

انتقال گرما و جرم

مبانی و کاربردها (ویرایش SI)

ویراست چهارم (جلد اول)

یونان ای. ج. کل (سنجل)
اس. جی. جی. جی.

ترجمه:

مهندس عباس نصیری
مهندس مرضیه یداله پور

دکتر علی اکبر عالم رجبی
دانشیار مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی اصفهان





انتقال گرما و جرم

مبانی و کاربردها (ویرایش SI)

یونس ای. چنگل، افشین جی. قجر
ترجمه: علی اکبر عالم رجبی، عباس نصر آزادانی، مرضیه یداله پور
حروفچینی و صفحه آرایی: عباس نصر آزادانی
گرافیک و طرح جلد: غزال رباحی نظری
چاپ اول: تابستان ۱۳۹۳، ۲۰۰۰ نسخه
لیتوگرافی و چاپ: گل آذین
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۱۳۶۲-۱-۶
قیمت (جلد اول، به همراه لوح فشرده): ۲۷۰۰۰۰ ریال

شماره ثبت کتاب: ۸۸۸۷۴۹۰۲-۴، تهران، میدان ونک، خیابان خدای، پلاک ۳، طبقه ششم، واحد ۶۰۱

تلفن: ۸۸۸۷۴۹۰۲-۴، فکس: ۸۸۸۷۴۹۰۵

وبسایت: www.hamrahelm.com

پست الکترونیک: info@hamrahelm.com

حق چاپ برای انتشار، از شرکت همراه علم محفوظ است.

سرشناسه	: چنگل، یونس ا.
عنوان و نام پدیدآور	: Cengel, Yunus A.
وضعیت ویراست	: انتقال گرما و جرم، مبانی و کاربردها (ویرایش SI)
مشخصات نشر	: ویراست چهارم
مشخصات ظاهری	: تهران: همراه علم، ۱۳۹۳.
شابک	: ج: مصور (بخشی رنگی)، جدول (بخشی رنگی)، معمول (بخشی رنگی)، ۲۲ x ۲۹ س.م.
وضعیت فهرست نویسی	: 6-1-978-600-91362-1-6
یادداشت	: فیبای مختصر
یادداشت	: این مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
یادداشت	: ترجمه: علی اکبر عالم رجبی، عباس نصر آزادانی، مرضیه یداله پور
یادداشت	: واژه نامه
یادداشت	: نمایه
یادداشت	: کتابنامه
شناسه افزوده	: عالم رجبی، علی اکبر، ۱۳۳۴ -
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۵۷۴۳۷۹

Contents

فهرست مطالب

۴۳	منابع و مراجع پیشنهادی		
۴۳	مسائل		
۵۹	فصل دوم: معادله رسانش گرما	۱	فصل اول: مقدمه مفاهیم پایه
۶۰	۱-۲ مقدمه	۲	۱-۱ ترمودینامیک و انتقال گرما
۶۱	انتقال گرمای پایا و گذرا	۳	عرضه‌های کاربرد انتقال گرما
۶۲	انتقال گرمای چندبعدی	۳	دورنمای تاریخی
۶۳	تولید گرما	۴	۲-۱ انتقال گرمای مهندسی
۶۵	۲-۲ معادله رسانش گرمای یک‌بعدی		مدلسازی در انتقال گرما
۶۵	معادله رسانش گرما در یک دیوار تخت بزرگ	۶	۳-۱ گرما و گونه‌های دیگر انرژی
۶۶	معادله رسانش گرما در یک استوانه بلند		گرمای ویژه گازها، مایعات و جامدات
۶۷	معادله رسانش گرما در یک کره		انتقال انرژی
۶۷	معادله ترکیبی رسانش گرمای یک‌بعدی		۴-۱ قانون اول ترمودینامیک
۶۹	۲ معادله عمومی رسانش گرما	۱۱	موازنه انرژی برای سیستم‌های بسته (جرم ثابت)
۶۹	مختصات استوانه‌ای	۱۱	موازنه انرژی برای سیستم‌های جریان پایا
۷۰	مختصات استوانه‌ای	۱۲	موازنه انرژی سطح
۷۱	مختصات کروی	۱۵	۵-۱ مکانیزم‌های انتقال گرما
۷۲	۴-۲ شرایط مرزی و شرایط	۱۵	۶-۱ رسانش
۷۳	(الف) شرط مرزی دمای مشخص	۱۷	ضریب رسانایی گرمایی
۷۳	(ب) شرط مرزی شار گرمایی مشخص	۲۱	ضریب پخش گرمایی
۷۴	حالت خاص: مرز عایق‌بندی شده	۲۳	۷-۱ جابه‌جایی
۷۴	یا حالت خاص دیگر: تقارن	۲۵	۸-۱ تابش
۷۵	(ج) شرط مرزی جابه‌جایی	۲۷	۹-۱ مکانیزم‌های انتقال گرمای همزمان
۷۶	(د) شرط مرزی تابش	۳۱	۱۰-۱ تکنیک‌های حل مسئله
۷۶	(ه) شرایط مرزی سطح مشترک	۳۳	نرم‌افزارهای مهندسی
۷۷	(و) شرایط مرزی عمومی	۳۴	حل‌کننده معادله‌های مهندسی (EES)
۷۹	۵-۲ حل مسائل رسانش گرمای یک‌بعدی پایا	۳۵	توضیحی بر ارقام با معنی
۸۸	۶-۲ تولید گرما در یک جسم جامد	۳۶	مبحث ویژه: آسایش گرمایی
۹۳	۷-۲ ضریب رسانایی گرمایی متغیر، $k(T)$	۴۲	خلاصه

۲۲۱	تماس دو جسم نیمه‌بی‌نهایت	۹۶	مبحث ویژه: مروری کوتاه بر معادلات دیفرانسیل
۲۲۳	۴-۴ رسانش گرمای گذرا در سیستم‌های چندبعدی	۹۹	خلاصه
۲۲۹	مبحث ویژه: سردسازی و انجماد مواد غذایی	۱۰۱	منابع و مراجع پیشنهادی
۲۳۹	خلاصه	۱۰۱	مسائل
۲۴۱	منابع و مراجع پیشنهادی		
۲۴۱	مسائل	۱۱۹	
۲۵۹	فصل پنجم: روش‌های عددی در رسانش گرما	۱۲۰	فصل سوم: رسانش گرمای پایا
۲۶۰	۱-۵ چرا روش‌های عددی؟	۱۲۱	۱-۱ رسانش گرمای پایا در دیوار تخت
۲۶۰	الف) محدودیت‌ها	۱۲۲	مفهوم مقاومت گرمایی
۲۶۱	ب) مدل‌سازی بهتر	۱۲۲	شبکه مقاومت گرمایی
۲۶۱	ج) انعطاف‌پذیری	۱۲۴	دیوارهای چندلایه
۲۶۱	د) پیچیدگی‌ها	۱۲۷	۱-۳ مقاومت گرمایی تم
۲۶۲	هـ) طبیعت انسان	۱۳۱	۳-۳ شبکه مقاومت گرمایی تعمیم‌یافته
۲۶۳	۲-۵ رابطه تفاضل محدود برای معادلات دیفرانسیل	۱۳۴	۴-۳ رسانش گرما در استوانه‌ها و کره‌ها
۲۶۵	۳-۵ رسانش گرمای یک‌بعدی پایا	۱۳۵	استوانه‌ها و کره‌ها چندبعدی
۲۶۷	شرایط مرزی	۱۳۹	۵-۳ شعاع بحرانی عایق
	فرض گرهِ‌های مرز عایق به عنوان گرهِ‌های داخلی:	۱۴۱	۶-۳ انتقال گرما از سطوح پُر
۲۶۹	مفهوم تصویر آینه‌ای	۱۴۲	معادله پره
۲۷۳	۴-۵ رسانش گرمای دوبعدی پایا	۱۴۶	بازده پره
۲۷۵	گرهِ‌های مرزی	۱۴۸	کارایی پره
۲۷۸	مرزهای نامنظم	۱۵۱	طول مناسب پره
۲۸۱	۵-۵ رسانش گرمای گذرا	۱۵۱	۷-۳ انتقال گرما در شکل‌های هندسی متداول
۲۸۲	رسانش گرمای گذرا در یک دیوار تخت	۱۵۵	مبحث ویژه: انتقال گرما از طریق دیوارها و سقف‌ها
۲۸۴	شرط‌گذاری برای روش صریح: محدودیت Δt	۱۶۶	خلاصه
۲۹۱	روش‌های عددی برای رسانش گرمای گذرا	۱۶۸	منابع و مراجع پیشنهادی
۲۹۵	مرکز‌گرار محاوره‌ای SS-T-CONDUCT	۱۶۸	مسائل
۲۹۹	مبحث ویژه: انتقال گرما در سیال	۱۹۷	فصل چهارم: رسانش گرمای ناپایا
۳۰۲	خلاصه	۱۹۸	۱-۴ تجزیه و تحلیل سیستم‌های یک‌پارچه
۳۰۳	منابع و مراجع پیشنهادی	۱۹۹	معیارهایی برای تجزیه و تحلیل سیستم یک‌پارچه
۳۰۳	مسائل	۲۰۱	چند نکته پیرامون انتقال گرما در سیستم‌های یک‌پارچه
۳۲۵	فصل ششم: اصول جابه‌جایی	۲۰۴	۲-۴ رسانش گرمای گذرا در دیوارهای تخت بزرگ،
۳۲۶	۱-۶ مکانیزم فیزیکی جابه‌جایی	۲۰۳	استوانه‌های بلند و کره‌ها با آثار فضایی
۳۲۸	عدد نوسلت	۲۰۴	مسئله بی‌بعد رسانش گرمای یک‌بعدی گذرا
۳۲۹	۲-۶ دسته‌بندی جریان‌های سیال	۲۰۵	حل دقیق مسئله رسانش یک‌بعدی گذرا
		۲۰۷	جواب‌های تقریبی تحلیلی و ترسیمی
		۲۱۷	۳-۴ رسانش گرمای گذرا در اجسام نیمه‌بی‌نهایت

۳۲۱	شار گرمای یکنواخت	۳۲۹	جریان لزج و غیرلزج
۳۷۴	۳-۷ جریان در اطراف استوانه‌ها و کره‌ها	۳۳۰	جریان داخلی و خارجی
۳۷۶	تأثیر زبری سطح	۳۳۰	جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر
۳۷۷	ضریب انتقال گرما	۳۳۱	جریان آرام و آشفته
۳۸۱	۴-۷ جریان در اطراف شبکه لوله‌ها	۳۳۱	جریان طبیعی (غیراجباری) و اجباری
۳۸۴	افت فشار	۳۳۱	جریان پایا و ناپایا
۳۸۶	خلاصه	۳۳۲	جریان یک‌بعدی و سه‌بعدی
۳۸۸	منابع و مراجع پیشنهادی	۳۳۲	۳-۱ لایه مرزی سرعت
۳۸۸	مسائل	۳۳۳	شش برشی دیواره
۴۰۵	فصل هشتم: جابه‌جایی اجباری داخلی	۳۳۴	۴-۶ لایه مرزی گرما
۴۰۶	۱-۸ مقدمه	۳۳۵	عدد پراتل
۴۰۶	۲-۸ سرعت و دمای متوسط	۳۳۶	۵-۶ جریان‌های آرام و آشفته
۴۰۷	جریان آرام و آشفته در لوله‌ها	۳۳۷	عدد رینولدز
۴۰۸	۳-۸ ناحیه ورودی	۳۳۸	۶-۶ انتقال گرما و مومنوم در جریان آشفته
۴۱۰	طول‌های ورودی	۳۴۰	۷-۶ به دست آوردن معادلات دیفرانسیل جابه‌جایی
۴۱۱	۴-۸ تجزیه و تحلیل عمومی گرما	۳۴۰	معادله پیوستگی
۴۱۲	شار گرمای سطح ثابت (ثابت $\dot{q}_s$)	۳۴۱	معادلات مومنوم
۴۱۳	دما و سطح ثابت (ثابت T_s)	۳۴۱	معادله بقای انرژی
۴۱۵	۵-۸ جریان آرام در داخل لوله‌ها	۳۴۱	۸-۶ جواب معادلات جابه‌جایی برای یک صفحه تخت
۴۱۷	افت فشار	۳۴۷	معادله انرژی
۴۱۸	پروفیل دما و عدد نوسلت	۳۴۸	۹-۶ معادلات بی‌بعد شده جابه‌جایی و تشابه
۴۱۹	شار گرمای سطح ثابت	۳۴۹	۱۰-۶ شکل تابعی ضرایب اصطکاک و جابه‌جایی
۴۱۹	دما و سطح ثابت	۳۵۰	۱۱-۶ تشابه‌های بین انتقال مومنوم و گرما
۴۱۹	جریان آرام در لوله‌های گرد	۳۵۲	مبحث ویژه: انتقال گرما در مقیاس میکرو
۴۲۰	جریان آرام در لوله‌های گرد	۳۵۴	خلاصه
۴۲۰	جریان آرام در لوله‌های گرد	۳۵۶	منابع و مراجع پیشنهادی
۴۲۴	۶-۸ جریان آشفته در داخل لوله‌ها	۳۵۶	مسائل
۴۲۴	سطوح زبر	۳۶۳	فصل هفتم: جابه‌جایی اجباری خارجی
۴۲۶	جریان آشفته در حال توسعه در لوله‌های گرد	۳۶۴	۱-۷ نیروی پسا و انتقال گرما در جریان خارجی
۴۲۶	جریان آشفته در لوله‌های غیردایره‌ای	۳۶۴	نیروی پسای اصطکاک و فشاری
۴۲۷	جریان در مجراهای لوله‌ای حلقوی	۳۶۶	انتقال گرما
۴۲۷	افزایش انتقال گرما	۳۶۷	۲-۷ جریان موازی بر روی صفحات تخت
۴۳۰	مبحث ویژه: جریان گذار در لوله‌ها	۳۶۷	ضریب اصطکاک
۴۳۷	خلاصه	۳۶۹	ضریب انتقال گرما
۴۳۸	منابع و مراجع پیشنهادی	۳۷۰	صفحه تخت با طول اولیه گرم نشده
۴۳۹	مسائل		

۱۶-پ	جدول پ-۱۱: خواص آمونیاک اشباع
۱۷-پ	جدول پ-۱۲: خواص پروپان اشباع
۱۸-پ	جدول پ-۱۳: خواص مایعات
۱۹-پ	جدول پ-۱۴: خواص فلزات مایع
۲۰-پ	جدول پ-۱۵: خواص هوا در فشار 1 atm
۲۱-پ	جدول پ-۱۶: خواص گازها در فشار 1 atm
۲۳-پ	جدول پ-۱۷: خواص جو در ارتفاعهای زیاد
۲۴-پ	جدول پ-۱۸: ضریب صدور سطوح
۲۵-پ	جدول پ-۱۹: خواص تابش خورشیدی مواد
۲۶-پ	شکل پ-۲۰: نمودار مودی برای ضریب اصطکاک در جریان کاملاً توسعه یافته در لوله های دایره ای
۲۷-پ	ضرایب تبدیل

پیوست (جداول و نمودارهای خواص)

۱-پ	جدول پ-۱: جرم مولی، ثابت گاز و گرمای ویژه گاز ایده آل برای مواد مختلف
۲-پ	جدول پ-۲: خواص نقطه جوش و انجماد
۳-پ	جدول پ-۳: خواص فلزات جامد
۴-پ	جدول پ-۴: خواص غیرفلزات جامد
۷-پ	جدول پ-۵: خواص مصالح ساختمانی
۸-پ	جدول پ-۶: خواص مواد عایق
۱۰-پ	جدول پ-۷: خواص مواد غذایی متداول
۱۱-پ	جدول پ-۸: خواص آلودگی هوا
۱۳-پ	جدول پ-۹: خواص اشباع
۱۴-پ	جدول پ-۱۰: خواص مبرد اشباع
۱۵-پ	

www.ketaboo.ir

Preface

پیشگفتار مترجمین

کمتر کسی، چه استادان و چه از دانشجویان و مهندسان شاغل در شاخه‌های مختلف مهندسی مکانیک، با نام نویسنده معروف و مؤلف کتاب‌های درسی این رشته، یعنی دکتر یونس چنگل (که در ایران به سنجیل مشهور است) ناآشناست. کتاب‌های دکتر چنگل، به ویژه در دهه اخیر، جزو چند کتاب برتر و پرفرمدار در زمینه حرارت و سیالات بوده و از اقبال فراوانی در بین مخاطبان برخوردار است. کتاب‌های "مکانیک سیالات: مبانی و کاربردها" (ویرایش سوم، ۲۰۱۳)، "ترمودینامیک: با نگرش مهندسی" (ویرایش هشتم، ۲۰۱۴) و "انتقال گرما و جرم: مبانی و کاربردها" (ویرایش چهارم، ۲۰۱۱)، در دانشگاه‌ها، بسیار نامی در سراسر جهان به عنوان کتاب درسی مورد استفاده قرار گرفته و یکی از مراجع مفید و ساده برای سایر افراد مرتبط با این مباحث مهندسی است. سایر تألیفات چنگل نیز به نوبه خود از موفق‌ترین کتاب‌های سال‌های اخیر به شمرده می‌شود.

کتاب "انتقال گرما و جرم: مبانی و کاربردها" نوشته دکتر یونس ای. چنگل، یکی از معدود کتاب‌ها در زمینه انتقال گرماست که توانسته در یک دهه اخیر خوانندگانش را بسیار زیاد کند. استادان و مدرسان دانشگاه، دانشجویان رشته‌های مهندسی و مهندسان حرفه‌ای را در سراسر دنیا خود جلب کند. انتشار سه ویرایش از این کتاب طی کمتر از ده سال و ترجمه آن به چندین زبان در سرتاسر دنیا، خود گویای این واقعیت است. موفقیت روزافزون این کتاب در سطح جهانی و نیاز جامعه دانشگاهی کشور به این منبع به زبان فارسی، باعث گردید که به ترجمه این اثر ارزنده از این نویسنده سرشناس بپردازیم.

ویژگی‌های منحصر به فرد کتاب‌های دکتر چنگل و به خصوص جنبه‌های ویژه کتاب "انتقال گرمای او، این متن را در رده یکی از مراجع بسیار مناسب برای آموزش و همخوان با علایق دانشجویان قرار داده است. خوردهای فراوانی که از ترجمه ویرایش سوم کتاب گرفته شده، این همخوانی را نشان می‌دهد. به علاوه، ویرایش چهارم این کتاب، نسبت به سه ویرایش قبلی آن، دارای ویژگی‌های جدیدی است که از آن میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ارائه بیش از ۲۰۰ مسئله آزمون اصول مهندسی به منظور کمک به آمادگی دانشجویان برای آزمون‌های مشابه؛
- استفاده از بیش از ۱۰۰۰ شکل برای کمک به درک شهودی دانشجویان نسبت به مفاهیم مختلف؛
- بیان وقایع تاریخی در سرتاسر متن؛
- مثال‌های حل شده جدید در تمام فصول؛
- بسط و بازنگری بخش‌های مختلف برای توضیح بهتر مباحثی مانند سطوح پره‌دار، روش‌های عددی در رسانایی گرما، میکرولوله‌ها و ...؛
- ارائه بیش از ۲۰۰ مسئله شامل مسائل مفهومی، طراحی، نگارشی، پارامتری و چندگزینه‌ای که حدود یک سوم از آنها نسبت به ویرایش قبلی کتاب، بازنگری شده و یا کاملاً جدید است؛
- ادامه ارائه مباحث ویژه در انتهای فصل‌ها که مرزهای انتقال گرمای کلاسیک را به زمینه‌های جالب در کاربردهای روزمره گسترش می‌دهد؛
- معرفی یک نرم‌افزار محاسباتی جدید برای حل مسائل رسانش گرمای یک و دوبعدی پایا و گذرا.

همانند ویرایش سوم، در ترجمه این کتاب نیز سعی شده از اصطلاحات و معادل‌هایی که بیشتر در بین دانشگاهیان رایج است، استفاده شود. علاوه بر این، به منظور آشنایی دانشجویان با اصطلاحات علمی، معادل اصلی کلمات در حد نیاز آورده شده است. در اینجا، بر خود لازم می‌دانیم به خاطر اشکالاتی که در ویرایش قبلی این کتاب از دید ما پنهان بوده و موجبات ناراحتی خوانندگان عزیز را فراهم کرده، پوزش بخواهیم و بیان کنیم که سعی فراوانی شده تا این ایرادها، به همراه بسیاری از مواردی که در متن کتاب اصلی و حتی در شکل‌های آن وجود داشته، تا حد امکان برطرف شود. با این حال، همچنان از کلیه عزیزان و مخاطبان درخواست می‌گردد تا درباره اشکالات متن حاضر، دیدگاه‌ها و پیشنهادهای خود را با ما در میان گذارند تا بتوانیم اثری درخور و شایسته هم‌میهنان عزیز ارائه دهیم.

هرچند بنا به پاره‌ای مسائل و مشکلات، توفیق چاپ جلد دوم ویرایش قبل کتاب حاصل نشد، اما مجدداً درصدد خواهیم بود تا به منظور ارائه مطلوب‌تر و با کیفیت متن مورد استفاده دانشجویان، ترجمه فارسی ویرایش چهارم این کتاب را نیز با همت و تلاش انتشارات همراه علم، در دو بخش ارائه کنیم. آنچه در این جلد پیش رو دارید، فصل‌های اول تا سیم کتاب است که بخش‌های انتقال گرمای رسانشی و مفاهیم اصلی جابه‌جایی را پوشش می‌دهد. جلد دوم کتاب، به مباحث مهم دیگر از انتقال گرمای جابه‌جایی آزاد، انتقال گرما در تغییر فاز (جوشش و چگالش)، مبدل‌های گرمایی، انتقال گرمای تابشی و نیز انتقال جرم می‌پردازد. جداول و نمودارهای خواص که برای هر دو قسمت مورد استفاده می‌باشد، به همراه جداول ضمیمه به طور مشترک، در هر دو جلد آورده خواهد شد.

در پایان، از همه کسانی که پیشنهاد و فرزنده خود در مراحل مختلف تهیه این کتاب، ما را یاری نمودند، به ویژه آقای مهندس بهروز نصرآبادی که با حوصله و زحمات فراوان، راهنمایی‌های بسیار ارزنده‌ای را در اختیار ما قرار دادند، کمال تشکر را داشته و از آنها قدردانی می‌نماییم. همچنین لازم است از خانواده‌های عزیزمان که تا پایان این کار، مشوق و پشتیبان ما بودند، سپاسگزاری کنیم. امیدواریم این ناچیز اندک گوشه‌ای از زحمات این عزیزان را جبران کند.

علیرضا عالم‌رجبی (arajabi@cc.iut.ac.ir)

مرضیه یداله‌پور

عباس نصرآبادی