مقدمه‌ای بر انتقال گرما

(ویراست پنجم)

دانشکدهٔ مهندسی دانشگاه نوتردام

کالج مهندسی مکانیک دانشگاه پوردو

دپارتمان مهندسی مکانیک دانشگاه کونکتیکوت

دپارتمان مهندسی مکانیک و هوا فضا
دانشگاه کالیفرنیا، ایروین

ترجمهٔ بهرام پوستی

www.ketab.ir

نشر کتاب دانشگاهی

www.ketab.ir

عنوان و نام پدیدآور	مقدمه‌ای بر انتقال گرما/ [نویسندگان] اینکروپرا، [و دیگران]؛ ترجمهٔ بهرام پوستی.
مشخصات نشر	تهران: نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری	۹۱۲ص.: مصور (رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۱۰۷-۵۰-۰
وضعیت فهرست‌نویسی	فیپا
یادداشت	نویسندگان اینکروپرا، دویت، برگمن، لاوین.
یادداشت	عنوان اصلی: Introduction to Heat Transfer, 5th ed.
موضوع	گرما -- انتقال
موضوع	گرما -- انتقال-- مسائل، تمرین‌ها و غیره (عالی).
شناسهٔ افزوده	اینکروپرا، فرانک پی.
شناسهٔ افزوده	Incropera, Frank P.
شناسهٔ افزوده	پوستی، بهرام، ۱۳۳۲- ، مترجم.
رده‌بندی کنگره	QC۳۲۰/۷م۹الف ۱۳۹۰
رده‌بندی دیویی	۶۲۱/۴۰۲۲
شمارهٔ کتاب‌شناسی ملی	۲۴۶۲۰۷۶

نشر کتاب دانشگاهی

اینکروپرا ◦ دویت ◦ برگمن ◦ لاوین

مقدمه‌ای بر انتقال گرما

(ویراست پنجم)

ترجمهٔ بهرام پوستی

ویرایش فنی و نمونه‌خوانی
فرزانه فرزانیان

حروف‌چینی و صفحه‌آرایی
الهام احمدی

امور هنری و گرافیک
فاران اتحاد، افسانه کرمی

چاپ اول ۱۳۹۰
لیتوگرافی رامین
چاپ رامتین
صحافی کتیبه
تعداد صفحات ۹۱۲، خشتی

۲۵۰۰ نسخه

۱۸۰۰۰ تومان

شابک ۰-۵۰۰-۵۱۰۷-۶۰۰-۹۷۸ ISBN 978-600-5107-50-0

[illegible]

مرکز پخش: خیابان بزرگمهر، بین وصال و قدس، شمارهٔ ۸۷، تلفکس ۶۶۴۶۷۲۲۶
فروشگاه روز نو: خیابان انقلاب، بین فخررازی و دانشگاه، شمارهٔ ۱۲۰۲، تلفکس ۶۶۹۵۰۵۲۰
Website: www.ketabedaneshgahi.com E-mail: info@ketabedaneshgahi.com

حقوق چاپ و نشر دائم این اثر محفوظ و مخصوص نشر کتاب دانشگاهی است.

www.ketab.ir

یادبود

سال ۲۰۰۵، سال فقدان دکتر دیوید پی. دویت بود. دوست و همکار عزیزی که طی ۴۵ سال کار حرفه‌ای، نقش مؤثری در تکنولوژی انتقال گرما و آموزش آن داشت. دیوید دارای مدارک BS از دانشگاه دوک، MS از دانشگاه MIT و PhD از دانشگاه پوردو بود. در دانشگاه پوردو مشغول ادامهٔ تحقیقات خود در زمینهٔ فیزیک گرما و رادیومتری بود که متأسفانه بیماری مانع کار او شد. او استانداردهای اندازه‌گیری رادیومتری در مرکز تحقیقات دانشگاه پوردو را بنیان نهاد و به سمت قائم‌مقام ریاست این مرکز و رئیس شرکت طراحی ابزار نوری و گرمایی منسوب شد. در سال ۱۹۷۳ به‌عنوان استاد مهندسی مکانیک در دانشگاه پوردو استخدام شد و تا سال ۲۰۰۰ (که بازنشسته شد) در آن دانشگاه به تدریس پرداخت. از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ در بخش تکنولوژی اپتیک انستیتوی ملی تکنولوژی و استانداردها کار می‌کرد.

دیوید استادی عالی‌قدر و محققی برجسته بود. مهارت و اطلاعات او همواره باعث موفقیت کتاب‌هایی بوده است که با همکاری یکدیگر منتشر کرده‌ایم. بالاتر از همهٔ این‌ها، شخصیت فردی و بود که هیچگاه فراموش نمی‌شود.

من و دیوید، هر کدام صاحب سه دختر هستیم. به زحمت می‌توان فراموش کرد که چه‌قدر دیوید به دختران خود (کارن، امی و دبی) علاقه‌مند بود و به آن‌ها افتخار می‌کرد. در سال ۱۹۹۰، دیوید همسر اول خود (جودی) را براثر سرطان از دست داد. من شاهد بودم که او با چه متانتی این مصیبت را تحمل کرد. در سال ۱۹۹۷، او با همسر دوم خود (فیلیز) ازدواج کرد.

دیوید را همواره یک انسان متعهد و مهربان و جوانمرد به یاد می‌آورم. دوست عزیزم! گرچه تو را از دست داده‌ام، اما با این امید که رها از درد و در سرای بهتر هستی خود را آرامش می‌دهم.

فرانک اینکروپرا

www.ketab.ir

پیشگفتار

www.ketab.ir

مدت زیادی از انتشار آخرین ویرایش این کتاب نگذشته بود که من و دویت به روزی فکر می‌کردیم که دیگر نتوانیم ویرایش‌های بعدی را با تفاوت چشمگیر عرضه کنیم. این احساس دو دلیل داشت: (۱) کاهش قوای جسمانی، (۲) نداشتن اطلاعات کافی از مطالب روز.

به همین دلیل، در سال ۲۰۰۲ تصمیم گرفتیم از همکاران جدید بهره بگیریم. برای انتخاب این همکاران، عوامل زیر را درنظر گرفتیم: سابقهٔ تدریس در زمینهٔ انتقال گرما، فعالیت‌های تحقیقاتی در این زمینه، سابقهٔ خدمت در کمیتهٔ انتقال گرما و علاقه به همکاری.

پس‌از بررسی‌های همه‌جانبه، از تئودور برگمن و آدرین لاوین (استادان مهندسی مکانیک در دانشگاه کونکتیکوت و دانشگاه کالیفرنیا) دعوت کردیم تا به جمع ما بپیوندند. ایشان که در تألیف این ویرایش نقش مؤثری داشته‌اند، ویرایش بعد را با همکاری یکدیگر منتشر خواهند کرد.

تفاوت کیفی این ویرایش با ویرایش قبل، خصوصاً بحث‌های مربوط به نانوتکنولوژی و بیوتکنولوژی، حاصل تلاش‌های شایستهٔ تقدیر تئودور و آدرین است.

فرانک اینکروپرا

مقدمه

از انتشار آخرین ویرایش این کتاب تاکنون، تحولات اساسی در مهندسی روی داده است. در این رابطه، پرسش‌های زیر مطرح است: در دهۀ آینده، مهندسی کدام مسیر را طی می‌کند؟ در آینده، یک مهندس *متخصص* موفق‌تر است یا مهندسی که *نظریه‌ها* را بهتر می‌داند؟ آیا فارغ‌التحصیلان مهندسی پاسخگوی *نیازهای آیندۀ بازار* خواهند بود؟ آیا مرزهای بین صنعت و نظریه‌هایی که در دانشگاه‌ها تدریس می‌شوند همچنان برجای خواهد ماند؟

در ویرایش جدید، موضوعاتی از قبیل تکنولوژی اطلاعات، بیوتکنولوژی، فارماکولوژی، انرژی جایگزین و نانوتکنولوژی موردبحث قرارگرفته است. این علوم جدید، همراه با کاربردهای سنتی در زمینۀ تولید انرژی، مصرف انرژی، ساخت و تولید، نشان می‌دهد که علم انتقال گرما همچنان راهگشای مسائل آینده است.

نکات آموزشی

برای فرگیری انتقال گرما، مراحل چهارگانۀ زیر نیز است:

۱. درک واژه‌ها و ارتباط فیزیکی آن‌ها با مطالب موردبحث.
۲. تشخیص فرایندها در سیستم‌هایی که با انتقال گرما سروکار دارند.
۳. کاربرد فرمول‌های مناسب برای محاسبۀ آهنگ انتقال گرما و توزیع دما.
۴. مدل‌سازی فرایندها و سیستم‌ها، تجزیه و تحلیل آن‌ها و نتیجه‌گیری برای طراحی و محاسبۀ عملکرد.

مطالب هر فصل، مانند ویرایش قبل، به‌وضوح تشریح شده‌اند و برای هر مطلب مثال‌هایی آورده شده است. شیوۀ استنتاج فرمول‌ها نیز بحث شده است. در انتهای هر فصل، واژه‌ها و مفاهیم کلیدی فهرست شده‌اند. سپس، برای بررسی میزان درک دانشجو، پرسش‌هایی مطرح شده است.

در مسائلی که شامل مدل‌های پیچیده‌اند، یا تأثیر *تغییرات پارامتری* در آن‌ها مطرح است، از نرم‌افزار *IHT* (که پیوست کتاب است) می‌توان استفاده کرد. این نرم‌افزار می‌تواند دستگاه معادلات، شامل ۳۰۰

www.ketab.ir

معادله یا بیش‌تر، را حل کند، نمودارها را رسم و خطاها را نیز بررسی کند. هم‌چنین، شامل جداول خواص و توابع موردنیاز در حل مسائل است. توصیه می‌شود استاد نحوهٔ کاربرد نرم‌افزار IHT را آموزش دهد. به این ترتیب، دانشجو می‌تواند مسائل را سریع‌تر (و با خطای کم‌تر) حل کند و به نکات اساسی مسئله بپردازد. نرم‌افزار دیگری که توسط آن مسائل رسانش دوبعدی را به‌سهولت می‌توان حل کرد، نرم‌افزار $FEHT$ است (که آن هم پیوست کتاب است).

در انتهای هر فصل، مسائل تکلیف بسیاری، شامل مسائل کامپیوتری، آورده شده است. بعضی مسائل کامپیوتری به‌گونه‌ای است که آن‌ها را به‌صورت دستی نیز می‌توان حل کرد (به این ترتیب، دانشجو می‌تواند نتایج محاسبات کامپیوتری را با حل دستی مقایسه کند). در بعضی دیگر از مسائل کامپیوتری، دربارهٔ تأثیر تغییرات یک (یا چند) پارامتر بر شرایط طراحی و عملکرد بحث می‌شود. *قسمت‌های کامپیوتری* مسائل با علامت مستطیل مشخص شده‌اند. مسائلی که شمارهٔ آن‌ها با علامت مستطیل مشخص شده است *کاملاً کامپیوتری‌اند* (مانند مسئلهٔ ۱ـ۲۶). با استفاده از این نمادگذاری، دانشجو به‌سهولت می‌تواند مسائل کامپیوتری (یا قسمت‌های کامپیوتری مسائل) را تشخیص دهد.

ویژگی‌های ویراست جدید

مجموعهٔ مسائل. این ویراست شامل تعداد زیادی مسائل جدید یا تجدیدنظرشده است که اغلب آن‌ها کاربردهای صنعتی دارند.

انتقال بعضی قسمت‌ها به اینترنت. بعضی از قسمت‌های این کتاب، که استاد *به‌دلخواه* می‌تواند تدریس کند و مسائل تکلیف مربوط به آن‌ها از وب‌سایت زیر قابل دسترسی است:

www.wiley.com/college/incropera

این قسمت‌ها، در فصل‌های مختلف، در زیرنویس توضیح داده شده‌اند.

برای دستیابی به پاسخ مسائل تکلیف و قسمت‌های اینترنتی، دانشجو می‌تواند روی لینک زیر کلیک کند:

student companion site

تغییرات محتوای فصل‌ها. فصل ۱ شامل بحث مفصلی دربارهٔ *ارتباط انتقال گرما با سایر علوم* است. در این بحث، *وسایل تبدیل انرژی* (شامل پیل‌های سوختی)، کاربرد *تکنولوژی اطلاعات* و *مهندسی بیولوژیک* بررسی و در مبحث مربوط به *اصل پایستاری انرژی* نیز تجدیدنظر شده است.

در فصل ۲، موضوع جدید *رسانش گرما در مقیاس‌های میکرو و نانو*، با استفاده از حرکت *حامل‌های انرژی* (شامل فونون‌ها و الکترون‌ها)، بررسی شده است. هم‌چنین، عبارت‌های تقریبی برای *ضریب رسانش مؤثر در فیلم‌های نازک*، ضریب رسانش مواد با *ساختار نانو*، کاربردهای نانوتکنولوژی و *محدودیت‌های معادلهٔ رسانش گرما* در مواد با ساختار میکرو بررسی شده است.

www.ketab.ir

در فصل ۳، معادلهٔ *گرمازیست* آورده شده است.

در فصل ۴، دربارهٔ *ضرایب شکل* در رسانش پایای چندبعدی و *آهنگ رسانش* چندبعدی بحث شده است (روش ترسیمی برای حل مسائل رسانش دوبعدی نیز در قسمت‌های اینترنتی آمده است).

در فصل ۵، رسانش گذرا با یک روش یکدست بررسی و مطلب جدید *روش‌های تقریبی* نیز اضافه شده است. برای حل مسائل رسانش گذرای یک‌بعدی، اغلب دانشجویان از حل‌های دقیق یا تقریبی استفاده می‌کنند و فقط بعضی از آن‌ها روش‌های ترسیمی را به‌کار می‌برند. به همین دلیل، روش ترسیمی برای حل مسائل رسانش گذرای یک‌بعدی و هم‌چنین روش‌های تحلیلی برای بررسی رسانش گذرای چندبعدی در قسمت‌های اینترنتی آورده شده است. هم‌چنین در این فصل، عنوان جدید *گرمایش تندوبی* و کاربرد آن برای اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی مواد با ساختار نانو به‌طور خلاصه بررسی شده است.

در فصل ۶ از اصول انتقال گرمای جابه‌جایی، تبدیل جریان لایه‌ای به متلاطم و آثار تلاطم با شیوهٔ جدید بحث شده است. استنتاج معادله‌های انتقال گرمای جابه‌جایی نیز در قسمت‌های اینترنتی آورده شده است.

در فصل ۷، *جریان خارجی* و در فصل ۸ *جریان داخلی* بررسی شده است. رابطه‌های جریان در *لوله‌های خمیده* و محدودیت‌های کاربرد رابطه‌های جابه‌جایی در جریان داخلی برای مقیاس‌های میکرو از مطالب جدید فصل ۸ است.

در فصل ۹، رابطه‌های ضریب رسانش مؤثر برای *جابه‌جایی آزاد* در محفظه‌ها مورد تجدیدنظر قرارگرفته است و ارتباط آن‌ها با روابط رسانش در فصل ۳ نشان داده شده است.

در فصل ۱۰، *انتقال گرما در فرایند جوشش* با روش جدید بررسی شده است. در این روش، به ارتباط فرایند جوشش با جابه‌جایی واداشته و جابه‌جایی آزاد توجه شده است (به این ترتیب، منحنی جوشش را بهتر می‌توان درک کرد). مقدار ثابت‌ها در رابطه‌های جوشش نیز تغییر کرده‌اند و به‌روز شده‌اند. میردهایی که امروزه استفاده نمی‌شوند حذف شده‌اند و به‌جای آن‌ها خواص میردهای رایج در جدول آورده شده‌اند. علاوه بر این‌ها، رابطه‌های انتقال گرما برای *جریان داخلی دوفازی*، *محدودیت‌های کاربرد این رابطه‌ها* برای مقیاس‌های میکرو و روش سادهٔ حل مسائل چگالش بررسی شده‌اند.

در فصل ۱۱، از روش اختلاف دمای میانگین لگاریتمی (LMTD) برای محاسبات مبدل‌های گرمایی لوله‌ای هم‌مرکز استفاده شده است. اما، به علت انعطاف‌پذیری روش NTU، طراحی سایر مبدل‌ها براساس روش LMTD به قسمت‌های اینترنتی منتقل شده است.

در فصل‌های ۱۲ و ۱۳، انتقال گرمای تشعشعی (با اندکی تغییرات) آورده شده است.

تئودور ال. برگمن

آدرین اس. لاوین

www.ketab.ir

فهرست

فصل ۱ مقدمه ۱

۱ـ۱ چه و چگونه؟ ۲
۱ـ۲ معادله‌های آهنگ انتقال گرما ۲
۱ـ۲ـ۱ رسانش ۲
۱ـ۲ـ۲ جابه‌جایی ۵
۱ـ۲ـ۳ تشعشع ۸
۱ـ۲ـ۴ رابطهٔ انتقال گرما با ترمودینامیک ۱۲
۱ـ۳ اصل پایستاری انرژی ۱۲
۱ـ۳ـ۱ اصل پایستاری انرژی برای حجم کنترل ۱۲
۱ـ۳ـ۲ موازنهٔ انرژی در سطح ۲۴
۱ـ۳ـ۳ شیوهٔ کاربرد قوانین پایستاری ۲۷
۱ـ۴ شیوهٔ تحلیل مسائل انتقال گرما ۲۸
۱ـ۵ ارتباط انتقال گرما با سایر علوم ۳۱
۱ـ۶ آحاد و ابعاد ۳۳
۱ـ۷ خلاصه ۳۶
مراجع ۳۸
مسائل ۳۹

فصل ۲ مقدمه‌ای بر رسانش ۵۵

۲ـ۱ معادلهٔ آهنگ رسانش ۵۶
۲ـ۲ خواص گرمایی ماده ۵۸
۲ـ۲ـ۱ ضریب رسانش ۵۸
۲ـ۲ـ۲ سایر خواص ماده ۶۵
۲ـ۳ معادلهٔ پخش گرما ۶۷
۲ـ۴ شرایط مرزی و شرایط اولیه ۷۳
۲ـ۵ خلاصه ۷۷
مراجع ۷۸
مسائل ۷۹

www.ketab.ir

فصل ۳ رسانش پایای یک‌بعدی ۹۱

۳ـ۱ دیوار مسطح ۹۲
۳ـ۱ـ۱ توزیع دما ۹۲
۳ـ۱ـ۲ مقاومت گرمایی ۹۳
۳ـ۱ـ۳ دیوار مرکب ۹۴
۳ـ۱ـ۴ مقاومت تماسی ۹۶
۳ـ۲ روش غیراستاندارد برای تحلیل رسانش ۱۰۷
۳ـ۳ دیواره‌های شعاعی ۱۱۰
۳ـ۳ـ۱ دیوارهٔ استوانه‌ای ۱۱۰
۳ـ۳ـ۲ دیوارهٔ کروی ۱۱۶
۳ـ۴ خلاصهٔ روابط رسانش یک‌بعدی ۱۱۹
۳ـ۵ رسانش همراه با تولید انرژی گرمایی ۱۲۰
۳ـ۵ـ۱ دیوار مسطح با تولید گرما ۱۲۰
۳ـ۵ـ۲ اجسام شعاعی با تولید گرما ۱۲۶
۳ـ۵ـ۳ آثار تولید گرمای داخلی ۱۳۱
۳ـ۶ انتقال گرما در سطوح گسترده ۱۳۱
۳ـ۶ـ۱ تحلیل رسانش در پره‌ها ۱۳۳
۳ـ۶ـ۲ پره‌ها با مقطع عرضی یکنواخت ۱۳۴
۳ـ۶ـ۳ عملکرد پره‌ها ۱۴۱
۳ـ۶ـ۴ پره با مقطع عرضی غیریکنواخت ۱۴۳
۳ـ۶ـ۵ بازده کلی سطح ۱۴۷
۳ـ۷ معادلهٔ گرمازیست ۱۵۶
۳ـ۸ خلاصه ۱۶۰
مراجع ۱۶۲
مسائل ۱۶۴

فصل ۴ رسانش پایای دوبعدی ۱۹۷

۴ـ۱ روش‌های غیراستاندارد ۱۹۸
۴ـ۲ روش جدا کردن متغیرها ۱۹۹
۴ـ۳ ضریب شکل و آهنگ بی‌بعد انتقال گرمای رسانشی ۲۰۳
۴ـ۴ معادله‌های تفاضل محدود ۲۰۷
۴ـ۴ـ۱ شبکهٔ گره‌ها ۲۰۸
۴ـ۴ـ۲ شکل تفاضل محدود معادلهٔ گرما ۲۰۹
۴ـ۴ـ۳ روش موازنهٔ انرژی ۲۰۹

www.ketab.ir

۴ـ۵ حل معادله‌های تفاضل محدود ۲۱۶
۴ـ۵ـ۱ روش ماتریس معکوس ۲۱۶
۴ـ۵ـ۲ روش تکرار گاوس‌ـسیدل ۲۱۸
۴ـ۵ـ۳ چند نکته ۲۲۳
۴ـ۶ خلاصه ۲۲۸
مراجع ۲۲۸
مسائل ۲۲۹

فصل ۵ روش‌های کلی ۲۴۷

۵ـ۱ روش ظرفیت فشرده ۲۴۸
۵ـ۲ صحت روش ظرفیت فشرده ۲۵۰
۵ـ۳ تحلیل کلی ظرفیت فشرده ۲۵۴
۵ـ۴ تغییرات دما برحسب مکان ۲۶۱
۵ـ۵ دیوار مسطح ۲۶۳
۵ـ۵ـ۱ حل دقیق ۲۶۳
۵ـ۵ـ۲ حل تقریبی ۲۶۴
۵ـ۵ـ۳ انتقال انرژی کل ۲۶۶
۵ـ۵ـ۴ نکته‌های اضافی ۲۶۶
۵ـ۶ دیواره‌های استوانه‌ای و کروی ۲۶۷
۵ـ۶ـ۱ حل‌های دقیق ۲۶۷
۵ـ۶ـ۲ حل‌های تقریبی ۲۶۸
۵ـ۶ـ۳ انتقال انرژی ۲۶۸
۵ـ۶ـ۴ نکات اضافی ۲۶۹
۵ـ۷ جسم نیم‌نامتناهی ۲۷۴
۵ـ۸ پاسخ گذرا در سایر شرایط ۲۸۱
۵ـ۸ـ۱ دمای ثابت در سطح ۲۸۱
۵ـ۸ـ۲ شار گرمای ثابت در سطح ۲۸۲
۵ـ۸ـ۳ حل‌های تقریبی ۲۸۳
۵ـ۹ گرمایش متناوب ۲۹۰
۵ـ۱۰ روش‌های تفاضل محدود ۲۹۲
۵ـ۱۰ـ۱ گسسته‌سازی معادلهٔ گرما: روش صریح ۲۹۲
۵ـ۱۰ـ۲ گسسته‌سازی معادلهٔ گرما: روش ضمنی ۳۰۰
۵ـ۱۱ خلاصه ۳۰۸
مراجع ۳۰۹
مسائل ۳۱۰

www.ketab.ir

فصل ۶ مقدمه‌ای بر جابه‌جایی ۳۳۷
۶ـ۱ لایه‌های مرزی جابه‌جایی ۳۳۸
۶ـ۱ـ۱ لایهٔ مرزی هیدرودینامیکی ۳۳۸
۶ـ۱ـ۲ لایهٔ مرزی گرمایی ۳۳۹
۶ـ۱ـ۳ نقش لایه‌های مرزی ۳۴۰
۶ـ۲ ضریب جابه‌جایی محلی و ضریب جابه‌جایی متوسط ۳۴۰
۶ـ۲ـ۱ انتقال گرما ۳۴۰
۶ـ۲ـ۲ مسئلهٔ جابه‌جایی ۳۴۱
۶ـ۳ جریان لایه‌ای و جریان متلاطم ۳۴۲
۶ـ۳ـ۱ لایهٔ مرزی هیدرودینامیکی لایه‌ای و متلاطم ۳۴۳
۶ـ۳ـ۲ لایهٔ مرزی لایه‌ای و لایهٔ مرزی متلاطم ۳۴۵
۶ـ۴ معادله‌های لایهٔ مرزی ۳۴۸
۶ـ۴ـ۱ معادله‌های لایهٔ مرزی برای جریان لایه‌ای ۳۴۸
۶ـ۵ تشابه در لایهٔ مرزی: معادله‌های بی‌بعد ۳۵۰
۶ـ۵ـ۱ پارامترهای تشابه در لایهٔ مرزی ۳۵۰
۶ـ۵ـ۲ حل‌ها به‌صورت توابع ۳۵۲
۶ـ۶ مفهوم فیزیکی پارامترهای بی‌بعد ۳۵۵
۶ـ۷ تشابه بین انتقال تکانه و انتقال گرما (تشابه رینولدز) ۳۵۷
۶ـ۸ خلاصه ۳۵۸
مراجع ۳۵۹
مسائل ۳۶۰
فصل ۷ جریان خارجی ۳۶۷
۷ـ۱ روش آزمایشی ۳۶۸
۷ـ۲ جریان روی یک صفحهٔ تخت ۳۶۹
۷ـ۲ـ۱ جریان لایه‌ای روی یک صفحهٔ تک‌دما: حل تشابه ۳۷۰
۷ـ۲ـ۲ جریان متلاطم روی یک صفحهٔ تخت تک‌دما ۳۷۵
۷ـ۲ـ۳ لایهٔ مرزی آمیخته ۳۷۵
۷ـ۲ـ۴ حالت‌های خاص ۳۷۶
۷ـ۲ـ۵ صفحات تخت با شارگرمای ثابت در سطح ۳۷۷
۷ـ۲ـ۶ محدودیت‌های کاربرد ضرایب جابه‌جایی ۳۷۸
۷ـ۳ محاسبهٔ ضریب جابه‌جایی ۳۷۸
۷ـ۴ استوانه در جریان عرضی ۳۸۴
۷ـ۴ـ۱ حالت جریان ۳۸۴

www.ketab.ir

۷ـ۴ـ۲ انتقال گرمای جابه‌جایی ۳۸۶
۷ـ۵ کره ۳۹۴
۷ـ۶ جریان عرضی روی یک دسته لوله ۳۹۷
۷ـ۷ جت‌های ضربه‌ای ۴۰۷
۷ـ۷ـ۱ بررسی هیدرودینامیکی جت‌های ضربه‌ای ۴۰۷
۷ـ۷ـ۲ انتقال گرمای جابه‌جایی ۴۰۹
۷ـ۸ بسترهای پرشده ۴۱۲
۷ـ۹ خلاصه ۴۱۳
مراجع ۴۱۶
مسائل ۴۱۸
فصل ۸ جریان داخلی ۴۴۱
۸ـ۱ آثار هیدرودینامیکی ۴۴۲
۸ـ۱ـ۱ شرایط جریان ۴۴۲
۸ـ۱ـ۲ سرعت میانگین ۴۴۳
۸ـ۱ـ۳ منحنی سرعت در ناحیهٔ کاملاً فراگیر ۴۴۴
۸ـ۱ـ۴ شیب فشار و ضریب اصطلاک در جریان کاملاً فراگیر ۴۴۵
۸ـ۲ آثار گرمایی ۴۴۷
۸ـ۲ـ۱ دمای میانگین ۴۴۸
۸ـ۲ـ۲ قانون سرمایش نیوتن ۴۴۸
۸ـ۲ـ۳ شرایط کاملا فراگیر ۴۴۹
۸ـ۳ موازنهٔ انرژی ۴۵۲
۸ـ۳ـ۱ نکته‌های کلی ۴۵۲
۸ـ۳ـ۲ شار گرمای ثابت در سطح ۴۵۳
۸ـ۳ـ۳ دمای ثابت در سطح ۴۵۶
۸ـ۴ جریان لایه‌ای در لوله‌های دایره‌ای: رابطه‌های جابه‌جایی ۴۵۹
۸ـ۴ـ۱ ناحیهٔ کاملا فراگیر ۴۵۹
۸ـ۴ـ۲ ناحیهٔ ورودی ۴۶۶
۸ـ۵ رابطه‌های جابه‌جایی: جریان متلاطم در لوله‌های دایره‌ای ۴۶۸
۸ـ۶ رابطه‌های جابه‌جایی مجراهای غیردایره‌ای و حلقوی هم‌مرکز ۴۷۳
۸ـ۷ تقویت انتقال گرما ۴۷۶
۸ـ۸ جریان داخلی در میکروتیوب‌ها ۴۷۸
۸ـ۸ـ۱ جریان داخلی در ریزمجراها ۴۷۸
۸ـ۸ـ۲ آثار گرمایی در ریزمجراها ۴۷۹

www.ketab.ir

۹ـ۸ خلاصه ۴۸۲
مراجع ۴۸۵
مسائل ۴۸۶

فصل ۹ جابه‌جایی آزاد

۵۰۷

۹ـ۱ مکانیسم جابه‌جایی آزاد ۵۰۸
۹ـ۲ معادله‌ها در جابه‌جایی آزاد ۵۱۰
۹ـ۳ تشابه ۵۱۲
۹ـ۴ جابه‌جایی آزاد لایه‌ای روی یک صفحهٔ عمودی ۵۱۳
۹ـ۵ آثار تلاطم ۵۱۵
۹ـ۶ رابطه‌های تجربی برای جابه‌جایی آزاد در جریان خارجی ۵۱۸
۹ـ۶ـ۱ صفحهٔ عمودی ۵۱۸
۹ـ۶ـ۲ صفحات مایل و افقی ۵۲۱
۹ـ۶ـ۳ استوانه‌های بلند افقی ۵۲۷
۹ـ۶ـ۴ کره‌ها ۵۳۰
۹ـ۷ جابه‌جایی آزاد در کانال‌های متشکل از صفحات موازی ۵۳۲
۹ـ۷ـ۱ کانال‌های عمودی ۵۳۲
۹ـ۷ـ۲ کانال‌های مایل ۵۳۵
۹ـ۸ رابطه‌های تجربی: محفظه‌ها ۵۳۵
۹ـ۸ـ۱ محفظه‌های مستطیلی ۵۳۶
۹ـ۸ـ۲ استوانه‌های هم‌مرکز ۵۳۹
۹ـ۸ـ۳ کره‌های هم‌مرکز ۵۴۰
۹ـ۹ انتقال گرمای ترکیبی ۵۴۲
۹ـ۱۰ خلاصه ۵۴۳
مراجع ۵۴۴
مسائل ۵۴۶

۵۶۷

فصل ۱۰ جوشش و چگالش

۱۰ـ۱ پارامترهای بی‌بعد در جوشش و چگالش ۵۶۸
۱۰ـ۲ انواع جوشش ۵۶۹
۱۰ـ۳ جوشش استخری ۵۶۹
۱۰ـ۳ـ۱ منحنی جوشش ۵۷۰
۱۰ـ۳ـ۲ انواع جوشش استخری ۵۷۱
۱۰ـ۴ رابطه‌های جوشش استخری ۵۷۴

www.ketab.ir

۱۰ـ۴ـ۱ جوشش هسته‌ای ۵۷۴
۱۰ـ۴ـ۲ شارگرمای بحرانی در جوشش هسته‌ای ۵۷۶
۱۰ـ۴ـ۳ شارگرمای مینیمم ۵۷۷
۱۰ـ۴ـ۴ جوشش فیلمی ۵۷۷
۱۰ـ۴ـ۵ تأثیر بعضی پارامترها بر جوشش استخری ۵۷۸
۱۰ـ۵ جوشش با جابه‌جایی واداشته ۵۸۳
۱۰ـ۵ـ۱ جوشش واداشته در جریان خارجی ۵۸۳
۱۰ـ۵ـ۲ جوشش دوفازی ۵۸۴
۱۰ـ۵ـ۳ جوشش دوفازی در ریزمجراها ۵۸۷
۱۰ـ۶ چگالش: مکانیسم‌های فیزیکی ۵۸۸
۱۰ـ۷ چگالش فیلمی لایه‌ای روی صفحهٔ عمودی ۵۸۹
۱۰ـ۸ چگالش فیلمی متلاطم ۵۹۳
۱۰ـ۹ چگالش فیلمی روی کره‌ها و استوانه‌ها ۵۹۸
۱۰ـ۱۰ چگالش فیلمی در لوله‌های افقی ۶۰۱
۱۰ـ۱۱ چگالش قطره‌ای ۶۰۲
۱۰ـ۱۲ خلاصه ۶۰۳
مراجع ۶۰۳
مسائل ۶۰۶

فصل ۱۱ مبدل‌های گرمایی ۶۱۷

۱۱ـ۱ انواع مبدل‌های گرمایی ۶۱۸
۱۱ـ۲ ضریب کلی انتقال گرما ۶۲۰
۱۱ـ۳ تحلیل مبدل گرمایی: کاربرد اختلاف دمای میانگین لگاریتمی (روش LMTD) ۶۲۳
۱۱ـ۳ـ۱ مبدل گرمایی با جریان همسو ۶۲۴
۱۱ـ۳ـ۲ مبدل گرمایی با جریان ناهمسو ۶۲۶
۱۱ـ۳ـ۳ شرایط خاص ۶۲۷
۱۱ـ۴ تحلیل مبدل گرمایی: روش ε-NTU ۶۳۶
۱۱ـ۴ـ۱ تعریف‌ها ۶۳۶
۱۱ـ۴ـ۲ رابطه‌های بین ε و NTU ۶۳۷
۱۱ـ۵ طرحی و محاسبهٔ عملکرد مبدل‌های گرمایی با استفاده از روش ε-NTU ۶۴۵
۱۱ـ۶ مبدل‌های گرمایی فشرده ۶۵۱
۱۱ـ۷ خلاصه ۶۵۷
مراجع ۶۵۸
مسائل ۶۵۹

www.ketab.ir

فصل ۱۲ تشعشع: فرایندها و خواص ۶۷۵

۱۲ـ۱ مفاهیم اصلی ۶۷۶
۱۲ـ۲ شدت تشعشع ۶۷۸
۱۲ـ۲ـ۱ توصیف‌های ریاضی ۶۷۸
۱۲ـ۲ـ۲ شدت تشعشع و رابطهٔ آن با گسیل تشعشع ۶۸۰
۱۲ـ۲ـ۳ شدت تشعشع فرودی ۶۸۴
۱۲ـ۲ـ۴ شدت تشعشع خروجی ۶۸۶
۱۲ـ۳ تشعشع جسم سیاه ۶۸۷
۱۲ـ۳ـ۱ توزیع پلانک ۶۸۸
۱۲ـ۳ـ۲ قانون جابه‌جایی وین ۶۸۹
۱۲ـ۳ـ۳ قانون استفان‌ـبولتزمن ۶۹۰
۱۲ـ۳ـ۴ باند گسیل ۶۹۰
۱۲ـ۴ گسیل تشعشع از سطوح حقیقی ۶۹۶
۱۲ـ۵ جذب، بازتاب و عبور تشعشع از سطوح حقیقی ۷۰۴
۱۲ـ۵ـ۱ ضریب جذب ۷۰۶
۱۲ـ۵ـ۲ ضریب بازتاب ۷۰۷
۱۲ـ۵ـ۳ ضریب عبور ۷۰۸
۱۲ـ۵ـ۴ چند نکته ۷۰۸
۱۲ـ۶ قانون کیرشهف ۷۱۳
۱۲ـ۷ سطح خاکستری ۷۱۵
۱۲ـ۸ تشعشع در طبیعت ۷۲۳
۱۲ـ۹ خلاصه ۷۲۹
مراجع ۷۳۲
مسائل ۷۳۳

فصل ۱۳ تبادل تشعشع بین سطوح ۷۶۳

۱۳ـ۱ ضریب دید ۷۶۴
۱۳ـ۱ـ۱ انتگرال ضریب دید ۷۶۴
۱۳ـ۱ـ۲ رابطه‌های ضریب دید ۷۶۵
۱۳ـ۲ تبادل تشعشع بین سطوح پخشی کدر و خاکستری در یک محفظه ۷۷۳
۱۳ـ۲ـ۱ تبادل خالص تشعشع در یک سطح ۷۷۴
۱۳ـ۲ـ۲ تبادل تشعشع بین سطوح یک محفظه ۷۷۵
۱۳ـ۲ـ۳ تبادل تشعشع در جسم سیاه ۷۸۱

www.ketab.ir

۱۳ـ۲ـ۴ محفظهٔ دوسطحی ۷۸۳
۱۳ـ۲ـ۵ پرتوگیرها ۷۸۵
۱۳ـ۲ـ۶ سطح بازتابنده ۷۸۷
۱۳ـ۳ انتقال گرمای ترکیبی ۷۹۲
۱۳ـ۴ تبادل تشعشع در یک محیط فعال ۷۹۵
۱۳ـ۴ـ۱ جذب حجمی ۷۹۵
۱۳ـ۴ـ۲ گسیل و جذب تشعشع در گازها ۷۹۶
۱۳ـ۵ خلاصه ۸۰۰
مراجع ۸۰۱
مسائل ۸۰۲
پیوست الف خواص رادیاتیو بعضی مواد ۸۳۱
پیوست ب روابط و توابع ریاضی ۸۵۹
پیوست ج شرایط گرمایی برای تولید نوری یکنواخت در محفظه‌های یک‌بعدی ۸۶۵
پیوست د معادله‌های انتقال گرمای جابه‌جایی ۸۷۳
پیوست ه معادله‌های لایه مرزی جریان صفحه‌ای ۸۷۷
پیوست و حل انگرالی برای معادله لایه مرزی گذاری جریان روی صفحه تخت ۸۷۹

www.ketab.ir