

پائیز ۱۳۹۷

راهنمای خودآموز نرم افزار COMSOL Multiphysics

COMSOL
MULTIPHYSICS®



COMSOL

Protected by U.S. Patents 7,519,516; 7,596,474; 7,623,991; 8,219,373; 8,457,932; 8,626,475; 8,949,089; and 8,954,302. Patents pending. © 1998 - 2015 COMSOL. All rights reserved.

نویسندگان:

سام ستارزاده

امیرپارسا زیوری

علیرضا نیک ضمیر

عباس آسکانی

استاد:

دکتر محمد معماریان

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی شریف

COMSOL چیست؟

نرم افزار COMSOL در اصل یک مجموعه کامل شبیه سازی است که می تواند در یک محیط شبیه سازی گرافیکی معادلات دیفرانسیل را به روش اجزای محدود (Final Element Method; FEM) حل نماید. زمینه های استفاده این شبیه ساز بسیار گسترده می باشد. مسائل اپتیک، الکتروشییمی، حرارت و سیالات، پلاسما، امواج رادیویی، آکوستیک و انواع مختلف و متنوعی از مسایلی که در فضای سه بعدی و یا کم بعد تر قابل تعریف هستند در این نرم افزار قابل شبیه سازی می باشند. این خودآموز برای شبیه سازی مسائل الکتروستاتیک و مغناطیس تهیه شده است.

این نرم افزار در سال ۱۹۸۶ میلادی و توسط دانشجویان موسسه سلطنتی فناوری سوئد ابداع شد و با نام FEMLAB آغاز به کار کرد تا در سال ۲۰۰۵ به COMSOL Multiphysics تغییر نام داد.

COMSOL چه کاربردها و مزیت هایی دارد؟

کامسول نرم افزار بسیار کاربردی برای دانشجویان و محققان حوزه های مرتبط به مخابرات میدان و نوری و فیزیک می باشد. این نرم افزار همانند متلب قابلیت شبیه سازی مسائل مختلف و گسترده ای را دارد؛ با این حال مزیت بزرگ کامسول نسبت به متلب این است که برخلاف متلب، کار با نرم افزار کامسول نیاز به کدنویسی را به حداقل می رساند و با کار در یک محیط گرافیکی می توان پروژه های مهندسی و علمی مختلفی را شبیه سازی نمود.

COMSOL برای الکترومغناطیس (مقدمه)

در این خودآموز شما با نحوه استفاده نرم افزار کامسول برای حل مسائل الکترومغناطیس آشنا خواهید شد. نحوه اجرای نرم افزار بدین صورت است که این نرم افزار به روش FEM معادلات پایه ای الکتروستاتیکی و مغناطیسی را با شرایط مرزی و فضایی که شما با توجه به مسئله خود تعیین خواهید کرد حل می کند. در این روش، فضای سه بعدی به تعداد زیادی مش تقسیم می شود و هر مش به صورت یک المان جزئی در نظر گرفته می شود. سپس معادلات مورد نظر به این جزء ها تعمیم داده می شود و بدین صورت متغیرهایی نظیر پتانسیل، میدان الکتریکی، جابجایی الکتریکی و ... در تمام فضا محاسبه خواهند شد.

باز کردن یک فضای حل مسئله (study) الکتروستاتیک /

مغناطیس در کامسول

برای استفاده از نرم افزار کامسول، ابتدا باید مشخصات مسئله ای که می خواهید تعریف کنید را تعیین نمایید. هنگامی که نرم افزار کامسول را باز می کنید، با پنجره ای مطابق با شکل ۱ مواجه می شوید. شما می توانید با انتخاب گزینه Model Wizard ساخت یک فایل .mph را آغاز نمایید.

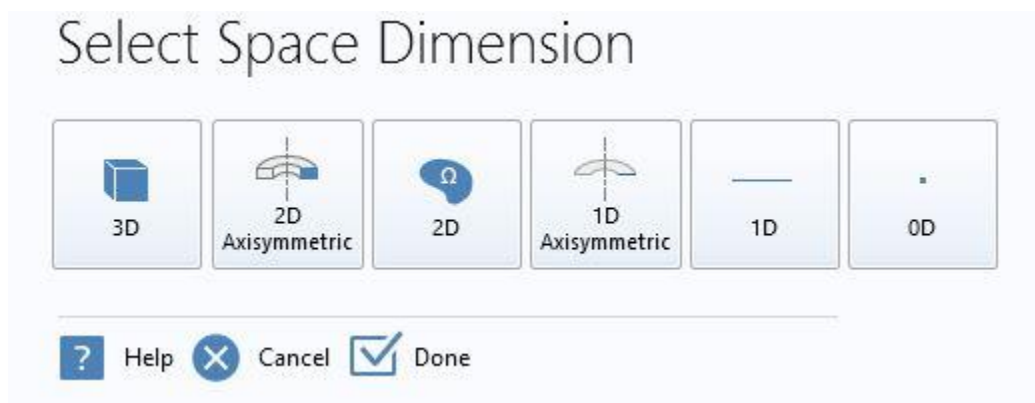
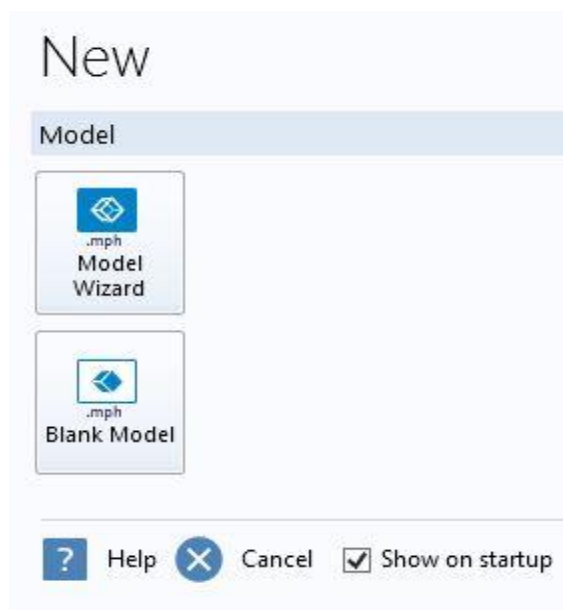
سپس، شما باید ابعاد مسئله را مشخص نمایید. (شکل ۲). مسئله شما ممکن است سه بعد، دو بعد، و یا یک بعد را در بر گیرد. شما با توجه به مدل مسئله خود باید تعداد ابعاد را مشخص نمایید. (در ادامه این خودآموز این در مورد انتخاب ابعاد توضیحاتی ارائه خواهد شد).

در گام بعدی، شما باید محیط مسئله را انتخاب نمایید. در محیط

کامسول، برای حل مسائل مختلف ماژول های متنوعی در نظر گرفته شده است. در این درس، شما با ماژول های

شکل ۱

AC/DC سر و کار خواهید داشت. (شکل ۳)



شکل ۲

در این لیست، پس از انتخاب ماژول AC/DC منویی مطابق شکل ۳ برای شما باز خواهد شد. در صورتی که شما

با مسئله الکتروستاتیک کار دارید،

گزینه Electrostatics (es) را

انتخاب نمایید. چنانچه قصد شما حل

یک مسئله مغناطیسی است، گزینه

Magnetic Fields (mf) را از منو

انتخاب نمایید. پس از انتخاب گزینه، با

فشردن دکمه Add ماژول مورد نظر را

اضافه کرده و سپس با کلیک بر گزینه

study به آخرین منو بروید. در این

منو (شکل ۴) حوزه های زمانی و

فرکانسی مختلفی قابل انتخاب می

باشند. از آن جایی که مسائل

الکتروستاتیک و مغناطیس در این

درس مستقل از زمان و در حالت پایا

حل خواهند شد، در این منو گزینه

Stationary را انتخاب نموده و سپس

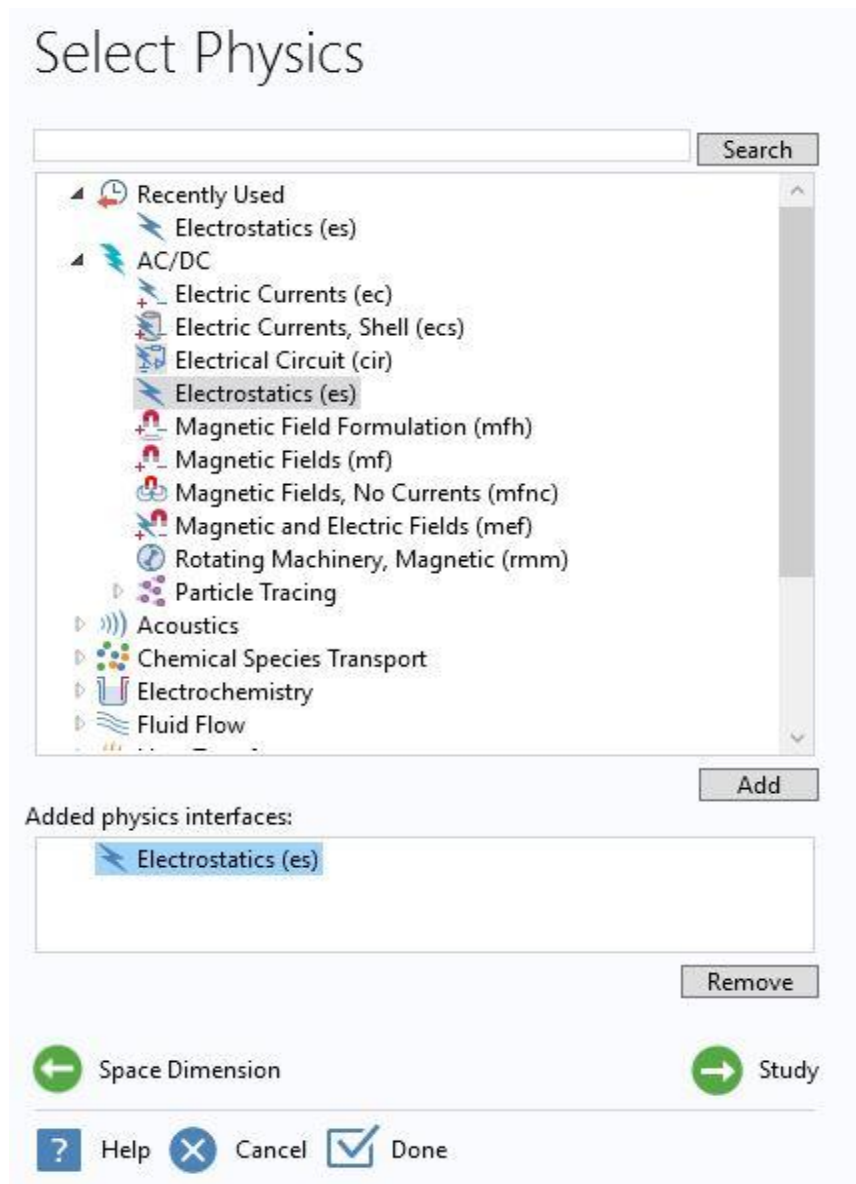
با کلیک بر روی Done در پایین منو،

محیط شبیه سازی برای شما ساخته

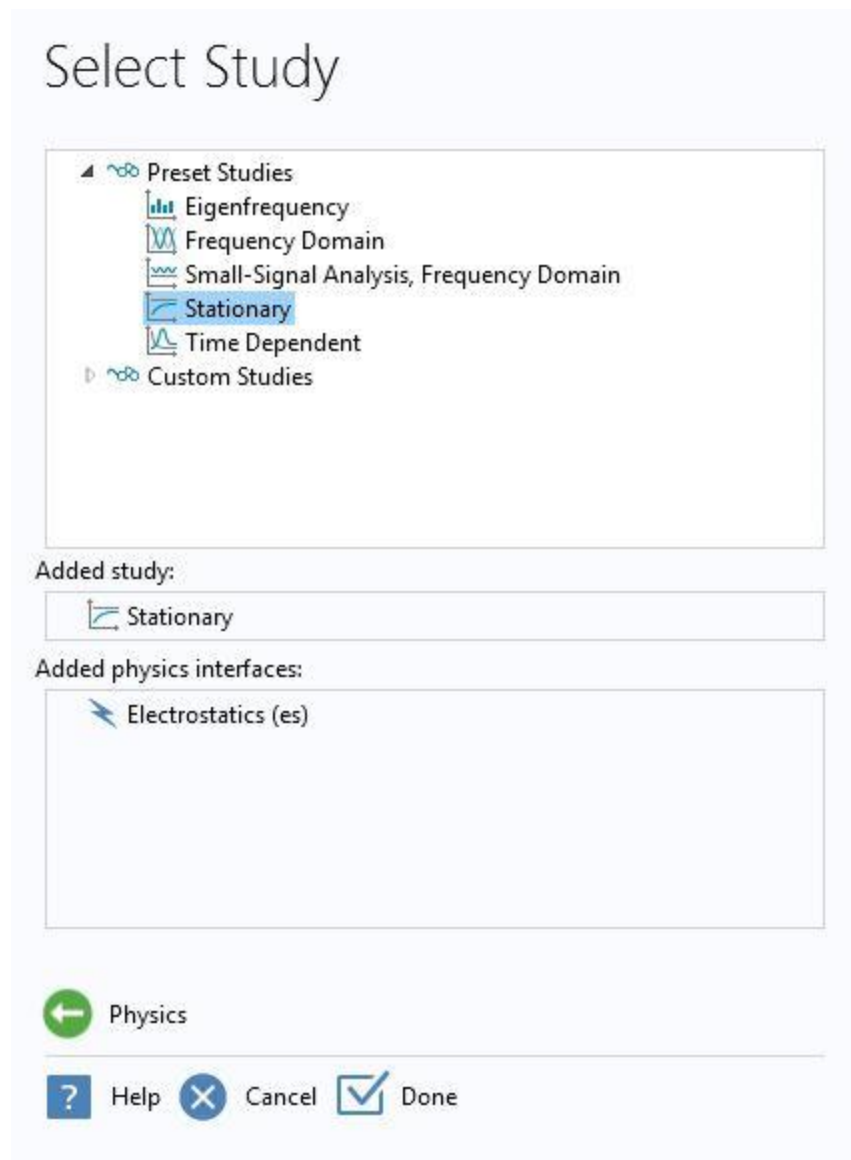
خواهد شد. در قسمت بعدی، ما شیوه

پیاده سازی یک مسئله الکتروستاتیک

را برای شما آموزش خواهیم داد.



شکل ۳



شکل ۴

تعریف مسئله در فضای کامسول (مقدمه)

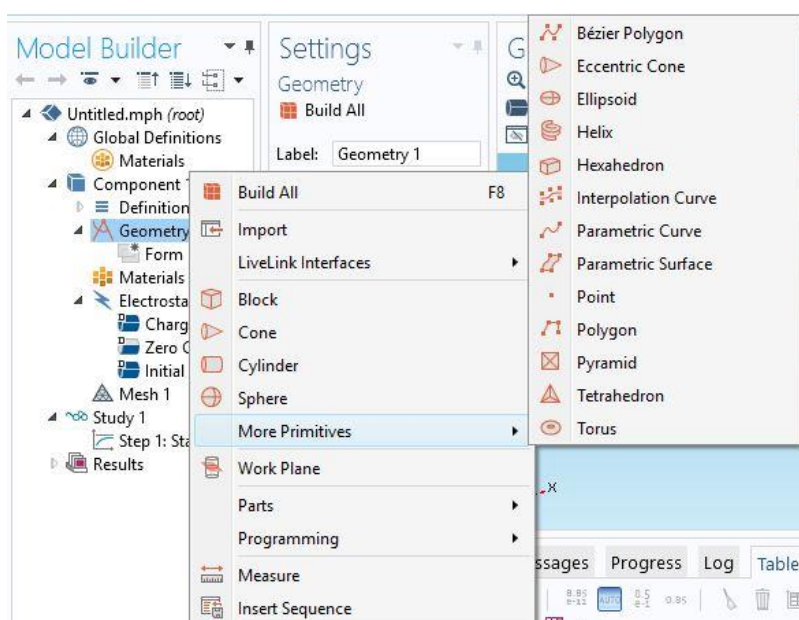
پس از ایجاد یه فضای study در کامسول مطابق آنچه تا اینجا توضیح داده شد، وقت آن فرا رسیده است که مسئله خود را به صورت گرافیکی در کامسول شبیه سازی نمایید. برای تعریف مسئله در محیط گرافیکی، شما باید ۴ مرحله را انجام دهید:

- تعریف اشکال هندسی مورد استفاده (Geometry)

- جنس اشکال تعریف شده (Materials)
- تعریف پارامترهای الکتروستاتیک مورد استفاده (مانند بار، پتانسیل، ...)
- شیوه مش بندی فضا

تعریف اشکال هندسی مورد استفاده (Geometry)

در مسائل الکتروستاتیک و مغناطیس، اجسام مختلفی با چگالی بار خطی، سطحی و یا حجمی و همچنین جریان سطحی و حجمی تعریف می شوند. برای شبیه سازی این اجسام، گام اول آن است که اجسام مورد نظر را از قسمت Geometry در منوی



Model Builder واقع در سمت

چپ محیط نرم افزار انتخاب کنیم. با

پلیک راست بر روی گزینه

Geometry، منویی مطابق شکل ۵

باز می شود. در این منو، می شما می

توانید اشکالی مانند کره، مکعب،

مخروط، بیضی گون، دونات، بار نقطه

ای، خط، مارپیچ و ... را تعریف کنید

که بعضی از این اشکال در زیرمنوی

More Primitives که در شکل ۵

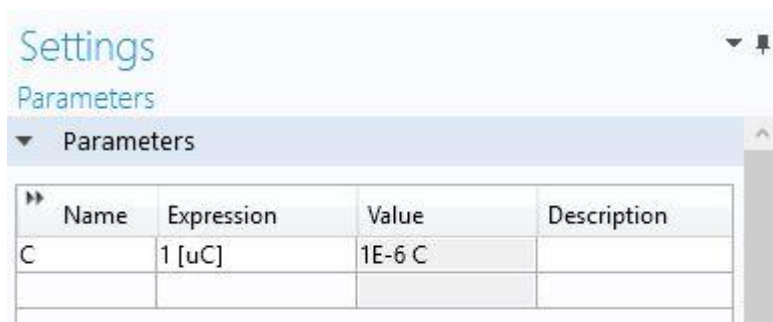
مشخص شده است قرار دارند. هم

چنین شما در این زیرمنو می توانید با انتخاب دو گزینه Parametric Surface و Parametric Curve

شکل ۵

سطوح دیگر را با تعریف تابع آن ها بسازید.

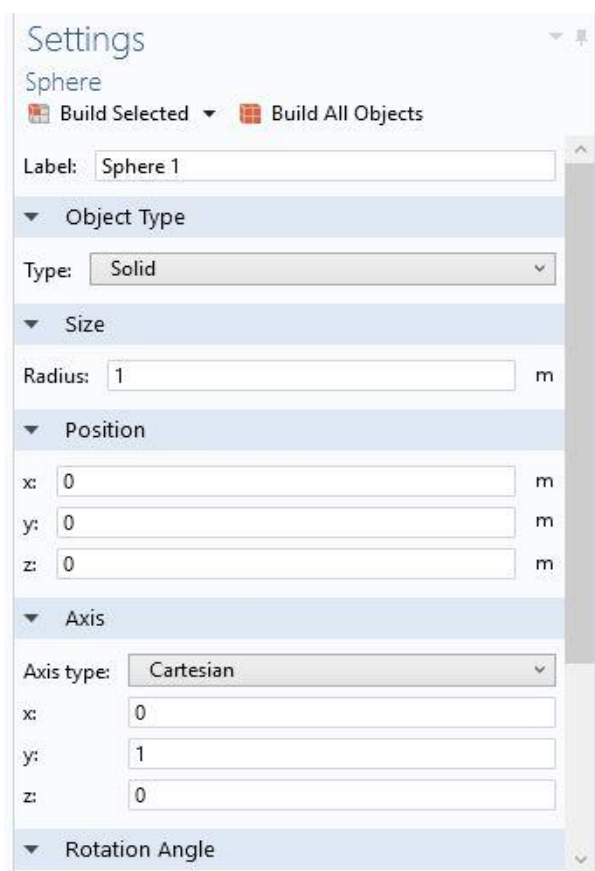
با کلیک روی هر کدام از اشکال و تعریف موقعیت مرکز آن ها و سایر پارامترهای مورد نیاز مانند ضلع، شعاع و ... شما در منوی Settings که در کنار منوی Model Builder باز می شود، شکل هندسی مورد نظر در صفحه گرافیکی قرار می گیرد. (شکل ۷) مقادیر مورد نیاز می توانند به صورت عدد و یا پارامتر تعریف گردند. برای تعریف پارامترها، در منوی بالای صفحه و از قسمت Definition گزینه Parameters را انتخاب کنید (شکل ۶) و سپس با نوشتن نام (در پنجره Name) و مقدار و واحد معادل پارامترها (در پنجره Expression)



شکل ۶

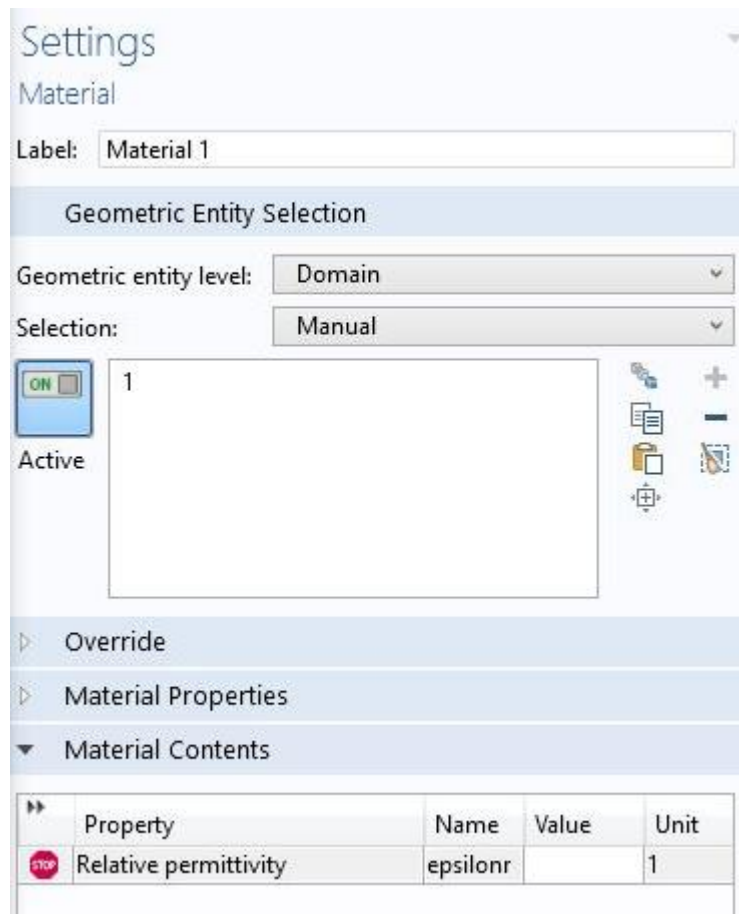
پارامترهای مد نظرتان را اضافه نمایید.
(واحد ها باید در قلاب ([]) قرار داده
شوند. هم چنین، در پنجره Value
مقدار و واحدی که تعریف کرده اید، به
صورت خودکار و در سیستم SI ذخیره
می شود.)

جنس اشکال تعریف شده (Materials)



شکل ۷

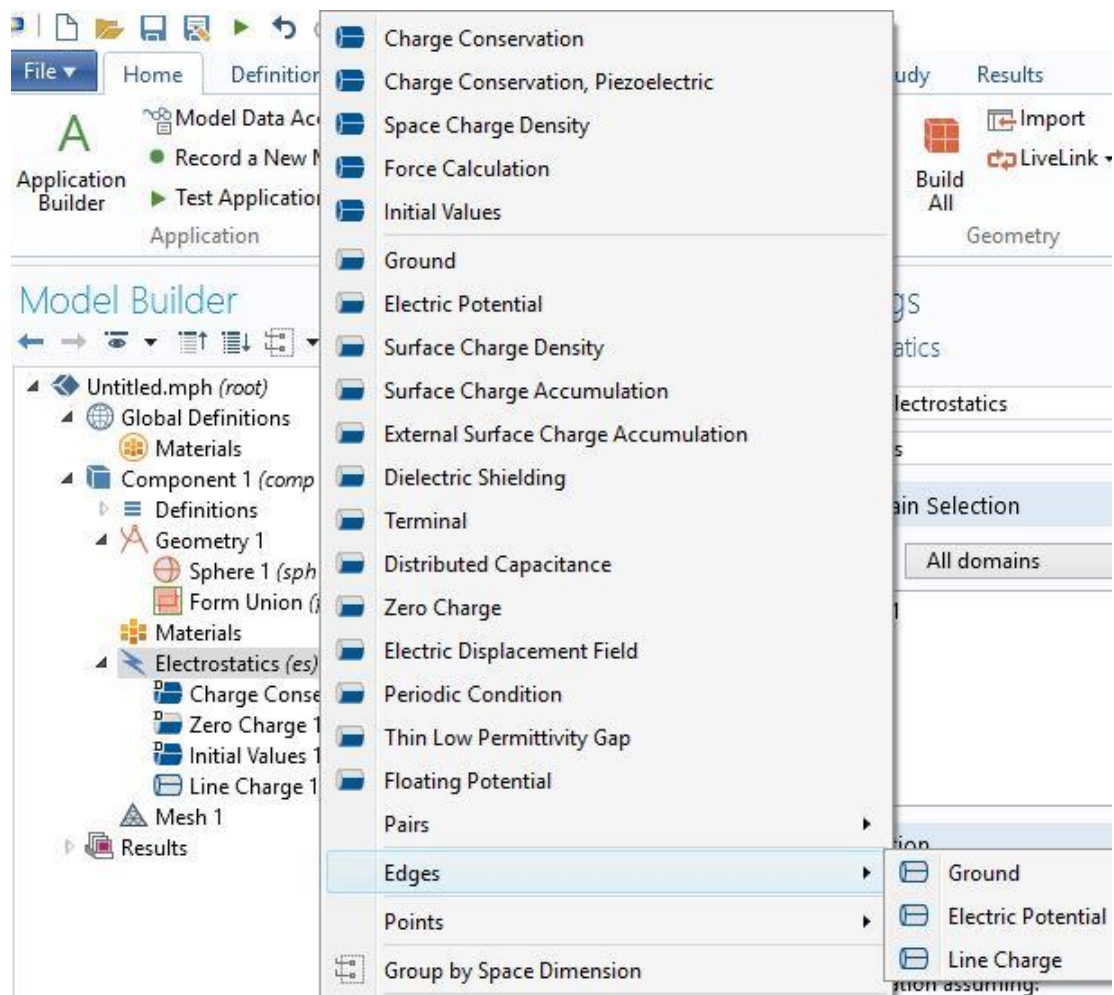
در این قسمت (گزینه Materials از منوی Model
Builder) می توانید پارامترهایی مانند ضریب گذردهی،
رسانایی الکتریکی و مغناطیسی و... را که به جنس ماده برمی
گردند تعریف کنید. با کلیک راست بر روی گزینه Materials
و انتخاب گزینه Blank Material شما می توانید ماده
جدیدی تعریف کنید و ضرایب گذردهی و رسانایی آن را تعریف
کنید. (در قسمت Material Contents) سپس، می توانید با
کلیک بر روی حجم هایی را که در قسمت قبل تعریف نموده اید
در منوی Graphics که اشکال ساخته شده را به شما نشان
می دهد، Material خود را به این احجام نسبت دهید. شما در
مسائل الکتروستاتیک نیاز دارید یک محیط بسیار بزرگ با
ضریب گذردهی ۱ (هوا) را مشخص نمایید که سایر احجام در
آن قرار دارند؛ زیرا چنین محیطی در فضای کامسول از پیش
تعریف نشده است. در صورت عدم تعریف چنین فضایی،
هنگام اجرای شبیه سازی شما به Error بر خواهید
خورد. (شکل ۸)



شکل ۸

تعریف کمیت الکتروستاتیک مورد استفاده

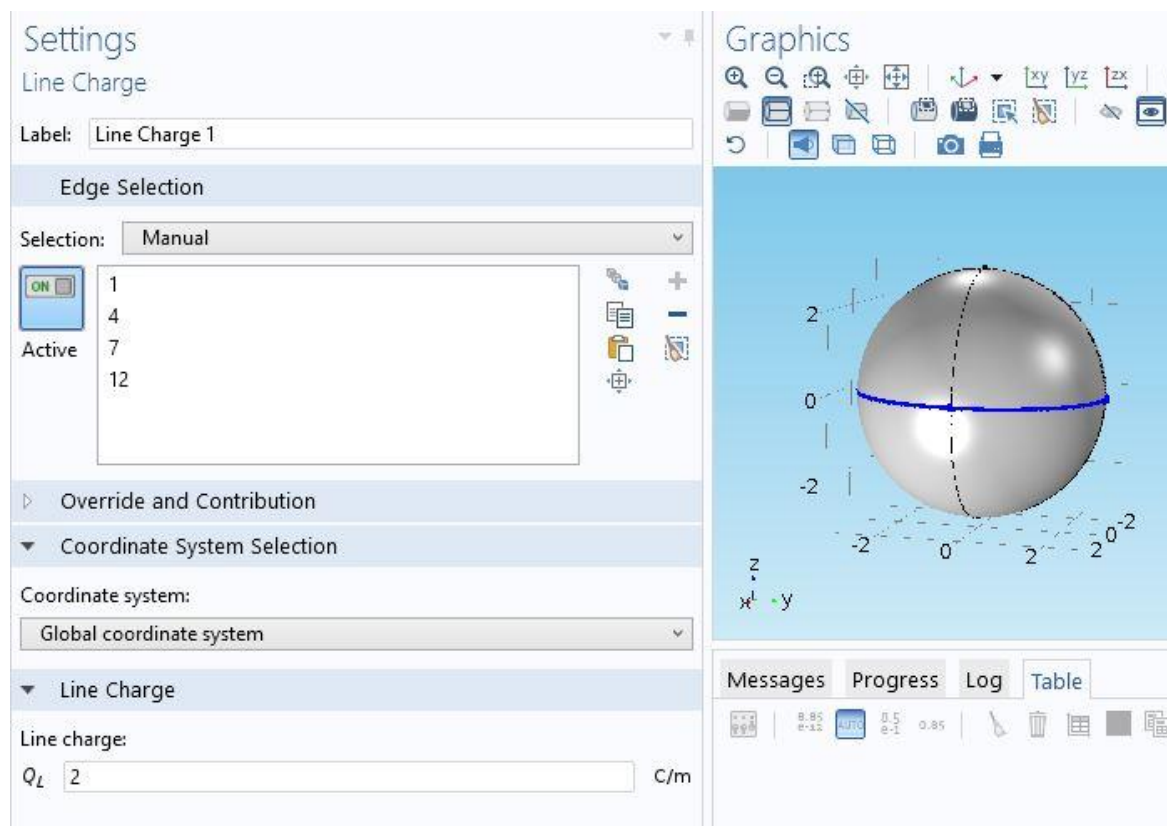
در این قسمت شما قادر خواهید بود کمیت های الکتریکی نظیر توزیع بار الکتریکی و پتانسیل الکتریکی را در اجسام مختلف تعیین نمایید. کمیت هایی که شما تعریف می کنید می تواند مقداری ثابت و یا تابعی بر حسب مختصات دستگاه کارتزین (x, y, z) باشند. شما قادرید با کلیک راست بر روی گزینه **Electrostatics** در منوی **Model Builder** که در هنگام ساخت **study** آن را اضافه نمودید، کمیت مورد نظر خود را انتخاب نمایید. توجه داشته باشید که برای ایجاد توزیع بار خطی و مقدار بار نقطه ای، نیاز دارید ماوس را بر روی گزینه های **Edges** و یا **Points** بیاورید. (شکل ۹)



شکل ۹

نکته مهم در هنگام ایجاد توزیع بار جدید این است که باید دقت کنید تمامی لبه ها و یا سطوحی را که می خواهید توزیع بار را به آن نسبت دهید انتخاب نموده باشید. (شکل ۱۰) گرافیک کامسول به گونه ای است که هر شکل را به تعدادی سطح افراز می کند و شما در صورتی که قصد دارید تمامی سطح شکلی را برای نسبت دادن ماده و یا کمیت الکتروستاتیک نسبت دهید، باید هر افراز سطح را جداگانه انتخاب نمایید. برای مثال، یک کره مانند شکل ۱۰ به هشت سطح افراز می شود. شما در پنجره Selection قادرید سطوح انتخاب شده خود را با شماره مربوطه آنان مشاهده فرمائید.

هم چنین، از آن جایی که شرایط مرزی در بی نهایت در محیط کامسول تعریف نشده است (با توجه به توضیحاتی که در قسمت مش بندی آورده خواهد شد، اگر این شرایط تعریف می شدند، نرم افزار به ساخت بی نهایت المان جزئی برای حل مسئله نیاز داشت!!) حتما پیش از انجام مش بندی، شرایط مرزی را برای محیط بسیار بزرگی که در قسمت **Materials** ساخته اید، مشخص نمایید. (پتانسیل صفر)

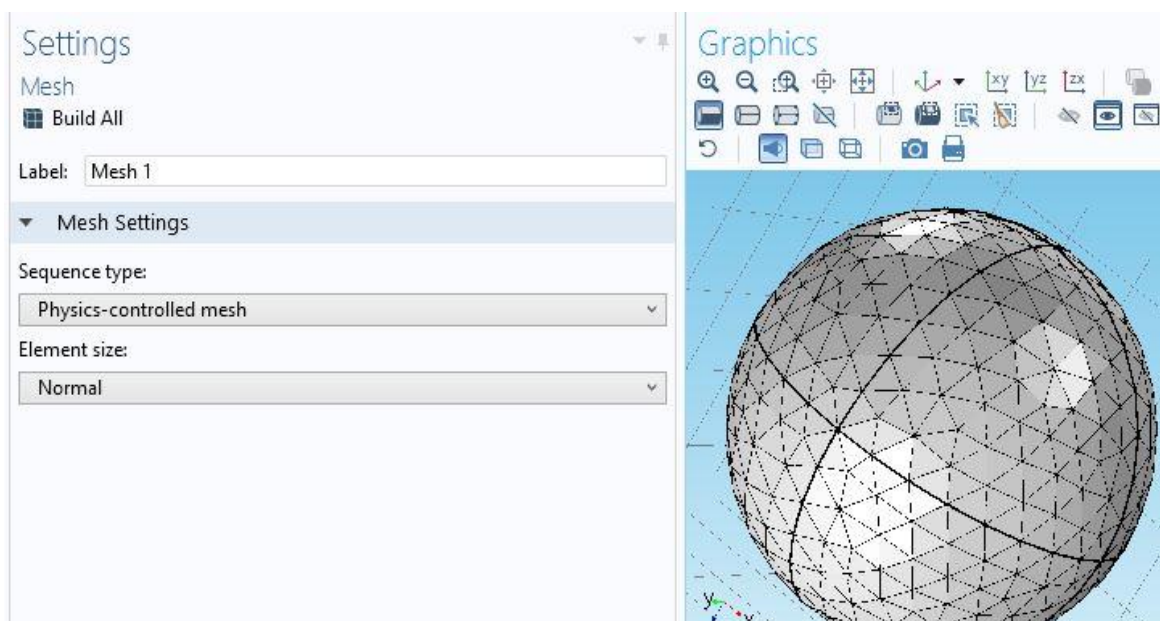


شکل ۱۰

مش بندی فضا

پس از ساخت اجسام و تعیین جنس و کمیت های الکتروستاتیکی آن ها، تنها گامی که برای حل مسئله پیش رو داریم، تعیین نوع مش بندی است. همان طور که در ابتدا توضیح داده شد، کامسول بر اساس روش FEM مسائل مختلف را حل می کند. این روش بر اساس محاسبه مشتق های جزئی در المان های سه بعدی مسئله را با تقریب بسیار بالایی حل می کند. بدیهتاً کاهش طول المان های جزئی و افزایش تعداد آن ها دقت حل مسئله را بالا می برد؛ ولی از سویی دیگر موجب افزایش زمان محاسبه توسط نرم افزار نیز می گردد. انتخاب نوع مش بندی کاملاً بر عهده کاربر است؛ ولی کاربر باید متوجه محدودیت های احتمالی سیستمی که از آن استفاده می کند، از جمله RAM پایین باشد. چرا که در صورتی که کاربر روی یک سیستم با RAM پایین مش بندی بسیار خوبی را اعمال کند، در هنگام مش بندی و یا study ممکن است با مشکلات سیستمی مواجه گردد. شکل ۱۱ نمونه ای از مش بندی به شیوه Normal را نشان می دهد. برای انجام مش بندی، پس از تعیین شیوه مش بندی بر روی گزینه Build All کلیک کنید.

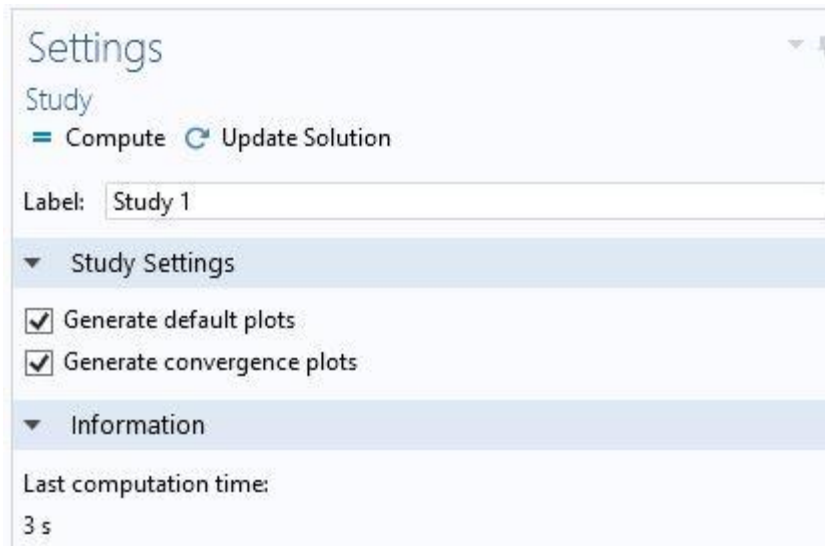
توجه نمائید که شما اگر Sequence type را از حالت Physics-Controlled Mesh بر روی گزینه User-Controlled Mesh تغییر دهید، می توانید جزئیات مش بندی را بر اساس تمایل خود تنظیم کنید. ولی معمولاً شما نیازی به این کار نخواهید داشت. لذا از همان گزینه Physics-Controlled Mesh استفاده نمائید.



شکل ۱۱

رسم نمودارها در کامسول

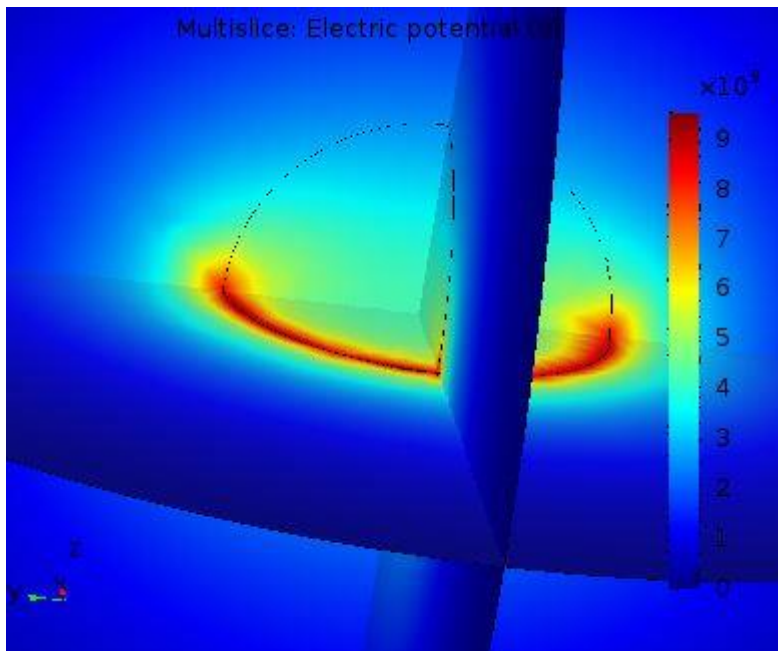
پس از ساخت مسئله، شما با انتخاب گزینه study از منوی Model Builder و کلیک بر روی گزینه Compute در منوی Settings ایجاد شده مطابق شکل ۱۲ مسئله حل شده را در اختیار دارید و تنها کاری که پس از این نیاز دارید انجام دهید رسم کمیت های خروجی مورد نظرتان بر روی نمودارهای یک بعدی، دو بعدی و یا سه بعدی می باشد. در این قسمت، ما مسئله توزیع بار خطی 0.1 C/m بر روی محیط دایره ای به شعاع ۳ متر را بعنوان یک مثال ساخته ایم، و حال قصد داریم رسم نمودارهای متفاوت این مسئله را آموزش دهیم.



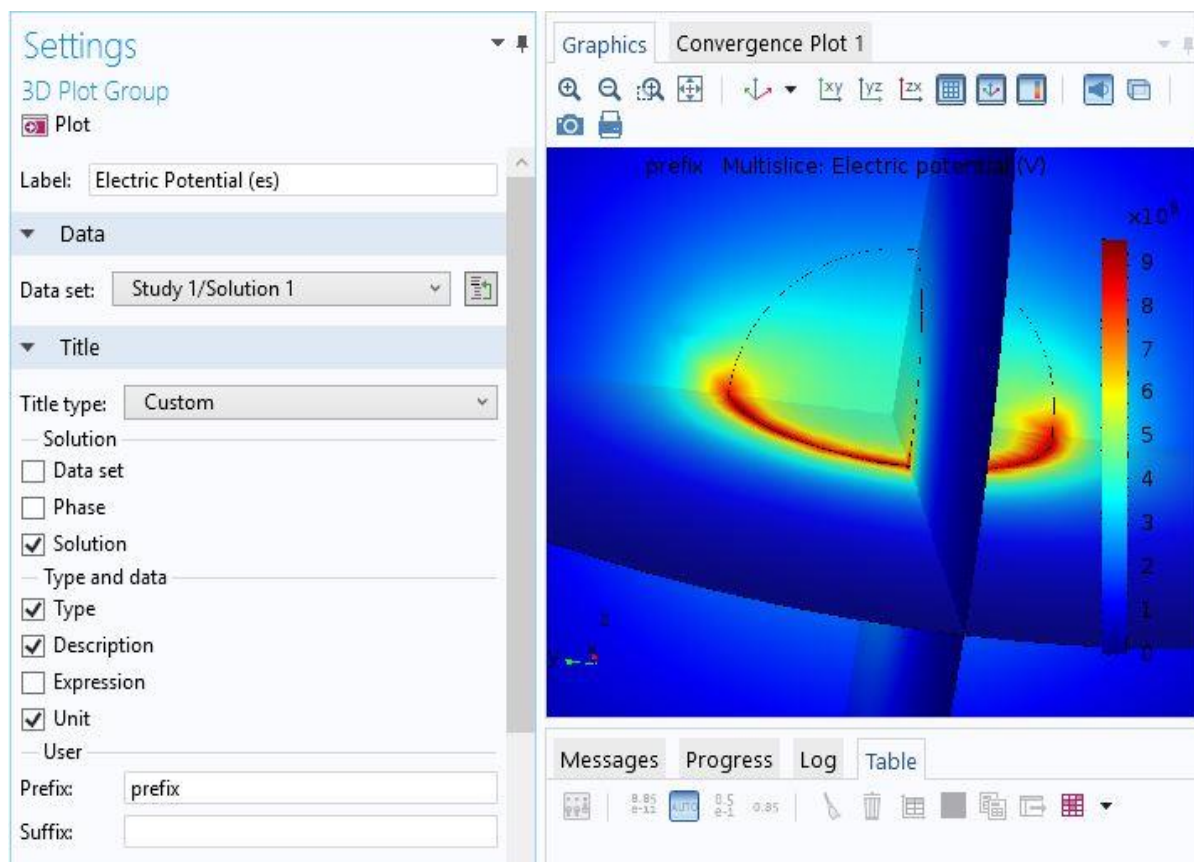
شکل ۱۲

تنظیم نمودار

شکل ۱۳ نمونه ای از نمودار پتانسیل الکتریکی مسئله در فضا را در فضای کامسول نشان می دهد. شیوه نمایش سه بعدی مطابق شکل به گونه ای انتخاب شده است که بتوان به کمک آن درک سه بعدی مطلوبی از کل نمودار - که بدیهتا در دو بعد به طور کامل قابل رسم نیست - کسب کرد. در این بخش توضیح مختصری در مورد legend، تیترو سایر مشخصات قابل تنظیم نمودارها داده خواهد شد.



شکل ۱۳



شکل ۱۴

مطابق شکل ۱۴، زیرمنوی Data که درباره آن در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد، منبع اطلاعاتی را می گیرد که بر اساس آن نمودار رسم شده است. (پیش فرض آن آخرین study صورت گرفته در کامسول است.) در زیرمنوی بعدی، title، عنوان نمودار قابل تنظیم است. اگر نوع عنوان (title type) اتوماتیک باشد، مطابق شکل ۱۳ یک عنوان پیش فرض بر روی نمودار قرار می گیرد. با تغییر این نوع به custom می توانید ترکیبی از نوع نمودار (در اینجا Multislice)، نام متغیر و علامت و واحد آن و یک عبارت پیش فرض که شما آن را تعیین می کنید را برای عنوان نمودار بسازید. با تغییر نوع به Manual نیز می توانید نام عنوان را کاملاً دستی و مطابق میل خود تعیین نمایید.

مطابق شکل ۱۵، در زیرمنوی Color Legend شما می توانید legend یا همان راهنمای نمودار را که مقادیر کمیت رسم شده بر حسب رنگ در نمودار را نشان می دهد حذف کنید یا موقعیت آن در نمودار را تنظیم نمایید.

در زیرمنوی Number Format نیز شما قادرید شیوه نمایش اعداد بر روی legend و محورها را مطابق میل خود تغییر دهید. (نمایش به صورت نماد علمی، نمایش با ارقام اعشاری،...)

▼ Color Legend

☒ Show legends

☐ Show maximum and minimum values

Position: Alternating ▼

▼ Number Format

☒ Manual color legend settings

Notation: Automatic ▼

☒ Use common exponent

☒ Show trailing zeros

Precision: 2

☒ Manual grid settings

Notation: Automatic ▼

☒ Use common exponent

☐ Show trailing zeros

Precision: 3

شکل ۱۵

هم چنین، مطابق شکل ۱۶ شما می توانید از طریق زیرمنوی Window Settings پنجره ای جدید با نام مشخص را تعریف کنید و سپس با کلیک بر روی گزینه plot در بالای منوی نمودار جدید در یک پنجره جدید رسم نمائید.

Settings

3D Plot Group

Plot

Label: Electric Potential (es)

▼ Data

Data set: Study 1/Solution 1

▶ Title

▶ Plot Settings

▶ Color Legend

▶ Number Format

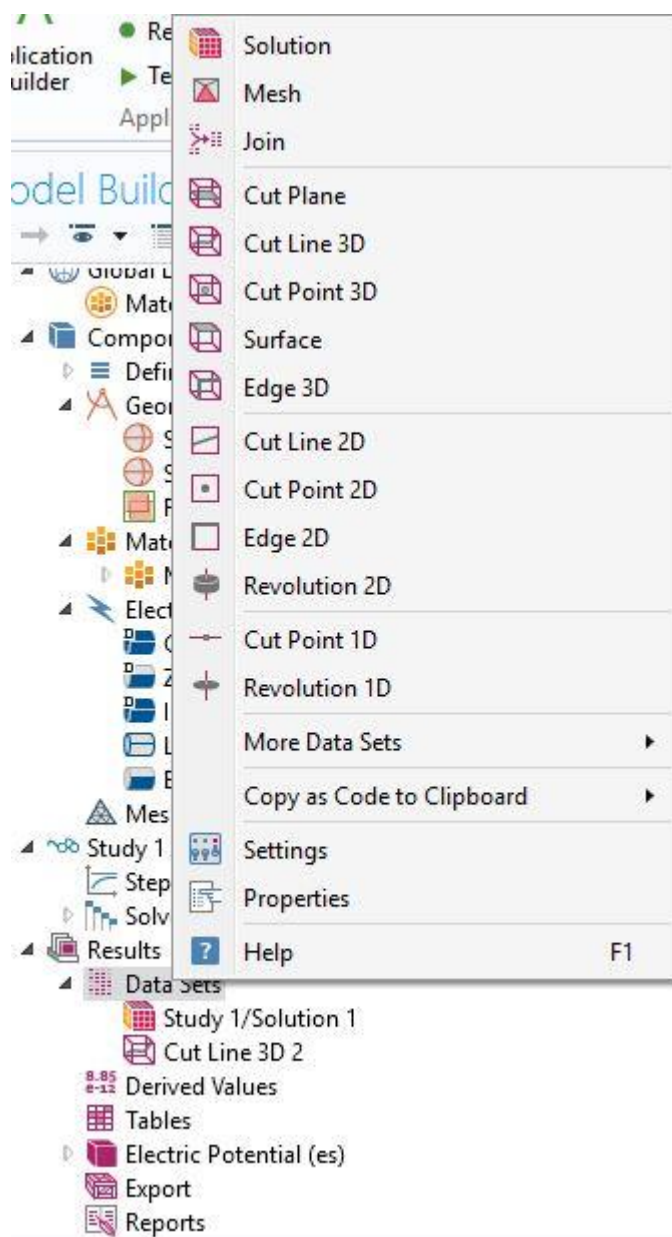
▼ Window Settings

Plot window: test

Window title: ☒ test

شکل ۱۶

محدوده های نمودار



برای رسم هر نمودار جدید، ابتدا باید محدوده مکانی را که می خواهیم در آن تغییرات یک کمیت را بررسی کنیم، تعیین کنیم. لذا نیاز به ایجاد Cut line و Cut Plane داریم. برای این کار، مطابق شکل ۱۷ ابتدا بر روی گزینه Data Sets کلیک راست کرده و از منوی باز شده گزینه مورد نظر را انتخاب می کنیم. کات لاین های دو بعدی در صفحه $z=0$ ایجاد می گردند؛ لذا شما با کات لاین ۳ بعدی راحت تر خواهید بود. در هر نمودار جدیدی که می خواهید ایجاد نمایید، کافیست این کات لاین یا کات پلین را به نمودار بدهید تا در آن محدوده نمودار مورد نظر شما را رسم کند.

Cut Line های سه بعدی به صورت یک پاره خط و با وارد کردن نقاط ابتدایی و انتهایی آن ها ایجاد می گردند. Cut Plane نیز می تواند به صورت یک صفحه موازی با یکی از صفحات اصلی مختصات ساخته شود؛ و یا با دادن سه نقطه متفاوت، صفحه یکتایی که از هر سه نقطه می گذرد به عنوان Cut Plane در نظر گرفته شود.

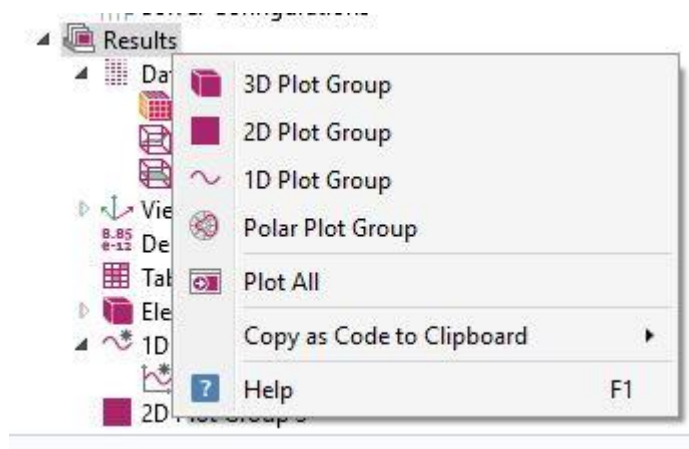
شکل ۱۷

ایجاد نمودار

پس از ایجاد یک محدوده نمودار، می توانید مطابق شکل ۱۸ یک نمودار یک، دو و یا سه بعدی ساخته و محدوده نمودار مورد نظر را در آن تعریف نمایید. همان طور که در پیش آورده شد، در منوی مربوط به نمودار جدید ایجاد شده و در زیرمنوی Data (شکل ۱۶) یک پنجره Data Set وجود دارد. این پنجره به طور پیش فرض روی کل

مسئله (study) قرار دارد؛ ولی شما می توانید آن را روی محدوده نموداری که از قبل تعریف نموده اید تنظیم نمایید. در این صورت، نمودار شما تنها در محدوده ای که تعریف نمودید رسم خواهد شد.

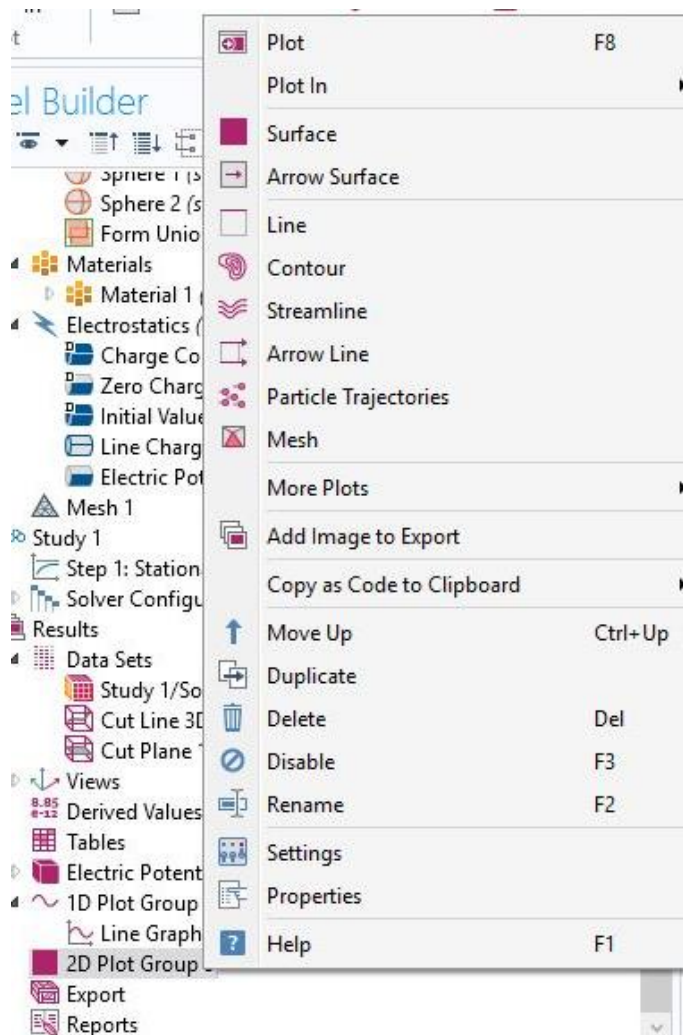
پس از انتخاب یکی از انواع نمودار مطابق شکل ۱۸، گزینه مربوط به آن نمودار در منوی Model Builder اضافه می شود. با کلیک راست بر روی گزینه ایجاد شده، می توان یک گراف به این نمودار نسبت داد که کمیت مورد نظر ما مطابق آن گراف در نمودار نشان داده شود. توضیحات درباره این گراف در ادامه آورده خواهند شد.



شکل ۱۸

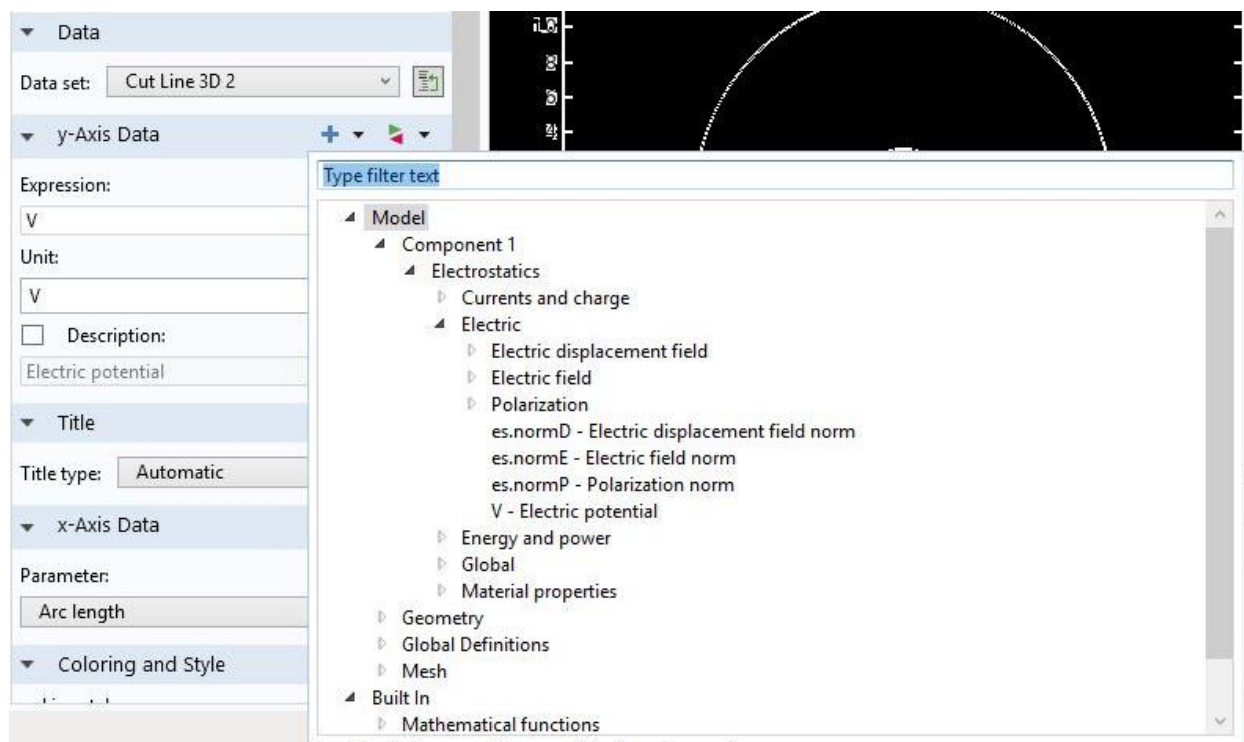
افزودن گراف به نمودار

مطابق شکل ۱۹ ما می توانیم انواع مختلفی از گراف های دو بعدی را با کلیک راست بر روی یک نمودار 2D Plot که مطابق قسمت قبل ساخته ایم، بسازیم. هم چنین، ما می توانیم با انتخاب گزینه Line Graph که در منوی نمودار 1D Plot وجود دارد، نمودار یک بعدی بسازیم. در این قسمت، ما جزئیات ساخت یک Line Graph و اضافه کردن آن به یک نمودار یک بعدی را شرح می دهیم. سپس، چند نمونه از گراف های دو بعدی را نیز نشان و توضیح می دهیم. ساخت این گراف ها، بسیار شبیه به گراف خطی می باشد. گراف های دوبعدی نظیر Arrow Line، Streamline و ... برای رسم کمیت ها در دو بعد، جهت خطوط میدان الکتریکی و مغناطیسی، سطوح هم پتانسیل و ... استفاده دارند.



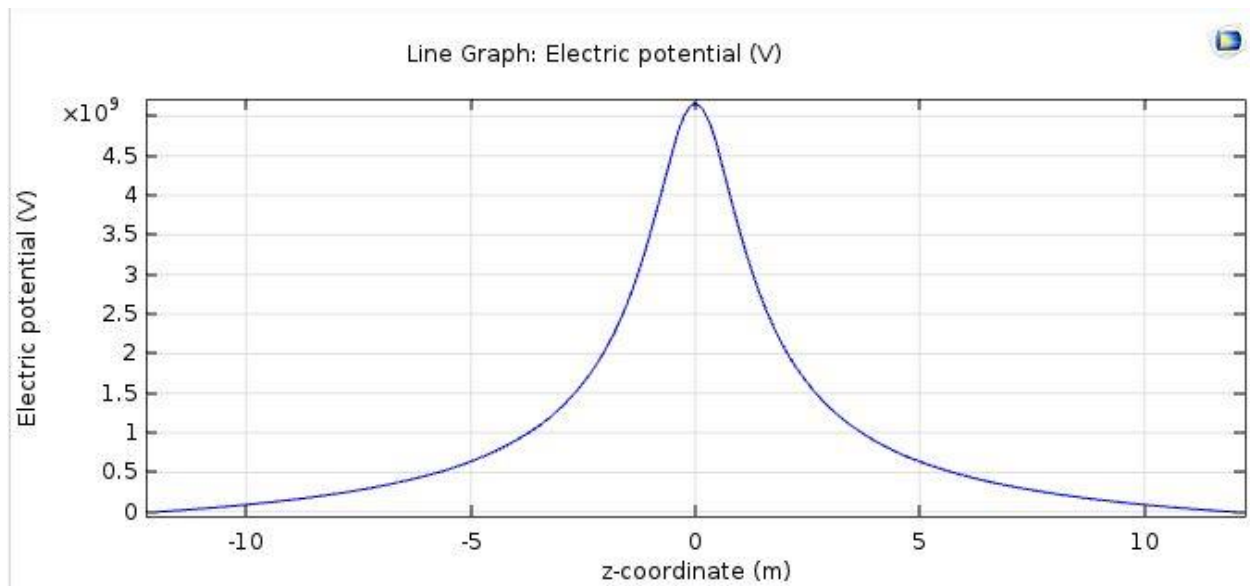
شکل ۱۹

برای رسم گراف خطی، همان طور که اشاره شد با کلیک بر روی نمودار یک بعدی مورد نظر و انتخاب **Line Graph** از منوی مورد نظر گراف مورد نظر ساخته می شود. هم چنین، از طریق منوی مربوط به گراف که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، علاوه بر تنظیم جزئیات گراف، می توانید کمیت مورد نظر خودتان را از منویی که با کلیک بر روی **دو فلش سبز و قرمز رنگ** در کنار منوی **y-axis Data** باز می شود انتخاب نمایید. در شکل ۲۰ شما کمیت هایی مانند اندازه میدان الکتریکی، مولفه های میدان در دستگاه مختصات کارتزین، قطبیدگی و جابجایی الکتریکی، پتانسیل التریکی و... را می توانید بیابید.



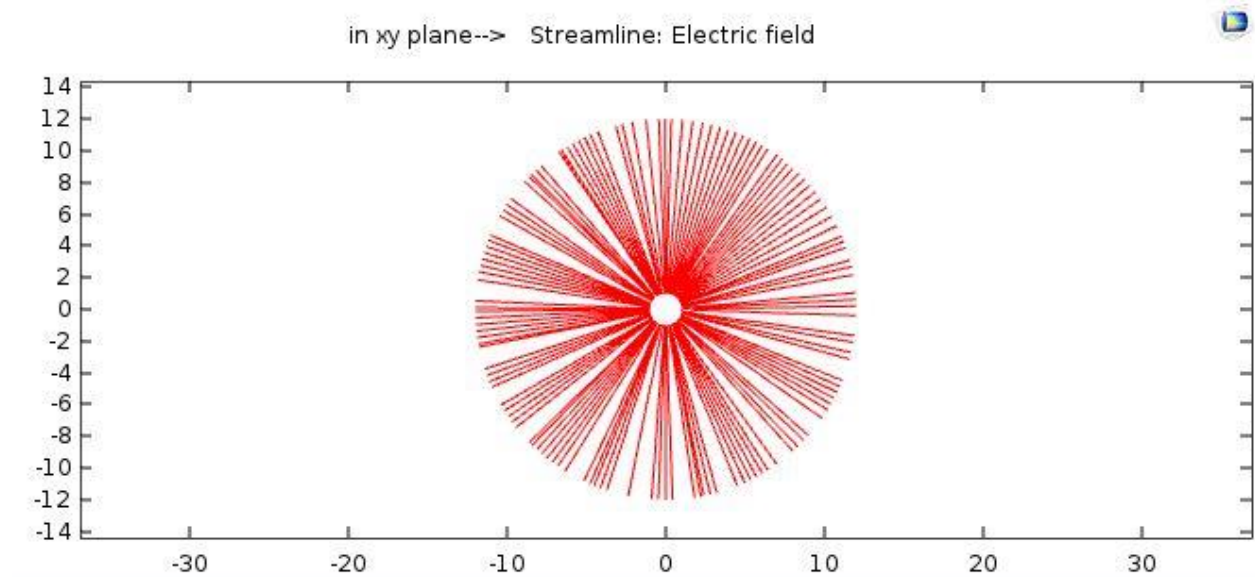
شکل ۲۰

در شکل ۲۱ در صفحه بعد، شما می توانید یک نمونه از نمودار پتانسیل الکتریکی بر حسب مکان را در مسئله اشاره شده ببینید. نکته دیگری که برای صحت نمودار خود حتما باید رعایت نمایید این است که در منوی **x-Axis Data** (شکل ۲۰) متغیر **Arc length** که در حقیقت طول پیموده شده از **Cut Line** شماست، به محور **x** ها نسبت داده شده است. شما باید پنجره **Parameter** در منوی **x-Axis Data** را بر روی گزینه **Expression** تنظیم نمایید تا به صورت دستی کمیت صحیح (در اینجا مقدار مختصه **z** دستگاه کارتزین) را به محور **x** ها نسبت دهید.

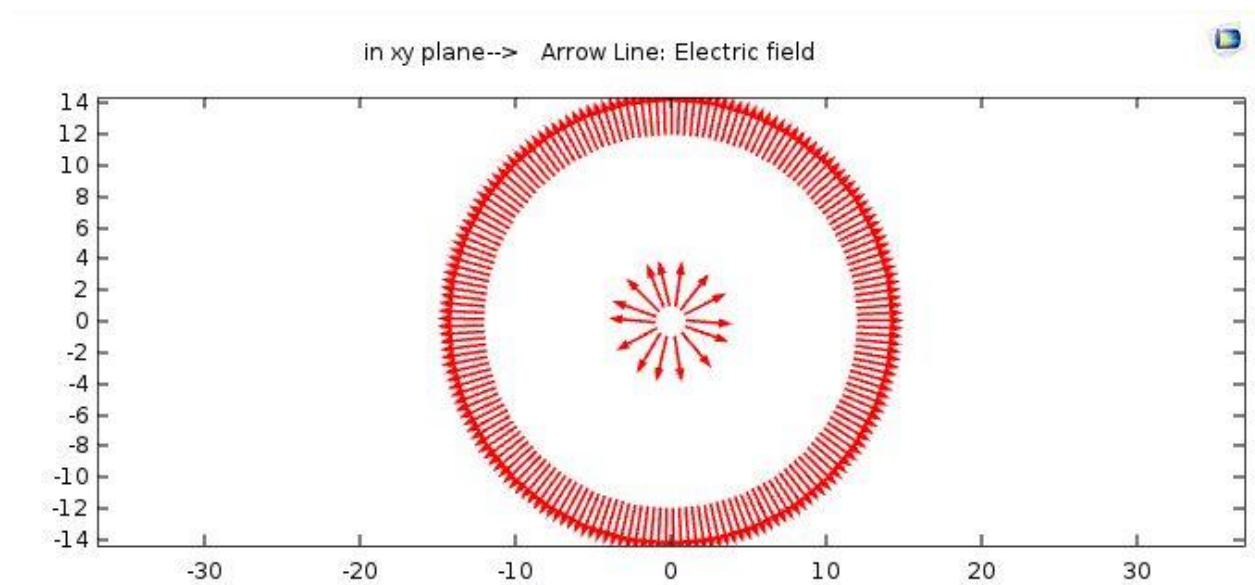


شکل ۲۱

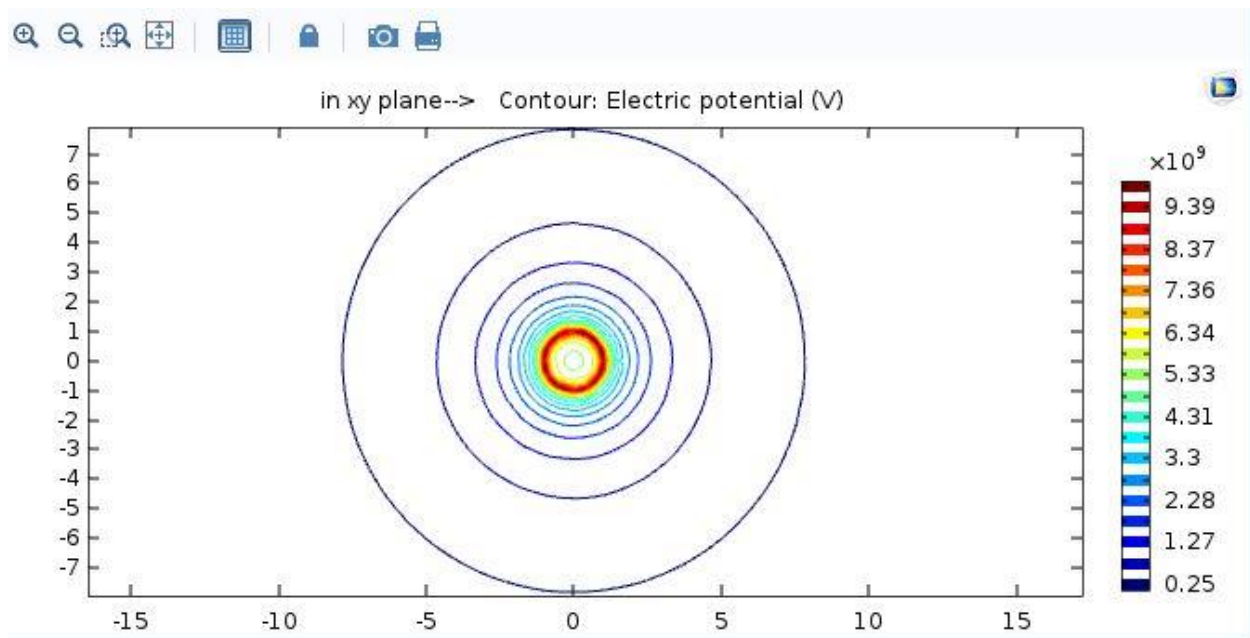
علاوه بر گراف خطی که ساده ترین گراف ممکن است، گراف های دو بعدی نیز می توانند حاوی اطلاعات بسیار مفیدی باشند. در شکل های ۲۲ تا ۲۴، نمونه هایی از گراف های Streamline، Arrow Surface و Contour آورده شده است. گراف های Streamline و Arrow Surface برای رسم خطوط میدان کاربرد دارند. (Streamline خطوط را به صورت شار عبوری رسم می کند، در حالی که Arrow Surface خطوط میدان را به صورت برداری رسم می کند). گراف Contour نیز برای رسم منحنی های هم پتانسیل در سطوح دو بعدی بسیار کاراست.



شکل ۲۲



شکل ۲۳



شکل ۲۴