

شکل ۱- چند نمونه فرکانس متر موجبری مانند HP536A

• توضیح نحوه کار فرکانس متر:

فرکانس متر RF (که چند نمونه از آن را در شکل ۱ می بینید) به این صورت کار می کند:

یک موجبر عادی را در نظر بگیرید. در صفحه ی E آن یک سوراخ رو به یک cavity می زنیم که ارتفاع این cavity به صورت مکانیکی قابل تغییر است.

مقداری از انرژی موج، وارد cavity می شود و اگر فرکانس موج با فرکانس رزونانس cavity برابر باشد، این مقدار بسیار بیشتر خواهد بود؛ چرا که موج می تواند داخل cavity رزونانس کند و میرا نمی شود.

معادله فرکانس رزونانس cavity دایروی، طبق کتاب Pozar، به شکل زیر است:

TE:

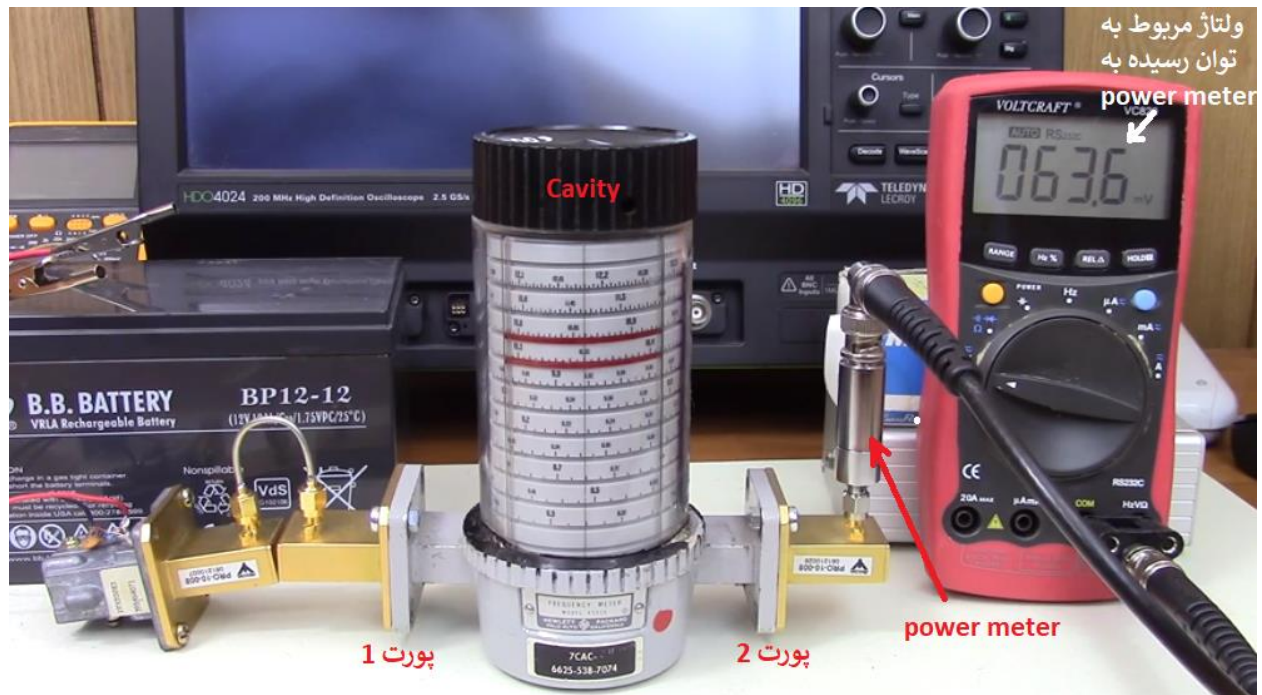
$$f_{nm\ell} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{\ell\pi}{d}\right)^2} \quad \beta_{nm} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{p'_{nm}}{a}\right)^2}$$

TM:

$$f_{nm\ell} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{\ell\pi}{d}\right)^2} \quad \beta_{nm} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{p_{nm}}{a}\right)^2}$$

همانطور که می بینید، فرکانس رزونانس همه مودها به a (= شعاع cavity) و d (= ارتفاع cavity) مربوط است.

set مربوط به استفاده از فرکانس متر را در شکل ۲ می بینید.

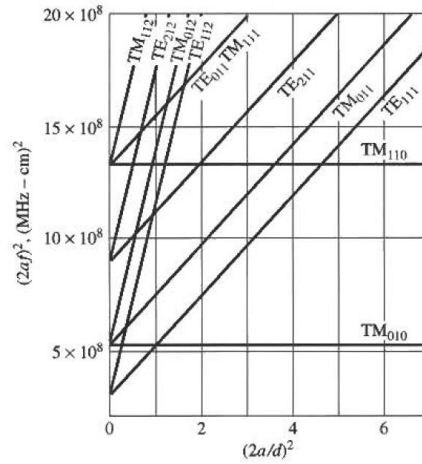


شکل ۲- set مربوط به استفاده از فرکانس متر

در شکل ۲، یک سیگنال با فرکانس مجهول از پورت ۱ وارد شده و از پورت ۲ خارج می شود. در پورت ۲، یک power meter قرار داده شده که توان رسیده به پورت ۲ را اندازه گیری می کند.

با چرخاندن حلقه مشکی بالای cavity، ارتفاع آن را به آرامی تغییر می دهیم تا اینکه در یک نقطه خاص، یک کاهش قابل توجه در توان رسیده به پورت ۲ می بینیم. در این ارتفاع، فرکانس رزونانس cavity با فرکانس سیگنال مجهول برابر است؛ چون در این فرکانس، بخش قابل توجهی از انرژی سیگنال وارد cavity می شود و به پورت ۲ نمی رسد.

• توضیح تئوری طراحی:



شکل ۳- نمودار فرکانس رزونانس مدهای مختلف، به ازای ارتفاع های مختلف cavity

طبق نمودار شکل ۳ می توانیم ببینیم که مدهای غالب TE_{111} و TE_{112} و TM_{010} است.

ما در طراحی مان، قصد داریم فقط مود غالب TE_{111} در cavity منتشر شود، به این ترتیب با داشتن a و d می توانیم طبق فرمول زیر، فرکانس رزونانس cavity (و در نتیجه، فرکانس سیگنال مجهول) را بیابیم:

$$f_{TE,111} = \frac{c\epsilon}{2} * \sqrt{\left(\frac{P'_{11}}{a}\right)^2 + \left(\frac{1*\pi}{d}\right)^2}, P'_{11} = 1.841$$

پس، حالا باید تمهیدی بیندیشیم که مدهای دیگر در cavity منتشر نشوند. به این ترتیب، سه شرط زیر باید ارضا شوند:

۱- اطمینان از انتشار مود TE_{111} در همه فرکانس ها

۲- عدم انتشار مود های TE_{11n}

۳- عدم انتشار بقیه مدهای TE_{nml} و مدهای TM

برای ارضای شرط ۱، باید ثابت انتشار cavity به ازای همه ی فرکانس های باند X (۸ تا ۱۲ گیگاهرتز) موهومی باشد:

$$\beta_{nm} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{P'_{11}}{a}\right)^2} \Rightarrow \omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{P'_{11}}{a}\right)^2 > 0 \rightarrow f = 8\text{GHz} \rightarrow \text{در بدترین شرایط:}$$

$$(2\pi * 8e9)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{1.841}{a}\right)^2 > 0 \Rightarrow |a| > 0.011\text{m} = 11\text{mm}$$

برای ارضای شرط ۳، باید ثابت انتشار به ازای همه ی P'_{nm} های دیگر (به غیر از P'_{11}) حقیقی باشد:

کوچکترین P'_{nm} بعد از P'_{11} ، $P'_{21} = 3.0542$ می باشد. پس در بدترین شرایط داریم:

$$(2\pi * 12e9)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{3.0542}{a}\right)^2 < 0 \Rightarrow |a| < 0.0122\text{m} = 12.2\text{mm}$$

$$\Rightarrow 1,3 \Rightarrow 11^{mm} < a < 12.2^{mm} \Rightarrow a = 11.5^{mm}$$

برای ارضای شرط ۲، کافی است هنگام آزمایش، ابتدا d را در کمترین مقدار خود قرار دهیم و سپس، به آرامی آن را زیاد کنیم. در اولین نقطه ای که رزونانس ببینیم، همان رزونانس TE_{111} است.

مقادیر مینیمم و ماکسیمم d را می توانیم با توجه به کران های باند X بیابیم:

$$(2\pi * 12e9)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{1.841}{0.0115}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{d_{min}}\right)^2 \Rightarrow d_{min} = 16.2^{mm}$$

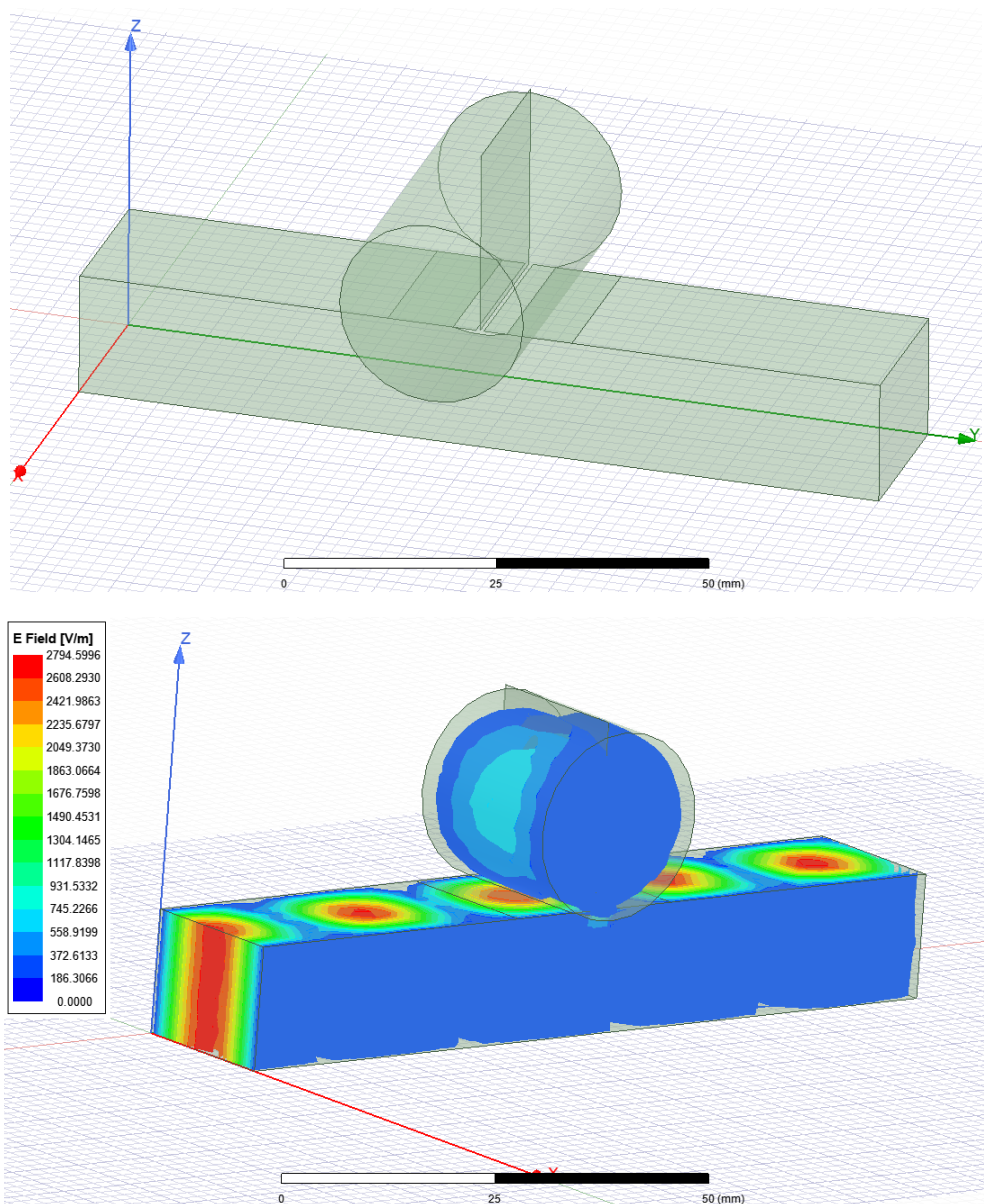
$$(2\pi * 8e9)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{1.841}{0.0115}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{d_{max}}\right)^2 \Rightarrow d_{min} = 63.5^{mm}$$

همچنین d را برای فرکانس 10^{GHz} (برای تست) بدست می آوریم:

$$(2\pi * 10e9)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{1.841}{0.0115}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \Rightarrow d = 23.3^{mm}$$

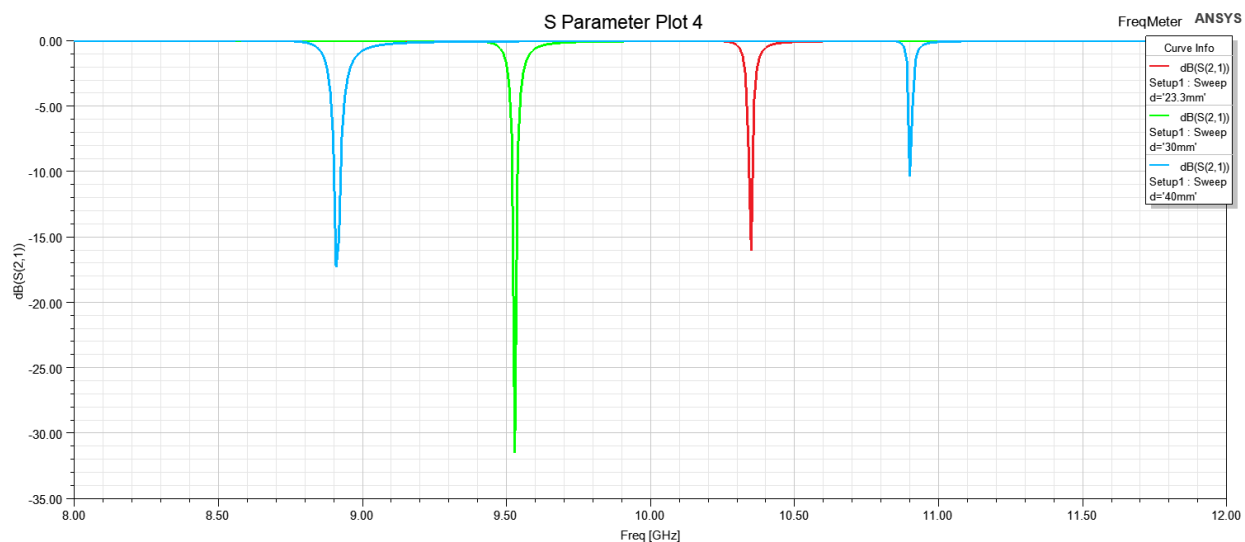
• شبیه سازی:

با توجه به ابعاد به دست آمده در تئوری، شبیه سازی را انجام می دهیم. نتایج آن را در شکل ۴ می بینید:

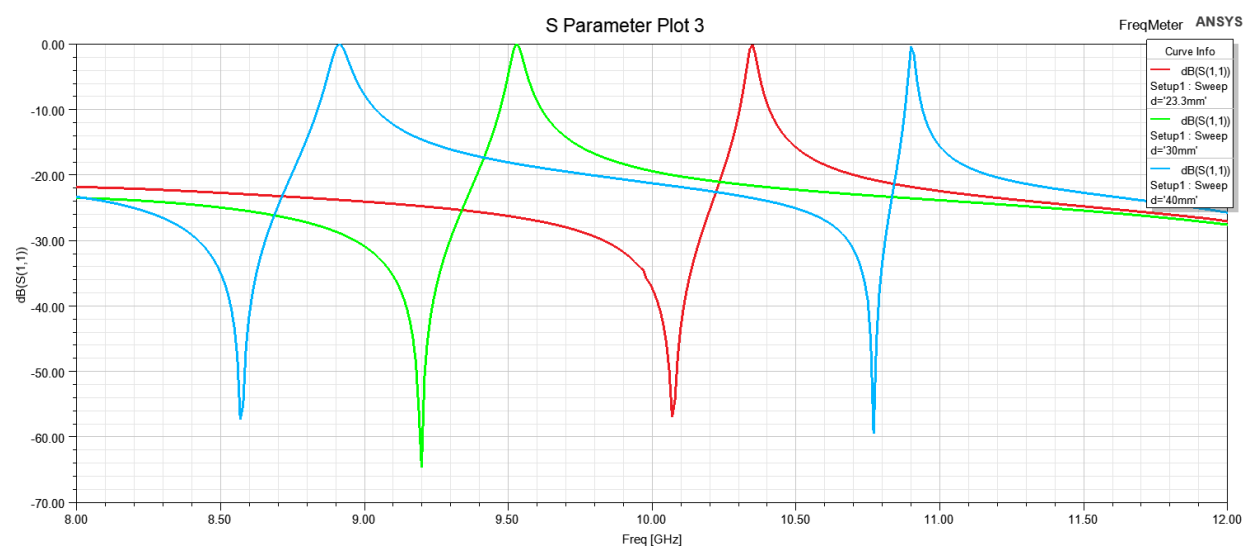


شکل ۴- توزیع انرژی میدان در طرح ۱

نمودارهای S21 و S11 ساختار را در شکل های ۵ و ۶ می بینید.



شکل ۵- نمودار S_{21} به ازای d های متفاوت



شکل ۶- نمودار S_{11} به ازای d های متفاوت

در نمودار قرمز رنگ شکل ۵ می بینیم که به ازای $d = 23.3\text{mm}$ فرکانس رزونانس تقریباً 10.35GHz است که به مقدار تئوری آن بسیار نزدیک است. هم چنین، مشاهده می کنیم که هیچ مود دیگری در باند X به ازای این مقدار، رزونانس نکرده است.

مقدار فرکانس رزونانس در دو تست دیگر ($d = 30\text{mm}$, $d = 40\text{mm}$) نیز تقریباً با مقدار تئوری آنها برابر است:

$$(2\pi * f)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{1.841}{0.0115}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{0.030}\right)^2 \Rightarrow f = 9.13\text{GHz}$$

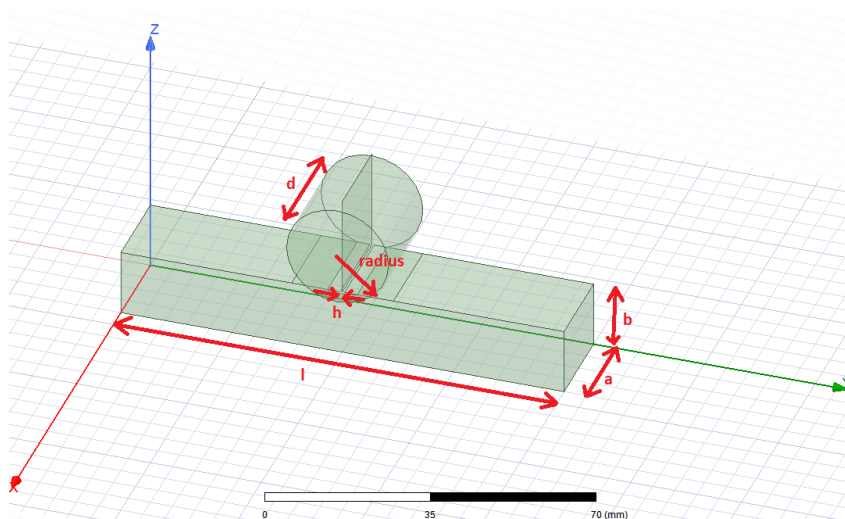
$$(2\pi * f)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{1.841}{0.0115}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{0.040}\right)^2 \Rightarrow f = 8.51\text{GHz}$$

منتها، در $d = 40\text{mm}$ یک مود دیگر هم رزونانس کرده است که همان مود TE_{112} می باشد:

$$(2\pi * f)^2 * \frac{1}{(3e8)^2} - \left(\frac{1.841}{0.0115}\right)^2 = \left(\frac{2 * \pi}{0.040}\right)^2 \Rightarrow f = 10.71\text{GHz}$$

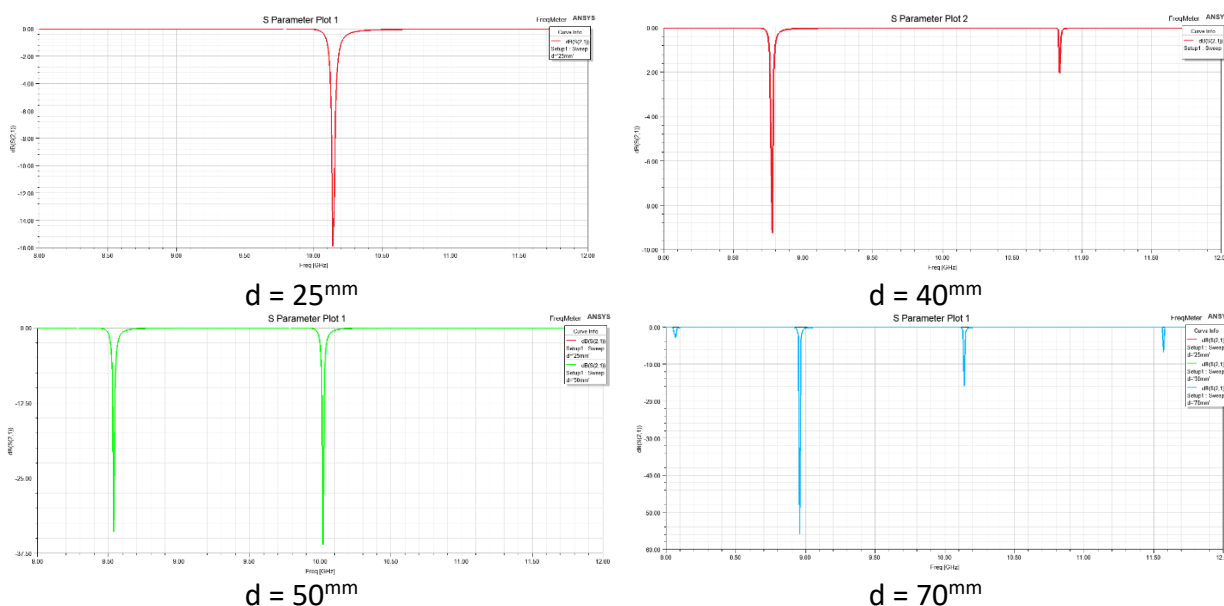
اگر همانطور که در بخش تئوری گفتیم، d را از مقدار مینیمم آن، به آرامی زیاد کنید، مود TE_{111} قبل از مود TE_{112} رزونانس کرده و در نتیجه، فرکانس رزونانس را به اشتباه اندازه گیری نمی کنیم.

• آنالیز حساسیت طرح ۱:



شکل ۷- متغیرهایی که حساسیت نتایج نسبت به آنها را می سنجیم

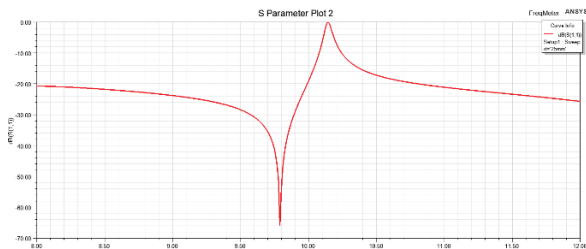
✓ حساسیت نسبت به d :



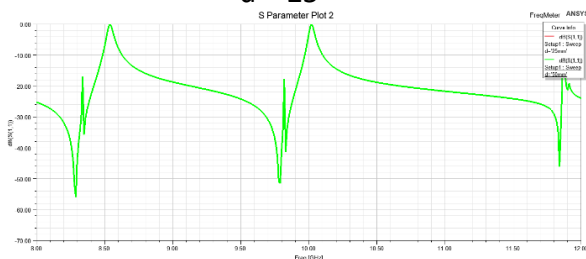
شکل 8- حساسیت S_{21} به d

همانطور که انتظار داشتیم، با افزایش d فرکانس رزونانس کاهش می یابد تا جایی که مود های TE_{11n} (به ازای $n > 1$) در باند X مشاهده می شوند. اگر d را از محدوده تعیین شده در تئوری خارج کنیم، دیگر خود مود TE_{111} در باند X مشاهده نمی شود.

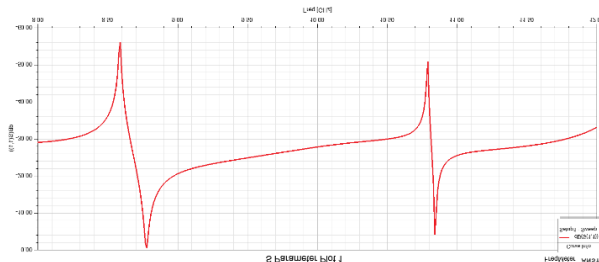
مثلا به ازای $d = 70\text{mm}$ در شکل ۸، هیچ کدام از مودهای دیده شده در باند X ، TE_{111} نیستند.



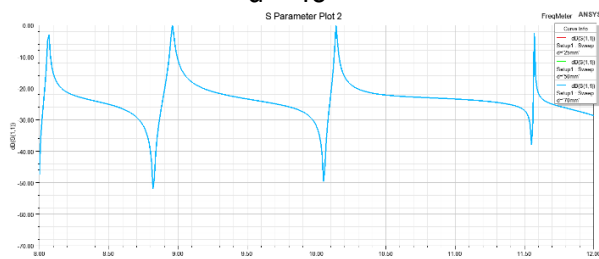
$d = 25\text{mm}$



$d = 50\text{mm}$



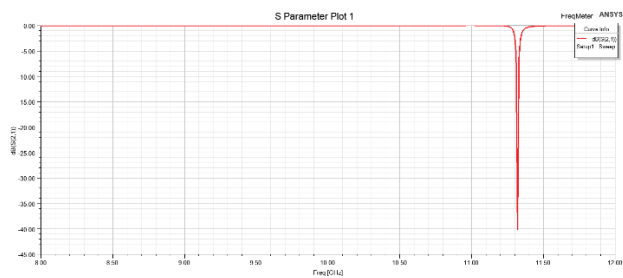
$d = 40\text{mm}$



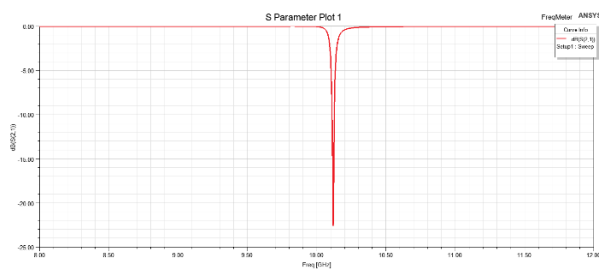
$d = 70\text{mm}$

شکل ۹ - حساسیت S_{11} نسبت به d

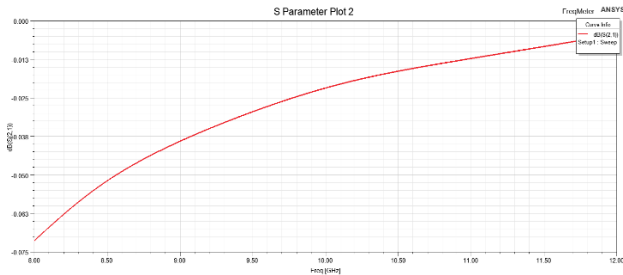
✓ حساسیت نسبت به radius:



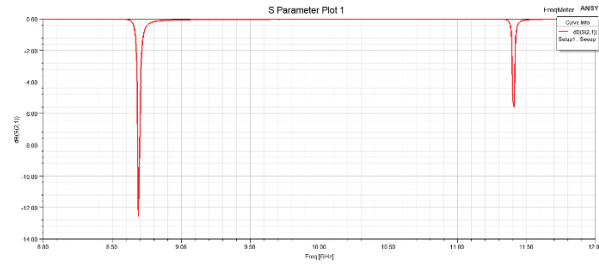
radius = 10mm



radius = 12mm



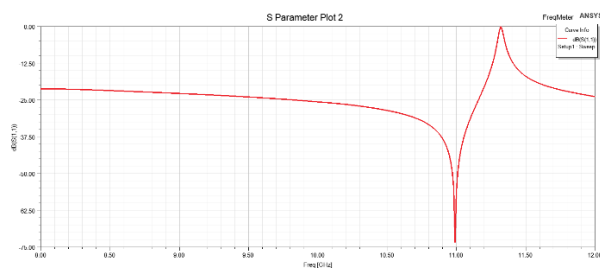
radius = 8mm



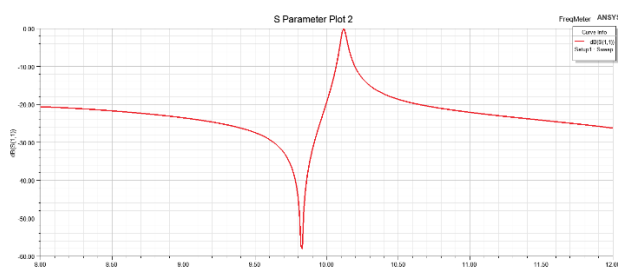
radius = 16mm

شکل ۱۰ - حساسیت S_{21} به radius

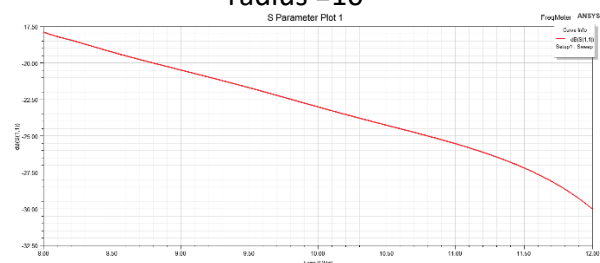
همانطور که طبق تئوری انتظار داشتیم، با افزایش radius فرکانس رزونانس کاهش می یابد. اگر radius به اندازه کافی از کران بالای تعیین شده در تئوری دور شود، مودهای دیگری - به جز TE₁₁₁ - در باند X مشاهده می کنیم. و اگر از کران پایین تعیین شده در تئوری عبور کنیم، هیچ مودی (حتی TE₁₁₁) را در باند X مشاهده نمی کنیم.



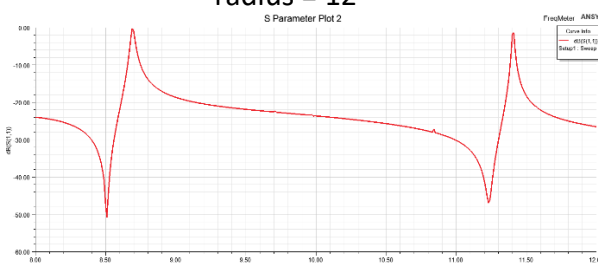
radius = 10mm



radius = 12mm



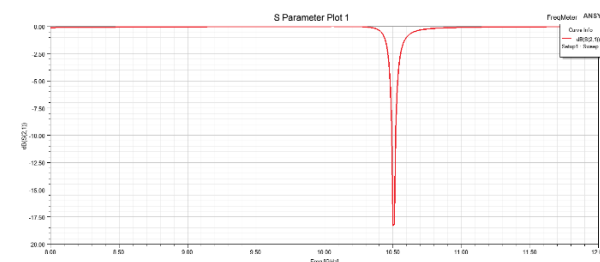
radius = 8mm



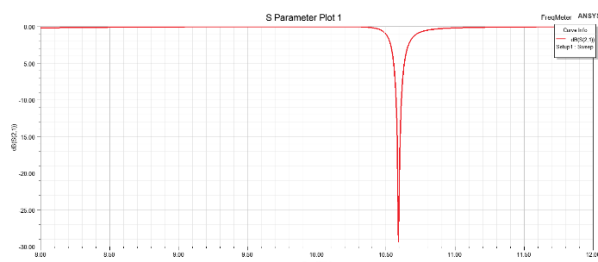
radius = 16mm

شکل ۱۱ - حساسیت S11 به radius

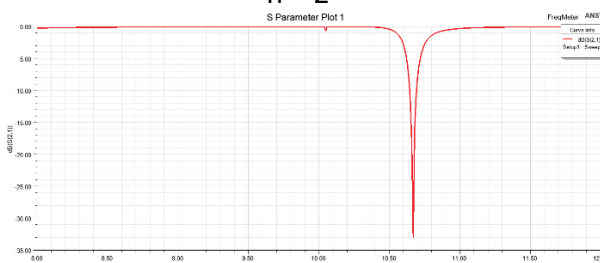
✓ حساسیت نسبت به h:



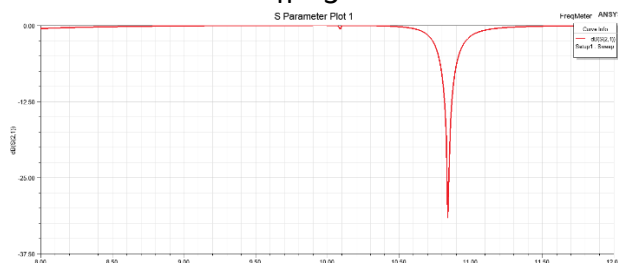
h = 2mm



h = 3mm



h = 4mm

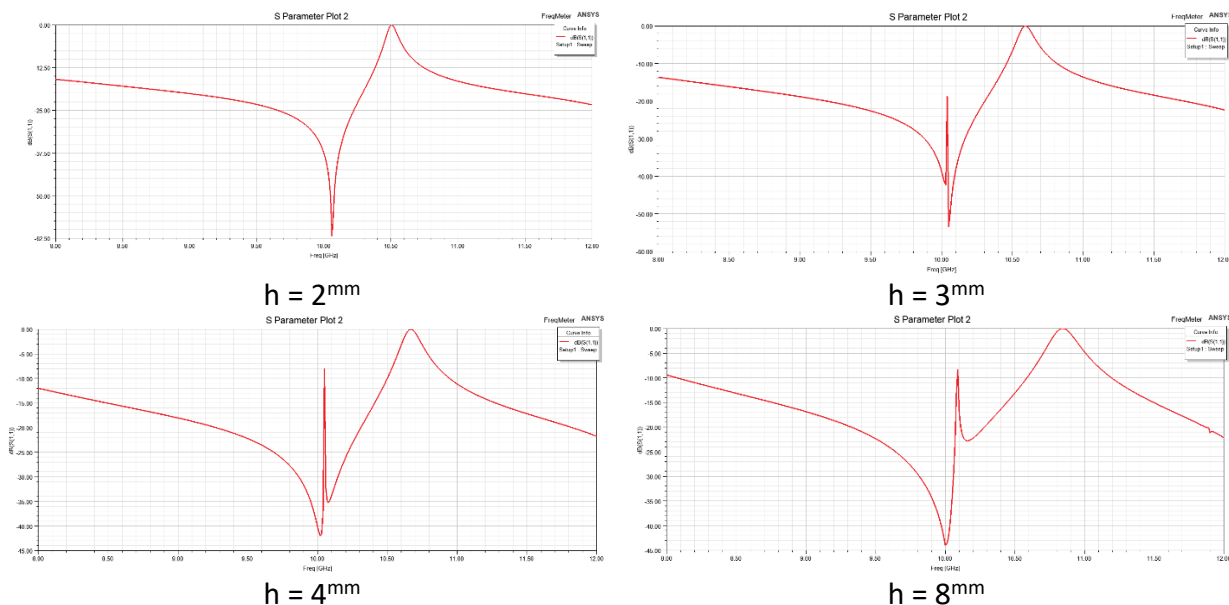


h = 8mm

شکل ۱۲ - حساسیت S21 به h (قطر سوراخ)

با افزایش h، فرکانس رزونانس بسیار کم تغییر می کند (کمی افزایش می یابد).

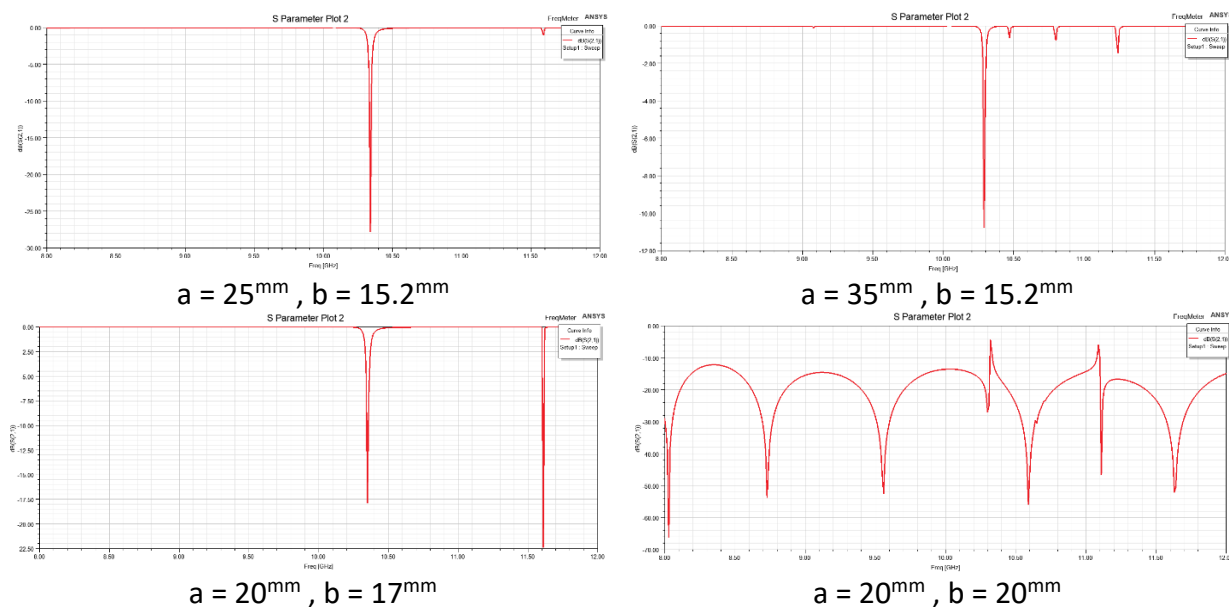
اما h بیشتر روی S11 تاثیر می گذارد (باعث ایجاد یک اختلال در match شدن سیستم می شود).



شکل ۱۳ - حساسیت S_{11} به h

✓ حساسیت نسبت به a و b (ابعاد موجبر):

در حالت عادی، $a = 20\text{mm}$ و $b = 15.2\text{mm}$ است؛ این طور تنظیم شده تا فرکانس TE_{01} آن، وسط باند X (10GHz) باشد.

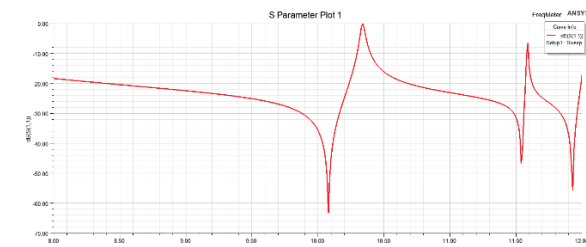


شکل ۱۴ - حساسیت S_{21} به ابعاد موجبر (a و b)

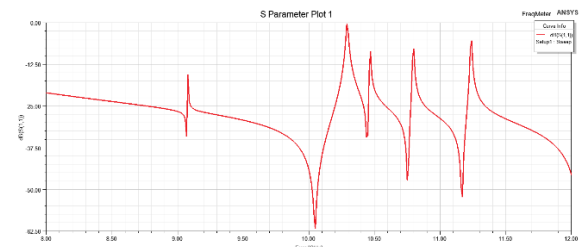
با افزایش a کمی اختلال در S_{21} مشاهده می شود، ولی فرکانس رزونانس تغییر چندانی نمی کند. تغییر a بیشتر در S_{11} تاثیرگذار است. همانطور که در شکل ۱۵ می بینیم، افزایش a اختلال قابل توجهی در S_{11} ایجاد می کند.

از طرف دیگر، b حتی با تغییر اندکی، اختلال بسیار زیادی در S_{21} ایجاد می کند. در $b = 17\text{mm}$ یک فرکانس رزونانس کاملاً غریبه در نمودار ایجاد می شود و در $b = 20\text{mm}$ شکل نمودار کاملاً عوض می شود.

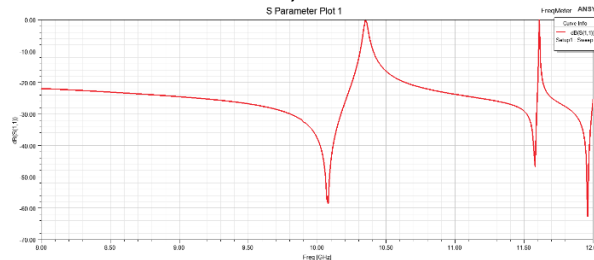
به نظر می آید که این ساختار بیش از هر متغیر دیگری به b وابسته است.



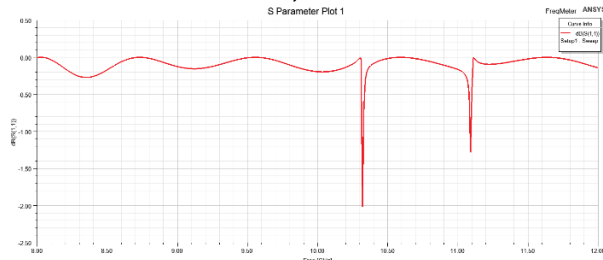
$a = 25\text{mm}$, $b = 15.2\text{mm}$



$a = 35\text{mm}$, $b = 15.2\text{mm}$



$a = 20\text{mm}$, $b = 17\text{mm}$

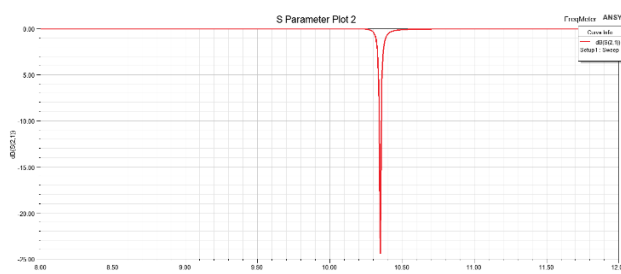


$a = 20\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$

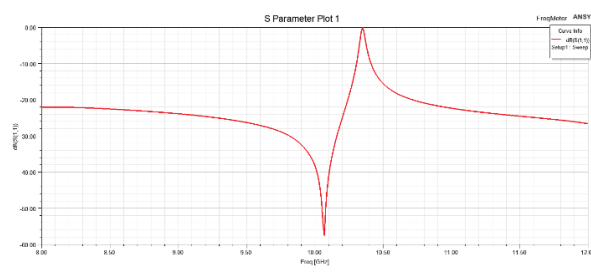
شکل ۱۵ - حساسیت S_{11} به ابعاد موجبر (a و b)

✓ حساسیت نسبت به a :

در حالت عادی، $l = 100\text{mm}$ است.



$l = 150\text{mm}$, S_{21}



$l = 150\text{mm}$, S_{11}

شکل ۱۶ - حساسیت S_{11} و S_{21} به طول موجبر (l)

S_{11} و S_{21} به l هیچ حساسیتی ندارند. چون به هر حال، پورت ۱ و پورت ۲ هر دو تطبیق هستند و گویی موجبر طول بی نهایت دارد.

در نهایت، قابل ذکر است که طرح های متعدد دیگری نیز می توان برای فرکانس متر اجرا کرد که ما در اینجا تنها یکی از آنها را تشریح کردیم.

با تشکر