

به نام خدا

# شبیه‌سازی CFD جریان‌های چندفازی

با نرم‌افزار

# FLUENT

ترجمه و اقتباس:

دکتر سیدحسن هاشم‌آبادی

عضو هیأت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی دهنوی

عضو هیأت علمی دانشگاه امام حسین (ع)



عنوان و نام پدیدآور: شبیه‌سازی CFD جریان‌های چندفازی با نرم‌افزار FLUENT

ترجمه و اقتباس حسن هاشم‌آبادی، محمدعلی دهنوی.

مشخصات نشر: تهران: اندیشه سرا، ۱۳۹۰.

مشخصات ظاهری: ۲۰۸ص: مصور، جدول، نمودار.

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۷۱۶-۶۳-۴

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: این کتاب ترجمه بخش "Modeling multiphase flows"

از کتاب "FLUENT ۶.۳ user's guide" است.

موضوع: نرم‌افزار فلونت

موضوع: جریان چندفازی - - شبیه‌سازی - - نرم‌افزار.

موضوع: سیالات - - دینامیک - - شبیه‌سازی کامپیوتری

شناسه افزوده: هاشم‌آبادی، سیدحسن، ۱۳۴۹ - ، مترجم

شناسه افزوده: دهنوی، محمدعلی، ۱۳۴۲ - ، مترجم

رده‌بندی کنگره: ۱۳۹۰ ش ۳۵ ج ۵ / TA۳۵۷/۵

رده‌بندی دیویی: ۶۲۰/۱۰۶۴

شماره کتاب‌شناسی ملی: ۲۲۹۹۲۰۹



انتشارات اندیشه سرا

شبیه‌سازی CFD جریان‌های چندفازی

با نرم‌افزار FLUENT

ترجمه و اقتباس: دکتر سیدحسن هاشم‌آبادی و دکتر محمدعلی دهنوی

چاپ اول، ۱۳۹۰، شمارگان ۲۰۰، ۷۰۰۰ تومان

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۷۱۶-۶۳-۴ ۹۷۸-۶۰۰-۵۷۱۶-۶۳-۴ ISBN

حق چاپ و نشر محفوظ و هرگونه استفاده از محتوای این کتاب به داشتن اجازه‌ی کتبی از ناشر نیازمند است.

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

[www.andishehsara.org](http://www.andishehsara.org)

## به امیدش و به یاریش

پیش گفتار

پس از چندین ترم تدریس موضوع دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در دانشگاه و ارائه‌ی کارگاه‌های تخصصی مختلف، عدم وجود مرجعی که ضمن معرفی دیدگاه‌های مختلف شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی، روش مدل‌سازی این نوع جریان‌ها را بیان کند احساس می‌شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بین نرم‌افزارهای موجود CFD، نرم‌افزار FLUENT بیشتر در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود در بسیاری از کارهای انجام شده در پروژه‌های مختلف صنعتی و دانشگاهی، اطلاعات کافی از ابعاد مختلف شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی از جمله نحوه‌ی انتخاب متناسب دیدگاه‌های شبیه‌سازی، مزایا، معایب و محدودیت‌های هر کدام از این دیدگاه‌ها وجود ندارد و عمدتاً به صورت خیلی سطحی از این نرم‌افزار استفاده می‌شود که در بسیاری موارد به نتایجی قابل قبولی نیز منجر نمی‌گردد. کتاب حاضر ترجمه‌ی بخش " شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی " راهنمای این نرم‌افزار می‌باشد که مبانی تئوری مدل‌های جریان چندفازی را به خوبی بیان کرده است. هدف این کتاب از بین بردن شکاف موجود در منابع قابل دسترسی جهت شناخت مبانی نظری و انجام شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT می‌باشد. از آن‌جا که مبانی تئوری حاکم بر این جریان‌ها در تمام نرم‌افزارهای CFD یکسان و فقط در جزئیات تفاوت‌های اندکی را نشان می‌دهد، لذا کتاب حاضر برای کلیه‌ی شبیه‌سازی‌های جریان‌های چندفازی با CFD قابل استفاده می‌باشد.

در پایان از کلیه کسانی که در نگارش کتاب حاضر کمک کردند و به خصوص از سرکار خانم فاطمه امیدبیگی و آقای مهندس سامان حریری به خاطر چک کردن نگارش بخش‌هایی از کتاب تشکر می‌شود. علی‌رغم تلاش زیاد در ارائه ساده و روان مطالب کتاب، مطمئناً نواقصی همچنان در ارائه‌ی مطالب موجود باشد، لذا نیازمند راهنمایی‌ها و پیشنهادات خوانندگان عزیز به ویژه اساتید بزرگوار و دانشجویان عزیز می‌باشیم.

سیدحسن هاشم‌آبادی، محمدعلی دهنوی



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۳	۱- مقدمه
۱۳	۱-۱- رژیم‌های جریان چند فازی
۱۳	جریان‌های گاز - مایع یا جریان‌های مایع - مایع
۱۴	جریان‌های گاز - جامد
۱۵	جریان‌های مایع - جامد
۱۵	جریان‌های سه فازی
۱۵	۲-۱- مثال‌هایی از سیستم‌های چند فازی
۱۷	۲- انتخاب یک مدل چند فازی معمولی
۱۷	۲-۱- دیدگاه‌های مدل‌سازی جریان‌های چند فازی
۱۷	دیدگاه اولر - اولر
۱۸	مدل VOF
۱۸	مدل مخلوط
۱۸	مدل اولری
۱۹	۲-۲- مقایسه‌ی مدل‌ها
۱۹	راهنمای انتخاب میان مدل‌های مخلوط و اولری
۲۰	اثر بارگیری ذره‌ای
۲۱	اهمیت عدد استوک
۲۲	مثال‌ها
۲۲	۲-۳- طرح زمانی در جریان چند فازی
۲۴	۲-۴- پایداری و همگرایی
۲۵	۳- تئوری مدل حجم سیال (VOF)
۲۵	۳-۱- مروری بر محدودیت‌های مدل VOF
۲۵	محدودیت‌ها
۲۶	محاسبات حالت پایا و گذاری VOF
۲۷	۳-۲- معادله‌ی کسر حجمی
۲۷	طرح ضمنی
۲۸	طرح صریح
۲۸	درون‌یابی در نزدیک فصل مشترک
۲۹	طرح بازسازی هندسه
۳۰	طرح‌دهنده - گیرنده

۳۱	طرح CICSAM
۳۱	۳-۳- خواص مواد
۳۱	۳-۴- معادله‌ی مومنتوم
۳۲	۳-۵- معادله‌ی انرژی
۳۲	۳-۶- معادلات اسکالر دیگر
۳۲	۳-۷- وابسته به زمان
۳۳	۳-۸- کشش سطحی و چسبندگی دیوار
۳۳	کشش سطحی
۳۵	مواردی که اثرات کشش سطحی مهم است
۳۶	چسبندگی دیوار
۳۷	۳-۹- جریان کانال باز
۳۸	شرایط مرزی بالادست
۳۸	ورودی فشار
۳۹	شدت جریان جرمی
۳۹	مشخصات کسر حجمی
۴۰	شرایط مرزی پایین‌دست
۴۰	فشار خروجی
۴۰	جریان خروجی
۴۱	مشخصات کسر حجمی جریان برگشتی
۴۳	۴- تئوری مدل مخلوط
۴۳	۴-۱- مرور و محدودیت‌های مدل مخلوط
۴۳	محدودیت‌ها
۴۵	۴-۲- معادله‌ی پیوستگی
۴۵	۴-۳- معادله‌ی مومنتوم
۴۶	۴-۴- معادله‌ی انرژی
۴۶	۴-۵- سرعت نسبی (لغزش) و سرعت راندگی
۴۸	۴-۶- معادله‌ی کسر حجمی برای فازهای ثانویه
۴۸	۴-۷- خواص دانه‌ای
۴۸	ویسکوزیته‌ی ناشی از برخورد ذرات
۴۹	ویسکوزیته‌ی جنبشی
۴۹	۴-۸- دمای دانه‌ای
۵۰	۴-۹- فشار جامد
۵۱	۵- تئوری مدل اولری
۵۱	۵-۱- مرور و محدودیت‌های مدل اولری

۵۲	محدودیت‌ها
۵۲	۲-۵- کسرهای حجمی
۵۳	۳-۵- معادلات بقاء
۵۳	معادلات در فرم کلی
۵۳	بقای جرم
۵۴	بقای مومنتوم
۵۴	نیروهای برآ
۵۵	نیروی جرم مجازی
۵۶	بقای انرژی
۵۶	معادلاتی که توسط Fluent حل می‌شوند
۵۶	معادله پیوستگی
۵۷	معادلات مومنتوم سیال - سیال
۵۷	معادلات مومنتوم سیال - جامد
۵۸	بقای انرژی
۵۸	۴-۵- ضرایب تبادل بین فازی
۵۸	ضریب تبادل سیال - سیال
۵۹	مدل Naumam, Schiller
۵۹	مدل Alexander, Morsi
۶۰	مدل متقارن
۶۱	ضریب تبادل سیال - جامد
۶۱	مدل Syamlal-O'Brien
۶۲	مدل Wen, Yu
۶۳	مدل Gidaspow
۶۳	ضریب تبادل جامد - جامد
۶۳	۵-۵- فشار جامد
۶۵	تابع توزیع شعاعی
۶۷	۶-۵- حداکثر حد پرشوندگی در مخلوط‌های دو تایی
۶۷	۷-۵- تنش‌های برشی جامد
۶۸	ویسکوزیته‌ی برخورد
۶۸	ویسکوزیته‌ی جنبشی
۶۸	ویسکوزیته‌ی توده
۶۸	ویسکوزیته‌ی اصطکاکی
۷۱	۸-۵- دمای دانه‌ای
۷۲	۹-۵- انتقال حرارت
۷۳	ضریب تبادل حرارت

۷۳	۵-۱۰- مدل های اغتشاش
۷۴	گزینه های مدل اغتشاش $\epsilon$ -k
۷۴	گزینه های مدل اغتشاش RSM
۷۴	مدل اغتشاش مخلوط $\epsilon$ -k
۷۵	مدل اغتشاش پراکنده $\epsilon$ -k
۷۵	فرضیات
۷۶	اغتشاش در فاز پیوسته
۷۷	اغتشاش در فاز پراکنده
۷۹	انتقال مومنتوم اغتشاش بین فازی
۸۰	مدل اغتشاش $\epsilon$ -k برای هر فاز
۸۰	معادلات انتقال
۸۱	انتقال مومنتوم اغتشاش بین فازی
۸۱	مدل اغتشاش RSM
۸۲	مدل اغتشاش پراکنده RSM
۸۳	مدل اغتشاش مخلوط RSM
۸۴	۵-۱۱- روش حل در Fluent
۸۴	معادله تصحیح فشار
۸۴	کسرهای حجمی
۸۵	۶- تئوری مدل بخار مرطوب
۸۵	۶-۱- مرور و محدودیت های مدل بخار مرطوب
۸۵	محدودیت ها
۸۶	۶-۲- معادلات جریان بخار مرطوب
۸۷	۶-۳- مدل تغییر فاز
۸۹	۶-۴- خواص ترمودینامیک بخار مرطوب
۸۹	معادلات حالت
۹۰	خط بخار اشباع
۹۱	خط مایع اشباع
۹۱	خواص مخلوط
۹۳	۷- مدل سازی انتقال جرم در جریان های چند فازی
۹۳	۷-۱- ترم های چشمه ناشی از انتقال جرم
۹۳	معادله ی جرم
۹۳	معادله ی مومنتوم
۹۴	معادله ی انرژی
۹۴	معادله ی اجزا



۹۴	سایر معادلات اسکالر
۹۴	۷-۲- نرخ انتقال جرم ثابت یک‌سویه
۹۵	۷-۳- UDF برای انتقال جرم
۹۵	۷-۴- مدل‌های کاویتاسیون
۹۶	مدل کاویتاسیون اصلی
۹۶	قابلیت‌های مدل کاویتاسیون
۹۷	محدودیت‌های به کارگیری مدل کاویتاسیون در Fluent
۹۷	کسر جرمی بخار و انتقال بخار
۹۸	نوسانات فشار ناشی از اغتشاش
۹۸	اثرات گازهای غیر قابل میعان
۱۰۰	نرخ تغییر فاز
۱۰۰	راهنمایی‌های بیشتر برای مدل کاریتاسیون
۱۰۰	ضرایب آسایش
۱۰۱	شرایط اولیه
۱۰۱	گازهای غیر قابل میعان
۱۰۱	محدودیت‌های متغیرهای وابسته
۱۰۱	ضریب آسایش برای معادله تصحیح فشار
۱۰۲	طرح‌های انفصال‌سازی فشار
۱۰۲	قابلیت مدل کاویتاسیون گسترش یافته
۱۰۲	مدل کاویتاسیون چند فازی
۱۰۳	مدل کاویتاسیون انتقال اجزای چند فازی
۱۰۵	۸- مدل‌سازی انتقال اجزا در جریان‌های چند فازی
۱۰۶	۸-۱- محدودیت‌ها
۱۰۶	۸-۲- انتقال جرم و مومنتوم با انتقال اجزای چند فازی
۱۰۷	انتقال جرم
۱۰۷	انتقال مومنتوم
۱۰۸	انتقال اجزا
۱۰۸	انتقال حرارت
۱۱۱	۹- مراحل استفاده از یک مدل چند فازی
۱۱۲	۹-۱- فعال کردن مدل چند فازی
۱۱۳	۹-۲- حل یک جریان چند فازی همگن
۱۱۳	۹-۳- تعریف فازها
۱۱۴	۹-۴- لحاظ کردن نیروهای حجمی
۱۱۵	۹-۵- مدل‌سازی انتقال اجزای چند فازی

۱۱۷	۹-۶- مشخص کردن واکنش‌های هتروژن
۱۱۸	۹-۷- لحاظ کردن اثرات انتقال جرم
۱۲۰	۹-۸- تعریف شرایط مرزی چند فازی
۱۲۱	شرایط مرزی برای فازهای مخلوط و منفرد
۱۲۱	مدل VOF
۱۲۳	مدل Mixture
۱۲۴	مدل Eulerian
۱۲۵	نسبت سرعت
۱۲۵	کسر حجمی
۱۲۹	مراحل قرار دادن شرایط مرزی
۱۳۲	مراحل کپی کردن شرایط مرزی
۱۳۵	۱۰-۱- قرار دادن مدل VOF
۱۳۵	۱۰-۱- انتخاب فرمولاسیون VOF
۱۳۵	طرح صریح
۱۳۵	وابستگی زمان با طرح درون‌یابی صریح
۱۳۶	وابستگی زمان با طرح درون‌یابی بازسازی مجدد هندسه
۱۳۶	وابستگی زمان با طرح درون‌یابی دهنده - گیرنده
۱۳۷	طرح ضمنی
۱۳۷	طرح وابسته به زمان با درون‌یابی ضمنی
۱۳۷	طرح درون‌یابی ضمنی با حالت پایا
۱۳۷	مثال‌ها
۱۳۸	۱۰-۲- مدل‌سازی جریان‌های کانال باز
۱۳۹	تعریف گروه ورودی
۱۳۹	تعریف گروه خروجی
۱۴۰	قرار دادن گروه ورودی
۱۴۰	قرار دادن گروه خروجی
۱۴۱	تعیین ارتفاع سطح آزاد
۱۴۱	تعیین ارتفاع پایین
۱۴۲	مشخص کردن ارتفاع کل
۱۴۲	تعیین مقدار سرعت
۱۴۳	تعیین فاز ثانویه برای ورودی
۱۴۳	انتخاب روش مشخصه‌ی فشار
۱۴۳	محدودیت‌ها
۱۴۴	توصیه‌هایی برای قرار دادن یک مسئله‌ی کانال باز
۱۴۵	۱۰-۳- تعریف فازها برای مدل VOF

۱۴۵	تعریف فاز اولیه
۱۴۶	تعریف فاز ثانویه
۱۴۷	لحاظ کردن اثر کشش سطحی و چسبندگی دیواره
۱۴۸	۱۰-۴- قرار دادن پارامترهای وابسته به زمان برای مدل VOF
۱۴۹	۱۰-۵- مدل سازی جریان های تراکم پذیر
۱۵۰	۱۰-۶- مدل سازی انجماد / ذوب
۱۵۱	۱۱- قرار دادن مدل Mixture
۱۵۱	۱۱-۱- تعریف فازها برای مدل مخلوط
۱۵۱	تعریف فاز اولیه
۱۵۱	تعریف فاز ثانویه غیر دانه ای
۱۵۲	تعریف فاز ثانویه دانه ای
۱۵۵	تعریف دراگ میان فازها
۱۵۵	تعریف سرعت لغزش
۱۵۶	۱۱-۲- لحاظ کردن اثرات کاویتاسیون
۱۵۸	۱۱-۳- مدل سازی جریان های تراکم پذیر
۱۵۹	۱۲- قرار دادن مدل Eulerian
۱۵۹	۱۲-۱- رهنمودهای بیشتر برای شبیه سازی چند فازی Eulerian
۱۵۹	۱۲-۲- تعریف فازها برای مدل Eulerian
۱۵۹	تعریف فاز اولیه
۱۶۰	تعریف فاز ثانویه غیر دانه ای
۱۶۱	تعریف فاز ثانویه دانه ای
۱۶۵	تعریف برهمکنش میان فازها
۱۶۵	مشخص کردن تابع دراگ
۱۶۶	مشخص کردن ضرایب ارتجاعی
۱۶۷	لحاظ کردن نیروی برآ (Lift Force)
۱۶۷	لحاظ کردن نیروی جرم مجازی
۱۶۸	۱۲-۳- مدل سازی اغتشاش
۱۶۹	لحاظ کردن ترم های چشمه
۱۶۹	اصلاح ویسکوزیته ی اغتشاش مدل k-ε برای جریان چند فازی
۱۶۹	۱۲-۴- لحاظ کردن اثرات انتقال حرارت
۱۷۰	۱۲-۵- مدل سازی جریان های تراکم پذیر
۱۷۳	۱۳- تنظیمات مدل بخار مرطوب
۱۷۳	۱۳-۱- استفاده از خواص بخار مرطوب ترمودینامیکی تعریف شده توسط کاربر
۱۷۴	۱۳-۲- نوشتن توابع خاصیت بخار مرطوب تعریف شده توسط کاربر UDWSPF

۱۷۷	۱۳-۳- کامپایل کردن UDWSPF و ساخت یک فایل برنامه مشترک
۱۷۸	۱۳-۴- بار کردن فایل برنامه مشترک UDWSPF
۱۷۹	۱۳-۵- مثال UDWSPF
۱۸۷	۱۴- استراتژی حل برای مدل سازی چند فازی
۱۸۷	۱۴-۱- قرار دادن کسرهای حجمی اولیه
۱۸۷	۱۴-۲- مدل VOF
۱۸۷	قرار دادن مکان فشار مرجع
۱۸۸	طرح درون یابی فشار
۱۸۸	انتخاب طرح انفصال سازی برای فرمولاسیون های ضمنی و صریح
۱۸۹	کوپلینگ فشار - سرعت و زیر تحفیف برای فرمولاسیون های ناپایا
۱۸۹	ضرایب زیر تحفیف برای فرمولاسیون حالت پایا
۱۸۹	۱۴-۳- مدل Mixture
۱۸۹	قرار دادن ضرایب زیر تحفیف برای سرعت لغزش
۱۹۰	اجرای یک حل اولیه
۱۹۰	۱۴-۴- مدل Eulerian
۱۹۰	محاسبه ی یک حل اولیه
۱۹۰	صرف نظر موقت از نیروهای لیفت و جرم مجازی
۱۹۱	استفاده از سیکل W چندشیکه ای
۱۹۱	۱۴-۵- مدل بخار مرطوب
۱۹۳	۱۵- پس پردازش مدل سازی چند فازی
۱۹۳	۱۵-۱- متغیرهای خاص مدل
۱۹۳	مدل VOF
۱۹۳	مدل Mixture
۱۹۴	مدل Eulerian
۱۹۴	انتقال اجزای چند فازی
۱۹۵	مدل بخار مرطوب
۱۹۶	۱۵-۲- نمایش دادن بردارهای سرعت
۱۹۶	۱۵-۳- گزارش فلاکس ها
۱۹۶	۱۵-۴- گزارش نیروهای دیوار
۱۹۶	۱۵-۵- گزارش شدت جریان ها
۱۹۹	واژه نامه
۲۰۳	منابع