



دانشگاه فردوسی مشهد

انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، شماره ۱۴۵

انتقال حرارت

اصول و کاربرد
(جلد اول)

ویرایش سوم، چاپ نهم

تألیف:

دکتر سید حسین نوعی

استاد گروه مهندسی شیمی
دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر محمد خسنودی

استاد گروه مهندسی شیمی
دانشگاه سیستان و بلوچستان

خشنودی، محمد، ۱۳۲۷ -

انتقال حرارت: اصول و کاربرد / تألیف محمد خشنودی؛ سید حسین نوعی. - [ویرایش ۲]. -

مشهد: دانشگاه فردوسی (مشهد)، ۱۳۸۰.

ج: مصور، نمودار. - (انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۱۴۵)

۲۷۰۰۰ ریال

فهرست نویسی براساس اطلاعات فیبا.

ص.ع. به انگلیسی:

M. Khoshnoodi, S. H.

Noie. Heat transfer: Principles and Applications.

در چاپ اول جلد دوم این کتاب سید حسین نوعی به عنوان نویسنده اول ذکر گردیده است.
کتابنامه:

، ب. دانشگاه فردوسی (مشهد).

۱. گرما - انتقال. الف. نوعی باغیان، حسین، ۱۳۲۹ -

ج. عنوان.

۵۳۶/۲

QC ۳۲۰ / ن ۹

۱۳۸۰

م ۸۰-۱۱۷۴۴

کتابخانه ملی ایران



انتشارات، شماره ۱۴۵

انتقال حرارت: اصول و کاربرد (جلد اول)

تألیف

دکتر محمد خشنودی - دکتر سید حسین نوعی

وزیری، ۷۰۰ صفحه، ۱۰۰۰ نسخه، چاپ نهم، ویرایش سوم، تابستان ۱۳۹۴

امور فنی و چاپ: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

بها: ۳۰۰۰۰۰ ریال

ISBN: 964-6335-92-6

شابک ۹۶۴-۶۳۳۵-۹۲-۶

تقدیم به:

آزادگان، این قهرمانان صبر و پایداری
بویژه دانشجویان عزیز آزاده

محمد خشنودی، سید حسین نوعی

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 گرانروی 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 سیستم‌های 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

155 مسایل

182	فصل چهارم - هدایت پایدار، دو و سه بعدی
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 چند بعدی
- 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 پرانتل
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 - کلبرن
- 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
- 485 485

مسایل

496	فصل نهم - جابه‌جایی آزاد یا طبیعی
497	1-9 مقدمه
499	2-9 اعداد بدون بعد جابه‌جایی آزاد
503	3-9 بررسی تقریبی جابه‌جایی آزاد آرام روی سطح عمودی
515	4-9 بعد مشخصه اعداد گراشف و ناسلت برای اشکال مختلف
516	5-9 روابط تجربی جابه‌جایی آزاد
516	1-5-9 جابه‌جایی آزاد روی سطح عمودی
523	2-5-9 جابه‌جایی آزاد روی یک سطح افقی
525	3-5-9 جابه‌جایی آزاد روی سطح شیب‌دار
527	4-5-9 جابه‌جایی آزاد روی استوانه‌ی بلند
530	5-5-9 جابه‌جایی آزاد روی کره‌ها و اجسام
533	6-9 روابط ساده شده‌ی جابه‌جایی آزاد برای هوا
535	7-9 جابه‌جایی آزاد روی ردیف پره‌ها
539	8-9 سازوکار جابه‌جایی آزاد در فضاها ی بسته
541	9-9 روابط تجربی جابه‌جایی آزاد در فضاها ی بسته
545	10-9 ترکیب جابه‌جایی آزاد و اجباری
554	مسائل

572	فهرست منابع
-----	-------------------

.....	پیوست‌ها
-------	----------------

پیوست الف - خلاصه‌ای از ریاضیات مورد نیاز

575	الف - 1 معادلات دیفرانسیل
579	الف - 2 توابع بسل
582	جدول (الف - 1) مقدار توابع بسل را نوع اول و دوم از درجه صفر و یک
	جدول (الف - 2) مقدار توابع اصلاح شده بسل از نوع اول و دوم از درجه صفر و
583	یک
585	شکل (الف - 1) نمودارهای توابع بسل

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

616.....	پیوست ب - خواص حرارتی
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

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

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

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 هرگونه پیشنهاد و ذکر کمبود و نواقص، بسیار سپاسگزار خواهند شد.

مؤلفین

محمد خشنودی - سید حسین نوعی

پیشگفتار چاپ پنجم، ویرایش دوم

حمد و سپاس خداوند منان را که توفیق داد تا چاپ پنجم و ویرایش دوم کتاب انتقال حرارت (اصول و کاربرد) را برای دانشجویان رشته‌های مهندسی و علاقمندان به این دانش تقدیم داریم.

در این ویرایش بیش‌تر سعی شده تا اشکالات تایی قبلی رفع و هم‌چنین با آوردن برنامه کامپیوتری جدید در حل عددی معادلات هدایت دو بُعدی تنوع مناسبی ایجاد شده است. در ویرایش جدید نویسنده اول ضمن وارد نمودن مبحث کوره‌ها در فصل یازده، با تکمیل فصل سیزده و با افزودن دو فصل جدید (چهارده و پانزده) سعی نموده مبحث مبادله‌کن‌های حرارتی نسبت به ویرایش قبلی تکمیل‌تر و کامل‌تر نماید. در پایان لازم است از خانم عفت گمرکی طهران که در حروف‌چینی و صفحه‌آرایی زحمات بی‌شائبه‌ای را متحمل شده‌اند تشکر و قدردانی نمایم.

مؤلفین

محمد خشنودی - سید حسین نوعی

پیشگفتار چاپ نهم، ویرایش سوّم

مکاتب الهی و در رأس آنها، اسلام انسان ساز، انسان را موجودی پویا و کمال طلب می-داند. از نظر اسلام، انسان در حال تکامل و جهت گیری او به سوی خدای تبارک و تعالی است. یکی از راههای تقرب به ذات اقدسش، علم است. علمی که (به تعبیر استاد شهید مرتضی مطهری) زیبایی عقل است. علمی که انسان خداپرست در ذره ذره اش نشانی از آفریدگار می یابد و هرچه علمش افزون گردد، تقربش به خدای تعالی بیش تر می شود. اما علم و علم آموزی محتاج ابزار است که مهم ترین آنها کتاب است، کتاب دریچه ای به سوی علم است.

حمد و ستایش ایزد منان را که کتاب انتقال حرارت-اصول و کاربرد، جلد اول، به چاپ نهم خود رسید. هم چنین خرسندیم مجموعه ی دو جلدی کتاب "انتقال حرارت، اصول و کاربرد" پس از تجدید نظر چند باره و سه مرحله ویرایش، اکنون به یک کتاب دانشگاهی در میان حجم انبوه کتب انتقال حرارت جایگاه خاص خو را کسب کرده و مورد استقبال اهل دانش و دانشجویان گرامی قرار گرفته است، به گونه ای که چاپ های جدید مجموعه در مدت کمتر از دو سال تجدید چاپ می شود. از این بابت خدای منان را شاکر و سپاسگزاریم.

اما موضوعی که حلاوت و شیرینی این انتشار را به کام تلخ کرده، در گذشت استاد ارجمند و گرانمایه شادروان دکتر خشنودی استاد مهندسی شیمی دانشگاه سیستان و بلوچستان و مولف دیگر کتب است که غمی سنگین را برروح و روانمان مسنولی می نماید.

در این مقال و از این مجال بهره گرفته و به عنوان یک همکار و دوست دیرینه این حادثه غم بار را به تمامی همکاران محترم هیات علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان و دانشجویان گرامی ایشان و جامعه دانشگاهی و مخصوصاً به خانواده محترم آن استاد فقیه تسلیت و تعزیت عرض می نمایم.

در ویرایش سوّم، با مساعدت همکار محترم آقای دکتر سید مصطفی نوعی، عضو هیات گروه مهندسی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد، کتاب به صورت کلی مورد بازبینی قرار گرفته و نارسایی ها و نواقص قبلی برطرف گردیده است. تغییرات و تصحیحات صورت گرفته در ویرایش حاضر شامل:

- ۱- اشکال و جداول کاملاً جدید و به صورت رنگی از نو طراحی گردیده است.
 - ۲- متن مورد بازبینی قرار گرفته و تمامی اشکالات نوشتاری در حد ممکن تصحیح گردیده است.
 - ۳- مسایل انتهایی هر فصل بازنگری شده و مسایل جدید و به روز اضافه گردیده که می تواند درک عمیق تری از مباحث کتاب را برای دانشجویان عزیز فراهم آورد.
- در این جا بر خود لازم می دانیم از همکاری بی شایبه آقایان مهندس کریمی و مهندس معاصری و خانم مهندس بازوبندی، دانشجویان عزیز گروه مهندسی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد، تقدیر شایان و تشکر فراوان بنماییم. امید است نسخه جدید رضایت مشتاقان این عرصه را جلب نماید.
- در پایان فرصت را غنیمت شمرده از همه استادان، دانشجویان و صنعتگرایی که به نحوی در ارایه این اثر همکاری کرده اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نماییم. نویسندگان از دریافت هر گونه پیشنهاد و ذکر کمبود و نواقص، بسیار سپاسگزار خواهند شد.

مؤلفین

محمد خشنودی - سید حسین نوعی