



دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده برق و کامپیوتر



مایکروویو

تمرین کامپیوتری شماره 2

سوگل اصلان صفت

۸۱۰۱۹۸۵۷۳

پاییز ۱۴۰۳

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
مقدمه.....	۱
قسمت اول: طراحی موجبر راست گوشه.....	۲
۱-۱- بدست آوردن همگرایی جواب.....	۲
۱-۲- توزیع بردار میدانهای الکتریکی و مغناطیسی.....	۵
۱-۳- توزیع جریان بر روی دیواره ها.....	۶
۱-۴- شکل مودهای مختلف.....	۶
5-1- امپدانس WAVEPORT.....	۹
۱-۶- امپدانس های مشخصه.....	۱۰
۱-۷- فرکانس قطع مود دوم و سوم.....	۱۱
8-1- ماتریس S موجبر.....	۱۲
۱-۹- بررسی شرط $S_{112} + S_{122}$	۱۳
۱-۱۰- موجبر با دیواره تلف دار.....	۱۳
11-1- برش در راستای طول ساختار بواسطه PEC یا PMC.....	۱۵

مقدمه

قسمت اول: طراحی موجبر راست گوشه

۱-۱- بدست آوردن همگرایی جواب

جهت بدست آوردن نمودار همگرایی ابتدا باید با در نظر گرفتن شرایط و اهداف مذکور در صورت سوال موجبر را طراحی نمود. پارامترهایی که باید در طی طراحی آن را در نظر بگیریم به شرح زیر هستند:

$$f_Q = 573 \times 40 \text{MHz} = 22.92 \text{GHz} \quad , \quad f_Q = \frac{f_{c2} + f_{c3}}{2} \quad , \quad L = 8\lambda_g$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{2n\pi}{a}\right)^2} \quad , \quad f_{cmn} = \frac{C}{2a} \sqrt{m^2 + 4n^2} \quad , \quad b = \frac{a}{2}$$

حال، با داشتن فرکانس قطع شروع به بررسی چند جواب ابتدایی میکنیم، تا فرکانس قطع اول و دوم را بدست آوریم و سپس با داشتن فرکانسهای قطع مقدار طول را محاسبه می کنیم:

جدول (۱-۱) فرکانسهای قطع به ازای مقادیر مختلف m و n

m	n	f(GHz)
0	1	$\frac{C}{2a}\sqrt{4}$
1	0	$\frac{C}{2a}\sqrt{1}$
2	0	$\frac{C}{2a}\sqrt{4}$
0	2	$\frac{C}{2a}\sqrt{16}$
1	1	$\frac{C}{2a}\sqrt{5}$
2	1	$\frac{C}{2a}\sqrt{8}$

مطابق با جدول اکنون می توانیم مقدار a را محاسبه کنیم:

$$f_Q = \frac{f_{c2} + f_{c3}}{2}$$

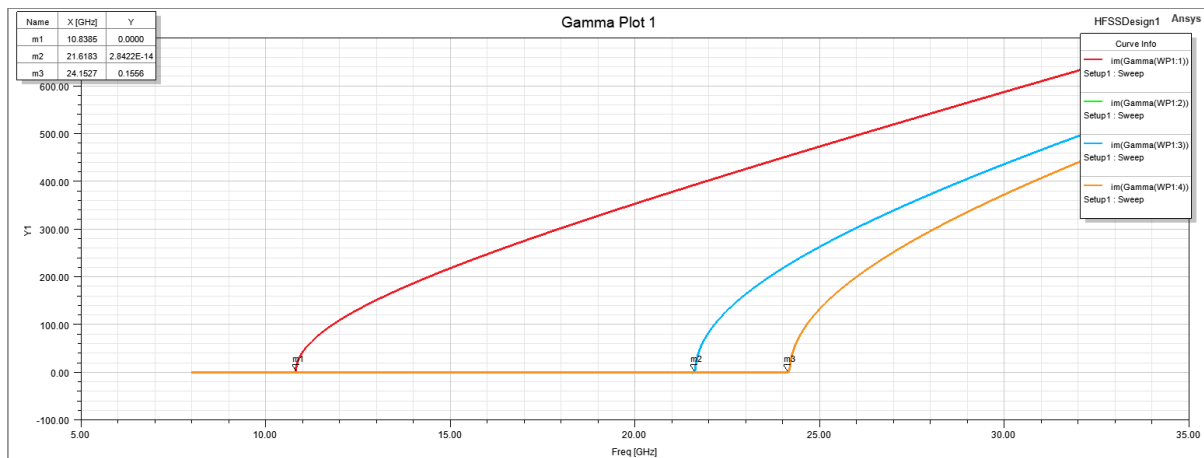
$$22.92 \text{ GHz} = \frac{C}{4a}(2 + \sqrt{5}) \xrightarrow{\text{hence}} a = 0.0138614 \text{ (m)}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2}}, \quad \lambda_0 = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8}{22.92 \times 10^9} = 0.013089 \text{ (m)}$$

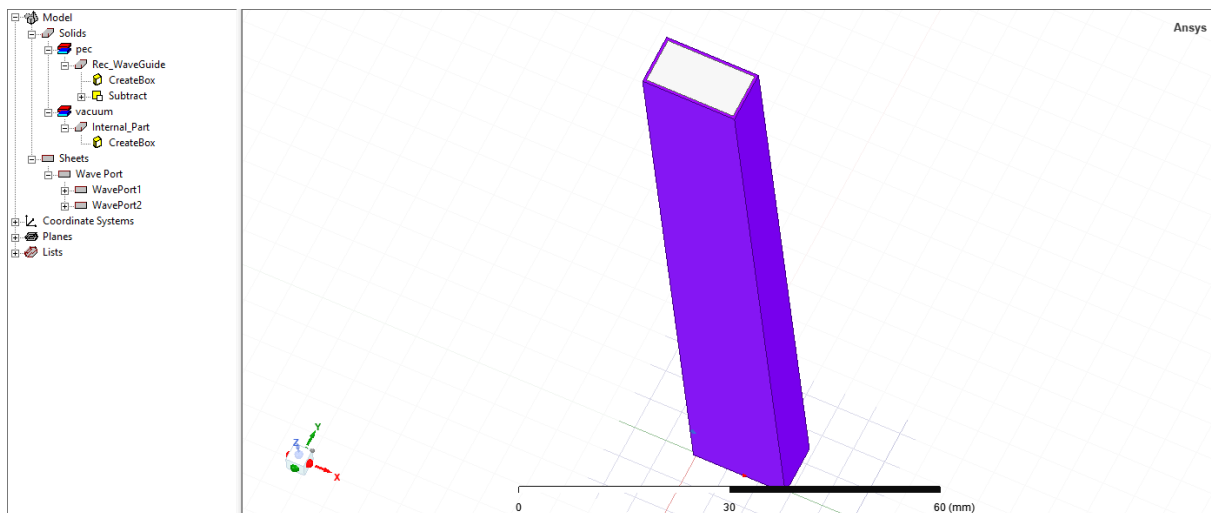
برای محاسبه مقدار λ_g بستگی دارد که در نظر بگیریم که کدام مود را قصد داریم مورد بررسی قرار بدیم. در واقع در فرکانس کاری ما چندین مود قابلیت انتشار دارد (سه سطر اول جدول (۱-۱)). بنابراین بسته به اینکه در قسمت منبع کدام حالت را قصد داریم ایجاد کنیم این کمیت متفاوت می‌شود. در اینجا جهت تسهیل در فرآیند شبیه‌سازی مقدار کمیت منظور را با در نظر گرفتن اولین فرکانس قطع محاسبه می‌کنیم:

$$f_c = \frac{C}{2a} = 10.8214 \text{ GHz}, \quad \lambda_g = 0.014848 \text{ (m)}$$

در نتیجه با اعمال پارامترهای بدست آمده برای شبیه‌سازی داریم:

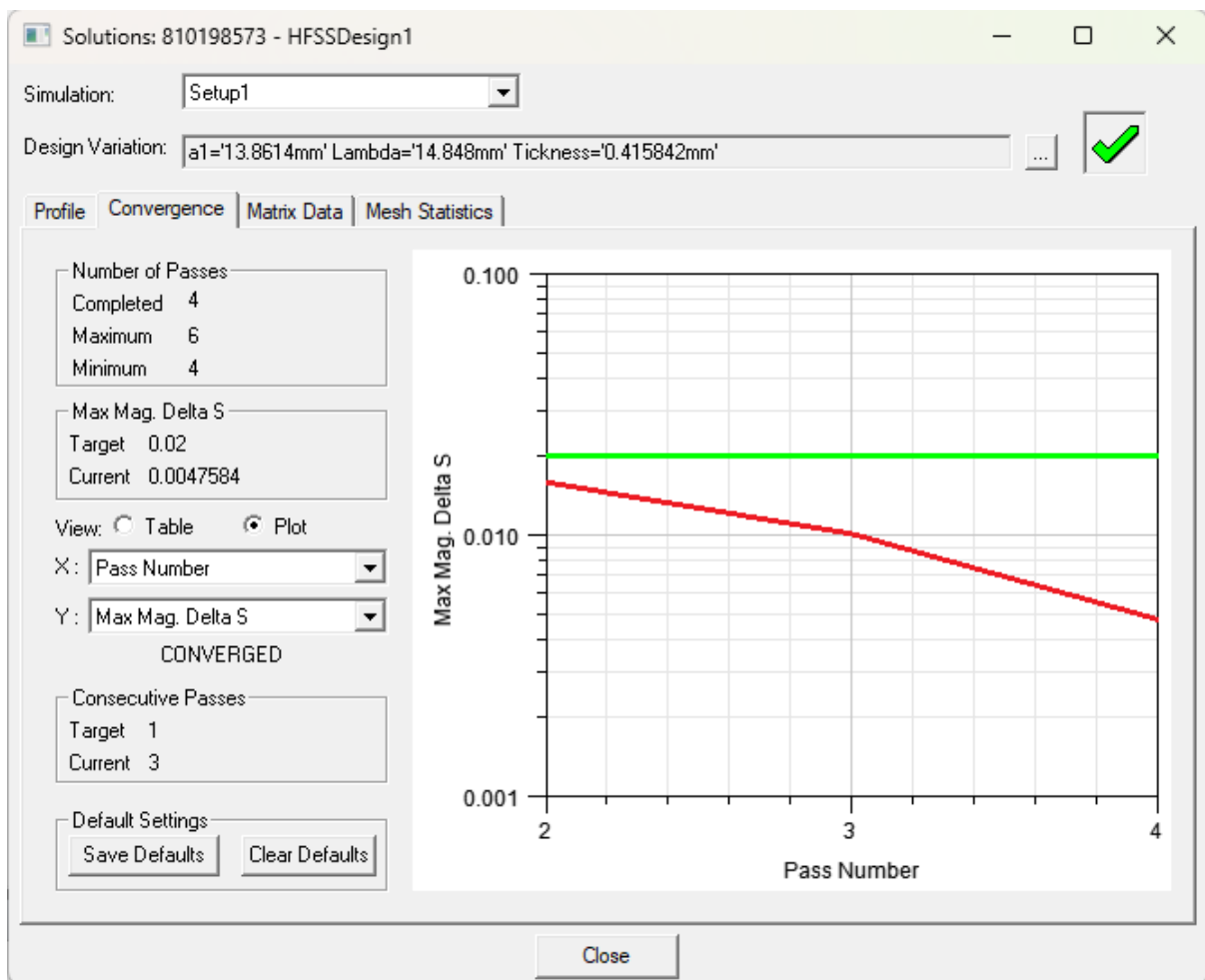


شکل (۱-۱) فرکانس قطع چهار مود ابتدایی



شکل (۱-۲) خروجی شبیه‌سازی پس از اعمال پارامترهای بدست آمده

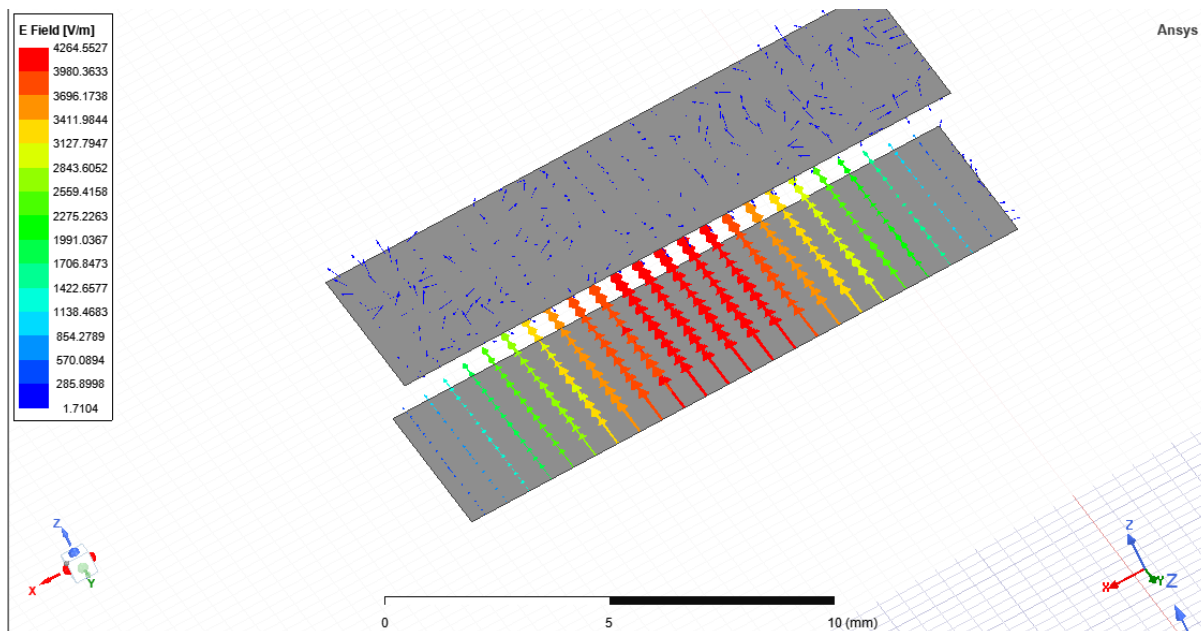
حال برای بررسی همگرایی پاسخ با در نظر گرفتن $\text{Maximum number of passes} = 6$ و $\text{Minimum number of passes} = 4$ داریم:



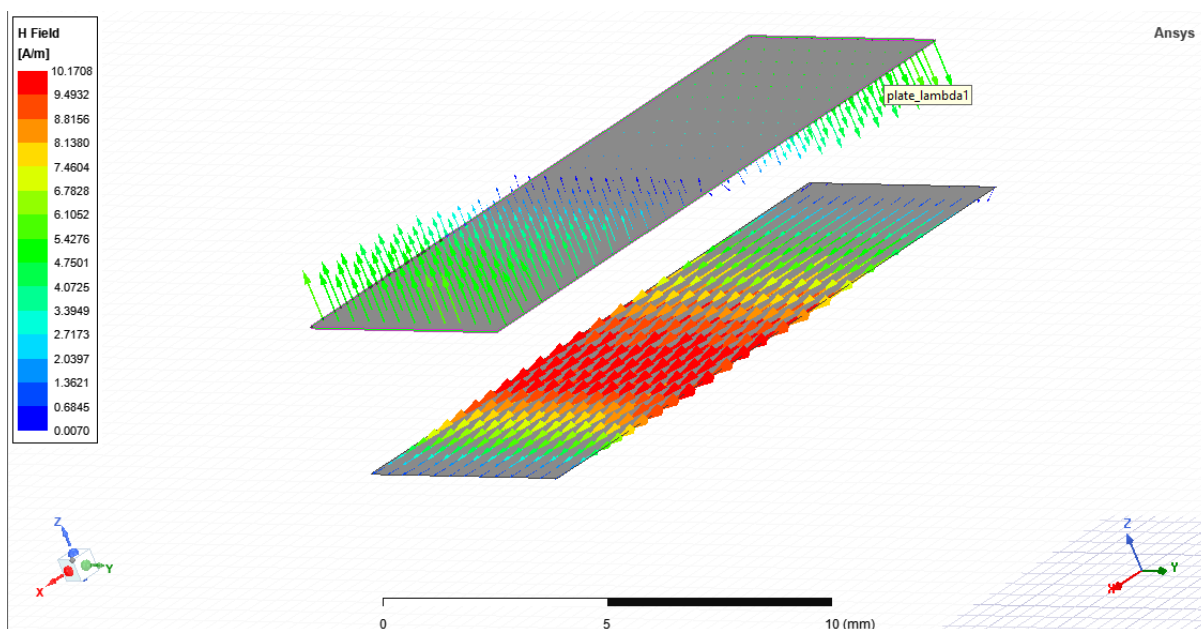
شکل (۱-۳) نمودار همگرایی جواب

۱-۲- توزیع بردار میدانهای الکتریکی و مغناطیسی

توزیع میدانها در صفحات $z = \lambda_g$, $z = \frac{5}{4}\lambda_g$ به صورت زیر می باشد:



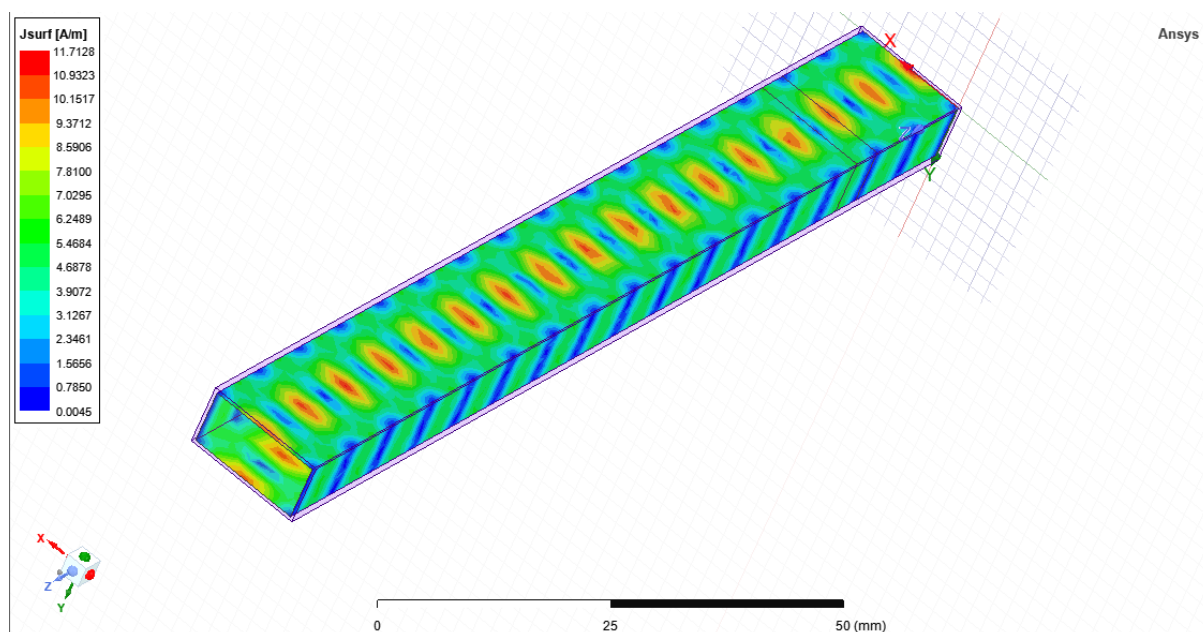
شکل (۱-۴) توزیع میدان الکتریکی در صفحات $z = \lambda_g$, $z = \frac{5}{4}\lambda_g$



شکل (۱-۵) توزیع میدان مغناطیسی در صفحات $z = \lambda_g$, $z = \frac{5}{4}\lambda_g$

۱-۳- توزیع جریان بر روی دیواره‌ها

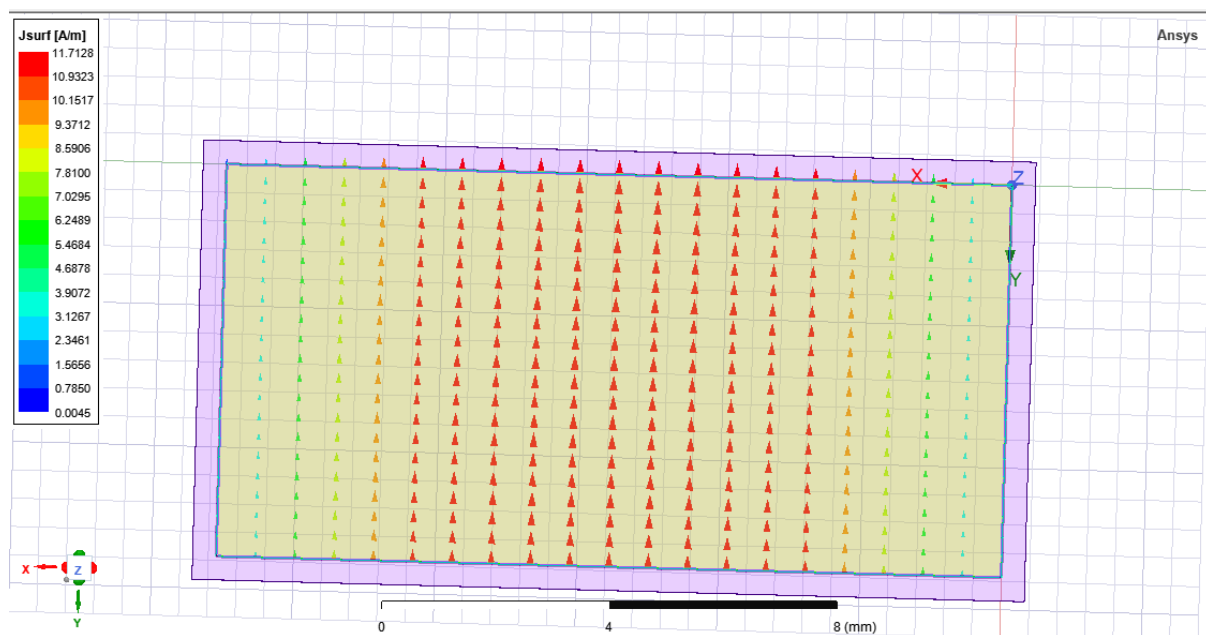
برای توزیع جریان، دیواره‌های داخلی را انتخاب می‌کنیم و داریم:



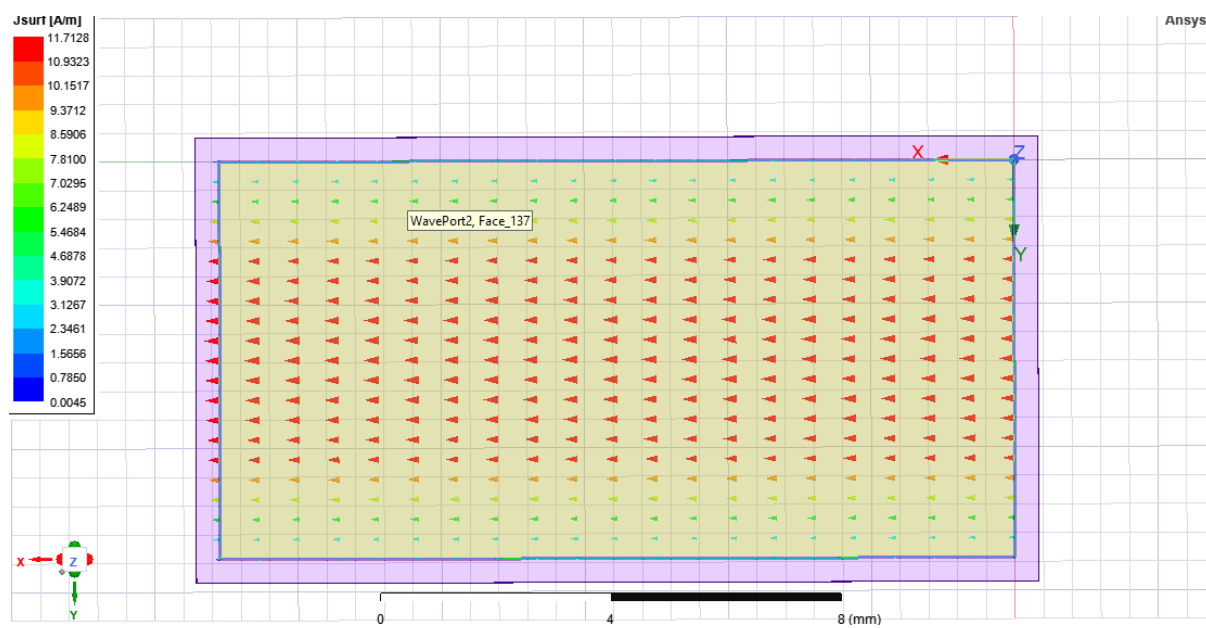
شکل (۱-۶) توزیع جریان بر روی دیواره داخلی موجبر

۱-۴- شکل موده‌های مختلف

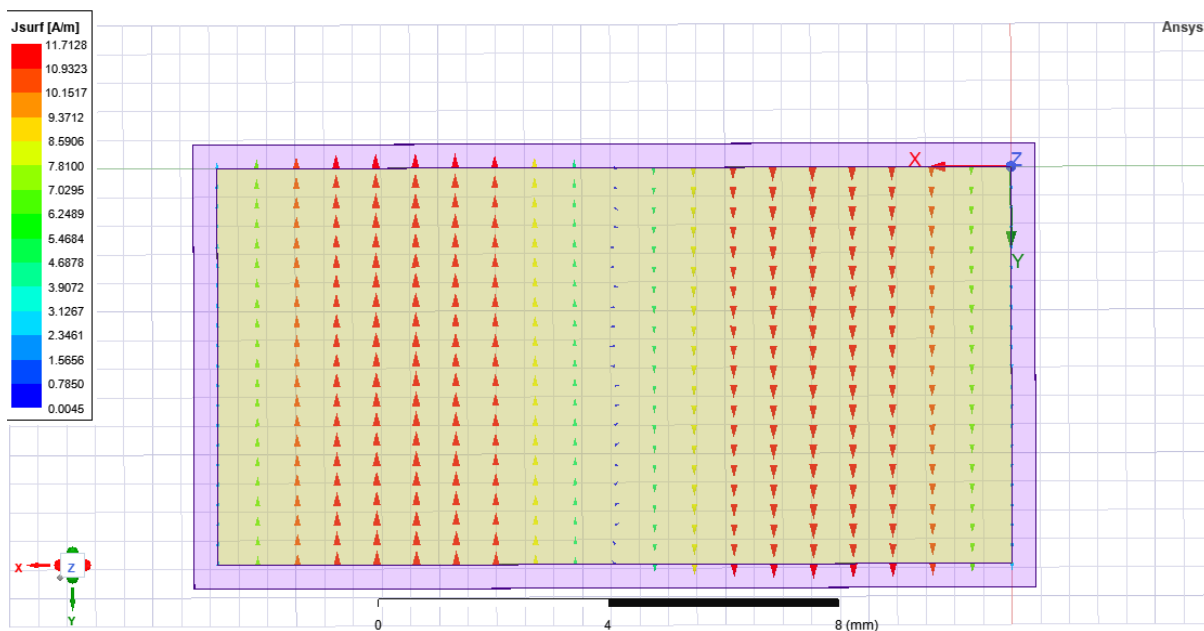
با رجوع به قسمت Port Field Display و انتخاب پورت می‌توانیم توزیع میدان را مشاهده کنیم. به عنوان مثال برای پورت یک تصاویر به صورت زیر می‌باشند:



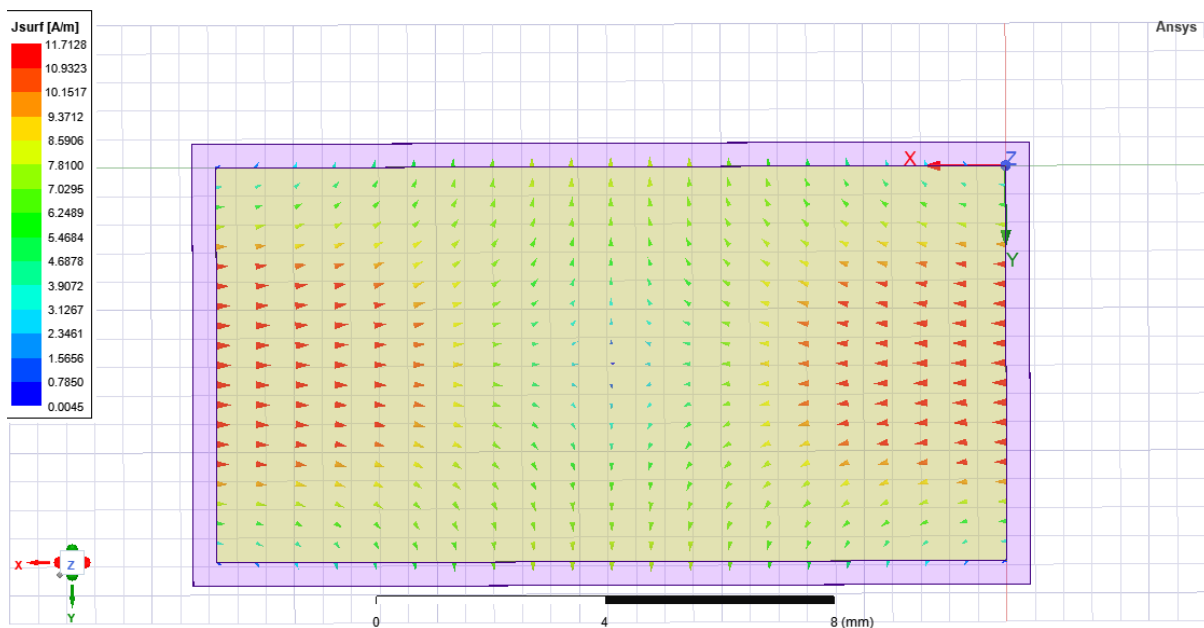
شکل (۷-۱) شکل مود شماره یک



شکل (۸-۱) شکل مود شماره دو



شکل (۹-۱) شکل مود شماره سه



شکل (۱۰-۱) شکل مود شماره چهار

تنها شباهتی که بین این قسمت و قسمت اول وجود دارد در این است که در صورتی که همگرایی وجود نداشته باشد آنگاه امکان دارد میدان‌ها دچار ناپایداری شوند و از الگوهای غیرمنتظره‌ای پیروی کنند و دیگر متقارن نباشند. ضمن اینکه مودهای ناخواسته امکان انتشار پیدا میکنند و میدان‌ها دچار نویز نیز می‌شوند و حتی امکان برآورده نشدن شرایط مرزی نیز وجود دارد.

۱-۵- امپدانس Waveport

برای محاسبه امپدانس موجبر باید در نظر داشت که امپدانس موجبر کمیتی یکتا نمی‌باشد و تعاریف مختلفی برای آن وجود دارد حتی در HFSS نیز برای پیدا کردن امپدانس موجبر می‌توان کمیت‌های $Z_{vi}, Z_{pv}, Z_{pi}, Z_{wave}$ را اندازه‌گیری کرد. هر کدام از این امپدانس‌ها متفاوت بوده و کاربرد خاصی دارند که تعریف آنها را در ادامه ذکر شده و در این قسمت تنها برای مود TE_{10} فرمول‌ها نوشته شدند:

$$\text{For TE mode: } H_z = A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{2n\pi y}{a}\right) e^{-j\beta z}$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu m\pi}{k_c^2 a} A \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{2n\pi y}{a}\right) e^{-j\beta z}, H_x = \frac{j\beta m\pi}{k_c^2 a} A \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{2n\pi y}{a}\right) e^{-j\beta z}$$

$$\text{for } TE_{10}: Z = \frac{V_{CL}}{I_Z}, \quad Z = \frac{P}{I_Z^2}, \quad Z = \frac{V_{CL,rms}^2}{P}, \quad Z = \frac{V_{CL,p-p}^2}{P}, \quad V_{CL} = bE_{y,max}$$

$$V_{CL} = bE_{y,max} = \frac{\omega\mu ab}{\pi} A = AZ_{TE} b \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g}\right), \quad I_Z = \frac{2aA}{\pi} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g}\right)$$

$$Z = \frac{V_{CL}}{I_Z} = \frac{b\pi}{2a} Z_{TE} = \frac{\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = 336.03\Omega$$

$$Z = \frac{V_{CL,rms}^2}{P} = \frac{b}{a} \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = 213.93\Omega$$

$$Z = \frac{V_{CL,p-p}^2}{P} = 2 \frac{b}{a} \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = 427.86\Omega$$

$$Z = \frac{P}{I_Z^2} = 465 \frac{b}{a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = 263.86\Omega$$

اکنون همین مقادیر را از طریق شبیه‌سازی می‌خوانیم:

جدول (۱-۲) مقادیر امپدانس‌های موجود در پورت شماره ۱ در فرکانس 22.52GHz برای مود اول

<i>Impedance</i>	<i>Calculated</i>	<i>HFSS</i>
$Z = \frac{V_{CL}}{I_Z}$	336.03Ω	335.805798 Ω
$Z = \frac{V_{CL,p-p}^2}{P}$	427.86Ω	427.934110 Ω
$Z = \frac{P}{I_Z^2}$	263.86Ω	263.511441Ω

همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر بدست آمده با درصد بسیار کمی تفاوت دارند و این یعنی نتایج

کامپیوتری منطبق بر نتایج تحلیلی می‌باشد.

۱-۶- امپدانس‌های مشخصه

با توجه به قسمت قبل تعریف هر یک از سه امپدانس مشخصه ذکر شد اما در مورد کاربرد هر یک به

ترتیب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (مطابق با آنچه در Help HFSS می‌باشد):

- امپدانس Z_{PI} : برای کاربردهای میکرواستریپ استفاده می‌شود (به عنوان مثال آنچه در پروژه شماره ۱ بود)
- امپدانس Z_{VI} : برای هنگامی هست که دو هادی داریم و می‌توانیم پتانسیل را نسبت به آن دو تعریف کنیم و برای حالت TEM این مقدار به مقدار واقعی امپدانس همگرا می‌شود
- امپدانس Z_{PV} : جهت استفاده در ساختار های Coplnar WaveGuide استفاده می‌شود

جدول (۱-۳) مقدار امپدانس Z_{PI} در پورت شماره ۱ در فرکانس 22.52GHz

Number of mode	Real part	Imaginary
1	263.766019	0
2	2789.458334	0
3	698.435884	0
4	0	435.034321

جدول (۱-۴) مقدار امپدانس Z_{VI} در پورت شماره ۱ در فرکانس 22.52GHz

Number of mode	Real part	Imaginary
1	335.702210	0

2	3553.040627	0
3	890.097020	0
4	0	564.172054

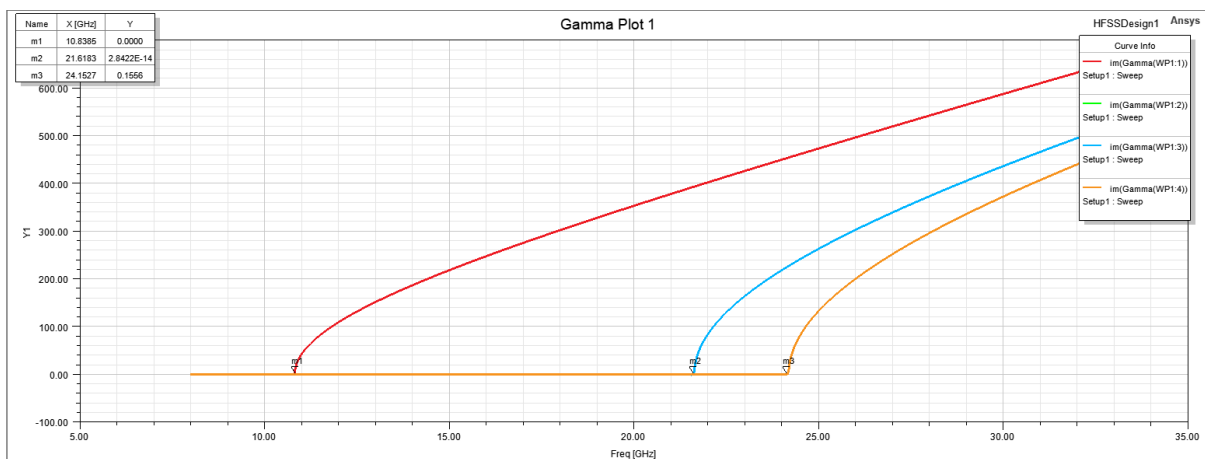
جدول (۵-۱) مقدار امپدانس z_{PV} در پورت شماره ۱ در فرکانس 22.52GHz

Number of mode	Real part	Imaginary
1	427.257364	0.00000
2	4525.644833	0.00000
3	1134.352805	0.00000
4	0.000000	731.643669

توجه شود که تمامی مقادیر بالا برای موج در مود TE نوشته شده است. و خطوط پتانسیلی که برای محاسبه هر یک از مودها به کار رفته است با سایرین متفاوت است. در واقع برای محاسبه هر کدام ابتدا بررسی شده است که میدان در کدام ناحیه بیشینه بوده و سپس خطوط محاسبه اختلاف پتانسیل در آن راستا رسم شده است.

۱-۷- فرکانس قطع مود دوم و سوم

برای فرکانس قطع مودهای دوم و سوم، بازه فرکانسی را از 8GHz تا 35GHz تنظیم می‌کنیم و داریم:



شکل (۱-۱۱) فرکانس قطع مودهای دوم و سوم

بصورت تئوری فرکانس قطع مود دوم را 21.642GHz بدست آوردیم که در اینجا 21.6183GHz شده است. همچنین برای مود سوم بصورت تئوری فرکانس قطع مود سوم را 24.197GHz بدست آوردیم که در اینجا برابر با 24.1527GHz شده است.

۱-۸ - ماتریس S موجبر

برای ماتریس S موجبر توجه داریم که در حال حاضر موجبر بدنه‌اش از جنس PEC می‌باشد و ماده پر

کننده داخل موجبر خلا می‌باشد. بنابراین اتلافی نداریم و باید توان ورودی و خروجی برابر باشد:

$$[V^-] = [S][V^+] \quad , \quad S_{ii} = \frac{V^-}{V^+} = \rho = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

در رابطه‌ی بالا مقدار Z برابر با امپدانس مشخصه موجبر (حالت iv) برای مود خاصی هست که در نظر

داریم و مقدار Z_0 برابر با 50Ω می‌باشد. بنابراین ابتدا باید امپدانس مشخصه موجبر را بدست آوریم.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad , \quad S_{12}^2 = 1 - S_{22}^2 \quad , \quad S_{21}^2 = 1 - S_{11}^2$$

$$S_{11} = S_{22} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

جدول (۶-۱) ماتریس S برای چهار مود TE در حالت امپدانس pi

Number of mode	TE	HFSS
1	$\begin{bmatrix} 0.740 & 0.672 \\ 0.672 & 0.740 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.740750 & 0.671781 \\ 0.671781 & 0.740750 \end{bmatrix}$
2	$\begin{bmatrix} 0.972 & 0.234 \\ 0.234 & 0.972 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.972175 & 0.235160 \\ 0.235160 & 0.972175 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} 0.894 & 0.448 \\ 0.448 & 0.894 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.893326 & 0.449357 \\ 0.449357 & 0.893326 \end{bmatrix}$
4	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

توجه شود که برای بدست آوردن ماتریس S باید حتما در تنظیمات Waveport ها در تب post

processing گزینه Renormalize All Modes فعال شود در غیر اینصورت ماتریس S بصورت تقریباً یکانی (I)

حاصل می‌شود. بعد از انجام این فرآیند باید مجدداً تنظیمات را به حالت اول برگردانیم در غیر اینصورت

امپدانسی که در قسمت قبل بدست آوردیم همگی با هم برابر و مساوی با 50Ω می‌شوند.

در مورد کوپلینگ توان مودها به همدیگر با استفاده از Matrix Data می‌توان تشخیص داد که اندکی

از توان بین مودها جابه‌جا می‌شود:

Solutions: 810198573 - HFSSDesign1

Simulation: Setup1 Sweep

Design Variation: a1='13.8614mm' Lambda='14.848mm' Thickness='0.415842mm'

Profile | Convergence | Matrix Data | Mesh Statistics

Default Custom Width: 8 Precision: 5 Use Scientific

Magnitude

View Format Passivity Export

Freq		S:WP1:1	S:WP1:2	S:WP1:3	S:WP1:4	S:WP2:1	S:WP2:2	S:WP2:3	S:WP2:4
22.93617GHz	WP1:1	0.74075	7.2017e-05	5.9437e-05	3.7516e-05	0.67178	2.5441e-05	5.9802e-05	1.9001e-05
	WP1:2	7.2017e-05	0.97235	0.00053866	2.0378e-05	3.0491e-05	0.23385	0.00012803	5.1239e-05
	WP1:3	5.9436e-05	0.00053866	0.89333	7.4015e-05	6.3005e-05	8.1498e-05	0.44936	1.7326e-05
	WP1:4	3.7516e-05	2.0378e-05	7.4015e-05	0.00082596	1.5165e-05	2.5351e-06	2.0552e-05	3.2138e-09
	WP2:1	0.67178	3.0491e-05	6.3005e-05	1.5165e-05	0.74075	1.1702e-05	4.0686e-05	1.1337e-05
	WP2:2	2.5441e-05	0.23385	8.1498e-05	2.5351e-06	1.1703e-05	0.97227	1.4226e-05	6.123e-06
	WP2:3	5.9802e-05	0.00012803	0.44936	2.0552e-05	4.0686e-05	1.4226e-05	0.89335	4.2498e-06
	WP2:4	1.9001e-05	5.1239e-05	1.7326e-05	3.2144e-09	1.1337e-05	6.123e-06	4.2498e-06	1

Close

شکل (۱-۱۲) خروجی Matrix Data برای ماتریس S

۱-۹- بررسی شرط $|S_{11}|^2 + |S_{12}|^2$

با توجه به مفهومی که هر یک از این دو کمیت دارند و در نظر داشتن اینکه موجبر بدون تلف است،

این نتیجه بدست می‌آید که حاصل عبارت باید همیشه برابر با یک باشد.

این عبارت تحت عنوان قضیه واحد در کلاس بیان شد.

مطابق با جدول این عبارت برای همه ماتریس‌ها صادق می‌باشد و بعضاً تفاوت بسیار اندکی با یک دارد.

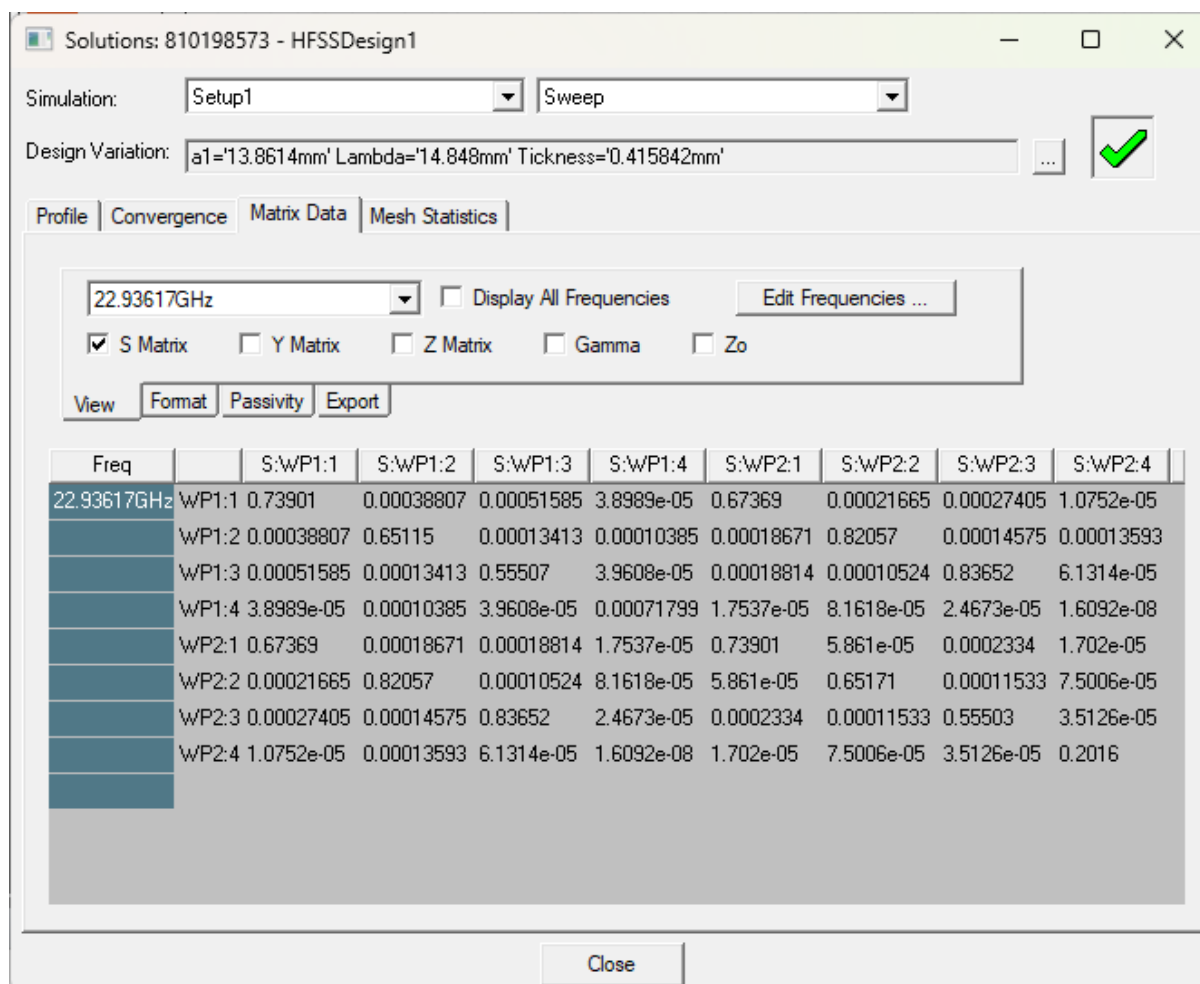
۱-۱۰- موجبر با دیواره تلف دار

با توجه به قانون بقای انرژی و مفاهیم ماتریس پراکندگی برای موجبر داریم:

$$1 = P_{transmitted} + P_{reflected} + P_{loss}$$

$$P_{loss} = 1 - (P_{transmitted} + P_{reflected}) = 1 - (|S_{11}|^2 + |S_{12}|^2)$$

اکنون بواسطه Matrix Data می‌توان تلف شده را حساب کرد:



شکل (۱-۱۳) خروجی Matrix Data برای ماتریس S برای موجبر با جنس مس

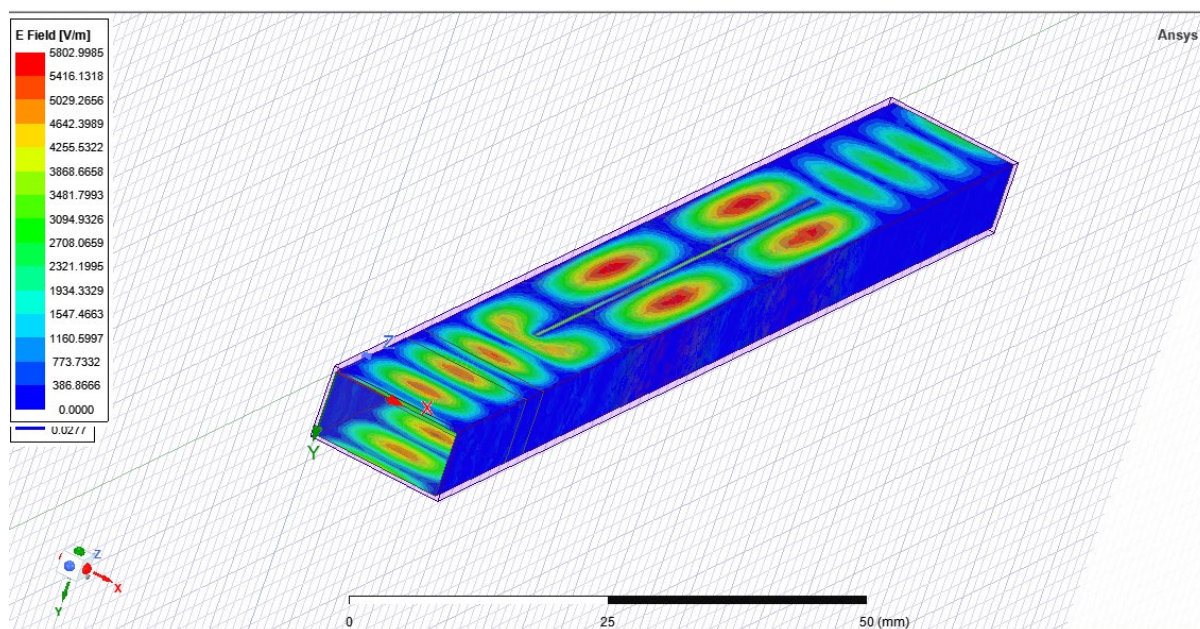
جدول (۱-۷) محاسبه توان تلف شده برای هر یک از مودها

mode	Loss(W)
1	6.0038×10^{-6}
2	-0.09733
3	-7.8684×10^{-3}
4	0.99999

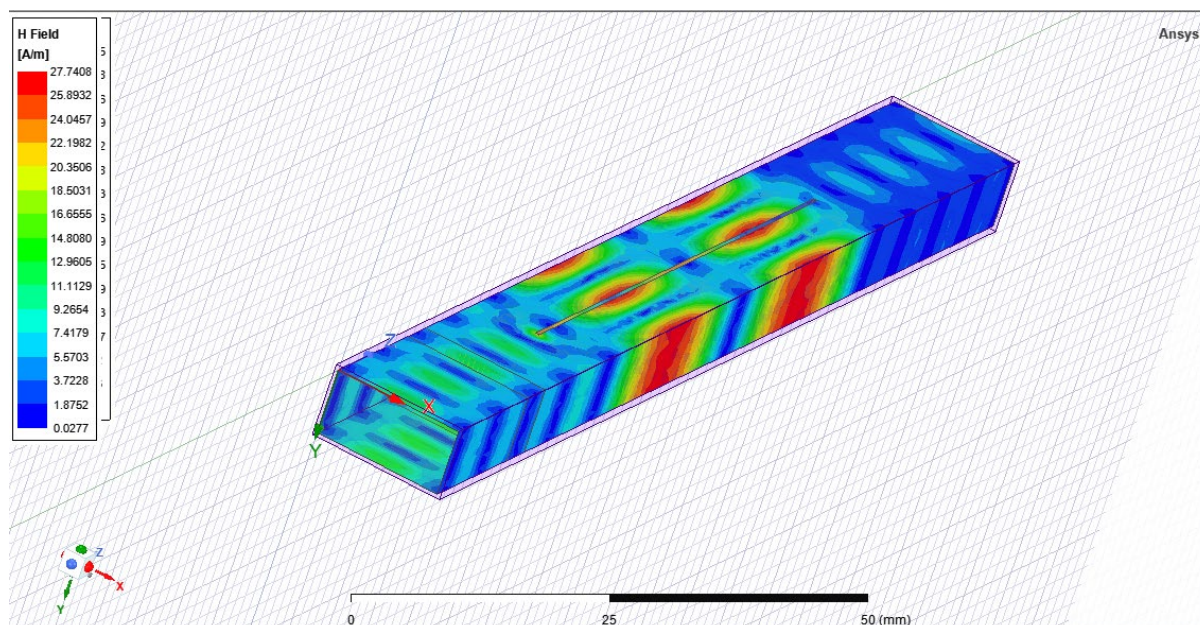
۱-۱۱- برش در راستای طول ساختار بواسطه PEC یا PMC

شکل اندازه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بصورت زیر می‌باشند که انیمیشن هر کدام ضمیمه فایل

پروژه شده است:



شکل (۱-۱۴) شکل اندازه میدان الکتریکی با وجود صفحه PEC



شکل (۱-۱۵) شکل اندازه میدان مغناطیسی با وجود PEC

قسمت دوم: طراحی مبدل
