

## بهینه‌سازی جفت‌کننده هم‌محور به موجبر ۱۸۰۰ با توان ورودی بالا با استفاده از نرم‌افزار CST تحت کنترل برنامه MATLAB

مریم مستأجران و فیروزه کاظمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

پست الکترونیکی: mostajeran@yazd.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۴/۲۵)

### چکیده

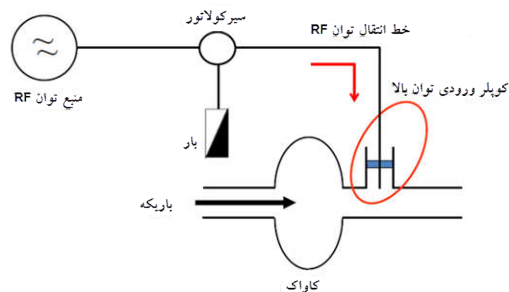
جفت‌کننده‌های هم‌محوری با توان ورودی بالا، از اجزای مهم شتاب‌دهنده‌ها هستند و معمولاً در بسامد ۵۰۰ مگاهرتز استفاده می‌شوند. برای اعمال شرایط توان بالای RF در جفت‌کننده‌ها، جفت‌کننده‌ها تحت شرایطی یکسان، در ایستگاه آزمایش آماده می‌شوند، برای این منظور از موجبر جفت شده به هم‌محور استفاده می‌شود. پارامتر  $S_{11}$  نشاندهنده میزان تلف بازگشتی توان ورودی است که با بهینه‌کردن ابعاد مدل پیشنهادی کاهش می‌یابد. برنامه MATLAB دارای ابزارهای توانمندی برای بهینه‌سازی ابعاد مدل‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار CST STUDIO SUITE است. در این مقاله، مراحل و جزئیات روش‌های کنترل نرم‌افزار CST با استفاده از برنامه MATLAB شرح داده شده است. سپس با استفاده از این روش، به بهینه‌سازی ابعاد جفت‌کننده هم‌محور به موجبر ۱۸۰۰ با توان بالا، پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده‌ها، جفت‌کننده، توان بالا، بهینه‌سازی، MATLAB، CST

### ۱. مقدمه

الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد، نیاز به ابزارهای شبیه‌سازی با مهارت بالاتر نیز افزایش می‌یابد. نرم‌افزار MWS در طول چندین سال تحقیق و توسعه، یکی از بهترین نرم‌افزارها در انجام شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی سه بعدی با دقت بالا شناخته شده است. از جمله ویژگی‌های این نرم‌افزار این است که می‌تواند با برنامه MATLAB ترکیب شود [۱]. برنامه MATLAB زبان ریاضی قابل دسترس، پردازشگر سیگنال و بسته نرم‌افزاری گرافیکی است. مهندسی از توابع قدرتمند برنامه MATLAB برای طراحی و بررسی ساختارهای مختلفی از جمله موجبر و کاواک استفاده

برای طراحی و ساخت ابزارهای الکترومغناطیسی مانند کاواک‌ها، موجبرها، آنتن‌ها، رادارها و تصاویر پزشکی، مدل‌سازی الکترومغناطیسی ضروری است. ماژول CST Microwave Studio یا به اختصار MWS که یکی از ماژول‌های پرکاربرد نرم‌افزار CST STUDIO SUITE است، کاربر را قادر می‌سازد تا به آسانی و بدون انجام آزمون‌های هزینه‌بر و بعضاً مضر در سیستم‌های واقعی، مدل مورد نظر را شبیه‌سازی کرده و جنبه‌های مختلف آن را مورد بررسی قرار دهد. هنگامی که پیچیدگی تجزیه و تحلیل‌های



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) جفت کننده متصل به کاواک، برای انتقال توان RF.

## ۲. مدل پیشنهادی برای جفت کننده هم محور به موجبر ۱۸۰۰ با توان ورودی بالا

جفت کننده ابزار اتصال دهنده در سیستم‌های الکترومغناطیسی است و یکی از اجزای مهم شتاب‌دهنده‌های SRF<sup>۴</sup> (شتاب‌دهنده‌هایی با کاواک ابرسانا مورد استفاده در بسامد رادیویی) است. قیمت جفت کننده‌ها معمولاً قابل مقایسه با قیمت کاواک‌هاست. این ابزارهای اتصال‌دهنده می‌توانند اثر بسیار زیادی بر نحوه عملکرد کاواک‌ها داشته باشد. جفت کننده‌های ورودی توان بالا معمولاً از نوع هم محوری هستند مانند تریستن<sup>۵</sup> که در شتابدهنده KEKB<sup>۵</sup> ژاپن استفاده شده است [۵]. این نوع جفت کننده‌ها، معمولاً در بسامد ۵۰۰ MHz مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۱ جفت کننده متصل به کاواک را نشان می‌دهد.

برای اعمال شرایط توان بالای RF در جفت کننده‌ها، ابتدا جفت کننده‌ها باید تحت شرایطی یکسان، در ایستگاه آزمایش<sup>۶</sup> آزموده شود. بدین منظور جفت کننده را به موجبری با ابعاد مناسب متصل می‌کنند تا میزان توان انتقال داده شده توسط جفت کننده تست شود.

شکل ۲ مدل پیشنهادی جفت کننده هم محوری به موجبر ۱۸۰۰ را نشان می‌دهد. موجبر دارای ارتفاع ۱۸ اینچ و عرض ۹ اینچ است، که به آن موجبر ۱۸۰۰ می‌گویند. جفت کننده‌های هم

می‌کنند. اگرچه نرم‌افزارهایی مانند MWS می‌توانند بسیاری از سیستم‌های الکترومغناطیسی پیچیده را مدل‌سازی و بهینه کنند اما توانایی‌های مختلف و متعدد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در برنامه MATLAB را ندارند. استفاده از برنامه MALAB برای کنترل حل‌کننده‌های موجود در نرم‌افزارهایی همچون MWS ابزار توانمندی برای بررسی نتایج به وجود آورده و همچنین امکان بهینه‌سازی پارامترهای مختلف شبیه‌سازی را فراهم می‌کند [۲]. تبادل اطلاعات بین نرم‌افزار MWS و برنامه MATLAB، اجرای الگوریتم‌های ریاضی و امکانات گرافیکی را که در نرم‌افزار MWS وجود ندارد فراهم می‌کند [۳]. میزان ترکیب دو نرم‌افزار می‌تواند شامل پس‌پردازش<sup>۱</sup> و تحلیل نتایج شبیه‌سازی تا واگذار کردن یک بخش از شبیه‌سازی به برنامه MATLAB باشد. از دیگر مزایای ترکیب دو نرم‌افزار می‌توان به زمان شبیه‌سازی کوتاه‌تر و افزایش اعتبار نتایج اشاره کرد [۱].

اگرچه در چندین مقاله [۱-۴] از ترکیب برنامه MATLAB و کدهای تجاری مانند CST و HFSS<sup>۲</sup> برای اهداف مختلف استفاده شده است ولی مراحل و جزئیات آن بیان نشده است. در این مقاله برای بهینه‌سازی جفت کننده هم محور به موجبر ۱۸۰۰ با توان بالا از ترکیب نرم‌افزار MWS و برنامه MATLAB استفاده می‌شود. در اینجا چگونگی استفاده از برنامه MATLAB با زبان برنامه‌نویسی مانند VBA<sup>۳</sup> برای فراخوانی MWS با جزئیات بیان می‌شود.

بخش‌های بعدی این مقاله به ترتیب زیر است: در بخش ۲ مدل استفاده شده در این مقاله ارائه می‌شود، چگونگی ترکیب برنامه MATLAB با نرم‌افزار MWS در بخش ۳ به دو روش شرح داده می‌شود. در ادامه در بخش ۴ چگونگی ذخیره سازی برخی نتایج بیان می‌شود. با استفاده از یکی از روش‌های ترکیبی، نتایج بهینه‌سازی مدل پیشنهاد شده در بخش ۵ ارائه می‌شود و نتیجه‌گیری در بخش ۶ بیان می‌شود.

۴. Superconducting radio frequency

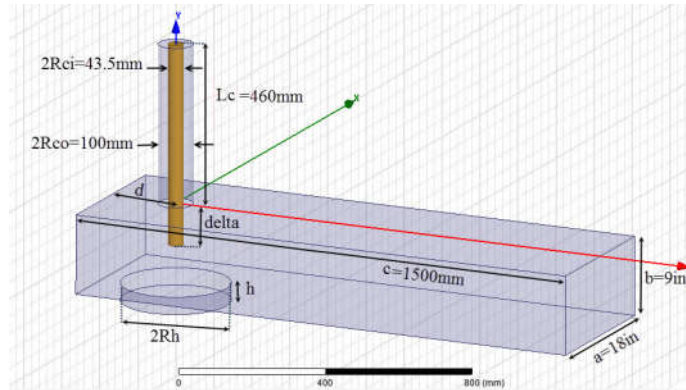
۵. Tristan

۶. Test stand

۱. Post Processing

۲. High Frequency Structural Simulator

۳. Visual Basic for Application



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح‌واره جفت کننده هم محور به موجبر ۱۸۰°.

درصد از توان عبوری از درگاه ۱ به این درگاه باز گردد. همچنین در این مقاله بهینه‌سازی ابعاد مدل پیشنهادی به طوری که کمترین مقدار  $S_{11}$  در بسامد ۵۰۰MHz باشد، مورد نظر است. بهینه‌سازی در نرم افزار CST بر اساس الگوریتم‌های مختلفی از جمله  $\chi^2$  NM است. از این الگوریتم‌ها زمانی جواب مناسبی به دست می‌آید که نقطه شروع نزدیک به بهترین جواب باشد. برای این هدف از برنامه MATLAB ای که با نرم افزار CST ترکیب شده است استفاده می‌کنیم و بازه مناسب را به دست آورده و سپس با استفاده از آن بهینه‌سازی را انجام می‌دهیم.

### ۳. روش‌های کنترل نرم‌افزار CST با استفاده از برنامه MATLAB

کنترل به دو روش صورت می‌گیرد:

- ۱.۳. اجرای فایل MATLAB ای که فایل bas (فایل حاوی دستورهایی به زبان VBA) در آن فراخوانی شده است.
- ۲.۳. اجرای فایل MATLAB ای که دستورهایی CST مستقیماً در آن نوشته شده است.

#### ۳.۱. روش اول کنترل نرم‌افزار توسط فایل bas

در این روش، برنامه MATLAB برای کنترل نرم‌افزار CST به صورت غیر مستقیم عمل می‌کند و از یک زبان برنامه نویسی VBA استفاده می‌کند.

محور دارای مقاومت  $Z_0 = 50 \Omega$  هستند بنابراین قطر استوانه درونی هم محور (۲Rci) و قطر بیرونی آن (۲Rco) ۴۳٫۵ mm و ۱۰۰ mm است. ارتفاع هم محور (Lc) ۴۶۰ mm است. در اینجا مقدار ورود هم محور به داخل موجبر (delta)، فاصله هم محور تا لبه موجبر (d)، شعاع استوانه طراحی شده (Rh) و ارتفاع استوانه طراحی شده (h)، با روش بهینه‌سازی مشخص می‌شوند. در طراحی سامانه‌های مخابراتی و ابزارهای الکترومغناطیسی از جمله جفت کننده‌ها، یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی، پارامترهای S هستند. این پارامترها درایه‌های ماتریسی به نام ماتریس پراکندگی یا ماتریس S را تشکیل می‌دهند. پارامترهای S، توان‌های تابیده شده و انعکاس یافته از درگاه‌ها که منبع توان سیستم هستند را به یکدیگر مربوط می‌سازند به عنوان مثال  $S_{11}$ ، توان بازگشتی به درگاه یک را نشان می‌دهند. به همین علت در طراحی ابزارهای الکترومغناطیسی، هدف کمینه کردن این پارامتر است.  $S_{11}$  با رابطه (۱) نشان داده می‌شود

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_1^-}{P_1^+}, \quad (1)$$

که در اینجا  $P_1^-$  توان بازتابی و  $P_1^+$  توان ورودی به درگاه ۱ است. تلف بازگشتی ( $RL$ ) در واحد dB به صورت زیر محاسبه می‌شود [۶].

$$RL = 10 \log |S_{11}|^2 \text{ dB}. \quad (2)$$

معمولاً در طراحی ساختارهای خطوط انتقال، سعی بر این است که  $S_{11} \leq -30 \text{ dB}$  باشد [۴]، به این منظور که فقط حدود ۰٫۱

جدول ۱. فایل های مورد نیاز در ترکیب نرم افزار CST و برنامه MATLAB.

مفهوم فایل	نوع فایل
فایل های شامل دستورهای MATLAB هستند.	فایل هایی با پسوند m
فایل ASCII است که شامل مقادیر متغیرهاست.	فایلی با پسوند txt
فایلی شامل دستورهای VBA است.	فایلی با پسوند bas
فایل حاوی مدل طراحی شده.	فایلی با پسوند CST

```
>>"CST_MWS_Path\CST
DESIGNENVIRONMENT.exe"
-m file_Path\cmdfile.bas
```

این دستور شامل دو بخش است. در بخش اول CST\_MWS\_Path مسیر قرار گرفتن فایل CST DESIGN ENVIRONMENT.exe است که همان مسیر نصب نرم افزار CST در سیستم است. در بخش دوم دستور، file\_Path مسیر قرار گرفتن فایل bas و cmdfile نام فایل bas است که در ادامه طریقه نوشتن این فایل متنی توضیح داده می شود. به جای cmdfile هر نام دیگری برای فایل bas می توان انتخاب کرد. به طور مثال اگر نرم افزار در درایو C نصب شده باشد و basfile با نام controlling\_CST در درایو D در پوشه Test13 ایجاد شده باشد، دستور بالا به صورت زیر خواهد بود.

```
!"C:\Program Files (x86)\CST STUDIO SUITE
2016\cst design environment.exe" -m
D:\Test13\Controlling_CST.bas
```

### روش نوشتن دستورهای فایل bas

در فایل bas ابتدا نام فایل و عبارت Sub Main() به صورت زیر نوشته می شود:

```
' Controlling_CST
Sub Main() (۳)
```

سپس سه دستور زیر به ترتیب نوشته می شود

```
Dim test(۱ To ۱۰) As Variant (۴)
```

```
Open "txt file_path \file name.txt" For Input As #1
Input #۱, test(۱)
Input #۱, test(۲)
Input #۱, test(۳)
Input #۱, test(۴)
Input #۱, test(۵)
Input #۱, test(۶)
Input #۱, test(۷) (۵)
```

نرم افزار CST و HFSS از جمله نرم افزارهایی هستند که دارای ویرایشگر VBA هستند. دستورهای VBA توابع مختلف در نرم افزارهای شبیه سازی مانند CST و HFSS را در برنامه MATLAB فراخوانی می کنند. به طور کلی برای کنترل نرم افزار CST در برنامه MATLAB چندین فایل مرتبط با پسوندهای مختلف نیاز است که در جدول ۱ آورده شده است.

مراحل انجام این روش به صورت زیر است:

I ابتدا باید مدل مورد نظر در محیط MWS ایجاد شود.  
II در برنامه MATLAB، پارامترهای استفاده شده در طراحی مدل برای ورود به فایل bas، توسط تابعی به نام function\_write\_data\_on\_file در فایلی متنی چاپ می شوند (دستور زیر).

```
filename = 'structure';
parameters = [مقدار عددی متغیرهای مدل طراحی شده];
function_write_data_on_file(filename,parameters);
filename نام فایل متنی است که در اینجا به نام structure است و parameters، متغیرهای استفاده شده در طراحی مدل مورد نظر است. تابع استفاده شده می تواند به صورت زیر نوشته شود.
```

```
function_write_data_on_file(filename,data)
fid = fopen(strcat(filename,'.txt'),'w');
for i=۱:(length(data))
fprintf(fid,'%f\r',data(i));
fprintf(fid,'\n');
end
fclose(fid);
```

III سپس فایل CST از طریق دستورهای VBA که در فایلی با پسوند bas نوشته شده است، به محیط برنامه MATLAB فراخوانی می شود. برای انجام این فراخوانی در برنامه MATLAB دستور زیر وارد می شود

Save (۹)  
Rebuild

مرحله بعدی به دو حالت می‌تواند انجام شود

۱. اعمال شرایط و ویژگی‌های مدل به طور مستقیم در فایل MWS.

۲. نوشتن دستورهای مربوط به شرایط و ویژگی‌های مدل در فایل bas.

اگر حالت اول انتخاب شود، دیگر نیازی به نوشتن دستورهای ویژگی در فایل bas نیست.

در حالت دوم، می‌توان سایر ویژگی‌های مدل از جمله، شرایط مرزی، مش‌بندی، محدودهٔ بسامدی، تعریف درگاه و بسیاری ویژگی‌های دیگر را نیز در فایل bas وارد کرد. دستورهای مربوط به شرایط مرزی، مش‌بندی و بسیاری ویژگی‌های دیگر را می‌توان از قسمت history در نرم‌افزار CST استفاده کرد. به طور مثال دستورهای مربوط به شرایط مرزی که در فایل bas می‌توان نوشت، به صورت زیر است

```
With Boundary
.Xmin "electric"
.Xmax "electric"
.Ymin "electric"
.Ymax "electric"
.Zmin "electric"
.Zmax "electric"
.Xsymmetry "none"
.Ysymmetry "none"
.Zsymmetry "none"
.ApplyInAllDirections "False"
End With
```

ویژگی‌های مربوط به یک نوع مش‌بندی در اینجا مش‌بندی شش‌وجهی (Hexahedral legancy) به صورت زیر است.

```
With MeshSettingsv
.SetMeshType "Hex"
.Set "Version", %
End With
With Mesh
.UseRatioLimit "True"
.RatioLimit "1.0"
.LinesPerWavelength "15"
.MinimumStepNumber "15"
.Automesh "True"
.MeshType "PBA"
.SetCreator "High Frequency"
End With
```

به طور کلی در حالت Time domain solver فقط مش‌بندی شش‌وجهی قابل انتخاب است. جزئیات بیشتر پیرامون مش‌بندی و شرایط مرزی در مرجع [۷] آمده است. دستور

```
Input #\,test(۸)
Input #\,test(۹)
Input #\,test(۱۰)
Close #\
```

با استفاده از دستور ۲، تعداد متغیرها تعیین می‌شود سپس با استفاده از دستور ۳، فایل متنی که مقادیر عددی متغیر استفاده شده در مدل، در آن نوشته شده است، باز می‌شود و با استفاده از دستور ۴ این مقادیر وارد فایل bas می‌شوند. txt file\_path مسیر فایل متنی است و file name نام فایل متنی است. در اینجا به طور مثال ده متغیر برای مدل مورد بررسی در نظر گرفته شده است که وارد فایل bas می‌شوند.

پس از نوشتن دستورهای بالا، نرم‌افزار MWS، با دستور زیر باز می‌شود.

```
openfile("cstname_path\cst name.cst") (۶)
```

در اینجا، cstname\_path مسیر قرار گرفتن فایل CST حاوی مدل طراحی شده است و عبارت cst name نامی است که مدل در نرم‌افزار CST با آن ذخیره شده است. با اجرای این دستور، مدل در محیط نرم‌افزار ظاهر می‌شود. برای اینکه امکان تغییر ابعاد مدل وجود داشته باشد، باید پارامترهای مدل با دستور ششم در فایل bas نوشته شود.

```
storeparameter("parameter name(1) in cst file",test(1))
storeparameter("parameter name(2) in cst file", test (2))
storeparameter("parameter name(3) in cst file", test (3)) (۷)
```

در قسمت parameter name() in cst file باید نام پارامتر مورد استفاده در طراحی مدل قرار داده شود. به طور مثال برای ده پارامتر مدل مورد نظر ما، دستور بالا به صورت زیر خواهد بود:

```
storeparameter("a", test (1))
storeparameter("b", test (2))
storeparameter("c", test (3))
storeparameter("d", test (4))
storeparameter("Rci ", test (5))
storeparameter("Rco", test (6)) (۸)
storeparameter("Lc", test (7))
storeparameter("delta", test (8))
storeparameter("Rh", test (9))
storeparameter("h", test (1۰))
```

با دستورهای بالا داده‌ها ذخیره می‌شوند و با دستور ۸ مدل دوباره با ابعاد جدید ساخته می‌شود.

مزیت این روش نسبت به روش اول، این است که، در این روش می توان کنترل کاملی از CST درون برنامه MATLAB انجام داد. عملیات هایی که در این روش می توان انجام داد شامل: حل مدل های مختلف، انجام مطالعاتی پیرامون پارامترهای تعیین شده، تغییر یک مدل، ذخیره کردن یا دوراندختن نتایج حاصل از نرم افزار CST و غیره می شود. مراحل انجام این روش به صورت زیر است.

I. ابتدا باید CST DESIGN ENVIRONMENT باز شود و برای انجام این مرحله از دستور زیر استفاده می شود.  
`actxserver('CSTStudio.application')`  
 به جای عبارت `act` می توان از هر اسم دیگری استفاده کرد.  
 II. در مرحله دوم باید مدل ایجاد شود. برای این کار دو راه وجود دارد:

۱. طراحی، اعمال شرایط و ویژگی های مدل به طور مستقیم در محیط MWS.

۲. طراحی، اعمال شرایط و ویژگی های مدل با دستورهای مناسب در برنامه MATLAB.  
 در راه اول با دستور زیر، می توان مدل از قبل طراحی شده را فراخوانی کرد.

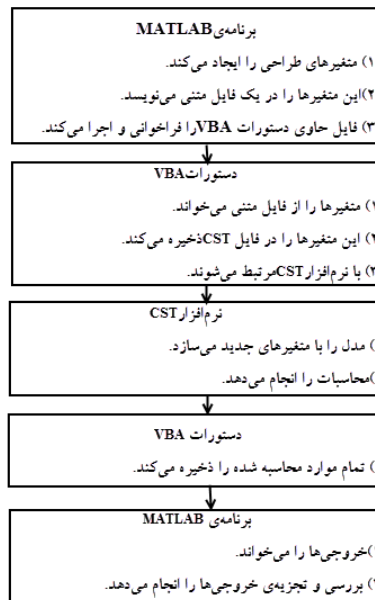
```
mws = invoke(cst, 'OpenFile', 'filename.cst')
```

در این دستور، در قسمت `filename` باید مسیر فایل MWS که حاوی مدل طراحی شده است را به همراه نام فایل وارد.

در راه دوم، مدل مورد نظر به طور مستقیم با دستورهای مناسب MATLAB، در محیط MWS ساخته می شود. برای نوشتن دستورهای MATLAB از دستورهای VBA مربوط به ساخت اجزای مختلف موجبر ۱۸۰۰ جفت شده، در قسمت `history list` در نرم افزار CST استفاده می شود. به طور مثال دستورهای VBA مربوط به ساخت موجبر، به صورت زیر است:

```
With Brick
.Reset
.Name "waveguide"
.Component "component1"
.Material "Vacuum"
.Xrange "0", "457.2"
.Yrange "0", "228.6"
.Zrange "0", "15.0"
.Create
End With
```

ترجمه دستورهای بالا به زبان MATLAB به صورت زیر است.



شکل ۳. مراحل ترکیب برنامه MATLAB و نرم افزار CST.

تعیین محدوده بسامدی مدل نیز به صورت زیر است:

```
"Solver.FrequencyRange "400", "600"
```

به همین ترتیب می توان دستور مربوط به بسیاری از ویژگی های دیگر را مانند موارد بالا در فایل `bas` وارد کرد.

بعد از این مراحل، در پایان فایل `bas` باید حل کننده مورد نظر، بیان شود و نتایج ذخیره شود. برای این هدف دستور زیر استفاده می شود.

```
SolverType.start
Save
End sub
```

(۱۰)

عبارت `Solver Type` نام حل کننده مورد نظر است که بر حسب حوزه کاری کاربر متفاوت خواهد بود. برای حل کننده `Time domain` فقط کافی است عبارت `solver` وارد شود.

به طور خلاصه می توان مراحل انجام شده روش اول کنترل را در شکل ۳ مشاهده کرد.

۳.۲. روش دوم کنترل نرم افزار، با دستورهای مستقیم در

### برنامه MATLAB

در این روش، تمامی دستورهای که باید در نرم افزار CST اجرا شود، به جای قرار گرفتن در یک فایل `bas` شامل دستورهای VAB، در یک فایل MATLAB با پسوند `m`. قرار می گیرند.

`solver = invoke(mws, 'Solver');`  
`invoke(solver, 'Start');`

به جای عبارت Solver (در این قسمت) نام حل‌کننده مورد استفاده نوشته می‌شود. اگر حل‌کننده Time domain مورد نظر باشد، نوشتن عبارت solver کافی است.

#### ۴. ذخیره نتایج

این امکان وجود دارد که بعد از انجام محاسبات، نتایج یک بعدی که در نرم‌افزار CST به دست آمده است، با دستور مناسب در خارج از CST ذخیره شود و سپس با دستور دیگری توسط MATLAB خوانده شود. به عنوان مثال اگر حل‌کننده Time domain انتخاب شده باشد یکی از نتایج پارامترهای S هستند. مثلاً برای خواندن S11 توسط MATLAB، دستور زیر اجرا می‌شود.

`result = invoke(mws, 'ResultD', 'a(1)(1)');`

برای محاسبه پارامتر  $S_{11}$  بر حسب dB، در دستور بالا، باید به جای عبارت `a1(1)1(1)` عبارت `d1(1)1(1)` را وارد کرد. با دستور زیر داده‌های پارامتر  $S_{11}$  در محل مورد نظر در خارج از CST ذخیره می‌شود.

`invoke(result, 'Save', file_path \ file name');`

در اینجا، در قسمت `file -path` باید مسیر ذخیره فایل حاوی داده‌ها وارد شود و به جای عبارت `file name` نام فایل نوشته شود. این نکته قابل ذکر است که نام فایل باید با نام مدل یکی باشد. به عنوان مثال برای ذخیره‌های داده‌های مربوط به پارامتر  $S_{11}$  در پوشه با نام `Test15-waveguide` در درایو D و با نام `waveguide-part1`، دستور ذخیره به صورت زیر خواهد بود.

`invoke(result, 'Save', 'D:\Test15-waveguide\waveguide_part1');`

بعد از اجرای این دستور، داده‌ها در یک فایل متنی با نام `waveguide-part1.sig` ذخیره می‌شود. فایل با پسوند sig دستور `importdata` درون نرم‌افزار MATLAB وارد می‌شود.

`A = importdata(file_path \ file name.sig', ' ', 4)`  
`x = A.data(:, 1);`  
`y = A.data(:, 2);`

بعد از ذخیره داده‌ها، با دستور `save` و `Quite` فایل MWS ذخیره

`brick = invoke(mws, 'Brick');`  
`% create a brick in MWS`  
`invoke(brick, 'Reset');`  
`invoke(brick, 'Name', waveguide);`  
`invoke(brick, 'Component', 'component1');`  
`invoke(brick, 'Xrange', '0', '457.2');`  
`invoke(brick, 'Yrange', '0', '228.6');`  
`invoke(brick, 'Zrange', '0', '1500');`  
`invoke(brick, 'Material', 'Vacuum');`  
`invoke(brick, 'Create');`

به همین ترتیب می‌توان دستورهای مربوط به سایر اجزای جفت‌کننده هم محور به موجبر از جمله استوانه را نیز در ادامه این دستورها اضافه کرد. می‌توان واحدها را نیز با دستورهای زیر مشخص کرد

`units = invoke(mws, 'Units');`  
`invoke(units, 'Geometry', 'cm');`  
`invoke(units, 'Frequency', 'ghz');`  
`invoke(units, 'Time', 's');`  
`invoke(solver, 'FrequencyRange', fr1, fr2);`

به ترتیب به جای عبارت `fr1` و `fr2` کمترین و بیشترین مقدار بسامد قرار داده می‌شود.

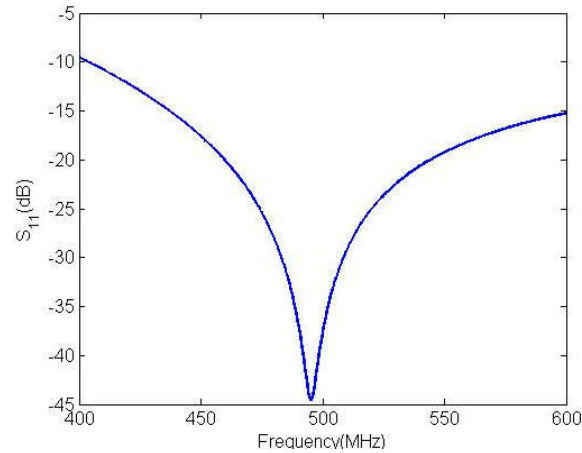
III. بعد از طرحی مدل، می‌توان ابعاد آن را به صورت پارامتری تعریف کرد تا امکان بهینه‌سازی با تغییر مقادیر هر پارامتر، وجود داشته باشد. برای این کار از دستورهای زیر برای هر پارامتر استفاده می‌شود.

`a = 457.2;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'a', a);`  
`b = 228.6;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'b', b);`  
`c = 1500.0;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'c', c);`  
`d = 129.0;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'd', d);`  
`Rci = 21.75;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'Rci', Rci);`  
`Rco = 50.0;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'Rco', Rco);`  
`Lc = 460.0;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'Lc', Lc);`  
`delta = 120.0;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'delta', delta);`  
`Rh = 129.0;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'Rh', Rh);`  
`h = 50.0;`  
`invoke(mws, 'StoreParameter', 'h', h);`

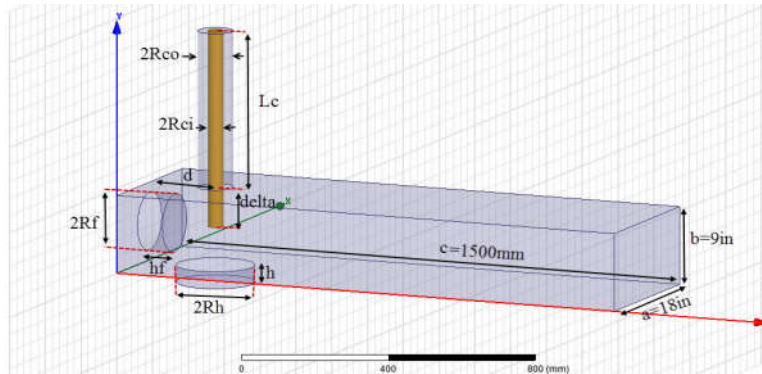
IV. اکنون باید نوع حل‌کننده و همچنین دستور اجرای حل‌کننده وارد شود. دستورهای زیر برای این منظور استفاده می‌شوند.







شکل ۴. نمودار تلف بازگشتی  $S_{11}$  بر حسب بسامد.



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح‌واره جفت کننده هم محور به موجبر ۱۸۰۰ به همراه حفره جانبی.

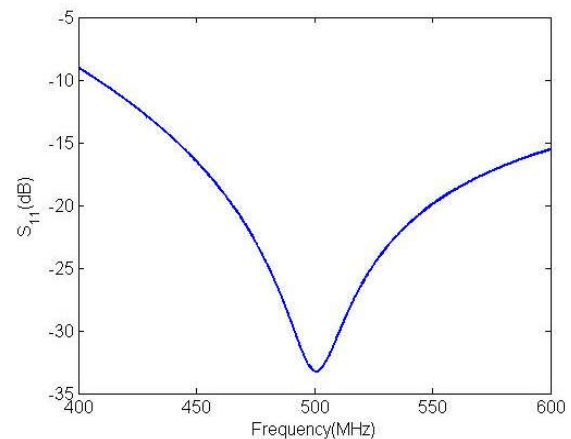
جدول ۳. ابعاد بهینه‌شده با استفاده از ترکیب MATLAB-CST.

hf	Rf	h	Rh	delta	d	ابعاد
۵	۹۵	۵۰	۱۲۹	۱۲۰	۱۲۹	اندازه (mm)

$S_{11}$  را داشته باشیم، هندسه موجبر را تغییر می‌دهیم. یک حفره استوانه‌ای به شعاع  $R_f$  و ارتفاع  $hf$  در دیواره پشتی موجبر ایجاد می‌کنیم تا درجه آزادی بیشتری روی  $S_{11}$  در بسامد  $500\text{MHz}$  داشته باشیم (شکل ۵). سپس مقادیر  $R_f$  و  $hf$  را با بهینه‌سازی به دست می‌آوریم (جدول ۳).

با ابعاد داده شده در جدول ۳، نمودار  $S_{11}$  بر حسب بسامد به صورت شکل ۶ به دست می‌آید.

همان طور که از نمودار  $S_{11}$  مشاهده می‌شود در بسامد  $500\text{MHz}$  که بسامد طراحی بود پارامتر  $S_{11}$  از  $-30\text{dB}$  کمتر



شکل ۶. نمودار تلف بازگشتی  $S_{11}$  بر حسب بسامد.

خواهد بود که مقدار بسیار مناسبی است.

## ۶. نتیجه گیری

نرم افزار CST یکی از نرم افزارهای مورد استفاده در شبیه سازی های الکترومغناطیسی سه بعدی، با دقت بالا شناخته شده است. برای بررسی نتایج به دست آمده در نرم افزار CST، می توان از امکانات پیشرفته ای که برنامه MATLAB در اختیار دارد، استفاده کرد. در این مقاله، مراحل و جزئیات ترکیب نرم افزار CST و برنامه MATLAB را شرح دادیم. جفت

کننده های هم محوری از جمله ابزارهای الکترومغناطیسی هستند که دقت در طراحی آنها، اهمیت بسزایی بر نحوه عملکرد کاواک های مورد استفاده در شتاب دهنده ها دارند. با استفاده از روش ترکیبی ذکر شده، به بهینه کردن ابعاد مدل پیشنهادی برای جفت کننده هم محور به موجبر  $180^\circ$  با توان ورودی بالا، پرداخته و کمترین تلف بازگشتی را در بسامد مورد نظر به دست آوردیم.

## مراجع

1. N Srinivas, and Kalyanmoy Deb; *Evolutionary computation* 2. 3 (1994) 221.
  2. A Mishra and D H Kumar; "*Design and Optimization of DRA array Using PSO Technique*"; *Bachelor Thesis*, National Institute of Technology, Rourkela, India (2013-2014).
  3. M A Montaser *et al.*, *Progress In Electromagnetics Research B* 37 (2012) 21.
  4. R L Haupt; *ACES* 23, 1 (2008).
  5. F Naito *et al.*; *IEEE, Particle Accelerator*
6. D M Pozar, "*Microwave engineering*", *John Wiley & Sons*, (2009).
۷. م مستأجران، ف کاظمی، س حجازی، «آموزش شبیه سازی ساختارهای مغناطیسی با استفاده از نرم افزار CST Studio Suite»، چاپ اول، (۱۳۹۵)، دانشگاه یزد.