

# معماری

طراحی و شبیه سازی

پروژه های مهندسی مواد با

COMSOL

مهندسی یار

مؤلفان

مهندس بهروز باقری

دکتر محمود عباسی  
(هیأت علمی دانشگاه کاشان)



نشر دانشگاهی کیان  
Kian Publication

سرشناسه	باقری، بهروز، ۱۳۶۳.
عنوان و نام پدیدآور	طراحی و شبیه سازی پروژه های مهندسی مواد با COMSOL / مولفان بهروز باقری، محمود عباسی.
مشخصات نشر	تهران: انتشارات دانشگاهی کیان، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	۸۰۷ص: مصور، جدول.
فروست	مهندس یار.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۳۰۷-۱۳۵-۳
وضعیت فهرست نویسی	فیپا
موضوع	مهندسی مواد - داده پردازی.
موضوع	نرم افزار کامسول مالتی فیزیکس.
رده بندی کنگره	۱۳۹۵ ط۲/ب۲/۳۰۳ TA.
رده بندی دیویی	۶۲۰/۱۱۰۲۸۵
شماره کتابشناسی ملی	۴۲۱۷۹۳۶



## انتشارات دانشگاهی کیان

نام کتاب : طراحی و شبیه سازی پروژه های مهندسی مواد با COMSOL

مولفان : بهروز باقری و محمود عباسی

ناظر فنی : بهیمان عمرانی

ویراستار : لیلا رفیعی

گروه تولید : علی محمودی و فاطمه علی اکبری

صفحه آرا : مرضیه امانت

طراح جلد : شیلان هوشیاری

چاپ اول : ۱۳۹۶

تیراژ : ۵۰۰

چاپ : ستاره سبز

صحافی : نمونه

شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۳۰۷-۱۳۵-۳



خرید اینترنتی آسان از:

[www.kianpub.com](http://www.kianpub.com)

بر اساس قانون حقوق مولفان و مصنفان، کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب به طور انحصاری به نشر دانشگاهی کیان تعلق دارد و هرگونه استفاده و برداشت از محتوای این اثر به هر شکلی اعم از چاپ، کپی، اسکن، لوح فشرده، نشر الکترونیک و اینترنتی یا به صورت هرگونه فایل رایانه ای، بدون مجوز رسمی ناشر ممنوع و حرام شرعی است و پیگرد قانونی دارد.



kianpublication

برای دریافت اخبار و اطلاعات مفید و شرکت در قرعه کشی، ما را در این شبکه ها دنبال کنید.

## سخن ناشر

بشر قرن ۲۱ بی‌وقفه و به سرعت در تکاپوی توسعه‌ی همه‌جانبه‌ی مرزهای دانش در تمامی حوزه‌هاست و در این مسیر از تلاش باز نمی‌ایستد؛ چرا که اثرگذارترین ابزار برتری‌جویی در فضای رقابتی امروز را دستیابی به فناوری‌های پیشرفته، علوم نوین و گسترش صنایع پیشرفته، کارآمد و منحصربه‌فرد یافته است. براساس چنین نگرشی است که رشد سریع علوم و فنون کاربردی در گستره‌ی عظیمی از زمینه‌های تحقیقاتی در دستورکار بازی‌گردانان نظام جهانی قرار گرفته است.

در شرایط ویژه و پیچیده‌ای که کشور ما با آن روبه‌روست، گام برداشتن در مسیر پیشرفت و رشد و توسعه‌ی داخلی و نیز کسب جایگاه درخور و تاثیرگذار در عرصه‌ی بین‌المللی منوط به اصلاح دید کلان نسبت به توسعه‌ی علمی و پژوهشی با هدف ارتقای شاخص‌های پیشرفت و توسعه‌ی کشور است و این جز با حمایت ویژه و مستمر از بخش‌های دانشگاهی و پژوهشی امکان‌پذیر نخواهد بود.

**انتشارات دانشگاهی کیان**، به عنوان یکی از بسترهای مستعد تحقق بومی‌سازی فناوری‌های پیشرفته (High Technology) قصد دارد با استفاده از همت بلند متخصصان صنعتی و دانشگاهی کشور و با استفاده از تجارب خود در زمینه چاپ و نشر بیش از سیصد عنوان کتاب‌های فنی و مهندسی، بخشی هرچند کوچک از این وظیفه‌ی خطیر را به انجام برساند.

**مجموعه کتاب‌های مهندسیار**، با هدف دسترسی دانشجویان، اساتید، پژوهشگران و علاقمندان به دانش فنی و تخصص روز دنیا در حوزه‌ی فنی و مهندسی با نگاه ویژه‌ای تدوین شده است. در این آثار سعی شده است تا تجارب و دستاوردهای علمی و پژوهشی مولفان به نام و فرهیخته‌ی کشور، به شیوه‌ای آموزشی و استاندارد و با بالاترین کیفیت فنی و محتوایی، به مخاطبان علاقمند انتقال یابد. این مجموعه، گستره‌ی وسیعی از علوم فنی و مهندسی را دربر می‌گیرد و تلاش بر آن است تا در آینده‌ی نزدیک در سایه‌ی الطاف الهی و با تکیه بر دانش و تخصص بومی، عناوین کاملی از کتاب‌های کاربردی و ارزشمند در این مجموعه پوشش داده شود.

انتشارات دانشگاهی کیان در این مسیر دست یکایک اساتید و پژوهشگران حوزه‌ی فنی و مهندسی را به گرمی می‌فشارد و از پیشنهادهای ارزنده‌ی **تالیف و ترجمه** در این چارچوب استقبال می‌کند و از مخاطبان این مجموعه خواهشمند است نقدها و نظرهای سازنده‌ی خود را از طریق پل‌های ارتباطی موجود در جهت ارتقای محتوایی و کیفی آثار مطرح نمایند.

نشر دانشگاهی کیان

[www.kianpub.com](http://www.kianpub.com)

[info@kianpub.com](mailto:info@kianpub.com)

## درباره ی کتاب

### چرا کامسول؟

استفاده از نرم افزار قدرتمند COMSOL، به شکل چشمگیری میان دانشجویان، علاقه مندان و متخصصان شبیه سازی رو به افزایش است. این شبیه ساز که قادر به تحلیل مسایل متنوع حوزه های مختلفی از فنی و مهندسی گرفته تا علوم پایه و محض است، علاوه بر امکانات رایج سایر نرم افزارهای شبیه سازی بر پایه المان محدود، مانند کاربری آسان، امکانات درون برنامه ای و گرافیک قدرتمند، پشتیبانی از فایل های مدل متنوع ورودی و نیز امکان مدل سازی و تحلیل در یک، دو و سه بعد در شرایط پایدار و حتی تحلیل دینامیک (وابسته به زمان)، مزایای بسیار ارزشمند و ویژه ای نیز در دسترس کاربر قرار می دهد:

❖ **کامسول یک نرم افزار تخصصی میان رشته ای است.** بسیاری از مسایل و مدل های مورد مطالعه تنها به یک حوزه محدود و مربوط نمی شوند و تجزیه و تحلیل آنها نیازمند بررسی ابعاد مختلف آنهاست. به طور مثال در شبیه سازی یک سیستم مکانیکی که از الکتریسیته به عنوان منبع انرژی استفاده می کند، هر دو حوزه مکانیک و برق در حل مساله و درک شرایط آن دخیل هستند و باید به نحو مطلوب در تجزیه و تحلیل منظور شوند. کامسول از ماژول های بسیار متنوعی شامل حوزه های برق، فیزیک، شیمی، مکانیک، عمران، پزشکی و زیرمجموعه های آنها، برای تحلیل انواع مسایل بهره می گیرد که ابتدا مساله بر مبنای این ماژول ها تعریف و مدل می شود و سپس با برقراری ارتباط صحیح میان این ماژول ها و اعمال شرایط مرزی و اولیه مناسب، تحلیل جامع و دقیقی از مساله انجام می شود.

❖ **کامسول، چندفیزیکی است.** همان طور که گفته شد، این نرم افزار قادر به تحلیل مساله براساس تعریف ماژول های مختلف است. این ویژگی سبب می شود که بتوان فیزیک های مختلف را با استفاده از رابط های فیزیکی در یک مدل کامسول تعریف کرد؛ به طور مثال می توان برای یک مساله، به طور همزمان شرایط انتقال حرارت، الکتریسیته و سیالات را با استفاده از رابط های فیزیکی مربوطه، تعریف کرد. با استفاده از این خاصیت چندفیزیکی (Multiphysics) این نرم افزار قادر به درک دقیق مساله و تولید تحلیل مناسب برای آن خواهد بود. بسیاری از نرم افزارهای موجود از این امکان ارزشمند بی بهره اند و درکی از مساله ندارند، اما کامسول مدل را می فهمد.

❖ **با نرم افزار قدرتمند MATLAB ارتباط مستقیم دارد.** در تمامی نرم افزارهای شبیه ساز قدرتمند به نحوی قابلیت کدنویسی، پیش بینی شده است؛ زیرا امکان پوشش تمامی شرایط و قواعد خاص حاکم بر مسایل، وجود ندارد. کدنویسی در نرم افزارهای شبیه ساز، اغلب کار سختی است، اما نه در کامسول! متلب، به عنوان یکی از قوی ترین

نرم افزارهای ریاضی، امروزه در دسترس کاربران بیش از ۱۳ رشته تحصیلی و زمینه پژوهشی، قرار دارد. بسیار ارزشمند است که نرم افزار نام آشنای متلب، مدل های کامسول را پشتیبانی می کند و قابلیت استفاده از موتور محاسباتی خود را کاملاً در اختیار کامسول قرار می دهد.

### نحوه مطالعه کتاب

این کتاب به دو بخش اساسی تقسیم شده که در بخش اول، نرم افزار کامسول و قابلیت های آن به طور کامل معرفی شده است. در این بخش در فصل ابتدایی، مبانی نرم افزار شامل ماژول های مهم و کاربردی به همراه رابط های فیزیکی مورد استفاده و نیز معادلات پایه ای موجود در آنها ارایه شده است. همان طور که گفته شد، قابلیت ویژه و کاربردی این نرم افزار، چندفیزیکی بودن آن است و بسیاری از مسایل و مدل ها با بیش از یک فیزیک قابل بیان و تحلیل اند. پس اگر ماژول هایی را می بینید که با رشته یا تخصص شما سازگار نیستند، تعجب نکنید. آنها را حداقل به طور سطحی مطالعه کنید؛ زیرا ممکن است لازم باشد در مدل های خود از آنها به نحوی استفاده نمایید.

در فصل دوم از بخش اول، امکانات و ابزارهای مختلف نرم افزار برای تولید و تعریف مدل با استفاده از رابط های فیزیکی موردنظر و نیز نحوه اختصاص ماده مدل و اعمال شرایط مرزی (و شاید اولیه) تا مرحله اجرای محاسبات و گرفتن نتایج و خروجی های گرافیکی مطلوب، به طور کامل مطرح و توصیف شده اند. این فصل را با دقت بخوانید تا در تولید و تعریف مدل خود و نیز تحلیل آن با مشکل روبه رو نشوید. در فصل سوم از این بخش نیز نحوه ارتباط این نرم افزار با MATLAB به طور دقیق و کامل مطرح شده است. توجه داشته باشید که این سه فصل را باید بر اساس ترتیب ارایه آنها مطالعه کنید.

بخش دوم این کتاب، شامل تمرین ها و پروژه های کاربردی متنوع است که متناسب با رشته تحصیلی یا پژوهشی شما انتخاب شده است. در ابتدای هر یک از این تمرین ها، صورت مساله مطرح شده و پس از آن نحوه ی پیاده سازی مساله در کامسول و تجزیه و تحلیل آن به صورت مرحله به مرحله و کامل ارایه گردیده است. از آنجایی که هر یک از تمرین ها به صورت مستقل مطرح شده و مورد تحلیل قرار گرفته، نیازی به مطالعه پیوسته این بخش نخواهید داشت و می توانید تنها به سراغ تمرین های مورد نظر خود که با مورد مطالعاتی شما سازگار است، بروید؛ اما به خاطر داشته باشید که باید پیش از مراجعه به این بخش و استفاده از تمرین ها، سه فصل بخش اول را خوب مطالعه کرده باشید. در ضمن، تمامی فایل های مورد نیاز این بخش، در DVD همراه کتاب موجود است.

انتشارات دانشگاهی کیان علاقه مند است بازخوردهای ارزنده شما مخاطب گرامی را در مورد این اثر و سایر آثار خود دریافت کند. از آنجایی که هیچ کتابی خالی از اشکال نیست، خواهشمند است نظرها، پیشنهادات و نیز نقدهای ارزشمند خود را از طریق آدرس های ارتباطی موجود به اطلاع نشر برسانید تا در نسخه های آتی مورد بازبینی و اصلاح قرار گیرند.

## فهرست مطالب

## بخش اول: آشنایی با نرم افزار COMSOL

## فصل اول: آشنایی با نرم افزار COMSOL

- ۱-۱. مقدمه ..... ۱۳
- ۲-۱. ماژول های نرم افزار ..... ۱۶

## فصل دوم: آشنایی با محیط نرم افزار COMSOL

- ۱-۲. ابزارها و سرببرگ های مورد استفاده در نرم افزار ..... ۶۶
- ۲-۲. شاخه ها و زیرشاخه های Model Builder ..... ۷۱
- ۳-۲. معرفی ابزارهای مورد نیاز در بخش مدل سازی ..... ۷۴
- ۴-۲. معرفی کتابخانه مواد ..... ۸۷
- ۵-۲. عملیات مش بندی ..... ۱۱۱
- ۶-۲. مرحله تحلیل و بررسی نتایج ..... ۱۲۶
- ۷-۲. خطاها و هشدارها ..... ۱۳۵

## فصل سوم: اتصال کامسول به MATLAB توسط LiveLink

- ۱-۳. اقدامات اولیه برای برقراری اتصال LiveLink for MATLAB ..... ۱۴۰
- ۲-۳. به کارگیری MATLAB در COMSOL ..... ۱۴۱
- ۳-۳. فراخوانی یک تابع MATLAB به درون یک مدل COMSOL ..... ۱۴۲
- ۴-۳. ایجاد مدل با کمک متلب ..... ۱۵۴
- ۵-۳. کار با مدل کامسول در متلب ..... ۱۸۱

## بخش دوم: تمرین های کاربردی

- تمرین ۱: تحلیل و بررسی روش حفاظت آندی به عنوان یکی از روش های جلوگیری از ... ۱۸۷
- تمرین ۲: آنالیز خوردگی اتمسفری ..... ۲۰۱
- تمرین ۳: آنالیز حفاظت کاتدی فولاد در سازه بتنی ..... ۲۱۹
- تمرین ۴: آنالیز خوردگی حفره ای آهن در محلول اسید استیک و استات سدیم ..... ۲۳۵
- تمرین ۵: آنالیز میخ گالوانیزه ..... ۲۵۳
- تمرین ۶: آنالیز خوردگی گالوانیک با تغییر شکل الکترو ..... ۲۶۹
- تمرین ۷: آنالیز خوردگی CO<sub>2</sub> در لوله های فولادی ..... ۲۸۱
- تمرین ۸: آنالیز خوردگی موضعی ..... ۲۹۵
- تمرین ۹: آنالیز حفاظت خوردگی در بدنه کشتی ..... ۳۰۹
- تمرین ۱۰: آنالیز حفاظت خوردگی سکوی نفتی با استفاده از آندهای فداشونده ..... ۳۲۵
- تمرین ۱۱: آنالیز عملیات پوشش دهی به روش آب کاری الکتریکی در اتومبیل ..... ۳۳۵
- تمرین ۱۲: آنالیز شکست ناشی از سیکل خستگی در فریم عینک ..... ۳۵۱

## فهرست مطالب

تمرین ۱۳: آنالیز انتقال حرارت انیزوتروپی در میان کامپوزیت الیاف کربنی.....	۳۶۳
تمرین ۱۴: آنالیز اثر جریان همرفتی مارانگونی (Marangoni).....	۳۷۹
تمرین ۱۵: آنالیز تغییر فاز.....	۳۸۹
تمرین ۱۶: آنالیز فرایند تغییر جبهه ذوب سرب.....	۴۰۱
تمرین ۱۷: آنالیز کاوش مغناطیسی برای رسوبات سنگ آهن.....	۴۱۳
تمرین ۱۸: آنالیز تاثیر لعابکاری بر روی رفتار حرارتی پنجره.....	۴۲۷
تمرین ۱۹: آنالیز ترانسفورماتور پیزوالکتریک کامپوزیتی.....	۴۴۳
تمرین ۲۰: آنالیز مبدل پیزوسرامیک لوله‌ای شکل.....	۴۵۵
تمرین ۲۱: آنالیز یک کریستال فوتونیک.....	۴۶۹
تمرین ۲۲: آنالیز شیمی سطح در پوشش‌دهی.....	۴۷۹
تمرین ۲۳: آنالیز خزش القایی حرارتی.....	۴۹۷
تمرین ۲۴: آنالیز جریان مولکولی در سیستم کاشت یونی.....	۵۰۷
تمرین ۲۵: آنالیز تنش‌های حرارتی در یک کامپوزیت.....	۵۱۹
تمرین ۲۶: آنالیز انجماد در فلزات.....	۵۲۹
تمرین ۲۷: آنالیز توری پراش.....	۵۴۳
تمرین ۲۸: آنالیز لنز مغناطیسی.....	۵۷۱
تمرین ۲۹: آنالیز ریخته‌گری پیوسته.....	۵۸۷
تمرین ۳۰: آنالیز لغزش در ورق.....	۶۰۹
تمرین ۳۱: آنالیز الاستیک - پلاستیک ورق حاوی سوراخ.....	۶۱۷
تمرین ۳۲: آنالیز لوله تحت فشار.....	۶۳۱
تمرین ۳۳: آنالیز اکستروژن آلومینیوم.....	۶۴۳
تمرین ۳۴: آنالیز رسوب‌دهی شیمیایی بخار تحت خلأ.....	۶۶۳
تمرین ۳۵: آنالیز پولیش الکتروشیمیایی.....	۶۷۷
تمرین ۳۶: آنالیز همرفت Marangoni.....	۶۸۵
تمرین ۳۷: آنالیز الگوی پراش.....	۶۹۵
تمرین ۳۸: حرارت‌دهی ویفر سیلیکونی با لیزر.....	۷۰۱
تمرین ۳۹: آنالیز آبکاری زینتی.....	۷۱۳
تمرین ۴۰: آنالیز رسوب‌دهی مس در Trench.....	۷۲۳
تمرین ۴۱: آنالیز سختی در مهارکننده‌ی دوگوشه‌ای دکل مخابرات.....	۷۲۹
تمرین ۴۲: آنالیز پیوستگی سیکل در خستگی.....	۷۴۹
تمرین ۴۳: آنالیز پاسخ خستگی به اعمال نیروی غیرتناسبی.....	۷۶۱
پیوست ۱: لیستی از سطح مقطع‌های نرم‌افزار.....	۷۷۷
پیوست ۲: جزئیات تکمیلی در مورد محیط کار نرم‌افزار COMSOL.....	۷۸۵
پیوست ۳: آشنایی با نقش متغیرها، ثابت‌ها و عملگرهای نرم‌افزار.....	۷۹۹



# بخش اول



آشنایی با نرم افزار COMSOL



## فصل

# آشنایی با نرم افزار COMSOL

### ۱-۱. مقدمه

نرم افزار Comsol یکی از قدرتمندترین نرم افزارها در زمینه المان محدود<sup>۱</sup> است که قادر به پاسخ گویی و تحلیل مسایل گوناگون در زمینه های مختلف علمی و مهندسی می باشد. این نرم افزار، محیط قدرتمندی را شامل تمام ابزار و امکانات موردنظر برای انجام عملیات مدل سازی، مش بندی، پردازش و پس پردازش برای کاربر فراهم می کند.

این نرم افزار قابلیت وارد کردن هندسه های موردنظر با استفاده از داده های CAD<sup>۲</sup> با فرمت های Parasolid، Step، ACIS، SAT، IGES و امثال آنها را دارد. همچنین، وارد کردن فایل هایی با پشتیبانی VDA-FS، Autodesk Inventor، Pro/Engineer، CATIA v4 و CATIA v5 در این نرم افزار امکان پذیر است. در این نرم افزار مدل های فیزیکی مختلفی به صورت پیش فرض جهت بررسی انواع مسایل در اختیار کاربر قرار دارد. همچنین، در مواردی که مدل سیستم مورد بررسی در

---

1. Finite Element Method (FEM)

2. Computer Aided Design & Drafting



پیش فرض های نرم افزار وجود نداشته باشد، امکان وارد نمودن مدل جدید برای کاربر فراهم است. از دیگر ویژگی های برجسته این نرم افزار می توان به امکان بررسی همزمان چند مدل که بسیار در سیستم های مهندسی پر کاربرد است، اشاره کرد.

به طور کلی، اساس کار نرم افزار Comsol، بر پایه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی<sup>۱</sup> استوار است. در این شرایط نرم افزار مدل های مختلف را با کمیت های فیزیکی مربوط به آنها مورد بررسی قرار می دهد. کاربر می تواند این متغیرها، تعاریف و اعداد را به صورت مستقیم به ناحیه مربوط به جسم ها، مرزها، لبه ها و گره هایی که مستقل از مش هستند، اعمال کند. پس از انجام این عملیات، نرم افزار شروع به جمع آوری یک دستگاه از PDE های می کند که به وسیله خود مدل در آن تعریف شده است.

نرم افزار Comsol همانند دیگر نرم افزارهای المان محدود، دارای رابط گرافیکی کاربر<sup>۲</sup> است که به ارتباط کاربر برای مدل سازی در این نرم افزار کمک می کند. با استفاده از رابط فیزیکی می توانید تحلیل های مختلف را به راحتی انجام دهید:

◀ آنالیزهای استاتیکی و وابسته به زمان؛

◀ آنالیزهای خطی و غیرخطی؛

◀ آنالیزهای پاسخ فرکانسی<sup>۳</sup>، مودال و فرکانس ویژه.

در هنگام تحلیل یک مساله، نرم افزار با استفاده از یک سری ابزارهای پیشرفته عددی، مراحل تحلیل را انجام می دهد. نرم افزار Comsol مراحل مختلف تحلیل را که شامل مراحل طراحی، تعریف خواص، مش بندی و بارگذاری و شرایط مرزی است در حین تحلیل، فراخوانی و بارگذاری می کند. فرایند حل همزمان معادلات حاکم بر مدل به طور کامل، موازی انجام می شود. حل کننده تفکیکی<sup>۴</sup> با یک واسطه آسان اجازه کنترل فرایند و حل را برای کاهش میزان حافظه مورد نیاز و افزایش پایداری در مسایل کوپل شده فراهم می سازد. همچنین، شما می توانید از حل کننده تفکیکی برای دادن حدس اولیه مناسب در هنگام حل مسایل غیرخطی درجه بالا استفاده کنید و یا با استفاده از تابع حداقل مربعات یا تفاضل مربعات GLS، کارایی حل کننده تکراری را برای مسایل جریان های غیرتراکم پذیر، غیرهمدمای و کم تراکم پذیر به طور چشمگیری افزایش دهید.

1. Partial Differential Equations (PDEs)

2. Graphical User Interface

3. Eigenfrequency

4. Segregated Solver

در مرحله پس از پردازش و بررسی نتایج، امکان رسم نمودارهای مختلف فراهم است. علاوه بر ویژگی‌های موجود برای انواع نمودارها و نقشه‌ها، در منوی پس پردازش امکانات دیگری شامل محاسبات مربوط به خصوصیات هندسی مانند سطح، حجم، مرکز جرم و مواردی از این دست نیز اضافه شده است.

برخی محاسبات فنی و مهندسی مانند امکانات پردازش بر نتایج آزمایش‌هایی مانند میانگین، خطا، پردازش نمودار مانند مساحت یا حجم زیر نمودار و موارد دیگر نیز امکان پذیر است. کاربر می‌تواند از نرم افزار Comsol در زمینه‌های مختلف علمی و مهندسی استفاده کند؛ برخی از این موارد عبارت‌اند از:

- ◀ آکوستیک؛
- ◀ علوم زیستی<sup>۱</sup>؛
- ◀ واکنش‌های شیمیایی؛
- ◀ خوردگی و حفاظت در مقابل خوردگی؛
- ◀ نفوذ<sup>۲</sup>؛
- ◀ الکتروشیمی؛
- ◀ الکترومغناطیس؛
- ◀ آنالیزهای خستگی؛
- ◀ دینامیک سیالات؛
- ◀ پیل‌های سوختی و الکتروشیمی؛
- ◀ ژئوفیزیک؛
- ◀ انتقال حرارت؛
- ◀ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی<sup>۳</sup>؛
- ◀ میکروسیالات<sup>۴</sup>؛
- ◀ مهندسی ماکروویو<sup>۵</sup>؛
- ◀ اپتیک؛
- ◀ ردگیری ذره؛

- 
1. Bioscience
  2. Diffusion
  3. Microelectromechanical systems (MEMS)
  4. Microfluidic
  5. Microwave engineering



فتونیک؛

جریان در داخل مواد متخلخل؛

فیزیک پلاسما؛

مکانیک کوانتوم؛

امواج فرکانس رادیویی؛

ادوات نیمه هادی؛

مکانیک سازه ای؛

پدیده های انتقال؛

انتشار موج.

بسیاری از کارکردهای پدیده های فیزیکی واقعی، بر کوپل شدن همزمان PDE های چند فیزیکی یک سیستم استوار هستند. برای مثال، ماهیت انتقال جریان الکتریکی اغلب با افزایش دمای محیط همزمان است. برای نشان دادن تاثیر عبور جریان بر نحوه انتشار حرارت و توزیع آن در محیط، دو پدیده فیزیکی جریان الکتریکی و توزیع حرارت باید همراه و همزمان با یکدیگر مورد تحلیل قرار گیرند.

بسیاری از رابط های چند فیزیکی که از پیش در نرم افزار تعریف شده اند، برای استفاده در تحلیل های مختلف به خصوص در کاربردهای مشترک چند فیزیکی، مفید هستند. ماژول هایی با کاربردهای معین که دارای کاربردهای کلیدی منحصربه فرد و کتابخانه های جامع و مخصوص به خود هستند را می توانید در این نرم افزار مشاهده کنید. این کتابخانه ها شامل نمونه مدل هایی هستند که کاربر این ماژول ها را در زمینه های مختلف به کار می گیرد.

## ۱-۲. ماژول های نرم افزار


همان طور که گفته شده، کامسول یک نرم افزار قدرتمند بین رشته ای است؛ که جزییات آنها در رشته های متفاوتی بررسی می شود، چراکه قادر است به طور همزمان فیزیک های متفاوت حاکم بر یک مساله را در نظر بگیرد. در بسیاری از مسایل پیرامون ما، بیش از چند فیزیک وجود دارد و حل مطلوب و شبیه سازی تحلیلی آنها بدون در نظر گرفتن و اعمال شرایط چندگانه آنها امکان پذیر نیست. این موضوع سبب می شود، نمونه ی شبیه سازی شده به شدت به واقعیت نزدیک شود و نتایج آن با دقت بالایی قابل قبول باشند.

به همین دلیل، در این قسمت تمامی ماژول های پرکاربرد کامسول در رشته های متفاوت معرفی شده و مورد توصیف اجمالی قرار می گیرند. برای یک شبیه سازی موفق و کامل، لازم است از این ماژول ها، حتی در حد اندک، مطلع باشید.

در این بخش به بررسی و معرفی ماژول های مورد استفاده در نرم افزار که شامل رابط های فیزیکی و اصطلاحات استاندارد مخصوص به خود هستند، پرداخته می شود. برای برخی از این ماژول ها، کتابخانه مواد مستقل، تحلیل گرهای ویژه، انواع المان ها و ابزارهای تصویرساز منحصر به فرد ارائه می شود. به طور خلاصه می توان ماژول های مورد استفاده در نرم افزار را به این صورت بیان کرد:

- ◀ ماژول AC/DC؛
- ◀ ماژول آکوستیک؛
- ◀ ماژول واکنش شیمیایی؛
- ◀ ماژول باتری ها و پیل های سوختی؛
- ◀ ماژول دینامیک سیالات محاسباتی؛
- ◀ ماژول انتقال حرارت؛
- ◀ ماژول پلاσμα؛
- ◀ ماژول RF<sup>۱</sup>؛
- ◀ ماژول مکانیک سازه ای؛
- ◀ ماژول سیستم های الکترومکانیکی؛
- ◀ ماژول میکروسیال ها؛
- ◀ ماژول مواد سازه ای غیرخطی؛
- ◀ ماژول بهینه سازی؛
- ◀ ماژول خوردگی؛
- ◀ ماژول ردگیری ذره؛
- ◀ ماژول جریان زیرسطحی؛
- ◀ ماژول ژئومکانیک.

### ۱-۲-۱. ماژول AC/DC

این نوع ماژول، محیط ویژه ای را برای شبیه سازی الکترومغناطیس AC/DC در محیط های دوبعدی و سه بعدی مهیا می کند. آیکون مربوط به این محیط به صورت  می باشد. این ماژول ابزار قدرتمندی برای آنالیزهای دقیق مربوط به سیم پیچ ها و خازن ها و به طور کلی المان های الکتریکی و الکترونیکی به حساب می آید. با کمک این ماژول می توان با رابط گرافیکی، عملیات استاتیکی، شبه استاتیکی<sup>۲</sup> و هارمونیک زمانی را اجرا کرد.

1. Radio Frequency

2. Quasi- Static Simulation



برای انجام عملیات الکترومغناطیسی، نرم افزار دارای سه رابط فیزیکی می باشد که با کمک دو رابط ابتدایی، کاربر قادر به انجام عملیات استاتیکی برای تحلیل خواص می باشد که در ادامه معرفی خواهد شد:

◀ الکترواستاتیک؛

◀ جریان های الکتریکی؛

◀ میدان های مغناطیسی.

مسائل مربوط به آنالیزهای الکترومغناطیسی در مقیاس ماکرو بر اساس معادلات ماکسول<sup>۱</sup> تحت شرایط مرزی منحصر به فرد مورد تحلیل قرار می گیرند. این نوع معادلات به صورت دیفرانسیلی و یا انتگرالی ارایه می شوند. مهم ترین کمیت های تشکیل دهنده این معادلات عبارت اند از:

◀ دانسیته میدان الکتریکی  $E$ ؛

◀ جابه جایی الکتریکی و یا دانسیته فلاکس الکتریکی  $F$ ؛

◀ دانسیته میدان مغناطیسی  $H$ ؛

◀ دانسیته فلاکس مغناطیسی  $B$ ؛

◀ دانسیته جریان  $J$ ؛

◀ دانسیته شارژ الکتریکی  $\rho$ .

فرم دیفرانسیلی معادلات ماکسول در حالت کلی همانند معادلات (۱-۱) تا (۴-۱) بیان می شود.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3-1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4-1)$$

معادلات (۱-۱) و (۲-۱) به ترتیب منطبق بر قوانین ماکسول-آمپر و فارادی<sup>۲</sup> و معادلات (۳-۱) و (۴-۱) ارایه دهنده دو نوع از قانون گوس<sup>۳</sup> (الکتریکی و مغناطیسی) هستند.

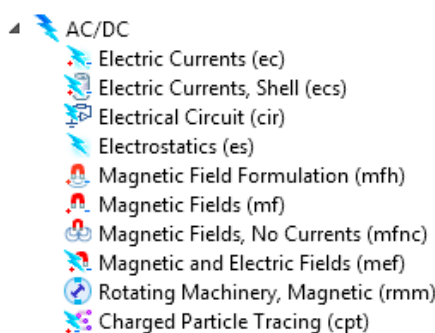
نرم افزار Comsol شامل رابط های فیزیکی به منظور انجام تحلیل های میدان ها و جریان های الکتریکی استاتیکی در این ماژول می باشد.

1. Maxwell's Equations

2. Faraday's Law

3. Gauss' Law

در این ماژول می توان مواد ناهمگن، غیرایزوتروپ، غیرخطی و یا با خاصیت پراکندگی<sup>۱</sup> را تعریف کرد. در اکثر ماژول های نرم افزار، مدل های Ready- to- run تعبیه شده است که وظیفه اجرا و تحلیل مسایل را سریع تر و راحت تر انجام می دهد. به عنوان نمونه، جهت یافتن توزیع حرارتی در یک موتور، ابتدا جریان داخل سیم پیچ را که در یکی از رابط های شبه استاتیکی بیان شده است، مشخص و سپس آن را به معادله حرارت در ماژول انتقال حرارت متصل کنید. در این شرایط مدل مولتی- فیزیک (چندفیزیکی) ایجاد خواهد شد که تمام معادلات موردنظر را به صورت همزمان تحلیل می کند. نمایی از زیرمجموعه ماژول AC/ DC در تصویر ۱-۱ ارایه شده است.



تصویر ۱-۱. ماژول AC/ DC و زیرمجموعه های آن.

## ۱-۲-۲. ماژول آکوستیک

صوت شناسی یا آکوستیک یکی از شاخه های علم فیزیک است و موضوع آن بررسی موج های مکانیکی در گازها، مایع ها و جامدها، مانند نوسان ها، صدا، فراصوت و فروصوت است. کاربردهای آکوستیک در بسیاری از جنبه های زندگی امروز دیده می شود و ساده ترین نمونه آن صنایع صوتی و نیز کنترل نویز (مکانیکی) است.


صوت در دو نوع مستقیم و غیرمستقیم دریافت می شود. صداهای مستقیم در یک فرم کروی انتقال یافته و از منبع به طور مستقیم به شنونده می رسند و این فرم کروی در حرکت باعث می شود که در تمام جهت ها در یک زمان مشخص حرکت داشته باشند. در حالت غیرمستقیم صدا در اثر برخورد با یک سطح، بازگشت یافته و سپس به دریافت کننده می رسد. صدا، هم زمان که از مسیرهای مختلف خارج می گردد، دریافت می شود.

1. Dispersive Materials



کنترل آکوستیکی به معنی کنترل انتشار مستقیم و غیرمستقیم (مسیرهای ثانویه) به وسیله صوت است. برای فراهم کردن یک صدای خوب در محیط باید به سه نکته توجه ویژه داشت؛ اول، کنترل و رسیدن صدای خوب به هر شخص به صورت مستقیم است که این موضوع خود بیانی از مباحث انتشار و بازگشت و کم کردن مدت زمان طنین جهت جلوگیری از هم پوشانی صداها توسط یکدیگر است. دوم، جلوگیری از ایجاد نویز یا نوفه بوده که از طریق انتخاب سایت مناسب دور از آلودگی صوتی، دیوارهای دوجداره، مصالح جاذب و دورسازی تاسیسات از چنین محیطهایی و نیز قرار دادن فضاهای واسطه‌ای چون کریدور و انبار میان محیط خارج و فضاهای شنوایی انجام می‌گیرد. سوم، استفاده از سیستم‌های صوتی ایده‌ال می‌باشد که در واقع، تقویت صدا با به کارگیری میکروفون‌ها و بلندگوها و تقویت‌کننده‌ها با تعبیه یک اتاق کنترل است. بسته به نوع به کارگیری برای این مورد از سیستم‌های مختلفی می‌توان بهره برد.

این مازول شامل مجموعه‌ای از رابط‌های فیزیکی است که می‌تواند بیشتر عملیات آکوستیک در زمینه‌های سیالات و جامدات را انجام دهد. صوت، نتیجه انتشار امواج در اتمسفر است. به عبارت دیگر، صوت ارایه‌دهنده حساسیت تغییرات ناچیز، اما سریع در فشار هوا می‌باشد. پدیده آکوستیک حالت فیزیکی صوت را بیان می‌کند. این مازول قادر به شبیه‌سازی آنالیزهای زمانی، مودال و هارمونیک درباره سیالات است و تحلیل‌های پاسخ فرکانسی ویژه، پاسخ زمانی و سازه‌ای برای ساختارهای مرتبط به آنها را ارایه می‌دهد.

این مازول با آیکون  ارایه می‌شود. در تصویر ۱-۲ می‌توانید زیرمجموعه‌های تشکیل‌دهنده آن را مشاهده کنید. همان‌گونه که در این تصویر نشان داده شده است، زیرمجموعه‌های این مازول عبارت‌اند از:

- |                                |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Acoustics                      | آکوستیک فشاری؛              |
| Pressure Acoustics             | برهم‌کنش آکوستیک - سازه‌ای؛ |
| Acoustic-Structure Interaction | آیروآکوستیک؛                |
| Aeroacoustics                  | آکوستیک حرارتی.             |
| Thermoacoustics                |                             |

تصویر ۱-۲. مازول Acoustics و زیرمجموعه‌های آن.

هر کدام از این نوع آکوستیک‌ها نیز شامل زیرمجموعه‌هایی مخصوص به خود می‌باشند. زیرمجموعه‌های آکوستیک فشاری عبارت‌اند از:

آکوستیک فشاری گذرا و حوزه - فرکانسی؛

آکوستیک حالت مرزی.

1. Frequency- Domain And Transient Pressure Acoustics
2. Boundary Mode Acoustics