انتقال حرارت

(ویرایش دهم)

جی پی هولمن

ترجمه:
مهندس ملک زاده – مهندس کاشانی مختار

انتشارات نما

نشر جهان فردا

www.ketab.ir

سرشناسه : هولمن، جک فیلیپ
Holman, J. P. (Jack Philip)
عنوان و نام پدیدآور : انتقال حرارت/ جی‌پی هولمن ؛ ترجمه ملک‌زاده، کاشانی‌حصار.
مشخصات نشر : مشهد : نشر نما، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری : ۷۶۰ ص.: مصور،جدول.
شابک : 978-600-217-021-7
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
یادداشت : عنوان اصلی: Heat transfer, 10th ed, 2010.
یادداشت : کتاب حاضر در سالهای مختلف توسط مترجمان و ناشران متفاوت منتشر شده است.
یادداشت : واژه‌نامه.
موضوع : گرما -- انتقال
شناسه افزوده : ملک‌زاده، غلامرضا، ۱۳۲۸-، مترجم
شناسه افزوده : کاشانی حصار، محمدحسین، ۱۳۲۶ - ، مترجم
رده بندی کنگره : الف ۱۳۹ ۸الف۹ه/QC۳۲۰
رده بندی دیویی : ۶۲۱/۴۰۲۲
شماره کتابشناسی ملی : ۲۶۹۱۱۸۱

www.ketab.ir

انتشارات نما

نشر جهان فردا

انتشارات نما، مشهد، تلفن ۸۴۰۷۹۹۵ - تهران، تلفن ۶۶۴۶۴۵۹۳
http://www.namapub.ir E-mail: info@namapub.ir

انتقال حرارت - ویرایش دهم

نویسنده: جک فیلیپ هولمن

ترجمه: مهندس غلامرضا ملک زاده، مهندس محمدحسین کاشانی حصار

شمارگان: ۳۰۰۰ نسخه

چاپ اول (چاپ شانزدهم) بهار ۱۳۹۱ - ۷۶۰ صفحه وزیری

صفحه آرایی: واژگان خرد، لیتوگرافی: مشهد اسکنر

چاپ و صحافی: دانشگاه فردوسی

شابک: ۷-۰۲۱-۲۱۷-۶۰۰-۹۷۸

قیمت: ۲۰۰۰۰ تومان

حق چاپ محفوظ است

مرکز پخش: تهران- انقلاب، خیابان اردیبهشت- کوچه وحید شماره ۷ تلفاکس ۶۶۴۶۴۵۹۳
مرکز پخش: مشهد: قاسم‌آباد- استاد یوسفی ۱۷- کتاب جهان‌نما تلفاکس ۶۶۲۸۲۲۵

فهرست

پیشگفتار نویسنده ۹
مقدمه مترجمین ۱۲

فصل ۱ مقدمه ۱۷
۱-۱ انتقال هدایتی حرارتی ۱۷
۱-۲ قابلیت هدایت حرارتی ۲۲
۱-۳ انتقال حرارت جابجایی ۲۶
۱-۴ انتقال حرارت تشعشعی ۲۹
۱-۵ ابعاد و آحاد ۳۰
۱-۶ خلاصه ۳۵
سؤالات مروری ۳۷
مسائل ۳۷

فصل ۲ هدایت حالت پایدار یک بعدی ۴۳
۲-۱ مقدمه ۴۳
۲-۲ جدارهٔ مسطح ۴۳
۲-۳ عایق و مقادیر R ۴۵
۲-۴ سیستم‌های شعاعی ۴۶
۲-۵ ضریب کلی انتقال حرارت ۵۰
۲-۶ ضخامت بحرانی برای عایق ۵۶
۲-۷ سیستم‌های دارای منبع حرارتی ۵۷
۲-۸ استوانه با منبع حرارتی ۵۹
۲-۹ سیستم‌های هدایتی - جابجایی ۶۱
۲-۱۰ پره‌ها ۶۴

www.ketab.ir

۲-۱۱ مقاومت حرارتی اتصال ۷۴
مسائل ۷۸

فصل ۳ هدایت حالت پایدار - چند بعدی ۹۵
۳-۱ مقدمه ۹۵
۳-۲ تحلیل‌های ریاضی هدایت حرارت دو بعدی ۹۶
۳-۳ تحلیل‌های ترسیمی ۹۹
۳-۴ ضریب شکل هدایتی ۱۰۱
۳-۵ روش تحلیل عددی ۱۰۷
۳-۶ فرمول‌بندی عددی بر حسب اجزای مقاومتی ۱۱۶
۳-۷ تکرار گوس - سایدل ۱۱۹
معادلات گره‌ای برای $\Delta y = \Delta x$ ۱۲۰
۳-۸ رعایت دقت ۱۲۱
۳-۹ تشابه الکتریکی برای هدایت دو بعدی ۱۳۸
۳-۱۰ خلاصه ۱۳۹

فصل ۴ هدایت حالت ناپایدار ۱۵۸
۴-۱ مقدمه ۱۵۸
۴-۲ سیستم ظرفیت حرارتی انباشته ۱۶۰
۴-۳ جریان حرارت گذرا در جسم نیم محدود ۱۶۳
۴-۴ شرایط مرزی جابجایی ۱۶۷
۴-۵ سیستم‌های چند بعدی ۱۸۱
۴-۶ روش عددی گذرا ۱۸۷
۴-۷ مقاومت حرارت و فرمول‌بندی ظرفیتی ۱۹۲
۴-۸ خلاصه ۲۱۲
سؤالات مروری ۲۱۳
فهرست مثال‌های حل شده ۲۱۳
مسائل ۲۱۴

فصل ۵ اصول انتقال حرارت جابجایی ۲۳۷
۵-۱ مقدمه ۲۳۷

www.ketab.ir

۵-۲ جریان لزج ۲۳۷
۵-۳ جریان غیرلزج ۲۴۰
۵-۴ لایهٔ مرزی آرام بر روس صفحه مسطح ۲۴۴
۵-۵ معادلهٔ انرژی لایهٔ مرزی ۲۵۰
۵-۶ لایهٔ مرزی حرارتی ۲۵۳
۵-۷ رابطهٔ بین اصطکاک سیال و انتقال حرارت ۲۶۳
۵-۸ انتقال حرارت لایهٔ مرزی درهم ۲۶۵
۵-۹ ضخامت لایهٔ مرزی درهم ۲۷۲
۵-۱۰ انتقال حرارت در جریان آرام درون لوله ۲۷۴
۵-۱۲ انتقال حرارت در جریان با سرعت زیاد ۲۸۱
۵-۱۳ خلاصه ۲۸۷
مسائل ۲۸۸

فصل ۶ روابط تجربی و عملی برای انتقال ۲۹۸
حرارت با جابجایی اجباری ۲۹۸
۶-۱ مقدمه ۲۹۸
۶-۲ روابط تجربی برای جریان درون لوله‌ها ۳۰۰
۶-۳ جریان روی استوانه‌ها و کره‌ها ۳۱۴
۶-۴ جریان سیال بر روی مجموعه لوله‌ها ۳۲۴
۶-۵ انتقال حرارت از فلز مایع ۳۲۹
۶-۶ خلاصه ۳۳۳
مسائل ۳۳۶

فصل ۷ سیستم‌های جابجایی طبیعی ۳۵۰
۷-۱ مقدمه ۳۵۰
۷-۲ انتقال حرارت به طریق جابجایی آزاد روی یک صفحهٔ مسطح قائم ۳۵۰
۷-۳ روابط تجربی برای جابجایی آزاد ۳۵۶
۷-۴ جابجایی آزاد روی صفحات و استوانه‌های قائم ۳۵۹
۷-۵ جابجایی آزاد از استوانه‌های افقی ۳۶۴
۷-۶ جابجایی آزاد از صفحات افقی ۳۶۶
۷-۷ جابجایی آزاد از سطوح شیب‌دار ۳۶۷

www.ketab.ir

۷-۸ سیالات غیرنیوتنی ۳۶۹
۷-۹ معادلات ساده شده برای هوا ۳۶۹
۷-۱۰ جابجایی آزاد از کره‌ها ۳۷۰
۷-۱۱ جابجایی آزاد از فضاهای بسته ۳۷۱
۷-۱۲ ترکیب جابجایی آزاد و اجباری ۳۸۳
۷-۱۳ خلاصه ۳۸۶
۷-۱۴ روش خلاصه برای تمام مسائل جابجایی ۳۸۷
مسائل ۳۸۹

فصل ۸ انتقال حرارت تشعشعی ۴۰۶
۸-۱ مقدمه ۴۰۶
۸-۲ مکانیزم فیزیکی ۴۰۶
۸-۳ خواص تشعشعی ۴۰۸
ساخت یک جسم سیاه ۴۱۳
۸-۴ ضریب شکل تشعشعی ۴۱۶
۸-۵ روابط بین ضرایب شکل ۴۲۶
۸-۶ تبادل حرارت بین اجسام غیرسیاه ۴۳۲
۸-۷ صفحات موازی و نامحدود ۴۴۰
۸-۸ سپرهای تشعشعی ۴۴۵
۸-۹ تشعشع گازها ۴۴۹
۸-۱۰ شبکه تشعشعی برای محیط‌های جذب‌کننده و منتقل‌کننده ۴۵۰
۸-۱۱ تبادل تشعشع با سطوح آینه‌ای ۴۵۶
۸-۱۲ تبادل تشعشع با محیط‌های انتقال‌دهنده، منعکس‌کننده و جذب کننده ۴۶۱
۸-۱۳ فرمول‌بندی برای راه‌حل عددی ۴۶۷
۸-۱۴ تشعشع خورشیدی ۴۸۳
۸-۱۵ خواص تشعشعی محیط ۴۸۸
۸-۱۶ اثر تشعشع بر اندازه‌گیری درجه حرارت ۴۹۰
۸-۱۷ ضریب انتقال حرارت تشعشعی ۴۹۲
۸-۱۸ خلاصه ۴۹۳
مسائل ۴۹۴

www.ketab.ir

فصل ۹ انتقال حرارت درچگالش و جوشش ۵۲۳
۹-۱ مقدمه ۵۲۳
۹-۲ پدیدهٔ انتقال حرارت در چگالش ۵۲۳
۹-۳ عدد چگالش ۵۲۸
۹-۴ چگالش لایه‌ای درون لوله‌های افقی ۵۲۹
۹-۵ انتقال حرارت در جوشش ۵۳۲
۹-۶ روابط ساده شده برای انتقال حرارت جوششی با آب ۵۴۳
۹-۷ لولهٔ حرارتی ۵۴۵
۹-۷ خلاصهٔ بحث و اطلاعات طراحی ۵۴۷
مسائل ۵۴۹

فصل ۱۰ مبدل‌های حرارتی ۵۵۷
۱۰-۱ مقدمه ۵۵۷
۱۰-۲ ضریب کلی انتقال حرارت ۵۵۸
۱۰-۳ ضرایب رسوب‌گیری ۵۶۳
۱۰-۴ انواع مبدل‌های حرارتی ۵۶۴
۱۰-۵ اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی ۵۶۷
۱۰-۶ ضریب تأثیر - روش NTU ۵۷۶
۱۰-۷ مبدل‌های حرارتی فشرده ۵۹۲
۱۰-۸ تحلیل خواص متغیر ۵۹۶
۱۰-۹ ملاحظات طراحی مبدل‌های حرارتی ۶۰۴
مسائل ۶۰۶
مراجع ۶۲۳

فصل ۱۱ انتقال جرم ۶۲۴
۱۱-۱ مقدمه ۶۲۴
۱۱-۲ قانون نفوذفیک ۶۲۵
۱۱-۳ نفوذ در گازها ۶۲۶
۱۱-۴ نفوذ در مایعات و جامدات ۶۳۱
۱۱-۵ ضریب انتقال جرم ۶۳۱
۱۱-۶ فرآیندهای تبخیر در جو ۶۳۵

www.ketab.ir

مسائل ۶۳۸
مراجع ۶۴۱

فصل ۱۲ خلاصه و اطلاعات طراحی ۶۴۲
۱۲-۱ مقدمه ۶۴۲
۱۲-۲ مسائل انتقال حرارت هدایتی ۶۴۳
۱۲-۳ روابط انتقال حرارت جابجایی ۶۴۴
۱۲-۴ انتقال حرارت تشعشعی ۶۵۸
۱۲-۵ مبدل‌های حرارتی ۶۶۳
مسائل ۶۸۰

ضمائم ۶۸۳
واژه‌نامه ۷۵۲

www.ketab.ir

پیشگفتار نویسنده

در این کتاب بررسی مقدماتی از اصول انتقال حرارت ارایه می‌شود و به‌عنوان یک مجموعه درسی دربردارنده مطالب کافی جهت ارائه در یک نیم سال تحصیلی است که بسته به اهداف دوره در سطح سال سوم یا بالاتر تدریس می‌شود. این دوره درسی معمولاً دربرنامه‌های درسی مهندسی شیمی و مکانیک موردنیاز است ولی برای دانشجویان رشته برق نیز توصیه می‌شود زیرا مسائل سرمایش در کاربردهای متعددی از الکترونیک اهمیت دارد. بنابه تجربه مؤلف، دانشجویان مهندسی برق نیز دوره انتقال حرارت را به‌خوبی طی می‌کنند اگرچه زمینه‌ای از ترمودینامیک و مکانیک سیالات ندارند. داشتن زمینه‌ای از معادلات دیفرانسیل جهت درک صحیح مطالب درسی مفید خواهد بود.

درارائه مطالب از روش کلاسیک ارائه مباحث جداگانه برای هدایت، جابجایی و تشعشع استفاده شده است. اگرچه بر این نکته تأکید می‌شود که مکانیزم فیزیکی انتقال حرارت جابجایی مشابه با هدایت با لایه سیال در مجاورت سطح تبادل حرارت است. در سراسر کتاب، بر درک فیزیکی مسائل تأکیدشده و درعین حال در مواردی که ارائه راه‌حل تحلیلی ساده امکان‌پذیر نیست از داده‌های آزمایشی پرمعنا استفاده شده است.

انتقال حرارت هدایتی از دیدگاه تحلیلی و عددی مورد بحث قرار می‌گیرد به‌طوری که خواننده می‌تواند از راه‌حل‌های تحلیلی نیز همانند تحلیل‌های عددی که اغلب در عمل کاربرد دارند، آگاهی یابد. روش مشابهی نیز در بحث انتقال حرارت جابجایی دنبال خواهد شد. تحلیل انتگرالی در ارائه تصویر فیزیکی فرایند جابجایی در لایه مرزی جابجایی آزاد و اجباری مورد بحث قرار می‌گیرد. این بیان فیزیکی می‌تواند منجر به نتایجی گردد که به‌طور طبیعی به ارائه روابط تجربی و عملی محاسبه ضرایب انتقال حرارت جابجایی می‌انجامد. روش شبکه تشعشعی در معرفی تحلیل سیستم‌های تشعشعی به‌کاربرده می‌شود زیرا از سایر روش‌ها، سهل‌تر است. درعین حال در مباحث بعدی رابطه‌ای جامع‌تر و ملی‌تر ارائه خواهد شد. مفاهیم اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی و ضریب تأثیر در تحلیل عملکرد مبدل‌های حرارتی ارائه می‌شوند زیرا هردو مفهوم به‌طور گسترده مورد استفاده قرارگرفته و هریک از آنها برای طراح مزایایی دارند. معرفی مختصری از نفوذ و انتقال جرم برای آشنایی خواننده با این فرایندها و برقراری تشابه مهم میان انتقال حرارت، جرم و اندازه حرکت، نیز ارائه خواهد شد. یک فصل جدید (فصل ۱۲) به این کتاب افزوده شده که اطلاعات طراحی را به‌صورت خلاصه مطرح می‌کند. نمودارهای محاسبات متعددی در این فصل به طراحی مقدماتی کمک کرده و باعث سرعت آن می‌شود و می‌توان کار دقیق‌تر را در مراحل بعد از طراحی انجام داد. مثال‌های ارائه شده در این فصل بااستفاده از این نمودارهاست.

مسائل در انتهای هر فصل آورده شده است. برخی از این مسائل دارای ماهیت عادی هستند تا دانشجویان با کارکردن با اعداد و مفاهیم مرتبه بزرگی پارامترهای مختلف انتقال حرارت آشنا شوند. در مسائل دیگر موضوعی خاص بسط می‌یابد که لازم است دانشجویان اصول بنیادی را برای وضعیتی جدید به‌کار گیرند و معادلاتی را خود به‌دست آورند.

در انتهای هرفصل بخشی تحت عنوان مسائل طراحی‌شده است. مسائل این قسمت‌ها عموماً برای بحث مطرح شده‌اند و نیاز به یک پاسخ معین ندارند. در برخی از موارد طول این مسائل نیز زیاد است و نیازمند راه‌حل‌های قضاوتی در فرایند حل و

www.ketab.ir

تحلیل می‌باشد. بیش از ۱۰۰ مسأله از این نوع در این کتاب ارائه شده‌است.

مباحث انتقال حرارت، مباحثی ایستا نیستند و مرتباً درحال گسترش روزافزون می‌باشد و هرروزه تنوعی از راه‌حل‌های تحلیل داده‌های تجربی ارائه می‌شود که می‌تواند مورد استفاده متخصصین حرفه‌ای قرار بگیرد. به‌دلیل حجم اعظم اطلاعاتی که در مقالات تحقیقی یافت می‌شود چنانچه بسیاری از اختلافات کوچک ارائه و تشریح گردند باعث دستپاچگی و سردرگمی دانشجویان مبتدی می‌گردد. این کتاب به‌این منظور تألیف شده است که به‌عنوان کتاب درسی مقدماتی به‌کار برده شود و مؤلف برای خود نقش مفسر این ادبیات را تصویر می‌کند که یافته‌ها و معادلاتی که عرضه خواهد شد را تفسیر می‌کند و خواننده می‌تواند سریعاً آنها را به‌کار گیرد. امید است که توجه دانشجویان به آثار جامعی که به دفعات کافی از آنها یاد می‌شود جلب گردد تا به درکی عمیق‌تر از اغلب موضوعات انتقال حرارت دست یابد. برای دانشجویان کنجکاو، مراجع انتهای فصل دروازه‌ای است به ادبیات و مقالاتی که دررابطه با انتقال حرارت است و می‌تواند مبنایی برای تحقیقات بعدی باشد.

یک کتاب درضمن ویرایش خود به وضوح منعکس‌کننده بسیاری از فرایندهای تکاملی و اصلاحی در طی سالیان متمادی است. این کتاب نیز یک استثنا نمی‌باشد. اگرچه مکانیزم فیزیکی بنیادی انتقال حرارت تغییر نکرده‌است ولی فنون و روش‌های تحلیل و داده‌های آزمایشی به‌نحو ثابت بازنگری شده و تکامل یافته‌اند. در این ویرایش برخی از مواد درسی قدیمی حذف شده‌اند و برخی از مواد جدید اضافه گردیده‌اند. درعین‌حال که مسائل قدیمی، تجدیدنظر شده‌اند. هفده مسأله جدید برای کار اضافه شده است که بسیاری از آنها مسائل کامپیوتری هستند. تمامی مسائل مطرح‌شده با مقاصد طراحی نیز در ابتدای کتاب و فهرست مطرح شده‌اند و درپایان هر فصل نیز فهرست آنها مجدداً درج شده است. نرم‌افزار کامپیوتری تهیه‌شده توسط دکتر آلن کراوس که قبلاً در ضمایم ارائه شده بود، اکنون به‌صورت یک صفحه وب یا از تهیه‌کننده آن بدون پرداخت هزینه، در دسترس می‌باشد.

مزایای زیادی در کاربرد نرم‌افزار اکسل مایکروسافت در حل مسائل انتقال حرارت حالت پایدار و گذرا وجود دارد. بحث کاملی درخصوص نرم‌افزار اکسل در ضمیمه D ارائه شده‌است که مشتمل بر منابع حرارتی، شرایط مرزی تشعشعی، شرایط حالت پایدار و گذرا و محل اتصال مواد مرکب می‌باشد. روش مرحله به مرحله‌ای که به صورت خودکار معادلات گره‌ای را برای شرایط رابع می‌نویسند، تدارک دیده شده است. ده مثال برای کاربرد اکسل در حل مسائل ارائه شده است که شامل تعدیلات و استثناها در برخی از مسائل فصل سوم و چهارم است. یک مساله نیز برای توسعه راه‌حل حالت گذرا که در طی زمان نسبتاً طولانی به حالت پایدار می‌رسد مطرح شده است. مثال‌هایی نیز در تحلیل حالت انباشته که شرایط مرزی هدایت و تشعشعی متغیر دارند ارائه می‌شود.

علاوه‌براین روابط جابجایی در پایان هر فصل به صورت جداول ارائه شده‌اند (فصول ۵، ۶، ۷) و راه‌حل کلی برای تحلیل مسائل حالت انتقال حرارت جابجایی مطرح و موردبررسی قرار می‌گیرد. اگرچه ممکن است این کتاب به‌عنوان کتابی مشابه با دستور طبخ تلقی و مطرح شود ولی برای افرادی که عملاً در حل مسائل انتقال حرارت فعالیت می‌کنند، مفید است بدون آنکه دام‌های ساده رایج و خلع سلاح کننده در تحلیل و حل مسائل جابجایی مانع کار آنها شود. در پاسخ به درخواست کاربران، پاسخ مسائل در انتهای کتاب درج شده است.

سیستم آحاد SI (متریک) در این کتاب، سیستم آحاد اصلی است. باتوجه به اینکه سیستم Btu-pound هنوز به نحو وسیعی کاربرد دارد، پاسخ‌ها و مراحل میانی مثال‌ها را گاه گاه برحسب این آحاد بیان کرده‌ایم. مثال‌ها و مسائل محدودی نیز کاملاً با استفاده از آحاد انگلیسی ارائه شده‌اند. برخی از شکل‌ها دارای مختصات دوگانه‌اند که هردو سیستم آحاد را نشان می‌دهد. به‌این طریق دانشجو قادر خواهد بود توانایی «تکلم به دو زبان» خود را طی دوره قبل از آنکه تبدیل کامل به سیستم

www.ketab.ir

متریک صورت گیرد، گسترش دهد.

مطرح کردن تمام مباحث این کتاب در یک ترم یا چهار ماهه ممکن نیست ولی امید می‌رود انواع مباحث و مسائل بتواند انعطاف لازم در بسیاری از کاربردها را ایجاد کند.

تشکر و قدردانی

برای یک کتاب در این مرحله از بازنگری، فهرست افرادی که با پیشنهادات و راهنمایی‌های خود باعث رشد و تعالی کتاب شده‌اند، بسیار طولانی است، به جای ریسک حذف و جا افتادن یک نام، امیدوارم تشکر و قدردانی عمومی بیانگر سپاسگذاری مخلصانه من از تمام افرادی که به من کمک کرده و مشوق من بوده‌اند، باشد. همانند قبل پیشنهادات و نظرات استفاده کنندگان از کتاب قابل تقدیر بوده و از آنها تشکر می‌کنم. مؤلف و مؤسسه مک‌گراوهیل نیز مایلند از تلاش تمامی کسانی که در ذیل نام آنها می‌آید به‌خاطر پیشنهادات سودمندشان در بهبود ویرایش جدید، تشکر و قدردانی کنند.

Neil L. Book, *University of Missouri–Rolla*
Rodney D.W. Bowersox, *Texas A & M University*
Kyle V. Camarda, *University of Kansas*
Richard Davis, *University of Minnesota–Duluth*
Roy W. Knight, *Auburn University*
Frank A. Kulacki, *University of Minnesota*
Ian H. Leslie, *New Mexico State University*
Daniela S. Mainardi, *Louisiana Tech University*
Randall D. Manteufel, *University of Texas at San Antonio*
M. Pinar Menguc, *University of Kentucky*
Samuel Paolucci, *University of Notre Dame*
Paul D. Ronney, *University of Southern California*
Harris Wong, *Louisiana State University*

جی پی هولمن

www.ketab.ir

مقدمه مترجمین

این کتاب ترجمه آخرین ویرایش کتاب «انتقال حرارت» (ویرایش دهم، ۲۰۱۰) تألیف دکتر جک فیلیپ هولمن است که سال‌های متمادی است به‌عنوان یکی از بهترین کتاب‌های درسی انتقال حرارت در اکثر دانشگاه‌های جهان تدریس می‌گردد. به‌خصوص از دیدگاه کلاسیک و آموزش مباحث انتقال حرارت، این کتاب جایگاه ویژه‌ای در میان کتب فنی دانشگاهی دارد و به‌عقیده بسیاری از دست‌اندرکاران و اساتید تاکنون هیچ مجموعه درسی انتقال حرارت نتوانسته است جایگزین آن گردد. به‌همین‌دلیل، این اثر به‌عنوان کتابی کامل در انتقال حرارت همواره مطرح بوده است و ما نیز باتوجه به این نکته، بر آن شدیم تا ترجمه کتاب را باتوجه به تغییرات آخرین ویرایش آن مورد بازنگری قرار دهیم. به لطف الهی اکنون این تلاش به‌ثمر رسیده و ترجمه حاضر در اختیار دانش‌پژوهان قرار می‌گیرد. در این راستا، لازم می‌دانیم از تلاش‌های جمع کثیری از عزیزان که در کلیه مراحل آماده‌سازی کتاب ما را یاری داده‌اند، قدردانی و تشکر کنیم.

چاپ‌های مکرر این کتاب و استقبال دانشجویان و اساتید محترم دانشگاه‌ها از آن، مترجمین و ناشر را برآن داشته است که هماهنگ با کتاب اصلی، آخرین تجدیدنظرها را در ترجمه فارسی به‌کار بسته و آن را به‌روز کنند و در اسرع وقت در اختیار علاقه‌مندان قرار دهند. امید است که این تلاش گامی هرچند کوتاه در اعتلای علمی کشورمان باشد.

لازم می‌دانیم از خانواده‌های خود که مشوق و یاورمان در این تلاش بوده‌اند و ناشر محترم کتاب که امکانات لازم را به بهترین نحو فراهم ساخته است، تقدیر و تشکر کنیم. بدون همکاری و مشارکت این عزیزان، انجام این مهم در زمانی کوتاه میسر نبود.

ملک‌زاده – کاشانی حصار

www.ketab.ir

فهرست نمادها

a سرعت موضعی

a ضریب تضعیف (فصل ۸)

A مساحت

A مقدرت انعکاس (فصل ۸)

A_m مساحت پروفیل پره (فصل ۲)

c حرارت مخصوص، معمولاً بر حسب kJ/kg.°C

C غلظت (فصل ۱۱)

C_D ضریب کشش، تعریف شده توسط معادله (۱۲-۶)

C_f ضریب اصطکاک، تعریف شده توسط معادله (۵-۵۲)

c_p حرارت مخصوص در فشار ثابت، معمولاً برحسب kJ/kg.°C

c_v حرارت مخصوص در حجم ثابت، معمولاً برحسب kJ/kg.°C

D قطر

d عمق یا قطر

D ضریب نفوذ (فصل ۱۱)

D_H قطر هیدرولیک، تعریف شده توسط معادله (۱۶-۴)

e انرژی داخلی در واحد جرم، معمولاً بر حسب

E انرژی داخلی، معمولاً بر حسب kJ

E_{bo} ثابت خورشیدی (فصل ۸)

$E_{b\lambda}$ توان پخش جسم سیاه در واحد طول موج، تعریف شده توسط معادله (۱۲-۸)

f ضریب اصطکاک

F نیرو، معمولاً بر حسب N

F_{m-n} یا F_{ij} ضریب شکل تشعشع برای تشعشع از سطح m به سطح n

g شتاب ثقل

g_c ضریب تبدیل، تعریف شده توسط معادله (۱۴-۱)

$G = \frac{\dot{m}}{A}$ سرعت جرمی

G تابش‌دهی (فصل ۸)

h ضریب انتقال حرارت، معمولاً بر حسب W/m².°C

$\bar{h}$ ضریب انتقال حرارت متوسط

h_{fg}

h_r ضریب انتقال حرارت تشعشعی (فصل ۸)

K ضریب انتقال جرم، m/h

i انتالپی، معمولاً بر حسب kJ/kg

I شدت تشعشع

I عایق خورشیدی (فصل ۸)

I_0 عایق خورشیدی در لبه بیرونی اتمسفر

J رادیوسیتی (فصل ۸)

k قابلیت هدایت حرارتی، معمولاً بر حسب W/m.°C

k_e قابلیت هدایت حرارتی مؤثر فضاهای بسته (فصل ۷)

k_s ضریب پراکندگی (فصل ۸)

L طول

L_c طول اصلاح شدهٔ پره (فصل ۲)

m جرم

$\dot{m}$ دبی جرمی جریان

M وزن مولکولی (فصل ۱۱)

n چگالی ملکولی

N نرخ نفوذ مولی، مول در واحد وزن (فصل ۱۱)

p فشار، معمولاً بر حسب N/m² یا Pa

p محیط

q نرخ انتقال حرارت، kJ در واحد زمان

q'' شار حرارتی، kJ در واحد زمان در واحد سطح

$\dot{q}$ حرارت تولید شده در واحد حجم

Q حرارت، kJ

r شعاع یا فاصله شعاعی

r ضریب بازیافت، تعریف شده توسط معادله (۱۲۰-۵)

R شعاع ثابت

R ثابت گازها

www.ketab.ir

R_{th} مقاومت حرارتی، معمولاً بر حسب °C/W
s یک بعد مشخصه (فصل ۴)
S ضریب شکل هدایتی، معمولاً بر حسب m
t ضخامت، مورد استفاده برای مسائل پره‌ها (فصل ۲)
t,T درجه حرارت
u سرعت
v سرعت
v حجم مخصوص، معمولاً بر حسب m^3/kg
V سرعت
V حجم ملکولی (فصل ۱۱)
W وزن، معمولاً بر حسب N
x,y,z مختصات فضایی در سیستم کارتزین
$\alpha = \frac{k}{\rho c}$ ضریب نفوذ حرارتی، معمولاً بر حسب m^2/s
α ضریب جذب (فصل ۸)
α ضریب انباشت (فصل ۷)
α زاویه اوج خورشیدی، درجه (فصل ۸)
β ضریب انبساط حجمی، 1/K
β ضریب درجه حرارت قابلیت هدایت حرارتی، 1/°C
$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ نماد ایزونتروپیک، بدون بعد
Γ دبی جرمی مایع چگالیده در واحد عمق صفحه (فصل ۹)
δ ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی
δ_t ضخامت لایه مرزی حرارتی
ϵ ضریب تأثیر مبدل حرارتی
ϵ ضریب انتشار
ϵ_H و ϵ_M ضریب نفوذ گردابه‌ای حرارت و اندازه حرکت (فصل ۵)
$\zeta = \frac{\delta_t}{\delta}$ نسبت ضخامت لایه مرزی حرارتی به ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی
η متغیر تشابه، تعریف شده توسط معادله (۶ - B)
η_f بازده پره، بدون بعد
θ زاویه در سیستم مختصات کروی یا استوانه‌ای
θ اختلاف درجه حرارت، مرجع T-$T_{مرجع}$
درجه حرارت مرجع برای سیستم‌های مختلف، متفاوت درنظر گرفته می‌شود (به فصل ۲ تا ۴ رجوع کنید)
λ طول موج (فصل ۸)
λ طول مسیر پویش آزاد (فصل ۷)
μ لزجت دینامیکی
ν لزجت سینماتیکی
ν فرکانس تشعشع (فصل ۸)
ρ چگالی، معمولاً بر حسب kg/m^3
ρ ضریب بازتاب (فصل ۸)
σ ثابت استفان بولتزمن
σ کشش سطحی در فصل مشترک مایع - بخار (فصل ۹)
τ زمان
τ تنش برشی بین لایه‌های سیال
τ ضریب انتقال (فصل ۸)
ϕ زاویه در سیستم مختصات کروی یا استوانه‌ای
ψ تابع جریان

گروههای بدون بعد

$\mathrm{Bi} = \frac{hs}{k}$ مدول بیو

$\mathrm{FO} = \frac{\alpha\tau}{s^2}$ مدول فوریه

$\mathrm{Gr} = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2}$ عدد گراشف

$\mathrm{Gr}^* = \mathrm{Gr}\,\mathrm{Nu}$ عدد گراشف اصلاح‌شده برای شار حرارتی ثابت

$\mathrm{Gz} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\,\frac{d}{L}$ عدد گراتز

$\mathrm{Kn} = \frac{\lambda}{L}$ عدد نادسون

$\mathrm{Le} = \frac{\alpha}{D}$ عدد لویس (فصل ۱۱)

$\mathrm{M} = \frac{u}{a}$ عدد ماخ

$\mathrm{Nu} = \frac{hx}{k}$ عدد ناسلت

$\overline{\mathrm{Nu}} = \frac{\overline{h}x}{k}$ عدد ناسلت متوسط

$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}$ عدد پکله

$\mathrm{Pr} = \frac{c_f\mu}{k}$ عدد پرانتل

$\mathrm{Ra} = \mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr}$ عدد رایلی

$\mathrm{Re} = \frac{\rho u x}{\mu}$ عدد رینولدز

$\mathrm{Sc} = \frac{\nu}{D}$ عدد اشمیت (فصل ۱۱)

www.ketab.ir

$\mathrm{Sh} = \frac{K_x}{D}$ عدد شروود (فصل ۱۱)

$\mathrm{St} = \frac{h}{\rho c_p \mu}$ عدد استانتون

$\overline{\mathrm{St}} = \frac{\overline{h}}{\rho c_p \mu}$ عدد استانتون

پانویس‌ها

aw شرایط جداره آدیاباتیک

b ارزیابی شده در شرایط حجمی (فصل ۸)

d بر مبنای قطر

f ارزیابی شده در شرایط لایه نازک

g شرایط بخار اشباع (فصل ۱۰)

i شرایط اولیه یا ورودی

L بر مبنای طول صفحه

m شرایط جریان متوسط

m, n مشخص‌کننده موقعیت گره‌ها در راه‌حل عددی (به فصل‌های ۳ و ۴ رجوع کنید)

O مشخص‌کننده شرایط جریان سکون (فصل ۵) یا شرایط اولیه در زمان صفر

r در موقعیت شعاعی خاص

s ارزیابی شده در شرایط محیط

x مشخص‌کننده موقعیت محلی نسبت به مختصه x

w ارزیابی شده در شرایط جداره

$*$ (سرنویس) خواص ارزیابی شده در درجه حرارت مرجع، توسط معادله (۱۲۴-۵) به‌دست می‌آید

∞ ارزیابی شده در شرایط جریان آزاد

www.ketab.ir

۱

مقدمه

انتقال حرارت علمی است که با پیش‌بینی انتقال حرارتی که بین دو جسم به‌واسطهٔ وجود اختلاف درجه حرارت به‌وجود می‌آید سر و کار دارد. ترمودینامیک به ما می‌آموزد که این انرژی انتقال یافته را به‌عنوان حرارت تعریف کنیم. علم انتقال حرارت نه تنها چگونگی انتقال حرارت را تشریح می‌کند بلکه نرخ این تبادل تحت شرایط خاص و معین را نیز پیش‌بینی می‌کند. این حقیقت که نرخ انتقال حرارت خواستهٔ مطلوب در یک تجزیه و تحلیل است، تفاوت میان انتقال حرارت و ترمودینامیک را مشخص می‌سازد. ترمودینامیک در ارتباط با سیستم‌هایی است که در تعادلند و می‌توان از آن برای پیش‌بینی مقدار انرژی مورد نیاز برای تغییر سیستم از یک حالت تعادل به حالت دیگر استفاده کرد. با این وجود با استفاده از علم ترمودینامیک نمی‌توان مشخص کرد که این تغییر با چه سرعتی رخ می‌دهد زیرا در حالی فرایند، سیستم در حال تعادل نیست. در انتقال حرارت، اصول اول و دوم ترمودینامیک همراه با قوانین تجربی به کار گرفته می‌شوند که با کمک آنها می‌توان نرخ انتقال حرارت را به‌دست آورد. همانند علم ترمودینامیک، قوانین تجربی به‌عنوان مبانی بحث انتقال حرارت، به‌سادگی و سهولت برای به‌کارگیری در موقعیتهای عملی متنوعی تعمیم می‌یابند.

به‌عنوان مثالی از انواع متفاوت مسائلی که در آنها انتقال حرارت و ترمودینامیک به‌کار برده می‌شود، سردشدن میلهٔ فولادی داغی را درنظر می‌گیریم که درون ظرفی از آب قرار دارد. با استفاده از ترمودینامیک می‌توان درجه حرارت نهایی تعادل میان میلهٔ فولادی و آب را به‌دست آورد. اما ترمودینامیک مدت زمان لازم برای رسیدن به این شرایط تعادلی با درجه حرارت میله پس از سپری‌شدن زمانی خاص پیش از رسیدن به شرایط تعادلی را مشخص نمی‌کند. علم انتقال حرارت را می‌توان جهت پیش‌بینی درجه حرارت میله و آب به‌صورت تابعی از زمان مورد استفاده قرار داد.

اغلب خوانندگان کتاب با عبارات مشخص‌کنندهٔ سه شکل انتقال حرارت، ***هدایت، جابجایی، تشعشع*** آشنایی دارند. در این فصل مکانیزم سه حالت مذکور از نظر کیفی تشریح می‌گردد به نحوی که هر کدام از آنها را می‌توان در ابعاد مناسبشان مورد توجه قرار داد. در فصل‌های بعدی این سه نوع انتقال حرارت به تفصیل تشریح خواهند شد.

۱-۱ انتقال هدایتی حرارتی

تجربه نشان داده است که هنگامی که در جسمی گرادیان درجه حرارت وجود داشته باشد، انتقال انرژی از ناحیهٔ دارای

www.ketab.ir

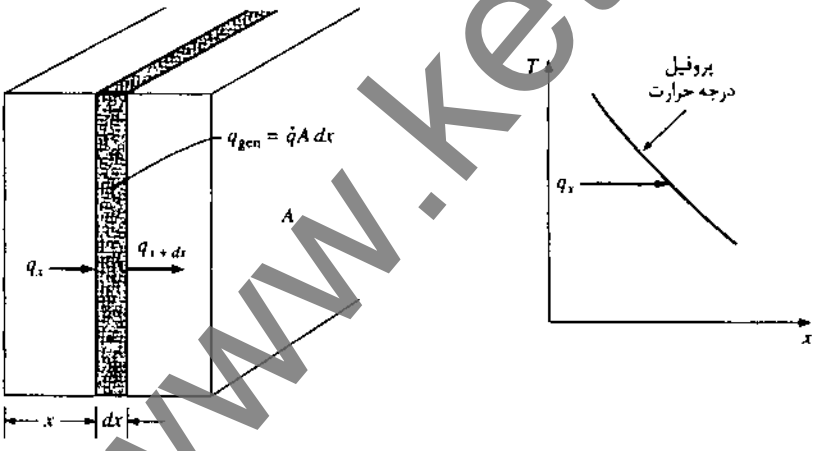
درجه حرارت بالا به ناحیهٔ دارای درجه حرارت پایین‌تر صورت می‌گیرد. دراین‌حالت می‌گوییم انرژی از ***طریق هدایت*** انتقال یافته است و نرخ انتقال حرارت در واحد سطح متناسب با گرادیان نرمال درجه حرارت می‌باشد:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

زمانی که ثابت تناسب به‌کار برده شود:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۱-۱)$$

در رابطهٔ فوق q_x انتقال حرارت $\partial T / \partial x$ گرادیان درجه حرارت در جهت جریان حرارت می‌باشد. ضریب ثابت مثبت k موسوم به ***قابلیت هدایت حرارتی*** جسم است و علامت منفی نیز به‌گونه‌ای در معادله قرار گرفته است که اصل دوم ترمودینامیک برقرار شود. مطابق با این اصل باید در مقیاس درجه حرارت جهت جریان حرارت به طرف پایین باشد همانگونه که در سیستم مختصات شکل (۱-۱) مشاهده می‌گردد. معادلهٔ (۱-۱) را به افتخار ریاضی - فیزیکدان فرانسوی ***ژوزف فوریه***، قانون فوریه در هدایت حرارتی می‌نامند. وی سهم بسیار مهمی در تجزیه و تحلیل رفتار انتقال حرارت هدایتی دارد. ذکر این نکته اهمیت دارد که معادلهٔ (۱-۱)، معادلهٔ مشخصهٔ قابلیت هدایت حرارتی است و در سیستمی که جریان حرارت با واحد وات بیان می‌شود، k دارای واحد وات بر متر - درجه سلسیوس می‌باشد.



شکل ۱-۱ شکل نشان‌دهندهٔ جهت جریان **شکل ۲-۱** حجم جزیی برای تحلیل هدایت یک بعدی

اکنون به بررسی این مسئله می‌پردازیم که معادلهٔ بنیادی مشخصهٔ انتقال حرارت در یک جسم جامد را تعیین کنیم و از معادلهٔ (۱-۱) به‌عنوان نقطهٔ آغاز این بررسی، استفاده می‌کنیم.

سیستمی یک بعدی را درنظر بگیرید که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. اگر سیستم در حالت پایدار باشد و یا به‌عبارت دیگر درجه حرارت نسبت به زمان تغییر نکند، آنگاه مسئله ساده خواهد بود و تنها با انتگرال‌گیری از معادلهٔ (۱-۱) و قراردادن مقادیر مناسب در آن می‌توانیم کمیت مورد نظر را به‌دست آوریم. با این همه اگر درجه حرارت جسم با زمان تغییر کند و یا چشمه یا چاه حرارتی در جسم جامد وجود داشته باشد، وضعیت پیچیده‌تر خواهد بود. حال حالت عمومی را درنظر می‌گیریم که درجه حرارت با زمان تغیر می‌کند و چشمه‌های حرارتی نیز ممکن‌است در جسم وجود داشته باشند. برای جزیی به ضخامت dx می‌توان موازنهٔ انرژی را به‌صورت زیر برقرار کرد:

www.ketab.ir

انرژی تولید شده در جز مورد نظر + انرژی هدایت شده از سمت چپ به داخل
انرژی هدایت شده از سمت راست به بیرون + تغییر انرژی داخلی =

این کمیات انرژی به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\text{انرژی ورودی از سمت چپ} = q_x = -kA\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\text{انرژی تولید شده در جز مورد نظر} = \dot{q}A\,dx$$

$$\text{تغییر انرژی داخلی} = \rho cA\frac{\partial T}{\partial \tau}dx$$

$$\text{انرژی خروجی از سمت راست} = q_{x+dx} = -kA\frac{\partial T}{\partial x}\bigg]_{x+dx}$$

$$= -A\left[k\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]$$

در روابط فوق:

$\dot{q}$ = انرژی تولید شده در واحد حجم، W/m^3

c = گرمای ویژهٔ ماده، $J/kg.\,^\circ C$

ρ = چگالی، kg/m^3

از ترکیب روابط فوق خواهیم داشت:

$$-kA\frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}A\,dx = \rho cA\frac{\partial T}{\partial \tau}dx - A\left[k\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]$$

و یا:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \dot{q} = \rho c\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (۱-۲)$$

معادلهٔ مذکور معادلهٔ هدایت حرارت یک بعدی است. برای جریان حرارت در بیش از یک بعد تنها بایستی هدایت حرارت ورودی و خروجی به واحد حجم در سه جهت مختصات را درنظر بگیریم. این مطلب در شکل (۳-۱ الف) نشان داده شده است. از موازنهٔ انرژی داریم:

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{d\tau}$$

و معادلات انرژی عبارت است از:

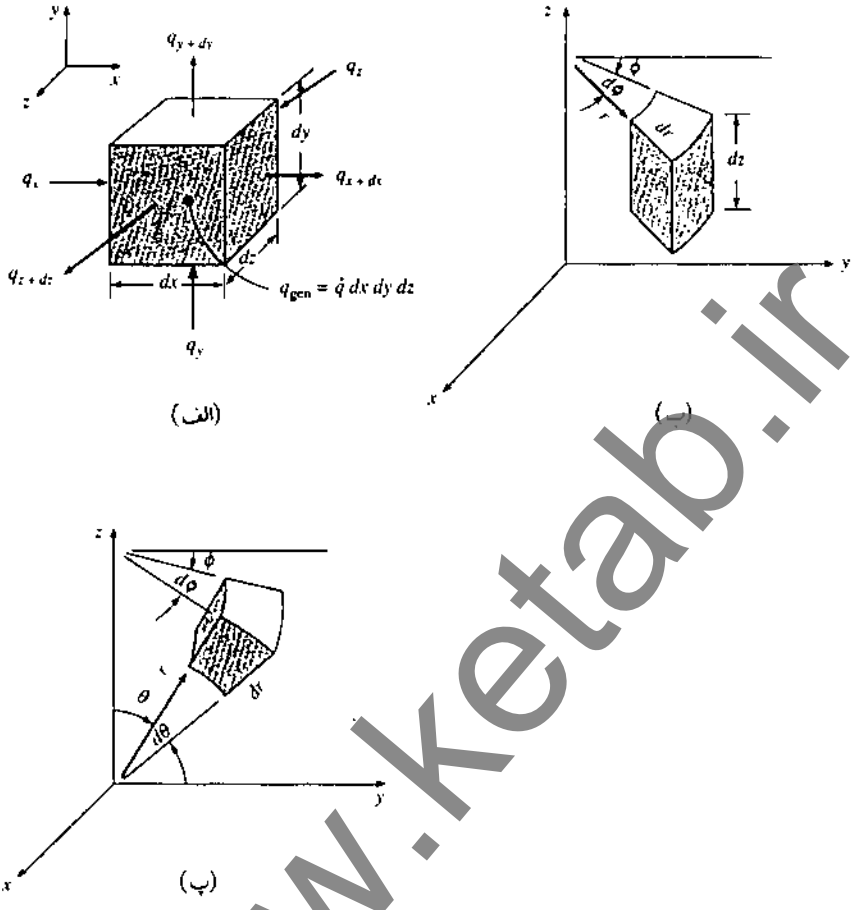
$$q_x = -k\,dy\,dz\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx} = -\left[k\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx\right]dy\,dz$$

$$q_y = -k\,dx\,dz\frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+dy} = -\left[k\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)dy\right]dx\,dz$$

www.ketab.ir



شکل ۳-۱ عنصر حجمی برای تحلیل هدایت حرارتی در سه بعد، (الف) مختصات کارتزین، (ب) مختصات استوانه‌ای، (پ) مختصات کروی

$$q_z = -k\,dx\,dy\,\frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz} = -\left[k\,\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial z}\right)dz\right]dx\,dy$$

$$q_{gen} = \dot{q}\,dx\,dy\,dz$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \rho c\,dx\,dy\,dz\,\frac{\partial T}{\partial \tau}$$

بنابراین معادلهٔ کلی هدایت حرارتی سه بعدی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c\,\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (۳-۱)$$

در هنگامی که قابلیت هدایت حرارتی در معادلهٔ (۳-۱) ثابت باشد، خواهیم داشت:

www.ketab.ir

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (۳-۱ \text{ الف})$$

در معادلهٔ فوق کمیت $\alpha = k/\rho c$ را ضریب پخش حرارتی ماده می‌نامند. هر چه مقدار α بزرگتر باشد، نفوذ و پخش حرارت در جسم سریعتر خواهد بود. این مطلب را می‌توان با امتحان کمیاتی که در ساختار α به‌کار رفته‌اند، دریافت. مقدار زیاد α می‌تواند ناشی از زیادبودن مقدار قابلیت هدایت حرارتی که خود نشان‌دهندهٔ نرخ سریع انتقال حرارت است و یا به‌دلیل کم‌بودن مقدار ظرفیت حرارتی ρc باشد. پایین‌بودن مقدار ظرفیت حرارتی نیز بدان معنی است که انرژی کمتری در جسم حرکت کرده و این انرژی در آن جذب شده و باعث افزایش درجه حرارت جسم می‌گردد. بنابراین انرژی بیشتری باید وجود داشته باشد تا انتقال حرارت بیشتری صورت گیرد. ضریب پخش حرارتی α دارای واحد مترمربع در ثانیه است.

در مشتقات فوق، عبارت مشتق $x+dx$ به شکل بسط سری تیلور و تنها با بهره‌گیری از دو جملهٔ اوّل آن نوشته شده است. معادلهٔ (۳-۱ الف) را می‌توان با استفاده از روشهای استاندارد ریاضی در مختصات استوانه‌ای یا کروی نیز نوشت. نتایج عبارت‌اند از:

مختصات استوانه‌ای

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (۳-۱ \text{ ب})$$

مختصات کروی

$$\frac{1}{r}\frac{\partial^2}{\partial r^2}(rT)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (۳-۱ \text{ پ})$$

سیستم‌های مختصات مورد استفاده همراه با معادلات (۳-۱ ب) و (۳-۱ پ) در شکل‌های (۳-۱ ب و پ) نمایش داده شده‌اند.

در بسیاری از مسائل عملی حالات خاصی از معادلات عمومی فوق به کار گرفته می‌شوند. به‌عنوان راهنمایی جهت مباحث پیشرفته‌تر فصول بعدی، بیان شکل‌های ساده شدهٔ این معادلات برای چند حالت عمومی ارزشمند و جالب خواهد بود:

جریان یک بعدی پایدار (بدون تولید حرارت)

$$\frac{d^2 T}{dx^2}=0 \qquad (۱-۴)$$

توجه کنید که این معادله در هنگامی که (مقدار ثابت = q) است مشابه با معادله (۱-۱) می‌باشد.

جریان یک بعدی پایدار در مختصات استوانه‌ای (بدون تولید حرارت)

$$\frac{d^2 T}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dT}{dr}=0 \qquad (۱-۵)$$

جریان حرارت یک بعدی پایدار با منبع حرارتی

$$\frac{d^2 T}{dx^2}+\frac{\dot{q}}{k}=0 \qquad (۱-۶)$$

هدایت پایدار دو بعدی بدون منبع حرارتی

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0 \qquad (۱-۷)$$

www.ketab.ir

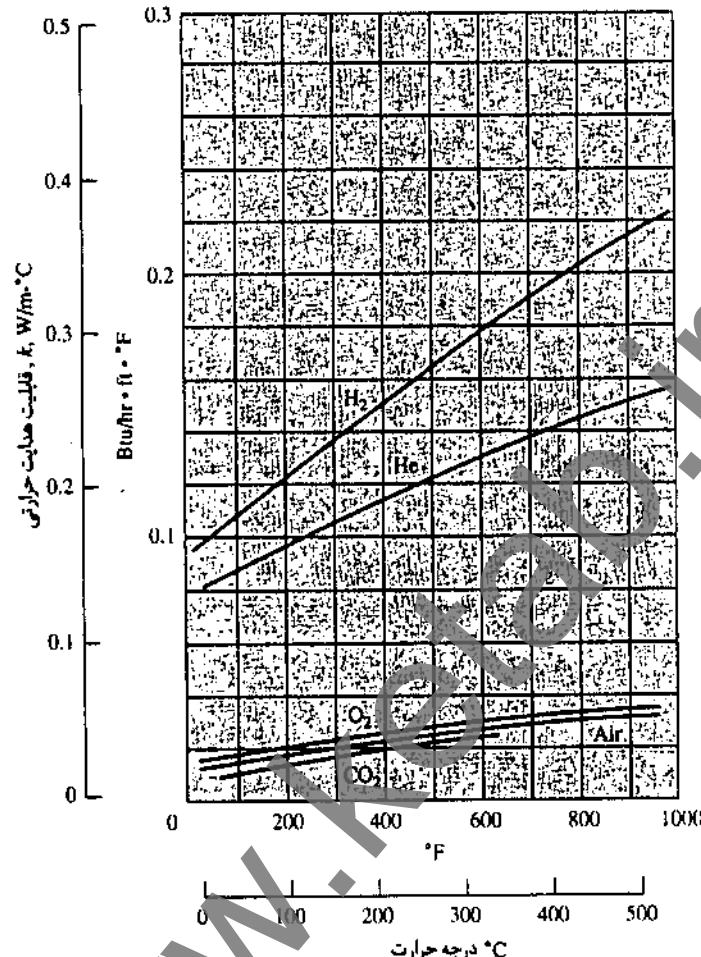
جدول ۱-۱ قابلیت هدایت حرارتی مواد مختلف در 0 C°

ماده	قابلیت هدایت حرارتی k	
فلزات	W/m·°C	Btu/h·ft·°F
Silver (pure)	410	237
Copper (pure)	385	223
Aluminum (pure)	202	117
Nickel (pure)	93	54
Iron (pure)	73	42
Carbon steel, 1% C	43	25
Lead (pure)	35	20.3
Chrome-nickel steel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
غیرفلزات جامد		
Diamond	2300	1329
Quartz, parallel to axis	41.6	24
Magnesite	4.15	2.4
Marble	2.08–2.94	1.2–1.7
Sandstone	1.83	1.06
Glass, window	0.78	0.45
Maple or oak	0.17	0.096
Hard rubber	0.15	0.087
Polyvinyl chloride	0.09	0.052
Styrofoam	0.033	0.019
Sawdust	0.059	0.034
Glass wool	0.038	0.022
Ice	2.22	1.28
مایعات		
Mercury	8.21	4.74
Water	0.556	0.327
Ammonia	0.540	0.312
Lubricating oil, SAE 50	0.147	0.085
Freon 12, CCl_2F_2	0.073	0.042
گازها		
Hydrogen	0.175	0.101
Helium	0.141	0.081
Air	0.024	0.0139
Water vapor (saturated)	0.0206	0.0119
Carbon dioxide	0.0146	0.00844

www.ketab.ir

۱-۲ قابلیت هدایت حرارتی

معادلهٔ (۱-۱) معادلهٔ مشخصهٔ قابلیت هدایت حرارتی است. اندازه‌گیری‌های تجربی برای تعیین قابلیت هدایت حرارتی اجسام مختلف بر اساس این تعریف صورت می‌گیرد. برای گازها در درجه حرارت‌های نسبتاً پایین، تحلیل تئوری جنبشی گازها را می‌توان جهت پیش‌بینی دقیق مقادیر مشاهده شدهٔ تجربی مورد استفاده قرار داد. در برخی از موارد، تئوری‌هایی برای برآورد قابلیت هدایت حرارتی مایعات و جامدات در دسترس می‌باشد ولی در حالت کلی هنوز سؤالات و مفاهیم متعددی در ارتباط با مایعات و جامدات وجود دارد که بایستی روشن گردند.



شکل ۴-۱ قابلیت هدایت حرارتی برخی از گازها [1W/m .°C = 0.5779 Btu/h.ft , °F]

مکانیزم هدایت حرارتی در گازها ساده است. انرژی جنبشی یک مولکول با درجه حرارت آن مشخص می‌گردد لذا در ناحیه درجه حرارت‌های بالا، مولکول‌ها دارای سرعت‌های بالاتر از ناحیهٔ درجه حرارت‌های پایین هستند. مولکول‌ها دارای حرکت تصادفی پیوسته می‌باشند و در نتیجه به یکدیگر برخورد نموده و انرژی و اندازهٔ حرکت خود را مبادله می‌کنند. این حرکت تصادفی مولکول‌ها با یا بدون وجود گرادیان درجه حرارت در گاز، همواره وجود دارد. اگر یک مولکول از ناحیه درجه حرارت پایین حرکت کند، انرژی جنبشی را همراه با خود به ناحیه دارای درجه حرارت کمتر منتقل می‌کند و در آنجا انرژی را در طی برخوردها به مولکول‌های دارای انرژی کمتر انتقال می‌دهد.

در جدول (۱-۱) مقادیر قابلیت هدایت حرارتی برخی از مواد فهرست شده است تا موقعیت نسبی آنها که در عمل انتظار آن‌را داریم از نظر مقداری نمایش داده شود. اطلاعات جدول‌بندی شدهٔ کامل‌تر در ضمیمه A مشاهده می‌گردد. به‌طور کلی قابلیت هدایت حرارتی به‌شدت به درجه حرارت وابسته است.

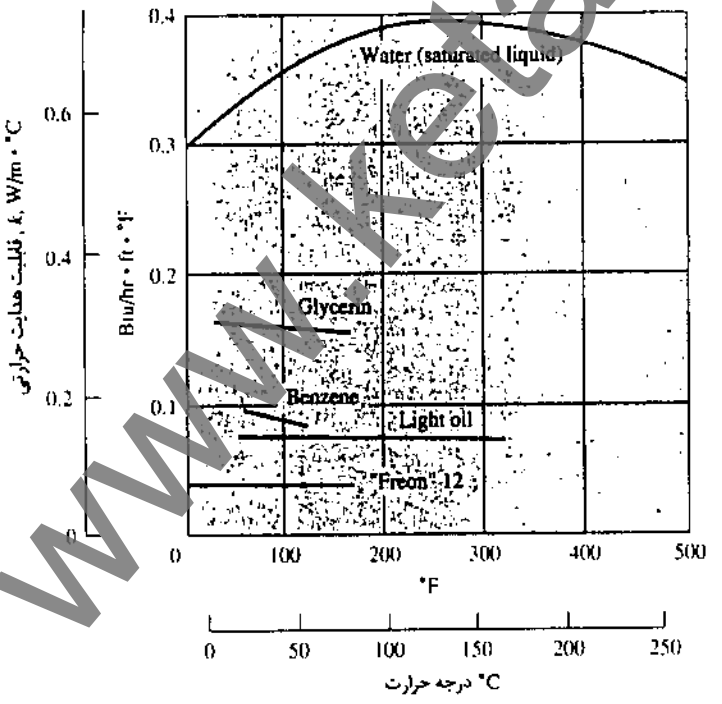
پیشتر گفتم که اگر جریان حرارت با واحد وات بیان شود، قابلیت هدایت حرارتی دارای واحد وات بر متر در درجه سلسیوس خواهد بود. توجه کنید که در اینجا نرخ حرارت مطرح است و مقدار عددی قابلیت هدایت حرارتی نمایانگر آن

www.kateb.ir

است که حرارت با چه سرعتی در یک مادهٔ مشخص جریان می‌یابد. نرخ انتقال حرارت که در مدل مولکولی فوق مورد بحث قرار گرفت، چگونه به حساب آورده می‌شود؟ واضح است که هر چه مولکول سریعتر حرکت کند، سریعتر انرژی را منتقل خواهد کرد. تحلیلی ساده نشان می‌دهد که قابلیت هدایت حرارتی یک گاز با ریشهٔ دوم درجه حرارت مطلق تغییر می‌کند. (به یاد آورید که سرعت صوت در یک گاز با ریشهٔ دوم درجه حرارت تغییر می‌کند و این سرعت تقریباً متوسط سرعت مولکول‌هاست). قابلیت هدایت حرارتی برخی از گازها در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. برای اغلب گازها در فشارهای متوسط، قابلیت هدایت حرارتی تنها تابعی از درجه حرارت است. این بدان معنی است که داده‌های مربوط به گازها در فشار یک اتمسفر (atm) که در ضمیمهٔ A مشاهده می‌گردد را می‌توان برای محدودهٔ وسیعی از فشارها مورد استفاده قرار داد.

وقتی فشار گاز در حد فشار بحرانی آن باشد و یا به‌طورکلی‌تر، هنگامی که رفتار گاز غیر ایده‌آل محسوس باشد، باید از منابع دیگری برای به‌دست‌آوردن داده‌های مربوط به قابلیت هدایت حرارتی استفاده کنیم.

مکانیزم فیزیکی هدایت انرژی حرارتی در مایعات از نظر کیفی همانند گازها است گر چه وضعیت بسیار پیچیده‌تر می‌باشد زیرا مولکول‌ها دارای فواصل کمتر بوده و میدان نیروهای مولکولی تأثیر شدیدی بر تبادل انرژی در فرایند برخورد از خود بر جا می‌گذارد. قابلیت هدایت حرارت برخی از مایعات در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.



شکل ۵-۱ قابلیت هدایت حرارتی برخی از مایعات

در سیستم آحاد انگلیسی، واحد جریان حرارت بر حسب واحد حرارتی بریتانیایی در ساعت (Btu/h)، سطح بر حسب فوت مربع و درجه حرارت بر حسب فارنهایت بیان می‌گردد. قابلیت هدایت حرارتی نیز دارای واحد Btu/h.ft. °F است.

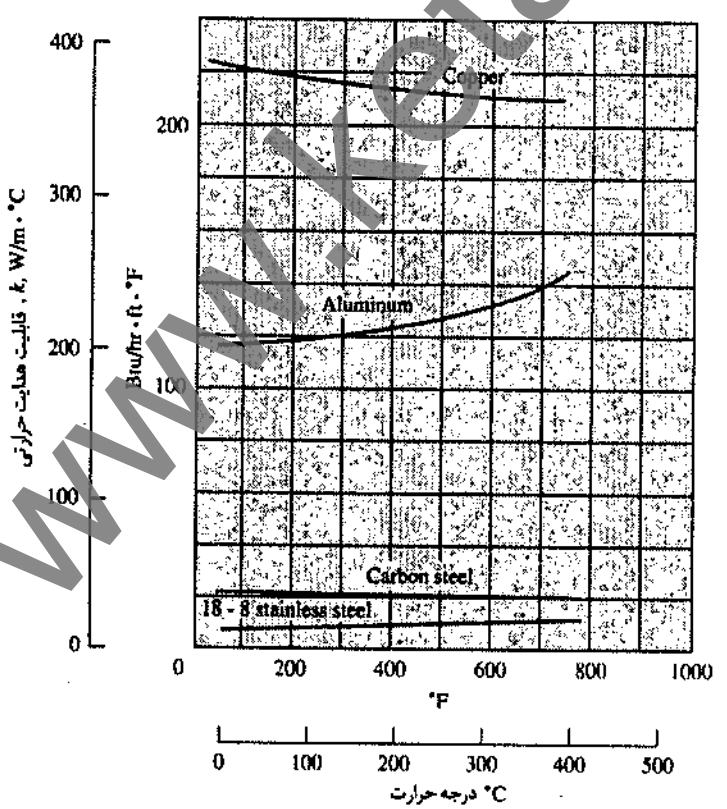
ممکن‌است انرژی حرارتی در جامدات به دو صورت انتقال یابد. ارتعاشات شبکه‌ای و انتقال توسط الکترون‌های آزاد. در هادی‌های خوب الکتریکی تعداد بسیار زیادی الکترون آزاد در ساختمان شبکه‌ای جسم حرکت می‌کنند. همانگونه که

www.ketab.ir

الکترون‌ها بارهای الکتریکی را منتقل می‌کنند، قادر هستند انرژی حرارتی را نیز از یک ناحیه با درجه حرارت بالا به ناحیه‌ای با درجه حرارت پایین‌تر انتقال دهند، نظیر آنچه در مورد گازها دیدیم. در حقیقت از این الکترون‌ها غالباً به‌عنوان گاز الکترونی یاد می‌شود. انرژی ممکن‌است به‌صورت انرژی ارتعاشی در ساختمان شبکه‌ای جسم نیز انتقال یابد. گر چه در حالت کلی این شکل اخیر از انتقال انرژی در مقایسه با انتقال به‌وسیلهٔ الکترون‌ها، ناچیز است و به این دلیل هادی‌های خوب الکتریکی اغلب هادی‌های خوب حرارتی نیز هستند، مانند: مس، آلومینیوم و نقره. عایق‌های الکتریکی نیز معمولاً عایق‌های حرارتی خوب می‌باشند. قابلیت هدایت حرارتی برخی از جامدات در شکل (۶-۱) نشان داده شده است و در ضمیمه A نیز اطلاعات بیشتری ارائه می‌گردد.

قابلیت هدایتی حرارتی اجسام عایق متعددی نیز در ضمیمهٔ A درج گردیده است. به‌عنوان مثال قابلیت هدایت حرارتی برای پشم شیشه معادل 0.038 °C.W/m و برای شیشهٔ ساختمانی معادله 0.78 °C.W/m است. در درجه حرارت‌های بالا، انتقال انرژی ازطریق اجسام عایق شامل اشکال متعددی است: هدایت ازطریق الیاف و مواد جامد متخلخل، هدایت ازطریق هوای به تله افتاده در فضای‌های خالی، و در درجه حرارت‌های به حد کافی بالا ازطریق تشعشع.

یک مسئله فنی مهم ذخیره‌سازی و انتقال مایعات کرایوژنیک نظیر هیدروژن مایع، برای مدت زمانی طولانی است. اینگونه کاربردها منجر به تکامل فوق عایق‌ها برای استفاده در درجه حرارت‌های بسیار پایین (کمتر از 250 °C-) شده‌اند.



شکل ۶-۱ قابلیت هدایت حرارتی برخی از جامدات

www.ketab.ir

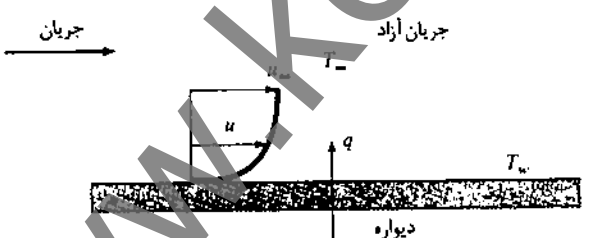
مؤثرترین اینگونه فوق عایق‌ها شامل چند لایه از موادی هستند که به‌شدت خاصیت انعکاسی دارند. فواصل بین این لایه‌ها با مواد عایق دیگر پر شده است. کل سیستم نیز جهت به حداقل رساندن هدایت هوا، تخلیه و خلأ می‌شود و قابلیت هدایت حرارتی تا حد 0.3 mW/m. °C کاهش می‌یابد. خلاصه این از مقادیر قابلیت هدایت حرارتی مواد عایق در درجه حرارت‌های کرایوژنیک در جدول ۲-۱ مشاهده می‌گردد. اطلاعات بیشتر در مورد عایقهای چند لایه در مراجع ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲-۱ قابلیت هدایت حرارتی مؤثر برخی از مواد عایق کرایوژنیک در محدودهٔ 15 °C تا 195 °C- چگالی از 30 تا 80 kg/m^3 تغییر می‌کند.

Type of insulation	Effective k, mW/m-°C
1. Foams, powders, and fibers, unevacuated	7–36
2. Powders, evacuated	0.9–6
3. Glass fibers, evacuated	0.6–3
4. Opacified powders, evacuated	0.3–1
5. Multilayer insulations, evacuated	0.015–0.06

۳-۱ انتقال حرارت جابجایی

می‌دانیم که وقتی یک صفحه فلزی داغ در مقابل یک فن قرار گیرد سریعتر از زمانی سرد می‌شود که در مجاورت هوای ساکن قرار گیرد. در این صورت می‌گوییم که حرارت جابجا شده است و این فرایند را ***انتقال حرارت جابجایی*** می‌نامیم.



شکل ۷-۱ انتقال حرارت جابجایی از یک صفحه

اصطلاح ***جابجایی*** برای خواننده همراه با نوعی آگاهی حسی در رابطه با فرایند انتقال حرارت است گر چه این آگاهی و درک حسی باید به‌گونه‌ای تعمیم یابد که شخص بتواند به تحلیلی کامل از مسئله دست یابد. به‌عنوان مثال به‌وضوح می‌دانیم که سرعت عبور هوا از روی صفحهٔ داغ بر نرخ انتقال حرارت اثر می‌گذارد. اما آیا این تأثیر به‌صورت سردشدن خطی است؟ به‌عبارت دیگر اگر سرعت دو برابر شود، نرخ انتقال حرارت دو برابر خواهد شد؟ ممکن‌است سؤال کنیم که در صورتی که صفحه را به جای هوا با آب سرد کنیم نرخ انتقال حرارت متفاوت می‌باشد، اما مجدداً این سؤال مطرح می‌شود که این اختلاف چقدر می‌تواند باشد؟ این سؤالات را می‌توان به کمک برخی از تحلیلهایی که در فصول بعد خواهیم دید، پاسخ گفت. اما اکنون ما به ترسیم مکانیزیم فیزیکی انتقال حرارت جابجایی خواهیم پرداخت و ارتباط آن با فرایند هدایت را نشان خواهیم داد.

صفحهٔ گرم شده شکل (۷-۱) را درنظر بگیرید. درجه حرارت صفحه T_w است و درجه حرارت سیال T_∞ می‌باشد. سرعت جریان به‌صورتی است که مشاهده می‌گردد، یعنی بر روی صفحه به‌دلیل عمل نیروهای ***لزجتی*** به صفر کاهش می‌یابد. از آنجا که سرعت لایهٔ سیال در جداره صفر خواهد بود، در این نقطه باید حرارت فقط به‌واسطهٔ هدایت منتقل گردد.

www.ketab.ir