

به نام خدا

مدل سازی جریان و انتقال حرارت با

OPENFOAM_{2.X.X}

نیما سام خانیانی



۱۳۹۱

سرشناسه: سام‌خانیانی، نیما، ۱۳۶۵-

عنوان و نام پدیدآور: مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت با OPENFOAM 2.X.X / نیما سام‌خانیانی.

مشخصات نشر: تهران: اندیشه سرا، ۱۳۹۱.

مشخصات ظاهری: ۱۶۰ ص. مصور، جدول، نمودار.

شابک: 978-600-5716-83-2

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

موضوع: سیالات--دینامیک--نرم‌افزار

موضوع: سیالات--دینامیک--شبیه‌سازی کامپیوتری

رده بندی کنگره: ۱۳۹۱ ۲س ۴ن ۵/۵ TA۳۵۷

رده بندی دیویی: ۶۲۰/۱۰۶۴

شماره کتابشناسی ملی: ۲۹۷۶۵۲۷

خریدار محترم

آن‌چه خریداری می‌نمایید، یک "کتاب" است. در صورتی که "لوح فشرده‌ای" به همراه کتاب باشد، مؤلف یا یک شرکت مرتبط آن را به عنوان "هدیه" در اختیار خریداران گذاشته است. انتشارات اندیشه‌سرا، مؤلف و هیچ شخص حقیقی یا حقوقی دیگر، مسئولیتی در ارتباط با قابل استفاده بودن لوح‌های فشرده ندارد. کتابی را به خاطر لوح فشرده‌ی همراه آن خریداری نفرمایید.



انتشارات اندیشه‌سرا

مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت با

OPENFOAM 2.X.X

نوشته‌ی: نیما سام‌خانیانی

چاپ اول، ۱۳۹۱، شمارگان ۲۰۰، ۱۰۰۰۰ تومان

شابک ۲-۸۳-۵۷۱۶-۶۰۰-۹۷۸-۹۷۸-۶۰۰-۵۷۱۶-۸۳-۲ ISBN 978-600-5716-83-2

حق چاپ و نشر محفوظ و هر گونه استفاده از محتوای این کتاب به دانشن اجازه‌ی کتبی از ناشر نیازمند است.

«انتشارات اندیشه‌سرا» از انتشار کتاب‌های ارزشمند حمایت می‌کند: ۰۹۱۲۳۱۶۱۶۸۷

مسئولیت نوشته‌های کتاب با نویسنده است

www.andishehsara.org

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

فهرست

مقدمه

۹	۱- معرفی
۱۰	۲- نسخه های OpenFOAM
۱۰	۱-۲- نصب همزمان چندین نسخه ی OpenFOAM
۱۱	۳- مراجع
۱۲	۴- محیط گرافیکی کاربر (Graphical User Interface)
۱۲	۵- ساختار OpenFOAM

فصل یک

۱۷	۱- حل میدان جریان در داخل کانال دو بعدی همراه با حفره
۱۷	۱-۱- پیش نیاز
۱۷	۲-۱- تعریف مسأله
۱۸	۳-۱- استراتژی حل
۱۸	۴-۱- پیش پردازش
۱۸	۱-۴-۱- رسم شکل در BlockMeshDict
۲۵	۲-۴-۱- اعمال شرایط مرزی
۲۷	۳-۴-۱- آماده سازی مقادیر فیزیکی
۲۷	۴-۴-۱- تعیین گام زمانی
۲۹	۵-۱- پردازش
۳۰	۶-۱- پس پردازش
۳۰	۱-۶-۱- بررسی همگرایی یا استفاده از foamLog
۳۲	۲-۶-۱- رسم کانتور سرعت با نرم افزار ParaView
۳۳	۳-۶-۱- رسم خطوط جریان
۳۳	۷-۱- خطاهای رایج
۳۵	۸-۱- خلاصه
۳۵	۹-۱- تمرین

فصل دوم

۳۷	۲- مدل سازی حرکت حباب در هندسه‌ی متقارن محوری
۳۷	۱-۲- پیش نیاز
۳۷	۲-۲- تعریف مسأله
۳۸	۳-۲- استراتژی حل
۳۸	۴-۲- پیش پردازش
۳۸	۱-۴-۲- رسم شکل در <i>BlockMeshDict</i>
۴۲	۲-۴-۲- اعمال شرایط مرزی
۴۶	۳-۴-۲- شرط اولیه‌ی غیر یک نواخت
۴۸	۴-۴-۲- آماده سازی مقادیر فیزیکی
۴۹	۵-۴-۲- تعیین گام زمانی
۵۱	۵-۲- پردازش
۵۱	۱-۵-۲- <i>Allclean Allrun</i>
۵۲	۶-۲- پس پردازش
۵۲	۱-۶-۲- رسم کامل
۵۶	۲-۶-۲- تهیه‌ی فیلم
۵۷	۷-۲- خلاصه

فصل سوم

۵۹	۳- جریان سیال و انتقال حرارت در ژانویی اختلاط
۵۹	۱-۳- پیش نیاز
۵۹	۲-۳- تعریف مسأله
۶۰	۳-۳- استراتژی حل
۶۱	۴-۳- پیش پردازش
۶۱	۱-۴-۳- ورود مش از <i>gambit</i>
۶۶	۲-۴-۳- اعمال شرایط مرزی
۷۶	۳-۴-۳- آماده سازی مقادیر فیزیکی
۷۷	۴-۴-۳- تعیین گام زمانی
۷۹	۵-۴-۳- فایل <i>fvSolution</i>
۸۱	۵-۳- پردازش
۸۱	۶-۳- پس پردازش
۸۱	۱-۶-۳- <i>probe</i>

۸۲	calculator - ۲-۶-۳
۸۳	خطاهای رایج - ۷-۳
۸۴	خلاصه - ۸-۳

فصل چهارم

۸۵	۴- مدل سازی انتقال حرارت چندگانه (Conjugate Heat Transfer)
۸۵	۱-۴- پیش نیاز
۸۵	۲-۴- تعریف مسأله
۸۶	۳-۴- استراتژی حل
۸۷	۴-۴- پیش پردازش
۸۷	۱-۴-۴- رسم شکل در BlockMeshDict
۹۴	۲-۴-۴- اعمال شرایط مرزی
۹۹	۳-۴-۴- شرط مرزی غیریک نواخت
۱۰۰	۴-۴-۴- جداسازی ناحیه ی سیال از جامد
۱۰۰	۵-۴-۴- آماده سازی مقادیر فیزیکی
۱۰۳	۶-۴-۴- تعیین گام زمانی
۱۰۴	۷-۴-۴- آماده سازی fvSchemes و fvSolution
۱۰۵	۵-۴- پردازش
۱۰۷	۶-۴- پس پردازش
۱۰۷	۷-۴- نگاشت
۱۰۹	۸-۴- پردازش موازی
۱۱۰	۹-۴- خلاصه

فصل پنجم

۱۱۱	۵- مدل سازی سیال با ویژگی های فیزیکی متغیر با دما
۱۱۱	۱-۵- پیش نیاز
۱۱۱	۲-۵- تعریف مسأله
۱۱۲	۳-۵- استراتژی حل
۱۱۳	۴-۵- استخراج معادلات
۱۱۳	۵-۵- کدخوانی
۱۱۴	۱-۵-۵- icoFoam.C
۱۱۷	۲-۵-۵- creatFields.H
۱۱۹	۶-۵- حل گر جدید

۱۱۹.....	۵-۶-۱- آماده‌سازی اولیه
۱۱۹.....	۵-۶-۲- کدنویسی
۱۲۱.....	۵-۶-۳- ایجاد فایل اجرایی
۱۲۱.....	۵-۷- حل مسأله با حل‌گر جدید
۱۲۵.....	۵-۸- خطاها
۱۲۶.....	۵-۹- خلاصه

پیوست

۱۲۷.....	۱- فهرست فرمان‌های پرکاربرد در خط فرمان (Terminal) لینوکس
۱۳۰.....	۲- حل‌گر
۱۳۵.....	۳- متغیرها
۱۳۷.....	۴- شرایط مرزی
۱۳۷.....	۴-۱- شرط مرزی پایه
۱۳۹.....	۴-۲- شرط مرزی ابتدایی و استخراجی
۱۴۰.....	۵- پردازش موازی
۱۴۱.....	۵-۱- پردازش‌گر با حافظه مشترک
۱۴۱.....	۵-۲- پردازش‌گر با حافظه‌ی توزیع یافته
۱۴۲.....	۵-۳- پردازش موازی با OpenFOAM
۱۴۲.....	۵-۳-۱- فایل decomposeParDict
۱۴۴.....	۵-۳-۲- اجرای دامنه تقسیم شده
۱۴۵.....	۵-۳-۳- توزیع داده‌ها بین چند دیسک
۱۴۶.....	۵-۳-۴- عملیات پس‌پردازش مسائل موازی
۱۴۷.....	۶- swak4Foam
۱۴۷.....	۶-۱- funkySetFields
۱۴۹.....	۶-۲- groovyBC
۱۵۱.....	۶-۳- swakFunctionObjects

سخنی با خوانندگان

چهار سال پیش زمانی که شروع به یادگیری نرم افزار *OpenFOAM* کردم، تعداد کسانی که به این نرم افزار در کشور آشنایی داشتند بسیار محدود بود، البته *OpenFOAM* در خارج از کشور و در خواستگاهش اروپا نیز جوان بود. در طول این چند سال نسخه های جدیدتری از این نرم افزار ارائه شد و گروه های بیشتری از دانشگاه و صنعت از این نرم افزار استقبال کردند. دلایل بسیاری برای این استقبال وجود دارد. *OpenFOAM* نرم افزاری متن باز است و برای استفاده از آن هیچ هزینه ای پرداخت نمی کنید. همچنین این نرم افزار حاوی حل گر برای مدل سازی عددی دامنه ی وسیعی از کاربری های صنعتی است. در داخل کشور، استقبال از این نرم افزار در جامعه ی دانشگاهی بیشتر شده است و هم اکنون تعداد پروژه های ارشد یا دکترا که با این نرم افزار صورت می پذیرد بسیار بیشتر از گذشته است. به هر حال استفاده از این نرم افزار، خالی از اشکال نیست. محیط متنی و راهنمای کاربران پراکنده از جمله مشکلات استفاده از این نرم افزار است. در این کتاب سعی شده که بخشی از این تجربیات چند ساله به اشتراک گذاشته شود تا قدم های اول در یادگیری این نرم افزار قدرت مند، برای شما سریع تر طی شود.

این کتاب دارای ۶ فصل و چندین ضمیمه است. در مقدمه، اطلاعات کلی درباره ی استفاده، نصب و بهره مندی از *OpenFOAM* ارائه شده است. در چهار فصل بعد با ارائه ی مثال برخی از توانمندی های این نرم افزار ارائه شده است و در فصل آخر برنامه نویسی در *OpenFOAM* مطرح می شود. مخاطب این کتاب بیشتر کسانی هستند که تازه کار بوده و یا تجربه ای در استفاده از *OpenFOAM* ندارند. برای کسانی که تجربه ی قبلی در استفاده از *OpenFOAM* دارند نیز مطالبی برای یادگیری وجود دارد.

یک *DVD* به همراه این کتاب عرضه می شود. این *DVD* حاوی مثال های کتاب، نرم افزار متن باز *virtualBox* و یک نسخه سیستم عامل لینوکس توزیع *ubuntu* است. نرم افزار متن باز *virtualBox*، برای نصب سیستم عامل لینوکس درون *windows* مورد استفاده قرار می گیرد. نسخه ی *ubuntu* ارائه شده در این *DVD* حاوی چندین نسخه از *OpenFOAM* است. همچنین با توجه به نیاز کاربران ایرانی و فارسی زبان، به برخی از نرم افزارها هم چون کدک های مدیا پلیر مجهز شده است.

با همه‌ی دقت نظر و وسواسی که در نوشتن این کتاب صورت گرفته است، خالی از ایراد نخواهد بود، بنابراین خوانندگان محترم می‌توانند از طریق ای‌میل زیر نظرات، پیشنهادها و انتقادات خود را با این جانب درمیان بگذارند.

nima.samkhaniani@gmail.com

از سرکار خانم نسیم محبوب بصیری، سرکار خانم شیرین طالعی‌فرد و جناب آقای پویا خداپرست که در اصلاح متن کتاب همکاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

نیما سام‌خانیانی

www.ketab.ir

مقدمه

۱- معرفی

دینامیک سیالات محاسباتی شاخه‌ای از مکانیک سیالات است که به حل عددی جریان سیال می‌پردازد. با گسترش رایانه‌هایی با پردازش سریع و ابررایانه‌ها، این شاخه از مکانیک گسترش بیشتری یافته است. در کنار نرم‌افزارهای گسترده‌ی تجاری مانند *CFX*، *Fluent* و ... که به حل جریان سیال می‌پردازند، نرم‌افزارهای متن‌باز^۱ نیز در این شاخه ارائه شده‌اند که مهم‌ترین نرم‌افزار متن‌باز در این حیطه *OpenFOAM* است. این نرم‌افزار امکان حل گستره‌ی وسیعی از پدیده‌های فیزیکی هم‌چون جریان‌های قابل تراکم و غیر قابل تراکم، جریان دو فاز (گاز- ذره، سیال- سیال)، جریان در مواد متخلخل، دینامیک گازها، احتراق، توربو ماشین و ... را دارا است. قدرت اصلی *OpenFOAM* ناشی از استفاده‌ی هوشمندانه از توانایی‌های زبان برنامه‌نویسی *C++* است. این زبان برنامه‌نویسی شی‌گرا^۲ می‌باشد. برنامه‌ی *OpenFOAM* با بهره‌گیری از این قابلیت زبان *C++*، ساختار منظمی از کلاس‌ها، کتابخانه‌ها و به طور کلی اشیاء را فراهم نموده است که امکان گسترش و اختصاصی‌سازی این کدها را برای حل هر مسأله‌ی خاص امکان‌پذیر می‌سازد.

از مزیت‌های دیگر این برنامه، پیوند نزدیک آن با سایر برنامه‌های پیش‌پردازش^۳ و پس‌پردازش^۴ است. برای مثال در این نرم‌افزار ابزار ایجاد هندسه در نظر گرفته شده است، اما امکان ورود مش از بسیاری از نرم‌افزارهای مش‌زنی هم‌چون *SALOME*، *NETGEN*، *GAMBIT* و مانند آن وجود دارد یا در کنار *ParaView* که نرم‌افزار استاندارد نمایش گر خروجی برنامه‌های *OpenFOAM* است، امکان نمایش خروجی در بسیاری از نرم‌افزارهای پردازش گر داده هم‌چون *ENSIGHT* و *Tecplot* وجود دارد.

مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده‌ی جریان سیال نیاز به حجم عظیم کدنویسی دارد. امکان دسترسی به کدهای منبع^۵ و گسترش آن، سبب شده است تا کاربران این نرم‌افزار به‌ویژه در بین جامعه‌ی دانشگاهی گسترش یابد و نسخه‌های جدیدتر آن با سرعت بیشتری ارائه گردد. مهم‌ترین مشکل در راه استفاده‌ی گسترده از این نرم‌افزار، راهنمای ضعیف کاربران و پراکندگی اطلاعات درباره‌ی حل‌گرها است که زمان یادگیری و بهره‌گیری از این نرم‌افزار قدرت‌مند را طولانی و گاه کاربران عادی را از کار با این نرم‌افزار دل‌برد می‌کند.

در این کتاب سعی شده است با ارائه‌ی چندین مثال، کاربران سریع‌تر با ساختار نرم‌افزار *OpenFOAM* و نحوه‌ی استفاده از آن آشنا شوند. این کتاب جای‌گزینی برای راهنمای کاربران نیست،

^۱ Open Source

^۲ Object-Oriented

^۳ Preprocessing

^۴ Postprocessing

^۵ Source Code

بلکه تلاشی است اندک تا مراجع و ابزار لازم برای استفاده‌ی راحت‌تر و سریع‌تر از این نرم‌افزار معرفی شود.

۲- نسخه‌های OpenFOAM

شاید اولین نکته در برخورد یک کاربر با نرم‌افزار OpenFOAM تنوع نسخه‌های ارائه شده باشد. این نرم‌افزار در دو نسخه‌ی رسمی و غیر رسمی (توسعه‌یافته)^۱ ارائه می‌شود. معمولاً نسخه‌های توسعه‌یافته دارای قابلیت‌های بیشتری هستند و حل‌گرهای بیشتری را شامل می‌شوند. هم‌چنین روش‌های متنوعی برای نصب وجود دارد مانند نصب از طریق بسته‌ی باینری^۲، نصب از منبع^۳، نصب از git و نصب از طریق بسته‌ی دبیین^۴ بر روی نسخه‌ی اوبونتو^۵. آسان‌ترین روش نصب، نصب از طریق بسته‌ی دبیین است. بعد از آن نصب از نسخه‌ی باینری ساده‌تر از راه‌های دیگر می‌باشد. نصب از طریق source نیاز به آگاهی و تجربه‌ی بیشتر در کار با سیستم عامل لینوکس دارد.

۲-۱- نصب هم‌زمان چندین نسخه‌ی OpenFOAM

به دلیل تنوع نسخه‌های OpenFOAM و تفاوت‌هایی که بین این نسخه‌ها وجود دارد، گاهی نیازمند نصب هم‌زمان دو یا چند نسخه‌ی متفاوت از OpenFOAM روی سیستم عامل خود هستید. توجه کنید که هیچ تفاوتی بین نصب یک یا چند نسخه از OpenFOAM وجود ندارد. تنها تفاوت درباره‌ی نحوه‌ی فراخوانی فرامین در ترمینال است. چون اجرای OpenFOAM با تایپ فرامین در ترمینال صورت می‌گیرد و از آن جا که نسخه‌های متفاوت از فرامین یکسانی برخوردارند، باید قبل از استفاده مشخص کنید که از چه نسخه‌ای استفاده خواهید کرد، یعنی فرامین وابسته به کدام یک از نسخه‌های OpenFOAM هستند.

در آخرین مرحله از نصب برنامه‌ی OpenFOAM به فایل مخفی^۶ (bashrc) از پوشه‌ی home عبارت‌ی افزوده می‌شود. برای مشاهده‌ی فایل bashrc به پوشه‌ی home بروید و Ctrl+H را فشار دهید، در این صورت فایل‌های مخفی خود را نشان می‌دهد. سپس فایل bashrc را باز کنید و یا در ترمینال فرامین زیر را به ترتیب اجرا کنید. (اگر این اولین تجربه‌ی استفاده شما از لینوکس است، هیچ نگران نباشید. در اوبونتو، ترمینال در Applications/Accessories/Terminal قرار دارد.) لینوکس به حروف بزرگ و کوچک حساس است، بنابراین دقت کنید که فرامین یا آدرس‌ها و یا نام پوشه‌ها را درست وارد کنید.

^۱ Extended

^۲ Binary package

^۳ Source

^۴ Debian package

^۵ Ubuntu

^۶ Hidden file

```
cd
gedit .bashrc
```

مثلاً برای نصب OpenFOAM-2.1.0 نسخه دیبِن برای نصب در شاخه *opt* عبارت زیر به انتهای فایل *.bashrc* اضافه می‌شود. این عبارت در واقع آدرس فایل *.bashrc* در داخل پوشه *etc* از پوشه *OpenFOAM* است و با توجه به مکان نصب *OpenFOAM* که می‌تواند در شاخه *opt* یا شاخه *home* باشد، متفاوت است.

```
./opt/openfoam210/etc/bashrc
```

حال فرض کنید هم‌زمان سه نسخه *OpenFOAM* زیر را در اختیار دارید:

✓ *OpenFOAM-1.6* نسخه دیبِنری، نصب در شاخه *home*

✓ *OpenFOAM-2.1.0* نسخه دیبِن، نصب در شاخه *opt*

✓ *OpenFOAM-2.0.1* نسخه دیبِن، نصب در شاخه *opt*

با فرمان *alias* این نسخه‌ها جدا از هم فراخوانی می‌شوند. در انتهای فایل *.bashrc* به جای عبارت بالا لازم است عبارت زیر را اضافه کنید.

```
alias of210='. /opt/openfoam210/etc/bashrc'
alias of201='. /opt/openfoam201/etc/bashrc'
alias of16='. $HOME/OpenFOAM/OpenFOAM-1.6/etc/bashrc'
```

از این پس، پیش از اجرای *OpenFOAM*، نسخه‌ی مورد نظر را فراخوانی کنید. مثلاً اگر از نسخه *OpenFOAM-2.1.0* استفاده می‌کنید، کافی است تا در ترمینال پیش از شروع برنامه عبارت زیر را وارد کنید.

```
of210
```

به یاد داشته باشید اگر پنجره‌ی جدیدی در ترمینال باز کنید، تکرار این فرمان ضروری است. در غیر این صورت فرامین *OpenFOAM* شناخته نمی‌شوند.

۳- مراجع

مهم‌ترین راه یادگیری نرم‌افزار *OpenFOAM* مطالعه‌ی راهنمای کاربران و برنامه‌نویسان است که پس از نصب در پوشه *doc* در زیر شاخه *opt* قرار دارد. اما از آن‌جا که این راهنما تنها حجم کوچکی از اطلاعات و مثال‌های مورد نیاز را پوشش می‌دهد، برای دستیابی بیشتر به اطلاعاتی درباره قابلیت‌ها، راهنمای حل‌گرها و مانند آن‌ها، همیشه نیاز به جست‌وجو در منابع اینترنتی می‌باشد. از مهم‌ترین این منابع انجمن کاربران^۱ و ویکی‌پدیا^۲ می‌باشد که توسط کاربران قدیمی‌تر به روزرسانی شده

^۱ <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam/>

^۲ <http://openfoamwiki.net>

و گسترش می یابد. از مراکز مهم دانشگاهی که بر روی این نرم افزار کار می کنند و نمونه های مطالعاتی برای برخی از حل گر ها در آن موجود است، دانشگاه چالمرز^۱ می باشد.

۴- محیط گرافیکی کاربر (Graphical User Interface)

همراه با نسخه ی استاندارد این نرم افزار، محیط گرافیکی ارائه نمی شود. مدل سازی یک فرآیند فیزیکی شامل ورود اطلاعات برای تولید مش، انتخاب حل گر و در نهایت تعیین پارامترهای فیزیکی و زمانی از طریق ویرایش فایل های متنی صورت می پذیرد. البته گروه های مستقل محیط گرافیکی (GUI) برای OpenFOAM طراحی کرده اند. از نرم افزارهای رایگان که محیط گرافیکی برای OpenFOAM فراهم می کنند، می توان به Discretizer و enGrid و از نرم افزارهای تجاری به ICON FOAMpro اشاره کرد.

۵- ساختار OpenFOAM

در این فصل با اجرای یک مثال ساده، به ساختار OpenFOAM نگاهی انداخته می شود و توضیحات تکمیلی در فصل های دیگر ارائه خواهد شد. در اولین مواجهه با یک نرم افزار تحلیلی هم چون OpenFOAM این سؤال مطرح است که برای مدل سازی یک فرآیند فیزیکی به چه اطلاعاتی نیاز است. نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی به حل معادلات پایستار جریان (معادله ی پیوستگی، معادلات مومنتم و گاه معادله ی انرژی) می پردازند. در زیر معادلات پایستار در حالت کلی آورده شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = \rho g - \nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \bar{U}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

این معادلات از نوع مشتق پاره ای و غیر خطی هستند. همان طور که از ریاضیات مهندسی به یاد دارید برای حل هر معادله ی مشتق جزئی نیاز دارید تا موارد زیر را بدانید:

- ✓ شرایط مرزی
- ✓ شرایط اولیه
- ✓ دامنه ی حل
- ✓ روش گسسته سازی (بازه ی حل، گام زمانی، روش عددی محاسبه ی ترم های مشتق پاره ای و غیره)

^۱ http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD/

ساختار OpenFOAM بر اساس شرایط بالا شکل گرفته است. برای آشنایی بیشتر به مسأله *cavity* از پوشه *tutorial* به آدرس زیر مراجعه کنید.

`/home/user/OpenFOAM/user-2.0.1/run/tutorials/incompressible/icoFoam/cavity`

^۱ یا فرمان زیر را در ترمینال تایپ کنید.

```
cd $FOAM_RUN/tutorials/incompressible/icoFoam/cavity
```

این مسأله یکی از مسائل ساده‌ی دینامیک سیالات محاسباتی است. در این مسأله، معادلات جریان برای سیال غیر قابل تراکم، آرام در داخل یک حفره حل می‌شوند و توزیع فشار و میدان سرعت به دست می‌آید. درباره‌ی این مسأله به تفصیل در راهنمای کاربران صحبت شده است. محتویات پوشه *cavity* را در شکل ۱-۵ می‌بینید. در این برنامه، چنین ساختاری بر حل دیگر مسائل نیز حاکم است. البته محتویات درون پوشه‌ها با توجه به انتخاب حل گر متفاوت هستند.

- ✓ پوشه‌ی صفر (0): در این پوشه متغیرهای جریان هم‌چون U (سرعت) و p (فشار) قرار دارند. درون این فایل‌ها شرایط مرزی و مقدار اولیه تعیین می‌گردد.
- ✓ پوشه‌ی ثوابت (*constant*): پوشه‌ی *polyMesh* و فایل *transportProperties* در این پوشه قرار دارند. هندسه‌ی مسأله، ثوابت فیزیکی هم‌چون ویسکوزیته در این بخش تعیین می‌گردد.
- ✓ پوشه‌ی سیستم (*system*): درون این پوشه فایل‌های *controlDict*، *fvSchemes* و *fvSolution* قرار دارند. گام زمانی، زمان شروع و پایان حل یک مسأله، روش عددی محاسبه‌ی ترم‌های مشتق پاره‌ای و دقت حل در این بخش تعیین می‌گردد.

^۱ اگر چنین پوشه‌ای یافت نشد، در ترمینال به ترتیب فرامین زیر را اجرا کنید.

```
mkdir -p $FOAM_RUN
cp -r $FOAM_TUTORIALS $FOAM_RUN
```

Bookmarks Help

Forward ↑ ↺ ↻ ↵ 🔍 100%

Location: /asam-2.1.0/run/tutorials/incompressible/icoFoam/cavity



0



constant



system

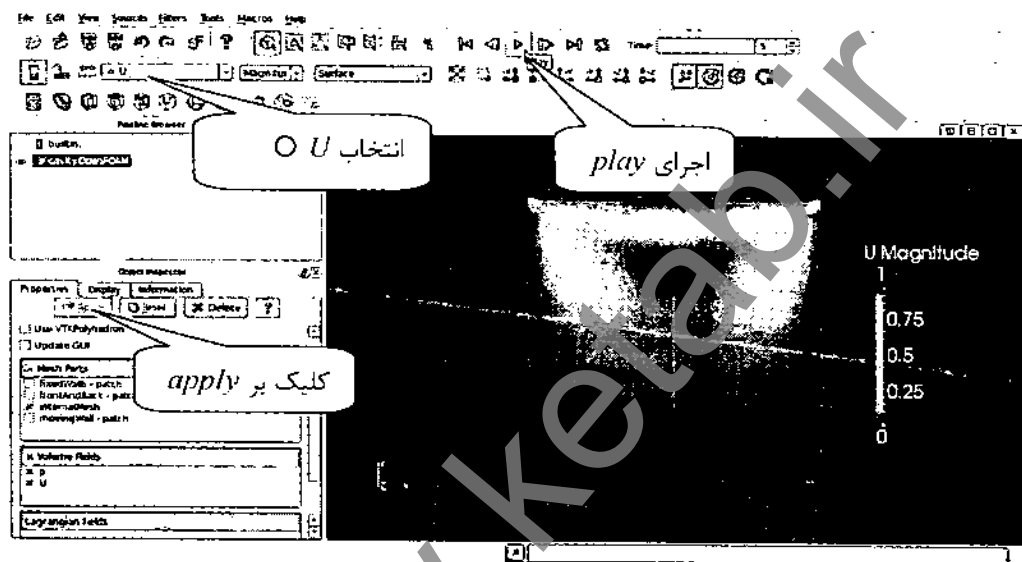
شکل ۱-۵: پوشه‌ی مسأله‌ی cavity

حالا فرامین زیر را به ترتیب در ترمینال تایپ کنید. (عجول نباشید، درباره‌ی همه‌ی فرامین توضیح داده خواهد شد).

```
blockMesh
icoFoam
paraFoam
```

در پنجره‌ی بازشده‌ی *ParaView*، ابتدا بر دکمه‌ی *apply* کلیک کنید، سپس از منوی آبشاری، *U* را انتخاب کرده و پس از آن دکمه‌ی *play* را بزنید تا توزیع سرعت زیر را مشاهده کنید. آفرین! شما اولین مثال *CFD* را با *OpenFOAM* حل کردید! شاید کمی گیج شده باشید! اما بدانید که تنها یک ساندویچ آماده را میل کرده‌اید. حل یک مسأله واقعی به درست کردن ساندویچ می‌ماند، گاهی از این هم سخت‌تر می‌شود و نیاز پیدا می‌کنید که مواد اولیه‌ی ساندویچ را نیز خود تهیه کنید! ببینیم چه اتفاقی افتاد و این مسأله چگونه حل شد. ابتدا دستور *blockMesh* را تایپ کردید، با این فرمان برنامه به سراغ فایل *blockMeshDict* از زیرپوشه‌ی *constant/polyMesh* می‌رود و اطلاعات آن را می‌خواند. این اطلاعات به برنامه می‌گوید که هندسه‌ی مسأله یک مکعب مستطیل است. درباره‌ی چگونگی ایجاد هندسه و اطلاعاتی که *blockMeshDict* در بر دارد، به مثال‌های بعدی رجوع کنید. سپس فرمان *icoFoam* را اجرا کردید. *icoFoam* نام حل‌گری است که به حل جریان آرام تک‌فاز می‌پردازد. شاید از خود بپرسید که خوب! از کجا بفهمم که از چه حل‌گری استفاده کنم و نام آن حل‌گر چیست؟ برای انتخاب حل‌گر به پیوست ۲ رجوع کنید. در واقع *icoFoam* ابتدا به *controlDict* از پوشه‌ی *system* نگاه می‌کند (زمان شروع مدل‌سازی و گام زمانی در این فایل آمده است)، سپس مقادیر اولیه و شرایط مرزی برای متغیرهای مسأله (فشار و سرعت) از پوشه‌ی صفر خوانده می‌شود. در نهایت این حل‌گر به حل معادلات پیوستگی و مومنتم می‌پردازد. حل این معادلات از طریق ایجاد

دستگاه معادلات خطی به فرم $AX = b$ و حل تکراری آن صورت می گیرد. میزان خطای نسبی و مطلق برای حل تکراری و نوع روش عددی برای حل این دستگاه های عددی در فایل *fvSolution* از پوشه *system* برای هر متغیر مشخص شده است. در فایل *fvSchemes* از پوشه *system* روش های عددی تجزیه ی ترم های مشتق جزئی همچون گرادینان، دیورژانس مطرح شده است. در نهایت خروجی OPENFOAM با فرمان *paraFoam* از طریق برنامه *ParaView* نمایش داده شده است.



شکل ۲-۵: اجرای برنامه ی *paraFoam* نمایش تغییرات سرعت (U)

- پس به طور کلی می توان مدل سازی را به سه بخش تقسیم کرد.
- ✓ پیش پردازش: شامل انتخاب حل گر، آماده سازی هندسه، شرایط مرزی و شرایط اولیه، ثوابت فیزیکی، تعیین گام زمانی و تعیین میزان دقت در محاسبات
 - ✓ پردازش: اجرای حل گر
 - ✓ پس پردازش: نمایش خروجی برنامه، رسم نمودار، تهیه فیلم و غیره
- که به آن ها در فصل های آینده بیشتر خواهیم پرداخت.
- توصیه می شود پیش از شروع فصل یک به پیوست ۱ مراجعه کنید. در این پیوست فهرست فرامین پر کاربرد در ترمینال لینوکس آورده شده است.