به نام خدا

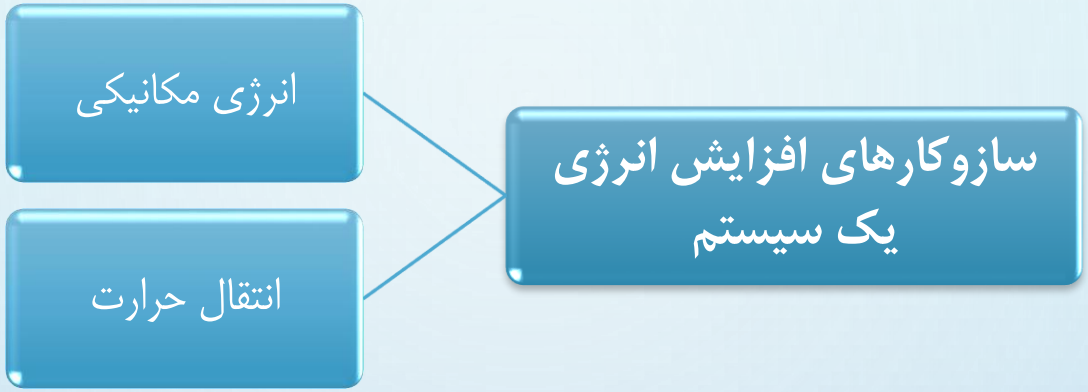
انتقال حرارت ۱

فصل اول

عنوان: مباحث مقدماتی انتقال حرارت و موازنه انرژی

مدرس : مجتبی برزویی

مقدمه ای بر انتقال حرارت

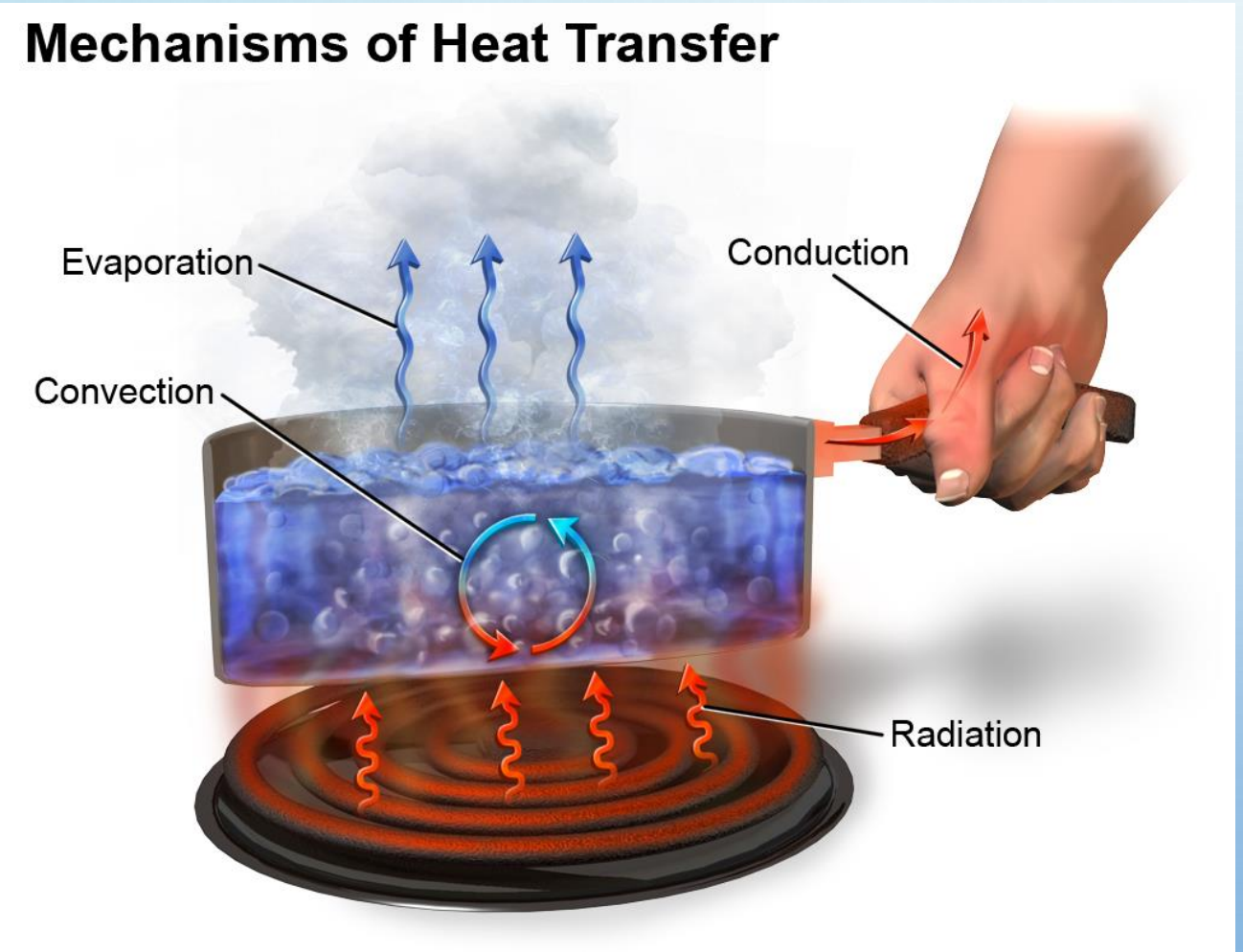


- محرک اصلی انتقال حرارت، اختلاف دمای سیستم با محیط پیرامون است.

✓ تفاوت انتقال حرارت و ترمودینامیک

در ترمودینامیک به تبادل انرژی بین دو جسم در اثر اختلاف دما، حرارت گفته می شود. هدف این علم، بررسی تاثیر میزان حرارت تبادل شده بر عملکرد سیستم می باشد و هیچ مطالعه ای پیرامون مکانیزم های تبادل گرما انجام نمی دهد. علاوه بر این، ترمودینامیک با حالت های تعادل ماده در ارتباط است که لازمه آن عدم وجود گرادیان دما است. وجود گرادیان دما که برای انتقال حرارت لازم است، به معنای عدم برقراری تعادل ترمودینامیکی می باشد. بنابراین موضوع انتقال حرارت به دنبال چیزی است که ترمودینامیک توانایی انجام آن را ندارد. در علم انتقال حرارت، علاوه بر مطالعه میزان تولید یا تبادل گرما، نحوه و مکانیزم این تبادل و جزئیات مربوط به آن در شرایط مختلف ماده پرداخته می شود.

مقدمه ای بر انتقال حرارت



❖ مکانیزم های انتقال حرارت

- ✓ رسانش یا هدایت $(conduction\ heat\ transfer)$
- ✓ جابجایی $(convection\ heat\ transfer)$
- ✓ تابش $(radiation\ heat\ transfer)$

مقدمه ای بر انتقال حرارت

موج ناشی از ارتعاشات اتمی را می توان با یک ذره بدون جرم به نام "فونون" معادل سازی کرد.

❖ دما

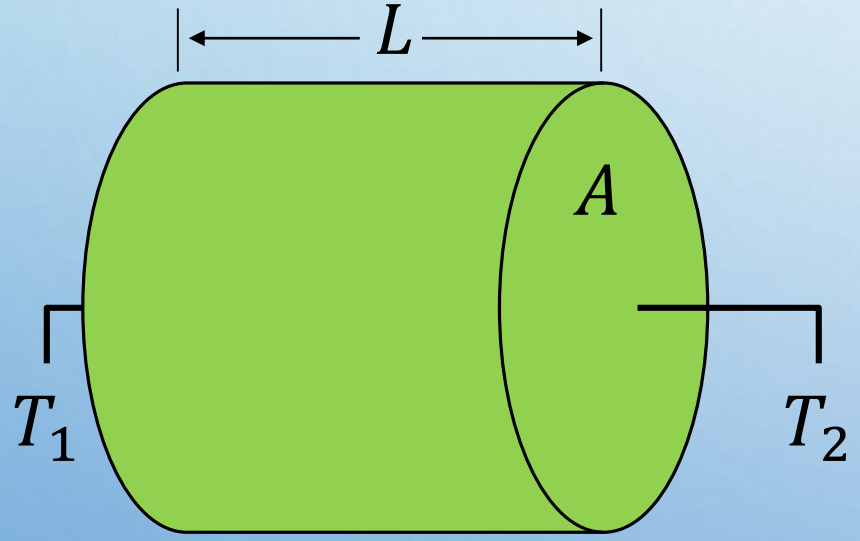
✓ آنچه که ما به عنوان کمیت ماکروسکوپی "دما" می شناسیم ناشی از جنب و جوش های ذرات ریز سازنده ماده است.

مقدمه ای بر انتقال حرارت

شار حرارتی (heat flux):
میزان انتقال حرارت بر واحد سطح
$(q'' = {}^{q}/_{A})$

❖ انتقال حرارت رسانش

✓ **تعریف:** به انتقال انرژی در ذرات سازنده ماده (مولکول ها، الکترون ها و فونون ها) از ناحیه دما بالا به ناحیه دما پایین، "انتقال حرارت رسانش" گفته می شود.



$$Fourier's\ law:\ q_{cond.} = -kA\frac{\Delta T}{L}$$

$k: thermal\ conductivity\ [\frac{W}{m°C}\ or\ \frac{W}{m\ K}]$

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ ضریب رسانش حرارتی

Table 1-1 | Thermal conductivity of various materials at 0°C.

Material	Thermal conductivity k W/m · °C	Thermal conductivity k 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_2F_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

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت رسانش

EXAMPLE 1-1 Conduction Through Copper Plate

One face of a copper plate 3 cm thick is maintained at 400°C, and the other face is maintained at 100°C. How much heat is transferred through the plate?

■ Solution

From Appendix A, the thermal conductivity for copper is 370 W/m · °C at 250°C. From Fourier's law

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dx}$$

Integrating gives

$$\frac{q}{A} = -k\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-(370)(100-400)}{3\times 10^{-2}} = 3.7\ \text{MW/m}^2 \quad [1.173\times 10^6\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2]$$

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت جابجایی

✓ برای محاسبه میزان انتقال حرارت به روش جابجایی از "قانون سرمایش نیوتن" استفاده می شود:

$$Newton's\ Law\ of\ Cooling:\ q_{conv.} = hA(T_{wall} - T_{\infty})$$

فرآیند خنک کاری	h ($W/m^2.K$)
جابجایی آزاد در گازها	2 – 25
جابجایی آزاد در مایعات	50 – 1000
جابجایی اجباری در گازها	25 – 250
جابجایی اجباری در مایعات	50 – 20000
جوشش یا چگالش	2500 - 10^5

Table 1-3 | Approximate values of convection heat-transfer coefficients.

Mode	h W/m^2 · °C	h Btu/h · ft^2 · °F
Across 2.5-cm air gap evacuated to a pressure of 10^{-6} atm and subjected to $\Delta T = 100°C - 30°C$	0.087	0.015
Free convection, $\Delta T = 30°C$		
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 $\Delta T = 60°C$	2.64	0.46
Fine wire in air, $d = 0.02$ mm, $\Delta T = 55°C$	490	86
Forced convection		
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, $T_\infty = -40°C$, 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°C in 5.0-cm-diameter tube	3410	600
Airflow at 50 m/s across fine wire, $d = 0.04$ mm	3850	678
Boiling water		
In a pool or container	2500–35,000	440–6200
Flowing in a tube	5000–100,000	880–17,600
Condensation of water vapor, 1 atm		
Vertical surfaces	4000–11,300	700–2000
Outside horizontal tubes	9500–25,000	1700–4400
Dropwise condensation	170,000–290,000	30,000–50,000

مقدمه ای بر انتقال حرارت

- انتقال حرارت جابجایی

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت جابجایی

Convection Calculation

EXAMPLE 1-2

Air at 20°C blows over a hot plate 50 by 75 cm maintained at 250°C. The convection heat-transfer coefficient is 25 $W/m^2 \cdot °C$. Calculate the heat transfer.

■ Solution

From Newton's law of cooling

$$q = hA\,(T_w - T_\infty)$$
$$= (25)(0.50)(0.75)(250 - 20)$$
$$= 2.156\ \text{kW} \quad [7356\ \text{Btu/h}]$$

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت جابجایی

Multimode Heat Transfer

EXAMPLE 1-3

Assuming that the plate in Example 1-2 is made of carbon steel (1%) 2 cm thick and that 300 W is lost from the plate surface by radiation, calculate the inside plate temperature.

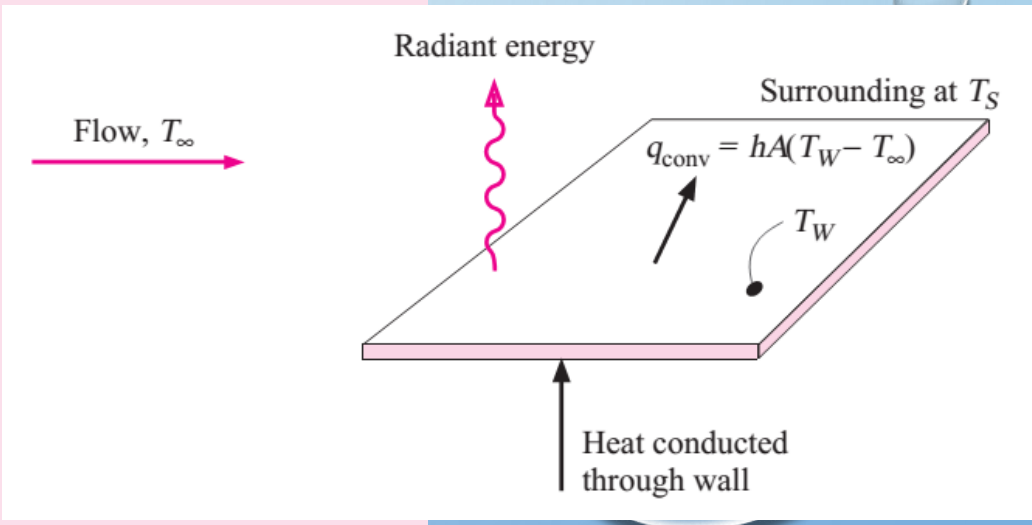
■ Solution

The heat conducted through the plate must be equal to the sum of convection and radiation heat losses:

$$q_{\text{cond}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}$$

$$-kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = 2.156 + 0.3 = 2.456 \text{ kW}$$

$$\Delta T = \frac{(-2456)(0.02)}{(0.5)(0.75)(43)} = -3.05^\circ\text{C} \quad [-5.49^\circ\text{F}]$$



where the value of k is taken from Table 1-1. The inside plate temperature is therefore

$$T_i = 250 + 3.05 = 253.05^\circ\text{C}$$

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت جابجایی

Heat Source and Convection

EXAMPLE 1-4

An electric current is passed through a wire 1 mm in diameter and 10 cm long. The wire is submerged in liquid water at atmospheric pressure, and the current is increased until the water boils. For this situation $h = 5000\ \text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$, and the water temperature will be 100°C. How much electric power must be supplied to the wire to maintain the wire surface at 114°C?

■ Solution

The total convection loss is given by Equation (1-8):

$$q = hA\,(T_w - T_\infty)$$

For this problem the surface area of the wire is

$$A = \pi dL = \pi(1 \times 10^{-3})(10 \times 10^{-2}) = 3.142 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

The heat transfer is therefore

$$q = (5000\ \text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C})(3.142 \times 10^{-4}\ \text{m}^2)(114 - 100) = 21.99\ \text{W} \quad [75.03\ \text{Btu/h}]$$

and this is equal to the electric power that must be applied.

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت تابش

- ✓ منشاء انتقال حرارت تابش، پدیده گسیل انرژی به شکل امواج الکترومغناطیس است که به طور طبیعی در تمامی اجسامی که دمای بالاتر از صفر مطلق دارند رخ می دهد.
- ✓ با توجه به فرضیات کوانتومی، این امواج را می توان معادل ذره ای بدون جرم به نام "فوتون" نیز درنظر گرفت.
- ✓ **توان گسیل (E $[\frac{W}{m^2}]$):** انرژی گسیل شده از یک جسم به ازاء واحد سطح آن جسم و واحد زمان.
- ✓ **جسم سیاه ($Black\ Body$):** جسمی است که جاذب کامل تابش است و تمامی تابش ورودی به سطح خود را جذب می کند؛ به عبارت دیگر هیچ جزئی از تابش ورودی به سطح جسم نه منعکس می شود و نه از آن عبورمی کند.

$$Stefan - Boltzmann's:\ E_{bb} = \sigma T^4 \quad ; \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 K^4}$$

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت تابش

✓ توان گسیل جسم واقعی

$$E_{rb} = \varepsilon E_{bb} = \varepsilon \sigma T^4 \quad ; \quad 0 < \varepsilon \leq 1 \quad ; \quad \varepsilon = 1 \rightarrow Black\ Body$$

✓ رابطه انرژی گسیل شده از یک جسم با دمای T بر واحد زمان:

$$\boldsymbol{q_{rad.} = \varepsilon \sigma A T^4}$$

✓ انتقال حرارت تابش بین دو جسم گرم و سرد

$$q_{rad.} = \varepsilon \sigma A (T_H^4 - T_C^4)$$

مقدمه ای بر انتقال حرارت

❖ انتقال حرارت تابش

✓ رابطه انتقال حرارت تابش را می توان به شکل قانون سرمایش نیوتن نوشت:

$$q_{rad.} = h_r A \Delta T$$

$$q_{rad.} = \varepsilon \sigma A (T_H^4 - T_C^4) \rightarrow h_r = \varepsilon \sigma (T_H + T_C)(T_H^2 + T_C^2)$$

✓ از رابطه فوق مشخص است که ضریب انتقال حرارت تابشی هنگامی قابل ملاحظه است که دو جسم تبادل کننده حرارت در دماهای بالا باشند. بنابراین بسیاری مواقع هنگامی که اجسام در دماهای معمولی هستند از انتقال حرارت تابش می توان صرفنظر کرد مگر اینکه جابجایی و رسانش نیز ضعیف باشند.

مقدمه ای بر انتقال حرارت

- انتقال حرارت تابش

EXAMPLE 1-5 Radiation Heat Transfer

Two infinite black plates at 800°C and 300°C exchange heat by radiation. Calculate the heat transfer per unit area.

■ Solution

Equation (1-10) may be employed for this problem, so we find immediately

$$q/A = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$
$$= (5.669 \times 10^{-8})(1073^4 - 573^4)$$
$$= 69.03\ \text{kW/m}^2 \quad [21{,}884\ \text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2]$$

EXAMPLE 1-6 Total Heat Loss by Convection and Radiation

A horizontal steel pipe having a diameter of 5 cm is maintained at a temperature of 50°C in a large room where the air and wall temperature are at 20°C. The surface emissivity of the steel may be taken as 0.8. Using the data of Table 1-3, calculate the total heat lost by the pipe per unit length.

■ **Solution**

The total heat loss is the sum of convection and radiation. From Table 1-3 we see that an estimate for the heat-transfer coefficient for *free* convection with this geometry and air is $h = 6.5\ \text{W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$. The surface area is πdL, so the convection loss per unit length is

$$\begin{aligned} q/L]_{\text{conv}} &= h(\pi d)(T_w - T_\infty) \\ &= (6.5)(\pi)(0.05)(50 - 20) = 30.63\ \text{W/m} \end{aligned}$$

The pipe is a body surrounded by a large enclosure so the radiation heat transfer can be calculated from Equation (1-12). With $T_1 = 50°\text{C} = 323°\text{K}$ and $T_2 = 20°\text{C} = 293°\text{K}$, we have

$$\begin{aligned} q/L]_{\text{rad}} &= \epsilon_1(\pi d_1)\sigma(T_1^4 - T_2^4) \\ &= (0.8)(\pi)(0.05)(5.669 \times 10^{-8})(323^4 - 293^4) \\ &= 25.04\ \text{W/m} \end{aligned}$$

The total heat loss is therefore

$$\begin{aligned} q/L]_{\text{tot}} &= q/L]_{\text{conv}} + q/L]_{\text{rad}} \\ &= 30.63 + 25.04 = 55.67\ \text{W/m} \end{aligned}$$

In this example we see that the convection and radiation are about the same. To neglect either would be a serious mistake.