

مدل سازی و شبیه سازی رفتار گاز درون

ماشین سانتریفیوژ گازی

جلد اول - آشنایی با ماشین سانتریفیوژ گازی و روش های
مدل سازی رفتار گاز درون آن

تهیه شده توسط جمعی از پژوهشگران و متخصصین سازمان انرژی اتمی

زیر نظر:

علی اکبر صالحی

سید جابر صفدری

علیرضا کشتکار

محمد حسن ملاح

M.H.Mallah, A.R. Keshtkar, S. J. Safdari, A. Salehi

گردآورنده: علی اکبر صالحی، سیدجابر صفدری، علیرضا کشتکار، محمدحسن ملاح

مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار گاز درون ماشین سانتریفیوژ گازی (جلد ۲)

(جلد اول: آشنایی با ماشین سانتریفیوژ گازی و روش‌های مدل‌سازی رفتار گاز درون آن)

تهران: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۳۹۸.

۸۹۴ ص: مصور، جدول، نمودار.

ISBN: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۴۱-۵

فهرست نویسی براساس اطلاعات فیبا

عنوان اصلی: مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار گاز درون ماشین سانتریفیوژ گازی

عنوان فرعی: آشنایی با ماشین سانتریفیوژ گازی و روش‌های مدل‌سازی رفتار گاز درون آن

رده‌بندی کنگره: TJ۹۰۰

رده‌بندی دیویی: ۶۰۷/۵۱

شماره‌ی کتابشناسی ملی: ۶۰۸۰۸

نام کتاب: مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار گاز درون ماشین سانتریفیوژ گازی

گردآورنده: علی اکبر صالحی، سیدجابر صفدری، علیرضا کشتکار، محمدحسن ملاح

ویراستاری علمی: محسن حسونند

ناظر علمی و فنی: سیدابوالفضل قاسمی

ویراستار ادبی و فنی: مهدیه السادات عامل ابراهیمی

ویرایش صفحه‌بندی و تنظیم جلد: شادی معماری‌آذر

حروف‌چینی: مریم رحیمی

تیراژ: ۲۰۰ جلد

چاپ: ۱۳۹۸

نوبت چاپ: اول

قیمت: ۹۹۰۰۰۰ ریال

چاپ و صحافی: چاپخانه دیجیتال آبنوس

ناشر: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، nstp@aeoi.org.ir

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۴۱۴-۴۱-۵

کلیدی حقوق چاپ و انتشار این اثر متعلق به پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای است.



اشارات پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

nstp.nstri.ir

پیشگفتار نویسندگان

به نام خداوند لوح و قلم
خدایی که داننده‌ی رازهاست

حقیقت نگار وجود و عدم
نخستین سرآغاز آغازهاست

در آغاز باید پیشانی ستایش و ستاس به درگاه ایزد مَنان بساییم که بر ما مَنّت نهاد و توفیق نگارش این اثر را به ما ارزانی داشت. خوب بختنامه در حال حاضر بخش اعظمی از جامعه‌ی بشری به تأثیر غیرقابل اجتناب و شگرف تولید انرژی پاک و هم‌پای آن تأمین سلامت، رفاه و سعادت آدمیان پی برده و از این رهگذر دستیابی به منابع مختلف انرژی در سطوح منطقه‌ای و بین‌المللی به یکی از رویکردهای اصلی دولت‌ها در راستای دستیابی به توسعه‌ی همه‌جانبه تبدیل شده است. در این میان مایه‌ی بسی خرسندی است که نقش انرژی هسته‌ای به عنوان یکی از دستاوردهای کم‌نظیر علوم و فنون جدید در سراسر گیتی به ویژه در کشورهای توسعه یافته بیش از پیش مورد توجه و عنایت قرار گرفته است. لازم به توضیح است که در مسیر وصول به اهداف راهبردی صنعت هسته‌ای، دستیابی به چرخه‌ی کامل سوخت هسته‌ای از جایگاهی ویژه در مساز برخوردار است. چرخه سوخت هسته‌ای شامل روندها و فرآیندهای مختلفی است که از اکتشاف و استخراج مواد اولیه آغاز شده و به تبدیل سنگ معدن اورانیم به سوخت مورد استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای منجر می‌شود.

در این چارچوب باید به این نکته اذعان نمود که یکی از مراحل اصلی دستیابی به چرخه‌ی کامل سوخت هسته‌ای، غنی‌سازی اورانیم می‌باشد. در حال حاضر و در آغاز هزاره‌ی سوم میلادی متداول‌ترین روش صنعتی برای غنی‌سازی اورانیم استفاده از ماشین‌های سانتریفیوژ گازی است. از

این منظر پژوهش و کنکاش در ابعاد و زوایای مختلف این موضوع و گردآوری اطلاعات در زمینه‌ی ماشین‌های سانتریفیوژ به منظور ارتقاء سطح دانش و فناوری کشور در حوزه‌ی غنی‌سازی از اهمیت بسزایی برخوردار است. با توجه به فقر منابع و مآخذ موجود و کمبود مستندات مدون در این زمینه، جمعی از استادان و پژوهشگران فعال در صنعت هسته‌ای کشور بر آن شدند تا به واسطه‌ی تضارب و تعاطی افکار و با هدف رفع بخشی از کاستی‌های موجود کتاب حاضر را به رشته‌ی تحریر درآورده و به پیشگاه محققان و علاقمندان این عرصه تقدیم نمایند. در این اثر ابتدا اغلب روش‌های ارائه شده برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار گاز معرفی شده و پس از آن، روش‌ها قابل استفاده برای بررسی و کنکاش در رفتار گاز درون روتور ماشین سانتریفیوژ گازی شامل «روش‌های تحلیلی، عددی و ملکولی» به صورت جامع بیان شده است. امید است این مجموعه بتواند به هکتاب دانشجویان، پژوهشگران و سایر علاقمندان به پژوهش در این عرصه باشد. همچنین شایان ذکر است که فصول و موضوعات این کتاب به گونه‌ای تنظیم و تدوین شده است که از مفاهیم ابتدایی آغاز شده و به تدریج وارد جزئیات و ظرایف و دقائق موضوع می‌شود. در این اثر انواع مدل‌ها، فرمول‌ها، معادلات و سازوکارهای اصلی راهبردی به روشنی و با وضوح کامل تشریح شده است. در پایان هر فصل تمرین‌ها منظور آموزش مفاهیم کلیدی، مجموعه‌ای از مسائل مرتبط با موضوعات آن فصل از کتاب ارائه شده است.

جلد اول این کتاب شامل ۱۴ فصل است که در فصول ۱ تا ۵، مفاهیم پایه، شامل آشنایی با ماشین سانتریفیوژ گازی پارامترهای اصلی در عملکرد ماشین، خواص فیزیکی گاز و در نهایت تقسیم بندی نواحی جریان گاز درون روتور بیان شده است. افزون بر این در فصول ۶ و ۷، معادلات و مناسبات حاکم بر جریان گاز در ناحیه پیوسته و روش‌های حل عددی آن‌ها، که قابلیت استفاده برای شرایط و ابعاد هندسی مختلف را دارد - ارائه شده است. اما در فصول ۸، ۹ و ۱۰، معادلات حاکم بر جریان گاز از دیدگاه ملکولی و روش‌های حل آن‌ها - که قابلیت استفاده برای شرایط و ابعاد هندسی مختلف را دارد - ذکر شده است. افزون بر این، در فصل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب به مدل‌سازی رفتار گاز درون روتور ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و ملکولی پرداخته شده است. در فصل ۱۳ نیز مدل‌سازی رفتار گاز درون روتور ماشین سانتریفیوژ با

ترکیب روش‌های "CFD" و "DSMC" بیان شده است. همچنین در آخرین فصل از این کتاب، مدل‌سازی رفتار گاز در فضای بین روتور و بدنه به روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در ضمن جلد دوم این کتاب در شرف تهیه بوده و بعد از اخذ مجوزهای لازم در آینده منتشر خواهد شد.

ناگفته پیداست که این کتاب به هیچ روی عاری از عیب و نقص نخواهد بود و از این رو نگارندگان این اثر از استادان، صاحب‌نظران، محققان و دانشجویان عزیز دعوت می‌نمایند تا از رهگذر ارائه انتقادات سازنده‌ی خود پدیدآورندگان این اثر را در مسیر اصلاح نواقص و تکمیل مطالب یاری نمایند.

نویسندگان

زمستان ۱۳۹۸

www.ketab.ir

فهرست

فصل اول

۱	روش های جداسازی اینتریفیوژنی
۳	علائم اختصاری
۴	۱-۱ مقدمه
۶	۲-۱ روش نفوذ گازی
۸	۳-۱ روش سانتریفیوژ گازی
۹	۴-۱ تقطیر و تبادل شیمیایی
۱۰	۵-۱ روش جداسازی الکترومغناطیسی
۱۲	۶-۱ روش جداسازی آیرودینامیکی
۱۳	۷-۱ روش جداسازی لیزری
۱۵	۸-۱ مقایسه روش های غنی سازی اورانیم
۲۲	۹-۱ ضرایب جداسازی و برش
۲۴	۱۰-۱ کار جداسازی و توان جداسازی
۲۵	مسائل
۲۶	مراجع

فصل دوم

۲۷	آشنایی با ماشین سانتریفیوژ گازی
۲۹	علائم اختصاری
۳۰	۱-۲ مقدمه
۳۱	۲-۲ انواع سانتریفیوژ های گازی

۳۱	..... ۱-۲-۲ سانتریفیوژ تبخیری
۳۲	..... ۲-۲-۲ سانتریفیوژ با جریان همسو
۳۳	..... ۳-۲-۲ سانتریفیوژ با جریان‌های رفت و برگشتی یا ناهمسو
۳۶	..... ۳-۲-۲ مروری بر سانتریفیوژهای گازی دهه‌های ۴۰ تا ۸۰
۳۸	..... ۱-۳-۲ سانتریفیوژ گازی بيمز
۳۹	..... ۲-۳-۲ سانتریفیوژ گازی گروث
۴۳	..... ۳-۳-۲ سانتریفیوژ گازی زيب
۴۴	..... ۴-۲-۲ آشناي با زنجيره‌ي جداسازي
۴۴	..... ۱-۴-۲ تعيبت زنجيره
۴۵	..... ۲-۴-۲ انواع زنجير
۴۷	..... ۵-۲ معرفي زيرسيستم‌ي يك ماشين سانتریفیوژ گازی
۴۷	..... ۱-۵-۲ زيرسيستم دوار
۵۰	..... ۲-۵-۲ زيرسيستم پايه و بنده
۵۱	..... ۳-۵-۲ زيرسيستم موتور
۵۳	..... ۴-۵-۲ زيرسيستم تعليق بالا
۵۵	..... ۵-۵-۲ زيرسيستم تعليق پايين
۵۵	..... ۶-۵-۲ زيرسيستم خلاء و گازرسانی
۵۹	..... ۷-۵-۲ زيرسيستم خنک‌کننده
۶۲	..... ۶-۲ وضعيت ماشين‌هاي سانتریفیوژ گازی از دهه‌ي ۸۰ به بعد
۶۳	..... ۱-۶-۲ آشناي با ماشين‌هاي سانتریفیوژ گازی آمريکايي
۶۶	..... ۲-۶-۲ آشناي با ماشين‌هاي سانتریفیوژ گازی يورنکو
۷۰	..... ۳-۶-۲ آشناي با ماشين‌هاي سانتریفیوژ گازی روسي
۷۶	..... ۴-۶-۲ ماشين‌هاي سانتریفیوژ گازی ساير کشورها
۷۹	..... مسائلي
۸۰	..... مراجع

فصل سوم

۸۱	.....	آشنایی با رفتار گاز درون روتور ماشین سانتریفیوژ گازی
۸۳	.....	علایم اختصاری
۸۵	.....	۱-۳ مقدمه
۸۶	.....	۲-۳ جریان شعاعی
۸۶	.....	۱-۲-۳ تشکیل جریان شعاعی درون ماشین سانتریفیوژ گازی
۸۷	.....	۲-۲-۳ تشابه نیروی کرانش زمین با نیروی گریز از مرکز در سانتریفیوژ با جریان شعاعی
۸۹	.....	۳-۲-۳ جدایش اولیه در سانتریفیوژ گازی با جریان شعاعی
۹۲	.....	۳-۳ جریان محوری
۹۲	.....	۱-۳-۳ مفهوم چرخش سیال
۹۴	.....	۲-۳-۳ جریان چرخشی در رور رور
۹۷	.....	۳-۳-۳ تشابه جریان درون روتور با جریان شعاعی در چرخش
۱۰۱	.....	۴-۳-۳ اثر محرک‌ها بر جریان محوری
۱۰۱	.....	۱-۴-۳-۳ محرک اختلاف دمای کپ
۱۰۳	.....	۲-۴-۳-۳ محرک گرادیان دمای دیواره
۱۰۴	.....	۳-۴-۳-۳ محرک اسکوپ
۱۰۸	.....	۴-۴-۳-۳ تجمیع محرک‌ها
۱۰۹	.....	۵-۳-۳ انواع پروفایل‌های جریان محوری
۱۰۹	.....	۱-۵-۳-۳ پروفایل ایده‌آل
۱۱۰	.....	۲-۵-۳-۳ پروفایل حرارتی
۱۱۱	.....	۳-۵-۳-۳ پروفایل دوپوسته‌ای
۱۱۲	.....	۴-۳ بررسی عوامل مؤثر بر جریان محوری
۱۱۲	.....	۱-۴-۳ معرفی عوامل مؤثر
۱۱۶	.....	۲-۴-۳ اثر اختلاف دما
۱۱۷	.....	۳-۴-۳ اثر اسکوپ
۱۱۸	.....	۱-۳-۴-۳ مدل کردن اسکوپ با استفاده از مفهوم نیروی درگ
۱۲۲	.....	۲-۳-۴-۳ مدل کردن اسکوپ با استفاده از مفهوم جریان برگشتی
۱۲۳	.....	۴-۴-۳ اثر خوراک

۱۲۳	.....	۱-۴-۳ اثر نرخ خوراک.....
۱۲۹	.....	۲-۴-۳ اثر سرعت، زاویه و موقعیت محوری ورود خوراک.....
۱۳۱	.....	۵-۴-۳ اثر نوع گاز.....
۱۳۴	.....	۶-۴-۳ اثر سایر پارامترهای عملیاتی.....
۱۳۴	.....	۱-۶-۳ اثر برش.....
۱۳۵	.....	۲-۶-۳ اثر سرعت و شارجرمی محوری.....
۱۳۷	.....	۳-۶-۳ اثر فشار دیواره.....
۱۴۰	.....	مسائل.....
۱۴۲	.....	مراجع.....

فصل چهارم

۱۴۵	.....	نحوه محاسبه پارامترهای جداسازی در ماشین سانتریفیوژ گازی.....
۱۴۷	.....	علامه اختصاری.....
۱۴۹	.....	۱-۴ مقدمه.....
۱۴۹	.....	۲-۴ پارامترهای اصلی جداسازی در سیستم‌های جداسازی.....
۱۴۹	.....	۱-۲-۴ نسبت فراوانی.....
۱۵۰	.....	۲-۲-۴ ضرایب جداسازی.....
۱۵۲	.....	۳-۲-۴ برش.....
۱۵۳	.....	۴-۲-۴ توان جداسازی با استفاده از تابع ارزش.....
۱۵۷	.....	۳-۴ پارامترهای اصلی جداسازی در سیستم‌های چندجزیی.....
۱۵۷	.....	۱-۳-۴ ضرایب جداسازی.....
۱۵۹	.....	۲-۳-۴ برش.....
۱۶۱	.....	۳-۳-۴ توان جداسازی وود.....
۱۶۷	.....	۴-۳-۴ توان جداسازی کای.....
۱۶۷	.....	۵-۳-۴ توان جداسازی یاماموتو.....
۱۶۹	.....	۶-۳-۴ توان جداسازی پالکین.....
۱۶۹	.....	۷-۳-۴ توان جداسازی فیلیوف.....
۱۷۰	.....	۴-۴ تئوری دیراک.....

۱۷۰	.....	۵-۴ تنوری راتز
۱۷۲	.....	۶-۴ بازده جداسازی در ماشین سانتریفیوژ گازی
۱۷۲	.....	۱-۶-۴ ضریب بازده حالت ایده‌آل
۱۷۳	.....	۲-۶-۴ ضریب بازده گردشی
۱۷۵	.....	۳-۶-۴ ضریب بازده الگوی جریان
۱۷۷	.....	۴-۶-۴ بازده آزمایشگاهی
۱۷۸	.....	۵-۶-۴ ضریب رده کل
۱۷۹	.....	مسائل
۱۸۰	.....	مراجع

فصل پنجم

۱۸۱	.....	معرفی خواص فیزیکی گازها و تقسیم بواخر جریان گاز درون روتور
۱۸۳	.....	علام اختصاری
۱۸۵	.....	۱-۵ مقدمه
۱۸۶	.....	۲-۵ معرفی گازها
۱۹۲	.....	۱-۲-۵ ضریب نفوذ
۱۹۲	.....	۱-۱-۲-۵ ضریب نفوذ در سیستم‌های دوجزیی
۱۹۵	.....	۲-۱-۲-۵ ضریب نفوذ در سیستم‌های چندجزیی
۲۰۰	.....	۲-۲-۵ چگالی
۲۰۱	.....	۳-۲-۵ ویسکوزیته
۲۰۹	.....	۴-۲-۵ ظرفیت گرمایی ویژه
۲۱۰	.....	۵-۲-۵ ضریب هدایت گرمایی
۲۱۱	.....	۶-۲-۵ ضریب نفوذ گرمایی
۲۱۲	.....	۷-۲-۵ عدد پرانتل
۲۱۲	.....	۳-۵ دیدگاه میکروسکوپی
۲۱۲	.....	۱-۳-۵ توصیف مولکولی
۲۱۳	.....	۲-۳-۵ مفهوم گاز رقیق
۲۱۵	.....	۳-۳-۵ تعیین خواص ماکروسکوپی در یک گاز ساده با دیدگاه میکروسکوپی

۲۱۷	.....	۱-۳-۳-۵ فرکانس بر خورد و میانگین پوش آزاد
۲۲۰	.....	۲-۳-۳-۵ محاسبه ی ضریب ویسکوزیته برای یک گاز رقیق
۲۲۹	.....	۳-۳-۳-۵ محاسبه ی ضریب هدایت حرارتی برای گاز رقیق
۲۳۳	.....	۴-۳-۳-۵ محاسبه ی ضریب خود نفوذی برای یک گاز رقیق
۲۳۶	.....	۴-۳-۵ توسعه روابط برای گاز مخلوط
۲۴۵	.....	۴-۵ رژیم های جریان و معادلات حاکم بر آن ها
۲۴۵	.....	۱-۴-۵ عدد ناسن
۲۴۷	.....	۲-۴-۵ رژیم جریان پیوسته
۲۴۸	.....	۳-۴-۵ رژیم جریان لغزشی
۲۵۰	.....	۴-۴-۵ رژیم جریان گذر
۲۵۱	.....	۵-۴-۵ رژیم جریان ریکمانی آزاد
۲۵۲	.....	۵-۵ تقسیم نواحی درون و تو با استفاده از عدد ناسن
۲۵۳	.....	۶-۵ تقسیم نواحی درون روتور استاتور روش لایه ی مرزی
۲۵۳	.....	۱-۶-۵ معرفی روش لایه ی مرزی
۲۵۶	.....	۲-۶-۵ تعیین لایه ها بر اساس عدد اکمن
۲۵۹	.....	مسائل
۲۶۰	.....	مراجع

فصل ششم

۲۶۵	.....	معادلات حاکم بر جریان گاز در ناحیه ی پیوسته
۲۶۷	.....	علامه اختصاری
۲۷۰	.....	۱-۶ مقدمه
۲۷۰	.....	۲-۶ تعاریف اولیه
۲۷۰	.....	۱-۲-۶ جریان لزج و غیر لزج
۲۷۱	.....	۲-۲-۶ جریان آرام و مغشوش
۲۷۴	.....	۳-۲-۶ اعداد بدون بعد
۲۷۴	.....	۱-۳-۲-۶ عدد ماخ و تراکم پذیری
۲۷۴	.....	۲-۳-۲-۶ عدد رینولدز

۲۷۶	..... عدد اکمن ۳-۲-۶
۲۷۷	..... پدیده‌ی شوک ۴-۲-۶
۲۷۹	..... معادله‌ی بقای جرم ۳-۶
۲۸۳	..... معادلات بقای اندازه‌ی حرکت ۴-۶
۲۸۳	..... شکل عمومی معادلات ۱-۴-۶
۲۸۸	..... معادلات ناویر- استوکس ۲-۴-۶
۲۸۹	..... معادلات ناویر- استوکس در مختصات استوانه‌ای ۳-۴-۶
۲۹۴	..... معادله‌ی بی‌انرژی ۵-۶
۲۹۸	..... جریان آشنا ۶-۶
۲۹۸	..... مفاهیم آشفتگی ۱-۶-۶
۳۰۰	..... مقیاس‌های جریان آشفتگی ۲-۶-۶
۳۰۴	..... لزوم متوسط‌گیری ۳-۶-۶
۳۰۵	..... روش‌های متوسط‌گیری ۴-۶-۶
۳۰۵	..... متوسط‌گیری زمانی ۱-۴-۶-۶
۳۰۶	..... متوسط‌گیری فاورا ۲-۴-۶-۶
۳۰۶	..... متوسط‌گیری مکانی ۳-۴-۶-۶
۳۰۸	..... مدل‌های اغتشاشی ۵-۶-۶
۳۰۸	..... مدل‌های آشفتگی RANS ۱-۵-۶-۶
۳۳۷	..... مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ۲-۵-۶-۶
۳۴۳	..... مدل شبیه‌سازی گردابه‌های جداشونده ۳-۵-۶-۶
۳۴۴	..... بررسی کارایی روش‌های مختلف ۶-۶-۶
۳۵۰	..... معادلات بقای جرم برای سیستم‌های چندجزیی ۷-۶
۳۵۰	..... مفاهیم و تعاریف اولیه‌ی انتقال جرم ۱-۷-۶
۳۵۶	..... معادله‌ی عمومی توزیع غلظت در مختصات دکارتی ۲-۷-۶
۳۵۹	..... معادله‌ی عمومی توزیع غلظت در مختصات استوانه‌ای ۳-۷-۶
۳۶۲	..... معادله‌ی دیفرانسیل تغییرات غلظت درون روتور ۴-۷-۶
۳۶۴	..... مسائل
۳۶۶	..... مراجع

فصل هفتم

- ۳۶۹ روش‌های عددی حل معادلات در ناحیه‌ی پیوسته.
- ۳۷۱ علایم اختصاری.
- ۳۷۳ ۱-۷ مقدمه.
- ۳۷۵ ۲-۷ شبکه‌بندی.
- ۳۷۸ ۳-۷ روش‌های گسسته‌سازی معادلات.
- ۳۷۸ ۱-۳-۷ روش اختلاف محدود.
- ۳۸۱ ۲-۳-۷ روش المان محدود.
- ۳۸۳ ۱-۲-۳-۷ انتگرال وی و تشکیل جواب ضعیف معادله در روش المان محدود.
- ۳۸۷ ۲-۲-۳-۷ روش باقی‌مانده‌های روش.
- ۳۸۸ ۳-۳-۷ روش حجم محدود.
- ۳۸۹ ۱-۳-۳-۷ گسسته‌سازی یک مسأله انتقال حرارت با استفاده از روش حجم محدود.
- ۳۹۲ ۲-۳-۳-۷ چهار قانون پایه‌ای برای استخراج دالات گسسته‌سازی شده.
- ۳۹۴ ۴-۷ تقریب جمله‌های مشتق.
- ۳۹۵ ۱-۴-۷ تقریب مرکزی.
- ۳۹۶ ۲-۴-۷ تقریب بالادست.
- ۴۰۰ ۵-۷ الگوریتم‌های حل معادلات.
- ۴۰۰ ۱-۵-۷ روش بر پایه‌ی فشار.
- ۴۰۱ ۱-۱-۵-۷ روش حل جدا از هم.
- ۴۱۳ ۲-۱-۵-۷ روش بر پایه‌ی فشار به روش هم‌زمان.
- ۴۱۴ ۶-۷ روش بر پایه‌ی چگالی.
- ۴۱۶ ۱-۶-۷ روش AUSM.
- ۴۲۲ ۲-۶-۷ روش Roe.
- ۴۳۵ ۷-۷ مدل‌سازی جریان در حفره با درپوش متحرک با استفاده از روش حجم محدود.
- ۴۳۵ ۱-۷-۷ تعریف مسئله.
- ۴۳۶ ۲-۷-۷ معادلات حاکم.
- ۴۳۷ ۳-۷-۷ گسسته‌سازی معادلات.

۴۵۴	.....	۴-۷-۷ الگوریتم حل
۴۵۴	.....	۸-۷ معرفی نرم افزارهای حل عددی معادلات در ناحیه پیوسته
۴۵۴	.....	۱-۸-۷ نرم افزارهای شبکه بندی
۴۵۸	.....	۲-۸-۷ نرم افزارهای مناسب تحلیل جریان در ناحیه پیوسته
۴۶۲	.....	مسائل
۴۶۵	.....	مراجع

فصل هشتم

۴۶۷	.....	معادلات حاکم بر جریان در دیدگاه مولکولی
۴۶۹	.....	علایم اختصاری
۴۷۰	.....	۱-۸ مقدمه
۴۷۰	.....	۲-۸ معادله ی بولتزمن
۴۷۰	.....	۱-۲-۸ مقدمه ای بر معادله ی بولتزمن
۴۷۵	.....	۲-۲-۸ سطح مقطع پراکندگی
۴۷۸	.....	۳-۲-۸ استخراج معادله ی بولتزمن
۴۸۴	.....	۳-۸ استخراج معادلات ناویر استوکس از معادله بولتزمن
۴۸۴	.....	۱-۳-۸ معادله ی پیوستگی
۴۸۵	.....	۲-۳-۸ معادله ی مومنتم
۴۸۵	.....	۳-۳-۸ معادله ی انرژی
۴۸۶	.....	۴-۸ توزیع ماکسول - بولتزمن
۴۸۹	.....	۱-۴-۸ توزیع های احتمالاتی ماکسول - بولتزمن
۴۹۳	.....	۲-۴-۸ محاسبه ی متوسط سرعت
۴۹۴	.....	۳-۴-۸ محاسبه ی میانگین مجذور سرعت
۴۹۶	.....	۴-۴-۸ محاسبه ی محتمل ترین سرعت
۴۹۹	.....	مسائل
۵۰۰	.....	مراجع