

۲۰۱۲۵۴
۹۸۱۲۹

انتقال جرم پیشرفته

تالیف

دکتر محمدعلی آرون

عضو هیأت علمی پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

www.ketab.ir



شماره مسلسل ۹۷۲۵

شماره انتشار ۳۹۸۶

انتشارات دانشگاه تهران

سرشناسه
عنوان و نام پدیدآور
مشخصات نشر
مشخصات ظاهری
فروست
شابک
وضعیت فهرست‌نویسی
اددانش
موضوع
سناسه افزوده
رده‌بندی کنگره
رده‌بندی یوئی
شمار کتابشناختی ملی

آرون، محمدعلی، ۱۳۵۶-
انتقال جرم پیشرفته/ محمدعلی آرون.
تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۳۹۷.
۴۵۰ ص: مصور، جدول، نمودار.
انتشارات دانشگاه تهران؛ شماره انتشار ۳۹۸۶.
978-964-03-7222-7
فیفا
کتابنامه.
جرم (فیزیک) — انتقال
دانشگاه تهران. مؤسسه انتشارات
QC۳۱۸/ج۴۱۴ ۱۳۹۷
۵۳۰/۴۷۵
۵۳۷۶۶۹۱

این کتاب مشمول قانون حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل‌های دیجیتال، کپی‌برداری، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود و تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است.



عنوان: انتقال جرم پیشرفته
تألیف: دکتر محمدعلی آرون
ویرایش ادبی: شهرام چراغی‌پور
نوبت چاپ: اول
تاریخ انتشار: ۱۳۹۷
شمارگان: ۲۰۰ نسخه
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران
چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مؤلف است»

بها: ۴۳۰۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرش مقدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران
پست الکترونیک: press@ut.ac.ir - تارنما: <http://press.ut.ac.ir>

پخش و فروش: تلفکس ۸۸۳۳۸۷۱۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فهرست مطالب

پیشگفتار مؤلف

مقدمه

فصل اول: موقوف بر نفوذ مولکولی

۱-۱- مقدمه

۲-۱- نفوذ مولکولی

۳-۱- روابط اساسی حاکم بر نفوذ مولکولی

۱-۳-۱- روابط غلظت مولی و جرم و انتقال جرم

۲-۳-۱- شار انتقال جرم از دیدگاه ناظر ساکن و متحرک

۳-۳-۱- روابط بین شارهای انتقال جرم

۴-۳-۱- جمع شار اجزای مخلوط

مسائل فصل اول

فصل دوم: نفوذ مولکولی دوجزئی پایا

۱-۲- قانون اول فیک

۲-۲- نفوذ مولکولی دوجزئی پایا در سطوح تخت و ثابت

۱-۲-۲- نفوذ تک جزئی و یک طرفه پایا در سطوح تخت و ثابت

۲-۲-۲- نفوذ متقابل هممول پایا در سطوح تخت و ثابت

۳-۲-۲- مقایسه نفوذ تک جزئی و نفوذ متقابل هممول در سطوح تخت و ثابت

۴-۲-۲- نفوذ پایا همراه با واکنش شیمیایی ناهمگن در سطوح تخت و ثابت

۵-۲-۲- انحلال پایای بلورهای آبدار در سطوح تخت و ثابت

۶-۲-۲- نفوذ پایای اجزای یک مخلوط تقطیرشونده از سطوح تخت و ثابت

۷-۲-۲- نفوذ پایای اجزای یک مخلوط میعان شونده در سطوح تخت و ثابت

۳-۲- نفوذ مولکولی دوجزئی پایا در سامانه‌های سطح متغیر

۱-۳-۲- نفوذ مولکولی دوجزئی پایا در سطوح تخت مخروطی

- ۶۷ ۲-۲-۲ نفوذ مولکولی دوجزئی پایا در سطوح کروی
 ۷۰ ۲-۲-۲ نفوذ مولکولی دوجزئی پایا در سطوح استوانه‌ای
 ۷۲ ۲-۲-۴ نفوذ مولکولی دوجزئی پایا در اشکالی با سطوح متنوع
 ۷۸ ۲-۴-۲ نفوذ مولکولی دوجزئی شبه‌پایا
 ۸۴ مسائل فصل دوم

- ۹۹ فصل سوم: نفوذ مولکولی دوجزئی پایا همراه با واکنش شیمیایی
 ۱۰۰ ۱-۳ مقدمه
 ۱۰۰ ۲-۳ انتقال جرم همراه با واکنش شیمیایی همگن
 ۱۰۱ ۲-۳-۱ دینامیک شیمیایی همگن مرتبه اول
 ۱۱۴ ۲-۳-۲ واکنش‌های شیمیایی همگن مرتبه دوم
 ۱۲۳ ۳-۳ انتقال جرم همراه با واکنش شیمیایی ناهمگن در داخل جامدات متخلخل
 ۱۴۳ مسائل فصل سوم

- ۱۴۹ فصل چهارم: نفوذ مولکولی در جزیی‌های جریان‌های آرام
 ۱۵۰ ۱-۴ مقدمه
 ۱۵۰ ۲-۴ قانون بقای جرم و مول جزئی در مختصات کروی
 ۱۵۰ ۲-۴-۱ موازنه جرم
 ۱۵۳ ۲-۴-۲ موازنه مول
 ۱۵۵ ۲-۴-۳ مقایسه موازنه‌های جرمی و مولی
 ۱۵۶ ۳-۴ قانون بقای جرم جزئی و معادلات پیوستگی در مختصات استوانه‌ای، کروی
 ۱۵۶ ۳-۴-۱ مختصات استوانه‌ای
 ۱۵۷ ۳-۴-۲ مختصات کروی
 ۱۵۷ ۴-۴ شکل عمومی معادلات پیوستگی، قانون بقای جرم جزئی و معادلات حرکت
 ۱۵۸ ۴-۴-۱ معادله پیوستگی
 ۱۵۸ ۴-۴-۲ قانون بقای جرم جزئی (وقتی سیستم دوجزئی و ρ و D_{AB} ثابت باشند)
 ۱۵۸ ۴-۴-۳ معادله حرکت (وقتی سیال نیوتنی و ρ و μ ثابت باشند)
 ۱۷۸ ۵-۴ انتقال جرم روی فیلم‌ریزان دیواره عمودی
 ۱۷۸ ۵-۴-۱ مقدمه
 ۱۷۹ ۵-۴-۲ هیدرودینامیک سیال روی فیلم‌ریزان دیواره عمودی
 ۱۸۳ ۵-۴-۳ جذب فیزیکی گاز بر روی جریان مایع فیلم‌ریزان دیواره عمودی
 ۱۸۵ ۵-۴-۴ جذب شیمیایی گاز بر روی جریان مایع فیلم‌ریزان دیواره عمودی

- ۱۹۳ ۵-۵-۴ انحلال دیواره جامد در جریان مایع فیلم ریزان دیواره عمودی
- ۱۹۹ ۴-۶-۱ انتقال جرم در جریان آرام داخل لوله‌ها
- ۲۰۳ ۴-۶-۱-۱ انتقال جرم در لوله‌ها در شرایطی که پروفایل سرعت یکنواخت، پروفایل غلظت در حال توسعه و غلظت جزء منتقل‌شونده در طول دیواره ثابت باشد
- ۲۱۳ ۴-۶-۲ انتقال جرم در لوله‌ها در شرایطی که پروفایل سرعت توسعه‌یافته سهموی، پروفایل غلظت در حال توسعه و غلظت جزء منتقل‌شونده در طول دیواره ثابت باشد
- ۲۲۲ ۴-۶-۳ انتقال جرم در لوله‌ها در شرایطی که پروفایل سرعت توسعه‌یافته سهموی، پروفایل غلظت در حال توسعه و شار جرمی جزء منتقل‌شونده در طول دیواره ثابت باشد
- ۲۲۵ مسائل فصل چهارم

- ۲۳۳ فصل پنجم: لایه مرزی جریان آرام
- ۲۳۴ ۵-۱-۱ انتقال جرم در لایه مرزی جریان آرام روی یک صفحه جامد مسطح افقی
- ۲۳۴ ۵-۱-۱-۱ روش حل دوگانه
- ۲۴۲ ۵-۱-۲ روش حل تقریبی
- ۲۵۳ ۵-۲-۱ انتقال جرم در لایه مرزی جریان آرام به وسیله سیال امتزاج‌ناپذیر افقی
- ۲۵۳ ۵-۲-۱-۱ لایه مرزی سرعت در جریان آرام بین دو سیال امتزاج‌ناپذیر افقی
- ۲۵۹ ۵-۲-۲ لایه مرزی غلظت در جریان آرام بین دو سیال امتزاج‌ناپذیر افقی
- ۲۶۵ ۵-۳-۱ انتقال جرم در لایه مرزی جریان آرام جابه‌جایی آزاد روی یک صفحه عمودی
- ۲۶۶ ۵-۳-۱-۱ حرکت سیال از پائین به بالا
- ۲۷۶ ۵-۳-۲ حرکت سیال از بالا به پایین
- ۲۷۸ ۵-۴-۱ انتقال جرم در لایه مرزی جریان جابه‌جایی آزاد روی یک صفحه افقی
- ۲۷۸ ۵-۴-۱-۱ سطح فعال صفحه افقی به سمت بالا
- ۲۹۸ ۵-۴-۲ سطح فعال صفحه افقی به سمت پایین
- ۳۱۰ مسائل فصل پنجم

- ۳۱۵ فصل ششم: انتقال جرم چندجزئی پایا
- ۳۱۶ ۶-۱-۱ مقدمه
- ۳۱۶ ۶-۲-۱ معادله استفان-ماکسول
- ۳۱۶ ۶-۲-۱-۱ سامانه‌های دوجزئی
- ۳۱۸ ۶-۲-۲ سامانه‌های چندجزئی
- ۳۲۵ ۶-۲-۳ معادله استفان-ماکسول چندجزئی در شکل ماتریسی
- ۳۳۴ ۶-۲-۴ ضرایب انتقال جرم چندجزئی در شکل ماتریسی و مسائل خود-راه‌انداز

- ۳۴۷ ۳-۶- معادلهٔ تعمیم یافتهٔ فیک
 ۳۴۷ ۱-۳-۶- سامانه‌های دو و چندجزئی
 ۳۴۹ ۲-۳-۶- ضرایب نفوذ چندجزئی فیک
 ۳۵۰ ۳-۳-۶- رابطهٔ بین ضرایب نفوذ چندجزئی فیک و ضرایب نفوذ دوتایی استفان-ماکسول
 ۳۵۲ ۴-۳-۶- ضریب نفوذ موثر یک جزء در یک مخلوط چندجزئی در معادله فیک
 ۳۵۵ مسائل فصل ششم

- ۳۶۱ فصل هفتم: انتقال جرم همراه با انتقال حرارت در شرایط پایا
 ۳۶۲ ۱-۷- مقدمه
 ۳۶۲ ۲-۷- معادله انرژی مکانیکی سیال خالص (نیوتنی، ویسکوزیته و دانسیته ثابت)
 ۳۶۲ ۱-۲-۷- شکل عمومی معادله انرژی مکانیکی
 ۳۷۰ ۲-۲-۷- معادله برنولی
 ۳۷۱ ۳-۷- معادله انرژی سیال خالص
 ۳۷۱ ۱-۳-۷- موازنه انرژی
 ۳۷۴ ۲-۳-۷- اشکال خاص معادله انرژی سیال خالص
 ۳۷۵ ۴-۷- معادله انرژی سیال چندجزئی
 ۳۸۷ مسائل فصل هفتم

- ۳۹۱ فصل هشتم: نفوذ ناپایای یک و چندبعدی
 ۳۹۲ ۱-۸- مقدمه
 ۳۹۲ ۲-۸- نفوذ ناپایای یک‌بعدی دوجزئی در یک تیغهٔ مسطح جامد
 ۳۹۳ ۱-۲-۸- نفوذ ناپایای یک‌بعدی دوجزئی در یک تیغهٔ مسطح جامد در زمان نفوذ کم
 ۳۹۶ ۲-۲-۸- نفوذ ناپایای یک‌بعدی دوجزئی در یک تیغهٔ مسطح جامد در زمان نفوذ زیاد
 ۴۰۰ ۳-۸- نفوذ ناپایای یک‌بعدی دوجزئی در یک کره
 ۴۰۶ ۴-۸- نفوذ ناپایای یک‌بعدی دوجزئی در یک استوانه
 ۴۱۴ ۵-۸- نفوذ ناپایای چند بعدی
 ۴۲۰ ۶-۸- نفوذ ناپایای یک‌بعدی در محیط‌های نیمه بینهایت
 ۴۲۲ ۷-۸- نفوذ ناپایای یک‌بعدی همراه با واکنش شیمیایی در محیط‌های نیمه بینهایت
 ۴۲۶ ۸-۸- نفوذ آنی و تابع گرین
 ۴۳۰ مسائل فصل هشتم

پیشگفتار مؤلف

از اولین سالی که تدریس درس انتقال جرم را آغاز کردم حدود ۱۵ سال می‌گذرد. از همان ابتدا به موضوع انتقال جرم و پدیده‌های انتقال بسیار علاقه مند بودم و تلاش کردم تا حد امکان کتاب‌هایی که در این زمینه در ایران و خارج از کشور تدوین و تألیف شده بودند را تهیه و مطالعه کنم. به طور حتم کتاب‌های موجود بسیار ارزشمند و هر یک به نوبه خود می‌توانند ما مهندس‌های شیمی را در شناخت بهتر پدیده انتقال جرم - که جزء دروس اصلی و اختصاصی رشته مهندسی شیمی است و تقریباً تمام واحدهای عملیات و فرایندهای جداسازی را به نحوی شامل می‌شود - یاری نمایند.

با این حال در طی این سال‌ها به‌ویژه چند سال پس از آن که تدریس درس انتقال جرم پیشرفته و جداسازی چندجزئی مقطع کارشناسی ارشد را در کنار تدریس درس انتقال جرم مقطع کارشناسی آغاز کردم، بر آن شدم تا تجارب تدریس خود در درس انتقال جرم پیشرفته را در قالب کتابی جامع و مناسب، تحت همین عنوان به رشته تدریس در آورم. از این رو با توجه به تجربه‌ای که از ترجمه کتاب اصول و کاربرد انتقال جرم (نوشته پروفسور آنتونی هاینز و رابرت مادوکس) و تألیف کتاب عملیات تقطیر در مهندسی شیمی (با همکاری مرحوم دکتر س. جلال‌الدین هاشمی) به دست آمده بود، از سال ۱۳۹۰ تألیف کتاب انتقال جرم پیشرفته را آغاز نمودم که به حمدالله پس از گذشت حدود ۶ سال این تلاش به ثمر نشست و کتاب حاضر که دست‌رنج سال‌ها مطالعه، تدریس و تحریر است، به علاقه‌مندان رشته مهندسی شیمی تقدیم می‌شود.

اگرچه این کتاب هم برای دانشجویان مقطع کارشناسی و هم برای دانشجویان مقطع تحصیلات تکمیلی رشته مهندسی شیمی مناسب است، با این حال محتوای کتاب را اساس مطالب مورد نیاز دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد و دکتری تنظیم و تدوین، و تلاش شده است حداقل مطالبی که یک مهندس شیمی لازم است در مقاطع تحصیلات تکمیلی از درس انتقال جرم بی‌سرفته کسب کند، در کتاب گنجانده شود.

این کتاب پس از پایان نگارش و از حدود ۱ سال پیش، سه بار به‌صورت کامل مطالعه، ویرایش و بازبینی شد و پس از ویراستاری ادبی مجدداً خط به خط مورد بررسی قرار گرفت و تا آنجا که امکان داشت تلاش شد عاری از اشکال باشد، با این حال هیچ اثر علمی عاری از عیب و نقص نیست و حقیر از کلیه اساتید بزرگوار، دانشجویان عزیز و خوانندگان و محققین محترم درخواست می‌کنم هر گونه انتقاد، پیشنهاد و یا ایرادی که ممکن است در این کتاب وجود داشته باشد، را از طریق آدرس

توجه قرار گیرد. maaroon@ut.ac.ir به اینجانب منتقل نمایند تا ان شاءالله پس از بررسی در ویرایش‌های بعدی مورد

در آخر جا دارد از همکاران محترم جناب آقای دکتر حسین ابوالقاسمی، سرکار خانم دکتر عاطفه حسن‌زاده، و سرکار خانم دکتر فاطمه اسماعیلی خلیل‌سرائی که در بخش حل معادلات پیچیده ریاضی بنده را راهنمایی فرمودند، تشکر کنم. همچنین از انتشارات دانشگاه تهران، متخصصین و اساتید محترم حوزه داورى اثر، ویراستارهای محترم ادبی، نماینده محترم دانشکده مهندسی شیمی در شورای انتشارات دانشگاه تهران، همکاران صحافی و صفحه‌آرایی و کلیه عزیزانی که به هر نحو بنده حقیر را در چاپ و نشر این کتاب مساعدت فرمودند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

با تشکر و تقدیم احترام

محمدعلی آرون

تابستان ۱۳۹۷