انتقال گرما

ویراست دهم

جی. پی. هولمن

ترجمهٔ محمدرضا افضلی

www.ketab.ir

نشر کتاب دانشگاهی

www.ketab.ir

سرشناسه	هولمن، جک فیلیپ
	Holman, J. P. (Jack Philip)
عنوان و نام پدیدآور	انتقال گرما، ویراست دهم/ جی. پی. هولمن؛ ترجمهٔ محمدرضا افضلی
مشخصات نشر	تهران: نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۹۱
مشخصات ظاهری	۷۵۶ ص.: مصور، جدول، نمودار
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۱۰۷-۶۴-۷
وضعیت فهرست‌نویسی	فیپا
یادداشت	عنوان اصلی: Heat Transfer, 10th ed., c2010
یادداشت	واژه‌نامه
یادداشت	کتابنامه
موضوع	گرما -- انتقال
شناسهٔ افزوده	افضلی، محمدرضا، ۱۳۳۱-، مترجم
رده‌بندی کنگره	QC۳۲۰/الف۹هـ۸ ۱۳۹۱
رده‌بندی دیویی	۶۲۱/۴۰۲۲
شمارهٔ کتاب‌شناسی ملی	۳۰۴۴۷۳۷

نشر کتاب دانشگاهی

جی. بی. هولمن

انتقال گرما

ویراست دوم

ترجمهٔ محمدرضا افضلی

ویرایش فنی و نمونه‌خوانی
خدیجه حسینی

حروف‌چینی و صفحه‌آرایی
راضیه پایدار

امور هنری و گرافیک
فاران اتحاد

چاپ اول ۱۳۹۱
لیتوگرافی رامین
چاپ رامتین
صحافی کتیبه
تعداد صفحات ۷۵۶، خشتی

۱۵۰۰ نسخه

شابک ۷-۶۴-۵۱۰۷-۶۰۰-۹۷۸ ISBN 978-600-5107-64-7

مرکز پخش: خیابان بزرگمهر، بین وصال و قدس، شمارهٔ ۸۷، تلفکس ۶۶۴۶۷۲۲۶
Website: www.ketabedaneshgahi.com E-mail: info@ketabedaneshgahi.com

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

۲۵۰۰۰ تومان

www.ketab.ir

فهرست

پیشگفتار یک
دربارهٔ مؤلف پنج
فهرست نمادها هفت
رابطه‌های پایه‌ای انتقال گرما یازده

فصل ۱
مقدمه ۱
۱ـ۱ انتقال گرمای رسانشی ۱
۱ـ۲ رسانندگی گرمایی ۵
۱ـ۳ انتقال گرمای همرفتی ۱۰
۱ـ۴ انتقال گرمای تابشی ۱۲
۱ـ۵ ابعاد و واحدها ۱۳
۱ـ۶ خلاصه ۱۹
پرسش‌های دوره ۲۰
فهرست مثال‌های حل‌شده ۲۱
مسائل ۲۱
مراجع ۲۵

فصل ۲
رسانش حالت پایا ـ تک‌بُعدی ۲۷
۲ـ۱ مقدمه ۲۷
۲ـ۲ دیوار مسطح ۲۷
۲ـ۳ عایق و مقدار R ۲۸
۲ـ۴ سیستم‌های شعاعی ۲۹
۲ـ۵ ضریب کلی انتقال گرما ۳۳
۲ـ۶ ضخامت بحرانی عایق ۳۹
۲ـ۷ سیستم‌های منبع گرما ۴۱
۲ـ۸ استوانه با منابع گرما ۴۳
۲ـ۹ سیستم‌های رسانش ـ همرفت ۴۵
۲ـ۱۰ پره‌ها ۴۸
۲ـ۱۱ مقاومت گرمایی تماسی ۵۷
پرسش‌های دوره ۶۰
فهرست مثال‌های حل‌شده ۶۰
مسائل ۶۱
مراجع ۷۵

فصل ۳
رسانش حالت پایا ـ چندبُعدی ۷۷
۳ـ۱ مقدمه ۷۷
۳ـ۲ تحلیل ریاضی رسانش دوبُعدی گرما ۷۷
۳ـ۳ تحلیل ترسیمی ۸۱
۳ـ۴ ضریب‌شکل رسانشی ۸۳
۳ـ۵ روش‌های عددی تحلیل ۸۸
۳ـ۶ فرمول‌بندی عددی برحسب جزء مقاومت ۹۸
۳ـ۷ روش تکرار گاوس ـ سیدل ۹۹
۳ـ۸ ملاحظات مربوط به دقت ۱۰۲
۳ـ۹ نظیر الکتریکی رسانش دوبُعدی ۱۱۸
۳ـ۱۰ خلاصه ۱۱۹
پرسش‌های دوره ۱۲۰
فهرست مثال‌های حل‌شده ۱۲۰
مسائل ۱۲۰
مراجع ۱۳۶

فصل ۴
رسانش حالت ناپایا ۱۳۹
۴ـ۱ مقدمه ۱۳۹
۴ـ۲ سیستم ظرفیت گرمایی انباشته ۱۴۱
۴ـ۳ جریان گرمای گذرا در جسم نیمه‌نامتناهی ۱۴۳
۴ـ۴ شرایط مرزی همرفت ۱۴۷
۴ـ۵ سیستم‌های چندبُعدی ۱۶۲
۴ـ۶ روش عددی گذرا ۱۶۸
۴ـ۷ فرمول‌بندی ظرفیت و مقاومت گرمایی ۱۷۶
۴ـ۸ خلاصه ۱۹۲
پرسش‌های دوره ۱۹۳
فهرست مثال‌های حل‌شده ۱۹۳
مسائل ۱۹۴
مراجع ۲۱۳

فصل ۵
اصول همرفت ۲۱۵
۵ـ۱ مقدمه ۲۱۵

www.ketab.ir

۵ـ۲ جریان ویسکوز ۲۱۵
۵ـ۳ جریان غیرویسکوز ۲۱۸
۵ـ۴ لایهٔ مرزی آرام روی صفحهٔ تخت ۲۲۲
۵ـ۵ معادلهٔ انرژی لایهٔ مرزی ۲۲۸
۵ـ۶ لایهٔ مرزی گرمایی ۲۳۱
۵ـ۷ رابطهٔ بین اصطکاک سیال و انتقال گرما ۲۴۱
۵ـ۸ انتقال گرما در لایهٔ مرزی متلاطم ۲۴۳
۵ـ۹ ضخامت لایهٔ مرزی متلاطم ۲۵۰
۵ـ۱۰ انتقال گرما در جریان آرام داخل لوله ۲۵۳
۵ـ۱۱ جریان متلاطم داخل لوله ۲۵۷
۵ـ۱۲ انتقال گرما در جریان پرسرعت ۲۵۹
۵ـ۱۳ خلاصه ۲۶۴
پرسش‌های دوره ۲۶۴
فهرست مثال‌های حل‌شده ۲۶۶
مسائل ۲۶۶
مراجع ۲۷۵

فصل ۶
روابط تجربی و عملی برای انتقال گرمای همرفتی واداشته ۲۷۷
۶ـ۱ مقدمه ۲۷۷
۶ـ۲ رابطه‌های تجربی برای جریان داخل لوله ۲۷۹
۶ـ۳ جریان در اطراف استوانه و کره ۲۹۳
۶ـ۴ جریان از روی دسته‌لوله‌ها ۳۰۴
۶ـ۵ انتقال گرمای فلزات مذاب ۳۰۹
۶ـ۶ خلاصه ۳۱۲
پرسش‌های دوره ۳۱۴
فهرست مثال‌های حل‌شده ۳۱۵
مسائل ۳۱۵
مراجع ۳۲۴

فصل ۷
سیستم‌های همرفت طبیعی ۳۲۷
۷ـ۱ مقدمه ۳۲۷
۷ـ۲ انتقال گرمای همرفتی آزاد روی صفحهٔ تخت عمودی ۳۲۷
۷ـ۳ رابطه‌های تجربی برای همرفت آزاد ۳۳۲
۷ـ۴ همرفت آزاد از صفحه‌ها و استوانه‌های عمودی ۳۳۴
۷ـ۵ همرفت آزاد از استوانه‌های افقی ۳۴۰
۷ـ۶ همرفت آزاد از صفحه‌های افقی ۳۴۲
۷ـ۷ همرفت آزاد از سطوح شیب‌دار ۳۴۴
۷ـ۸ سیال‌های غیرنیوتنی ۳۴۵
۷ـ۹ روابط ساده‌شده برای هوا ۳۴۵
۷ـ۱۰ همرفت آزاد از کره‌ها ۳۴۶
۷ـ۱۱ همرفت آزاد در فضاهای بسته ۳۴۷
۷ـ۱۲ همرفت مرکب آزاد و واداشته ۳۵۸
۷ـ۱۳ خلاصه ۳۶۲
۷ـ۱۴ خلاصهٔ روش حل همهٔ مسئله‌های همرفت ۳۶۲
پرسش‌های دوره ۳۶۴
فهرست مثال‌های حل‌شده ۳۶۴
مسائل ۳۶۶
مراجع ۳۷۶

فصل ۸
انتقال گرمای تابشی ۳۷۹
۸ـ۱ مقدمه ۳۷۹
۸ـ۲ مکانیسم فیزیکی ۳۷۹
۸ـ۳ خواص تابش ۳۸۱
۸ـ۴ ضریب شکل تابش ۳۸۸
۸ـ۵ روابط بین ضرایب شکل ۳۹۸
۸ـ۶ تبادل گرما بین اجسام غیرسیاه ۴۰۴
۸ـ۷ سطوح مرزی نامتناهی ۴۱۱
۸ـ۸ سپرهای تابش ۴۱۶
۸ـ۹ تابش گاز ۴۲۰
۸ـ۱۰ شبکهٔ تابش برای محیط جذب‌کننده و عبوردهنده ۴۲۱
۸ـ۱۱ تبادل تابش با سطوح آینه‌ای ۴۲۶
۸ـ۱۲ تبادل تابشی با محیط عبوردهنده، بازتابنده و جذب‌کننده ۴۳۰
۸ـ۱۳ فرمول‌بندی برای حل عددی ۴۳۷
۸ـ۱۴ تابش خورشیدی ۴۵۱

www.ketab.ir

۸ـ۱۵ خواص تابشی محیط ۴۵۶
۸ـ۱۶ اثر تابش بر اندازه‌گیری دما ۴۵۹
۸ـ۱۷ ضریب انتقال گرمای تابشی ۴۶۰
۸ـ۱۸ خلاصه ۴۶۱
پرسش‌های دوره ۴۶۲
فهرست مثال‌های حل‌شده ۴۶۲
مسائل ۴۶۳
مراجع ۴۸۵

فصل ۹
انتقال گرمای جگانشی و جوششی ۴۸۷
۹ـ۱ مقدمه ۴۸۷
۹ـ۲ پدیده‌های انتقال گرمای جگالشی ۴۸۷
۹ـ۳ عدد جگالش ۴۹۲
۹ـ۴ جگالش فیلمی در داخل لوله‌های افقی ۴۹۳
۹ـ۵ انتقال گرمای جوششی ۴۹۶
۹ـ۶ روابط ساده‌شده برای انتقال گرمای جوششی آب ۵۰۸
۹ـ۷ لولهٔ گرما ۵۰۹
۹ـ۸ خلاصه و اطلاعات طراحی ۵۱۲
پرسش‌های دوره ۵۱۳
فهرست مثال‌های حل‌شده ۵۱۳
مسائل ۵۱۳
مراجع ۵۱۸

فصل ۱۰
مبدل‌های حرارتی ۵۲۱
۱۰ـ۱ مقدمه ۵۲۱
۱۰ـ۲ ضریب کلی انتقال گرما ۵۲۱
۱۰ـ۳ ضریب انسداد ۵۲۷
۱۰ـ۴ انواع مبدل حرارتی ۵۲۸
۱۰ـ۵ اختلاف دمای میانگین لگاریتمی ۵۳۱
۱۰ـ۶ روش کارایی-تعداد واحدهای انتقال (NTU) ۵۴۰
۱۰ـ۷ مبدل‌های حرارتی فشرده ۵۵۵
۱۰ـ۸ تحلیل در حالت متغیر بودن خواص ۵۵۹
۱۰ـ۹ طراحی مبدل حرارتی و ملاحظات مربوط به آن ۵۶۷
پرسش‌های دوره ۵۶۸
فهرست مثال‌های حل‌شده ۵۶۸
مسائل ۵۶۹
مراجع ۵۸۵

فصل ۱۱
انتقال جرم ۵۸۷
۱۱ـ۱ مقدمه ۵۸۷
۱۱ـ۲ قانون نفوذ فیک ۵۸۷
۱۱ـ۳ نفوذ درگازها ۵۸۹
۱۱ـ۴ نفوذ در مایعات و جامدات ۵۹۳
۱۱ـ۵ ضریب انتقال جرم ۵۹۴
۱۱ـ۶ فرایندهای تبخیر در جو ۵۹۷
پرسش‌های دوره ۶۰۰
فهرست مثال‌های حل‌شده ۶۰۱
مسائل ۶۰۱
مراجع ۶۰۳

فصل ۱۲
خلاصه و اطلاعات طراحی ۶۰۵
۱۲ـ۱ مقدمه ۶۰۵
۱۲ـ۲ مسائل رسانش ۶۰۶
۱۲ـ۳ روابط انتقال گرمای همرفتی ۶۰۸
۱۲ـ۴ انتقال گرمای تابشی ۶۲۳
۱۲ـ۵ مبدل‌های حرارتی ۶۲۸
فهرست مثال‌های حل‌شده ۶۴۵
مسائل ۶۴۶

پیوست الف
جدول‌ها ۶۴۹
الف-۱ تابع خطا ۶۴۹
الف-۲ خواص ترمودینامیکی فلزات ۶۵۰
الف-۳ خواص ترمودینامیکی غیرفلزات ۶۵۳
الف-۴ خواص مایعات اشباع ۶۵۶
الف-۵ خواص هوا در فشار جو ۶۵۸
الف-۶ خواص گازها در فشار جو ۶۵۹

www.ketab.ir

الف-۷ خواص فیزیکی بعضی از فلزات با نقطهٔ ذوب پایین ۶۶۱
الف-۸ ضریب نفوذ گازها و بخارها در هوا در دمای ۲۵°C و فشار ۱ atm ۶۶۱
الف-۹ خواص آب (مایع اشباع) ۶۶۲
الف-۱۰ گسیل‌مندی کل سطوح مختلف در راستای قائم ۶۶۳
الف-۱۱ ابعاد لولهٔ فولادی ۶۶۵
الف-۱۲ ضرایب تبدیل ۶۶۶

پیوست ب
جواب‌های دقیق معادله‌های لایهٔ مرزی آرام ۶۶۷

پیوست ج
روابط تحلیلی برای نمودارهای هایسلر ۶۷۳

پیوست د
استفاده از نرم‌افزار Excel میکروسافت برای حل مسئله‌های انتقال گرما ۶۷۹
د-۱ مقدمه ۶۷۹
د-۲ الگوی Excel برای حل مسئله‌های انتقال گرمای حالت پایا ۶۷۹
د-۳ حل معادله‌های شبکهٔ غیریکنواخت و/یا خواص غیریکنواخت ۶۸۳
د-۴ منابع گرما و شرایط مرزی تابش ۶۸۳
د-۵ راهکار Excel برای انتقال گرمای گذرا ۶۸۴
د-۶ فرمول‌بندی برای گرمایش ظرفیت‌انباشته با همرفت و تابش ۶۹۷
فهرست مثال‌های حل‌شده ۷۱۲
مراجع ۷۱۲

نمایه ۷۱۳

واژه‌نامه ۷۲۵

www.ketab.ir

فهرست مثال‌های حل‌شده

فصل ۱

مقدمه ۱

۱ـ۱ رسانش در صفحهٔ مسی ۱۶

۱ـ۲ محاسبهٔ همرفت ۱۷

۱ـ۳ انتقال گرمای چندمودی ۱۷

۱ـ۴ منبع گرما و همرفت ۱۷

۱ـ۵ انتقال گرمای تابشی ۱۸

۱ـ۶ اتلاف گرما از طریق همرفت و تابش ۱۸

فصل ۲

رسانش حالت پایا-تک‌بُعدی ۲۷

۲ـ۱ رسانش چندلایه‌ای ۳۱

۲ـ۲ سیستم استوانه‌ای چندلایه ۳۲

۲ـ۳ انتقال گرما در دیوار مرکب (کامپوزیت) ۳۶

۲ـ۴ صرفه‌جویی در هزینهٔ انرژی با عایق‌کاری اضافی ۳۸

۲ـ۵ ضریب کلی انتقال گرما برای لوله ۳۹

۲ـ۶ ضخامت بحرانی عایق ۴۰

۲ـ۷ منبع گرما با همرفت ۴۴

۲ـ۸ تأثیر رسانندگی گرمایی در توزیع دما در پره ۵۳

۲ـ۹ پرهٔ آلومینیمی مستقیم ۵۵

۲ـ۱۰ پرهٔ آلومینیمی محیطی ۵۵

۲ـ۱۱ میله با منابع گرما ۵۶

۲ـ۱۲ تأثیر رسانایی تماسی در انتقال گرما ۶۰

فصل ۳

رسانش حالت پایا-چندبُعدی ۷۷

۳ـ۱ لولهٔ مدفون ۸۷

۳ـ۲ کورهٔ مکعبی ۸۷

۳ـ۳ دیسک مدفون ۸۷

۳ـ۴ دیسک‌های موازی مدفون ۸۸

۳ـ۵ مسئلهٔ نُه‌گرهی ۹۳

۳ـ۶ محاسبهٔ گاوس-سیدل ۱۰۳

۳ـ۷ فرمول‌بندی عددی با تولید گرما ۱۰۴

۳ـ۸ تولید گرما با اجزای گرهی غیریکنواخت ۱۰۶

۳ـ۹ مادهٔ مرکب با اجزای گرهی غیریکنواخت ۱۰۸

۳ـ۱۰ شرط مرزی تابش ۱۱۱

۳ـ۱۱ استفاده از شبکه‌ای با اندازهٔ متغیر ۱۱۳

۳ـ۱۲ فرمول‌بندی عددی سه‌بُعدی ۱۱۵

فصل ۴

رسانش حالت ناپایا ۱۳۹

۴ـ۱ سرد کردن گوی فولادی در هوا ۱۴۳

۴ـ۲ جسم جامد نیمه‌نامتناهی با تغییر ناگهانی شرایط سطحی ۱۴۶

۴ـ۳ انرژی پالسی در سطح جسم جامد نیمه‌نامتناهی ۱۴۶

۴ـ۴ حذف گرما از جسم جامد نیمه‌نامتناهی ۱۴۷

۴ـ۵ قرار گرفتن ناگهانی صفحهٔ نیمه‌نامتناهی در معرض همرفت ۱۵۹

۴ـ۶ صفحهٔ آلومینیمی که ناگهان در معرض همرفت قرار می‌گیرد ۱۶۰

۴ـ۷ استوانهٔ بلندی که ناگهان در معرض همرفت قرار می‌گیرد ۱۶۱

۴ـ۸ استوانهٔ نیمه‌نامتناهی که ناگهان در معرض همرفت قرار می‌گیرد ۱۶۵

۴ـ۹ استوانه با طول متناهی که ناگهان در معرض همرفت قرار می‌گیرد ۱۶۶

۴ـ۱۰ اتلاف گرما از استوانه‌ای با طول متناهی ۱۶۷

۴ـ۱۱ سرد کردن ناگهانی میله ۱۷۸

۴ـ۱۲ فرمول‌بندی ضمنی ۱۷۹

۴ـ۱۳ سرد کردن سرامیک ۱۸۱

۴ـ۱۴ سرد کردن میلهٔ فولادی، h غیریکنواخت ۱۸۲

www.ketab.ir

۴ـ۱۵ گرم کردن و سرد کردن تابشی ۱۸۶
۴ـ۱۶ رسانش گذرا همراه با تولید گرما ۱۸۸
۴ـ۱۷ حل عددی در حالت متغیر بودن رسانندگی ۱۹۰

فصل ۵
اصول همرفت ۲۱۵
۵ـ۱ جریان آب در پخش‌کن ۲۲۰
۵ـ۲ انبساط هم‌آنتروپی هوا ۲۲۱
۵ـ۳ جریان جرمی و ضخامت لایهٔ مرزی ۲۲۷
۵ـ۴ صفحهٔ تخت هم‌دما که سراسر طول آن گرم می‌شود ۲۳۷
۵ـ۵ صفحهٔ تخت با شارگرمای ثابت ۲۳۸
۵ـ۶ صفحه با طول اولیهٔ گرم‌نشده ۲۳۹
۵ـ۷ جریان روغن روی صفحهٔ تخت گرم‌شده ۲۴۰
۵ـ۸ نیروی پسا روی صفحهٔ تخت ۲۴۲
۵ـ۹ انتقال گرمای متلاطم از صفحهٔ تخت هم‌دما ۲۴۱
۵ـ۱۰ ضخامت لایهٔ مرزی متلاطم ۲۵۱
۵ـ۱۱ انتقال گرمای پرسرعت برای صفحهٔ تخت ۲۶۱

فصل ۶
روابط تجربی و عملی برای انتقال گرمای همرفتی واداشته ۲۷۷
۶ـ۱ انتقال گرمای متلاطم در لوله ۲۸۸
۶ـ۲ گرم کردن آب در جریان آرام داخل لوله ۲۸۸
۶ـ۳ گرم کردن هوا در جریان آرام داخل لوله با شارگرمای ثابت ۲۹۰
۶ـ۴ گرم کردن هوا با جدار لولهٔ هم‌دما ۲۹۱
۶ـ۵ انتقال گرما در لولهٔ ناصاف ۲۹۱
۶ـ۶ انتقال گرمای متلاطم در لولهٔ کوتاه ۲۹۲
۶ـ۷ جریان هوا روی استوانهٔ هم‌دما ۳۰۱
۶ـ۸ انتقال گرما از سیم گرم‌شده با عبور الکتریسیته ۳۰۲
۶ـ۹ انتقال گرما از کره ۳۰۳
۶ـ۱۰ گرم کردن هوا در دسته‌لولهٔ خطی ۳۰۷
۶ـ۱۱ روش محاسبهٔ جایگزین ۳۰۹
۶ـ۱۲ گرم کردن بیسموت در لوله ۳۱۲

فصل ۷
سیستم‌های همرفت طبیعی ۳۲۷
۷ـ۱ شارگرمای ثابت از صفحهٔ عمودی ۳۳۸
۷ـ۲ انتقال گرما از صفحهٔ عمودی هم‌دما ۳۳۹
۷ـ۳ انتقال گرما از لولهٔ افقی غوطه‌ور در آب ۳۴۰
۷ـ۴ انتقال گرما از سیم نازک در هوا ۳۴۱
۷ـ۵ لولهٔ افقی گرم در هوا ۳۴۱
۷ـ۶ خنک کردن مکعب در هوا ۳۴۳
۷ـ۷ محاسبه با استفاده از روابط ساده‌شده ۳۴۶
۷ـ۸ انتقال گرما در فضای بستهٔ عمودی ۳۵۱
۷ـ۹ انتقال گرما در فاصلهٔ هوایی افقی ۳۵۲
۷ـ۱۰ انتقال گرما در لایهٔ آب ۳۵۳
۷ـ۱۱ کاهش همرفت در فاصلهٔ هوایی ۳۵۳
۷ـ۱۲ انتقال گرما در فضای تخلیه‌شده ۳۵۷
۷ـ۱۳ همرفت مرکب آزاد و واداشته با هوا ۳۶۰

فصل ۸
انتقال گرمای تابشی ۳۷۹
۸ـ۱ عبور و جذب در صفحهٔ شیشه‌ای ۳۸۸
۸ـ۲ انتقال گرما بین سطوح سیاه ۳۹۷
۸ـ۳ محاسبهٔ ضریب شکل برای استوانه‌های تهباز ۴۰۱
۸ـ۴ محاسبهٔ ضریب شکل برای مخروط ناقص ۴۰۲
۸ـ۵ محاسبهٔ ضریب شکل برای بازتابگر استوانه‌ای ۴۰۳
۸ـ۶ صفحه‌های داغ محصور در اتاق ۴۰۸
۸ـ۷ سطح در توازن تابشی ۴۱۰
۸ـ۸ نیم‌کرهٔ باز در اتاق بزرگ ۴۱۳
۸ـ۹ گسیل‌مندی مؤثر سطح پره‌دار ۴۱۵
۸ـ۱۰ کاهش انتقال گرما با سپر صفحه‌ای موازی ۴۱۸
۸ـ۱۱ سپر استوانه‌ای باز در اتاق بزرگ ۴۱۸
۸ـ۱۲ شبکهٔ تابش گاز بین صفحه‌های موازی ۴۲۵

www.ketab.ir

۸ـ۱۳ کاواک با پوشش شفاف ۴۳۴
۸ـ۱۴ سیستم عبوری و بازتابی برای دریچهٔ کوره ۴۳۵
۸ـ۱۵ حل عددی محفظه ۴۴۱
۸ـ۱۶ جواب‌های عددی برای صفحه‌های موازی ۴۴۱
۸ـ۱۷ تابش از حفره‌ای با چگالی شار خروجی متغیر ۴۴۳
۸ـ۱۸ گرم‌کن با شار گرمای ثابت و سپرهای پیرامونی ۴۴۶
۸ـ۱۹ حل عددی سیستم مرکب همرفتی و تابشی (سیستم غیرخطی) ۴۴۹
۸ـ۲۰ دماهای تعادلی محیط خورشیدی ۴۵۳
۸ـ۲۱ تأثیر همرفت در دماهای تعادلی خورشیدی ۴۵۴
۸ـ۲۲ کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت ۴۵۵
۸ـ۲۳ خطای ناشی از تابش در اندازه‌گیری دما ۴۶۰

فصل ۹
انتقال گرمای چگالشی و جوششی ۴۸۷
۹ـ۱ چگالش روی صفحهٔ عمودی ۴۹۴
۹ـ۲ چگالش روی دسته‌لوله ۴۹۵
۹ـ۳ جوشش روی صفحهٔ مسی ۵۰۴
۹ـ۴ جوشش جریانی ۵۰۸
۹ـ۵ جوشش آب در ماهی‌تابه ۵۰۹
۹ـ۶ مقایسهٔ شارهای گرما ۵۱۱

فصل ۱۰
مبدل‌های حرارتی ۵۲۱
۱۰ـ۱ ضریب کلی انتقال گرما برای لوله در هوا ۵۲۳
۱۰ـ۲ ضریب کلی انتقال گرما برای لوله در معرض بخار آب ۵۲۵
۱۰ـ۳ تأثیر ضریب انسداد ۵۲۷
۱۰ـ۴ محاسبهٔ اندازهٔ مبدل حرارتی در صورت معلوم بودن دماها ۵۳۶
۱۰ـ۵ مبدل حرارتی پوسته‌ـلوله‌ای ۵۳۷
۱۰ـ۶ طراحی مبدل حرارتی پوسته‌ـلوله‌ای ۵۳۷
۱۰ـ۷ مبدل حرارتی با جریان عرضی و یک سیال مخلوط‌شده ۵۳۹
۱۰ـ۸ آثار آهنگ‌های جریان غیرطرح برای مبدل مثال ۱۰ـ۷ ۵۳۹
۱۰ـ۹ محاسبه با استفاده از روش کارایی‌ـNTU ۵۴۷
۱۰ـ۱۰ محاسبهٔ مبدل حرارتی مثال ۱۰ـ۴ ۵۴۷
۱۰ـ۱۱ مبدل با جریان عرضی و دو سیال مخلوط‌نشده ۵۴۸
۱۰ـ۱۲ مقایسهٔ گزینه‌های یک یا دو مبدل حرارتی ۵۵۰
۱۰ـ۱۳ مبدل پوسته‌ای‌ـلوله‌ای به‌عنوان گرم‌کن هوا ۵۵۲
۱۰ـ۱۴ کندانسور آمونیاک ۵۵۳
۱۰ـ۱۵ استفاده از مبدل حرارتی با جریان عرضی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی ۵۵۳
۱۰ـ۱۶ ضریب انتقال گرما در مبدل‌های فشرده ۵۵۸
۱۰ـ۱۷ پاسخ گذرای سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی ۵۶۰
۱۰ـ۱۸ تحلیل خواص‌ـمتغیر گرم‌کن کانالی ۵۶۳
۱۰ـ۱۹ عملکرد کندانسور بخار ۵۶۵

فصل ۱۱
انتقال جرم ۵۸۷
۱۱ـ۱ ضریب نفوذ CO_2 ۵۸۹
۱۱ـ۲ نفوذ آب در لوله ۵۹۳
۱۱ـ۳ دمای حباب‌ـخیس ۵۹۶
۱۱ـ۴ رطوبت نسبی جریان هوا ۵۹۷
۱۱ـ۵ آهنگ تبخیر آب ۵۹۹

فصل ۱۲
خلاصه و اطلاعات طراحی ۶۰۵
۱۲ـ۱ خنک کردن مکعب آلومینیمی ۶۲۸
۱۲ـ۲ خنک کردن قطعهٔ پره‌دار ۶۳۰
۱۲ـ۳ دمای محاسبهٔ خواص در فرایند همرفت با گاز ایده‌آل ۶۳۲
۱۲ـ۴ تحلیل طرح یک پنجرهٔ عایق ۶۳۴
۱۲ـ۵ مبدل حرارتی دولوله‌ای ۶۳۵

www.ketab.ir

۶ـ۱۲ نگهداری در یخچال در اقلیم بیابانی ۶۳۸
۷ـ۱۲ کوران هوای سرد در اتاق گرم ۶۳۹
۸ـ۱۲ طراحی عایق در معرض خلأ ۶۴۰
۹ـ۱۲ گرم‌کن تابشی ۶۴۲
۱۰ـ۱۲ خنک‌کن برای گرم‌کن تابشی ۶۴۴
۱۱ـ۱۲ اجاق‌برقی تابشی برای جوش آوردن آب ۶۴۴

پیوست ج
روابط تحلیلی برای نمودارهای هایسلر ۶۷۳
ج-۱ سرد کردن استوانهٔ کوچک ۶۷۶

پیوست د
استفاده از نرم‌افزار Excel میکروسافت برای حل مسئله‌های انتقال گرما ۶۷۹
د-۱ توزیع دما در صفحهٔ دوبُعدی ۶۸۶
د-۲ تحلیل و نمایش توزیع دما در پرهٔ مستقیم دوبُعدی با استفاده از نرم‌افزار Excel ۶۸۸
د-۳ تحلیل مثال ۵ـ۳ با شرط مرزی تابش و بدون آن، با استفاده از نرم‌افزار Excel ۶۸۹
د-۴ صفحه با منبع گرمای مرزی و همرفت ۶۹۳
د-۵ تحلیل گذرای مثال ۳ـ۵ برای حالت پایا ۶۹۴
د-۶ سرمایش جسم آلومینیمی پره‌دار ۶۹۹
د-۷ گرمایش‌گذرای جعبهٔ ادوات الکترونیکی داخل محفظه ۷۰۲
د-۸ فرمول‌بندی‌های متقارن ۷۰۴
د-۹ جسم با مواد مرکب ۷۰۷

www.ketab.ir

پیشگفتار

این کتاب به بررسی مقدماتی اصول انتقال گرما اختصاص دارد. مطالب آن به‌منزلهٔ کتاب درسی، برای ارائه در یک نیم‌سال، در سال سوم یا بالاتر بسته به اهداف درسی، زیاد است. این درس معمولاً در برنامهٔ درسی رشته‌های مهندسی شیمی و مهندسی مکانیک گنجانده می‌شود، اما گرفتن آن به دانشجویان رشتهٔ مهندسی برق نیز توصیه می‌شود، و علت آن اهمیت مسئله‌های سرمایش درکاربردهای مختلف الکترونیک است. تجربهٔ نگارنده نشان می‌دهد که دانشجویان مهندسی برق به‌خوبی از عهدهٔ فراگیری درس انتقال گرما برمی‌آیند، حتی اگر رسماً درس ترمودینامیک یا مکانیک سیالات را نگذرانده باشند. آشنایی با معادلات دیفرانسیل معمولی برای درک مطالب درس انتقال گرما سودمند است.

در ارائهٔ موضوع، خطوط کلاسیک بررسی و تشریح مجزای رسانش، همرفت و تابش دنبال شده است، هرچند تأکید می‌شود که مکانیسم فیزیکی انتقال گرمای همرفتی، در لایهٔ سیال ساکن نزدیک سطح انتقال گرما، رسانش است. در سراسر کتاب بر درک فیزیکی مطلب تأکید شده و در عین حال، در وضعیت‌هایی که یافتن جواب تحلیلی ساده امکان‌پذیر نیست، به داده‌های تجربی معتبار تکیه شده است.

رسانش از هر دو دیدگاه تحلیلی و عددی بررسی می‌شود، به‌طوری که دانشجو به بینشی مجهز می‌شود که حاصل روش‌های تحلیلی است و به ابزارهای مهم تحلیل عددی دست می‌یابد که غالباً در عمل باید از آن‌ها استفاده کند. مثال‌های زیادی ارائه شده است که شامل منابع گرما و شرایط مرزی تابش، اندازهٔ شبکهٔ غیریکنواخت، و یک مثال از سیستم گرهی سه‌بُعدی است. در بحث انتقال گرمای همرفتی نیز شیوهٔ مشابهی دنبال شده است. از تحلیل مجتمع‌شده لایه‌های مرزی همرفتی آزاد و واداشته برای ارائهٔ تصویری فیزیکی از فرایند همرفت استفاده شده است. با استفاده از این توصیف فیزیکی می‌توان نتایجی استنباط کرد که طبیعتاً به روابط تجربی و عملی لازم برای محاسبهٔ ضرایب انتقال گرمای همرفتی منتهی می‌شوند. از آن‌جا که روش شبکهٔ تابش محمل آموزشی آسان‌تری است، در معرفی تحلیل سیستم‌های تابشی از این روش استفادهٔ گسترده‌ای می‌شود، اما پس از آن فرمول‌بندی کلی‌تری ارائه خواهد شد. دستگاه‌های معادلات غیرخطی که برای حل آن‌ها باید از روش تکرار استفاده کرد نیز در فصل‌های رسانش و تابش مطرح می‌شوند، اما برای اطلاع از جزئیات حل باید به منابع نرم‌افزاری ذکرشده رجوع کرد. فرض بر این است که دانشجوی علاقه‌مند برای حل دستگاه‌های معادلات غیرخطی روشی را انتخاب کند که شخصاً بیش‌تر ترجیح می‌دهد.

رهیافت‌های اختلاف دمای میانگین لگاریتمی و کارایی در تحلیل مبدل‌های حرارتی مطرح شده‌اند، زیرا هر دو کاربرد گسترده‌ای دارند و هر یک مزایای خاص خود را در اختیار طراح می‌گذارد. نفوذ و انتقال جرم به‌اختصار و در سطح مقدماتی بررسی شده است تا دانشجو با این فرایندها آشنا شود و تناظرهای مهم بین انتقال گرما، انتقال جرم و انتقال اندازه‌حرکت را بهتر درک کند. فصل جدید ۱۲ به این ویراست اضافه شده است که به جمع‌بندی مطالب کتاب و اطلاعات طراحی اختصاص دارد. در این فصل نمودارهای محاسباتی متعددی ارائه شده تا در طراحی مقدماتی، یعنی در مرحله‌ای که ممکن است سرعت و سهولت، از دقت لازم در مراحل نهایی طراحی، اهمیت بیش‌تری داشته باشند، به طراح کمک کنند. یازده مثال جدید مطرح‌شده در این فصل، روش استفاده از نمودارها را نشان می‌دهند.

در پایان هر فصل چندین مسئله مطرح شده است. بعضی از این مسئله‌ها ماهیت تکراری دارند تا دانشجو را با

www.ketab.ir

عملیات عددی و مرتبهٔ بزرگی پارامترهای گوناگونی که در انتقال گرما با آن‌ها روبه‌رو می‌شود، آشنا کنند. مسئله‌های دیگر، با واداشتن دانشجو به کاربرد اصول پایه‌ای در مورد وضعیت‌های جدید و به‌دست آوردن معادله‌های مناسب برای این وضعیت‌ها، موضوع را تعمیم می‌بخشند. هر دو نوع مسئله مهم‌اند.

در پایان مسائل هر فصل، چندین مسئله با عنوان «مسائل طراحی» ارائه شده است. مسئله‌های این بخش معمولاً بازند و به جواب واحدی منتهی نمی‌شوند. در مواردی، حل آن‌ها نسبتاً طولانی است و در فرایند حل مسئله، قضاوت و تصمیم‌گیری ضرورت می‌یابد. در این کتاب بیش از صد مسئله از این نوع مطرح شده است.

انتقال گرما موضوعی ایستا و بی‌تحرک نیست. پیشرفت‌های جدید، تقریباً به‌طور منظم، روی می‌دهد و جواب‌های تحلیلی و داده‌های تجربی بهتر، پیوسته در اختیار دست‌اندرکاران حرفه‌ای این حوزه قرار می‌گیرد. به دلیل حجم زیاد اطلاعات نوشتگان پژوهشی، در صورتی که جنبه‌های متعدد و گوناگون موضوع با تفاوت‌های ظریف مطرح و تشریح شود، ممکن است دانشجوی مبتدی در انبوه اطلاعات غرق گردد. این کتاب طوری طراحی شده است که به‌صورت کتاب درسی مقدماتی از آن استفاده شود، بنابراین نگارنده نقش شارح نوشته‌ها را برعهده گرفته است و عنوان یافته‌ها و معادله‌هایی را عرضه می‌کند که دانشجو بتواند بلافاصله و مستقیماً از آن‌ها استفاده کند. امید می‌رود که در بسیاری از موارد توجه دانشجو به آثار جامع‌تری معطوف شود که مطلب را ژرف‌تر می‌شکافند و در مورد اغلب موضوعات انتقال گرما دردسترس‌اند. در این صورت، فهرست مرجع‌هایی که در پایان هر فصل آمده است، دری از نوشته‌های انتقال گرما را به روی دانشجوی کوشا می‌گشاید و می‌تواند واسطه‌ای برای تحقیقات بیش‌تر باشد. در بسیاری از فصل‌ها، تعداد مراجع بیش از حد لزوم است، و استنادات قدیمی‌تر که بیش‌تر اهمیت تاریخی دارند، گشاده‌دستانه حفظ شده‌اند. نگارنده احساس می‌کند که این گشاده‌دستی به دانشجو آزاری نمی‌رساند و از سودمندی کتاب کم نمی‌کند.

بدیهی است کتابی که به ویراست دهم می‌رسد، منعکس‌کنندهٔ دادوگرفت‌های فراوان و فرایندهای تکمیل و تکوین در طول سال‌هاست. اگرچه مکانیسم‌های فیزیکی پایه‌ای انتقال گرما تغییر نکرده‌اند، فنون تحلیلی و داده‌های تجربی بازنگری و اصلاح شده‌اند. در این ویراست بعضی از مطالب قدیمی حذف شده، مسئله‌های جدید به کتاب اضافه شده، و بعضی از مسئله‌های قدیمی به‌صورت تازه‌ای مطرح شده‌اند. شانزده مثال حل‌شدهٔ جدید نیز به کتاب اضافه شده است. در این ویراست، در ابتدای کتاب و درست پس از فهرست مطالب، فهرست همهٔ مثال‌های حل‌شده با ذکر صفحه آمده است. فهرست این مثال‌ها در پایان هر فصل نیز مانند قبل، حفظ شده است.

یکی از ویژگی‌های این ویراست بحثی دربارهٔ استفاده از نرم‌افزار Excel برای حل هر دو نوع مسئلهٔ انتقال گرمای حالت پایا و گذراست. در پیوست جدید (د) شرح نسبتاً کاملی از نرم‌افزار Excel آمده است که شامل منابع گرما و شرایط مرزی تابشی، شرایط حالت پایا و شرایط گذرا، و فصل‌مشترک‌های بین مواد مرکب است. الگوی ویژه‌ای ایجاد می‌شود که به‌طور خودکار معادله‌های گرهی را برای متداول‌ترین شرایط مرزی می‌نویسد. ده مثال از کاربرد Excel برای حل مسئله ارائه شده است که بعضی از آن‌ها صورت‌های تغییریافته و گسترش‌داده‌شدهٔ مثال‌هایی هستند که قبلاً در فصل‌های ۳ و ۴ حل شده‌اند. در یکی از مثال‌ها نشان داده می‌شود که هرگاه زمان به اندازهٔ کافی طولانی باشد، جواب حالت پایا از جواب گذرا به‌دست می‌آید.

علاوه‌بر جدول‌های خاص فرمول‌های همرفت که در پایان هر یک از فصل‌های اصلی مربوط به همرفت

www.ketab.ir

(فصل‌های ۵، ۶ و ۷) ارائه شده، برای تحلیل همهٔ مسئله‌های همرفت راهکاری کلی ارائه شده است که هم داخل جلد کتاب و هم در متن آن آمده است. اگرچه ممکن است بعضی‌ها این راهکار را نوعی «رهیافت کتاب آشپزی» تلقی کنند، نیت واقعی کمک به دست‌اندرکاران حوزهٔ انتقال گرما برای اجتناب از افتادن در تله‌های متداول و ساده هنگام حل مسئله‌های همرفت است.

دستگاه واحدهای SI (متریک) دستگاه واحدهای اصلی این کتاب است. چون دستگاه Btu-ft-pound هنوز کاربرد گسترده‌ای دارد، جواب‌ها و مراحل میانی مثال‌ها گاه برحسب این واحدها بیان شده‌اند. چند مثال و مسئله نیز برحسب واحدهای انگلیسی بیان شده‌اند.

همهٔ مطالب این کتاب را نمی‌توان در یک نیم‌سال تحصیلی درس داد. اما امید می‌رود که تنوع موضوعات و مسائل، انعطاف‌پذیری لازم را برای بسیاری از کاربردها تأمین کند.

جی. پی. هولمن

www.ketab.ir

فهرست نمادها

a سرعت موضعی صوت

a ضریب تضعیف (فصل ۸)

A مساحت

A بازتاب نسبی (فصل ۸)

A_m سطح مقطع پر (فصل ۲)

c گرمای ویژه، معمولاً kJ/kg .° C

C غلظت (فصل ۱۱)

C_D ضریب پسا،
تعریف‌شده با معادلهٔ (۶ـ۱۳)

C_f ضریب اصطکاک،
تعریف‌شده با معادلهٔ (۵ـ۵۲)

c_p گرمای ویژه در فشار ثابت، معمولاً
kJ/kg .° C

c_v گرمای ویژه در حجم ثابت، معمولاً
kJ/kg .° C

d قطر

D عمق یا قطر

D ضریب نفوذ (فصل ۱۱)

D_H قطر هیدرولیکی، تعریف‌شده با معادلهٔ (۶ـ۱۴)

e انرژی داخلی در واحد جرم، معمولاً kJ/kg

E انرژی داخلی، معمولاً kJ

E توان گسیل، معمولاً W/m^2 (فصل ۸)

$E_{b\nu}$ ثابت خورشیدی (فصل ۸)

$E_{b\lambda}$ توان گسیل جسم سیاه در
واحد طول موج، تعریف‌شده با معادلهٔ (۸ـ۱۲)

f ضریب اصطکاک

F نیرو، معمولاً N

F_{ij} یا F_{m-n} ضریب‌شکل تابش
برای تابش از سطح i به سطح j

g شتاب گرانش

g_c ضریب تبدیل، تعریف‌شده با
معادلهٔ (۱ـ۱۴)

G چگالی شار ورودی (فصل ۸)

$G = \frac{\dot{m}}{A}$ سرعت جرمی

h ضریب انتقال گرما،
معمولاً W/m^2 .° C

$\overline{h}$ ضریب میانگین انتقال گرما

h_{fg} آنتالپی تبخیر، kJ/kg

h_r ضریب انتقال گرمای تابشی (فصل ۸)

i آنتالپی، معمولاً kJ/kg

I شدت تابش

I خورتاب (فصل ۸)

I_ν خورتاب در بسامد خاصی چو

J چگالی شار خروجی (فصل ۸)

k رسانندگی گرمایی، معمولاً W/m .° C

k_e رسانندگی گرمایی مؤثر
فضاهای بسته (فصل ۷)

k_λ ضریب پراکندگی (فصل ۸)

K ضریب انتقال جرم، m/h

www.ketab.ir

رابطه‌های پایه‌ای انتقال گرما

قانون رسانش گرمای فوریه:

$$q_x = -kA\frac{\partial T}{\partial x}$$

مقاومت گرمایی مشخصه برای رسانش $= \Delta x/kA$

مقاومت گرمایی مشخصه برای همرفت $= 1/hA$

انتقال گرمای کلی $= \Delta T_{کل}/\Sigma R_{سری}$

انتقال گرمای همرفتی از سطح:

$q = hA(T_{سطح} - T_{جریان آزاد})$ برای جریان‌های خارجی

$q = hA(T_{سطح} - T_{توده سیال})$ برای جریان در کانال‌ها

همرفت واداشته: $\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})$ (فصل‌های ۵ و ۶، جدول‌های ۵ـ۲ و ۶ـ۸)

همرفت آزاد: $\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Gr}, \mathrm{Pr})$ (فصل ۷، جدول ۷ـ۵)

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u x}{\mu} \qquad \mathrm{Gr} = \frac{\beta^2 g \Delta T x^3}{\mu^2} \qquad \mathrm{Pr} = \frac{c_p \mu}{k}$$

$x =$ بُعد مشخصه

راهکار کلی برای تحلیل مسئله‌های همرفت: بخش ۷ـ۱۲، شکل ۷ـ۱۵، داخل جلد کتاب.

انتقال گرمای تابشی (فصل ۸)

توان گسیل جسم سیاه، $\sigma T^4 = \dfrac{\text{انرژی گسیل‌شده توسط جسم سیاه}}{\text{زمان} \times \text{سطح}}$

چگالی شار خروجی $= \dfrac{\text{انرژی خروجی از سطح}}{\text{زمان} \times \text{سطح}}$

چگالی شار ورودی $= \dfrac{\text{انرژی تابیده به سطح}}{\text{زمان} \times \text{سطح}}$

ضریب‌شکل تابش $F_{mn} =$ کسری از انرژی که سطح m را ترک می‌کند و به سطح n می‌رسد.

رابطهٔ تقابل: $A_m F_{mn} = A_n F_{nm}$

انتقال گرمای تابشی از سطحی به مساحت A_1، گسیل‌مندی ε_1 و دمای $T_1(K)$ به محفظه‌ای بزرگ با دمای $T_2(K)$:

$$q = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

روش LMTD برای مبدل‌های حرارتی (بخش ۱۰ـ۵):

$$q = UAF\,\Delta T_m$$

که در آن $F =$ ضریب مربوط به مبدل حرارتی موردنظر؛ $\mathrm{LMTD} = \Delta T_m$ برای مبدل حرارتی دولوله‌ای ناهمسو با دماهای ورودی و خروجی همانند

روش کارایی NTU برای مبدل‌های حرارتی (بخش ۱۰ـ۶، جدول ۱۰ـ۳):

$$\varepsilon = \frac{\text{اختلاف دمای سیال با مقدار مینیمم } mc}{\text{بیشترین اختلاف دما در مبدل حرارتی}}$$

$$\mathrm{NTU} = \frac{UA}{C_{\min}} \qquad \varepsilon = f(\mathrm{NTU}, C_{\min}/C_{\max})$$

برای اطلاع از تعریف هر جمله به فهرست نمادها در صفحهٔ هفت رجوع کنید.

www.ketab.ir