

انتقال الحرارة Heat transfer

يعرف انتقال الحرارة بأنه ذلك العلم الذي يرمي إلى حساب انتقال الطاقة من منطقة إلى أخرى نتيجة للفرق في درجات الحرارة بينهما. تسمى هذه الطاقة المنتقلة بالحرارة. وانتقال الحرارة لا يبحث في كيفية انتقال الحرارة فقط وإنما أيضاً بحسب المعدل (تغير مع الزمن) الذي تنتقل به هذه الحرارة. يختلف علم انتقال الحرارة عن علم الديناميكا الحرارية في أن علم الديناميكا الحرارية يدرس الاتزان الحراري للمواد ويكتفي بحساب كمية الحرارة اللازمة لتغير حالة المادة من اتزان حراري معين إلى وضع آخر بينما يعطي علم انتقال الحرارة تصوراً عن الكيفية التي انتقلت بها الحرارة لتغير وضع الاتزان هذا بالإضافة إلى حساب معدلات انتقال الحرارة أثناء تغير وضع الاتزان. ولتوضيح هذا المعنى نعطي المثال التالي: إذا تصورنا قطعة من الحديد الساخن وضعت في إناء مملوء بالماء البارد، كيف يعالج علم الديناميكا الحرارية وعلم انتقال الحرارة الكيفية التي تبرد فيها قطعة الحديد الساخن؟ علم انتقال الحرارة يعطي معدلات انتقال الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد (أي لكل فترة زمنية يمكن حساب كمية الحرارة المفقودة من الجسم الساخن) بينما يكتفي علم الديناميكا الحرارية بإعطاء كمية الحرارة الكلية التي يفقدها الجسم حتى يصل إلى وضع اتزان حراري معين. معظم الأجهزة المنزلية تصمم باستخدام أسس انتقال الحرارة. فمثلاً أجهزة التدفئة وتكييف الهواء والثلاجات والمجمدات وسخانات المياه وحتى الحاسبات الآلية والتلفزيونات وبالطبع فإن المنازل المقتصدة في استهلاك الطاقة تصمم على أساس تقليل فقدان الحرارة في الشتاء وتقليل اكتساب الحرارة صيفاً. ويلعب علم انتقال الحرارة دوراً كبيراً في تصميم أجهزة أخرى كثيرة مثل رادياترات السيارات ومجمعات الطاقة الشمسية وغيرها.

طرق انتقال الحرارة Modes of Heat Transfer

هنالك ثلاث طرق رئيسية لانتقال الحرارة هي:

1- انتقال الحرارة بالتوصيل: ويتم انتقال الحرارة بهذه الطريقة خلال المواد الصلبة وخلال السوائل والغازات

عندما تكون ساكنة.

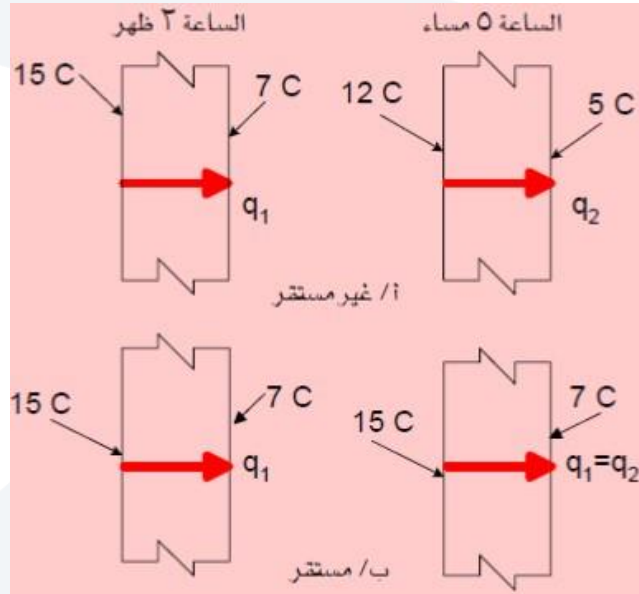
2- انتقال الحرارة بالحمل: تنتقل الحرارة بتيارات الحمل خلال السوائل والغازات.

3- انتقال الحرارة بالإشعاع: لا يحتاج انتقال الحرارة بالإشعاع إلى وجود وسيط مادي على عكس التوصيل والحمل.

ولا بد لكل طريقة من هذه الطرق من وجود فرق في درجات الحرارة ولا بد من ان تسري الحرارة من الوسط الذي درجة حرارته عالية إلى الوسط ذي درجة الحرارة المنخفضة.

انتقال الحرارة المستقر وغير المستقر Steady versus Transient Heat Transfer

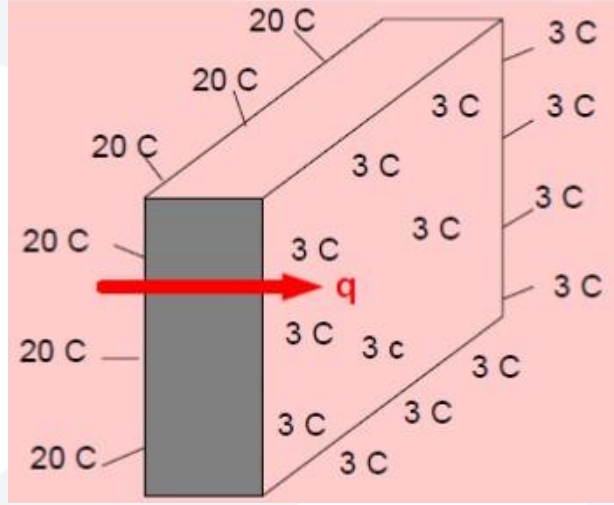
انتقال الحرارة إما أن يكون مستقراً أو غير مستقر. ويعني التعبير مستقر أنه لا تغير لخواص المادة مع الزمن عند أي نقطة في الوسط. أما التعبير غير مستقر فيعني أن هناك تغيراً مستمراً مع الزمن. وبالتالي في انتقال الحرارة المستقر تكون درجة الحرارة ومعدل انتقال الحرارة ثابتين لا يتغيران مع الزمن عند أي نقطة خلال الوسط الذي تنتقل فيه الحرارة، ولكن يمكن أن تتغير الكميتان من منطقة إلى أخرى. فمثلاً إن معدل انتقال الحرارة خلال جدران منزل معين يظل مستقراً في حالة أن الظروف الداخلية والخارجية للمنزل ظلت ثابتة ولمدة طويلة، الشكل (1). ولكن في المقابل فإن تبريد تفاعلة مثلاً داخل ثلاجة تعتبر عملية غير مستقرة إذ أن درجة الحرارة عند نقطة معينة داخل التفاعلة ستتغير مع الزمن خلال عملية التبريد.



الشكل (1): انتقال الحرارة المستقر وغير المستقر

انتقال الحرارة المستقر وفي اتجاه واحد One-dimensional Steady State Heat Transfer

إذا أخذنا في الإعتبار انتقال الحرارة خلال جدار منزل كما هو موضح في الشكل رقم 2. في فصل الشتاء فإن الحرارة تنتقل وباستمرار إلى خارج المنزل عن طريق الجدران في اتجاه عمودي على سطح الجدار. فالحرارة تنتقل دائماً في اتجاه معين عندما يكون هنالك فرق في درجات الحرارة في ذلك الإتجاه ولا تنتقل الحرارة في الاتجاهات التي ليس فيها فرق في درجات الحرارة. عليه فإن انتقال الحرارة في هذه الحالة يسمى انتقال الحرارة المستقر وفي اتجاه واحد وهو ما سوف ندرسه في هذه المرحلة.



الشكل (2): انتقال الحرارة خلال جدار في اتجاه واحد

انتقال الحرارة بالتوصيل Conduction Heat Transfer

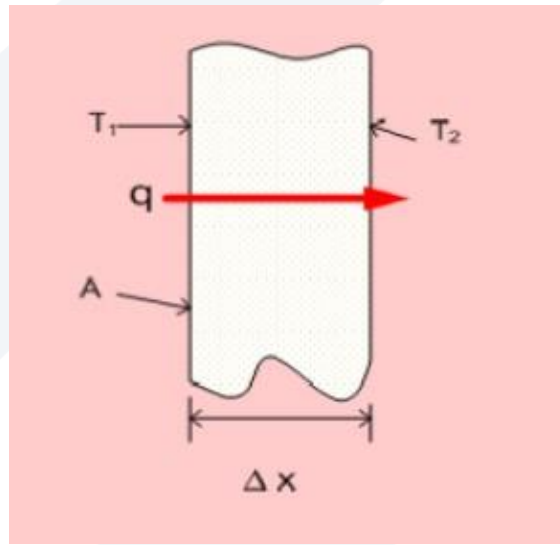
انتقال الحرارة بالتوصيل المستقر وفي اتجاه واحد Steady State Conduction-One Dimension

يسمى انتقال الحرارة خلال وسط صلب أو مائع غير متحرك في حالة وجود فرق في درجات الحرارة في ذلك الوسط بانتقال الحرارة بالتوصيل.

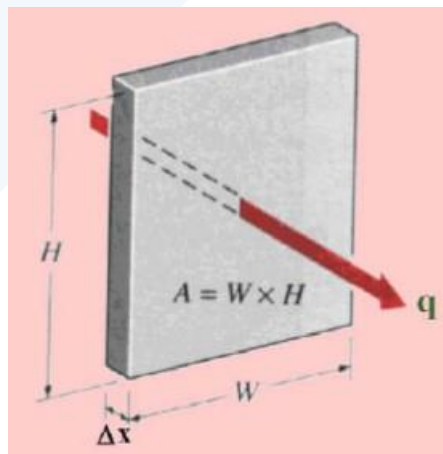
إن انتقال الحرارة بالتوصيل يعني انتقال الطاقة الحرارية من جزيئات المادة ذات الطاقة العالية إلى الجزيئات ذات الطاقة الأقل كنتيجة طبيعية لحركة هذه الجزيئات فيما بينها. ويحدث التوصيل في المواد الصلبة والسائلة والغازية. ففي السوائل والغازات يحدث التوصيل كنتيجة لتصادم الجزيئات في حركتها العشوائية. أما في المواد الصلبة فالتوصيل يحدث نتيجة اهتزاز الذرات وانتقال الطاقة بواسطة الإلكترونات الحرة. ومعدل انتقال الحرارة بالتوصيل خلال وسط معين يعتمد على الشكل الهندسي لذلك الوسط (سمكه ونوع مادة الوسط) وكذلك فرق درجات الحرارة عبر ذلك الوسط. فنحن ندرك تماماً أن وضع صوف زجاجي كعازل حول خزان ماء ساخن يقلل من معدل انتقال الحرارة من ذلك

الخبزان. وكلما كان ذلك العازل سميكاً كلما كان معدل فقدان الحرارة أقل. كما أن الخزان يفقد حرارة بمعدل أعلى كلما انخفضت درجة حرارة الغرفة التي يوضع بها الخزان.

قانون فوريير للتوصيل Fourier's Law of Heat Conduction



الشكل (3): التوصيل الحراري خلال جدار مكون من طبقة واحدة



الشكل (4): التوصيل الحراري خلال جدار مكون من طبقة واحدة.

يوضح الشكلان 3 و 4 انتقال الحرارة بالتوصيل خلال حائط (جدار) سمكه Δx ومساحة سطحه A (الطول \times العرض). لقد أثبتت التجربة أنه وبمجرد وجود فرق في درجات الحرارة بين سطحين فإن هنالك انتقالاً في الطاقة الحرارية بين السطحين وتنتقل هذه الطاقة من السطح الساخن إلى السطح البارد.

ولقد استنتج الفيزيائي الفرنسي فوريير أن معدل انتقال الحرارة خلال شريحة مستوية يتناسب طردياً مع الفرق في درجات الحرارة ومساحة الشريحة العمودية على اتجاه انتقال الحرارة وعكسياً مع سمك الشريحة. هذا القانون يسمى بقانون فوريير للتوصيل الحراري ويمكن توضيحه بالمعادلة التالية:

$$q = -k \frac{A dT}{dx} \quad (1)$$

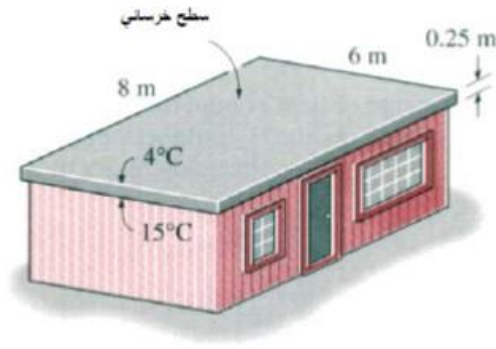
حيث أن ثابت التناسب k هو ما يعرف بموصلية المادة للحرارة thermal conductivity وهي مقياس لمقدرة المادة لتوصيل الحرارة.

بفصل المتغيرات في المعادلة (1) وإجراء عملية التكامل المحدود يمكن استنتاج الصورة التحليلية لقانون فوريير للتوصيل:

$$q = k A \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \quad (2)$$

مثال (1):

سقف منزل طوله 8 m وعرضه 6 m وسمكه 0.25 cm مصنوع من الخرسانة التي لها معامل انتقال حرارة بالتوصيل قدره $0.8 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ، إذا كانت درجات الحرارة في إحدى ليالي الشتاء للسطح الداخلي للسقف $15^\circ C$ وللسطح الخارجي $4^\circ C$ فاحسب معدل فقدان الحرارة خلال ذلك السقف في تلك الليلة.



الشكل (5): رسم توضيحي يخص المثال رقم 1.

الحل:

تبلغ مساحة سطح السقف $A = 8 \times 6 = 48 \text{ m}^2$

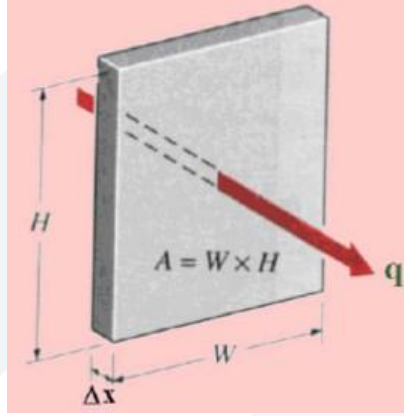
باستخدام المعادلة 2 وافترض أن انتقال الحرارة مستقر يكون:

$$q = k A \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x}$$

$$q = 0.8 \times 48 \frac{(15 - 4)}{0.25} = 1690 \text{ W}$$

مثال (2):

حائط ارتفاعه 3 m وسمكه 0.3 m له معامل انتقال حراري بالتوصيل $0.9 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ فإذا كانت درجات الحرارة للسطح الداخلي للحائط $16^\circ C$ وللسطح الخارجي للحائط $2^\circ C$. احسب معدل فقدان الحرارة خلال ذلك الحائط.



الشكل (6): رسم توضيحي للمثال رقم 2.

الحل:

$$A = 3 \times 5 = 15 \text{ m}^2$$

$$q = k A \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x}$$

$$q = 0.9 \times 15 \frac{(16 - 2)}{0.3} = 630 \text{ W}$$

Thermal Conductivity الموصلية المادة للحرارة

تسمى أيضاً بمعامل انتقال الحرارة بالتوصيل ويرمز لها بالرمز k وتعرف بأنها الفيض الحراري heat flux خلال كل وحدة سمك من المادة لكل وحدة فرق درجة حرارة. وتصنف المواد إلى مواد جيدة التوصيل الحراري وورديئة التوصيل تبعاً لقيمة معامل انتقال الحرارة. فالمواد جيدة التوصيل لها معامل انتقال حرارة مرتفع بينما المواد العازلة لها معامل انتقال حرارة منخفض. وفي دراستنا لتبريد وتكييف الهواء سوف نتعرض وبصفة مستمرة للمواد العازلة. يبين الجدول رقم 1 قيم معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لبعض المواد.

الجدول رقم 1: الموصلية الحرارية لبعض المواد الشائعة الاستخدام.

مواد موصلة	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل $k \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$	مواد عازلة	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل $k \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$
الماس	2300	الزجاج	0.78
الفضة	429	الطوب	0.72
النحاس	386	الماء	0.613
الذهب	317	الأمونيا	0.54
الألمنيوم	237	الخشب	0.17
حديد مطاوع	80	مطاوع ناعم	0.13
زئبق	8.9	هواء	0.026

يلاحظ من الجدول السابق أن المواد جيدة التوصيل للحرارة كالححاس والفضة مثلاً لها معامل انتقال حرارة بالتوصيل مرتفع. أما المواد الرديئة التوصيل للحرارة مثل المطاط والخشب فلها قيم منخفضة.

التشابه بين انتقال الحرارة وسريان شدة التيار الكهربائي

يمكن عرض قانون فوريير للتوصيل الحراري بصورة أخرى كما يلي:

$$q = \frac{\Delta T}{\Delta x/kA} \quad (3)$$

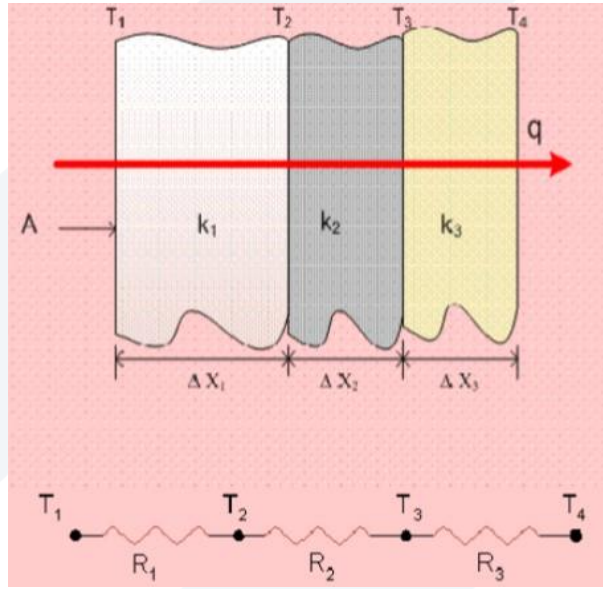
بمعنى أن انتقال الحرارة q يساوي الفرق في درجات الحرارة مقسوماً على المجموعة $\frac{\Delta x}{kA}$. لقد ذكرنا أن الفرق في درجات الحرارة ضروري لانتقال الطاقة الحرارية أي أنه هو القوة الدافعة الحرارية لانتقال الحرارة. وكما أن قانون أوم لانتقال التيار الكهربائي ينص على أن شدة التيار الكهربائي تساوي الفرق في الجهد ΔV (القوة الدافعة الكهربائية) مقسوماً على المقاومة الكهربائية R . وعليه يمكن مقارنة انتقال الحرارة بسريان التيار الكهربائي وإعادة صياغة قانون فوريير للتوصيل الحراري بأن معدل انتقال الحرارة q يساوي الفرق في درجات الحرارة ΔT (القوة الدافعة الحرارية) مقسوماً على المجموعة $\frac{\Delta x}{kA}$ والتي تسمى المقاومة الحرارية للمادة R :

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (4)$$



انتقال الحرارة المستقر خلال جدار مركب ومستوى

يوضح الشكل رقم 7 جدار مركب مكون من ثلاث طبقات من مواد مختلفة. درجات الحرارة عند كل سطح وسمك كل طبقة موضحة بالشكل. المطلوب هو حساب معدل انتقال الحرارة بالتوصيل بين السطح الداخلي والسطح الخارجي.



الشكل (7): انتقال الحرارة بالتوصيل خلال جدار مركب

لقد توصلنا إلى أن معدل انتقال الحرارة خلال جدار مستوي مكون من طبقة واحدة يمكن أن يحسب بواسطة المعادلة

$$q = \frac{\Delta T}{\Delta x/kA} \text{ التالية:}$$

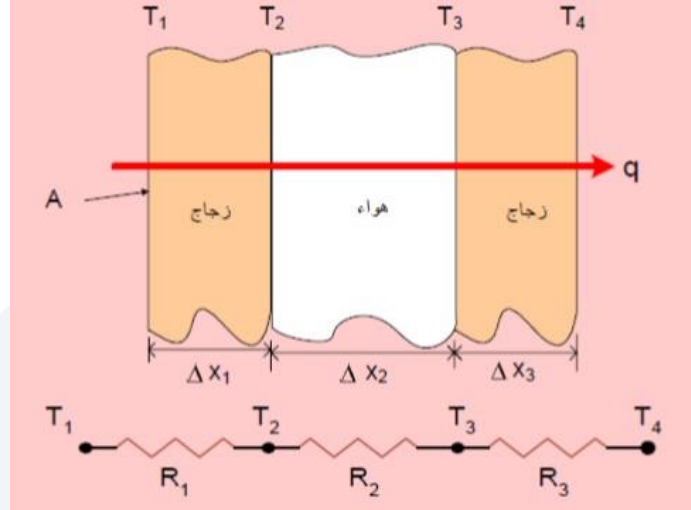
ΔT هي الفرق بين درجة الحرارة الأعلى ودرجة الحرارة المنخفضة وهي كما ذكرنا الجهد أو القوة الدافعة الحرارية والتي

تسبب انسياب الحرارة. أما الكمية $\Delta x/kA$ هي المكافئ للمقاومة الحرارية R والتي يبديها الجدار ضد سريان الحرارة

بالتوصيل، وعليه فإن:

$$R = \frac{\Delta x}{kA}$$

معدل انتقال الحرارة خلال الشباك إذا كانت درجة حرارة السطح الداخلي للشباك 15°C ودرجة حرارة السطح الخارجي -8°C .



الشكل (8): رسم توضيحي للمثال رقم 3.

الحل:

يتكون الشباك من ثلاث طبقات لذا يحسب معدل انتقال الحرارة تبعاً للقانون: $q = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3}$

مساحة سطح الشباك $A = 0.8 \times 1.5 = 1.3 \text{ m}^2$

نحسب المقاومة الحرارية لطبقة الزجاج

$$R_1 = R_3 = \frac{\Delta x_1}{k \times A} = \frac{0.004}{1.2 \times 0.78} = 0.00427 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

ومقاومة طبقة الهواء

$$R_2 = \frac{\Delta x_2}{k \times A} = \frac{0.01}{0.026 \times 1.2} = 0.3205 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{tot} = 0.00427 + 0.3205 + 0.00427 = 0.32477 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$q = \frac{15 - (-8)}{0.32477} = 70.82 \text{ W}$$