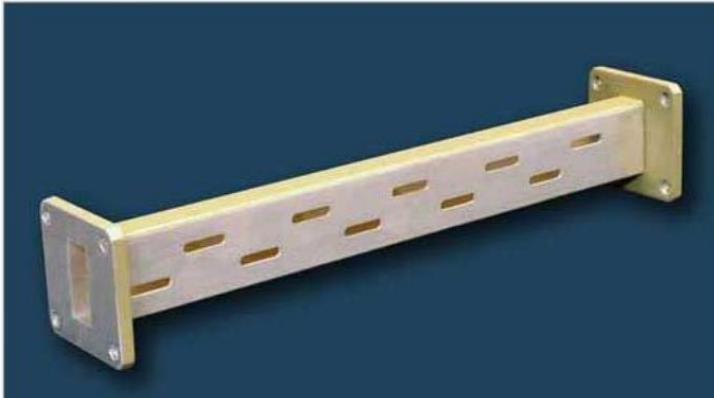
هدف طراحی و بررسی یک موجبر حلقوی برای کاربری Annular Waveguide Slot Antenna (AWSA) یا آنتن شکافی موجبر حلقوی است. اولین بار مفهوم این نوع آنتن ها توسط

S. Ebadi and K. Forooraghi

در سال 2007 در مقاله ای در IEEE معرفی شد تا در نهایت به عنوان یک المان در آنتن های آرایه ی شکافی مسطح دایره ای استفاده شوند.

با استفاده از شباهت زیاد با broad-wall rectangular waveguide slot قابل پیش بینی بود که این نوع اسلات (شکاف) مانند یک ادمیتانس موازی در موجبر های حلقوی (دایروی) عمل می کند.

شکل زیر نمونه ای از یک Slotted broad-wall rectangular waveguide antenna هست.



Slotted Broad Wall Microwave Antenna

سلاٹڈ برڈ وॉल माइक्रोवेव एंटीना, मोबाइल टॉवर

₹ 4,300/ Piece [Get Latest Price](#)

Frequency	8.2 -12.4 GHz
Application	Mobile Tower
Material	Brass
Thickness	6-14 mm

Slotted Broad Wall Antenna is a robust constructed and wide band

[View Complete Details](#)

1 Figure

برای راحتی محاسبات دیواره ها PEC (Perfect Electric Conductor) در نظر گرفته شده اند.

برای حل کردن مود TE_z را در نظر می گیریم.

با در نظر گرفتن معادله حاکم در موجبر (معادله هلم هولتز) در مختصات سیلندری برای جهت های ρ, z نیز standing wave در نظر گرفته شده است.

$$TE^z \Rightarrow \begin{cases} \bar{A} = 0 \\ \bar{F} = \hat{a}_z F_z(\rho, \varphi, z) \end{cases}, \quad \nabla^2 F_z + \beta^2 F_z = 0$$

$$\frac{\partial^2 F_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 F_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} + \beta^2 F_z = 0 \quad (1)$$

$$F_z = [A_1 J_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y_m(\beta_\rho \rho)] \times [A_2 \cos(\beta_z z) + B_2 \sin(\beta_z z)]$$

$$\times [A_3 \exp(-jm\varphi)] \quad , \quad \beta_z^2 + \beta_\rho^2 = \beta^2, m = 0, 1, 2, \dots$$

2Figure

$$E_{zF} = 0$$

$$E_{\varphi F} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial F_z}{\partial \rho} = \frac{\beta_\rho}{\varepsilon} [A_1 J'_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y'_m(\beta_\rho \rho)]$$

$$\times [A_2 \cos(\beta_z z) + B_2 \sin(\beta_z z)] \times [A_3 \exp(-jm\varphi)] \quad (2)$$

$$E_{\rho F} = -\frac{1}{\varepsilon \rho} \frac{\partial F_z}{\partial \varphi} = \frac{-jm}{\varepsilon \rho} [A_1 J_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y_m(\beta_\rho \rho)]$$

$$\times [A_2 \cos(\beta_z z) + B_2 \sin(\beta_z z)] \times [-A_3 \exp(-jm\varphi)]$$

3Figure

سپس از روی بردار پتانسیل ها میدان های الکتریکی به دست می آیند.

حال شرایط مرزی متناسب با موجبر در جهت z را اعمال می کنیم:

$$z = 0 \Rightarrow E_{\rho F} = 0 \Rightarrow A_2 = 0$$

$$z = h \Rightarrow E_{\rho F} = 0 \Rightarrow \beta_{zF} = \frac{n\pi}{h}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

4Figure

شرایط مرزی در جهت ρ را اعمال می کنیم:

$$\begin{aligned}
\rho = a &\Rightarrow E_{\phi F} = 0 \Rightarrow [A_1 J'_m(\beta_\rho a) + B_1 Y'_m(\beta_\rho a)] = 0 \\
&\Rightarrow \frac{A_1}{B_1} = -\frac{Y'_m(\beta_\rho a)}{J'_m(\beta_\rho a)} \\
\rho = b &\Rightarrow E_{\phi F} = 0 \Rightarrow [A_1 J'_m(\beta_\rho b) + B_1 Y'_m(\beta_\rho b)] = 0 \\
&\Rightarrow B_1 \left[-\frac{Y'_m(\beta_\rho a)}{J'_m(\beta_\rho a)} J'_m(\beta_\rho b) + Y'_m(\beta_\rho b) \right] = 0 \\
&\Rightarrow J'_m(\beta_\rho b) Y'_m(\beta_\rho a) - J'_m(\beta_\rho a) Y'_m(\beta_\rho b) = 0
\end{aligned} \tag{4}$$

5 Figure

با حل معادله ی بالا β_ρ به ازای هر m (ثابت انتشار):

$$\begin{cases} \beta_{zF} = \frac{n\pi}{h}, n = 1, 2, 3, \dots \\ J'_m(\beta_\rho b) Y'_m(\beta_\rho a) - J'_m(\beta_\rho a) Y'_m(\beta_\rho b) = 0 \Rightarrow \beta_{\rho F} \end{cases} \tag{5}$$

6 Figure

برای به دست آوردن شرایط کات آف باید $m=0$ در نظر گرفته شود.

$$\begin{cases} m = 0 \Rightarrow \beta_{\rho F} = 138.3 \\ \beta_{zF} = \frac{n\pi}{h} = 309.21, 618.42, \dots \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \beta_{cF} = \sqrt{\beta_{\rho F}^2 + \beta_{zF}^2} \\ f_{cF} = \frac{c \beta_{cF}}{2\pi} = 16.17 \text{GHz}, \dots \end{cases} \tag{7}$$

7 Figure

در بالا این مقادیر طوری انتخاب شده اند که فرکانس کاری ما در باند X باشد.

در بالا فرکانس قطع مود های TE_z حول 16.17 گیگا هرتز به دست آمده است که از باند X مورد نظر ما فاصله دارد برای همین مود TM_z بررسی شده است.

برای حل کردن مود TM_z را در نظر می گیریم.

$$TM^z \Rightarrow \begin{cases} \bar{A} = \hat{a}_z A_z(\rho, \varphi, z) \\ \bar{F} = 0 \end{cases}, \quad \nabla^2 A_z + \beta^2 A_z = 0$$

$$A_z = [A_1 J_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y_m(\beta_\rho \rho)] \times [A_2 \cos(\beta_z z) + B_2 \sin(\beta_z z)] \quad (8)$$

$$\times [A_3 \exp(-jm\varphi)]$$

$$\beta_z^2 + \beta_\rho^2 = \beta^2, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

8Figure

$$E_{\varphi A} = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \varphi \partial z} = \frac{\beta_z}{\omega \mu \epsilon} \frac{m}{\rho} [A_1 J_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y_m(\beta_\rho \rho)]$$

$$\times [-A_2 \sin(\beta_z z) + B_2 \cos(\beta_z z)] \times [-A_3 \exp(-jm\varphi)]$$

$$E_{\rho A} = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} = -j \frac{\beta_z \beta_\rho}{\omega \mu \epsilon} [A_1 J'_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y'_m(\beta_\rho \rho)] \quad (9)$$

$$\times [-A_2 \sin(\beta_z z) + B_2 \cos(\beta_z z)] \times [A_3 \exp(-jm\varphi)]$$

$$E_{zA} = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) A_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \beta_\rho^2 A_z$$

9Figure

$$z = 0 \Rightarrow E_{\rho A} = 0 \Rightarrow B_2 = 0$$

$$z = h \Rightarrow E_{\rho A} = 0 \Rightarrow \beta_{zA} = \frac{n\pi}{h}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

10Figure

$$\begin{aligned}
\rho = a &\Rightarrow E_{\varphi A} = 0 \Rightarrow [A_1 J_m(\beta_\rho a) + B_1 Y_m(\beta_\rho a)] = 0 \\
&\Rightarrow \frac{A_1}{B_1} = -\frac{Y_m(\beta_\rho a)}{J_m(\beta_\rho a)} \\
\rho = b &\Rightarrow E_{\varphi A} = 0 \Rightarrow [A_1 J_m(\beta_\rho b) + B_1 Y_m(\beta_\rho b)] = 0 \\
&\Rightarrow B_1 \left[-\frac{Y_m(\beta_\rho a)}{J_m(\beta_\rho a)} J_m(\beta_\rho b) + Y_m(\beta_\rho b) \right] = 0 \\
&\Rightarrow J_m(\beta_\rho b) Y_m(\beta_\rho a) - J_m(\beta_\rho a) Y_m(\beta_\rho b) = 0
\end{aligned} \tag{11}$$

11 Figure

مراحل دقیقاً مانند TEZ طی شده اند و به نتیجه ی زیر می رسیم:

$$\begin{cases} \beta_z = \frac{n\pi}{h}, n = 0, 1, 2, \dots \\ J_m(\beta_\rho b) Y_m(\beta_\rho a) - J_m(\beta_\rho a) Y_m(\beta_\rho b) = 0 \Rightarrow \beta_{\rho A} \end{cases} \tag{12}$$

12 Figure

SOLUTIONS OF β_ρ IN TERMS OF DIFFERENT M

m	0	1	2	3	4
β_ρ	137.2	138.3	141.5	146.7	153.7

13 Figure

$$\begin{cases} m = 0 \Rightarrow \beta_{\rho A} = 137.2 \\ \beta_{zA} = \frac{n\pi}{h} = 0, 309.21, \dots \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \beta_{cA} = \sqrt{\beta_{\rho A}^2 + \beta_{zA}^2} \\ f_{cA} = 6.55 \text{GHz}, \dots \end{cases} \tag{14}$$

14 Figure

فرکانس قطع مود TMz حول 6.55 گیگا هرتز به دست آمد که از باند X کمتر بوده و می توان از تحریک این مود برای استفاده در این باند استفاده کرد.

**X-BAND 90° ANNULAR WAVEGUIDE RESONANT FREQUENCIES;
THEORY AND SIMULATION COMPARISON**

$m/2$	β_ρ (Theory)	f_r (Theory)	f_r (HFSS)
1	141.5	6.75	6.71
2	153.7	7.34	7.30
3	172.2	8.22	8.19
4	194.9	9.3058	9.2905

15 Figure

حال m های متفاوت را برای رسیدن به فرکانس مورد نظر که در میانه ی باند X باشد را در نظر گرفته و نتایج در جدول بالا آمده است.

شبیه سازی:

در شکل زیر طراحی کلی این نوع آنتن برای $\text{PHI}=90$ degrees مشاهده می کنید که دارای یک شکاف است.

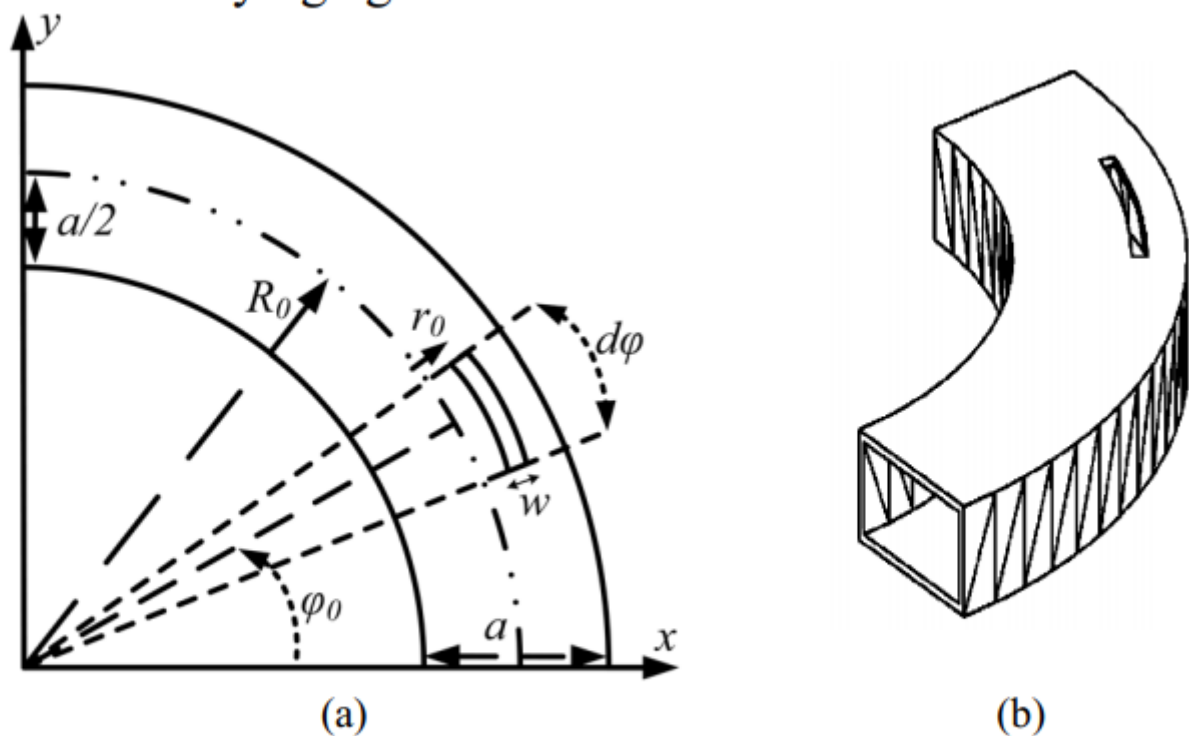


Fig. 1 A single slot AWSA and involved parameters; (a) Top (b) 3-D view

16 Figure

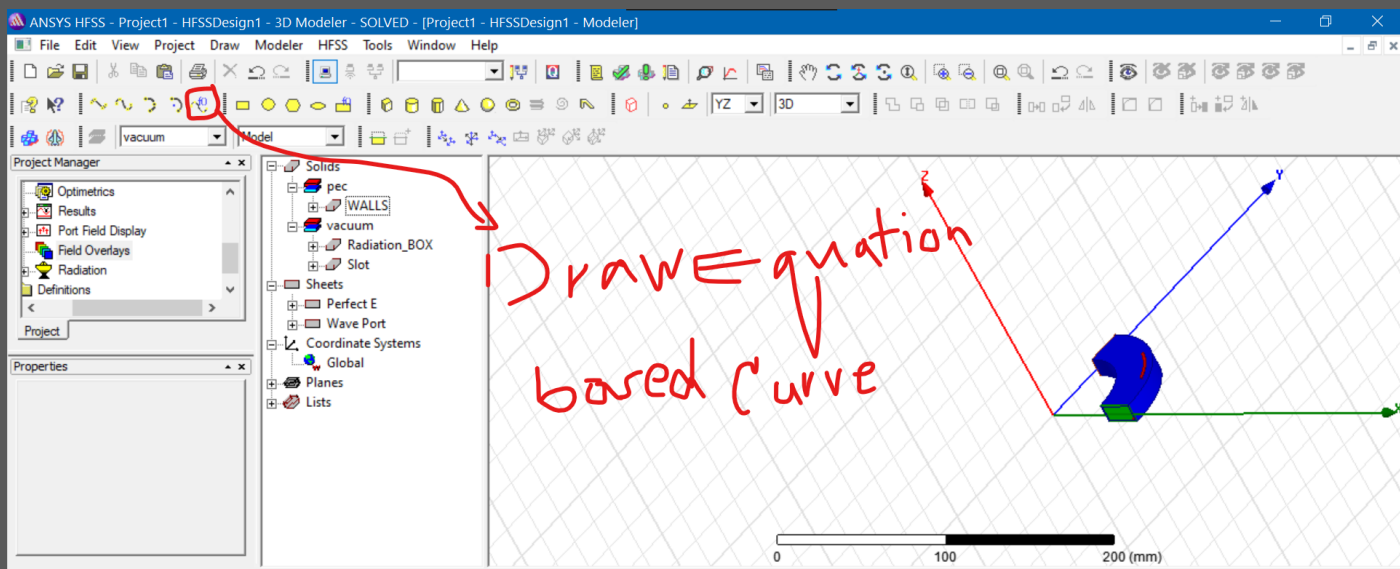
SINGLE AWSA FABRICATION PARAMETERS

Symbol	Description	Value	Symbol	Description	Value
λ_0	Centre wavelength	32.26mm	w	Slot width	1.6mm
λ_g	Guided wavelength	45.52mm	r_0	Slot offset	7mm
a	W.G. dimension	22.86mm	R_0	W.G. mean radius	58mm
b	W.G. dimension	10.16mm	ϕ_0	Slot ϕ position	37° (9.5% tuned)
t	Wall thickness	1mm	$d\phi_0$	Slot length	14.2°

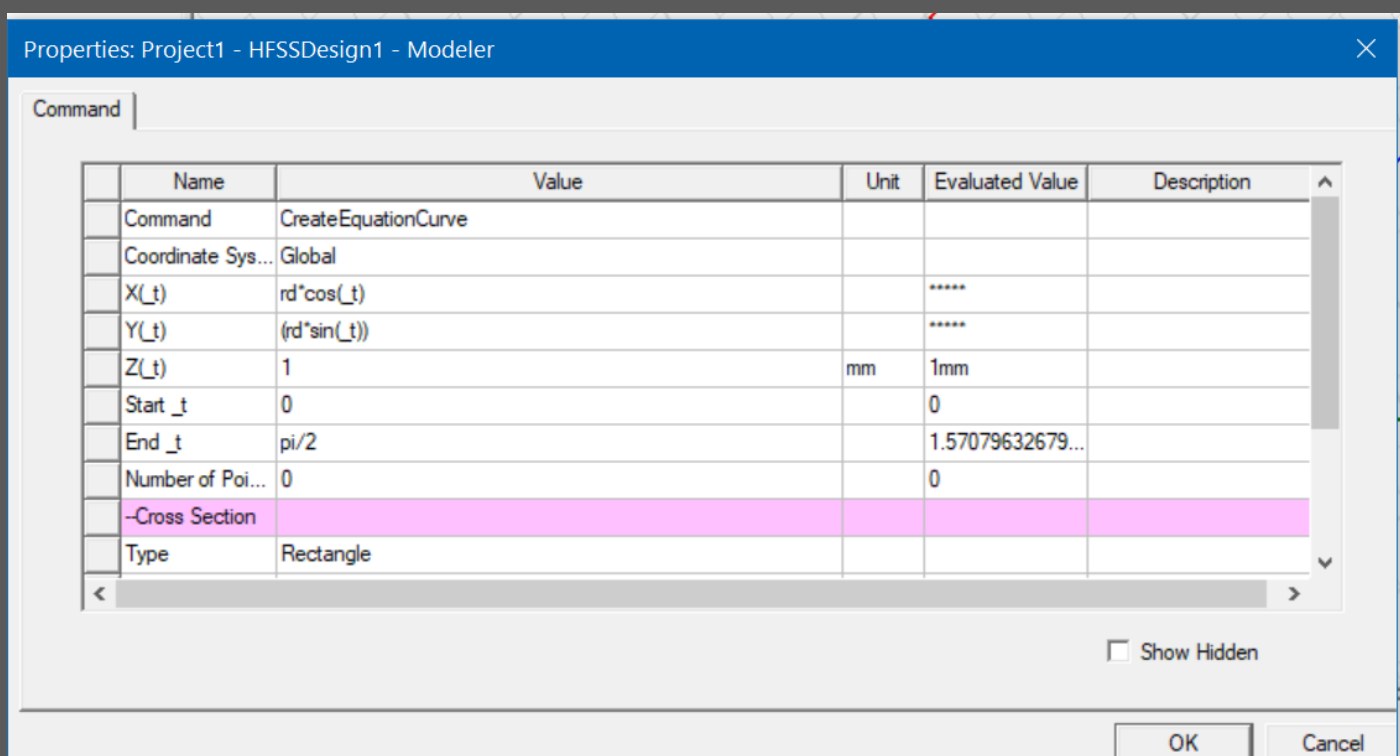
17 Figure

مقادیر فوق برای رسیدن به این فرکانس و مچ بودن ورودی در فرکانس کاری و همچنین گین (Gain) مورد نیاز داده شده است.

برای کشیدن این شکل خاص در HFSS نیاز بود تا از Draw Equation Based Curve استفاده کرد.



18 Figure



19 Figure

پس از انتخاب گزینه ی فوق صفحه ی بالا باز می شود که در قسمت های X,Y,Z باید معادله ی منحنی مورد نظر را نوشته و سپس مقدار متغیر و بازه ی تغییرات آن را در جلوی Start_t و End_t بنویسیم. نوع منحنی را مستطیلی و با توجه به شکل مورد نظر طراحی انتخاب می کنیم.

Type	Rectangle			
Orientation	Auto			
Width/Diameter	a		22.5mm	
Top Width	b		10.16mm	
Height	b		10.16mm	
Number of Seg...	0		0	

Figure 20

در انتها نیز باید مقدار قطر و ارتفاع ماژول مورد نظر انتخاب کنیم که با توجه به مقادیر با همان اسم ها در قسمت های بالا وارد شده اند.

معادله ی ربع دایره نیز برابر:

$$X(t) = R * \cos(t);$$

$$Y(t) = R * \sin(t);$$

است که در آن t از 0 تا 90 درجه تغییر پیدا می کند.

برای دیواره ی موجبر مقدار عرض و ارتفاع را به علاوه $t*2$ می کنیم که t ضخامت دیواره است.

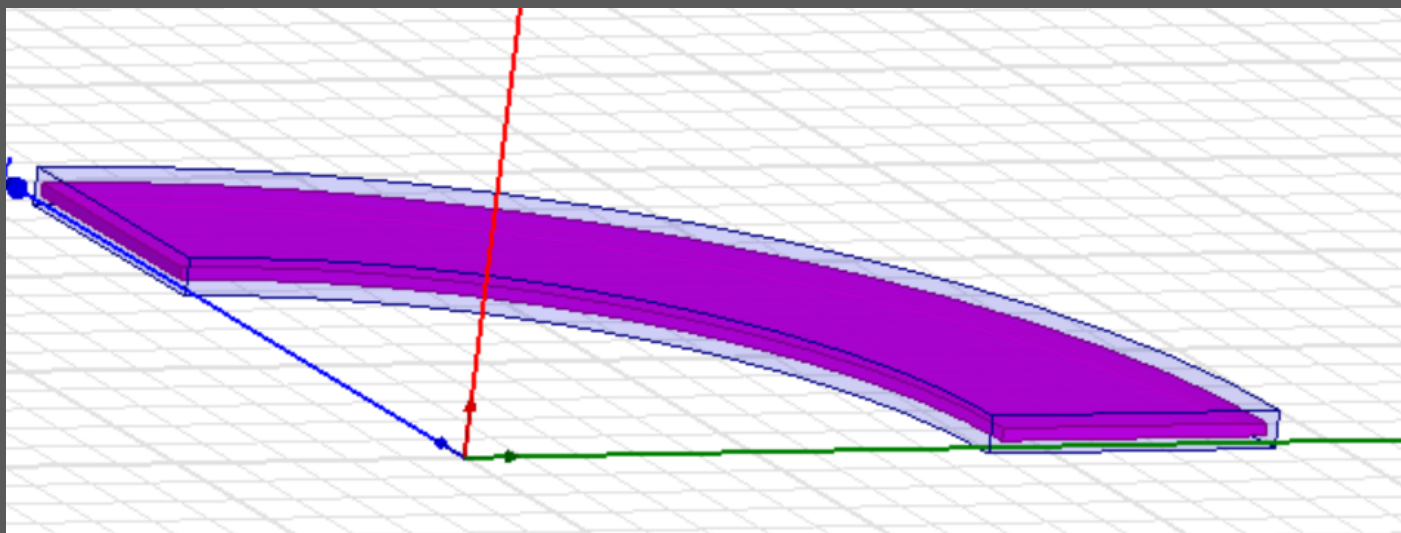


Figure 21

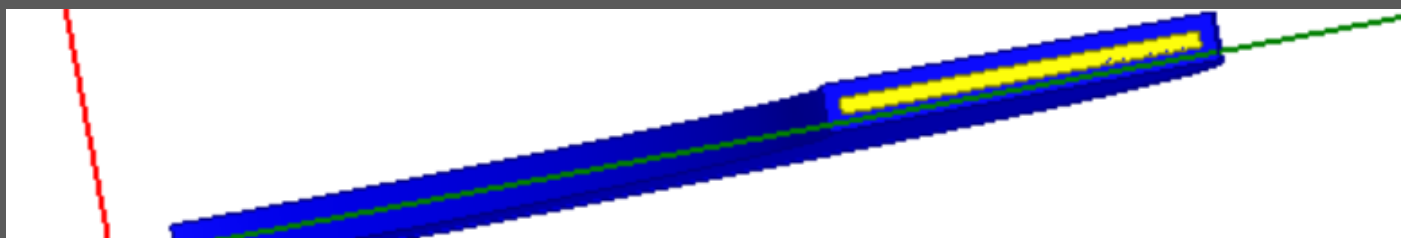


Figure 22

برای محل قرار گیری اسلات نیز نقطه ی شروع و پایان را متناسب با زاویه شروع که همان

$$\Phi_0 - d\phi$$

و نقطه ی پایان که $\Phi_0 + d\phi$

است قرار می دهیم.

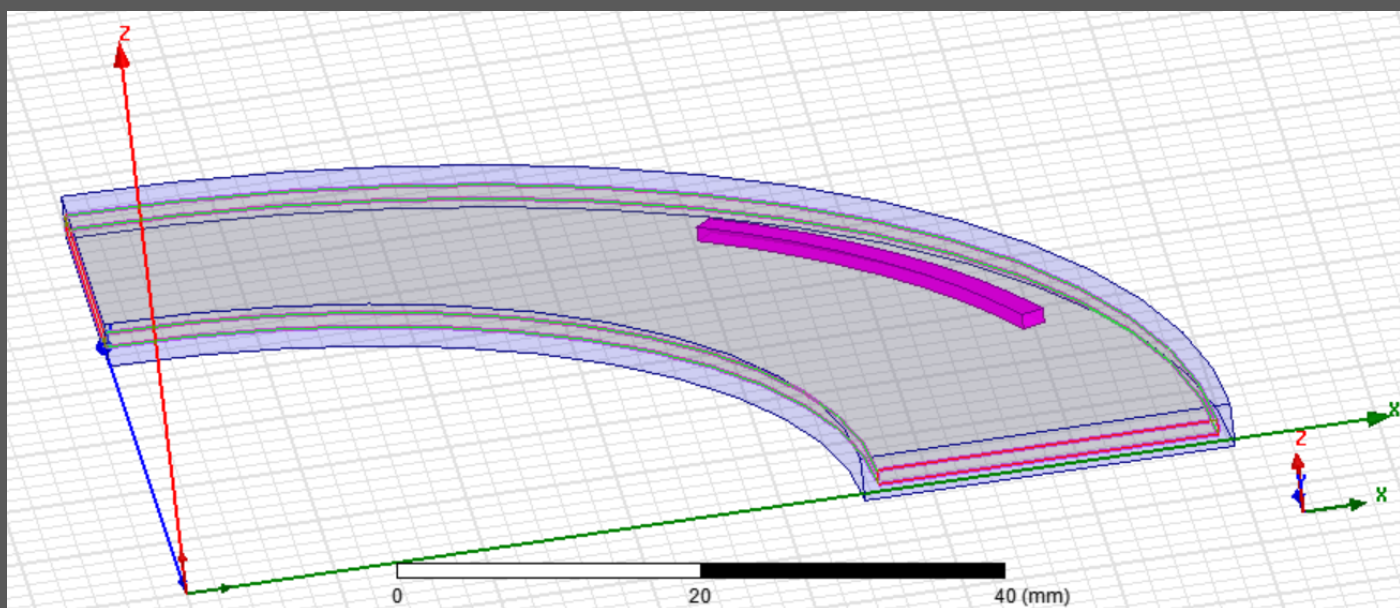


Figure 23

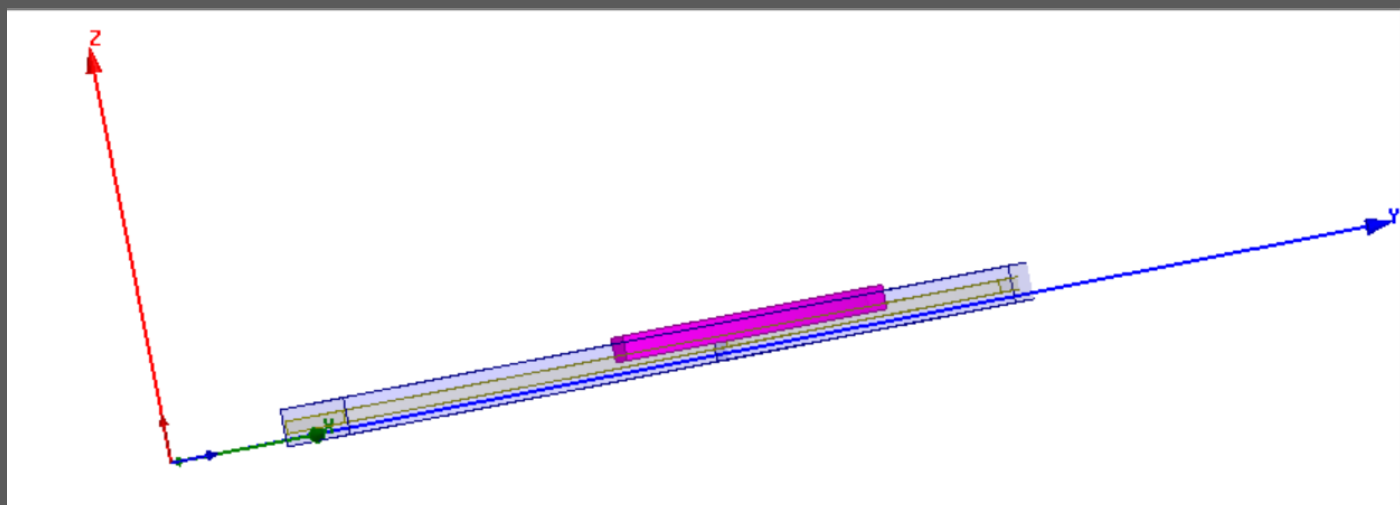


Figure 24

ارتفاع این اسلات را طوری تنظیم می کنیم که هم با هوای درون و هم با هوای بیرون intersection یا برخورد داشته باشد تا در نهایت آنها را باهم Unite کنیم.

برای اینکه یک پارامتر های یک آنتن را مشاهده کنیم لازم است تا یک باکس هوای بزرگ به عنوان Radiation Box انتخاب کرده و به عنوان شرط مرزی قرار دهیم.

همچنین Port های ورودی و خروجی به عنوان Sheet انتخاب شده و پورت 1 به عنوان منبع تحریک و پورت 2 به عنوان شرط مرزی PEC قرار داده شده است.

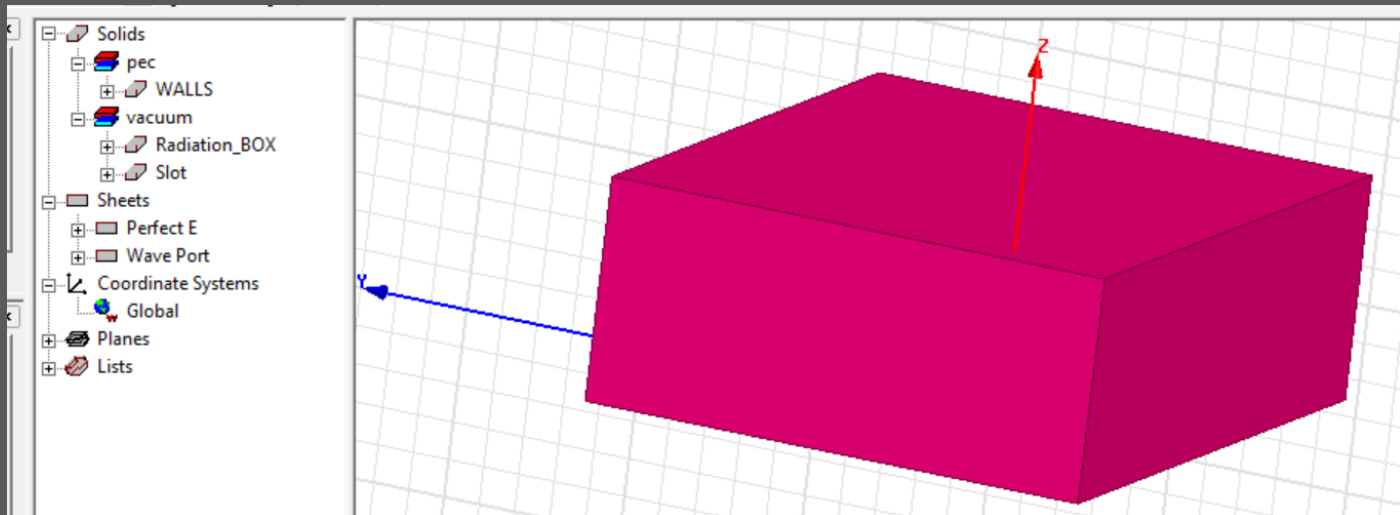


Figure 25

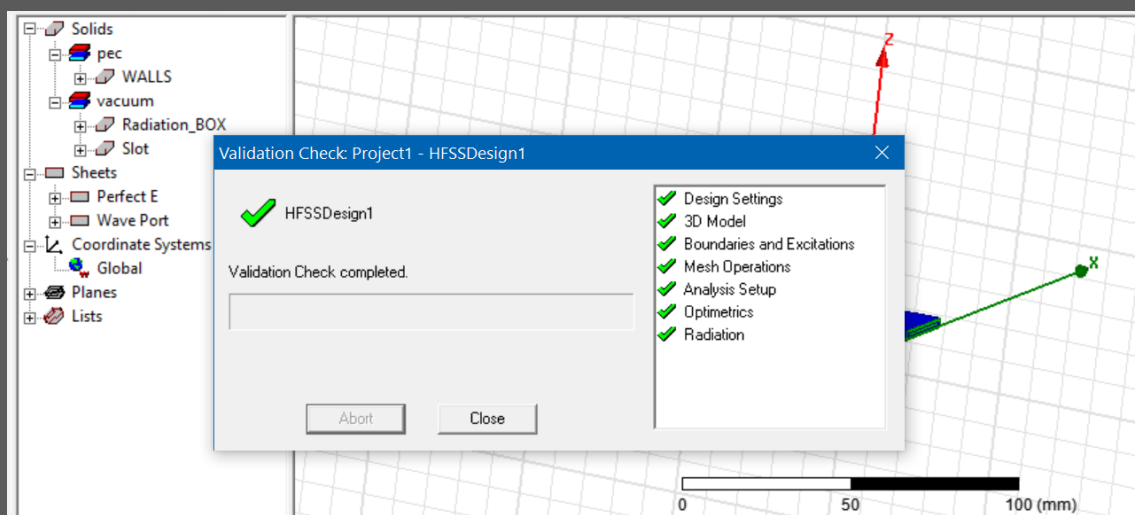


Figure 26

در نهایت با قرار دادن تمام اجزا و معین کردن نوع حل و بازه ی فرکانسی مورد حل می توان آن را شبیه سازی کرد که زمان مورد نیاز حداقل 20 دقیقه می باشد.

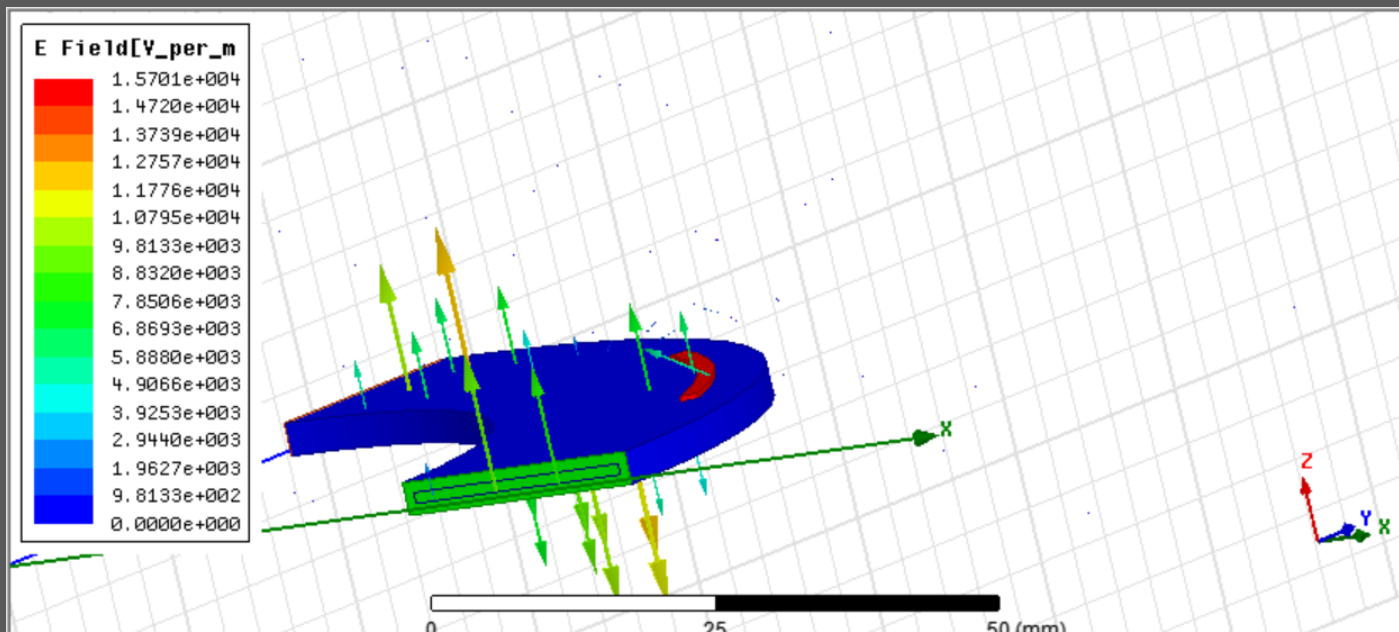


Figure 27

در شکل فوق میدان های الکتریکی از ابتدای پورت 1 قابل مشاهده هستند.

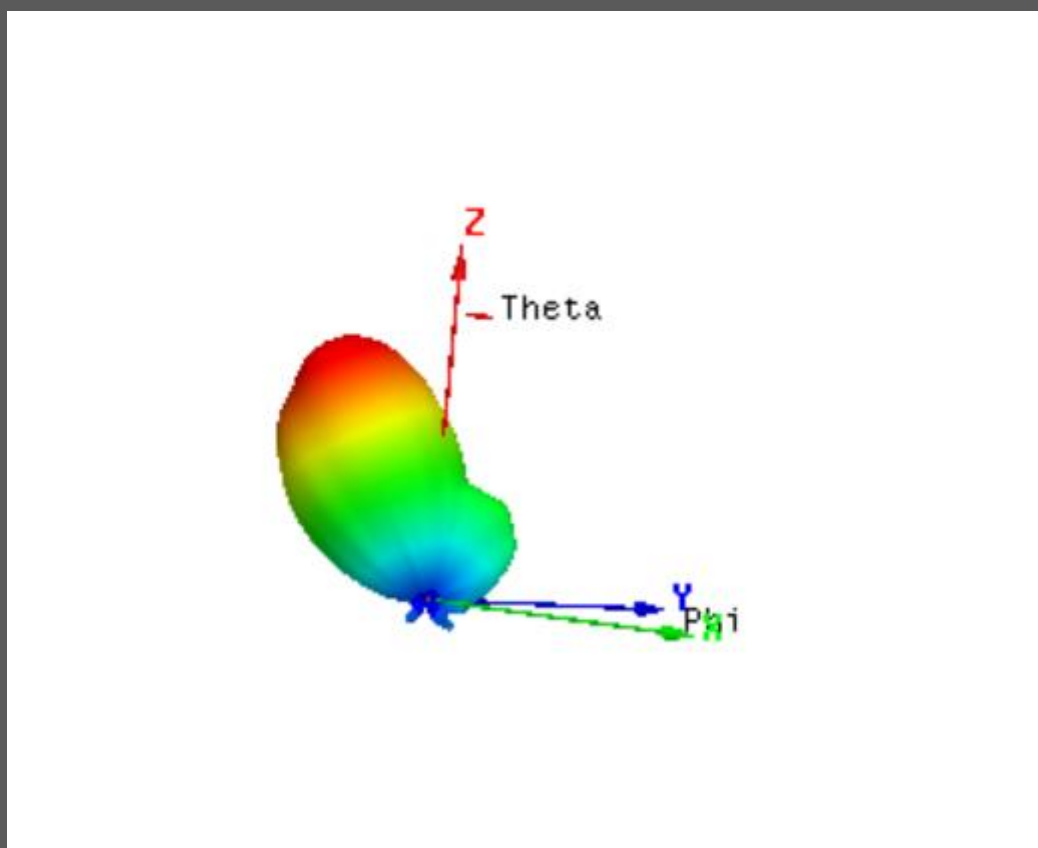


Figure 28

پترن تشعشعی آنتن در بالا آمده است.

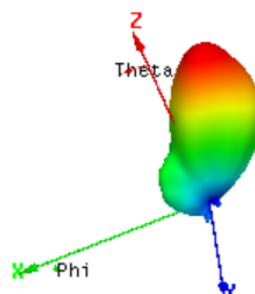
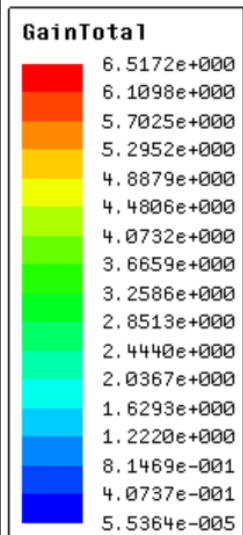


Figure 29

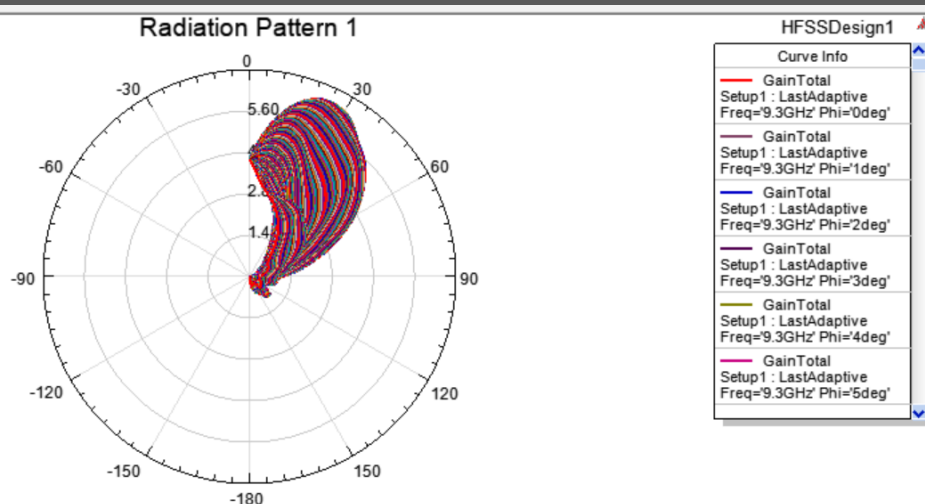


Figure 30

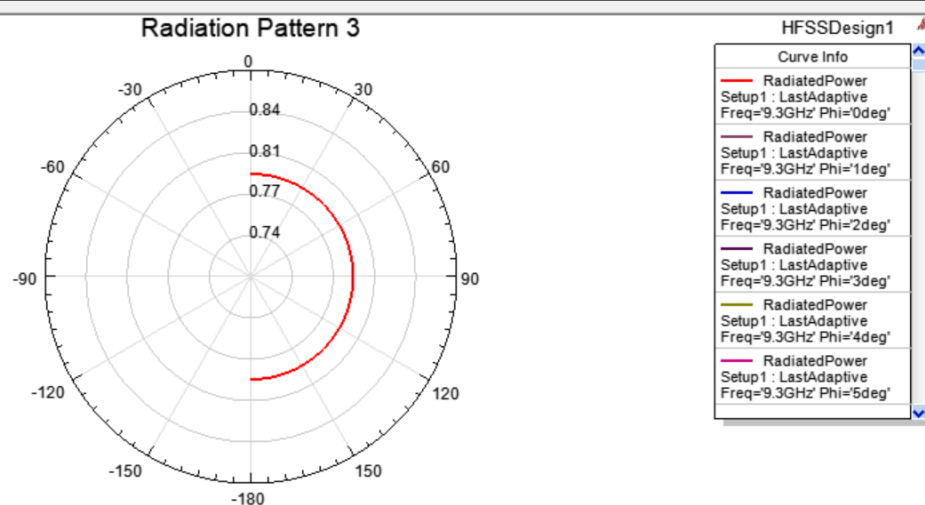


Figure 31

توان تشعشع شده توسط آنتن در شکل بالا آمده است.

• مقدار S_{11} :

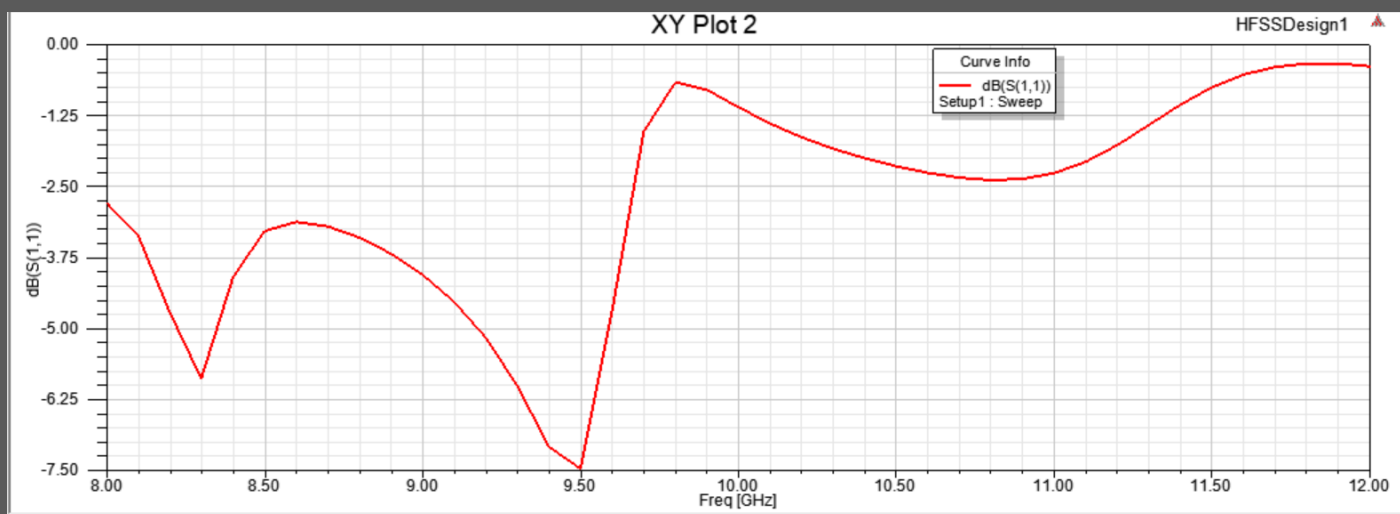
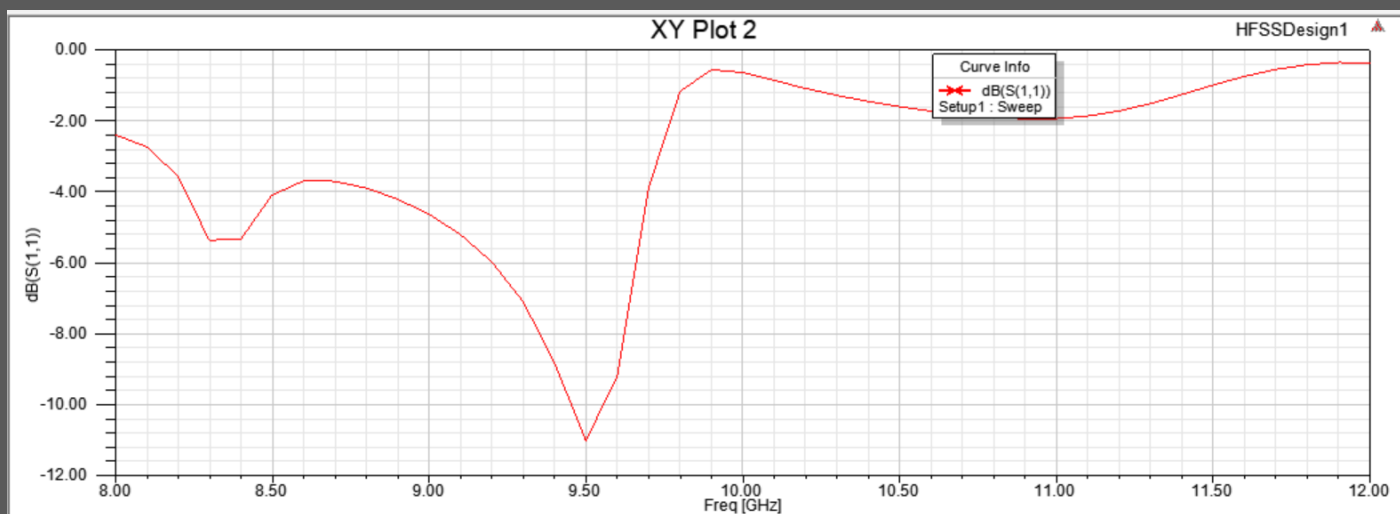
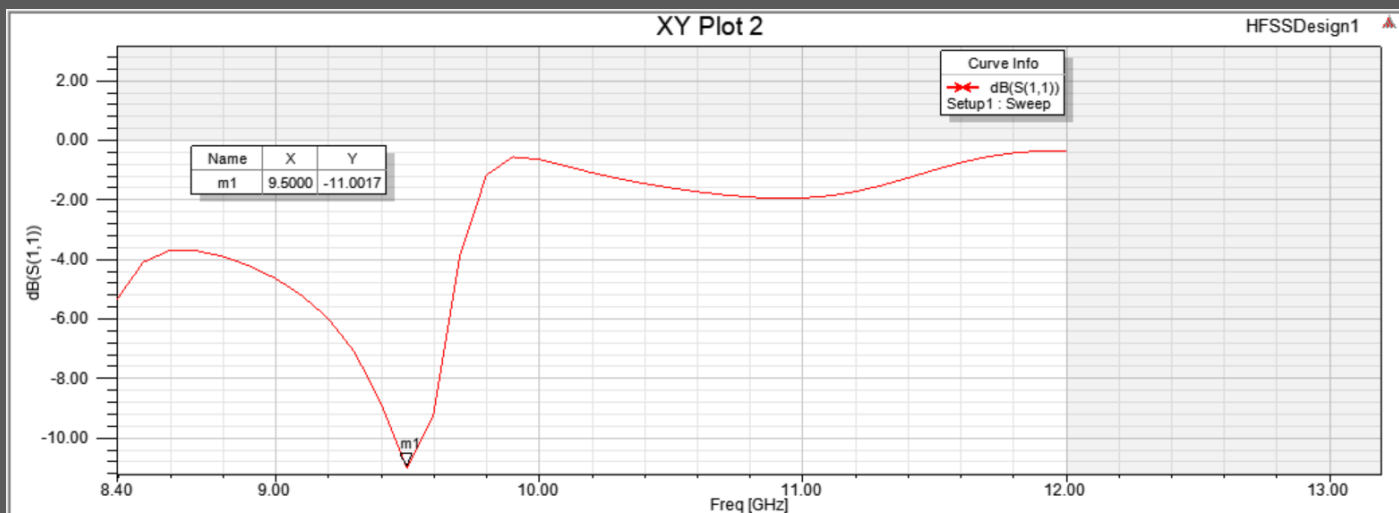


Figure 32

• با عوض کردن مقدار PH10 از 37 به 38 درجه داریم:

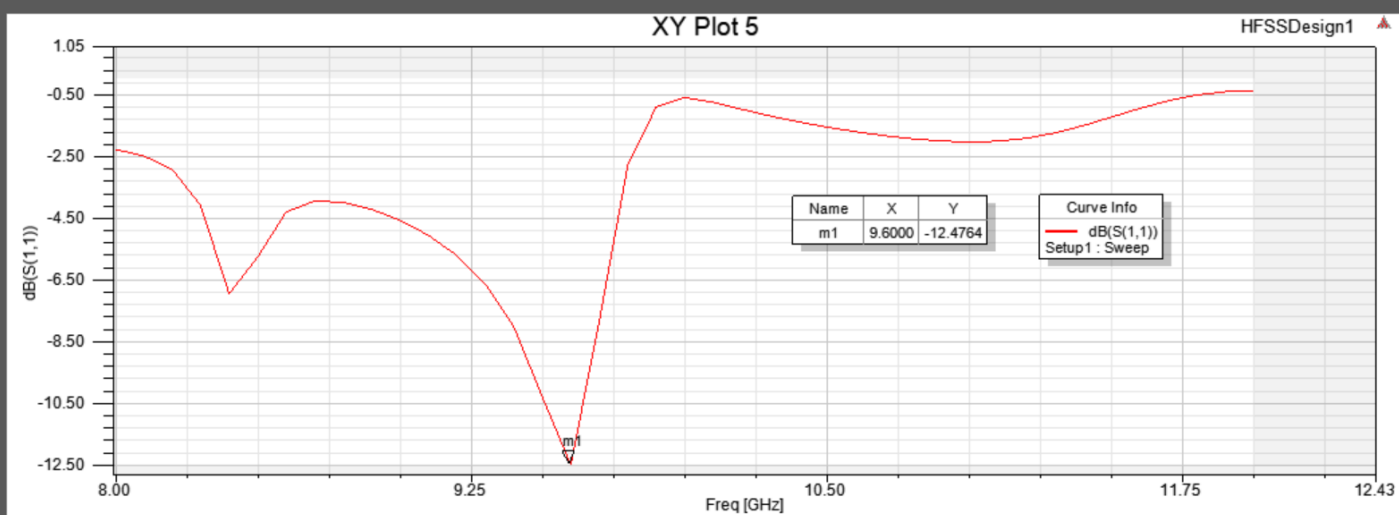


33 Figure



34 Figure

• و با تغییر a از 22.86 mm به 22.5 mm داریم:



35 Figure

$S(1,1)$

مشاهده می شود که با تغییر جزیی در مقادیر داده شده توسط طراح به تقریب بسیار خوبی از S_{11} و شکل مورد نظر می رسمیم که دارای -12.5 dB افت در فرکانس کاری است که مقدار قابل قبولی بوده و از -10 dB کمتر است.

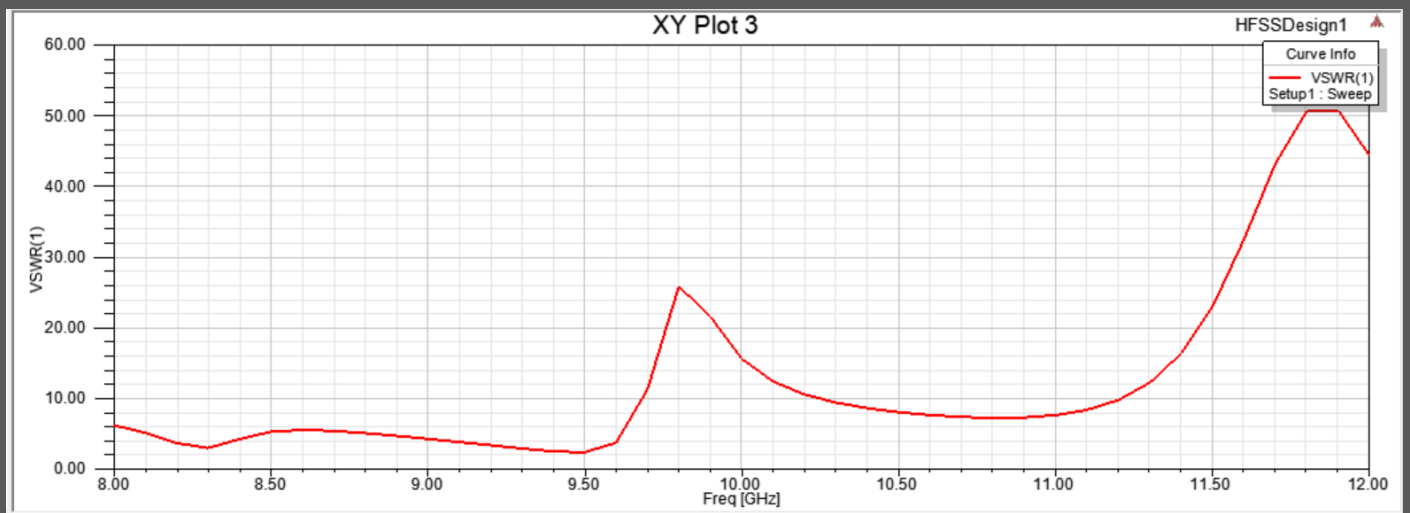
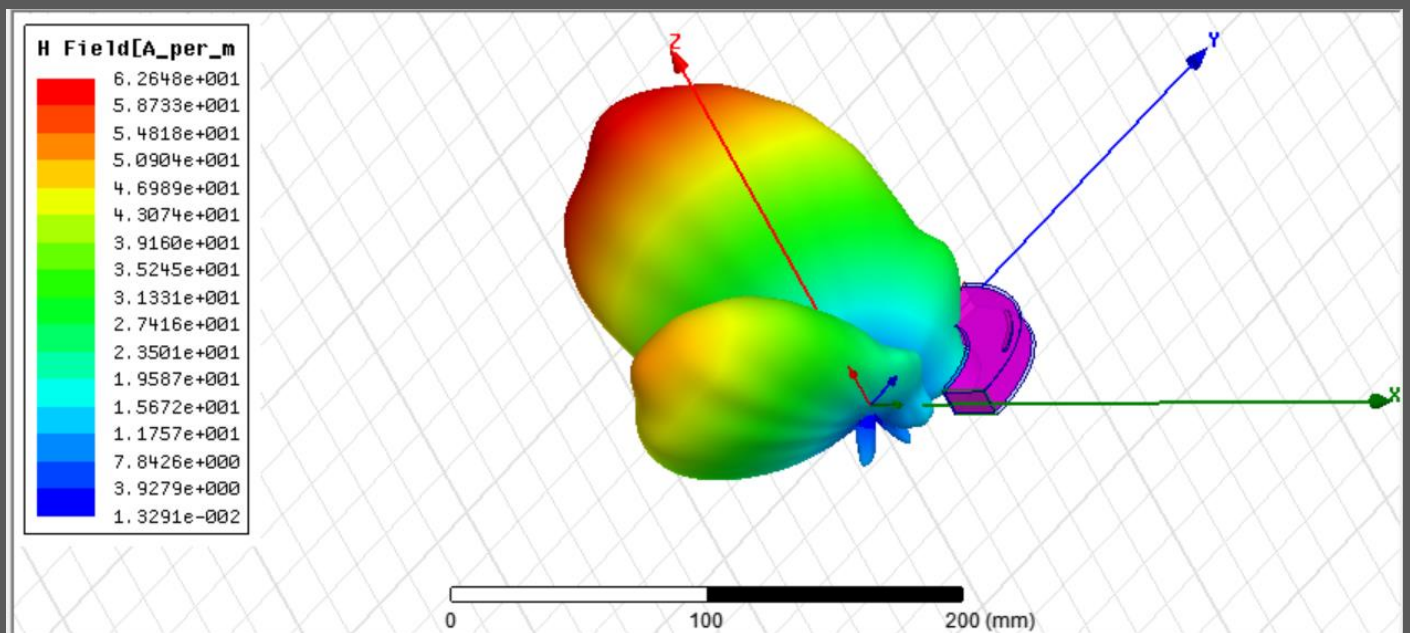


Figure 36

VSWR



37Figure

Radiation Field

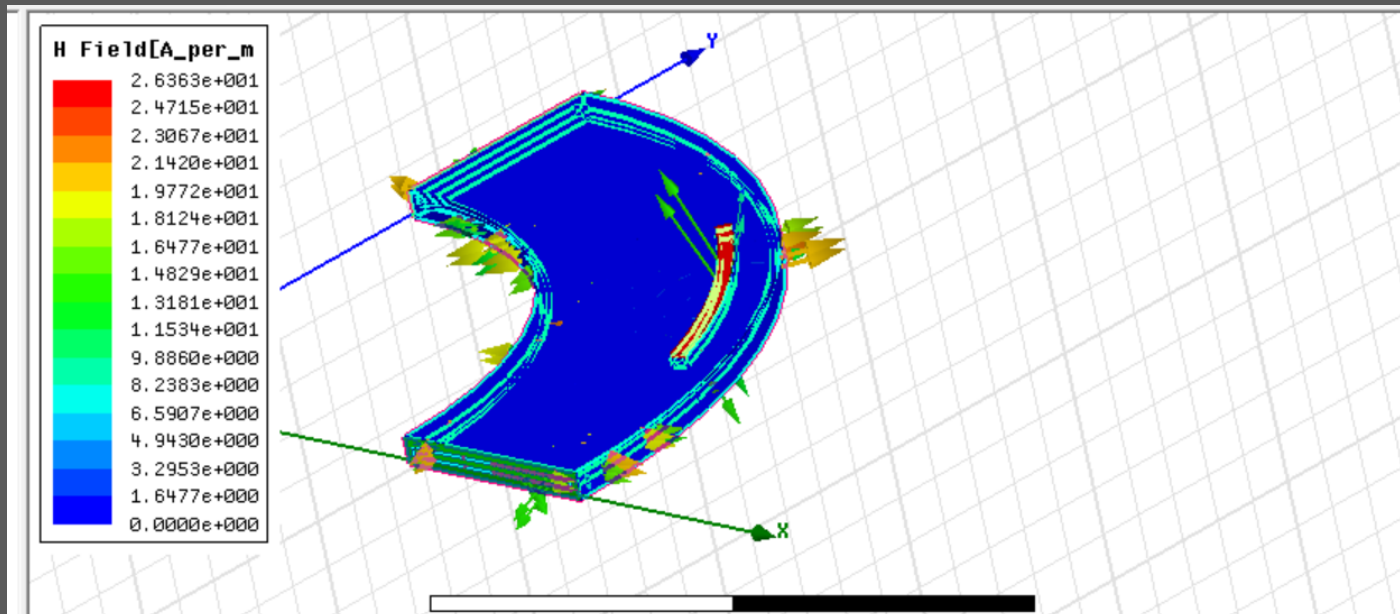
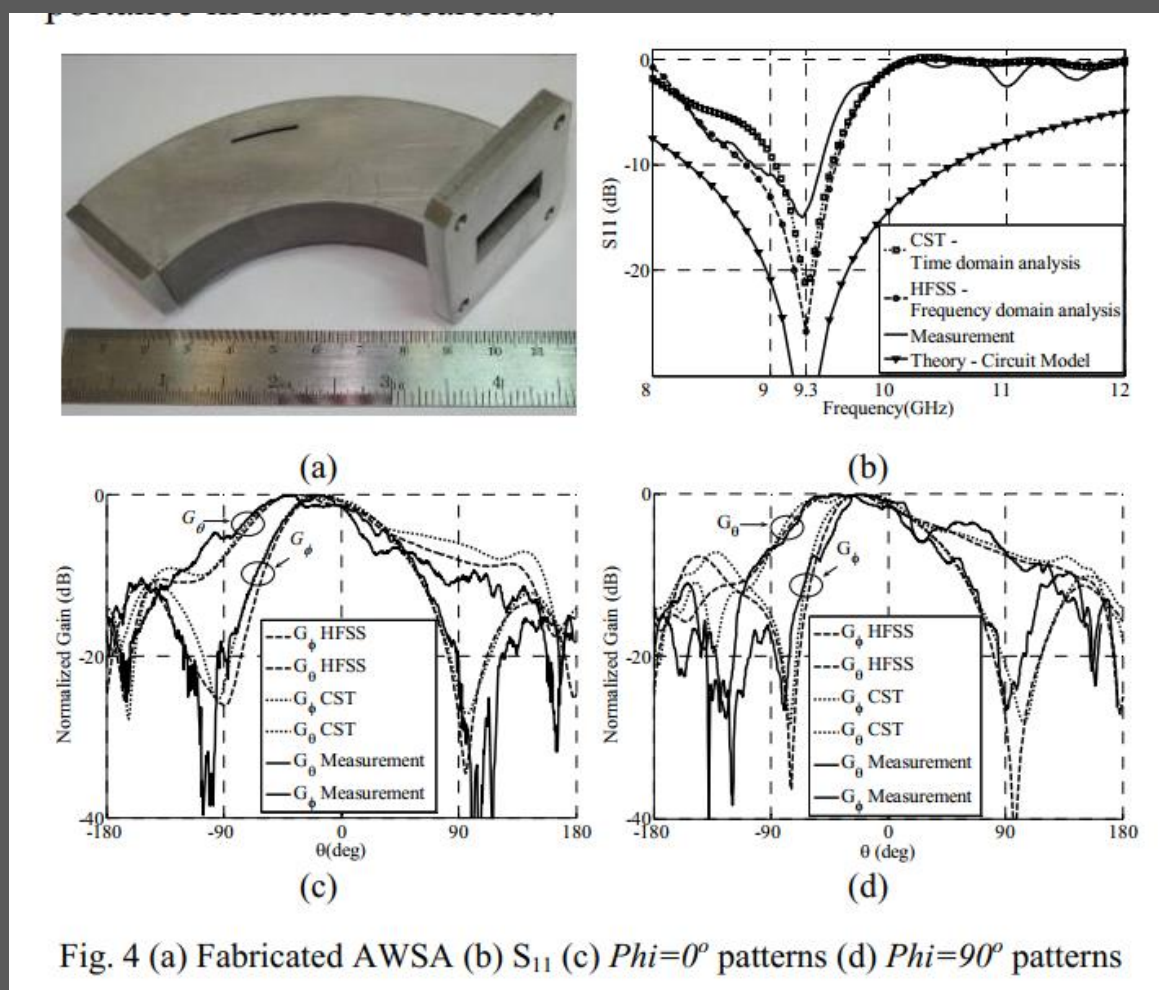


Figure 38

بردار های میدان H در بالا و با تمرکز بر روزنه یا شکاف در شکل بالا مشخص شده اند.



39 Figure

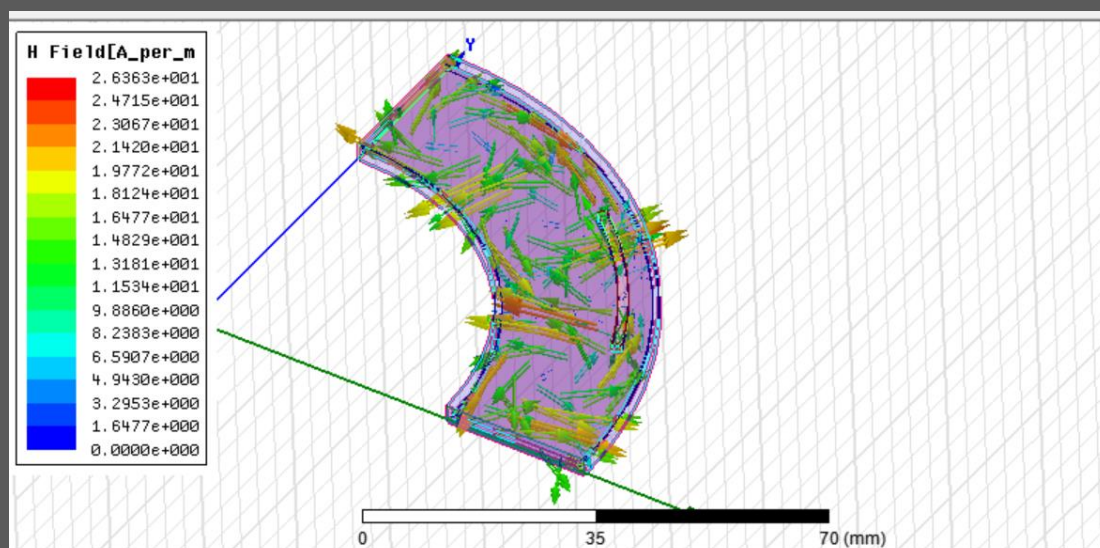


Figure 40

در نهایت نیز شکل میدان های H در درون هوای داخلی موجبر نشان داده شده است.