جزوه انتقال حرارت

استاد: ادراکی

۱ ـ ۱ ـ ترمودینامیک و انتقال گرما

ما در علم ترمودینامیک با تبادل گرما و نقش اساسی آن در قوانین اول و دوم آشنا شدیم اما در این علم مکانیزم انتقال گرما و روش‌های محاسبه نرخ انتقال گرما مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. در ترمودینامیک به حالت‌های تعادلی ماده پرداخته می‌شود که لازمه آن عدم وجود گرادیان دما است و این نکته که انتقال گرما ماهیتاً غیرتعادلی است مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. هدف ما در مطالعه علم انتقال گرما تعیین کمّی نرخ انتقال گرما برحسب میزان عدم تعادل و توزیع دما در سیستم است.

۱ ـ ۲ ـ مقدمه

انتقال گرما به صورت انرژی انتقال یافته از یک سیستم به سیستم دیگر در اثر وجود اختلاف دما بین دو سیستم تعریف می‌گردد. انتقال گرما ناشی از وجود اختلاف دما است، بین دو محیط که دمای یکسانی دارند انتقال گرمایی صورت نمی‌گیرد.

☜ **نکته:** گرادیان دما، نیروی محرکه انتقال گرما است.

☜ **نکته:** نرخ انتقال گرما در یک جهت مشخص به میزان اختلاف دما بر واحد طول بستگی دارد و هر چه اختلاف دما زیادتر باشد نرخ انتقال گرما زیادتر می‌شود.

انتقال گرما به سه طریق می‌تواند انجام گیرد: هدایت، جابه‌جایی و تشعشع.
در هر سه روش گرما از محیطی با دمای بالاتر به محیطی با دمای پایین‌تر منتقل می‌شود.

۱ـ۳ـ انتقال گرمای هدایتی

هدایت، انتقال انرژی از ذرات پرانرژی یک ماده به ذرات کم‌انرژی مجاور و حاصل از برهم کنش بین ذرات است. در این روش انتقال، واسطه انتقال گرما ساکن است. در مایعات و گازها هدایت بر اثر برخورد و انتشار مولکول‌ها در حین حرکت تصادفی صورت می‌گیرد. در جامدات هدایت در اثر ترکیبی از ارتعاشات مولکولی در شبکه و انتقال انرژی به وسیله الکترون‌های آزاد صورت می‌گیرد. بنابراین هدایت یک پدیده انتقال در مقیاس مولکولی است

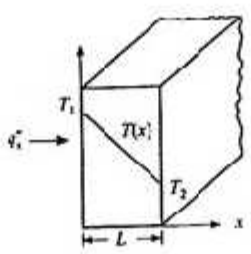
انرژی که مولکول‌ها دارا هستند بواسطه حرکات خطی، دورانی و نوسانی آن‌ها است و با افزایش دما افزایش می‌یابد.

نکته: نرخ هدایت گرمایی از یک محیط به هندسه، ضخامت، جنس ماده و اختلاف دما در عرض محیط بستگی دارد.

۱ـ۳ـ۱ـ قانون فوریه

برای تعیین میزان انتقال گرمای هدایتی از قانون فوریه استفاده می‌کنیم. قانون فوریه بیان می‌کند که انتقال گرما در اثر اندرکنشهای مولکولی در هر نقطه‌ای از جامد یا سیال از نظر مقدار متناسب با گرادیان دما و از نظر جهت در خلاف جهت آن است.

مطابق شکل (۱ـ۱) دیواری مسطح به ضخامت L را در نظر می‌گیریم که دمای یک طرف آن T_1 و دمای طرف دیگر آن T_2 است. با فرض $T_1 > T_2$ انتقال گرما از سمت چپ به سمت راست صورت می‌گیرد.



شکل ۱ـ۱

هرگاه این دیواره مسطح یک بعدی دارای توزیع دمای $T = T(x)$ باشد شار انتقال گرما (q''_x) با استفاده از قانون فوریه به دست می‌آید:

$$q''_x = -k\frac{dT}{dx} \qquad (۱-۱)$$

هرگاه توزیع دما خطی باشد داریم:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_۲ - T_۱}{L} \qquad (۱-۲)$$

بنابراین

$$q''_x = -k\frac{T_۲ - T_۱}{L} = k\frac{\Delta T}{L} \qquad (۱-۳)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که شار انتقال گرما متناسب با تغییرات دما در طول L است.

ضریب تناسب k را ضریب هدایت گرمایی می‌نامیم. در معادله فوق $\Delta T = T_۱ - T_۲$ و L ضخامت صفحه است.

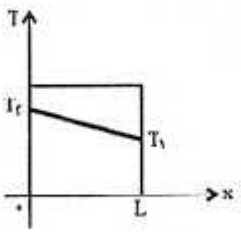
نرخ انتقال گرما در دیواره از رابطه $q_x = q''_x A$ بدست می‌آید که A سطح مقطع عمود بر جهت انتقال گرما است.

با زیاد کردن سطح و درجه حرارت و کم کردن ضخامت انتقال گرما به روش هدایت افزایش می‌یابد.

دلیل وجود علامت منفی این است که انتقال گرما در جهت کاهش دما صورت می‌گیرد.

مثال) در شکل زیر گرادیان دما $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ و شدت جریان حرارتی چقدر است؟

$$(T_۱ = ۴۰۰K\ ,\ T_۲ = ۶۰۰K\ ,k = ۱۰۰\ W/mK\ ,\ L = ۱۰cm)$$



۱) $\frac{dT}{dx} = -۱۰۰۰\ K/m$, $q''_x = ۲۰۰\ kW/m^۲$

۲) $\frac{dT}{dx} = -۲۰۰۰\ K/m$, $q''_x = ۲۰۰\ kW/m^۲$

۳) $\frac{dT}{dx} = ۲۰۰۰\ K/m$, $q''_x = -۲۰۰\ kW/m^۲$

۴) $\frac{dT}{dx} = ۱۰۰۰\ K/m$, $q''_x = ۱۰۰\ kW/m^۲$

حل)

$$\frac{dT}{dx}=\frac{۴۰۰-۶۰۰}{۰/۱}=-۲۰۰۰\ K/m$$

$$q''_x=-k\frac{dT}{dx}=-۱۰۰\times(-۲۰۰۰)=۲۰۰\times۱۰^{۳}\ W/m^{۲}=۲۰۰\ kW/m^{۲}$$

گزینه (۲) صحیح است.

اگر انتقال گرما در جهات x، y و z صورت گیرد داریم:

$$q''_x=-k\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۴-۱)$$

$$q''_y=-k\frac{\partial T}{\partial y} \qquad (۵-۱)$$

$$q''_z=-k\frac{\partial T}{\partial z} \qquad (۶-۱)$$

سه معادله فوق مؤلفه‌های معادله برداری زیر هستند:

$$\mathbf{q}''=q''_x\mathbf{i}+q''_y\mathbf{j}+q''_z\mathbf{k} \qquad (۷-۱)$$

$$\mathbf{q}''=-k\nabla T \qquad (۸-۱)$$

که شکل سه بعدی قانون فوریه نامیده می‌شود و نشان دهنده این است که بردار شار گرمایی متناسب با گرادیان دما است.

معادلات (۱ ـ ۴) تا (۱ ـ ۶) ارتباط دهنده شار گرما در عرض یک سطح با گرادیان دما در جهت عمود بر آن هستند.

مواد ایزوتروپیک یا همسانگرد: موادی هستند که ضریب هدایت گرمایی آنها در جهات مختلف یکسان است.

مواد غیرایزوتروپیک ناهمسانگرد: موادی هستند که ضریب هدایت گرمایی آنها در جهات مختلف یکسان نیست مانند چوب و کریستالهای غیرمکعبی.

معادلات (۱ ـ ۲) تا (۱ ـ ۴) برای مواد ایزوتروپیک صادق هستند. برای مواد غیرایزوتروپیک که مقدار ضریب هدایت گرمایی در جهات مختلف یکسان نیست داریم:

$$q''_x=-\left(k_{۱۱}\frac{\partial T}{\partial x}+k_{۱۲}\frac{\partial T}{\partial y}+k_{۱۳}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \qquad (۹-۱)$$

$$q''_y=-\left(k_{۲۱}\frac{\partial T}{\partial x}+k_{۲۲}\frac{\partial T}{\partial y}+k_{۲۳}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \qquad (۱۰-۱)$$

$$q''_z = -\left(k_{z1}\frac{\partial T}{\partial x} + k_{z2}\frac{\partial T}{\partial y} + k_{z3}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \qquad (۱۱-۱)$$

نکاتی در مورد قانون فوریه

۱ـ این قانون مبتنی بر تجربه است و به صورت تئوری به دست نیامده است.

۲ـ علامت منفی نشان دهنده این است که انتقال گرما در جهت کاهش دما صورت می‌گیرد. انتقال گرما نمی‌تواند از جای سرد به جای گرم صورت گیرد چون قانون دوم ترمودینامیک نقض می‌شود.

۳ـ این قانون برای هر دو حالت پایا و ناپایا صادق است.

۴ـ این قانون برای تمام حالت‌های ماده (جامد، مایع و گاز) قابل استفاده است.

نکته: در صورتی که گرادیان دما ثابت باشد انتقال گرما به ضخامت بستگی نخواهد داشت چون به ازای هر ضخامتی مقدار انتقال گرما ثابت است.

۱ـ۳ـ۲ـ ضریب هدایت گرمایی

ضریب هدایت گرمایی یک خاصیت انتقالی است و می‌توان آن را به صورت نسبت شار انتقال گرما به گرادیان دما تعریف کرد:

$$k = -\frac{q''_x}{\partial T/\partial x} \qquad (۱۲-۱)$$

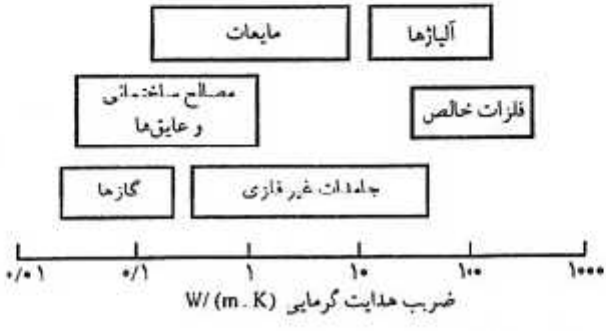
ضریب هدایت گرمایی معیاری از قابلیت مواد در هدایت گرما است.

واحد آن در سیستم SI، $W/m^{\circ}K$ و در سیستم انگلیسی $Btu/ft.hr.R$ است.

نکاتی در مورد ضریب هدایت گرمایی:

۱) ضریب هدایت گرمایی:

گازها < مایعات < جامدات غیرفلزی < آلیاژهای فلزی < فلزات خالص



شکل ۱ـ۲ـ محدوده ضریب هدایت گرمایی مواد در دما و فشار متوسط

۲) ضریب هدایت گرمایی یک ماده، تابع حالت ماده است و با تغییر دما، نشار، ساختمان، رطوبت و ... ماده تغییر می‌کند.

۳) از تغییرات ضریب هدایت گرمایی در اثر تغییر نشار می‌توان صرفنظر کرد.

۴) k نمی‌تواند مقدار منفی داشته باشد چون در اینصورت قانون دوم ترمودینامیکی نقض می‌گردد.

۵) در برخی جامدات خاص (مثلاً جامدات لیفی) مقدار k به جهت انتقال گرما هم وابسته است مثلاً ضریب هدایت گرمایی پشم شیشه در حالتی که جهت جریان در جهت الیاف است با حالتی که جهت جریان عمود بر الیاف است فرق می‌کند.

۶) با منظم‌تر شدن شبکه مولکولی ضریب هدایت گرمایی هم افزایش می‌یابد.

۷) برای گازها داریم:

الف) با استفاده از تئوری جنبشی گازها ضریب هدایت گرمایی با مجذور دما نسبت مستقیم دارد.

$$k \propto T^{\frac{1}{2}}$$

ب) ضریب هدایت گرمایی با مجذور جرم مولکولی نسبت عکس دارد.

$$k \propto M^{-\frac{1}{2}}$$

ج) در حالت عمومی برای گازها: $k < 0/1 W/m°C$

۸) برای مایعات داریم:

الف) ضریب هدایت گرمایی با افزایش دما، کاهش می‌یابد به جز آب و گلیسیرین $(T\uparrow : k\downarrow)$

ب) ضریب هدایت گرمایی با افزایش جرم مولکولی کاهش می‌یابد.

ج) ضریب هدایت گرمایی به فشار حساس نیست به جز حوالی نقطه بحرانی.

د) ضریب هدایت گرمایی آب با افزایش دما ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد.

ه) ضریب هدایت گرمایی: مایعات فلزی >> مایعات غیر فلزی

۹) برای فلزات داریم:

الف) در برخی از فلزات ضریب هدایت گرمایی با افزایش دما کاهش می‌یابد مثل مس و در برخی دیگر افزایش می‌یابد مثل آلومینیم و در برخی بدون تغییر می‌ماند مثل فولاد.

ب) فلزات خالص دارای ضریب هدایت گرمایی بالایی هستند ضریب هدایت گرمایی آلیاژی که از دو فلز درست شده است معمولاً خیلی کمتر از ضریب‌های هدایت گرمایی متناظر هرکدام از فلزات به حالت خالصشان است.

۱۰) جامدات شبکه‌ای مانند الماس و جامدات نیمه هادی مثل سیلیکون هادی خوب گرما و هادی ضعیف جریان الکتریکی هستند به همین خاطر به طور گسترده در صنایع الکترونیک کاربرد دارند.

۱۱) k در دماهای بسیار پایین به سرعت تغییر می‌کند.

۱۲) ضریب هدایت گرمایی معمولاً با هدایت الکتریکی نسبت مستقیم دارد.

توجه: تابعیت ضریب هدایت گرمایی از دما در اکثر مواد در محدوده‌های وسیعی از دما خطی است و توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$k = k_{\circ}(1 + \beta T) \qquad (۱۳-۱)$$

در معادله فوق $k_{\circ}$ ضریب هدایت گرمایی در دمای صفر (یا هر دمای مرجع دیگر) و β ضریب ثابت است.

الف) $\beta > \circ$: k تابع صعودی از دما است.

ب) $\beta < \circ$: k تابع نزولی از دما است.

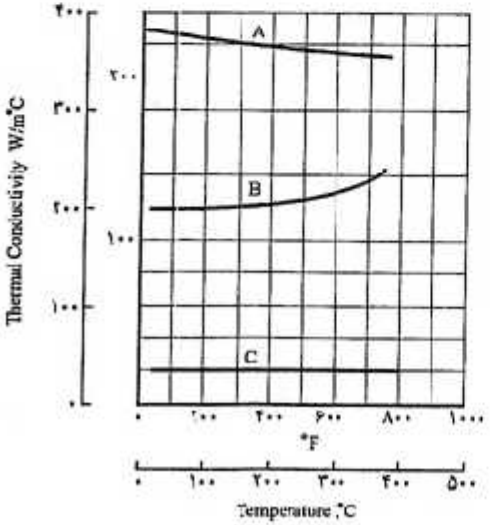
ج) $\beta = \circ$: k مستقل از دما است.

مثال) تغییرات ضریب رسانش گازها با دما چگونه است؟

۱) همیشه افزایشی
۲) همیشه کاهشی
۳) ناچیز و قابل اغماض
۴) گاهی افزایشی، کاهشی یا ناچیز

حل) گزینه (۱) صحیح است.

مثال) تغییرات ضریب هدایت حرارتی برحسب درجه حرارت جامدات (C,B,A) مطابق شکل زیر به ترتیب می‌تواند متعلق به کدام‌یک از دسته جامدات زیر باشد؟



۱) آلومینیم، استیل، مس
۲) استیل، آلومینیم، مس
۳) آلومینیم، مس، استیل
۴) مس، آلومینیم، استیل

حل) گزینه (۴) صحیح است.

مثال) مخترعی ادعا می‌کند که ماده عایق جدیدی ساخته است که ضریب رسانایی گرمایی (k) آن با دما $(t, °C)$ رابطه‌ای به صورت زیر دارد: $k = -۵۲ + \frac{t}{۲۵}$ آیا ادعای او پذیرفتنی است؟

۱) خیر، چون خاصیت ابر رسانایی دارد.
۲) بلی، چون عایق بسیار خوبی است.
۳) بلی، چون بعضی آلیاژها چنین رفتاری دارند.
۴) خیر، چون قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کند.

حل)

$$-۵۲ + \frac{t}{۲۵} = ۰ \Rightarrow t = ۱۳۰۰°C$$

در دماهای پایین‌تر از $۱۳۰۰°C$ مقدار k منفی است و قانون دوم ترمودینامیک نقض می‌شود.

گزینه (۴) صحیح است.

۱ـ۴ـ انتقال گرمای جابه‌جایی

جابه‌جایی روشی برای انتقال انرژی بین سطح یک جامد و مایع یا گاز مجاورش آن است که در حال حرکت می‌باشد و شامل ترکیب اثرات هدایت و حرکت سیال است.

انتقال گرمای جابه‌جایی از دو مکانیزم تشکیل شده‌است: یکی انتقال انرژی توسط حرکت تصادفی مولکولی (پخش گرمایی) و حرکت توده‌ای یا ماکروسکوپی سیال.

هرگاه مجموع این دو مکانیزم مد نظر باشد، از واژه جابه‌جایی استفاده می‌شود و هرگاه انتقال گرما تنها ناشی از حرکت توده سیال مد نظر باشد واژه ادواکسیون به کار می‌رود.

انتقال گرمای جابه جایی به دو صورت جابه جایی اجباری و جابه جایی آزاد وجود دارد. اگر جریان سیال توسط یکسری عوامل خارجی مانند پمپ، فن یا جریان باد ایجاد گردد جابه‌جایی از نوع جابه‌جایی اجباری است. در جابه‌جایی آزاد حرکت سیال به وسیله نیروهای شناوری حاصل می‌شود که از اختلاف چگالی ناشی از تغییرات دما نشأت می‌گیرد.

در برخی فرایندهای جابه‌جایی تبادل گرمای نهان نیز مطرح می‌شود و تبادل گرمای نهان معمولاً با تغییر فاز بین حالت‌های بخار و مایع یک سیال همراه است. جوشش و میعان نمونه‌هایی از این نوع جابه‌جایی هستند.

برای محاسبه انتقال گرمای جابه‌جایی از قانون سرمایش نیوتن استفاده می‌شود:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \qquad (۱۴-۱)$$

در معادله نوق h ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی، A سطح، T_s دمای سطح و T_∞ دمای سیال است.

مثال) صفحه‌ای داغ $(T_w = ۱۲۵\ ^\circ C)$ به میزان $۸۰۰۰\ W/m^۲$ گرما را به هوای محیط $(T_f = ۲۵^\circ C)$ انتقال می‌دهد. حساب کنید ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را.

۱) $h = ۸۰\ W/m^۲\ ^\circ C$

۲) $h = ۲۰\ W/m^۲\ ^\circ C$

۳) $h = ۴۰\ W/m^۲$

۴) $h = ۸۰\ W/m^۲$

حل)

$$q'' = h\,\Delta T \Rightarrow ۸۰۰۰ = h\,(۱۲۵ - ۲۵) \Rightarrow h = ۸۰\ W/m^۲{}^\circ C$$

گزینه (۱) صحیح است.

h یک خاصیت سیال نیست بلکه مقدار آن به هندسه سطح، طبیعت حرکت سیال و سرعت حجمی سیال بستگی دارد. واحد h، $W/m^۲{}^\circ C$ است.

انتقال گرمای جابه‌جایی یک کمیت مقداری است و به جهت بستگی ندارد.

☜ **نکته:** ضریب جابه‌جایی گرمایی: گاز < مایع

☜ **نکته:** ضریب جابه‌جایی گرمایی: جابه‌جایی آزاد < جابه‌جایی اجباری < جوشش < میعان

سیال و سیستم	$h\ (W/m^۲{}^\circ K)$
هوا در حالت جابه‌جایی طبیعی	۵ - ۲۵
هوا در حالت جابه‌جایی اجباری	۳۰ - ۳۰۰
آب در حالت جابه‌جایی اجباری	۳۰۰ - ۶۰۰۰
آب در حالت جوشش	۳۰۰۰ - ۶۰۰۰۰
آب در حالت میعان	۶۰۰۰ - ۱۲۰۰۰۰

جدول ۱ - ۱ - مقادیر تخمینی ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی

☜ **نکته:** در مجاورت سطح گرم جریان به سطح بالا حرکت می‌کند و در مجاورت سطح سرد جریان به سمت پایین حرکت می‌کند.

☜ **نکته:** در خلأ انتقال گرمای جابه‌جایی صورت نمی‌گیرد.

☜ **نکته:** بهترین روش جهت افزایش انتقال گرما زیاد کردن h است. وجود موانع روی سطح، سبب افزایش سطح انتقال، ایجاد تلاطم بیشتر و در نتیجه h بیشتر شده و انتقال گرما زیادتر می‌شود.

نکته: در قانون سرمایش نیوتن h مستقل از دما درنظر گرفته شده است اما داریم:

جابه‌جایی اجباری: h تقریباً مستقل از دما است.

جابه‌جایی آزاد: h تابعی از ΔT به توان $\frac{1}{3}$ تا $\frac{1}{2}$ است.

جوشش: h متناسب با توان سوم ΔT است.

۱ـ۵ـ انتقال گرمای تشعشعی

تشعشع نوعی انرژی است که از یک ماده به صورت امواج الکترومغناطیس (یا فوتون) خارج می‌گردد که حاصل تغییر در شکل الکترونیکی اتم‌ها یا مولکول‌ها است.

نکته: در انتقال گرمای هدایتی و جابه‌جایی محیط مادی مورد نیاز است ولی در انتقال گرمای تشعشعی چنین محیطی لازم نیست و می‌تواند در خلاء هم منتقل شود.

نکته: حداکثر انتقال گرمای تشعشعی زمانی صورت می‌گیرد که بین دو جسم خلأ کامل باشد.

کلیه اجسام در دمای بالاتر از صفر مطلق تشعشع گرمایی دارند. حداکثر تشعشع که توسط یک سطح با دمای مطلق T_s قابل صدور است با استفاده از قانون استفان ـ بولتزمن قابل محاسبه است:

$$q = A\sigma T_s^4 \qquad (۱۵-۱)$$

در معادله فوق σ ثابت استفان بولتزمن است و مقدار آن برابر $۵/۶۷ \times ۱۰^{-۸}\ W/m^۲K^۴$ است.

این سطح ایده‌آل فرضی که حداکثر تشعشع را حاصل می‌کند جسم سیاه می‌نامند توجه داشته باشید که تشعشع خروجی از کلیه سطوح حقیقی کمتر از تشعشع جسم سیاه با همان دما است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q = A\varepsilon\sigma T_s^4 \qquad (۱۶-۱)$$

در معادله فوق ε ضریب صدور سطح است و مقدار آن در محدوده $۰ < \varepsilon \leq ۱$ است.

انتقال گرمای تشعشعی خالص عبارت است از اختلاف بین نرخ تشعشع خروجی توسط سطح و تشعشع جذب شده.

هرگاه سطحی با ضریب صدور ε و سطح A و دمای مطلق T_s به وسیله سطح بزرگتری به دمای مطلق T_{sur} کاملاً پوشیده شده باشد و به وسیله گازی مانند هوا که هیچگونه تقابلی با تشعشع ندارد جدا شده باشد نرخ خالص انتقال گرمای تشعشعی بین دو سطح برابر خواهد بود با:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A\left(T_s^۴ - T_{sur}^۴\right) \qquad (۱۷-۱)$$

اگر بخواهیم معادله فوق را به شکل زیر بیان کنیم:

$$q_{rad} = h_r A(T_s - T_{surr}) \qquad (۱۸-۱)$$

ضریب انتقال گرمای تشعشعی h_r با استفاده از معادله (۱-۱۷) به شکل زیر خواهد شد:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{surr}^2)(T_s + T_{surr}) \qquad (۱۹-۱)$$

مبحث تشعشع در فصل ۱۲ به صورت خیلی کامل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱-۶- نکاتی در مورد روش‌های انتقال گرما

۱-انتقال گرما در مایعات ساکن به صورت هدایت و احتمالاً تشعشع انجام می‌شود و در مایعات جاری به صورت جابه‌جایی و احتمالاً تشعشع انجام می‌شود.

۲-انتقال گرمای تشعشعی فقط در دماهای بالا مطرح می‌شود.

۳-انتقال گرما در خلأ تنها با روش تشعشع قابل انجام است.

۴-انتقال گرما در جامدات تیره تنها با روش هدایت قابل انجام است و در جامدات غیر تیره با روش‌های هدایت و تشعشع قابل انجام است.

۵-تشعشع در مقایسه با هدایت یا جابه‌جایی آزاد قابل ملاحظه است ولی در مقایسه با جابه‌جایی اجباری ناچیز است.

۶-در دماهای خیلی بالا تشعشع در مقایسه با جابه‌جایی یا هدایت، مکانیزم اصلی انتقال گرما است.

۷-در گازها داریم:

الف) در دماهای بالا، جابه‌جایی و تشعشع، مکانیزم اصلی انتقال گرما هستند.

ب) در دماهای پایین، جابه‌جایی و هدایت، مکانیزم اصلی انتقال گرما هستند.

۸-در طراحی ظروف دو جداره بهترین روش طراحی به این صورت است که جهت جلوگیری از انتقال گرمای هدایتی و جابه‌جایی بین دو جداره، خلاء ایجاد شود و برای کاهش انتقال گرمای تشعشعی، سطوح داخلی به صورت آینه‌ای درست شود.

۹-برای اندازه‌گیری دمای اجسام خیلی دور از پیرومتر استفاده می‌شود که بر اساس رنگ (طول موج) نور رسیده کار می‌کند.

۱۰-برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی گازها از یک لایه نازک از گاز بین دو استوانه استفاده می‌شود.

مثال) کدام‌یک از انواع انتقال گرما در خلأ ممکن نمی‌باشند؟

۱) هدایت و جابه‌جایی ۲) هدایت و تابش

۳) تابش و جابه‌جایی ۴) جابه‌جایی، هدایت و تابش

حل) گزینه (۱) صحیح است.

۱ـ۷ـ قانون بقای انرژی

قانون بقای انرژی یا قانون اول ترمودینامیک در بسیاری از مسایل انتقال گرما کاربرد دارد و ما در اینجا آن را برای یک حجم کنترل و یک سطح کنترل بیان می‌کنیم.

۱ـ۷ـ۱ـ قانون بقای انرژی برای حجم کنترل

قانون بقای انرژی برای یک حجم کنترل در هر لحظه t به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \qquad (۲۰-۱)$$

$\dot{E}_{in}$: نرخ انرژی ورودی به حجم کنترل

$\dot{E}_{out}$: نرخ انرژی خروجی از حجم کنترل

$\dot{E}_{gen}$: نرخ انرژی تولید شده در حجم کنترل

$\dot{E}_{st}$: نرخ انرژی ذخیره شده در حجم کنترل $(\frac{dE_{st}}{dt})$

در حالت پایا: $\dot{E}_{st} = 0$

قانون بقای انرژی برای یک حجم کنترل در هر بازه زمانی Δt هم به شکل زیر بیان می‌شود:

$$E_{in} - E_{out} + E_{gen} = \Delta E_{st} \qquad (۲۱-۱)$$

انرژی‌های ورودی و خروجی پدیده‌های سطحی هستند این انرژی‌ها تنها در سطح کنترل مبادله شده و متناسب با سطح می‌باشند. انتقال گرما به روشهای هدایت، جابه‌جایی و تشعشع نمونه‌هایی از پدیده‌های سطحی هستند.

تولید انرژی و ذخیره انرژی پدیده‌های حجمی هستند این انرژی‌ها مربوط به داخل حجم کنترل بوده و متناسب با حجم می‌باشند.

تولید انرژی شامل تبدیل انواع انرژی‌های دیگر به انرژی گرمایی است ذخیره انرژی ناشی از تغییرات انرژی‌های داخلی، جنبشی و پتانسیل است.

توجه داشته باشید که اگر تغییر فاز داشته باشیم، عبارت گرمای نهان به بخش ذخیره انرژی اضافه شده و در صورت وجود اثرات هسته‌ای و شیمیایی آن را در بخش تولید انرژی منظور می‌کنیم.

مثال) یک جسم کروی از جنس مس با قطر $10\ cm$ و ضریب هدایت گرمایی $300\ W/mK$ مفروض است. در داخل این کره گرمایی برابر $30\ kW/m^3$ تولید می‌شود. با فرض اینکه ضریب جابه‌جایی $10\ W/m^2k$ و دمای محیط $25^\circ C$ باشد، دمای سطح جسم را تعیین کنید.

حل)

با استفاده از قانون بقای انرژی داریم:

$$E_{in} - E_{out} + E_{gen} = ۰ \quad \text{(حالت پایا)}$$

$$E_{gen} = \dot{q}V \quad , \quad E_{out} = q_{conv} \quad , \quad E_{in} = ۰$$

$$-h(T_s - T_\infty) \times ۴\pi r^۲ + \dot{q} \times \frac{۴}{۳}\pi r^۳ = ۰ \quad \Rightarrow \quad T_s = \frac{\dot{q}r}{۳h} + T_\infty$$

$$T_s = \frac{۳۰۰۰۰ \times ۰/۰۵}{۳ \times ۱۰} + ۲۵ = ۷۵^\circ C$$

مثال) گرما با (آهنگ) حجمی یکنواخت $q = ۱۰^۶ \, W/m^۳$ داخل میله‌ای بلند به شعاع $۵ \, mm$ تولید می‌شود. میله با هوای محیط در دمای $۲۵^\circ C$ تبادل گرمای جابه‌جایی (همرفتی) دارد. ضریب انتقال گرمای همرفتی (جابه‌جایی) $۱۰۰ \, W/m^۲K$ است. دمای سطح میله در شرایط پایا چقدر است؟

۱) $۳۵^\circ C$ ۲) $۴۵^\circ C$ ۳) $۵۰^\circ C$ ۴) $۷۵^\circ C$

حل)

$$q(\pi R^۲ L) - h(۲\pi RL)(T_s - T_\infty) = ۰$$

$$\Rightarrow \quad ۱۰^۶(۰/۰۰۵) - ۱۰۰(۲)(T_s - ۲۵) = ۰ \quad \Rightarrow \quad T_s = ۵۰^\circ C$$

گزینه (۳) صحیح است.

۱ـ۷ـ۲ـ قانون بقای انرژی برای سطح کنترل

در حالتی که قانون بقای انرژی را برای یک سطح کنترل به کار ببریم با توجه به اینکه سطح کنترل نه دارای جرم است نه حجمی را اشغال می‌کند، عبارتهای تولید و ذخیره انرژی از معادله قانون بقا حذف می‌شوند و در نتیجه خواهیم داشت:

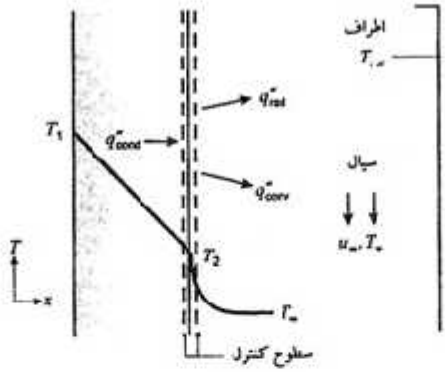
$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = ۰ \quad \text{یا} \quad \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \qquad (۲۲ - ۱)$$

معادله فوق هم برای حالت پایا و هم ناپایا صادق است.

توجه داشته باشید که در صورت وجود تولید انرژی در داخل ماده باز هم آن را در معادله فوق منظور نمی‌کنیم چون یک پدیده حجمی است.

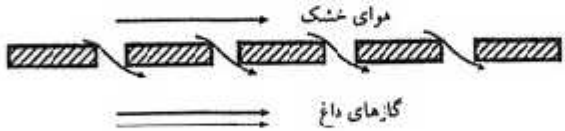
برای سطح کنترل نشان داده شده در شکل می‌توان قانون بقای انرژی را به شکل زیر بیان کرد:

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$



شکل ۱ ـ ۳

مثال) نمودار زیر یک روش برای خنک‌کردن دیواره محفظه احتراق در توربین‌های گازی را نشان می‌دهد. فرآیندهای انتقال حرارت را که به هنگام خنک‌شدن دیواره رخ می‌دهند مشخص نمایید. (مهندسی ازاد آزاد ۷۹)



q_1 = انتقال حرارت جابه‌جایی از پشت دیواره به هوای خنک

q_2 = انتقال حرارت جابه‌جایی از سوراخ‌ها (منافذ)

q_3 = انتقال حرارت تشعشعی از پشت دیواره به فضای اطراف

q_4 = انتقال حرارت تشعشعی از جریان گازهای داغ به دیواره

q_5 = انتقال حرارت تشعشعی از طرف جریان گازهای داغ

q_6 = انتقال حرارت تشعشعی از جداره‌های کانال حاوی جریان گازهای داغ به دیوار،

۱) $q_1 + q_2 + q_3 = q_4 + q_5$

۲) $q_1 + q_2 + q_4 = q_3 + q_5$

۳) $q_1 + q_2 + q_3 = q_5 + q_6$

۴) $q_1 + q_2 + q_3 = q_4 + q_5 + q_6$

حل)

$$q_{in} = q_۴ + q_۵ + q_۶ \quad , \quad q_{out} = q_۱ + q_۲ + q_۳$$

$$q_{in} = q_{out} \quad \Rightarrow \quad q_۴ + q_۵ + q_۶ = q_۱ + q_۲ + q_۳$$

گزینه (۴) صحیح است.

۱ ـ ۸ ـ خواص گرمایی مواد

خواص مورد استفاده در انتقال گرما عموماً به خواص ترموفیزیکی موسوم هستند که به دو گروه خواص انتقالی و خواص ترمودینامیکی تقسیم می‌شوند. خواص انتقالی مانند ضریب هدایت گرمایی و لزجت سینماتیکی و خواص ترمودینامیکی مانند ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی.
ضریب هدایت گرمایی در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت و ما در اینجا به برخی از خواص مهم دیگر می‌پردازیم.

۱ ـ ۸ ـ ۱ ـ ضریب گرمایی حجمی (ρC_p)

حاصل‌ضرب ρC_p به‌طور گسترده در تجزیه و تحلیل مسائل انتقال گرما کاربرد دارد. C_p و ρC_p هر دو معیاری از توانایی ذخیره گرمایی ماده هستند. C_p، این ظرفیت را برحسب واحد جرم و ρC_p، آن را برحسب واحد حجم بیان می‌کند.
در مورد مایعات و جامداتی که برای ذخیره انرژی به کار می‌روند عموماً $\rho C_p > ۱ MJ/m^۳K$ گازها به علت کم بودن چگالی‌شان مواد مناسبی برای ذخیره انرژی نیستند و عموماً $\rho C_p \approx ۱ kJ/m^۳K$

۱ ـ ۸ ـ ۲ ـ ضریب نفوذ گرمایی α

ضریب نفوذ گرمایی نیز به صورت گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل مسائل انتقال گرما و به خصوص انتقال گرمای گذرا کاربرد دارد و به صورت نسبت گرمای هدایت شده به گرمای ذخیره شده توسط واحد حجم تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \qquad (۲۳ ـ ۱)$$

هرچه α بیشتر باشد انتشار گرما در داخل ماده سریع‌تر است.
ضریب نفوذ گرمایی، معیاری از توانایی ماده در هدایت انرژی گرمایی در مقایسه با توانایی آن در ذخیره انرژی گرمایی است. اگر α یک ماده بزرگ باشد به سرعت به تغییرات شرایط گرمایی محیط خود پاسخ می‌دهد و سریعاً به حالت تعادل می‌رسد و برعکس اگر α کوچک باشد زمان لازم برای

رسیدن به تعادل زیاد است.

توجه: α برای فلزات در حدود $10^{-4} - 10^{-3}\ m^2/s$ و برای مواد عایق در حدود $10^{-6} - 10^{-7}\ m^2/s$ است.

مثال) ضریب نفوذگرمایی معرّف..... می‌باشد.

۱) شدت ذخیره‌سازی حرارت

۲) شدت انتقال حرارت به طریق هدایت

۳) نسبت هدایت حرارتی به ذخیره‌سازی حرارت

۴) نسبت شدت ذخیره‌سازی حرارت به هدایت حرارتی

حل) گزینه (۳) صحیح است.