آشنایی با انتقال حرارت

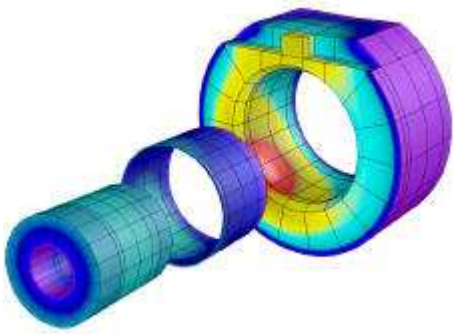
Introduction to Heat Transfer

- برای آشنایی دانشجویان با این درس، مختصری از مبحث انتقال حرارت به همراه برخی کاربردهای جالب آن معرفی می گردد.

[Pick the date]

دانشکده مکانیک

دکتر علی جباری مقدم



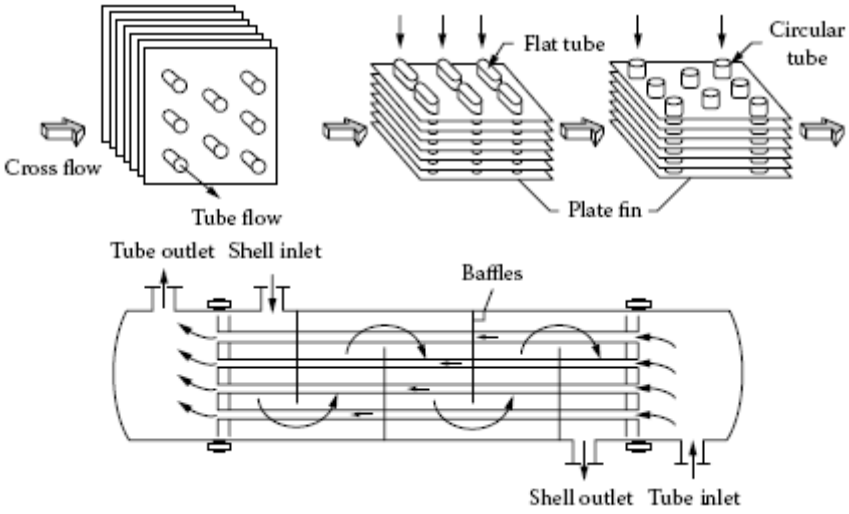
انتقال حرارت

انتقال حرارت یکی از دروس اصلی رشته مهندسی مکانیک است که به مطالعه انتقال انرژی گرمایی از یک جسم یا ناحیه ای مشخص به جسم یا ناحیه ای دیگر پرداخته و پدیده های فیزیکی و کاربردهای مرتبط با آنرا بررسی می کند. به طور کلی انتقال حرارت در نتیجه ی وجود اختلاف دما صورت می گیرد.

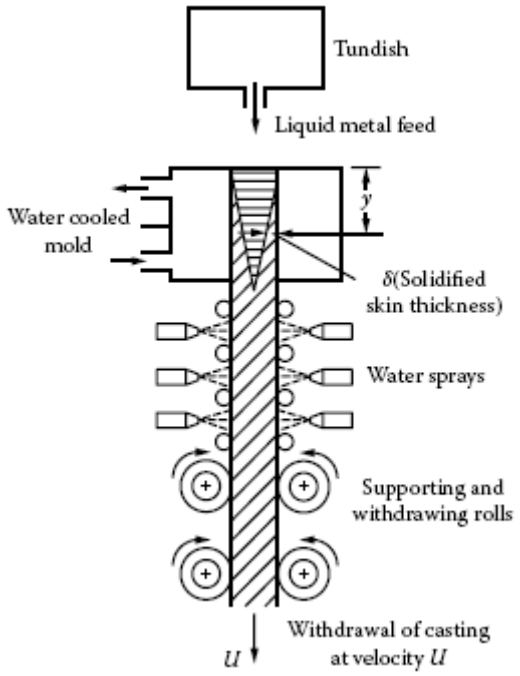
- انتقال گرما در مبدلهای حرارتی[1]
- سرخ کردن سیب زمینی
- عملیات حرارتی[2] فولادها
- گرمای اتلافی از نیروگاهها
- رادیاتورهای خانگی و صنعتی
- خنک کردن ترانسفورماتورهای برق
- کاربرد مواد نسوز[3] (دیرگداز) در صنعت
- سرد کردن هوای فشرده شده پس از هر مرحله[4] کمپرسور
- لوله گرمایی[5]
- عایقهای حرارتی
- روشهای مهار انقباض – انبساط گرمایی در صنعت
- خنک کردن قطعات کامپیوتر

نمونه هایی از موارد کاربرد انتقال حرارت در زندگی و صنعت بیان گردید که به همراه تصاویر زیر، کمک می کند تا اهمیت بحث انتقال گرما روشن تر شود.

[1] Heat Exchanger
[2] Heat Treatment
[3] Refractory
[4] Stage
[5] Heat Pipe

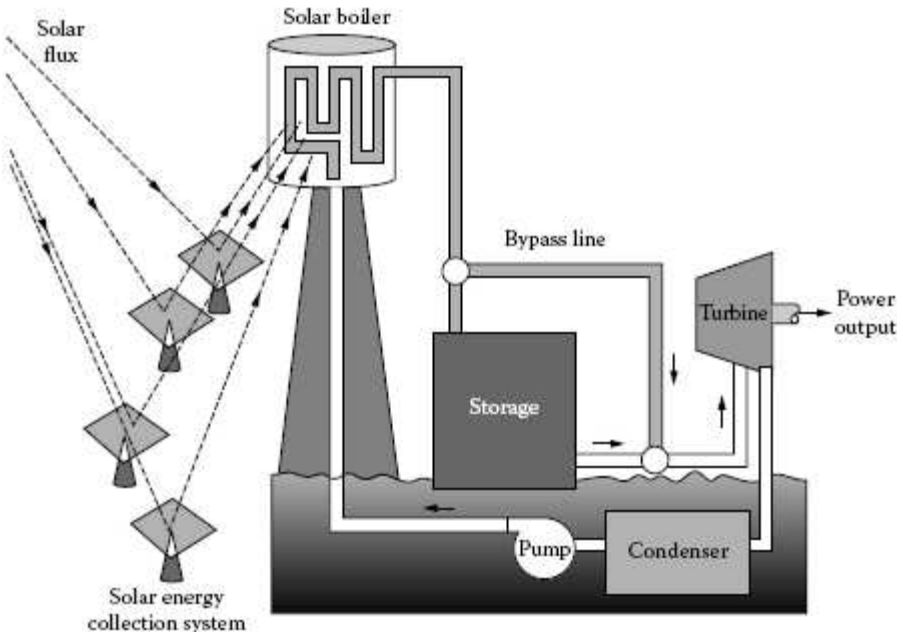


شکل (1) نمونه هایی از مبدلهای حرارتی

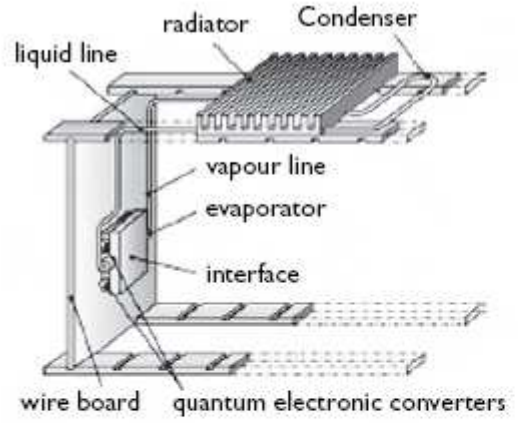


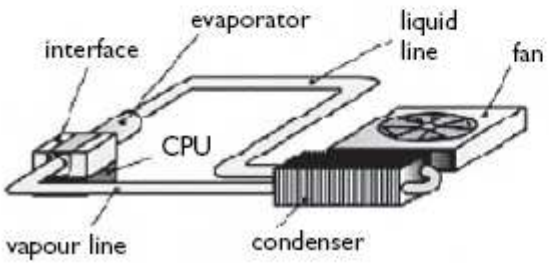
شکل (2) ریخته گری پیوسته[1]

[1] Continous Casting



شکل (3) نیروگاه خورشیدی





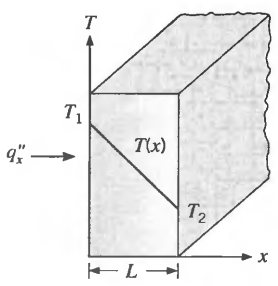
شکل (4) خنک کننده از نوع لوله گرمایی برای سی پی یو کامپیوتر

مکانیزم یا مود[1] انتقال گرما بر سه نوع است :

(1) هدایت یا رسانش[2]

در انتقال حرارت به شیوه هدایت، ماده واسطه یا جسم حرکتی ندارد و گرما بوسیله ارتعاشات ملکولی و حرکت الکترونهای آزاد از ذرات پرانرژی تر ماده به ذرات کم انرژی تر آن منتقل می شود. بنابراین انتقال حرارت هدایتی، در سطوح میکروسکوپی و ملکولی انجام می گیرد و حرکت ماده نقشی در آن ندارد. میزان هدایت حرارتی توسط قانون هدایت حرارتی فوریه[3] بیان می گردد.

در وضعیت یک بعدی صفحه تختی که دو سمت آن دارای اختلاف دما است این معادله بصورت زیر نوشته می شود :



شکل (5)

$$q''_x = -k\frac{dT}{dx}$$

$q''_x =$ فلاکس گرمایی[4] یا شدت انتقال گرما در راستای x در واحد سطح عمود بر راستای انتقال $\left(W/m^2\right)$.

$\frac{dT}{dx} =$ گرادیان دما[5] در راستای x.

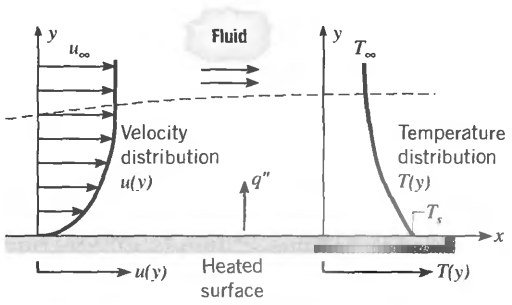
$k =$ رسانش گرمایی[6] یا ضریب هدایت گرمایی ماده $\left(W/m.K\right)$.

(2) جابجایی یا همرفت[7]

انتقال حرارت به شیوه جابجایی بطور کلی شامل دو مکانیزم می باشد. علاوه بر انتقال انرژی بوسیله حرکتهای تصادفی ملکولی (دیفیوژن یا نفوذ[8])، انرژی توسط حرکت توده ای

[1] Mode
[2] Conduction
[3] Fourier's Law
[4] Heat Flux
[5] Temperature Gradient
[6] Thermal Conductivity
[7] Convection
[8] Diffusion

سیال(ادوکسیون[1]) نیز منتقل می شود. به مجموع این دو مکانیزم، جابجایی یا کنوکسیون می گویند.



شکل (6)

درصورتیکه سیالی از روی یک سطح ساکن گرمتر عبور کند بدلیل اختلاف سرعت سیال و صفحه، ذرات سیال نزدیک صفحه کندتر و ذرات سیال دورتر از صفحه تندتر حرکت خواهند کرد ضمن اینکه ذرات سیال چسبیده به سطح $(y=0)$ ساکن خواهند بود.

بعبارت دیگر بدلیل اختلاف سرعت سیال و صفحه، یک پروفیل سرعت در امتداد y تشکیل می شود که از مقدار صفر در سطح تا سرعت جریان آزاد (u_∞) امتداد دارد. بطور مشابه بدلیل اختلاف دمای سیال و صفحه، یک پروفیل دما در امتداد y تشکیل می شود. بنابراین بطور همزمان یک لایه مرزی هیدرودینامیکی و یک لایه مرزی گرمایی در روی سطح بوجود می آید که لزوما با هم برابر نیستند. با این توضیح مختصر مشخص می شود که گرمای انتقالی از صفحه به سیال جاری، نخست بوسیله مکانیزم دیفیوژن از طریق ذرات سیال چسبیده به سطح (که ساکن هستند) وارد محیط سیال می شود و سپس بوسیله مکانیزم ادوکسیون، از طریق ذرات سیال متحرک به پایین دست برده می شود. لازم به یادآوری است که دیفیوژن در نزدیکی سطح یک مکانیزم غالب محسوب می شود همچنانکه ادوکسیون در نقاط دور از سطح، مکانیزم غالب می باشد.

معادله شدت انتقال گرمای جابجایی که به قانون سرمایش نیوتن[2] شهرت دارد چنین بیان می شود :

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

q'' = فلاکس گرمایی $\left(W/m^2\right)$.

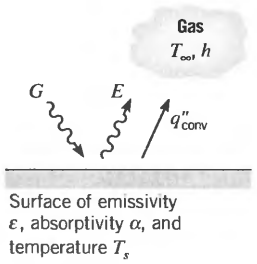
h = ضریب انتقال گرمای جابجایی $\left(W/m^2.K\right)$. این ضریب بستگی به هندسه سطح، خواص سیال و نوع جریان دارد.

[1] Advection
[2] Newton's Law of Cooling

(3) تشعشع یا تابش[1]

تابش گرمایی عبارت است از انرژی گرمایی منتشر شده توسط ماده ای که دمایی غیر از صفر دارد. ماده منتشر کننده انرژی می تواند جامد، مایع یا گاز باشد. انرژی تابشی بوسیله امواج الکترومغناطیسی منتشر می شود ازاینرو تابش گرمایی نیاز به ماده واسطه یا انتقال دهنده انرژی ندارد، چنانکه انرژی تابشی خورشید از میان خلا به زمین می رسد. در واقع هرچه ماده واسطه کمتر یا رقیقتر باشد انتقال انرژی تابشی بهتر صورت می گیرد.

مطابق شکل تابش منتشر شده توسط سطح را در نظر بگیرید که از انرژی گرمایی ماده احاطه شده توسط سطح سرچشمه می گیرد. نرخ انرژی آزاد شده در واحد سطح $\left(W/m^2\right)$ توان صدور سطح E نامیده می شود.



شکل (7)

قانون استفان-بولتزمن[2] حد نهایی توان صدوری را مشخص می کند:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

که T_s دمای مطلق سطح (K) و $\sigma = 5.67\times10^{-8} W/m^2.K^4$ ثابت استفان-بولتزمن نامیده می شود.

چنین سطحی **تابش کننده ایده ال** یا **جسم سیاه** نام دارد.

فلاکس گرمایی منتشر شده توسط یک سطح واقعی ، کمتر از جسم سیاه در همان دما است :

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4$$

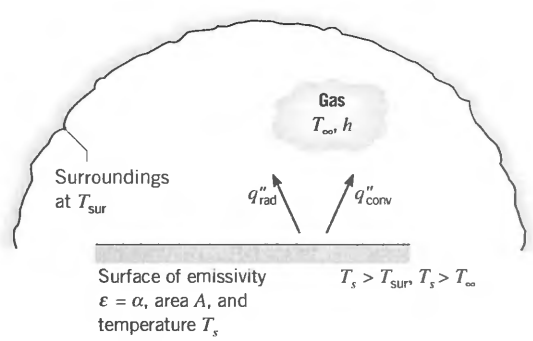
که ε خاصیت تابشی سطح و ضریب صدور[3] نام دارد و معیاری است از کارآیی صدور انرژی توسط سطح نسبت به جسم سیاه $(0 \le \varepsilon \le 1)$. ضریب صدور بشدت وابسته است به جنس و پرداخت سطح.

تابش ممکن است از محیطش نیز بر روی سطح وارد آید. این تابش می تواند از یک منبع خاص مانند خورشید یا از سطوح دیگر (که سطح در معرض آنها قرار گرفته) سرچشمه بگیرد. صرفنظر از منابع، شدت انرژی وارد شده در واحد مساحت سطح را تابش ورودی[4] (G) می نامیم. قسمتی از

[1] Radiation
[2] Stefan-Boltzmann
[3] Emissivity
[4] Irradiation

تابش ورودی ممکن است توسط سطح جذب شود که موجب افزایش انرژی گرمایی جسم می شود. شدت انرژی جذب شده در واحد سطح را می توان از خاصیت ضریب جذب[1] سطح (α) تعیین کرد. یعنی : $G_{abs} = \alpha G$ که $0 \le \alpha \le 1$ می باشد. در صورتیکه $\alpha \prec 1$ باشد سطح مات[2] است و بخشی از تابش ورودی منعکس می شود. اگر سطح نیمه شفاف[3] باشد بخشی از تابش ورودی نیز ممکن است عبور داده شود. اما در حالیکه تابش جذب شده و صادر شده بترتیب سبب افزایش و کاهش انرژی گرمایی ماده می شوند تابش منعکس شده و عبورداده شده هیچ اثری روی این انرژی ندارند. توجه کنید که α بستگی به طبیعت تابش ورودی و نیز خود سطح دارد. برای مثال ضریب جذب سطحی در معرض تابش خورشیدی ممکن است متفاوت از ضریب جذب همان سطح در برابر تابش صادر شده از دیوارهای یک کوره باشد.

وضعیت خاصی که ممکن است رخ بدهد تبادل تابشی بین یک جسم کوچک (T_s) و یک جسم خیلی بزرگتر ایزوترم (که بطور کامل جسم کوچک را احاطه کرده) می باشد.



شکل (8)

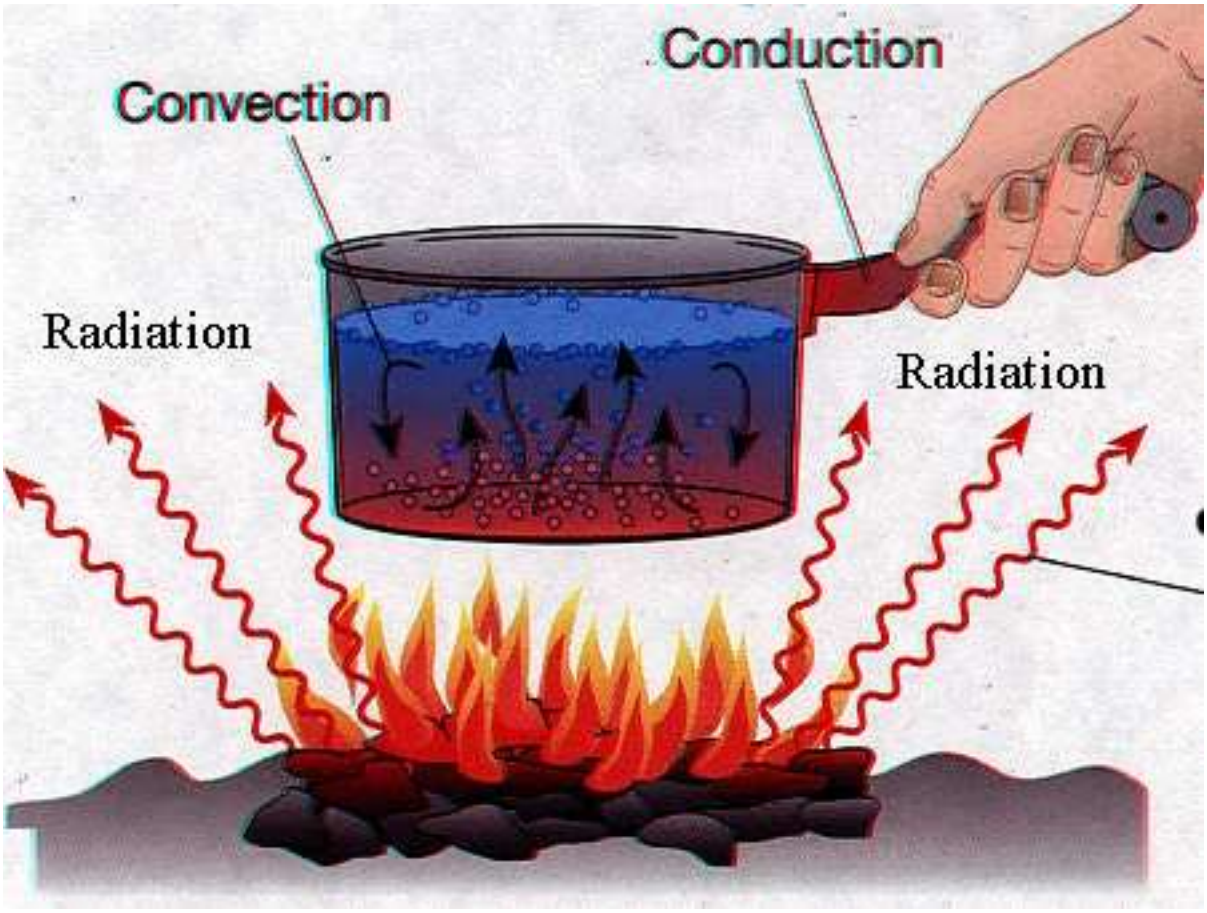
این محیط پوشاننده[4] ممکن است دیوارهای اتاق یا یک کوره صنعتی باشد که دمای آن $(T_{sur} \neq T_s)$ است. در این وضعیت تابش ورودی را می توان بصورت انتشار جسم سیاه در دمای T_{sur} فرض کرد که $G = \sigma T_{sur}^4$ می باشد. اگر فرض شود که سطح خاکستری[5] است $(\alpha = \varepsilon)$ نرخ خالص انتقال حرارت تابشی از سطح در واحد مساحت عبارت است از :

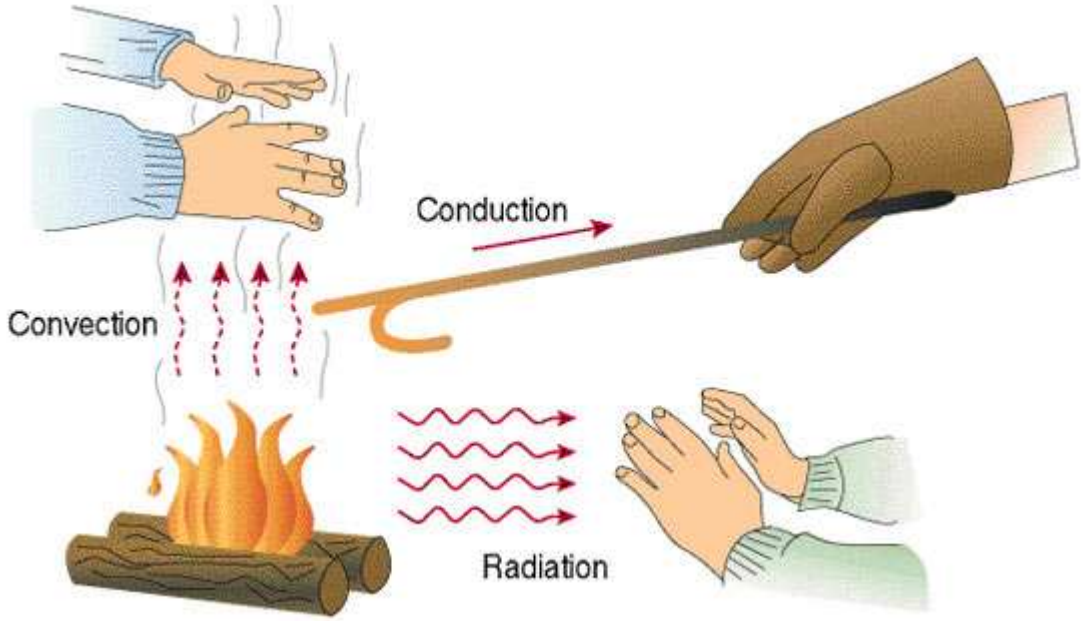
$$q''_{rad} = q/A = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - T_{sur}^4\right)$$

این عبارت، اختلاف **شدت انرژی گرمایی آزاد شده ناشی از صدور تابشی** و **شدت انرژی گرمایی بدست آمده ناشی از جذب تابشی** را (برای سطوح خاکستری) حساب می کند.

[1] Absorptivity
[2] Opaque
[3] Semi-Transparent
[4] Surrounding
[5] Gray

در دو تصویر زیر که برای همگان آشناست تفاوت مکانیزم انتقال گرما با سه روش رسانش، همرفت و تابش نمایش داده شده است.





جدول (1) گروههای بدون بعد مرسوم در مکانیک سیالات و انتقال حرارت و جرم

Commonly Used Dimensionless Groups in Fluid Mechanics and Heat and Mass Transfer

Parameter	Definition	Ratio of Effects
Reynolds number	$\mathrm{Re} = \frac{\rho V L}{\mu}$	$\frac{\text{Inertia forces}}{\text{Viscous forces}}$
Froude number	$\mathrm{Fr} = \frac{V^2}{gL}$	$\frac{\text{Inertia forces}}{\text{Gravitational forces}}$
Mach number	$\mathrm{M} = \frac{V}{a}$	$\frac{\text{Flow speed}}{\text{Sound speed}}$
Weber number	$\mathrm{We} = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$	$\frac{\text{Inertia forces}}{\text{Surface tension forces}}$
Euler number	$\mathrm{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho V^2}$	$\frac{\text{Pressure forces}}{\text{Inertia forces}}$
Prandtl number	$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$	$\frac{\text{Momentum diffusion}}{\text{Thermal diffusion}}$
Peclet number	$\mathrm{Pe} = \frac{VL}{\alpha}$	$\frac{\text{Convective transport}}{\text{Conductive transport}}$
Eckert number	$\mathrm{Ec} = \frac{V^2}{C_p \Delta T}$	$\frac{\text{Kinetic energy}}{\text{Enthalpy difference}}$
Biot number	$\mathrm{Bi} = \frac{hL}{k}$	$\frac{\text{Conductive resistance}}{\text{Convective resistance}}$
Fourier number	$\mathrm{Fo} = \frac{\alpha \tau}{L^2}$	$\frac{\text{Thermal diffusion}}{\text{Thermal energy storage}}$
Grashof number	$\mathrm{Gr} = \frac{g\beta \Delta T L^3}{\nu^2}$	$\frac{\text{Buoyancy forces}}{\text{Viscous forces}}$
Nusselt number	$\mathrm{Nu} = \frac{hL}{k_f}$	$\frac{\text{Convection}}{\text{Diffusion}}$
Sherwood number	$\mathrm{Sh} = \frac{h_m L}{D_{AB}}$	$\frac{\text{Convective mass transfer}}{\text{Mass diffusion}}$
Schmidt number	$\mathrm{Sc} = \frac{\nu}{D_{AB}}$	$\frac{\text{Momentum diffusion}}{\text{Mass diffusion}}$
Lewis number	$\mathrm{Le} = \frac{\alpha}{D_{AB}}$	$\frac{\text{Thermal diffusion}}{\text{Mass diffusion}}$