

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

press.um.ac.ir



انتشارات
۱۴۵

انتقال حرارت: اصول و کاربرد

جلد اول - ویرایش سوم

چاپ دهم

دکتر محمد خشنودی

استاد فقیه دانشگاه سیستان و بلوچستان

دکتر سید حسین نوعی

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

سرشناسه:	خشنودی، محمد، ۱۳۲۹ - ۱۳۸۶.
عنوان و نام پدیدآور:	انتقال حرارت: اصول و کاربرد / تألیف محمد خشنودی؛ سید حسین نوعی.
وضعیت ویراست:	ویراست ۳.
مشخصات نشر:	مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری:	ج. ۱: ۷۰۰ ص، مصور، نمودار.
فروست:	انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۱۴۵.
شابک:	ISBN: 978-964-6335-92-9 (جلد اول)
وضعیت فهرست نویسی:	فیبا.
یادداشت:	عنوان به انگلیسی
یادداشت:	ویراست قبلی: دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۱۳۸۰.
یادداشت:	کتابنامه.
موضوع:	گرما - انتقال.
شناسه افزوده:	نوعی باغبان، حسین، ۱۳۲۹ - .
شناسه افزوده:	دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده بندی کنگره:	۱۳۹۴ الف ۸ ن ۹ / QC ۳۲۰
رده بندی دیویی:	۵۳۶/۲
شماره کتابشناسی ملی:	۴۱۹۵۹۲۹

انتقال حرارت: اصول و کاربرد (جلد اول)

پدیدآورندگان: دکتر محمد خشنودی؛ دکتر سید حسین نوعی
مشخصات: وزیری، ۳۰۰ نسخه، چاپ دهم، پاییز ۱۴۰۰ (اول، ۱۳۸۰)
چاپ و صحافی: چاپخانه دقت
بها: ۱/۱۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.



انتشارات
۱۴۵

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶ - ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)
مؤسسه کتابیران: تهران، خیابان کارگر جنوبی، خیابان لبافی نژاد، بین خیابان فروردین و اردیبهشت،
شماره ۲۳۸، تلفن: ۶۶۴۹۴۴۰۹ - ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسسه دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شماره ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ - ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

<http://press.um.ac.ir>

Email: press@um.ac.ir

تقدیم به:

آزادگان، این قهرمانان صبر و پایداری
بویژه دانشجویان عزیز آزاده

محمد خشنودی، سید حسین نوعی

press.um.ac.ir

پیشگفتار چاپ اول پانزده

پیشگفتار چاپ پنجم، ویرایش دوم هفده

پیشگفتار چاپ نهم، ویرایش سوم نوزده

فصل اول - مقدمه و تعاریف 2

1-1 انرژی حرارتی و انتقال حرارت 3

2-1 هدایت 5

1-2-1 ضریب هدایت حرارتی، k 7

2-2-1 ضریب نفوذ حرارتی، α 12

3-1 جابه‌جایی 14

1-3-1 ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، h 16

2-3-1 جابه‌جایی اجباری 16

3-3-1 جابه‌جایی آزاد یا طبیعی 16

4-3-1 انتقال حرارت با تغییر فاز 17

4-1 تابش 20

1-4-1 تبادل تابش حرارتی 21

5-1 تشابه الکتریکی 22

6-1 دستگاه‌های آحاد 23

مسائل 27

فصل دوم - معادلات اساسی هدایت 32

2-1 بررسی هدایت حرارتی 33

2-2 مقدمه‌ای بر پدیده‌های انتقال 35

1-2-2 قانون فوریه در مورد هدایت حرارتی 35

2-2-2 قانون فیک در مورد انتقال جرم 36

3-2-2 قانون نیوتن در مورد گرانش سیالات 38

- 39 4-2-2 قانون اهم در مورد جریان الکتریکی
- 40 5-2-2 قانون کلی انتقال
- 41 3-2 معادلات اساسی هدایت حرارتی
- 42 1-3-2 معادله‌ی کلی هدایت حرارتی یک بعدی - تیغه‌ای
- 43 2-3-2 معادله‌ی کلی هدایت حرارتی یک بعدی - استوانه‌ای
- 44 3-3-2 معادله‌ی کلی هدایت حرارتی یک بعدی - کروی
- 46 4-3-2 معادلات کلی هدایت حرارتی سه بعدی
- 48 5-3-2 دسته‌بندی معادلات انتقال حرارت هدایتی
- 49 4-2 فرمول بندی انتقال حرارت
- 49 1-4-2 مقدمه
- 50 2-4-2 روش فرمول بندی
- 50 3-4-2 پنج مرحله فرمول بندی
- 52 5-2 شرایط مرزی و اولیه

55 مسایل

64 فصل سوم - هدایت پایدار و یک بعدی

- 65 1-3 مقدمه
- 66 2-3 هدایت در دیواره‌ها
- 66 1-2-3 دیواره‌ی ساده
- 67 2-2-3 دیواره‌های مرکب
- 70 3-2-3 اثر جابه‌جایی بر دیواره ساده
- 72 4-2-3 دیواره با k متغیر
- 76 3-3 هدایت در سیستم‌های استوانه‌ای
- 76 1-3-3 استوانه‌ی ساده‌ی توخالی
- 79 2-3-3 دیواره‌های مرکب استوانه‌ای
- 82 3-3-3 اثر جابه‌جایی بر استوانه‌ی ساده
- 83 3-3-3 ضخامت بحرانی غایق پیچی لوله‌ها
- 88 4-3 هدایت در سیستم‌های کروی

88	1-4-3 پوسته‌ی کروی
90	2-4-3 پوسته‌های مرکب کروی
91	3-4-3 اثر جابه‌جایی بر کره ساده
94	5-3 سیستم های هدایتی با چشمه‌ی حرارتی
95	1-5-3 دیواره با چشمه‌ی حرارتی ثابت
103	2-5-3 استوانه‌ی با چشمه‌ی حرارتی ثابت
109	4-5-3 چشمه‌ی حرارتی با شدت متغیر
115	6-3 پره‌ها، سطوح ادامه یافته
117	1-6-3 معادله‌ی دیفرانسیل عمومی برای سطوح ادامه یافته
129	3-6-3 نمودار محاسبات پره
137	4-6-3 پره با سطح مقطع متغیر
145	5-6-3 پره‌های ویژه
151	7-3 مقاومت حرارتی سطح تماس

مسایل 155

فصل چهارم – هدایت پایدار، دو و سه بعدی 182

183	1-4 مقدمه
184	2-4 بررسی ریاضی هدایت دوبعدی
186	1-2-4 حالت کلی
193	2-2-4 کاربرد اصل انطباق
195	3-2-4 هدایت حرارتی سه بعدی
196	3-4 روش حل عددی
197	1-3-4 حل عددی هدایت حرارتی دوبعدی
211	2-3-4 حل عددی دستگاه معادلات (اختلاف محدود)
221	3-3-4 حل عددی هدایت یک بعدی
223	4-3-4 حل عددی پره
224	5-3-4 حل عددی هدایت سه بعدی
226	4-4 روش‌های کاربردی

- 226..... 1-4-4 تشابه الکتریکی
- 227..... 2-4-4 روش ترسیمی
- 229..... 3-4-4 ضریب شکل هدایتی
- 238..... 5-4 حل چند مثال هدایت دو بعدی توسط برنامه مطلب
- 245.....

مسایل

- 260 **فصل پنجم - هدایت ناپایدار**
- 261..... 1-5 مقدمه
- 262..... 2-5 هدایت ناپایدار یک بعدی در دیواره
- 264..... 1-2-5 حالت کلی بدون اثر جابه جایی
- 271..... 2-2-5 حالت کلی با اثر جابه جایی
- 278..... 3-5 هدایت ناپایدار یک بعدی در سیستم استوانه ای
- 280..... 4-5 هدایت ناپایدار یک بعدی در سیستم کروی
- 293..... 5-5 هدایت ناپایدار در جسم نیمه محدود
- 294..... 1-5-5 دمای ثابت در سطح
- 300..... 2-5-5 شار حرارتی ثابت در سطح
- 300..... 3-5-5 جابه جایی سطحی
- 303..... 6-5 هدایت ناپایدار در سیستم های چندبعدی
- 315..... 7-5 سیستم با ظرفیت حرارتی یک تکه
- 316..... 1-7-5 حالت (1) با اثر جابه جایی
- 325..... 2-7-5 حالت (2) بدون اثر جابه جایی
- 329..... 8-5 هدایت ناپایدار نوسانی یا تناوبی
- 329..... 1-8-5 جسم یک تکه
- 330..... 2-8-5 جسم نیمه محدود
- 334.....

مسایل

- 346 **فصل ششم - انتقال حرارت به روش جابه جایی**
- 347..... 1-6 مقدمه
- 348..... 2-6 ضریب انتقال حرارت جابه جایی

351.....	3-6 تجزیه و تحلیل ابعادی
354.....	1-3-6 جریان‌های داخلی
355.....	2-3-6 جریان‌های خارجی
356.....	3-3-6 جابه‌جایی آزاد
356.....	4-6 اعداد بدون بُعد
357.....	1-4-6 عدد رینولدز
357.....	2-4-6 عدد گراشف
358.....	3-4-6 عدد پراتل
358.....	4-4-6 عدد اشمیت
358.....	5-4-6 عدد لوئیس
358.....	6-4-6 عدد ناسلت
359.....	7-4-6 عدد استانتون
359.....	8-4-6 عدد شروود
359.....	9-4-6 عدد اِکرت
360.....	5-6 خواص فیزیکی
360.....	1-5-6 گرانروی مطلق
360.....	2-5-6 گرانروی سینماتیکی
361.....	3-5-6 کشش سطحی
361.....	4-5-6 ضریب انبساط حجمی
361.....	5-5-6 ضریب تراکم‌پذیری
362.....	6-6 معادلات حرکت
362.....	1-6-6 معادله‌ی پیوستگی
363.....	2-6-6 معادلات مقدار حرکت
367.....	7-6 معادله انرژی
372.....	8-6 معادلات لایه‌ی مرزی
373.....	9-6 مفهوم جریان آشفته
377.....	1-9-6 مفهوم طول آمیختگی
380.....	مسایل

فصل هفتم - جابه‌جایی اجباری از روی اجسام 384

- 385 1-7 مقدمه
- 385 2-7 ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی صفحه‌ی تخت با دمای دیواره ثابت
- 386 1-2-7 فلزات مایع در جریان آرام
- 390 2-2-7 سیالات معمولی در جریان آرام
- 395 3-7 ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی صفحه‌ی تخت با شار حرارتی ثابت
- 396 4-7 تشابه رینولدز - کلمن
- 397 5-7 ضریب جابه‌جایی جریان آشفته روی صفحه‌ی تخت با دمای دیواره‌ی ثابت
- 6-7 ضریب جابه‌جایی جریان آرام و آشفته روی صفحه‌ی تخت با دمای دیواره ثابت
- 399 7-7 ضریب جابه‌جایی جریان آشفته روی صفحه‌ی تخت با شار حرارتی ثابت
- 402 8-7 جریان سیال از روی یک استوانه‌ی گرد
- 404 1-8-7 ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
- 408 9-7 جابه‌جایی اجباری روی کره
- 411 10-7 جریان عمود بر دسته لوله‌ها
- 422 436

مسایل**فصل هشتم - جابه‌جایی اجباری درون لوله‌ها و مجراها 448**

- 449 1-8 مقدمه
- 450 2-8 اثر عدد رینولدز در انتقال حرارت
- 453 3-8 اثر عدد پراتل
- 453 4-8 اثر ورود جریان
- 456 5-8 جابه‌جایی اجباری آرام درون یک لوله‌ی بلند
- 460 1-5-8 شار حرارتی ثابت
- 463 2-5-8 دمای سطح ثابت
- 468 6-8 جابه‌جایی اجباری آشفته در درون لوله
- 469 7-8 روابط تجربی جابه‌جایی اجباری در درون لوله‌ها
- 479 8-8 روابط جابه‌جایی اجباری در مجاری غیرگرد

مسایل 485

فصل نهم - جابه‌جایی آزاد یا طبیعی 496

9-1 مقدمه 497

9-2 اعداد بدون بعد جابه‌جایی آزاد 499

9-3 بررسی تقریبی جابه‌جایی آزاد آرام روی سطح عمودی 503

9-4 بعد مشخصه اعداد گراشف و ناسلت برای اشکال مختلف 515

9-5 روابط تجربی جابه‌جایی آزاد 516

9-5-1 جابه‌جایی آزاد روی سطح عمودی 516

9-5-2 جابه‌جایی آزاد روی یک سطح افقی 523

9-5-3 جابه‌جایی آزاد روی سطح شیب‌دار 525

9-5-4 جابه‌جایی آزاد روی استوانه‌ی بلند 527

9-5-5 جابه‌جایی آزاد روی کره‌ها و اجسام 530

9-6 روابط ساده شده‌ی جابه‌جایی آزاد برای هوا 533

9-7 جابه‌جایی آزاد روی ردیف پره‌ها 535

9-8 سازوکار جابه‌جایی آزاد در فضاهاى بسته 539

9-9 روابط تجربی جابه‌جایی آزاد در فضاهاى بسته 541

9-10 ترکیب جابه‌جایی آزاد و اجباری 545

مسائل 554**فهرست منابع** 572**پیوست‌ها****پیوست الف - خلاصه‌ای از ریاضیات مورد نیاز**

الف - 1 معادلات دیفرانسیل 575

الف - 2 توابع بسل 579

جدول (الف - 1) مقدار توابع بسل را نوع اول و دوم از درجه صفر و یک 582

جدول (الف - 2) مقدار توابع اصلاح شده بسل از نوع اول و دوم از درجه صفر و

یک 583

شکل (الف - 1) نمودارهای توابع بسل 585

586.....	الف - 3 معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی
590.....	الف - 4 آنالیز فوریه و بسط توابع
592.....	الف - 5 توابع هذلولی
595.....	جدول (الف - 3) توابع هذلولی
599.....	الف - 6 نحوه به دست آوردن معادله ی انتگرالی مقدار حرکت و انرژی
601.....	جدول (الف - 4) بازده پره های طولی و سوزنی
622.....	جدول (الف - 5) ریشه های معادله $\beta \tan \beta = c$
624.....	جدول (الف - 6) مقادیر تابع خطا $\text{erf}(z)$
627.....	جدول (الف - 7) ضریب های تبدیل و مقادیر ثابت

پیوست ب - خواص حرارتی..... 616

617.....	جدول (ب - 1) خواص حرارتی فلزات
621.....	جدول (ب - 2) خواص حرارتی غیر فلزات
625.....	جدول (ب - 3) خواص حرارتی مایعات
627.....	جدول (ب - 4) خواص حرارتی مایعات اشباع
634.....	جدول (ب - 5) خواص حرارتی آب (مایع اشباع)
636.....	جدول (ب - 6) خواص حرارتی هوا در فشار جو
638.....	جدول (ب - 7) خواص حرارتی گازها در فشار جو
644.....	جدول (ب - 8) خواص حرارتی برخی فلزات مذاب با نقطه ذوب پایین

پیوست ج - فهرست حروف و نشانه ها..... 640

پیوست د - رابطه و شرح اعداد بدون بُعد..... 650

پیشگفتار چاپ اول

تألیف حاضر که در دو جلد منتشر شده است، مجموعه‌ای از یادداشت‌های مؤلفین به هنگام تدریس «انتقال حرارت» در دانشگاه‌های «سیستان و بلوچستان» و «فردوسی مشهد» می‌باشد. قسمت‌هایی از این کتاب در سال ۱۳۵۹ توسط انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان به صورت جزوه درسی انتشار یافت و در این مدت چندین بار تجدید نظر و تکثیر گردید.

استقبال دانشجویان و تشویق همکاران باعث شد که تجدید نظر کاملی در کتاب به عمل آمده و فصل‌های ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ توسط نویسنده‌ی دیگر بدان افزوده شده و به صورت مجموعه کامل‌تری تألیف و ارایه گردد. هدف از چاپ این کتاب ارایه یک مجموعه‌ی مناسب جهت تدریس «انتقال حرارت ۱ و ۲» و کاربردی در رشته‌های مهندسی شیمی و مهندسی مکانیک می‌باشد. هم‌چنین می‌تواند مورد استفاده دانشجویان دوره‌های کارشناسی ارشد، اساتید محترم و متخصصین صنایع نیز قرار گیرد.

در تهیه این کتاب بیش از بیست مرجع مهم و شناخته شده درسی «انتقال حرارت» که در دانشگاه‌ها تدریس می‌شود مورد استفاده قرار گرفته است. در زمینه هر موضوع از چند مرجع مربوط بهره‌برداری شده و مسایل تیپ، نکته‌دار به همراه توضیحات انتخاب و ارایه شده است. در پایان هر فصل تعدادی مسایل حل نشده جالب به همراه پاسخ آن‌ها جهت تمرین دانشجویان آورده شده است. فهرست کتاب‌های مورد استفاده در پایان کتاب آورده شده است.

از آن‌جا که بیش‌تر فصل‌های کتاب با مباحث ریاضی سر و کار دارد لازم است دانشجویان اطلاعات کافی در زمینه ریاضیات دانشگاهی به ویژه معادلات دیفرانسیل داشته باشند.

پیشنهاد می‌شود که دروس ریاضیات پیشرفته مهندسی و آنالیز عددی را نیز گذرانده و یا به صورت همزمان با انتقال حرارت انتخاب نمایند. با وجود این خلاصه‌ای از ریاضیات مورد نیاز گردآوری و در پیوست (الف) کتاب ارایه شده است.

امید است این کتاب مورد استفاده درست دانشجویان و دانش پژوهان قرار گیرد. نویسندگان از دریافت هر گونه پیشنهاد و ذکر کمبود و نواقص، بسیار سپاسگزار خواهند شد.

مؤلفین

محمد خشنودی - سید حسین نوعی