



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

انتقال حرارت جابه‌جائی

تألیف:

پروفسور ادرین بجان

استاد دانشگاه دوک

ترجمه:

دکتر کامران مبینی

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

سرشناسه	: بیژان، آدریان، ۱۹۴۸ - م. Bejan, Adrian
عنوان و نام پدیدآور	: انتقال حرارت جابه‌جایی / تالیف آدرین بجان؛ ترجمه کامران مبینی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: د، ۵۳۸ ص: مصور، جدول.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۶۶۹-۰-۵
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: [2013], 4th ed., Convection heat transfer.
یادداشت	: ویراست قبلی کتاب حاضر قبلاً تحت عنوان "انتقال گرمای همرفت" با ترجمه جواد ابوالفضل‌اصفهانی و وحید اطمینان توسط دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۲ منتشر شده است.
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
عنوان دیگر	: انتقال گرمای همرفت.
موضوع	: گرما -- جابه‌جایی
موضوع	: Heat -- Convection
شناسه افزوده	: مبینی، کامران، ۱۳۳۹ - مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
شناسه افزوده	: Shahid Rajaei Teacher Training University
رده بندی کنگره	: QC ۱۳۹۶ ۸ الف ۹ ب / ۲۲۷
رده بندی دیویی	: ۴۰۲۲۵/۶۲۱
شماره کتابشناسی ملی	: ۵۰۰۳۷۰



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

عنوان	: انتقال حرارت جابه‌جایی
ترجمه	: کامران مبینی، عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
ویراستار علمی	: کامران مبینی
ویراستار ادبی	: عاطفه نجیبی
نوبت چاپ	: اول - زمستان ۱۳۹۶
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
لیتوگرافی	: رجاء نقشینه
چاپ	: شریف
طراح جلد	: عباس مرادی
ناظر چاپ	: محمد معتمدی نژاد
صفحه‌آرا و کارشناس چاپ	: نیره فیروزی
کارشناسان	: طاهره کیا / علی رضایی اهوآنوئی
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۳۰۰,۰۰۰ ریال
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۶۶۹-۰-۵
ISBN: 978-600-99669-0-5	

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفان و مترجمان و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی محفوظ است.
نشانی: تهران، لویزان - کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ - صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵ - تلفن: (۲۶۳۲) ۹ - ۲۲۹۷۰۰۶۰،
تلفکس: ۲۲۹۷۰۰۴۲، پست الکترونیکی: Publish@strtu.edu، وب سایت: http://Publish.strtu.edu

پیش‌گفتار

کتاب حاضر، ترجمه همراه با تشریح کتاب *انتقال حرارت جابه‌جایی*^۱، تألیف *ادریں بجان*^۲ استاد برجسته مهندسی مکانیک در دانشگاه دوک در آمریکا است. علاوه بر آثار با ارزشی که این نویسنده تألیف کرده، شهرت وی به علت ارائه قانون ساختاری^۳ است که کاربرد آن فراتر از رشته‌های مهندسی است. کتاب *انتقال حرارت جابه‌جایی* اول بار در سال ۱۹۸۴ به چاپ رسید و ویرایش‌های دوم تا چهارم آن به ترتیب در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۴ و ۲۰۱۳ منتشر شد. کتاب حاضر بر اساس ویرایش چهارم کتاب اصلی تدوین شده است. مزیت برجسته کتاب بجان در مقایسه با سایر کتاب‌های موجود در این موضوع این است که در آن علاوه بر ارائه تئوری-های اصلی، کاربردهای فراوان جابه‌جایی نیز در کلیه فصول مورد بحث قرار گرفته و این کاربردها فاصله چندانی از پژوهش‌های جاری در مرز علم انتقال حرارت جابه‌جایی ندارد. علی-رغم همه مزایا، این کتاب مانند هر کتاب دیگر معایبی نیز دارد. عیب مهم آن به‌عنوان یک کتاب درسی این است که فاقد یک فصل مقدماتی است که در آن حداقل جهت یادآوری، تعاریف اولیه مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی بیان شده باشد. اشکال دیگر آن است که در بسیاری از موارد توضیحات کافی برای خواننده برای درک روند تحلیل یک موضوع یا به‌دست آوردن یک معادله ارائه نشده است. اگرچه این کتاب در سطح پیشرفته است، اما به نظر می‌رسد که انتظار نویسنده از خواننده بیش از حد لازم است و این احتمال می‌رود که یک دانشجوی تحصیلات تکمیلی در درک مطالبی که از دیدگاه نویسنده بدیهی است با مشکل مواجه شود. به منظور رفع این معایب و جهت قابل استفاده شدن کتاب بجان برای دانشجویان تحصیلات

¹ *Convection Heat Transfer*

² *Adrian Bejan*

³ *constructal law*

تکمیلی، در کتاب حاضر یک فصل مقدماتی شامل تعاریف اولیه و لازم برای درک مطالب فصول بعدی ارائه گردیده است. البته مطالب این فصل مقدماتی نیز بر اساس کتاب *مقدمه‌ای بر تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی*¹ تالیف پاتریک / اوستویزن² تدوین شده است. علاوه بر این، در کل متن کتاب مباحث در موارد لازم تشریح شده است. یعنی اگر مطلبی نارسا و یا گنگ به نظر می‌رسیده، با ارائه توضیحات اضافه تلاش در رفع ابهام به عمل آمده است. همچنین در مواردی که روند اثبات معادلات سرعتی بیش از حد داشته و مراحل میانی حذف شده است، این مراحل به‌طور کامل در متن اضافه شده تا دانشجو در فهم مطالب با مشکلات بیش از اندازه مواجه نشود. از طرف دیگر قسمتی از مراحل اثبات به عهده دانشجو گذاشته شده تا دانشجو نیز به سهم خود برای تکمیل روند به‌دست آوردن معادلات تلاش و تفکر کرده باشد. این موارد در قالب تکالیفی است که در متن هر فصل و درست در محل مربوط به موضوع قرار داده شده است.

این کتاب حاصل ده سال تدریس درس انتقال حرارت پیشرفته (جابه‌جایی) برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی است و در طی این مدت به تدریج از یک جزوه کلاسی به‌صورت یک کتاب درآمدگی است. متن کتاب طی این مدت بارها توسط اینجانب و دانشجویان مطالعه شده و اشکالات آن رفع گردیده است. نکته مهم در مورد این کتاب آن است که این کتاب ترجمه کلمه به کلمه یا جمله به جمله کتاب اصلی نیست. بلکه مفهوم و محتوای کتاب اصلی به زبان فارسی شیوا و روان بیان شده است. به علاوه چنان‌که گفته شد مطالب زیادی اضافه بر محتوای کتاب جهت ایجاد سهولت در فهم کتاب بیان گردیده است.

کتاب حاضر شامل هشت فصل اول کتاب اصلی است که به نظر می‌رسد برای یک درس سه واحدی در طول یک نیم‌سال تحصیلی کافی باشد. اما در صورت درخواست اساتید معظم و احساس نیاز، سایر فصول کتاب نیز در آینده ترجمه و تشریح خواهد شد و به‌عنوان جلد دوم کتاب به چاپ خواهد رسید. از کلیه اساتید و دانشجویان محترم تقاضا دارم که نظرات و پیشنهادات خود را در مورد این کتاب به اطلاع اینجانب برسانند تا اصلاحات و تغییرات لازم در ویرایش‌های بعدی اعمال گردد.

کامران مبینی
 kmobini@srttu.edu
 تهران ۱۳۹۶

¹ *Introduction to Convective Heat Transfer Analysis*

² *Patrick H. Oosthuizen*

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	پیش‌گفتار
ت	فهرست مطالب
ز	فهرست نمادها
<hr/>	
۱	مقدمه
۱	۱-۰- انتقال حرارت جابه‌جائی
۵	۲-۰- جریان‌های آرام، آشفته و گذرا
۵	۳-۰- جابه‌جائی اجباری، آزاد و ترکیبی
۶	۴-۰- جریان‌های خارجی و داخلی
۶	۵-۰- ضریب انتقال حرارت جابه‌جائی
۱۰	۶-۰- کاربرد تحلیل بعدی در جابه‌جائی
۱۵	۷-۰- تفسیر فیزیکی اعداد بدون بعد
۱۵	۱-۷-۰- عدد رینولدز
۱۵	۲-۷-۰- عدد ناسلت
۱۶	۳-۷-۰- عدد گرافش
۱۶	۴-۷-۰- عدد پراتل
۱۸	منابع

۱۹	فصل ۱ – اصول بنیادی
۱۹	۱-۱- اصل بقای جرم
۲۲	۲-۱- اصل بقای اندازه حرکت
۲۵	۳-۱- اصل بقای انرژی
۲۹	۴-۱- قانون دوم ترمودینامیک
۳۱	۵-۱- تحلیل مقیاسی
۳۱	۱-۵-۱- مرتبه مقداری
۳۲	۲-۵-۱- روش تحلیل مقیاسی
۳۴	۳-۵-۱- قواعد تحلیل مقیاسی
۳۵	۶-۱- خطوط حرارت برای تجسم انتقال حرارت
۳۸	منابع
۴۲	مسائل

۴۹	فصل ۲ – جریان لایه مرزی آرام
۴۹	۱-۲- مساله بنیادی در انتقال حرارت جابه‌جائی
۵۱	۲-۲- مفهوم لایه مرزی
۵۵	۳-۲- تحلیل مقیاسی
۵۷	۱-۳-۲- لایه مرزی حرارتی ضخیم
۵۹	۲-۳-۲- لایه مرزی حرارتی باریک
۶۲	۴-۲- حل انتگرالی
۶۹	۱-۴-۲- لایه مرزی حرارتی کوچک
۷۳	۲-۴-۲- لایه مرزی حرارتی ضخیم
۷۴	۵-۲- راه‌حل‌های تشابهی
۷۴	۱-۵-۲- معادلات جریان
۷۸	۲-۵-۲- حل جریان
۸۲	۳-۵-۲- حل انتقال حرارت
۸۸	۶-۲- سایر شرایط حرارتی دیواره
۸۹	۱-۶-۲- شروع بدون انتقال حرارت

۹۱	۲-۶-۲- توزیع دلخواه دمای دیواره
۹۴	۲-۶-۳- شار حرارتی یکنواخت
۹۵	۲-۷- اثر تغییرات فشار در جهت جریان
۱۰۰	۲-۸- اثر جریان دمشی یا مکشی از درون سطح
۱۰۳	۲-۹- اثر هدایت از رسوب جامد روی سطح دیوار
۱۰۸	۲-۱۰- کمینه‌سازی تولید انترپی در جریان لایه مرزی آرام
۱۱۳	۲-۱۱- خطوط گرما در جریان لایه مرزی آرام
۱۱۸	منابع
۱۲۱	مسائل

فصل ۳- جریان آرام درون مجاری

۱۳۷	۳-۱- طول ورودی هیدرودینامیکی
۱۴۳	۳-۲- جریان کامل توسعه‌یافته
۱۴۶	۳-۳- قطر هیدرولیکی و افت فشار
۱۵۳	۳-۴- انتقال حرارت به جریان کامل توسعه‌یافته در مجرا
۱۵۳	۳-۴-۱- دمای متوسط
۱۵۳	۳-۴-۲- پروفیل دما در حالت کامل توسعه‌یافته
۱۵۶	۳-۴-۳- شار حرارتی یکنواخت از دیواره
۱۶۱	۳-۴-۴- دمای یکنواخت دیواره
۱۶۴	۳-۴-۵- لوله احاطه شده توسط سیال هم دما
۱۶۸	۳-۵- انتقال حرارت در جریان در حال توسعه
۱۶۸	۳-۵-۱- تحلیل مقیاسی
۱۶۹	۳-۵-۱-۱- اعداد پرناتل خیلی کوچک
۱۷۰	۳-۵-۱-۲- اعداد پرناتل خیلی بزرگ
۱۷۱	۳-۵-۱-۳- تغییرات عدد ناسلت در ناحیه ورودی مجرا
۱۷۳	۳-۵-۲- جریان یکنواخت توسعه‌یافته حرارتی
۱۷۴	۳-۵-۳- جریان هاگن- پوسوله در حال توسعه حرارتی
۱۷۸	۳-۵-۴- جریان در حال توسعه حرارتی و هیدرودینامیکی

۱۷۹	۳-۶- سرمایه‌ش بهینه یک دسته تیغه‌های موازی مولد حرارت
۱۸۰	۳-۶-۱- حد فاصله کم
۱۸۱	۳-۶-۲- حد فاصله زیاد
۱۸۵	۳-۷- خطوط گرما در جریان کامل توسعه‌یافته
۱۹۰	منابع
۱۹۷	مسائل

فصل ۴ - جابه‌جایی طبیعی خارجی

۲۱۳	۴-۱- جابه‌جایی طبیعی به‌عنوان یک موتور حرارتی متحرک
۲۱۵	۴-۲- معادلات لایه مرزی آرام
۲۱۸	۴-۳- تحلیل مقیاسی
۲۲۰	۴-۳-۱- سیالات Pr بزرگ
۲۲۲	۴-۳-۲- سیالات Pr کوچک
۲۲۵	۴-۳-۳- مشاهدات
۲۲۶	۴-۴- حل انتگرالی
۲۲۸	۴-۴-۱- سیالات با عدد پرانتل بزرگ
۲۳۰	۴-۴-۲- سیالات با عدد پرانتل کوچک
۲۳۱	۴-۵- حل تشابهی
۲۳۷	۴-۶- شار حرارتی ثابت از دیوار
۲۳۸	۴-۶-۱- سیالات دارای عدد پرانتل بزرگ
۲۴۰	۴-۶-۲- سیالات دارای عدد پرانتل کوچک
۲۴۱	۴-۷- لایه‌بندی حرارتی
۲۴۶	۴-۸- لایه‌های مرزی به هم جفت شده
۲۴۹	۴-۹- جریان در کانال عمودی
۲۵۳	۴-۱۰- ترکیب جابه‌جایی اجباری و طبیعی
۲۵۷	۴-۱۱- انتقال حرارت همراه با اثر اغتشاش
۲۵۷	۴-۱۱-۱- دیوارهای عمودی
۲۶۰	۴-۱۱-۲- دیوارهای مایل

۲۶۲	۳-۱۱-۴- دیوارهای افقی
۲۶۵	۴-۱۱-۴- استوانه‌های افقی
۲۶۶	۵-۱۱-۴- کره
۲۶۶	۶-۱۱-۴- استوانه‌های قائم
۲۶۷	۷-۱۱-۴- سایر اجسام غوطه‌ور
۲۶۸	۱۲-۴- سرمایش بهینه یک ردیف صفحات مولد حرارت
۲۶۹	۱-۱۲-۴- حد فاصله اندک
۲۷۰	۲-۱۲-۴- حد فاصله زیاد
۲۷۰	۳-۱۲-۴- تقاطع مجانب‌ها
۲۷۳	منابع
۲۷۶	مسائل

فصل ۵ - جابه‌جایی طبیعی داخلی

۲۸۹	۱-۵- گرمایش گذرا از اطراف
۲۸۹	۱-۱-۵- تحلیل مقیاسی
۲۹۵	۲-۱-۵- ضابطه وجود لایه‌های عمودی مجزا
۲۹۷	۳-۱-۵- ضابطه وجود لایه‌های افقی مجزا
۲۹۹	۴-۱-۵- مناطق چهارگانه
۳۰۰	۲-۵- منطقه لایه مرزی
۳۰۵	۳-۵- محفظه کم عمق
۳۱۲	۴-۵- خلاصه نتایج برای گرمایش از اطراف
۳۱۲	۱-۴-۵- دیوارهای جانبی هم‌دما
۳۱۵	۲-۴-۵- دیوارهای جانبی دارای شار حرارتی ثابت
۳۱۶	۳-۴-۵- محفظه‌های نیمه تقسیم‌بندی شده
۳۱۹	۴-۴-۵- محفظه‌های مثلثی
۳۲۰	۵-۵- محفظه‌هایی که از زیر گرم می‌شوند
۳۲۰	۱-۵-۵- شکل جریان جابه‌جایی در حالت مختلف
۳۲۴	۲-۵-۵- تحلیل مقیاسی جریان آشفته

۳۲۵	۵-۶- محفظه‌های شیب‌دار
۳۲۷	۵-۷- فضای بین دو استوانه هم‌مرکز افقی
۳۲۸	۵-۸- فضای بین دو کره هم‌مرکز
۳۲۹	منابع
۳۳۴	مسائل

۳۴۱	فصل ۶ - گذر به آشفته‌گی
۳۴۱	۶-۱- ضوابط تجربی برای گذر
۳۴۲	۶-۲- قواعد مقیاسی برای گذر
۳۴۶	۶-۳- کمانش جریان‌های غیرلزج
۳۵۰	۶-۴- ضابطه عدد رینولدز موضعی برای گذر
۳۵۶	۶-۵- ناپایداری جریان غیرلزج
۳۶۷	۶-۶- گذر جریان در جابه‌جایی آزاد بر روی یک دیوار عمودی
۳۶۹	منابع
۳۷۲	مسائل

۳۷۵	فصل ۷ - جریان لایه مرزی آشفته
۳۷۵	۷-۱- مقدمه
۳۷۵	۷-۲- معادلات متوسط زمانی
۳۷۹	۷-۳- معادلات لایه مرزی
۳۸۳	۷-۴- مدل طول اختلاط
۳۸۵	۷-۵- توزیع سرعت
۳۹۱	۷-۶- اصطکاک سطح در جریان لایه مرزی آشفته
۳۹۵	۷-۷- انتقال حرارت در جریان لایه مرزی آشفته
۴۰۲	۷-۸- تئوری انتقال حرارت در جریان لایه مرزی آشفته
۴۰۹	۷-۹- سایر جریان‌های خارجی
۴۰۹	۷-۹-۱- جریان عمود بر یک استوانه
۴۱۰	۷-۹-۲- جریان عبوری از روی یک کره
۴۱۱	۷-۹-۳- جریان عبوری از روی سایر اجسام

۴۱۱	۷-۹-۴- جریان عمود بر مجموعه‌ای از استوانه‌ها
۴۱۶	۷-۱۰-۱- جابه‌جایی آزاد در طول دیوارهای عمودی
۴۲۱	منابع
۴۲۳	مسائل

فصل ۸ - جریان آشفته داخلی

۴۳۱	۸-۱- توزیع سرعت
۴۳۴	۸-۲- ضریب اصطکاک و افت فشار
۴۳۸	۸-۳- ضریب انتقال حرارت
۴۴۴	۸-۴- نرخ انتقال حرارت کل
۴۴۴	۸-۴-۱- جدار هم‌دما
۴۴۶	۸-۴-۲- شار حرارتی یکنواخت
۴۴۶	۸-۵- مدل‌های آشفته‌گی دقیق‌تر
۴۵۲	۸-۶- خطوط گرما در جریان آشفته نزدیک به یک دیوار
۴۵۷	۸-۷- پهنای بهینه کانال در جریان آشفته
۴۵۹	منابع
۴۶۱	مسائل

ضمائم

۴۶۷	ضمیمه الف: ثابت‌ها و ضرایب تبدیل
۴۶۹	ضمیمه ب: خواص مواد جامد
۴۷۴	ضمیمه ج: خواص مایعات
۴۸۴	ضمیمه د: خواص گازها
۴۹۱	ضمیمه ه: فرمول‌های ریاضی
۴۹۷	

واژه‌نامه‌ها

۴۹۹	فارسی به انگلیسی
۴۹۹	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی
۵۰۴	

نمایه موضوعی

فهرست نمادها

a, b	ابعاد سطح مقطع لوله مستطیل شکل
A	مساحت
A_c	مساحت سطح مقطع
A, B	ثابت‌ها در قانون لگاریتمی دیواره
Ar	عدد ارشمیدس
b	ثابت تجربی، جریان فورشهایمر
b	پارامتر جابه‌جایی طبیعی
b	مقیاس طولی شعاعی برای جت سرعتی دایره‌ای
b	پارامتر لایه‌بندی
b	پارامتر شیب تغییر ضخامت رسوب
b	عدد لایه‌بندی حرارتی
b_T	مقیاس طولی شعاعی برای جت حرارتی دایره‌ای
$\widetilde{b}_{1,2}$	ضرایب تجربی
B	پارامتر رانش چگالش
B	عدد شکل سطح مقطع
B	گروه بدون بعد
Be_L	عدد بجان، عدد افت فشار
Be_p	عدد بجان برای یک محیط متخلخل
Bo_H	عدد بوسینسک
c	گرمای ویژه برای یک ماده تراکم‌ناپذیر

c_v	گرمای ویژه در حجم ثابت
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت
$c_{1,2}$	ثابت‌ها
C	ضربه یا واکنش فشاری
C	غلظت
C	ثابت
$C_{f,x}$	ضریب اصطکاک پوسته‌ای موضعی
C_n	ضریب
C_1, C_2, C_μ	ثابت‌ها
C_D	ضریب پسا
C_{sf}	ثابت
D, d	قطر
D	ضریب نفوذ جرمی
D	فاصله بین صفحات
D	مقیاس طولی عرض جریان
D_h	قطر هیدرولیکی
D_{k-k}	ضخامت زانو به زانوی متوسط زمانی لایه برشی آشفته
D_T	فاصله بیشینه نفوذ گرما در راستای y در نزدیکی یک نقطه تماس مستقیم
e	انرژی ویژه
f	پروفیل تشابهی تابع جریان بلازیوس
f	ضریب
f	ضریب اصطکاک
f	ضریب اصطکاک محیط متخلخل
f	ضخامت غلطشی
f_u	منحنی پروفیل سرعت
f_v	فرکانس پاشش گردابه
F	نیرو
F	پروفیل تشابهی تابع جریان
F_0	عدد فوریه
F_D	نیروی پسا

F_n	نیروی عمودی
F_t	نیروی مماسی
g	شتاب جاذبه
Gr_H	عدد گرافش
Gr_*	عدد گرافش بر اساس شار حرارتی
Gz	عدد گراتز
G_E	ثابت
h	ضریب انتقال حرارت - ضریب انتقال حرارت موضعی
h	آنتالپی ویژه
h_{fg}	گرمای نهان چگالش یا تبخیر
h'_{fg}	گرمای نهان افزوده شده
h''_{fg}	گرمای نهان افزوده شده
h_m	ضریب انتقال جرم
h_{sf}	گرمای نهان ذوب
H	نرخ جریان انتالپی
H	تابع گرما
H	ارتفاع
H	ثابت هنری
I	ممان اینرسی سطحی
I	انتگرال
j	شار انتشار
j_{app}	شار جرمی ظاهری
J	پارامتر ضخامت بدون بعد
Ja	عدد ژاکوب
k	رسانش گرمایی
k	عدد موج
k''_n, k'''_n	نرخ‌های واکنش
k_s	اندازه دانه شن
K	قدرت جت
K	نفوذپذیری

$K_{1,2}$	ثابت‌ها
l	طول موثر
l	طول اختلاط
L	طول
L	طول تماس لزوج مستقیم
L_C	طول مشخصه
ℓ	طول معادل
L_M	طول تماس حرارتی مستقیم
ε	طول موثر
Le	عدد لوئیس
m	نما در جریان روی گُوه
m	تابع
m	تابع شکل پروفیل برای تحلیل انتگرالی
\dot{m}	نرخ جرمی جریان
\dot{m}'	نرخ انتقال جرم بر واحد طول
\dot{m}'''	نرخ تولید جرم حجمی
M	گشتاور خمشی
M	تابع
M	نیروی ضربه یا عکس‌العمل نیروی ناشی از جریان سیال به درون یا بیرون حجم معیار
M	جرم
M	تابع جرم
M	محدودیت ماده
M	جرم مولی
n	مختصات بدون بعد در عرض لایه مرزی سرعتی (y/δ)
n	تعداد استوانه‌ها
n	تعداد بردهای تولیدکننده گرما
n	تعداد مول‌ها
n_l	تعداد ردیف‌ها
N_B	عدد کمانش
N_{tu}	تعداد واحدهای انتقال گرما

Nu	عدد ناسلت موضعی
Nu	عدد ناسلت در ناحیه کامل توسعه یافته
\overline{Nu}	عدد ناسلت کل
Nu_L^0	ثابت
Nu_{0-x}	عدد ناسلت کل
Nu_x	عدد ناسلت موضعی در ناحیه در حال توسعه (ورودی)
p	مختصات بدون بعد در عرض لایه مرزی حرارتی (y/δ_T)
p	تابع زوج
p	محیط تر شده
P	فشار
P_∞	فشار در جریان آزاد
Pe_D	عدد پکلت
Pe_L	عدد پکلت
Po	عدد پوسوله
Pr	عدد پراتنل
Pr_p	عدد پراتنل محیط متخلخل
Pr_t	عدد پراتنل آشفته
q	نرخ انتقال حرارت
q	تابع فرد
q'	نرخ انتقال حرارت بر واحد طول
q''	شار حرارتی
q''_{app}	شار حرارتی ظاهری
$q''_{0,max}$	بیشینه شار حرارتی، تحت یک نقطه تماس حرارتی مستقیم
q'''	نرخ تولید گرمای درونی
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت
Q	شدت جریان حجمی
r	مختصات شعاعی
r_o	شعاع لوله
r_h	شعاع هیدرولیکی
r, θ, z	مختصات استوانه‌ای

r, φ, θ	مختصات کروی
R	ثابت گاز ایده‌آل
\bar{R}	ثابت جهانی گازها
R	شعاع
R	مقاومت حرارتی
Ra_H	عدد ریلی
Ra_y	عدد ریلی اصلاح شده توسط داریسی
$Ra_{m,y}$	عدد ریلی انتقال جرم
Ra_q	عدد ریلی بر اساس قدرت منبع
Ra_{*H}	عدد ریلی بر اساس شار حرارتی
Ra_{*y}	عدد ریلی اصلاح شده توسط داریسی بر اساس شار حرارتی
Re_D	عدد رینولدز
Re_{Dh}	عدد رینولدز بر اساس شعاع هیدرولیکی
Re_l	عدد رینولدز موضعی
Re_L	عدد رینولدز
Re_l	عدد رینولدز نهایی
s	ثابت
s	آنتروپی ویژه
s	ضخامت محدوده مایع
S	آنتروپی
S_{gen}	نرخ تولید آنتروپی
Sc	عدد اشمیت
Sc_t	عدد اشمیت آشفته
Sh	عدد شروود
St_x	عدد استانتون موضعی
Ste	عدد استفان
Ste_μ	عدد استفان برای گرمایش لزجی
t	ضخامت
t	زمان
t_B	زمان کماتش یا زمان تشکیل گردابه

t_f	زمان توسعه لایه مرزی جابه‌جایی
t_v	زمان ارتباط لزجی عرضی
T	دما
T'_A	تابع خطی اوسین
T_0	دمای محیط
T_0	دمای مرجع
T_0	دمای سیال در شیپوره
T_0	دمای دیواره
T_b	دمای بالک
T_m	نقطه ذوب
T_{in}	دمای ورودی
T_∞	دمای جریان آزاد
$T_{\infty,0}$	دمای ته یک مخزن سیال لایه‌بندی شده
$T_{*\infty}$	دمای هسته در منطقه دارای عدد ریلی زیاد
u_A	تابع خطی اوسین
u_*	سرعت اصطکاکی
$u_{*\infty}$	سرعت هسته در منطقه دارای عدد ریلی زیاد
u_0	سرعت خط مرکزی
u, v, w	مولفه‌های سرعت در سیستم مختصات (x, y, z)
u', v'	نوسانات سرعت
\hat{u}, \hat{v}	دامنه‌های نوسان
U	سرعت میانگین مجرا
U	جریان پایه طولی
U	سرعت لغزنده
U_C	سرعت خط مرکزی
U_{max}	بیشینه سرعت میانگین
U_0	سرعت سیال در شیپوره
U_∞	سرعت جریان آزاد
v_0	سرعت دمش یا مکش
V	مقیاس سرعت جریان

V	سرعت
V	حجم
V	قید حجمی
W	پهنا
\dot{W}	نرخ انتقال کار، توان
x, y, z	مختصات دکارتی
x_i	کسر مولی
x_l	مختصات بدون بعد افقی در منطقه پیچ انتهایی
x_*	مختصات ورودی حرارتی
x_+	مختصات ورودی هیدرولیک
x_0	طول آغازین
x_0	طول آغازین گرما داده نشده
X	طول ورودی هیدرودینامیکی
X	مختصات عرضی برای یک نقطه واقع در بیرون لایه مرزی
X_C	طول ورودی تمرکز
X_l	گام طولی
X_t	گام عرضی
X_T	طول ورودی حرارتی
X, Y, Z	مولفه‌های نیروی جسمی
X_l^*	گام طولی بدون بعد
y	تابع
Y	شکل تعادلی یک جریان تاحدی مستقیم
Y	مختصات عرضی یک نقطه واقع در یک جریان آزاد
Y_T	طول ورودی حرارتی
z	ارتفاع

حروف یونانی

α	ضریب نفوذ حرارتی
α	نفوذ گرمایی محیط متخلخل
$\hat{\alpha}$	ثابت تجربی

α_{k-k}	زاویه زانو به زانو برای یک لایه برشی آشفته متوسط گیری شده نسبت به زمان
β	ضریب انبساط حرارتی
β_C	ضریب انبساط غلظتی
β	زاویه گوه
Γ	دبی جرمی ماده چگالش شده
γ	ثابت تجربی
γ	تابع
γ	گرادیان دما در جهت عمودی
γ_0	ثابت تجربی
Δ	تفکیک کننده
Δ	نسبت
ΔP	افت فشار
ΔT	اختلاف دما
ΔT_{avg}	اختلاف دمای میانگین
ΔT_{lm}	اختلاف دمای متوسط لگاریتمی
δ	ضخامت بدون بعد ناحیه انتهایی در یک محفظه کم عمق
δ	ضخامت غشاء
δ	ضخامت بیرونی لایه مرزی همرفتی طبیعی برای $Pr > 1$
δ	ضخامت لایه مرزی سرعتی
δ_C	ضخامت لایه مرزی غلظتی
δ_T	ضخامت لایه مرزی حرارتی
$\delta_{T,f}$	ضخامت لایه مرزی حرارتی در انتهای توسعه یافتن آن
δ_v	ضخامت لایه لزج داخلی لایه مرزی جابه جایی طبیعی برای $Pr < 1$
δ_v	ضخامت لایه مرزی سرعتی
δ^*	ضخامت جابه جایی
ϵ	پارامتر کوچک (H/L^2) برای محفظه های کم عمق
ϵ	تابع استهلاک آشفته
ϵ_H	نفوذ گردابی حرارتی
ϵ_m	نفوذ گردابی جرمی
ϵ_M	نفوذ گردابی اندازه حرکت

ϵ_w	ضریب گسیل
ζ	متغیر تشابه
ζ	تابع چرخش
η	چگالی نقاط تماس
η	متغیر تشابه
η_d	بازده تهویه یا جابه‌جایی
θ	زاویه
θ	تابع دمای بدون بعد
θ	زمان بدون بعد
θ	ضخامت اندازه حرکت
θ	پروفیل دمای تشابهی
θ	اختلاف دما
κ	ثابت فن کارمن
λ	ضریب لاگرانژ
λ	طول موج
λ_B	طول موج کماتش
$\lambda_{1,2}$	توابع ارتفاع
μ	لزجت
μ_f	ضریب اصطکاک
ν	لزجت سینماتیک
ρ	چگالی
σ	نسبت ظرفیت
σ	سرعت رشد آشفستگی
σ	ثابت تجربی
σ	تنش قائم
σ	کشش سطحی
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	ثابت‌ها
τ	زاویه انحراف
τ	تنش برشی
τ^*	زمان بدون بعد

τ_{app}	تنش برشی آشکار
$\tau_{0,max}$	تنش برشی بیشینه تحت اثر مستقیم یک نقطه ثابت لزج
φ	زاویه
φ	تابع پروفیل دمای کاملاً توسعه یافته
φ	تابع
φ	تخلخل
φ	نسبت حجمی
φ_r	نسبت
Φ	نسبت جرمی
Φ	تابع استهلاک لزجی
χ	ضریب
ψ	تابع جریان
ω	پارامتر دیواره

پائین نویسه‌ها

$(\cdot)_a$	هوا
$(\cdot)_{app}$	آشکار
$(\cdot)_{av}$	متوسط
$(\cdot)_{avg}$	متوسط
$(\cdot)_b$	حل پایه
$(\cdot)_b$	حجمی
$(\cdot)_c$	سرد
$(\cdot)_c$	یکنواخت، ثابت
$(\cdot)_c$	جابه‌جایی
$(\cdot)_c$	متغیرهای بدون بعد برای حل هسته کم عمق
$(\cdot)_c$	خواص در جایی که شرط دیواره بر مدل $k - \epsilon$ اعمال شده است
$(\cdot)_c$	خاصیت اندازه‌گیری شده در طول خط مرکزی جریان
$(\cdot)_{cv}$	خاصیت حجم معیار
$(\cdot)_{CLS}$	زیرلایه هدایتی
$(\cdot)_e$	پایانی

$(\cdot)_e$	عباراتی برای تحلیل انتگرالی ناحیه پایانی
$(\cdot)_f$	نهایی
$(\cdot)_f$	سیال
$(\cdot)_f$	مایع اشباع
$(\cdot)_{FC}$	جابه‌جایی اجباری
$(\cdot)_g$	بخار اشباع
$(\cdot)_h$	داغ
$(\cdot)_{HT}$	انتقال حرارت
$(\cdot)_i$	جزء i ام
$(\cdot)_i$	درونی
$(\cdot)_{in}$	ورودی
$(\cdot)_l$	مایع
$(\cdot)_m$	میانگین
$(\cdot)_{max}$	بیشینه
$(\cdot)_{min}$	کمینه
$(\cdot)_{MT}$	انتقال جرم
$(\cdot)_{NT}$	جابه‌جایی طبیعی
$(\cdot)_o$	بیرونی
$(\cdot)_{opt}$	بهینه
$(\cdot)_p$	روزنه
$(\cdot)_{rad}$	تابش
$(\cdot)_{ref}$	مرجع
$(\cdot)_{r,\theta,z}$	مولفه‌های یک بردار در مختصات استوانه‌ای
$(\cdot)_{r,\varphi,\theta}$	مولفه‌های یک بردار در مختصات کروی
$(\cdot)_s$	جامد
$(\cdot)_{sat}$	اشباع
$(\cdot)_{tr}$	انتقالی
$(\cdot)_v$	بخار
$(\cdot)_{VSL}$	زیرلایه لزج
$(\cdot)_w$	دیواره

$(.)_w$	آب
$(.)_0$	دیواره
$(.)_{0-L}$	مقدار متوسط از $x = 0$ تا $x = L$
$(.)_*$	متغیرهای بدون بعد برای حل با عدد ریلی بالا
$(.)_\infty$	خاصیت سیال آزاد

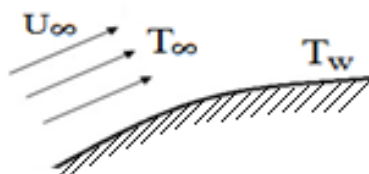
بالانویسه‌ها

$\overline{(.)}$	میانگین
$\overline{(.)}$	قسمت میانگین زمانی
$(.)'$	قسمت نوسانی
$(.)^+$	مختصات و متغیرهای دیواره

مقدمه

۱-۰- انتقال حرارت جابه‌جایی

انتقال حرارت جابه‌جایی یکی از سه روش انتقال حرارت است [1-4] که عبارت است از انتقال حرارت از محیط گرمتر به محیط سردتر در اثر حرکت ماکروسکوپی یک سیال. اگرچه ممکن است هر دو محیط سیال باشند، اما در اکثر کاربردهای عملی یکی از دو محیط یک سطح جامد و محیط دوم یک سیال است که بر روی آن سطح جامد جریان دارد و به علت اختلاف دما بین سطح و سیال، بین این دو تبادل حرارت وجود دارد. این حالت در شکل ۱-۰ نمایش داده شده است.

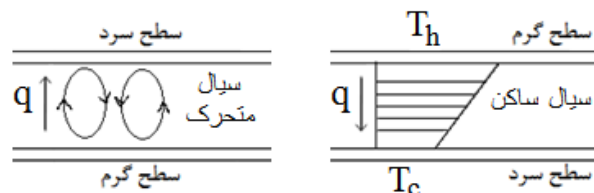


شکل ۱-۰- انتقال حرارت جابه‌جایی بر روی یک سطح

حالت دیگر آن است که هر دو محیط گرم و سرد جامد باشند و سیالی متحرک، واسطه انتقال حرارت از یک جسم به جسم دیگر باشد. این حالت در شکل ۲-۰ (سمت چپ) نشان داده شده است. همچنین ممکن است هر دو محیط سیال باشند، مثل هوایی که بر روی سطح آب دریا جریان دارد. حتی ممکن است هر دو محیط از یک نوع سیال تشکیل شده باشند، مثل تبادل حرارتی بین لایه‌های مختلف جریان آب در اقیانوس‌ها و یا جریان هوا در جو زمین. پس برای ایجاد جابه‌جایی سه چیز لازم است: محیط سردتر، محیط گرم‌تر و یک سیال متحرک. این

سیال ممکن است یکی از این دو محیط (شکل ۱-۰) و یا جدای از آنها (شکل ۲-۰) باشد، اما در هر صورت وجود سیال در حال حرکت برای جابه‌جایی ضروری است. مثال‌هایی از جابه‌جایی عبارتند از: خنک شدن بدن، خنک شدن فنجان چای، گرمایش یا سرمایش هوا توسط فن-کوئل، خنک‌کاری موتور خودرو و خنک‌کاری قطعات الکترونیکی.

از بین سه روش انتقال حرارت، هدایت و جابه‌جایی بر خلاف تابش نیاز به محیط مادی دارند. اما تفاوت این دو آن است که در جابه‌جایی، انتقال حرارت توسط یک سیال متحرک انجام می‌شود. در مواد جامد، انتقال حرارت فقط از طریق هدایت ممکن است. ولی در سیالات به علت آزاد بودن مولکول‌ها ممکن است هم هدایت و هم جابه‌جایی موجود باشند. اگر حین انتقال حرارت سیال حرکت کند، جابه‌جایی وجود دارد و در غیر این صورت هدایت است. در شکل ۲-۰ اگر سیال محبوس بین دو سطح، ساکن باشد (سمت راست)، انتقال حرارت هدایتی است. یعنی یک گرادیان دما در امتداد عمود بر صفحات در سیال ایجاد می‌شود و حرارت از سطح گرم به سطح سرد منتقل می‌شود. اما اگر طبق شکل سمت چپ در سیال جریان‌های حلقوی ایجاد شود و توده‌های سیال بین دو سطح حرکت کنند، جابه‌جایی وجود دارد.



شکل ۲-۰- هدایت و جابه‌جایی با سکون و حرکت سیال

جابه‌جایی حرارت توسط سیال، میزان انتقال حرارت را به شدت افزایش می‌دهد و هرچه سرعت حرکت سیال بیشتر شود، انتقال حرارت بیشتر می‌شود. علت آن است که با دور شدن توده سیال گرم از روی سطح گرم، سیال سرد جایگزین آن می‌شود و به علت اختلاف دمای بیشتر بین سطح و سیال، انتقال حرارت بیشتری صورت می‌پذیرد. جسم داغی را در نظر بگیرید که در هوای آزاد قرار گرفته است و انتقال حرارت از جسم به هوا با شدت کم وجود دارد. چنان‌که یک پنکه در مقابل جسم قرار گیرد، سرعت انتقال حرارت بیشتر می‌شود و با افزایش سرعت پنکه باز بر میزان انتقال حرارت افزوده می‌گردد. چنان‌که این جسم به جای هوا در آب قرار گیرد، انتقال حرارت به شدت افزایش می‌یابد.

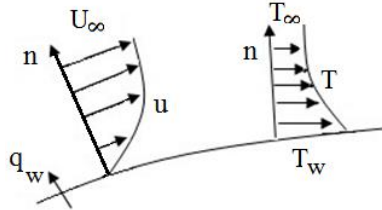
در بسیاری از موارد هر سه روش انتقال حرارت با هم وجود دارند، ولی به‌طور معمول یکی یا دو تا دارای اهمیت بیشتر هستند و نقش اصلی را در انتقال حرارت ایفا می‌کنند. به‌عنوان مثال در یک میله آهنی گداخته که در هوا قرار گرفته جابه‌جائی و تابش هر دو دارای اهمیت هستند و در مورد انتقال حرارت از آب گرم جاری در داخل یک لوله به هوای خارج لوله از طریق پره-های روی لوله، جابه‌جائی و هدایت، هر دو مهم هستند. در بعضی از موارد مانند مثال اول، می‌توان مقدار انتقال حرارت از هر یک از روش‌ها را به‌طور جداگانه محاسبه کرد و مقادیر به‌دست آمده را با هم جمع کرد. در بعضی دیگر از موارد مانند مثال دوم، به علت تاثیر دو روش انتقال حرارت بر یکدیگر، محاسبه جداگانه این دو امکان‌پذیر نیست و به‌طور هم‌زمان هر دو روش را باید در نظر گرفت.

چون جابه‌جائی به حرکت سیال بستگی دارد، بسیار پیچیده است و نیازمند تلفیق مکانیک سیالات و ترمودینامیک است. میزان انتقال حرارت جابه‌جائی به عوامل گوناگونی چون سرعت حرکت سیال، لزجت سیال، ضریب هدایت سیال، چگالی سیال و گرمای ویژه سیال بستگی دارد. علاوه بر آن به شکل هندسی سطح جامد و زبری آن نیز وابسته است. پس روابط جابه‌جائی باید پیچیده و تابع عوامل بسیار زیادی باشند. اما می‌دانیم که جابه‌جائی از یک معادله ساده تبعیت می‌کند که همان قانون سرمایش نیوتن است:

$$q = hA(T_w - T_{\infty})$$

توجه این تناقض ظاهری در این است که ضریب جابه‌جائی h تابع عوامل مختلف بوده و بر اساس روابط پیچیده‌ای باید محاسبه شود.

از آنجائی که در اکثر مسائل جابه‌جائی یک سطح جامد در کنار یک سیال وجود دارد، جریان سیال بر روی سطوح گوناگون باید مورد مطالعه دقیق قرار گیرد و چون هنگام عبور یک سیال لزج از روی یک سطح، لایه مرزی تشکیل می‌شود، مطالعه لایه مرزی ضروری است. تغییرات سرعت و دمای سیال در لایه‌های مرزی موجود بر روی یک سطح جامد در شکل ۰-۳ نشان داده شده است. مکانیزم جابه‌جائی بر روی سطح به این‌صورت است که ابتدا انرژی حرارتی در مقیاس مولکولی و میکروسکوپی از سطح به سیال منتقل می‌شود. سپس در اثر حرکت سیال و مخلوط شدن در مقیاس بزرگ و ماکروسکوپی حرارت به سایر قسمت‌های سیال منتقل می‌شود. بنابراین در مجاورت سطح هدایت وجود دارد و حرارت از سطح به مولکول‌های سیال که با سطح در تماس هستند، منتقل می‌شود.



شکل ۳-۰- تغییرات سرعت و دمای سیال در مجاورت یک سطح جامد

از آن جایی که قانون فوریه بر هدایت حاکم است، می‌توان نوشت: $q_w = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0}$ که در آن n امتداد عمود بر سطح و k ضریب هدایت سیال است. در کمی دورتر از سطح، مکانیزم انتقال حرارت از نوع جابه‌جائی است. پس می‌توان از قانون سرمایش نیوتن استفاده کرد و نوشت: $q = hA(T_w - T_\infty)$ که در آن h ضریب جابه‌جائی است. به عبارت دیگر هنگامی که یک سیال لزج از روی یک سطح عبور می‌کند، لایه‌ای از سیال که در مجاورت سطح جسم قرار دارد به سطح چسبیده و حرکت نمی‌کند. پس می‌توان گفت بین سطح و این لایه از سیال تنها هدایت وجود دارد و داریم:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

در این رابطه T توزیع دما در سیال و $[\partial T / \partial y]_{y=0}$ گرادیان دمای سیال بر روی سطح و در امتداد عمود بر سطح (y) است. چون حرارت منتقل شده از طریق هدایت در لایه‌های بعدی سیال توسط جابه‌جائی منتقل می‌شود، داریم:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = hA(T_w - T_\infty)$$

$$h = \frac{-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{T_w - T_\infty}$$

بنابراین برای محاسبه h باید توزیع دمای سیال در جهت عمود بر سطح جسم مشخص باشد. اما توزیع دما تابع توزیع سرعت است و توزیع سرعت تابع نوع جریان، نوع سیال، هندسه سطح و غیره است. پس لازم است ابتدا معادلات جریان سیال به‌دست آورده شود و بعد با ادغام معادلات انرژی و اندازه حرکت، معادله توزیع دما و بعد ضریب جابه‌جائی به‌دست آید.