

انتقال حرارت

j.P. Holman

مترجم: سهراب علی قربانیان



نشر دانشگاهی فرهمند

.....

نام کتاب: انتقال حرارت

تالیف: جی پی هولمن

مترجم: سهراب علی قربانیان

ویراستار و طراح جلد و متن: علیرضا فرهمند زادگان

شمارگان: ۱۰۰ نسخه

نوبت چاپ: دوم

سال چاپ: ۱۴۰۱

بها: ۳۷۰۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۲۱۵-۴۵-۷

.....

تهران، خیابان انقلاب، روبروی دانشگاه تهران، پاساژ فروزنده، طبقه اول، واحد ۴۱۹

تلفن: ۶۶۹۶۸۶۱۴ - ۶۶۴۱۰۶۸۸

کلیه حقوق برای نشر دانشگاهی فرهمند محفوظ می باشد

WWW.FARBOOK.IR

Email: farbook.pub@gmail.com

.....

سرشناسه	:	هولمن، جک فیلیپ (Holman, J. P. (Jack Philip)
عنوان و نام پدیدآور	:	انتقال حرارت / جک فیلیپ هولمن؛ مترجم سهراب علی قربانیان.
مشخصات نشر	:	تهران: نشر دانشگاهی فرهمند، ۱۳۹۳. مشخصات ظاهری
شابک	:	۹۷۸-۶۰۰-۶۲۱۵-۴۵-۷
یادداشت	:	عنوان اصلی: Heat transfer, c۱۰th ed., ۲۰۱۰. یادداشت
موضوع	:	گرما - انتقال
رده بندی کنگره	:	QC ۳۲۰ / ۵۹ الف ۸ ۱۳۹۲
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۳۰۳۹۵۱
	:	رده بندی دیویی
	:	۶۲۱/۴۰۲۲
	:	فیا
	:	۸۵۴ ص: مصور، جدول، نمودار.
	:	کتابنامه.
	:	قربانیان، سهراب علی، ۱۳۳۵ - مترجم

فهرست مطالب

فصل ۱

مقدمه

۱-۱	انتقال هدایتی حرارتی
۲-۱	قابلیت هدایت حرارتی
۳-۱	انتقال حرارت جابجایی
۴-۱	انتقال حرارت تشعشعی
۵-۱	ابعاد و آحاد
۶-۱	خلاصه
	سؤالات مروری

فصل ۲

هدایت حالت پایدار یک بعدی

۱-۲	مقدمه
۲-۲	جدارۀ مسطح
۳-۲	عایق و مقادیر مقاومت
۴-۲	سیستم‌های شعاعی

۵

۶

۱۱

۱۶

۲۰

۲۱

۲۹

۳۱

فصل ۳

هدایت حالت پایدار چند بعدی

۱-۳	مقدمه
۲-۳	تحلیل‌های ریاضی هدایت حرارت دو بعدی
۳-۳	تحلیل‌های ترسیمی
۴-۳	ضریب شکل هدایتی

۳۳

۳۳

۳۳

۳۵

۳۶

۵-۲	ضریب انتقال گرمای کل
۶-۲	ضخامت بحرانی عایق
۷-۲	سیستم‌های دارای منبع حرارتی
۸-۲	استوانه با منابع گرمایی
۹-۲	سیستم‌های انتقال حرارت هدایت-جابجایی
۱۰-۲	پره‌ها
۱۱-۲	مقاومت حرارتی اتصال
	سؤالات مروری
	فهرست مثالهای حل شده
	مسائل

۱۰۳

۱۰۳

۱۰۴

۱۱۰

۱۱۱

۵-۳	روش تحلیل عددی	۱۱۸	فصل ۵
۶-۳	فرمولاسیون عددی در ترم های المان های		
	مقاومتی	۱۳۱	
۷-۳	عملیات تکراری گاوس- سیدل	۱۳۳	
۸-۳	مشاهدات درست	۱۳۶	
۹-۳	مشابه الکتریکی برای رسانش دو بعدی	۱۵۸	
۱۰-۳	خلاصه	۱۵۹	
	سؤالات مروری	۱۶۰	
	فهرست مثالهای حل شده	۱۶۰	
	مسائل	۱۶۱	
	فصل ۴		
	هدایت حالت ناپایدار	۱۸۳	
۱-۴	مقدمه	۱۸۳	
۲-۴	سیستم ظرفیت حرارتی انباشته	۱۸۵	
۳-۴	جریان حرارت گذرا در جسم جامد نیم محدود	۱۸۹	
۴-۴	شرایط مرزی جابجایی	۱۹۶	
۵-۴	سیستم های چند بعدی	۲۱۴	
۶-۴	روش عددی گذرا	۲۲۳	
۷-۴	مقاومت گرمایی و تشکیل ظرفیت	۲۳۲	
۸-۴	خلاصه	۲۵۵	
	سؤالات مروری	۲۵۶	
	فهرست مثالهای حل شده	۲۵۶	
	مسائل	۲۵۷	
	فصل ۶		
	روابط تجربی و عملی برای انتقال حرارت		
	با جابجایی اجباری	۳۷۱	
۱-۶	مقدمه	۳۷۱	
۲-۶	روابط تجربی برای جریان درون لوله ها	۳۷۴	
۳-۶	جریان روی استوانه ها و کره ها	۳۹۲	

فصل ۸

انتقال حرارت تشعشی	۵۰۴
مقدمه	۵۰۴
مکانیزم فیزیکی	۵۰۴
خواص تشعشی	۵۰۷
ضریب شکل تشعشی	۵۱۸
روابط بین ضرایب شکل	۵۳۰
تبادل حرارت بین اجسام غیر سیاه	۵۳۹
صفحات موازی و نا محدود	۵۴۹
سپرهای تشعشی	۵۵۶
تشعشع گازها	۵۶۱
شبکه تشعشی برای یک محیط جاذب و تراگسیلنده	۵۶۲
مبادله تشعشع با سطوح آینه‌ای	۵۷۲
مبادله تشعشع با محیط‌های تراگسیلنده	۱۲-۸
بازتابنده و جاذب	۵۷۹
فرمول‌بندی برای راه حل عددی	۵۸۹
تشعشع خورشیدی	۶۱۰
خواص تشعشع محیط	۶۱۷
اثر تشعشع بر اندازه‌گیری درجه حرارت	۶۲۰
ضریب انتقال حرارت تشعشی	۶۲۲
خلاصه	۶۲۳
سؤالات مروری	۶۲۳
فهرست مثالهای حل شده	۶۲۴
مسائل	۶۲۶

جریان سیال بر روی مجموعه لوله‌ها	۴۰۳
انتقال حرارت فلز مایع	۴۱۰
خلاصه	۴۱۳
سؤالات مروری	۴۱۵
فهرست مثالهای حل شده	۴۱۶
مسائل	۴۱۷

فصل ۷

سیستم‌های جابجایی طبیعی	۴۳۱
مقدمه	۴۳۱
انتقال حرارت به طریق جابجایی آزاد روی یک صفحه مسطح قائم	۴۳۱
روابط تجربی برای جابجایی آزاد	۴۴۰
جابجایی آزاد روی صفحات و استوانه‌های قائم سطوح همدم	۴۴۲
جابجایی آزاد از استوانه‌های افقی	۴۵۱
جابجایی آزاد از صفحات افقی	۴۵۵
جابجایی آزاد از سطوح شیبدار	۴۵۷
سیالات غیر نیوتنی	۴۵۹
معادلات ساده شده برای هوا	۴۶۰
جابجایی آزاد از کره‌ها	۴۶۲
جابجایی آزاد از فضاها بسته	۴۶۳
ترکیب جابجایی آزاد و اجباری	۴۷۹
خلاصه	۴۸۴
روش خلاصه برای تمام مسائل جابجایی	۴۸۵
سؤالات مروری	۴۸۶
فهرست مثالهای حل شده	۴۸۸
مسائل	۴۸۹

فصل ۹

انتقال حرارت در چگالش و جوشش

۶۶۱

۷۶۹

سؤالات مروری

۷۷۰

فهرست مثالهای حل شده

۷۷۱

مسائل

فصل ۱۱

انتقال جرم

۷۹۴

۷۹۴

۱-۱۱ مقدمه

۷۹۵

۲-۱۱ قانون نفوذ فیک

۷۹۷

۳-۱۱ نفوذ در گازها

۸۰۳

۴-۱۱ نفوذ در مایعات و جامدات

۸۰۴

۵-۱۱ ضریب انتقال جرم

۸۰۹

۶-۱۱ فرایندهای تبخیر در جو

۸۱۴

سؤالات مروری

۸۱۴

مسائل

فصل ۱۲

اطلاعات مربوط به طراحی و خلاصه بحث

۸۱۸

۸۱۸

۱-۱۲ مقدمه

۸۱۹

۲-۱۲ مسائل مربوط به رسانایی

۸۲۲

۳-۱۲ روابط انتقال حرارت جابجایی

۸۳۶

۴-۱۲ انتقال حرارت تابشی

۸۴۱

۵-۱۲ تبادل حرارت

۸۶۲

لیست مثالهای ارائه شده

۸۶۲

مسائل

فصل ۱۰

مبدل‌های حرارتی

۷۰۳

۷۰۳

۱-۱۰ مقدمه

۷۰۴

۲-۱۰ ضریب کلی انتقال حرارت

۷۱۱

۳-۱۰ ضرایب رسوب‌گیری

۷۱۳

۴-۱۰ انواع مبدل‌های حرارتی

۷۱۶

۵-۱۰ اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی

۷۲۹

۶-۱۰ متد موثر NTU

۷۵۲

۷-۱۰ مبدل‌های حرارتی فشرده

۷۵۷

۸-۱۰ آنالیز برای خواص متغیر

۷۶۹

۹-۱۰ ملاحظات طراحی مبدل‌های حرارتی



مقدمه

انتقال حرارت علمی است که با پیش‌بینی انتقال حرارتی که بین دو جسم به واسطه وجود اختلاف درجه حرارت به وجود می‌آید سر و کار دارد. ترمودینامیک به ما می‌آموزد که این انرژی انتقال یافته را به عنوان حرارت تعریف کنیم. علم انتقال حرارت نه تنها چگونگی انتقال حرارت را تشریح می‌کند بلکه شدت این تبادل تحت شرایط خاص و معین را نیز پیش‌بینی می‌کند. این حقیقت که شدت انتقال حرارت خواسته مطلوب در یک تجزیه و تحلیل است، تفاوت میان انتقال حرارت و ترمودینامیک را مشخص می‌سازد. ترمودینامیک در ارتباط با سیستم‌هایی است که در تعادل اند 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 طی فرآیند، سیستم در حالت تعادل نیست. در انتقال حرارت، اصول اول و دوم ترمودینامیک همراه با قوانین تجربی به کار گرفته می‌شوند که با کمک آنها می‌توان شدت انتقال حرارت را به دست آورد، همانند علم ترمودینامیک، قوانین تجربی به عنوان مبانی بحث انتقال حرارت، به سادگی و سهولت برای به‌کارگیری در موقعیت‌های علمی متنوعی تعمیم می‌یابند.

به عنوان مثالی از انواع متفاوت مسائلی که در آنها انتقال حرارت و ترمودینامیک به کار برده می‌شود سرد شدن میله فولادی داغ را در نظر می‌گیریم که درون ظرفی از آب قرار دارد، با استفاده از ترمودینامیک می‌توان درجه حرارت نهایی تعادل میان میله فولادی و آب را به دست آورد. اما ترمودینامیک مدت زمان لازم برای رسیدن به این شرایط تعادلی با درجه حرارت میله پس از سپری شدن زمانی خاص پیش از رسیدن به شرایط تعادلی را مشخص نمی‌کند. علم انتقال حرارت رامی‌توان جهت پیش‌بینی درجه حرارت میله و آب به صورت تابعی از زمان مورد استفاده قرار داد.

۱-۱ انتقال هدایتی حرارتی

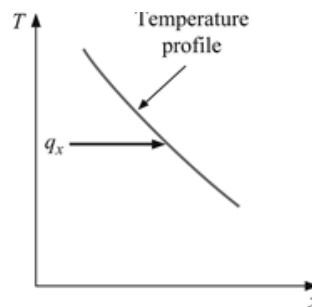
تجربه نشان داده است، هنگامی که در جسمی گردایان درجه حرارت وجود داشته باشد، انتقال انرژی از ناحیه دارای درجه حرارت بالاتر به ناحیه دارای درجه حرارت پایین تر صورت می گیرد. در این حالت می گوئیم انرژی از (طریق هدایت) انتقال یافته است و شدت انتقال حرارت در واحد سطح متناسب با گردایان نرمال درجه حرارت می باشد:

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

زمانی که ثابت تناسب به کار برده شود:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-1)$$

در رابطه فوق q_x انتقال حرارت و $\partial T / \partial x$ گردایان درجه حرارت در جهت جریان حرارت می باشد. ضریب ثابت مثبت k موسوم به قابلیت هدایت حرارتی جسم است و علامت منفی نیز به گونه ای 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 همان گونه که در سیستم مختصات شکل (۱-۱) مشاهده می گردد. معادله (۱-۱) را به افتخار ریاضی _ فیزیک دان فرانسوی ژوزف فوریه، قانون فوریه در هدایت حرارتی می نامند. وی سهم بسیار مهمی در تجزیه و تحلیل رفتار انتقال حرارتی هدایتی دارد. ذکر این نکته اهمیت دارد که معادله (۱-۱)، معادله مشخصه قابلیت هدایت حرارتی است و در سیستمی که جریان حرارت با واحد وات بیان می شود، k دارای واحد وات بر متر _ درجه سلسیوس می باشد.



شکل (۱-۱) نمایش جهت انتقال حرارت

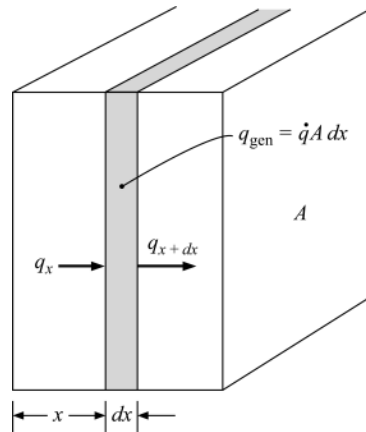
اکنون به بررسی این مسئله می‌پردازیم که معادله بنیادی مشخصه انتقال حرارت در یک جسم جامد را تعیین کنیم و از معادله (۱-۱) به عنوان نقطه آغاز این بررسی، استفاده می‌کنیم.

سیستمی یک بعدی را در نظر بگیرید که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. اگر سیستم در حالت پایدار باشد و یا به عبارتی دیگر درجه حرارت نسبت به زمان تغییر نکند. آنگاه مسئله ساده خواهد بود و تنها با انتگرال گیری از معادله (۱-۱) و قرار دادن مقادیر مناسب در آن می‌توانیم کمیت مورد نظر را به دست 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 پیچیده تر خواهد بود. حال حالت عمومی را در نظر می‌گیریم که درجه حرارت با زمان تغییر می‌کند و چشمه های حرارتی نیز ممکن است در جسم وجود داشته باشند. برای جزیی به ضخامت dx می‌توان موازنه انرژی را به صورت زیر برقرار کرد:

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

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

$$q_{\text{gen}} = \dot{q} A dx = \text{انرژی تولید شده در جزء مورد نظر}$$



شکل (۲-۱) المان حجمی یک بعدی برای آنالیز هدایت حرارتی

$$\rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx = \text{تغییر در انرژی داخلی}$$

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

از ترکیب روابط فوق خواهیم داشت:

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

و یا:

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

معادله مذکور معادله 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 در نظر بگیریم. این مطلب در شکل (۱-۳ الف) نشان داده شده است. از موازنه انرژی داریم:

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

و معادلات انرژی عبارت است از:

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

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

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

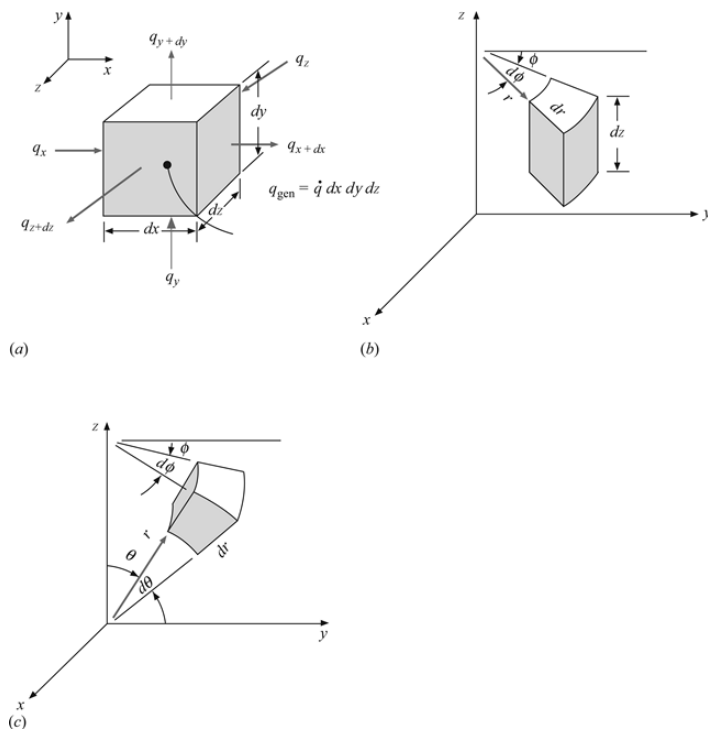
$$q_{y+dy} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz$$

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

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

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

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



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

بنابراین معادله کلی هدایت حرارتی سه بعدی به صورت زیر می باشد:

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

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

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

در معادله فوق کمیت $\alpha = K/\rho c$ را ضریب پخش حرارتی ماده می نامند. هرچه مقدار α بزرگتر باشد، نفوذ و پخش حرارت در جسم سریع تر خواهد بود. این مطلب را می توان با امتحان کمیاتی که در ساختار α به کار رفته اند، دریافت. مقدار زیاد α می تواند ناشی از زیاد بودن مقدار قابلیت هدایت حرارتی که خود نشان دهنده شدت بالای انتقال حرارت است و یا به دلیل کم بودن مقدار ظرفیت حرارتی ρc باشد. پایین بودن 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 می گردد. بنابراین انرژی بیشتری باید وجود داشته باشد تا انتقال حرارت بیشتری صورت گیرد. ضریب پخش حرارتی α دارای واحد متر مربع در ثانیه است.

معادله (۳-۱ الف) را می توان با استفاده از روش های استاندارد ریاضی در مختصات استوانه ای یا کروی نیز نوشت. نتایج عبارتند از: مختصات استوانه ای:

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

مختصات کروی:

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

سیستم های مختصات مورد استفاده همراه با معادلات (۳-۱ پ) در شکل های (۳-۱ ب و پ) نمایش داده شده اند.

در بسیاری از مسائل علمی حالات خاصی از معادلات عمومی فوق به کار گرفته می شود. به عنوان راهنمایی جهت مباحث پیشرفته تر فصول بعدی، بیان شکل های ساده شده این معادلات برای چند حالت عمومی ارزشمند و جالب خواهد بود:

جریان یک بعدی پایدار (بدون تولید حرارت)

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (۴-۱)$$

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

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

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

جریان حرارت یک بعدی پایدار با منبع حرارتی

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

هدایت پایدار دو بعدی بدون منبع حرارتی

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

۲-۱ قابلیت هدایت حرارتی

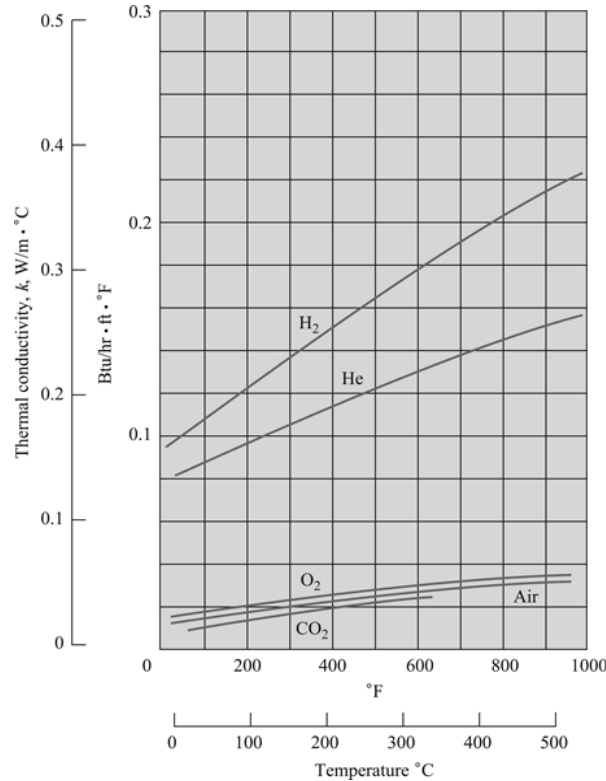
معادله (۱-۱) معادله مشخصه قابلیت هدایت حرارتی است. اندازه‌گیری‌های تجربی برای تعیین قابلیت هدایت حرارتی اجسام مختلف بر اساس این تعریف صورت می‌گیرد. برای گازها در درجه حرارت‌های نسبتاً پایین، تحلیل تئوری جنبشی گازها را می‌توان جهت پیش بینی دقیق مقادیر مشاهده شده تجربی مورد استفاده قرار داد. در برخی از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

Material	Thermal conductivity <i>k</i>	
	W/m · °C	Btu/h · ft · °F
Metals:		
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
Nonmetallic solids:		
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
Liquids:		
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 ₂ F ₂	0.073	0.042
Gases:		
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

جدول (۱-۱) ضریب هدایت حرارتی مواد مختلف در دمای °C

مکانیزم هدایت حرارتی در گازها ساده است. انرژی جنبشی با درجه حرارت آن مشخص می‌گردد. لذا در ناحیه درجه حرارت بالا، مولکول‌ها دارای سرعت بالاتر از ناحیه درجه حرارت‌های پایین هستند. مولکول‌ها دارای حرکت تصادفی پیوسته می‌باشند و در نتیجه به یکدیگر برخورد نموده و انرژی و اندازه حرکت خود را مبادله می‌کنند. این حرکت تصادفی مولکول‌ها با وجود و یا بدون وجود گردایان 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 در عمل همانطور که انتظار آن را داریم از نظر مقداری نمایش داده شود. اطلاعات جدول بندی شده کامل تر در ضمیمه A مشاهده می گردد.



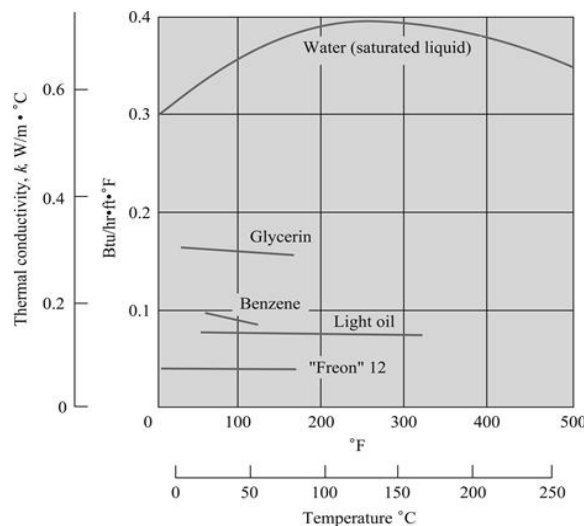
شکل (۱-۴) ضرایب هدایت حرارتی چند نمونه از گاز

پیشتر گفتیم که اگر جریان حرارت با واحد وات بیان شود، قابلیت هدایت حرارتی دارای واحد وات بر متر در درجه سلسیوس خواهد بود، در اینجا شدت حرارت مطرح است و مقدار عددی قابلیت هدایت حرارتی نمایانگر آن است که حرارت با چه سرعتی در یک ماده مشخص جریان می یابد. شدت انتقال حرارت که در مدل مولکولی فوق مورد بحث قرار گرفت، چگونه به حساب آورده می شود؟ واضح است که هر چه مولکول سریع تر حرکت کند، سریع تر انرژی منتقل خواهد کرد. تحلیل ساده نشان می دهد. که قابلیت هدایت حرارتی یک گاز با ریشه دوم درجه حرارت مطلق

تغییر می‌کند. سرعت صوت در یک گاز با ریشه 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 دماست. این بدان معنی است که داده‌های مربوط به گازها در فشار یک اتمسفر (atm) که در ضمیمه A مشاهده می‌گردد را می‌توان برای محدوده وسیعی از فشارها مورد استفاده قرار داد.

وقتی فشار گاز در حد فشار بحرانی آن باشد و یا به طور کلی تر، هنگامی که رفتار گاز غیر ایده آل محسوس باشد، باید از منابع دیگری برای به دست آوردن داده‌های مربوط به قابلیت هدایت حرارتی استفاده کرد.

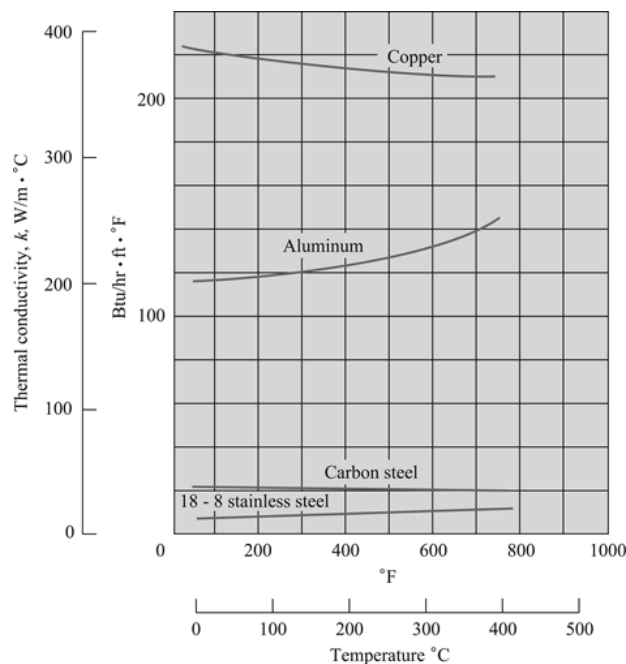
مکانیزم فیزیکی هدایت انرژی حرارتی در مایعات از نظر کیفی همانند گازها است گرچه وضعیت بسیار پیچیده تر می‌باشد زیرا مولکول‌ها دارای فواصل کمتر بوده و میدان نیروهای مولکولی تاثیر شدیدی بر تبادل انرژی در فرآیند بر خورد از خود بر جا می‌گذارد. قابلیت هدایت حرارت برخی از مایعات در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱) ضرایب هدایت حرارتی چند نمونه از مایع

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 $(Btu/hr \cdot ft \cdot ^\circ F)$ است. ممکن است انرژی حرارتی در جامدات به دو صورت انتقال یابد. ارتعاشات شبکه‌ای و انتقال توسط الکترون‌های آزاد، در هادی‌های خوب الکتریکی تعداد بسیار زیادی الکترون در ساختمان شبکه‌ای جسم

حرکت می‌کنند. همان‌گونه که الکترون‌ها بارهای الکتریکی را منتقل می‌کنند، قادر هستند انرژی حرارتی را نیز از یک ناحیه با درجه حرارت بالا به ناحیه‌ای با درجه حرارت پایین تر انتقال دهند، نظیر آنچه در مورد گازها دیدیم. در حقیقت از این الکترون‌ها غالباً به عنوان گاز الکترونی یاد می‌شود. انرژی ممکن است به صورت انرژی ارتعاشی در ساختمان شبکه‌ای جسم نیز انتقال یابد. گرچه در حالت کلی این شکل اخیر از انتقال انرژی در مقایسه با انتقال به وسیله 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.



شکل (۶-۱) ضرایب هدایت حرارتی چند نمونه از جامد

توجه کنید که در اینجا شدت انتقال حرارت مطرح است و مقدار عددی قابلیت هدایت حرارتی اجسام عایق متعددی نیز در ضمیمه A درج گردیده است. به عنوان مثال قابلیت هدایت حرارتی برای پشم شیشه معادل $0.038 W/m \cdot ^\circ C$ و برای شیشه ساختمانی معادل $0.78 W/m \cdot ^\circ C$ در درجه حرارت بالا، انتقال انرژی از طریق اجسام عایق شامل اشکال متعددی است: هدایت از طریق الیاف و مواد جامد متخلخل، هدایت از طریق هوای به تله افتاده در فضاهای خالی، و درجه حرارت‌های به حد کافی بالا از طریق تشعشع، یک مسئله فنی مهم ذخیره‌سازی و انتقال مایعات کرایوژنیک

نظیر هیدروژن مایع، برای مدت زمان طولانی است. این گونه کاربردها منجر به تکامل فوق عایق‌ها برای استفاده در درجه حرارت‌های بسیار پایین 250°C - شده‌اند. مؤثرترین این گونه فوق عایق‌ها شامل چند لایه از موادی هستند که به شدت 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 خلا می‌شود و قابلیت هدایت حرارتی تا حد $0.3\text{mW}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ کاهش می‌یابد. خلاصه این مقادیر قابلیت هدایت حرارتی مواد عایق در درجه حرارت های کرایوژنیک در جدول (۲-۱) مشاهده می‌گردد. اطلاعات بیشتر در مورد عایق های چند لایه در مراجع ۲ و ۳ آمده است.

Type of insulation	Effective k , $\text{mW}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$
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

جدول (۲-۱) قابلیت هدایت حرارتی مؤثر برخی از مواد عایق کرایوژنیک در محدوده ۱۵ درجه سانتیگراد تا ۱۹۵- و دانسیته ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب تا ۸۰ تعیین می‌کند.

۳-۱ انتقال حرارت جابه‌جایی

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 جابه‌جا شده است و این فرآیند را انتقال حرارت جابه‌جایی می‌نامیم.

اصطلاح جابه‌جایی برای خواننده همراه با نوعی آگاهی حسی در رابطه با فرآیند انتقال حرارت است گرچه این آگاهی و درک حسی باید به گونه‌ای تعمیم یابد که شخص بتواند به تحلیلی کامل از مسئله دست یابد. به عنوان مثال به وضوح می‌دانیم که سرعت عبور هوا از روی صفحه داغ بر شدت انتقال حرارت اثر می‌گذارد. آیا این اثر به صورت سرد شدن خطی است؟ به عبارتی دیگر اگر سرعت دو برابر شود، شدت انتقال حرارت دو برابر خواهد شد؟ ممکن است سوال کنیم که در صورتی که صفحه را به جای هوا با آب سرد کنیم شدت انتقال حرارت متفاوت می‌باشد، اما مجدداً این سؤال مطرح می‌شود که این اختلاف چقدر می‌تواند باشد؟

صفحه گرم شده شکل (۷-۱) را در نظر بگیرید، درجه حرارت صفحه T_W است و درجه حرارت سیال T_{∞} می‌باشد. سرعت جریان به صورتی است که مشاهده می‌گردد، یعنی بر روی صفحه به دلیل عمل نیروهای لزجی به صفر کاهش می‌یابد.

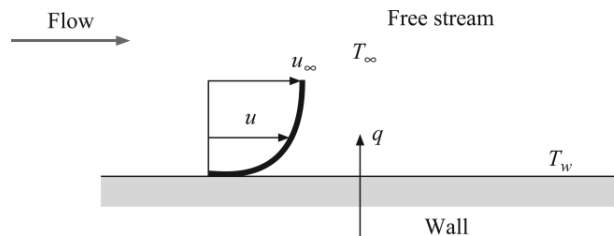
از آنجا که سرعت لایه سیال در جداره صفر خواهد بود. در این نقطه باید حرارت فقط به واسطه هدایت منتقل گردد. لذا می‌توانیم با استفاده از معادله (۱-۱) و با دانستن قابلیت هدایت حرارتی سیال و گرادیان درجه حرارت سیال در جداره، میزان انتقال حرارت را محاسبه کنیم. حال این سؤال مطرح می‌شود که اگر در این لایه و حرارت از طریق هدایت منتقل می‌گردد. چرا صحبت از انتقال حرارت جابه‌جایی می‌کنیم و نیاز به دانستن سرعت سیال داریم؟ پاسخ این است که گرادیان درجه حرارت و به شدت دور کردن حرارت به وسیله سیال وابسته است. سرعت زیاد با

ایجاد گرادیان درجه حرارت زیاد همراه است و الی آخر. لذا وجود گرادیان درجه حرارت بر روی جداره بستگی به میدان جریان دارد و بایستی در تحلیل قبلی خود عبارت را وارد کنیم که دو کمیت را به هم مربوط سازد. بایستی خاطر نشان کنیم که مکانیزم فیزیکی انتقال حرارت بر روی جداره همان مکانیزم فرآیند هدایت حرارتی است. برای بیان اثر کلی جابه‌جایی، از قانون سرمایش نیوتن استفاده کنیم:

A با این رابطه شدت انتقال حرارت به اختلاف کلی درجه حرارت بین جداره و سیال و سطح تماس مرتبط می‌گردد. کمیت h را ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌نامیم و معادله (۸-۱) معادله معرف آن است. محاسبه تحلیلی h برای برخی از سیستم‌ها امکان پذیر است. برای وضعیت‌های با پیچیدگی بیشتر بایستی این ضریب را به طور تجربی تعیین کنیم. ضریب انتقال حرارت را گاهی هدایت لایه نازک نیز می‌نامیم زیرا با فرآیند هدایت در لایه نازک ثابت سیال در سطح جداره ارتباط دارد. از معادله (۸-۱) در می‌یابیم که واحد h در هنگامی که جریان حرارت بر حسب وات بیان شود، بر حسب وات بر متر مربع در درجه سلسیوس بیان می‌گردد.

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (8-1)$$

با توجه به بحث قبلی، شخص درمی‌یابد که انتقال حرارت جابه‌جایی علاوه بر وابستگی به خواص حرارتی سیال (قابلیت هدایت حرارتی، گرمای ویژه، دانسیته) به لزجت سیال نیز بستگی دارد. این نکته را انتظار داریم زیرا لزجت بر پروفیل سرعت اثر گذاشته و در نتیجه بر شدت انتقال حرارت در نزدیکی جداره نیز اثر می‌گذارد.



شکل ۷-۱

اگر صفحه گرمی را در هوای معمولی اتاق و بدون منبع حرارتی خارجی، قرار دهیم حرکت هوا به واسطه گرادیان دانسیته در نزدیکی صفحه به وجود خواهد آمد. ما این جابه‌جایی را جابه‌جایی طبیعی یا آزاد می‌نامیم در مقابل جابه‌جایی اجباری که به واسطه جریان هوا به دلیل وجود فن (بادبزن) بر روی صفحه ایجاد می‌گردد. پدیده‌های جوشش و دانسیته نیز در گروه کلی انتقال حرارت جابه‌جایی قرار می‌گیرند. حدود تقریبی ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی در جدول (۳-۱) نشان داده شده است.

Mode	h	
	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
Across 2.5-cm air gap evacuated to a pressure of 10^{-6} atm and subjected to $\Delta T = 100^\circ C - 30^\circ C$	0.087	0.015
<i>Free convection, $\Delta T = 30^\circ C$</i>		
Vertical plate 0.3 m [1 ft] high in air	4.5	0.79
Horizontal cylinder, 5-cm diameter, in air	6.5	1.14
Horizontal cylinder, 2-cm diameter, in water	890	157
Heat transfer across 1.5-cm vertical air gap with $\Delta T = 60^\circ C$	2.64	0.46
Fine wire in air, $d = 0.02$ mm, $\Delta T = 55^\circ C$	490	86
<i>Forced convection</i>		
Airflow at 2 m/s over 0.2-m square plate	12	2.1
Airflow at 35 m/s over 0.75-m square plate	75	13.2
Airflow at Mach number = 3, $p = 1/20$ atm, $T_\infty = -40^\circ C$, across 0.2-m square plate	56	9.9
Air at 2 atm flowing in 2.5-cm-diameter tube at 10 m/s	65	11.4
Water at 0.5 kg/s flowing in 2.5-cm-diameter tube	3500	616
Airflow across 5-cm-diameter cylinder with velocity of 50 m/s	180	32
Liquid bismuth at 4.5 kg/s and $420^\circ C$ in 5.0-cm-diameter tube	3410	600
Airflow at 50 m/s across fine wire, $d = 0.04$ mm	3850	678
<i>Boiling water</i>		
In a pool or container	2500–35,000	440–6200
Flowing in a tube	5000–100,000	880–17,600
<i>Condensation of water vapor, 1 atm</i>		
Vertical surfaces	4000–11,300	700–2000
Outside horizontal tubes	9500–25,000	1700–4400
<i>Dropwise condensation</i>	170,000–290,000	30,000–50,000

جدول (۳-۱) مقادیر تقریبی ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی

موازنه انرژی روی یک مسیر عبور جریان

انتقال حرارت مطرح شده توسط معادله (۸-۱) برای ارزیابی افت حرارت در جریان روی سطوح بیرونی به کار برده می‌شود. ازدیاد یا افت حرارت جابه‌جایی به واسطه عبور سیال درون لوله‌ها یا مجاری عبور نشان داده شده در شکل (۸-۱) نیز اهمیت مشابهی دارد. در این حالت دیواره گرم

شده T_w ، حرارت را به سیال سردتر می‌دهد و درجه حرارت آن افزایش می‌یابد و از شرایط درونی T_i به شرایط بیرونی T_e می‌رسد. با استفاده از نماد i برای آنتالپی به جهت پرهیز از اشتباه آن با h که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است موازنه انرژی به صورت زیر خواهد بود:

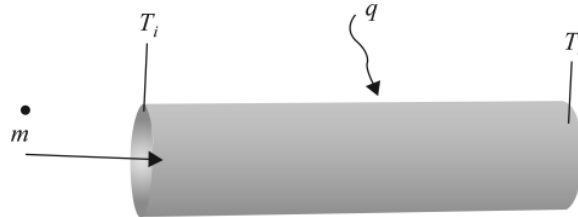
$$q = \dot{m}(i_e - i_i)$$

در این رابطه $\dot{m}$ دبی جرمی سیال است. برای بسیاری از مایعات یک فاز و گازها در درجه حرارت‌های منطقی و قابل قبول، $\Delta i = c_p \Delta T$ است و خواهیم داشت:

$$q = \dot{m} c_p (T_e - T_i)$$

این مقدار را می‌توان مساوی با معادله (۸-۱) قرار داد:

$$q = \dot{m} c_p (T_e - T_i) = h A (T_{w, \text{avg}} - T_{\text{fluid, avg}})$$



شکل ۸-۱ جابه‌جایی در یک مجرای عبور

در این حالت، درجه حرارت‌های سیال T_i ، T_e و T_{fluid} را درجه حرارت حجمی یا درجه حرارت متوسط انرژی می‌نامیم. A سطح جانبی مجرای عبور سیال است که در تماس با سیال می‌باشد. مطالب بیشتر در رابطه با انتقال حرارت جابه‌جایی جریان‌های بیرونی و درونی در فصل ۵ و ۶ مطرح خواهد شد. در حال حاضر، ما می‌خواهیم توجه خواننده را به تفاوت و تمایز دو نوع جریان جلب کنیم.

۴-۱ انتقال حرارت تشعشی

برخلاف مکانیزم هدایت و جابهجایی که انتقال انرژی از طریق ماده‌ای واسط صورت می‌گیرد، حرارت می‌تواند از ناحیه‌ای که خالصاً وجود دارد نیز عبور نماید. مکانیزم این حالت تشعشع الکترومغناطیسی است. ما بحث خود را به آن نوع از تشعشع الکترومغناطیسی محدود می‌کنیم که در نتیجه اختلاف درجه حرارت صورت می‌گیرد و موسوم به تشعشع حرارتی است.

الزامات ترمودینامیکی^۱ نشان می‌دهد که یک تشعشع کننده ایده‌آل یا جسم سیاه، انرژی را با شدت متناسب با توان چهارم درجه حرارت مطلق جسم و نیز متناسب با سطح آن منتشر می‌سازد. لذا:

$$q_{\text{emitted}} = \sigma AT^4 \quad (۹-۱)$$

σ ثابت تناسب است و ثابت استفان بولتزمن نامیده می‌شود که مقدار آن معادل $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ می‌باشد. معادله (۹-۱) را قانون استفان - بولتزمن در تشعشع حرارتی می‌نامند و تنها برای اجسام سیاه معتبر است. یادآوری این نکته مهم است که این معادله تنها برای تشعشع حرارتی سودمند است و برای سایر انواع تشعشعات الکترومغناطیسی رابطه مورد استفاده به این سادگی نیست.

معادله (۹-۱) تنها بر تشعشع منتشر شده از اجسام سیاه حاکم است. تبادل تشعشی خالص بین دو سطح متناسب با اختلاف درجه حرارت‌های مطلق آن‌ها با توان چهارم است، یعنی:

$$\frac{q_{\text{net exchange}}}{A} \propto \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (۱۰-۱)$$

متذکر شدیم که جسم سیاه، جسمی است که انرژی را مطابق با قانون T^4 منتشر می‌کند. ما چنین جسمی را سیاه می‌نامیم زیرا اجسام سیاه، نظیر قطعه‌ای فلز که با کربن سیاه پوشیده شده است، تقریباً این رفتار را نشان می‌دهند. دیگر انواع سطوح، نظیر یک سطح رنگ شده براق یا صفحه فلزی پرداخت شده، به اندازه‌ی یک جسم سیاه تشعشع ندارد، اگر چه تشعشع کل منتشر شده از این اجسام باز هم به طور کلی از تناسب T^4 تبعیت می‌کنند. برای به حساب آوردن ماهیت (خاکستری) چنین سطوحی، ضریب دیگری را در معادله (۹-۱) وارد می‌کنیم که موسوم به ضریب انتشار ϵ است که تشعشع جسم خاکستری را به جسم سیاه ایده‌آل مربوط می‌سازد. علاوه بر این، باید این حقیقت را در نظر داشته باشیم که تمام تشعشع خروجی از یک سطح به یک سطح دیگر نمی‌رسد زیرا تشعشعات الکترومغناطیس در خط مستقیم حرکت کرده و قسمتی از آنها در محیط از میان می‌روند. لذا دو ضریب جدید را برای به حساب آوردن هر دو موقعیت مذکور در معادله (۹-۱) وارد می‌کنیم، بطوری که:

^۱ برای مثال رجوع کنید به (ترمودینامیک) تألیف جک فلیپ هولمن، چاپ چهارم صفحه ۷۰۵، شرکت انتشارات مک گرو هیل، نیویورک، ۱۰