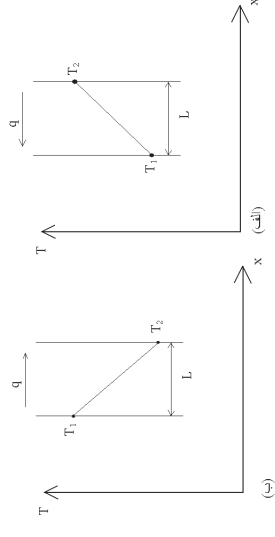


شدت انتقال حرارت هدایتی (مقدار گرمای منتقل شده در واحد زمان) متناسب با شیب دما در جسم و اندازه سطح عبور می‌باشد. هدایت حرارتی براساس قانون فوری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \quad (۱-۲)$$

شدت انتقال حرارت با واحد $\frac{J}{sec}$ یا w در سیستم SI
 K : ضریب هدایت حرارتی با واحد $\frac{W}{mc}$
 A : مساحت سطح عبور با واحد m^2

$\frac{dT}{dx}$: شیب دمایی با واحد $\frac{^{\circ}C}{m}$ (نسبت تغییرات دما به طول را نشان می‌دهد)
 در رابط (۱-۲) علامت منفی برای تطبیق جهت جریان گرما با شیب دمایی افزوده شده است. مطابق شکل (۱-۲) اگر شیب دما منفی باشد، جهت جریان گرما مثبت است و چنانچه شیب دما مثبت باشد، جریان گرما در جهت منفی خواهد بود.



شکل (۱-۲). هدایت حرارتی در دیواره

(الف) شیب دمایی مثبت، جهت جریان حرارت منفی
 (ب) شیب دمایی منفی، جهت جریان حرارت مثبت

انتقال گرما در حالت ثابت دمایی در تمام سطح یک جسم ثابت است بنابراین در حالت ثابت دمایی $\frac{dT}{dx}$ در تمام مقاطع جسم اندازه ثابتی دارد. بنابراین اگر A ثابت باشد، k در وضع

فصل دوم انتقال حرارت

انرژی حرارتی یا گرمای اجسام ناشی از جنبش و حرکت ذرات جسم است. این حرکت در مورد جامدات به صورت ارتعاش اتم‌ها یا مولکولهای درون شبکه جسم می‌باشد. در مورد گازها حرکت ذرات گاز است که محتوای انرژی حرارتی یا انرژی داخلی آن را تعیین می‌کند. براساس اصل دوم ترمودینامیک چنانچه قسمتی از یک سیستم نسبت به قسمتهای دیگر آن اختلاف دما داشته باشد، انرژی حرارتی از نقاط گرم به طرف نقاط سرد جریان می‌یابد.

۱-۲ - شیوه‌های انتقال حرارت

انتقال حرارت ممکن است به سه روش هدایت (conduction)، جا به جایی (convection) و تابشی (Radiation) انجام گیرد. در بیشتر مسائل کاربردی انتقال حرارت به صورت ترکیبی از دو یا سه روش می‌باشد.

۱-۲-۱ - هدایت (رسانش)

اگر دمای قسمتی از جسم نسبت به نواحی دیگر آن بالاتر باشد، حرارت از قسمت‌های گرم به سمت نواحی سرد جریان می‌یابد. این پدیده هدایت حرارتی نامیده می‌شود.

ذرات دمای مستقل از دماست و $\frac{dT}{dx}$ گراویان دما برای تمام مقاطع یکسان می‌باشد. بنابراین قانون فوریه به صورت ساده زیر در می‌آید:

$$q = KA \frac{T_1 - T_2}{L}$$

۱-۱-۲-۲- تعریف ضریب هدایت حرارتی K

ضریب هدایت حرارتی جسم عبارتست از نسبت شدت انتقال حرارت به سطح مقطعی از جسم که بر امتداد جریان حرارت عمود باشد، به شرط آنکه گراویان دمای برابر واحد باشد:

$$K = - \frac{q}{A \left(\frac{dT}{dx} \right)}$$

ضریب هدایت حرارتی (گرمای رسانایی) یک خاصیت مهم حرارتی اجسام است و به نوع جسم و شرایط آن بستگی دارد. هر چه مقدار ضریب هدایت حرارتی بیشتر باشد، جسم هادیتر و رسانایی بهتر حرارت خواهد بود و هر چه مقدار k کمتر باشد جسم عایق‌تر است.

نکاتی در مورد ضریب هدایت حرارتی:

- ۱) مقدار ضریب هدایت حرارتی فلزات بالاست و برای توره بیش از $400 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ می‌باشد.
- ۲) ضریب هدایت اجسام تابع دمای جسم است و با تغییر دما مقدار آن تغییر می‌کند.
- ۳) در دما 20°C - مقدار ضریب گرما رسانایی اجسام بسیار افزایش می‌یابد و اجسام تبدیل به ابر رسانا می‌شوند.
- ۴) ضریب هدایت حرارتی بیشتر انواع فولاد با تغییر دما تغییرات چندانی نمی‌کند و حدود $20 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ثابت می‌ماند.
- ۵) ضریب هدایت حرارتی بیشتر مایعات به جز آب با تغییر دما چندان تغییر نمی‌کند و حدود $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ثابت می‌ماند.
- ۶) ضریب هدایت حرارتی بیشتر گازها با افزایش دما بالا می‌رود. مقدار تقریبی آن در دماهای معمولی کمتر از $0.1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ است.
- ۷) ضریب هدایت حرارتی آب حدود $0.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ است. با افزایش دما تا 140°C مقدار آن بالا می‌رود و به $0.88 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ می‌رسد و سپس با افزایش دمای بیشتر مقدار آن کاهش می‌یابد.

۱-۱-۲-۲- ضریب نفوذ (بخش) حرارتی α

یکی دیگر از خواص مهم حرارتی اجسام، ضریب نفوذ حرارتی یا ضریب بخش حرارتی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{K}{\rho CP} \quad (2-2)$$

α نشان دهنده سرعت بخش و انتشار گرما و توده جسم است هر چه مقدار α بیشتر باشد.

گرمای سرریز بخش می‌شود.

۱-۲-۱-۲- جا به جایی

اگر سطحی در دمای T_w در مجاورت سیالی با دمای T_∞ قرار گیرد، میان سطح و سیال گرما مبادله می‌شود. این پدیده را وژش، جا به جایی یا همرفت می‌گویند. چنانچه سطح نسبت به سیال گرمتر باشد، انتقال حرارت جا به جایی از سطح به سیال صورت می‌پذیرد و اگر سیال نسبت به سطح گرمتر باشد، آن گاه انتقال حرارت جا به جایی از سیال به سطح روی می‌دهد.

مکانیسم تبادل انرژی به صورت برخورد مولکولهای سیال به سطح و تبادل انرژی حرارتی میان آن‌هاست. شدت انتقال حرارت جا به جایی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (3-2)$$

۱: شدت انتقال حرارت (J/sec یا W)

A: مساحت سطح تماس (m^2)

$(T_w - T_\infty)$: اختلاف دمای سطح و سیال ($^\circ\text{C}$)

h: ضریب انتقال حرارت جا به جایی ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)

رابطه (۳-۲) به قانون سومایش نیوتون معروف است.

۱-۲-۱-۲- ضریب انتقال حرارت جا به جایی h

ضریب انتقال حرارت جا به جایی، خاصیتی از سیال مورد مطالعه و یا سطح همجوار آن نیست و نمی‌توان مانند ضریب هدایت حرارتی (k) آن را یک خاصیت جسم دانست. برای تعیین h به تنها اطلاعات کاملی از جنس (ρ), خواص حرارتی (k, α, ρ, T) و خواص حرکتی

(Re, Pr, ν) سیال لازم است، بلکه اشکال مختلف هندسی سطح همجوار و وضعیت‌های گوناگون فیزیکی آنها نسبت به یکدیگر نیز در مقدار h موثرند.

۲-۲-۲- انواع جا به جایی

۱) جا به جایی اجباری: چنانچه سیال نسبت به سطح توسط عامل خارجی به حرکت در آید، جا به جایی را اجباری گویند.
 ۲) جا به جایی آزاد یا طبیعی: چنانچه سیال نسبت به سطح همجوار جریان اجباری نداشته باشد، جا به جایی را طبیعی یا آزاد گویند. در این حالت نیز سیال به دلیل وجود اختلاف دما در لایه‌های آن، حرکت می‌کند.
 ۳) انتقال حرارت با تغییر فاز: در این حالت نیز در اثر انتقال حرارت میان سیال و سطح همجوار آن، سیال به خاطر تبادل حرارت (گرفتن یا دادن حرارت) تغییر فاز می‌دهد.

۲-۲-۳- تابش

همه اجسام به خاطر دمایشان از خود انرژی منتشر می‌کنند. این پدیده را تابش حرارتی یا تشعشع حرارتی می‌گویند. تابش حرارتی نوعی از امواج الکترومغناطیسی است که طول موج آن بین $0.7 \mu m$ تا $100 \mu m$ می‌باشد. شدت انرژی حرارتی منتشر شده از هر سطح را می‌توان از قانون استفان بولتزمن به دست آورد:

$$E_b = \delta T^4 \quad (2-24)$$

δ به ثابت استفان بولتزمن معروف است و مقدار آن در $\frac{W}{m^2 K^4}$ در $5/6697 \times 10^{-8}$ می‌باشد.

رابطه (2-24) برای سطح ایده آل یا جسم سیاه به کار می‌رود، برای اجسام حقیقی داریم:

$$q = \epsilon \delta T^4 \quad (2-25)$$

ϵ ضریب نشر تابشی سطح است، مقدار عددی آن بین صفر و یک می‌باشد. برای جسم سیاه $\epsilon = 1$ است.

در حالتی که انتقال حرارت تشعشعی بین دو سطح و یا سطح و محیط صورت پذیرد و گازی که در فضای مابین دو سطح قرار دارد، تأثیری بر روی میزان انتقال حرارت نداشته باشد، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$q = \delta h (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-26)$$

انتقال انرژی توسط هدایت یا جا به جایی به محیط مادی نیاز دارد، ولی تشعشع حرارتی نیازمند چنین محیطی نیست و بهترین حالت برای تشعشع زمانی است که تابش در خلأ صورت پذیرد.

توجه: جریان‌های حرارتی (هدایت، تابش، همرفت) را می‌توان مشابه جریان الکتریکی دانست، بنابراین همانند قانون اهم، می‌توان مقاومت هدایتی، مقاومت تابشی و مقاومت جا به جایی را به صورت زیر تعریف نمود:

$$R = \frac{L}{KA} \quad \text{مقاومت هدایتی} \quad (2-27)$$

$$R = \frac{1}{hA} \quad \text{مقاومت جا به جایی} \quad (2-28)$$

$$R = \frac{1}{AF_{1-2}} \quad \text{مقاومت تابشی} \quad (2-29)$$

F_{1-2} ضریب شکل سطح ۱ نسبت به ۲ است و نشان می‌دهد که از کل انرژی حرارتی نشر شده از هر سطح، چه کسری از آن به سطح دیگر برخورد می‌کند.

۲-۲-۴- تشریح مولکولی هدایت حرارتی

در گازها دمای هر نقطه به انرژی مولکولهای گاز در مجاورت آن نقطه وابسته است، این انرژی به حرکت تصادفی، انتقال و همچنین به حرکتهای چرخشی و ارتعاشی درونی مولکولها ارتباط دارد. علاوه بر این دماهای بالاتر همراه با انرژیهای مولکولی زیادتر است و هنگام برخورد مداوم مولکولهای مجاور به یکدیگر انرژی از مولکولهای پر انرژی به مولکولهای کم انرژی منتقل می‌شود. در صورت وجود گرادیان دما، انتقال انرژی به طریق هدایت در جهت کاهش دما رخ می‌دهد. در مایعات نیز مکانیسم هدایت همانند گازهاست، فقط با این تفاوت که فاصله مولکولها کمتر و فعالتهای مولکولی قویتر و بیشتر هستند.

در جامدات هدایت به فعالیتهای اتمی و به شکل ارتباطات شبکه‌های نسبت داده می‌شود. در یک جسم غیرهادی انرژی منحصراً توسط این امواج شبکه‌ای انتقال می‌یابد، در حالی که در اجسام رسانا علاوه بر امواج شبکه‌ای، الکترونها نیز در انتقال حرارت نقش دارند.

نکته: چون فضای بین مولکولی در حالت سیال خیلی بزرگتر است و مولکولها حرکت تصادفی زیادتری نسبت به حالت جامد انجام می‌دهند، انتقال انرژی گرمایی در حالت سیال نسبت به حالت

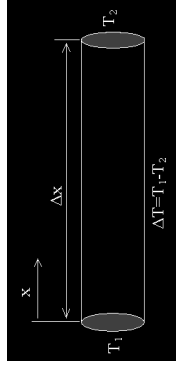
جامد کمتر است. بنابراین ضریب هدایت حرارتی گازها و مایعات به طور کلی کمتر از جامدات است.

۳-۲- بررسی معادلات اساسی هدایت

۳-۲-۱- معادله شدت هدایت حرارتی

قانون فوریه یک قانون پدیده شناسی است. یعنی از پدیده‌های تجربی و نه از مفاهیم اولیه، استخراج می‌شود. بنابراین معادله شدت هدایت تعمیمی از مشاهدات تجربی است.

برای میله‌ای استوانه‌ای که سطح جانبی آن عایق کاری شده است، ولی سطوح قائدهای آن در دماهای متفاوت ($T_1 > T_2$) نگه داشته شده‌اند، اختلاف دما باعث هدایت گرما در جهت مثبت x می‌شود.



شکل (۳-۲). هدایت گرمایی در حالت دایم

مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که: $\Delta T = T_1 - T_2$

(۱) با ثابت نگه داشتن ΔT ، Δx و تغییر مقدار A یا q ، A نسبت مستقیم دارد.

(۲) با ثابت نگه داشتن A ، ΔT و تغییر مقدار Δx یا q ، Δx نسبت عکس دارد.

(۳) و اگر A ، Δx ثابت باشند و ΔT تغییر کند، q با ΔT نسبت مستقیم دارد.

نتیجه مشاهدات فوق به این صورت بیان می‌شود:

$$q \approx A \frac{dT}{dx}$$

با تغییر دادن دما، ماده مورد بررسی تناسب فوق برقرار می‌ماند، ولی برای مقادیر ثابت A ، ΔT ، Δx مقدار q برای مواد مختلف تغییر می‌کند. با قرار دادن ضریب هدایت حرارتی که از خواص مهم ماده است، تناسب فوق به تساوی تبدیل می‌شود.

$$q = -KA \frac{dT}{dx}$$

با توجه به توضیحات داده شده:

(۱) شارگرها یک کمیت برداری است (یعنی دارای جهت است)
 $(۱-۲) \quad q'_x = \frac{dQ}{A} = -K \frac{dT}{dx}$

(۲) قانون فوریه در مورد سه حالت ماده (جامد، مایع، گاز) صادق است.

(۳) قانون فوریه یک قانون تجربی است.

با توجه به اینکه شارگر ما یک کمیت برداری است، بیان کلی تر معادله قانون فوریه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(۱-۱-۲) \quad q' = -k \nabla T = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} i + \frac{\partial T}{\partial y} j + \frac{\partial T}{\partial z} k \right)$$

∇ : عملگر سه بعدی دل

x, y, z : میدان مکانی اسکالر

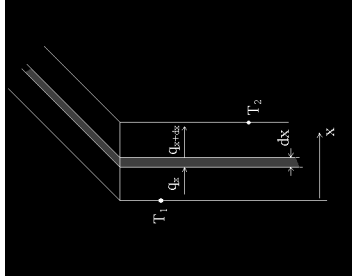
نکته: بردار شار گرمایی دارای جهتی عمود بر سطح ایزوترم (همدمای) است.

۳-۲-۲- معادله کلی هدایت حرارتی یک بعدی تیغهای

شکل (۳-۲) مدل هدایت حرارتی در یک تیغه را نشان می‌دهد. ضریب هدایت حرارتی جسم k و ضخامت تیغه L است. شدت تولید حرارت در جسم q' می‌باشد. معادله توازن انرژی برای جزء dx به صورت زیر است:

$$(۱۲-۲) \quad q_{in} + q_{gen} = q_{out} + q_{abs}$$

تغییر انرژی داخلی + حرارت خروجی = حرارت تولیدی + حرارت ورودی



شکل (۲-۱۷): هدایت حرارتی یک بعدی دیواره

هر یک از جملات را به دست می آوریم:

$$q_{in} = -KA \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$Q_{gen} = q' A dx$$

$$Q_{out} = -KA \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+dx} = -KA \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \right)$$

$$q_{abs} = A dx \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

با جاگذاری روابط فوق در رابطه توازن انرژی داریم:

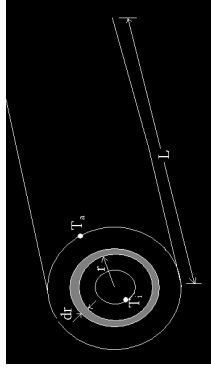
$$-KA \frac{\partial T}{\partial x} + q' A dx = -KA \frac{\partial T}{\partial x} - KA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx + A dx \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

با تقسیم طرفین تساوی به $K A dx$ و جاگذاری α با $\frac{K}{\rho c_p}$ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q'}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۲-۱۷)$$

۲-۳-۲- معادله کلی هدایت حرارتی یک بعدی استوانه

با توجه به شکل لوله به ضخامت dr در فاصله r از مرکز استوانه را بررسی می کنیم. معادله توازن انرژی را برای جزء لوله می نویسیم:



شکل (۲-۱۸): هدایت حرارتی یک بعدی در استوانه

$$q_{in} + q_{gen} = q_{out} + q_{abs}$$

$$A = 2\pi r L$$

$$r < L$$

$$q_{in} = -K \pi r L \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$q_{gen} = 2\pi r L q'$$

$$q_{out} = -k 2\pi r L \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r+dr} = -2\pi k L \left[r \frac{\partial T}{\partial r} + \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) dr \right]$$

$$q_{abs} = 2\pi r L dx \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

با جاگذاری و ساده کردن داریم:

$$-2\pi r L K \frac{\partial T}{\partial r} + 2\pi r L q' = -2\pi k L \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) dr$$

$$+ 2\pi r L K \frac{\partial T}{\partial r} + 2\pi r L q' = -2\pi k L r \frac{\partial T}{\partial r} - 2\pi k L \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) dr$$

$$+ 2\pi r L dx \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

با ساده سازی و تقسیم طرفین تساوی بر $2\pi r L K dx$ و جاگذاری $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ داریم:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q'}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱۴-۲)$$

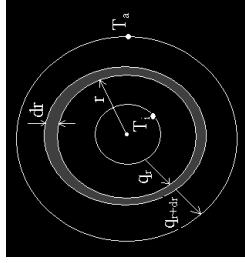
۴-۳- معادله کلی هدایت حرارتی یک بعدی کره‌ای

جزء مورد بررسی یک پوسته کره‌ای به ضخامت dr می‌باشد.

$$A = 4\pi r^2$$

معادله توازن انرژی را برای جزء مورد نظر می‌نویسیم:

$$q_{in} + q_{gen} = q_{out} + q_{abs}$$



شکل (۵-۲). هدایت حرارتی یک بعدی کره‌ای

هر یک از جملات را به دست می‌آوریم:

$$q_{in} = -K 4\pi r^2 \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$q_{gen} = 4\pi r^2 dr q'$$

$$q_{out} = -K 4\pi r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r+dr} = -4\pi k (r^2 + r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}) dr$$

$$q_{abs} = 4\pi r^2 dr \pi p \frac{\partial T}{\partial t}$$

با جایگذاری جملات در معادله توازن انرژی داریم:

$$\begin{aligned} -4\pi r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} + 4\pi r^2 dr q' &= \\ = -4\pi k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} - 4\pi k (2r \frac{\partial T}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}) dr + 4\pi r^2 dr \pi p \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

با ساده کردن و تقسیم طرفین بر $4\pi r^2 k dr$ و جایگذاری $\alpha = \frac{k}{\rho c p}$ رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q'}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱۵-۲)$$

۲-۴- هدایت حرارتی در دیوارهای مرکب

برای دیواره مرکب نشان داده شده در شکل (۶-۲) که متشکل از سه لایه با ضریب هدایت

حرارتی k_1, k_2 و k_3 داریم:

$$q = K_1 A \frac{(T_1 - T_2)}{x_1} \Rightarrow T_1 - T_2 = \frac{x_1}{K_1 A} q$$

$$q = K_2 A \frac{(T_1 - T_2)}{x_2} \Rightarrow T_1 - T_2 = \frac{x_2}{K_2 A} q$$

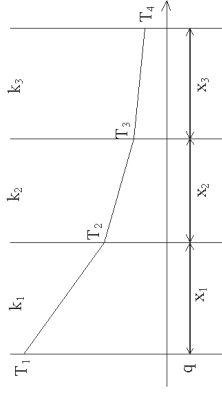
$$q = K_3 A \frac{(T_3 - T_4)}{x_3} \Rightarrow T_3 - T_4 = \frac{x_3}{K_3 A} q$$

با جمع سه رابطه فوق، معادله زیر به دست می‌آید:

$$T_1 - T_4 = \left(\frac{x_1}{K_1 A} + \frac{x_2}{K_2 A} + \frac{x_3}{K_3 A} \right) q \quad (۱۶-۲)$$

یا:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{x_1}{K_1 A} + \frac{x_2}{K_2 A} + \frac{x_3}{K_3 A}} \quad (۱۷-۲)$$

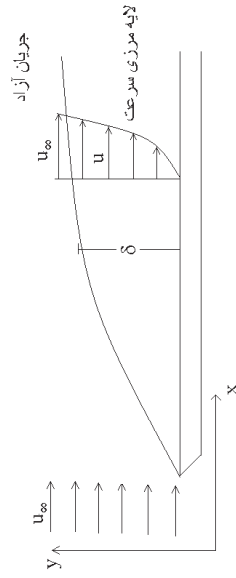


شکل (۲-۷). انتقال حرارت در دیواره مرکب

۲-۵-۵- لایه‌های مرزی به جایی

۲-۵-۵-۱- لایه مرزی سرعت

در جریان سیال روی یک صفحه تخت سرعت ذرات سیالی که با سطح در تماس‌اند صفر است. این ذرات، حرکت ذرات موجود در لایه سیال مجاور را کُند می‌کنند و به تدریج خود روی حرکت ذرات لایه بعدی تأثیر می‌گذارند و این پدیده تا فاصله $\delta = \lambda$ نسبت به سطح که در آن از این اثر صرف نظر می‌شود، ادامه دارد. کُند شدن حرکت سیال به تنش‌های برشی (τ) که در جهت موازی با سرعت سیال بر صفحات وارد می‌شوند، نسبت داده می‌شود.



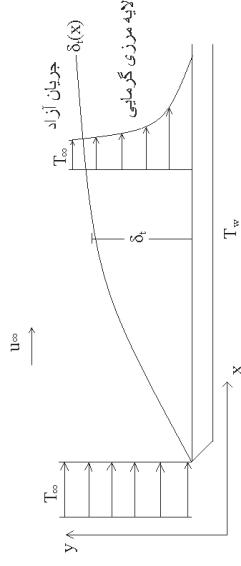
شکل (۲-۸). ایجاد لایه مرزی سرعت روی یک صفحه تخت

با افزایش فاصله λ نسبت به سطح، مولفه X سرعت سیال (u) در جریان آزاد افزایش می‌یابد. کمیت δ ضخامت لایه مرزی نام دارد و به صورت مقدار λ در $u = 0.99u_{\infty}$ تعریف شده است.

بنابراین، جریان سیال به وسیله دو ناحیه متمایز مشخص می‌شود. لایه نازک سیال (لایه مرزی) که در آن گرادینت سرعت و تنش برشی بزرگ هستند و ناحیه خارج از لایه مرزی که در آن از گرادینت سرعت و تنش برشی صرف نظر می‌شود. چون این لایه مرزی به سرعت سیال مربوط است، لایه مرزی سرعت نامیده می‌شود.

۲-۵-۳- لایه مرزی گرمایی

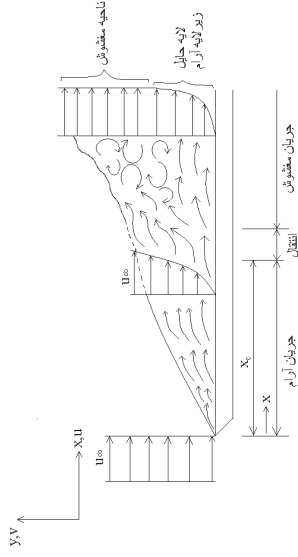
نظیر لایه مرزی سرعت که با عبور جریان سیال از روی سطح ایجاد می‌شود، لایه مرزی گرمایی نیز هنگامی به وجود می‌آید که دماهای سطح و جریان آزاد سیال متفاوت باشند. وقتی سیال روی یک صفحه تخت همدما جریان دارد، در لبه ابتدایی پروفایل دما یکپارخت می‌باشد و رابطه $T(y) = T_{\infty}$ برقرار است. ولی ذرات سیالی که در لبه تماس با صفحه قرار دارند، به تعادل گرمایی در دمای سطح صفحه می‌رسند. با تبادل انرژی بین این ذرات و ذرات لایه مجاور، گرادینت دما در سیال ایجاد می‌شود. ناحیه‌ای از سیال که این گرادینت دما وجود دارد لایه مرزی گرمایی نامیده می‌شود و ضخامت آن (δ_t) برابر مقدار λ در $\frac{T_w - T}{T_w - T_{\infty}} = 0.99$ است. با افزایش فاصله نسبت به لبه ابتدایی، تأثیرات انتقال گرما هر چه بیشتر به داخل جریان آزاد نفوذ کرده، لایه مرزی گرمایی ریشه می‌کند.



شکل (۲-۹). ایجاد لایه مرزی گرمایی روی صفحه تخت همدما

۳-۲- جریان آرام و معشوش

در لایه مرزی آرام، حرکت سیال منظم است و حتی می توان خطوط جریان را که ذرات سیال در ابتداء آنها حرکت می کنند مشخص نمود. حرکت سیال در لایه مرزی معشوش کاملا نامنظم است و با نوسانات سرعت مشخص می شود. همگانه که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است، لایه مرزی ابتدا آرام است، ولی در فاصله ای از لبه ابتدایی آشفتگی ها تقویت شده، به جریان معشوش تبدیل می شود.



شکل (۳-۲) ایجاد لایه مرزی سرعت روی یک صفحه تخت

نوسانات سیال در ناحیه انتقال شروع می شود و لایه مرزی کاملا معشوش می شود. در ناحیه کاملا توسعه یافته، شرایط جریان با حرکت سه بعدی و کاملا تصادفی توده های نسبتا بزرگ سیال مشخص می شوند و تبدیل به جریان معشوش در این ناحیه با افزایش قابل توجه ضخامت لایه مرزی، تنش برشی دیوار و ضریب جا به جایی همراه است.

لایه مرزی معشوش به سه ناحیه تقسیم می شود:

۱) زیر لایه آرام: انتقال ناشی از پدیده پخش است و در این ناحیه بروقابل سرعت تقریبا خطی است.

۲) لایه حائل: در این ناحیه پدیده پخش و اختلاط ناشی از اغتشاش قابل مقایسه اند.

۳) منطقه معشوش: انتقال فقط ناشی از اغتشاش جریان است.

برای محاسبه رفتار لایه مرزی فرض می کنیم، تبدیل در نقطه ای نظیر x_c شروع می شود این نقطه توسط گروه بی بعدی از متغیرها که عدد رینولدز نام دارد، تعیین می شود:

$$Re_x = \frac{\rho u_{\infty} x}{\mu} \quad (۱۸-۲)$$

طول مشخصه x فاصله از لبه ابتدایی است. عدد رینولدز بحرانی، مقداری از Re_x است که در آن تبدیل شروع می شود و برای جریان روی صفحه تخت از 10^5 تا 3×10^6 تغییر می کند، که این مقدار به زبری سطح و میزان اغتشاش جریان آزاد بستگی دارد. مقدار قراردادی $Re_x = 5 \times 10^5$ معمولا برای محاسبات لایه مرزی به کار می رود.