الفصل الثاني

المادة والحرارة

محتويات الفصل

تمهيد

تتميز المواد المختلفة عن بعضها بعدة خواص منها الكثافة والصلابة والمرونة. وتعتمد هذه الخواص على مايحويه الجسم من طاقة وكيف تتحرك ذراته وجزيئاته. وتعتمد هذه الطاقة والحركة بشكل رئيس على حرارة الجسم أي الطاقة الحرارية التي يملكها. ولهذا فإن هناك ارتباط وثيق بين حالة المادة وحرارتها. وسندرس في هذا الفصل نوعية الترابط بين ذرات الأجسام وانعكاس ذلك على حالته وخواصه.

ونبدأ هذه الدراسة بتعريف الحرارة وتأثيرها على الجسم ثم نعرف الكثافة والمرونة للأجسام المختلفة.

خواص المادة

2-1 تركيب المادة

المادة جسم يحتل حيزا من الفضاء، كسيارة تسير في الشارع وجهاز تلفاز في البيت وكرسي يجلس عليه الطالب، وغيرها. وقد تساءل الإنسان منذ القدم عن ماهية هذه المادة ومم تتركب. ولو أننا قمنا بتجزئة قطعة ورق إلى النصف ثم نصف النصف، وهكذا دواليك، فهل يمكن أن نصل إلى جزء صغير لايمكن تجزأته؟ لقد اعتقد القدماء أنه لايمكن تجزئة المادة إلى مالانهاية بل نصل لجسيم غاية في الصغر أطلق عليه اسم **ذرة** (atom) ويعني باليونانية الجسم غير القابل للانقسام. وفي أوائل القرن التاسع عشر وبعد تجارب عديدة على العناصر في الطبيعة وضع الكيميائي دالتون نظرية عن المادة بفرض أنها مؤلفة من ذرات، وتعزز ذلك فيما بعد بالتجارب

والدراسات التي أجراها العلماء منذ ذلك الوقت، وبالفعل تم تصوير الذرات بواسطة المكبر الإلكتروني فتبين أن أبعادها لاتتجاوز عشـرات النانومتـر (10^{-9} m). كما تبين أن الذرة ليست غير قابلة للانقسام كما افترض ديمقراطيس بل تتألف من إلكترونات تدور حول نواة ثقيلة نسبيا في مسارات شبه دائرية. وتتحد الذرات في العناصر لتشكل مايسمى **الجزئ** (molecule) كجزئ الهيدروجين H_2، والأوكسجين O_2، والماء H_2O، وغيرها. وتختلف المواد عن بعضها حسب تركيب ذراتها وارتباطها ببعضها، فبعض الذرات متماسكة جدا وتبقي الجسم صلبا دائما، بينما بعض المواد ذراتها متوسطة التماسك فلا تحافظ على المسافات بينها. وهناك عناصر قوة تماسك ذراتها ضعيفة بحيث نقول إن ذراتها حرة، وهذه هي الغازات. وهناك عوامل أخرى كثيرة تتحكم في طبيعة العناصر سندرسها في فصول لاحقة. أما في هذا الفصل فنستنظر كيف تتغير المادة عند التسخين و التبريد وما الذي يحصل لها نتيجة لذلك. كما ندرس تاثير الإجهاد أو الشد عليها وكيف تجابه ازدياد الضغوط عليها. ونعرف الخواص الساس للمادة من كثافة ودرجة حرارة وغيرها.

توليد الحرارة بفرك اليدين لترتفع درجة حرارة اليد

2-2 حالات المادة

تختلف المواد في الطبيعة عن بعضها بشكل واضح، فبعضها خفيف وبعضها ثقيل، وهناك الصلب منها والمائع، وبعض الأجسام لين طري وبعضها قاس شديد. فما الذي يعطي المادة خواصها هذه؟ وما الذي يجعل الأجسام تختلف عن بعضها بهذا الشكل؟ لقد ميز الإنسان ثلاث حالات أساس للمادة هي **الصلبة** (solid) **والسائلة** (liquid) **والغازية** (gas). وتختلف هذه الحالات عن بعضها بحسب قوى ترابط ذرات وجزيئات الجسم فيها. ففي الأجسام الصلبة تكون هذه القوى كبيرة جدا بحيث تقيد حركة الذرات والجزيئات بشكل كبير فيحافظ الجسم على شكله تماما عند درجة حرارة معينة. أما في السوائل فإن قوى الترابط الجزيئي أضعف نسبيا ولذا تتحرك الجزيئات والذرات بشكل محدود بحيث يأخذ السائل شكل الإناء الموضوع به. وفي الغازات فإن قوى الترابط بين ذرات الغاز تكاد تكون معدومة بحيث يمكن اعتبار كل ذرة فيه حرة تماما لتتحرك بحرية وينتشر الغاز في كافة أرجاء الحجم الذي يوضع فيه، كما في الشكل (2-1). كما أن السوائل والأجسام الصلبة غير قابلة للإنضغاط بحيث أنه من الصب تغيير حجمها، أما الغازات فيمكن ضغطها بسهولة وتتقلص وتتمدد مع الحرارة مثلا.

الشكل (2-1): حالات المادة الثلاث

1-3 الكثافة

هناك معادن خفيفة كالألمنيوم بينما هناك معادن ثقيلة كالرصاص والحديد، وهناك أجسام طرية يمكن ليها بسهولة كالورق والكرتون وهناك أجسام شبه مستحيل أن نطويها كالبلاستيك والخشب المقوى. ولو حاولت أن تحمل قطعة خشب وقطعة رصاص لهما نفس الحجم تماما للاحظت أن الأخيرة أثقل من الأولى بكثير، وكذلك لو قارنت قطعتين متماثلتين من الألمنيوم والذهب لوجدت أن الأخيرة أثقل. فلماذا؟ لاشك أن لنوع العنصر علاقة بذلك. ولتركيب ذراته وتراصها أهمية في هذه الخاصة الغريبة التي يملكها. إن سبب ذلك أن ذرات الرصاص تكون مرصوصة بقرب بعضها بشكل أكبر بالمقارنة مع الخشب، وكذلك ذرات الذهب بالمقارنة مع الألمنيوم، لذا نقول إن كثافة الرصاص أكبر من كثافة الخشب، وكثافة الذهب أكبر من كثافة الألمنيوم. ونعرف فيما يلي مانعنيه بكلمة كثافة للعنصر.

تمثل الكثافة كمية المادة الموجودة (عدد الذرات والجزيئات) في واحدة الحجم، أي نسبة كتلة جسم M لحجمه V، بحيث نكتب:

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad (1-2)$$

وتعطى وحدة الكثافة في نظام الوحدات الدولي بالكيلوغرام لكل متر مكعب، أي بـ kg/m^3، فكثافة الماء العادي تساوي $1000\ kg/m^3$ وهذه تعادل $1\ g/cm^3$ ، أي لو أحضرت علبة ابعادها 1 سم بـ 1 سم بـ 1 سم وملأتها ماءا لكانت كتلة الماء فيها 1 جرام فقط. بينما تصل كثافة الذهب لـ $19300\ kg/m^3$ أي أكبر من الماء بعشرين مرة تقريبا.

وتعطى في كثير من الأحيان **الكثافة النسبية للأجسام** ρ_{rel} مقارنة بالماء، أي:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{obj}}{\rho_{H_2O}} = \frac{\rho_{obj}(\text{kg/m}^3)}{1000} \qquad (2\text{-}2)$$

حيث يحصل الإنسان على شعور بمعنى كلمة كثافة لأي مادة بملاحظة فيما إذا كانت تطفو أو تغرق عند وضعها في الماء ذلك أن المواد الخفيفة بالنسبة للماء تطفو فوقه بينما تلك الثقيلة بالنسبة للماء تغرق فيه. فإن طفت نستنتج أن كثافتها أقل من الماء وإن غرقت تكون أكبر. فإذا علمت أن الكثافة النسبية للبنزين تساوي 0.739 فإنك تستنتج أنه يطفو على سطح الماء لأنه أخف منه، بينما كثافة الزئبق النسبية تساوي 13.6 مما يعني أنه أثقل من الماء العادي فيغرق فيه. وبنفس الشكل فغن كثافة ماؤ البحر النسبية اكبر من كثافة الماء العذب، وهذا يفسر لك سبب شعورك بأنك خفيف الوزن عندما تسبح في البحر.

نعطي الجدول (2-1) كثافة بعض المواد.

الجدول (2-1): كثافة بعض الأجسام

المادة	الكثافة (kg/m^3)	الكثافة النسبية	المادة	الكثافة (kg/m^3)	الكثافة النسبية
الألمنيوم	2700	2.70	الماء (4°C)	1000	1.00
الزئبق	13600	13.60	الهواء (0°C)	1.29	0.129
النحاس	8900	8.90	الهواء (25°C)	1.2	0.12
الحديد	7800	7.80	دم الإنسان (25°C)	1060	1.06

الفضة	10500	10.50	ماء البحر	1030	1.03
الرصاص	11300	11.30	زيت الزيتون (15°C)	920	0.92
الذهب	19300	19.30	البنزين (15°C)	739	0.739
الفولاذ	7800	7.80	الجليد	920	0.92

مثال (2-1)

تخلط كمية $300\ \text{cm}^3$ من الماء مع $600\ \text{cm}^3$ من البنزين. ماكثافة المزيج الناتج؟

الحل:

لإيجاد كثافة أي جسم أو مزيج يجب أن نجد كتلته الكليه وحجمه الكلي.

فنجد كتلة كل من الماء والبنزين بكتابة:

$$m_{water} = \rho_{water} V_{water} = (1000\,\text{kg/m}^3)(300\ \text{cm}^3) = (1\,g/\text{cm}^3)(300\,\text{cm}^3)$$

$$\Rightarrow \quad m_{water} = 300\,\text{g}=0.3\,\text{kg}$$

وكذلك بالنسبة للبنزين:

$$m_{benz} = \rho_{benz} V_{benz} = (739\,\text{kg/m}^3)(600\ \text{cm}^3) = (0.739\,g/\text{cm}^3)(600\,\text{cm}^3)$$

$$\Rightarrow \quad m_{benz} = 443\,\text{g} = 0.443\,\text{kg}$$

ومن ثم نجد الكتلة الكلية والحجم الكلي:

$$m_T = m_{water} + m_{benz} = (0.3 + 0.443)\text{kg} = 0.743\,\text{kg}$$
$$V_T = V_{water} + V_{benz} = (300 + 600)\,\text{cm}^3 = 900\,\text{cm}^3 = 9\times10^{-4}\,\text{m}^3$$

ولذلك تكون كثافة المزيج:

$$\rho = \frac{m_T}{V_T} = \frac{0.743\,\text{kg}}{9\times10^{-4}\,\text{m}^3} = 825.6\,\text{kg/m}^3$$

فهذا المزيج أخف من الماء.

4-2 الضغط

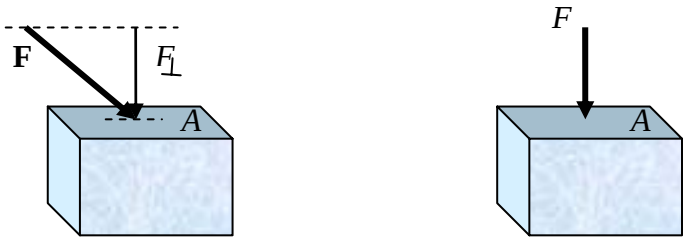
من المعروف أن الأحوال الجوية تتغير خلال السنة بشكل واضح وحتى خلال نفس اليوم. ونسمع في اخبار الجوية ن البلاد تتأثر بمنخفض جوي و مرتفع جوي. وهذا قد يؤدي لعواصف رملية أو تساقط الأمطار او برودة الجو وغير ذلك. ولو أنك تابعت يوما النشرة الجوية على التلفاز، بخاصة أيام الشتاء حيث يظهر على الخارطة الجوية مناطق مرتفعة الضغط ومناطق منخفضة الضغط. فهل تستطيع فهم ذلك؟ كيف يؤثر الضغط الجوي ياترى على طبيعة الطقس؟ ونلاحظ عندما نأخذ سيارتنا أحيانا لتغيير إطار من إطاراتها بأن العامل يرفعها بواسطة رافعة يدوية بسيطة يقوم هو بتشغيلها بسهولة فترتفع السيارة وكأنها لعبة خفيفة بيده. فكيف يستطيع شخص رفع سيارة كبيرة بيد واحدة بهذا الشكل؟ هنا يأتي دور الفيزياء وتطبيقاتها لفهم كيفية عمل هذه الآلات وغيرها والاستفادة منها بأفضل السبل.

ولذلك سندرس في هذه الفقرة **الضغط** وعلاقته بالقوة وكيف نستخدمه ونسخره للقيام بأعمال كانت سابقا تكاد تكون مستحيلة.

فمن المعروف أن المواد تتأثر بالقوى التي تؤثر عليها بحسب طبيعتها وشكلها ومقدار القوى المطبقة. لذلك نعرف **ضغط قوة** على جسم ما بالعلاقة:

$$p = \frac{F}{A} \qquad (3\text{-}2)$$

حيث A سطح الجسم الخاضع للقوة F التي نفترض أنها عمودية عليه، أو نأخذ المركبة العمودية منها إن كانت غير ذلك، كما هو مبين بالشكل (2-2 أ و ب).



(أ) القوة عمودية (ب) مركبة القوة غير العمودية

الشكل (2-2): ضغط قوة على جسم

وبمعرفة الضغط على سطح ما يمكن معرفة القوة العمودية المؤثرة عليه بكتابة:

$$F = pA \qquad (4\text{-}2)$$

وتعطى وحدة الضغط في نظام الوحدات الدولي **بالباسكال**-(B. Pascal, 1623 1662) ويرمز لها اختصارا بـ Pa وتساوي:

$$1\ \text{Pa} = 1\ \text{N/m}^2$$

ويعبر عن الضغط بوحدات أخرى منها:

4-2 أ **الضغط الجوي** (atm):

يعادل ضغط جوي واحد وزن اسطوانة من الهواء مساحة قاعدتها متر مربع ويمتد ارتفاعها من سطح البحر وحتى نهاية الغلاف الجوي (أي حوالي 10 كيلومتر). وقد وجد أن قيمة الضغط الجوي هي:

$$1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$$

فإذا كان الضغط في منطقة ما أكبر من الضغط الجوي فهذا يعني أن كمية الهواء هناك كبيرة بالمقارنة مع مناطق أخرى. أما المناطق منخفضة الضغط ففيها كمية أقل من الهواء الذي يتدفق إليها من المناطق الأعلى ضغطا. وهذا هو سبب حركة الرياح وحدوث مايسمى بموجة برد في الشتاء مثلا حيث يتدفق الهواء البارد من مناطق ضغط مرتفع إلى مناطق ضغط منخفض.

4-2 ب البار (bar) (أو الميلي بار):

يستخدم البارغالبا في علم الجو والطقس ويذكر في النشرات الجوية بكثرة، حيث يعادل البار ضغطا جويا واحدا تقريبا، وبالتحديد:

$$1 \text{ bar} = 1000 \text{ mbar} = 10^5 \text{ Pa}$$

ولذلك نسمع مقدم النشرة الجوية يقول إن الضغط في منطقة ما هو 980 ميلي بار مثلا، أي أقل من الضغط الجوي، وهكذا.

4-2 ج الميلمتر الزئبقي (mmHg):

يستخدم الميلمتر الزئبقي لتقدير الضغط في المختبرات وموازين الضغط المخبرية، ويعادل الضغط الجوي بهذه الوحدة وزن اسطوانة من الزئبـق

مساحـة قاعدتـها $1\ cm^2$ وارتفاعها 76 cm أو 760 mm، ولذلك نقول إن الضغط الجوي يساوي 760 مم زئبقي أي وزن هذا العمود من الزئبق، ونكتب:

$$1\ atm = 760\ mmHg$$

ويطلق على 1 mmHg في المختبرات المتخصصة اسم **التور** (torr)، أي أن:

$$1\ atm = 760\ torr = 760\ mmHg$$

مثال (2-2)

ماضغط الماء على قاع مسبح طوله 50 m وعرضه 10 m وارتفاعه 2 m ؟

الحل:

نحسب القوة الناتجة عن وزن هذا الماء فنكتب:

$$F = mg = (\rho V)g$$

حيث V حجم المسبح ويساوي الطول × العرض × الارتفاع، أي أن:

$$V = (50\ m)(10\ m)(2m) = 1000\ m^3$$

ومن ثم فالقوة المؤثرة على القاع هي:

$$F = (1000\ kg/m^3)(1000\ m^3)(9.80\ m/s^2) = 9.80 \times 10^6\ N$$

كما أن مساحة القاع تساوي الطول × العرض، أي $A = 500\ m^2$ ، لذا يكون الضغط عليه هو:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{9.80 \times 10^6\,\mathrm{N}}{500\,\mathrm{m}^2} = 19.6 \times 10^3\,\mathrm{Pa}$$

وهذا ضغط صغير بالمقارنة مع الضغط الجوي (الذي كان يجب أخذه بعين الاعتبار ولكننا أهملناه في حسابنا هذا) ولذلك يستطيع الإنسان الغوص إلى قعر هذا المسبح بسهولة دون أن يتأثر كثيرا بضغط الماء عليه.

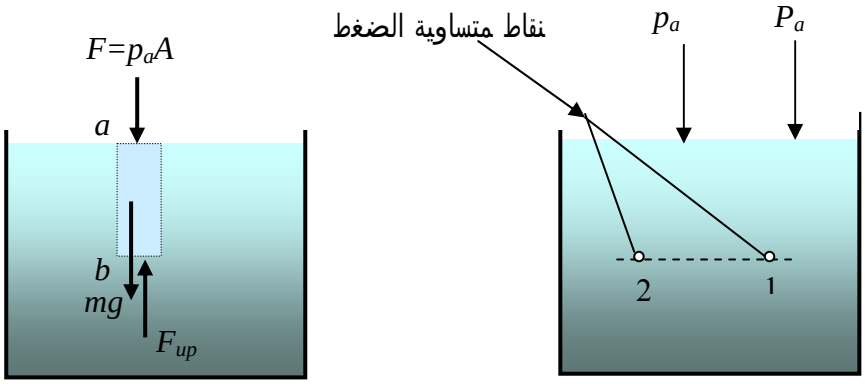
و لاتتغير كثافة الأجسام الصلبة والمائعة كثيرا مع الضغط لذا نقول إنها غير قابلة للإنضغاط (incompressible) بالمقارنة مع الغازات التي تنضغط بشكل واضح.

من جهة أخرى لو كتبنا وحدة الضغط بقوة على مسافة أي N/m للاحظنا بأنه لو ضربنا طرفي هذه النسبة بـ m لصارت $N.m/m^3 = J/m^3$ أي طاقة على حجم، أي **كثافة الطاقة**. لذلك نستنتج أن ضغط سائل في منطقة ما يمثل كثافة الطاقة الناتجة عن ضغطه هناك.

2-5 الضغط في السوائل الساكنة وقاعدة باسكال

تبين لنا من المثال (2-1) أن أي سائل يضغط على الأجسام الموجودة فيه. ولكن هل تتأثر كل نقاط السائل والأجسام الموجودة فيه بالضغط الجوي أيضا؟ للوصول لإجابة شافية سنفترض أن لدينا سائل ساكن في إناء، كما في الشكل (2-3)، فنلاحظ عندئذ مايلي:

أ- يخضع سطح السائل لوزن الهواء الذي فوقه، أي أن كل نقطة عليه تخضع للضغط الجوي الذي نرمز له بـ p_a.



(أ) الضغط متساوي عند نفس الارتفاع (ب) الضغط مختلف على ارتفاعات متفاوتة

الشكل (2-3): الضغط في السوائل الساكنة

ب - تخضع النقاط الداخلية الواقعة على نفس الارتفاع في السائل لنفس الضغط لأنه لو لم يكن الأمر كذلك لتحرك السائل لوحده من مواضع الضغط المرتفع لمواضع الضغط المنخفض وهذا غير منطقي طبعا ولايشاهد بأي حال. فالضغط عند النقطة 1 والنقطة 2 في الشكل (2-3 أ) واحد.

جـ- يختلف الضغط عند النقاط الواقعة على ارتفاعات مختلفة بحسب عمقها، حيث يكون الضغط في الأسفل أكبر من الضغط في الأعلى، أي أن الضغط عند النقطة b في الشكل (2-3 ب) أكبر من الضغط عند a. ويمكن تفسير هذا بسهولة إذا توهمنا جزءا من السائل على شكل اسطوانة ارتفاعها h ومساحة قاعدتها A التي تقع عند النقطة b. عندئذ نعلل سبب سكون هذه الأسطوانة بأن محصلة القوى عليها تساوي الصفر. لكن القوى المؤثرة عليها للأسفل هي: قوة الضغط الجوي (p_aA) ووزن الاسطوانة mg. فحتى يبقى هذا العمود ساكنا يجب أن يؤثر عليه السائل من تحته بقوة F_{up} نحو الأعلى، أي أن:

$$F_{up} = mg + p_a A \tag{5-2}$$

وبملاحظة أن كتلة هذا العمود تساوي كثافته مضروبة بحجمه:

$$m = \rho V = \rho(Ah)$$

كما أن قوة السائل من الأسفل عند النقطة b هي:

$$F_{up} = p_b A$$

حيث p_b ضغط السائل عند النقطة b.
بتعويض قوة الدفع للأعلى في العلاقة (2-5) نجد أن:

$$p_b A = (\rho Ah)g + p_a A$$

وباختصار المساحة A تؤول العلاقة السابقة إلى:

$$p_b = p_a + \rho gh \tag{6-2}$$

فالضغط عند النقطة b يساوي الضغط الجوي مضافا إليه الحد ρgh المتغير بحسب عمق النقطة b. وهذه نتيجة مهمة جدا نستنتج منها مايلي:
1- نلاحظ أن الضغط الجوي المؤثر على سطح السائل قد أثر ايضا على النقاط الأخرى في العمق. لذلك نقول بأنه إذا أثر ضغط على سائل في أي نقطة منه فإنه ينتشر لبقية نقاط السائل. ومن جهة أخرى، لو كان الإناء مغلقا لما أثر الضغط الجوي عليه، لأن غطاءه سيكون عازلا بين السائل

وبين الجو الخارجي، لكن لو طبق ضغط ما على أي نقطة من السائل فإنه سينتشر إلى كل نقاطه أيضا تماما مثلما ينتشر الضغط الجوي فيما لو كان الإناء مفتوحا. هذه هي **قاعدة باسكال** الذي تنص على مايلي: "إذا طبق ضغط على سائل ساكن في وعاء مغلق فإنه ينتشر إلى كل جزء من السائل وإلى جدران الوعاء الحاوي عليه".

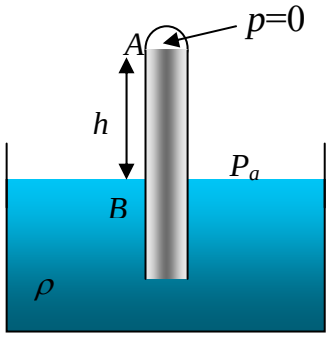
2- يزداد الضغط من نقطة لأخرى في سائل بحسب عمقها وكثافة السائل نفسه.

يطلق على العلاقة (2-6) اسم **قاعدة المانومتر**(manometer formula)، التي تكتب على النحو:

$$\Delta p = p_b - p_a = \rho g h$$

لتعطي **فرق الضغط** (gauge pressure) بين النقطتين a و b.

ويستفاد من العلاقة (2-6) لتصميم مقياس ضغط **توريشيلي** الموضح بالشكل (2-4)، حيث يقلب أنبوب مملوء بالزئبق في إناء فيه زئبق أيضا. عندئذ يكون الضغط عند النقطة A مهمل (لأنه يساوي وزن بخار الزئبق المتجمع في تلك المنطقة وهو مهمل فعلا) فيرتفع الزئبق في الأنبوب ليصير ارتفاعه محققا للعلاقة (2-6)، حيث وجد أنه يساوي 76 سم عند سطح البحر ولهذا يقال إن الضغط الجوي 76 سم زئبقي.



الشكل (2-4): مقياس ضغط توريشيلي

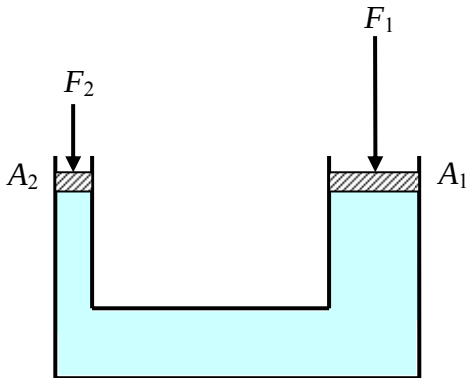
6-2 تطبيقات

كيف نستفيد من قاعدة باسكال؟ هل يمكن استخدامها لتصنيع ألآت مفيدة في حياتنا؟ لاشك ان هناك وسائل وأفكار وتطبيقات عديدة يمكن تسخيرها لجعل حياة الإنسان مريحة ومفيدة. وسنذكر هنا بعض التطبيقات المفيدة الآتية:

6-2 أ الرافعة الهيدروليكية:

يستفاد من قاعدة باسكال في تصميم الرافعة الهيدروليكية، كما هو موضح بالشكل (2-5) المستخدمة في محطات إصلاح وغسيل السيارات مثلا، والمؤلف من أنبوب على شكل حرف U مملوء بسائل كالزيت وله ذراعان، بحيث تطبق قوة كبيرة F_1 على الذراع الأول ذو المساحة A_1 بينما تطبق قوة صغيرة F_1 على الذراع الآخر ذو المساحة A_2. عندئذ وبسبب تساوي الضغط عند كل نقاط السائل المملوء بينهما يكون:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \qquad (7-2)$$



الشكل (2-5): الرافعة الهيدروليكية

مثال (2-3)

ترفع سيارة كتلتها 1000 kg في مغسلة في رافعة هيدروليكيـة على ذراع مساحـة قاعدتـه $0.3\ m^2$. ما القوة اللازم تطبيقها على الذراع الآخر إذا كانت مساحة قاعدته $0.01\ m^2$ ؟

الحل:

لمعرفة القوة اللازمة عند الذراع الصغيرة نلاحظ أن القوة المؤثرة على الذراع الكبيرة هي وزن السيارة، أي $(1000\ kg)(9.80\ m/s^2)$، ومن ثم نستخدم العلاقة (2-7) ونكتب:

$$\frac{F_1}{A_1}=\frac{F_2}{A_2} \Rightarrow \frac{(1000\,\mathrm{kg})(9.80\,\mathrm{m/s^2})}{(0.3\,\mathrm{m^2})}=\frac{\mathrm{F_2}}{(0.01\,\mathrm{m^2})}$$

ومنه:

$$F_2 = 326.7\,\mathrm{N}$$

وهذه قوة صغيرة تعادل وزن جسم كتلته 33 كغ فقط بالمقارنة مع وزن السيارة !

2-6 ب قاعدة الأواني المستطرقة:

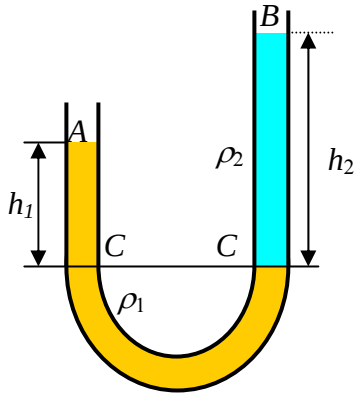
نستنتج من علاقة المانوميتر بأن الضغط واحد عند كافة نقاط السائل الواقعة على ارتفاع واحد في إناء مفتوح. لذا لو اعتبرنا عدة نقاط عند نفس العمق في سائل موضوع في إناء مفتوح ذو عدة أذرع مختلفة المقاطع، كما في الشكل (2-6)، عندئذ نلاحظ أن الفرق في الضغط بين أي نقطة منها وسطح السائل سيكون واحدا. ولكن هذا الفرق بحسب علاقة المانومتر يساوي كثافة السائل مضروبة بتسارع الجاذبية وارتفاع السائل في تلك الذراع. وبما أن الكثافة هي نفسها وتسارع الجاذبية نفسه لذلك نستنتج أن السائل سيرتفع في

كافة الأذرع إلى نفس الارتفاع. يطلق على هذه النتيجة اسم **قاعدة الأواني المستطرقة**.

الشكل (2-6): قاعدة الأواني المستطرقة

كيف يتغير ارتفاع السوائل ذات الكثافات المختلفة؟

إذا كان هناك سائلان مختلفان في ذراعي انبوب واحد، كما في الشكل (2-7) فإن ارتفاع كل ذراع سيعتمد على كثافة السائل الموجود فيه. ذلك أنه إذا اعتبرنا النقاط A وB و C في الشكل (2-6) لوجدنا من العلاقة (2-6) أن:



الشكل (2-7)

$$p_B - p_C = \rho_1 g h_1$$

و

$$p_A - p_C = \rho_2 g h_2$$

ولكن $p_A = p_B = p_a$ (ضغط جوي) ولذلك يكون:

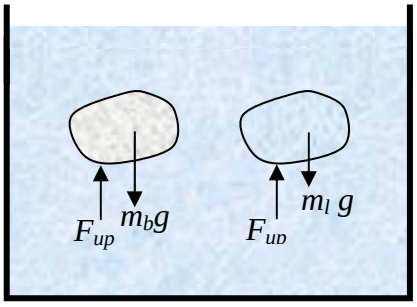
$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2 \qquad (8\text{-}2)$$

أي أن السائل يرتفع في الذراع ذي الكثافة الأقل، والعكس بالعكس.

2-6 جـ قاعدة أرخميدس:

كثير من الناس سمع بأرخميدس بل ويتذكرون شيئا اسمه قاعدة ارخميدس او ظاهرة الطفو. لكن القليل من يستطيع ان يشرح ذلك ولو بشكل منطقي أو إعطاء فكرة عما تعنيه. ومن المعروف لكل من يسبح أنه يشعر بأنه أخف في الماء مما هو عليه في الهواء. ويزداد هذا الشعور عندما نسبح في البحر (الماء المالح) بالمقارنة مع الماء العذب. ماسبب هذا ياترى؟ تروي القصص التاريخية أن العالم الإغريقي أرخميدس حل هذه المعضلة عندما طلب منه الملك معرفة فيما إذا كان تاجه من الذهب الخالص أم لا دون أن يحلله كيميائيا أو يؤدي لتشويهه بأي شكل من الأشكال وإلا ستكون العواقب وخيمة عليه. وبينما هو يستحم في حمام منزله (الذي كان مسبحا في تلك الأيام)، يفكر في طريقة تمكنه من النجاة من هذه المصيبة، توصل لنتيجة بسيطة لكن مهمة وصرخ كلمته المشهورة: وجدتها (Eureka!). فماذا وجد؟ من المحتمل أنه وجد رقبته التي كان يخشى أن يفقدها لو فشل في حل مسألة التاج، والله أعلم. لكن من الثابت أنه استطاع أن يثبت أن "**الجسم المغمور في سائل كليا أو جزئيا يخضع لقوة دافعة نحو الأعلى تعادل وزن السائل**

الذي أزاحه الجسم". هذه هي **قاعدة ارخميدس** المشهورة، ويطلق على القوة الدافعة اسم **قوة الطفو** (buoyancy force).



الشكل (2-8)

ويمكن إثبات قاعدة أرخميدس بسهولة لو اعتبرنا سائلا كثافته ρ_l ساكن في إناء، كما في الشكل (2-8). نلاحظ أن محصلة القوى على أي حجم V_l من السائل نفسه بداخل الإناء تساوي الصفر. وحيث أن لهذا الحجم وزن $m_l g=(\rho_l V_l)g$ للأسفل فلاشك أن هناك قوة من السائل الذي تحته للأعلى تساوي:

$$F_{up} = m_l g = \rho_l V_l g \qquad (9\text{-}2)$$

فلو كان هناك جسم كثافته ρ_b مختلف عن السائل نفسه ويحتل (كليا أو جزئيا) هذا الحجم منه فإنه سيخضع لنفس القوة الدافعة للأعلى، وبالتالي ستكون محصلة القوى عليه هي وزنه $m_b g$ للأسفل وقوة الطفو F_{up} للأعلى، كما في الشكل (2-8)، أي أن محصلة القوى عليه هي:

$$F_{Total} = w' = m_b g - F_{up}$$

حيث يدعى w' **الوزن الظاهري** للجسم (apparent weight).

فإذا كتبنا كتلة الجسم $m_b=\rho_b V_b$، وعوضنا عن F_{up} بقيمتها من (2-9)، عندئذ تؤول العلاقة السابقة إلى:

$$w' = (\rho_b V_b - \rho_l V_l) g \qquad (10\text{-}2)$$

تعطي هذه العلاقة **الوزن الظاهري** لجسم مغمور جزئيا أو كليا في سائل، ولو وضعنا تحته ميزانا وهو في السائل لوجدنا أن الميزان يقرأ هذه القيمة w'. أما لو طفا الجسم (float) عندئذ تتساوى قوة الطفو مع وزنه فيصير وزنه الظاهري معدوما ويقرأ الميزان صفرا، وتؤول العلاقة (2-10) في هذه الحالة إلى:

$$\rho_b V_b - \rho_l V_l = 0$$

أي أن:

$$\rho_b V_b = \rho_l V_l \qquad (11\text{-}2)$$

للأجسام الطافية.

مثال (2-4)

من المعروف أن السفينة السياحية تايتانك غرقت في المحيط الأطلسي في أول رحلة لها بعد اصطدامها بجبل جليدي طاف فوق سطح الماء. مانسبة الجزء المغمور من هذا الجبل إلى الجزء الطافي إذا علمت أن كثافة الجليد $920\ \mathrm{kg/m^3}$ وكثافة ماء المحيط $1030\ \mathrm{kg/m^3}$؟

الشكل (2-9): غرق التايتانك

الحل:

بما أن الجبل الجليدي يطفو فوق سطح الماء لذا نستخدم العلاقة (2-11) مباشرة ونكتب:

$$\rho_b V_b = \rho_l V_l$$

حيث V_l حجم الماء الذي أزاحه الجبل الجليدي، أي الجزء المغمور منه، و V_b حجم الجبل كله.

من ثم نكتب العلاقة الأخيرة بالشكل:

$$\rho_b V_b = \rho_l V_l \Rightarrow \frac{V_l}{V_b} = \frac{\rho_b}{\rho_l} = \frac{920\,\text{kg/m}^3}{1030\,\text{kg/m}^3} = 0.89$$

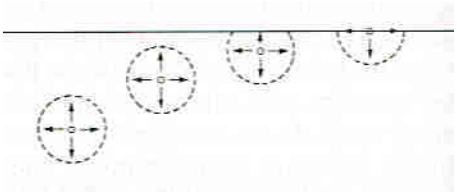
أي أن 89% من الجبل الجليدي كان مغمورا تحت الماء بينما لم يظهر منه على فوق الماء سوى 11% ! انظر الشكل (2-10).

الشكل (2-10): نسبة الجزء الظاهر والجزء المغمور من جبل جليدي

2-6 د التوتر السطحي:

تعتبر ظاهرة التوتر السطحي من أجمل وأروع الظواهر التي نعيشها يوميا تقريبا دون أن نعي تماما ماسببها وكيف تؤثر على صفحات الماء وقطرات المطر والندى الصباحي وغيرها. وهل لاحظت يوما كيف تتجمع قطرات الندى على ورقة الشجر وتتدلى منها بكل جمال ولطف؟ أم هل انزعجت ليلة ما عندما بقي صنبور الماء يقطر ويقطر ويقطر طوال الليل ؟ لماذا تتجمع كل قطرة لفترة معينة ثم تسقط فجأة لتبدأ قطرة جديدة بالتشكل إلى أن تقع هي الأخرى وهكذا دواليك؟ إن سبب ذلك هو تجمع جزيئات الماء داخل القطرة تدريجيا فتكبر وتكبر لكن غشاءها الخارجي يبقى متماسكا لدرجة معينة، كغلاف بالون هوائي، إلى أن يصل لدرجة تصير كمية السائل داخله أثقل من تماسكه فينفجر فجأة وتسقط القطرة من مكانها. تسمى هذه الظاهرة **التوتر السطحي** وتنتج عن قوى التماسك بين ذرات وجزيئات السائل وخصوصا تلك القريبة من السطح. ويوضح الشكل (2-11) بعض ذرات

من سائل في إناء حيث نلاحظ أن كل ذرة داخلية تخضع لتأثير الذرات المحيطة بها من كل جانب. أما الذرات القريبة من السطح فتخضع لتأثير من كل الاتجاهات ماعدا الجهة العلوية. لذلك تسحب جزيئات السطح للداخل مما يؤدي لتقلصه بأكبر قدر ممكن ونقول إنه مشدود أو متوتر. ولهذا تسمى هذه الظاهرة بالتوتر السطحي. وينتج عن توتر ذرات السطح أنها تبقى متماسكة ما أمكنها ذلك فتتجمع ذرات القطرة تحت السطح إلى يصير وزن القطرة أكبر من قوة التوتر السطحي فتقع القطرة. وبنفس الشكل يمكن لدبوس أن يطفو عند وضعه برفق على سطح سائل طالما كان وزنه أقل من التوتر السطحي.



الشكل (2-11): التوتر السطحي

الشكل (2-12): تشكل قطرات الماء على ورقة الشجر بفعل قوى التوتر السطحي

2-7 تحريك السوائل

إن دراسة حركة السوائل هي من أصعب الحركات في الطبيعة للدراسة لصعوبة متابعة حركة جزيئات المائع كله، كما يتضح لمن يراقب فيضان نهر كبير أو تدفق جدول صغير، من جهة وعدم انتظام حركة هذه الأجسام من جهة أخرى.

إلا أن هناك حالات مثالية يمكن الاستفادة منها للحصول على معلومات مهمة عن حركة سوائل معينة كالدم في الشرايين وحتى الماء في الأنابيب المنزلية أو القنوات العريضة طالما لم تكن سرعتها عالية جدا.

ونخصص في كتابنا هذا على مايسمى حركة **السائل المثالي** (ideal fluid) فقط الذي نفترض أنه **عديم اللزوجة** (non-viscous) و**غير قابل للانضغاط** (incompressible). ويمكن اعتبار الكثير من السوائل، كالماء، محققة للشرط الثاني لأنها صعبة الانضغاط، إلا أن غالبيتها لزجة بمعنى أن هناك احتكاك بين ذراتها وجزيئاتها. وتسبب **اللزوجة** إجهادا سطحيا (shear stress) بين طبقات السائل المتجاورة مما يؤدي لإعاقة حركتها بالنسبة لبعضها فتتداخل خطوط سريانها لتظهر الدوامات المعروفة عندئذ مما يجعل دراسة الحركة أكثر تعقيدا وصعوبة. لهذا سنفترض في هذه الفقرة أن السائل المدروس مثالي لالزوجة فيه وأن خطوط جريان جزئياته لاتتداخل مع بعضها. في هذه الحالة نقول إن **الجريـان ثابـت أو دائـم** (steady flow).

فإذا كان لدينا سائل يجري في أنبوب مساحة مقطعه A بسرعة v، كما في الشكل (2-13)، عندئذ نلاحظ أن السائل يقطع في زمن ما t مسافة $h=vt$، ومن ثم تكون كمية السائل المتدفقة في الأنبوب خلال هذا الزمن تساوي حجم السائل المار مضروبا بكثافة السائل، أي:

$$m = \rho V = \rho A h = \rho A(vt)$$

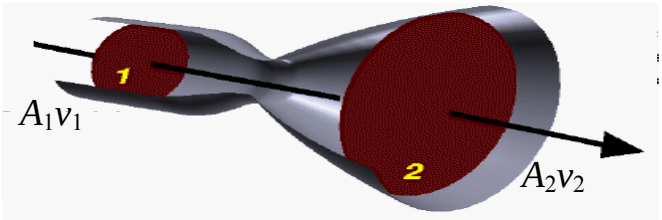
وبما أن السائل غير قابل للانضغاط فيجب أن تبقى m ثابتة في أي منطقة في الأنبوب، ولذلك إذا مر السائل في منطقة أولى مساحة مقطعها A_1 بسرعة v_1 ثم في منطقة ثانية مساحتها A_2 بسرعة v_2 عندئذ يجب أن تكون كمية السائل المارة في كلتا المنطقتين واحدة، أي أن:

$$A_1 \rho g v_1 = A_2 \rho g v_2$$

ومنه:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad (12\text{-}2)$$

تسمى العلاقة السابقة **معادلة الاستمرار** (equation of continuity).



الشكل (2-13): جريان سائل مثالي

من جهة أخرى، تبين لنا سابقا أن ضغط السائل p في موضع معين يمثل طاقة داخلية لواحدة الحجوم منه هناك، فلو كان لدينا سائل يجري بسرعة v على ارتفاع y فإن الطاقة الكلية لواحدة الحجوم منه تساوي طاقته الحركية $(\rho v^2/2)$ وطاقة وضعه $(\rho g y)$ وطاقة الضغط p (لاحظ أننا وضعنا الكتلة=الكثافة×الحجم، وحيث أننا نعتبر واحدة الحجوم لذا تصير الكتلة تساوي الكثافة)، أي أن الطاقة الكلية في واحدة الحجم من السائل عند موضع ما هي:

$$u = \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y + p$$

وبفرض أن السائل مثالي لا لزوجة فيه عندئذ يجب أن تبقى هذه الكمية ثابتة في أي موضع من مواضع جريان السائل، أي أن:

$$\tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 + p_1 = \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 + p_2 \qquad (13\text{-}2)$$

تسمى هذه المعادلة **معادلة برنولي** (D. Bernoulli, 1700-1782) ولها تطبيقات أساس في تحريك السوائل.

مثال (2-5) حركة الدم في الشرايين وضغط الدم

يجري دم كثافته $1060\ \text{kg/m}^3$ في أنبوب أفقي مساحة مقطعه $0.2\ \text{cm}^2$ بسرعة $20\ \text{m/s}$ عندما يصل لاختناق مساحته $0.05\ \text{cm}^2$. ماسرعة الجريان هناك؟ وما فرق الضغط عن الجذع الرئيس من الأنبوب؟

الحل:

نستخدم معادلة الاستمرار لمعرفة سرعة السائل في الاختناق فنكتب:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \Rightarrow (0.2\,\text{cm}^2)(20\,\text{m/s}) = (0.05\,\text{cm}^2)v_2$$

أي أن:

$$v_2 = 80\,\text{m/s}$$

أما فرق الضغط بين الجذع الرئيس والاختناق في الأنبوب فنجده من معادلة برنولي حيث نلاحظ أن طاقة وضع الجاذبية واحدة في الجزأين ولذلك نكتب:

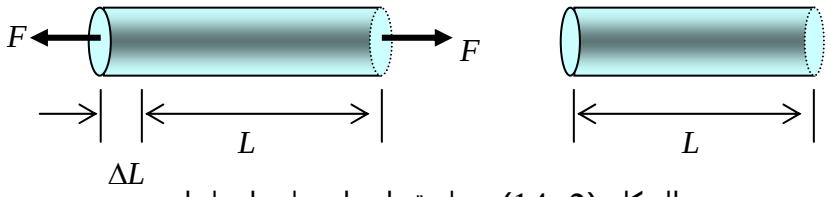
$$\tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 \;\Rightarrow\; p_1 - p_2 = \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 - \tfrac{1}{2}\rho v_1^2$$
$$\Rightarrow\; p_1 - p_2 = \tfrac{1}{2}(1060\,\mathrm{kg/m^3})(6400-400)(\mathrm{m/s})^2 = 31.8\times10^5\,\mathrm{Pa}$$

نستنتج من هذا المثال بأنه على النقيض مما يعتقد الإنسان لأول وهلة فإن الضغط في الجذع الرئيس أكبر من الضغط في الاختناق. ولهذه النتيجة أهمية كبيرة على سريان الدم في الشرايين التي يمكن أن تتضيق نتيجة تراكم الدهون وغيرها من المواد فينخفض ضغط الدم في منطقة الاختناق مؤديا لانغلاق الشريان كله والإصابة بنوبة قلبية وعواقب وخيمة أخرى، كما هو معروف في الطب.

2-8 المرونة

تتأثر المواد الصلبة بأي قوة تؤثر عليها بحسب قساوتها أو مرونتها، إذ يحتمل أن تتشوه خلال تطبيق القوة، فإن عادت لشكلها الأصلي بعد زوال القوة نقول إنها مرنة، وإن لم يحدث ذلك فإن المادة تتشوه بشكل دائم. وتعتمد مرونة المواد على طبيعتها بشكل أساس.

ولدراسة مفهوم المرونة نفترض أن لدينا قطعة اسطوانية من مادة طولها L ومساحة مقطعها A، فإذا طبقنا قوة F على قاعدتيها، كما في الشكل (2-14)، عندئذ يتغير طولها قليلا بمقدار ΔL.



الشكل (2-14): تطبيق إجهاد على اسطوانة

ونعرف الكميتين التاليتين:

الإجهاد (stress): ويمثل ضغط القوة المؤثرة على قاعدة الاسطوانة، أي أن: **الإجهاد** = $\frac{F}{A}$.

الانفعال (strain): ويمثل التغير النسبي في طول الاسطوانة بسبب الإجهاد المطبق عليها، أي أن: **الإنفعال** = $\frac{\Delta L}{L}$.

ومن الواضح أن الانفعال يتناسب مع الإجهاد بشكل مباشر (ولو أجهد أحدنا كثيرا فإنه ينفعل بسرعة!).

وتسمى نسبة الإجهاد إلى الإنفعال **معامل يانغ** في المرونة للأجسام ونكتب:

$$Y = \frac{(F/A)}{(\Delta L/L)} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}} \quad (14\text{-}2)$$

ونلاحظ أن وحدة معامل يانغ من العلاقة السابقة هي N/m^2.

ويعطي الجدول (2-2) معامل يانغ لبعض المواد.

الجدول (2-2): معامل يانغ لبعض المواد

المادة	Y (10^{10} N/m^2)
الألمنيوم	70
النحاس	110
النحاس الأصفر	90
الحديد	190
الرصاص	16
الفولاذ	200
التنغستين	360

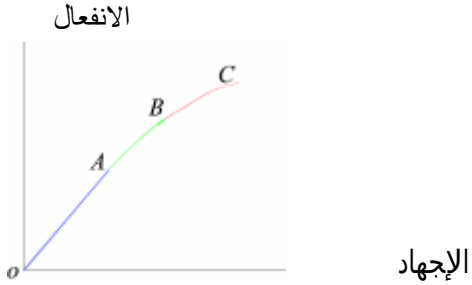
2-9 حدود المرونة والتشوه ونقطة التصدع

تتراوح انفعالات الأجسام مع الإجهادات المطبقة عليها بحسب نوعها، كما أسلفنا. ويوضح المنحنى الموضح بالشكل (2-15) تغير الإجهاد مع الانفعال لأسطوانة مثلا، حيث نلاحظ ثلاث مناطق مميزة هي:

1- بين O و A: يتناسب الانفعال مع الإجهاد خطيا بحيث تعود الاسطوانة لطولها الأصلي عند زوال الإجهاد، تماما مثل زنبرك. تسمى هذه المنطقة **منطقة المرونة** (elastic region)، ونقول إن الجسم يحقق قانون هوك في المرونة $F=-kx$.

2- بين A و B: إذا خضعت الاسطوانة لإجهاد كبير فإنها تستطيل لكنها لاتعود لطولها الأصلي عند زوال هذا الأجهاد بل تبقى مشوهة بعض الشئ. تسمى هذه المنطقة **المنطقة البلاستيكية**، فلا يزال الجسم طريا قليلا لكنه ليس مرنا.

3- إذا صار الإجهاد كبيرا جدا بحيث يصل للنقطة C عندئذ تتصدع الاسطوانة وتنشطر ولذلك تسمى C **نقطة التصدع** (breaking point).



الشكل (1-15)

مثال (2-6):

يثبت سلك من الفولاذ بسقف المختبر ويعلق بطرفه السفلي جسم كتلته 500 kg. ما استطالة السلك إذا علمت أن طوله 3 m ومساحة مقطعه 0.15 cm^2؟

الحل:

نلاحظ أن وزن الجسم المعلق هو

$$F=mg=(500\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)=4900\ \text{N}$$

لذا نحسب الإجهاد المطبق على السلك:

$$\frac{F}{A}=\frac{4900\,\text{N}}{0.15\times10^{-4}\,\text{m}^2}=3.27\times10^{8}\ \text{N/m}^2$$

ثم نحصل على معامل يانغ للفولاذ من الجدول (2-3) ونستخدم العلاقة (2-14) فنجد:

$$\frac{\Delta L}{L}=\frac{(F/A)}{Y}=\frac{3.27\times10^{8}\ \text{N/m}^2}{200\times10^{10}\ \text{N/m}^2}=1.63\times10^{-4}$$

أي أن استطالة السلك هي:

$$\Delta L=3\times1.63\times10^{-4}\,\text{m}=4.89\times10^{-4}\,\text{m}\cong0.5\,\text{mm}$$

2-10 الحرارة

تنقسم طاقة الأجسام إلى عدة أنواع منها: الميكانيكية والحرارية والنووية والكيميائية وغيرها. وسندرس في هذا الجزء من الوحدة الطاقة الحرارية، وكيف نقيسها، وتأثيرها على الأجسام المختلفة، وطرق انتقالها من وسط لآخر.

تنتج الطاقة الحرارية لجسم أو منظومة من الحركة العشوائية للذرات والجزيئات بداخلها، فكلما زادت سرعة هذه الجسيمات كلما صارت الطاقة الحرارية أكبر ويسخن الجسم أكثر فأكثر، ونقول إن درجة حرارته قد ارتفعت. **فدرجة الحرارة** هي معيار لقياس هذه الطاقة التي نسميها **حرارة**. ومن المعروف أن الإحساس بسخونة أو برودة جسم تحدث بشكل تلقائي وعفوي عند الإنسان عندما يلمس جسما ساخنا أو جسما باردا. لكن لو تمعنا في في هذا الأمر بعض الشئ لتبين لنا أننا عندما نقول إن جسما ما بارد فإننا نقارنه غريزيا بحرارة يدنا. ومن أبسط الأمثلة على ذلك أن نمسك بقطعة جليد لفترة طويلة نسبيا ونتركها لنمسك بعدها مباشرة ملعقة معدنية درجة حرارتها عادية، عندئذ نقرر أن الملعقة ساخنة لأنها كذلك بالنسبة ليدنا، فتنتقل الحرارة منها إلينا. أما لو كانت يدنا أسخن من الملعقة لانتقلت الحرارة إليها من يدنا ونقول عندئذ إنها باردة.

2-11 ميزان الحرارة

نستنتج من الفقرة السابقة أن قياس مقدار حرارة جسم ما تتم عادة بمقارنته بجسم آخر. وإذا وضعنا جسما أول A مع جسم ثاني B ولم يتبادلا أي حرارة فإننا نقول إنهما متزنان حراريا بالنسبة لبعضهما ولهما نفس درجة

الحرارة. ويتم معرفة ذلك عمليا بمقارنة كل واحد منهما بجسم ثالث C. فإذا كان A متزن حراريا مع C و B متزن مع C عندئذ نقول إن A و B متزنان حراريا. يطلق على هذه النتيجة الواضحة اسم **القانون الصفر في التحريك الحراري**، ويمثل مبدأ عمل **ميزان الحرارة** الذي يتميز بأنه جهاز يعطي دليلا على حرارة جسم دون أن يغير من خواصه أو يؤثر عليه. لذا فمن الطبيعي أن يكون ميزان الحرارة صغيرا بالمقارنة مع الجسم المراد تحديد درجة حرارته.

ويتم تصميم موازين الحرارة باستخدام مواد وأدوات مناسبة لهذا الغرض وتستند لظواهر فيزيائية معروفة وسهلة القياس، كاستطالة أو تقلص الأسلاك المعدنية، أو تغير المقاومة الكهربائية لمعدن، أو تغير حجم مائع، وغيرها.

وهناك عدة أنظمة لتصميم موازين الحرارة. ففي النظام المئوي تعتبر نقطة تجمد الماء عند الدرجة 0° C ونقطة غليانه عند 100° C، وقسمت الدرجات بينهما بالتساوي، وهذا هو ميزان الحرارة الشائع الاستعمال في معظم دول العالم. أما في النظام الفهرنهيتي فاعتبرت درجة تجمد الماء عند 32° F ودرجة الغليان عند 212° F. ومن ثم فإن تدريج النظام الفهرنهيتي يختلف أساسا عن النظام المئوي، كما هو موضح بالشكل (2-16).

الشكل (2-16): ميزان حرارة يظهر عليه التدريجان المئوي والفهرنهيتي

ويرتبط التدريج المئوي بالتدريج الفهرنهيتي بالعلاقة:

$$T_F = (\tfrac{9}{5}T_C + 32)\ ^\circ\mathrm{F} \qquad (15\text{-}1)$$

أو

$$T_C = \tfrac{5}{9}(T_F - 32)^\circ\mathrm{C} \qquad (16\text{-}1)$$

أما في نظام الوحدات الدولي فقد تقرر استخدام الحالة التي يكون عندها الماء صلبا (جليد) ومائعا (ماء) وغازيا (بخار) بنفس الوقت، لتدريج درجات الحرارة. وقد حددت هذه النقطة بالقيمة 273.16 K حيث K وحدة درجة الحرارة في النظام الدولي وتدعى كلفن، نسبة للورد كلفن الذي كان له باع طويل في دراسة خواص الأجسام والحرارة. تسمى هذه الحالة **بالنقطة الثلاثية** للماء ويرمز لها بـ T_3 أي أن:

$$T_3 = 273.16\mathrm{K}$$

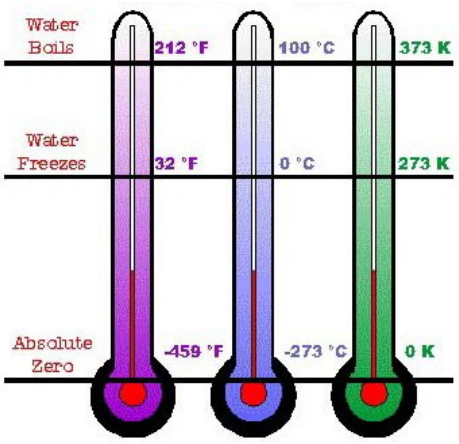
وقد تم التوصل لهذا الرقم الغريب نتيجة دراسات في التحريك الحراري حيث وجد أن حركة الذرات والجزيئات داخل أي مادة تنعدم تماما عند درجة حرارة 0 K الذي يطلق عليه اسم الصفر المطلق (absolute zero).
ويجدر التنويه إلى أننا لانقول إن درجة حرارة جسم 20 درجة كلفن (مثلما نقول 20 درجة مئوية أو 20 درجة فهرنهيتية) بل نقول إن درجة حرارة الجسم 20 كلفن، ولايحوي رمزها رمز الدرجة °. وينطبق على الكلفن جميع تدريجات النظام الدولي للوحدات، أي نقول مثلا إن:

$$0.001\mathrm{K}=1\mathrm{mK}$$

وقد تقرر أن تكون نقطة غليان الماء في النظام الدولي 312.16 K، أي أن هناك مئة كلفن بين تجمد الماء وغليانه تماما كما في النظام المئوي. وترتبط درجة الحرارة في النظامين بالعلاقة:

$$T_C = T_K - 273.16° \qquad (17-1)$$

ويمكن الربط بين التدريجات الثلاثة بسهولة بتذكر درجة تجمد الماء ودرجة غليانه في كل نظام، كما هو موضح بالشكل (6-17).



النظام الدولي النظام الفهرنهيتي النظام المئوي

الشكل (1-17): تدريجات درجة الحرارة في الأنظمة المختلفة

12-2 تمدد الأجسام وتغير الحالة

يؤدي ارتفاع درجة حرارة جسم ليزيد من طاقته الحرارية التي تكسبها جزيئاته على شكل طاقة حركية فتزيد سرعها وتتباعد عن بعضها. ولهذا كلما ارتفعت درجة حرارة المادة تباعدت جزيئاتها عن بعضها أكثر، وهذا هو سبب التمدد الحراري في الأجسام.

وتتمدد معظم المواد عند ارتفاع درجة حرارتها بشكل أو بآخر لكن مقدار تمددها يعتمد على عدة عوامل كنوع المادة وأبعادها الهندسية ومقدار التغير في درجة حرارتها. لذلك سندرس في هذه الفقرة ثلاثة أشكال من التمدد الحراري: هي **التمدد الطولي، والتمدد السطحي، والتمدد الحجمي**.

2-12 أ **التمدد الطولي**:

لنفترض أن لدينا جسما طوله l_0 عند درجة حرارة ما T_0، فإذا صارت درجة حرارته T، أي ارتفعت بمقدار $\Delta T=T-T_0$، فإن طوله يتغير إلى طول جديد l، أي يزيد بمقدار $\Delta l=l-l_0$، يعطى بالعلاقة:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T \qquad (18-1)$$

حيث α ثابت يسمى معامل التمدد الطولي ووحدته كما يتضح من العلاقة السابقة هي مقلوب تغير درجة الحرارة أي 1/K أو 1/°C لأن مقدار تغير درجة الحرارة متساوي في النظام المئوي والنظام الدولي. وتكتب العلاقة (1-14) في كثير من الأحيان بالشكل:

$$l = l_0(1+\alpha \Delta T) \qquad (19-1)$$

ويعطي الجدول (1-3) معامل التمدد الطولي لبعض المواد.

الجدول (6-3): معامل التمدد الطولي لبعض المواد شائعة الاستعمال

المادة الصلبة	$\alpha(10^{-6}/°C)$	المادة السائلة	$\alpha(1/°C)$
ألمنيوم	24	زئبق	0.0018
نحاس	17	كحول	1.01
حديد	12	أثير	1.51
رصاص	29	بنزين	0.95
زجاج تجاري	11	غليسرين	0.49
زجاج بايركس	3.3	زيت زيتون	0.68
اسمنت مسلح	12	كربون	1.18

ونلاحظ من الجدول السابق أن معامل تمدد الأجسام الصلبة صغير جدا بالمقارنة مع الموائع وهذا ينسجم تماما مع طبيعة القوى بين ذرات وجزيئات كل مادة، كما أسلفنا.

مثال (2-7):

ترتفع درجة حرارة سلك نحاسي في يوم صيفي حار بمقدار 25°C بين الصباح والظهيرة. مامعدل تغير طول السلك؟

الحل:

لمعرفة معدل تغير طول السلك نستخدم العلاقة (2-18) ونكتب:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T \Rightarrow \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$$

فمعدل التغير، أي التغير النسبي في طول السلك النحاسي، يساوي:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T = (17 \times 10^{-6} 1/°\text{C})(25°\text{C}) = 425 \times 10^{-6}$$

أي أن:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = 0.0425\%$$

2-12 ب **التمدد السطحي:**

تتمدد سطوح الأجسام لأنها تتمدد طوليا وعرضيا لذلك يمكن أن نكتب تغير كل من الطول l والعرض w بنفس العلاقة (1-19)، أي أن:

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T), \quad w = w_0(1 + \alpha \Delta T)$$

ومن ثم يصير السطح معطى بالعلاقة:

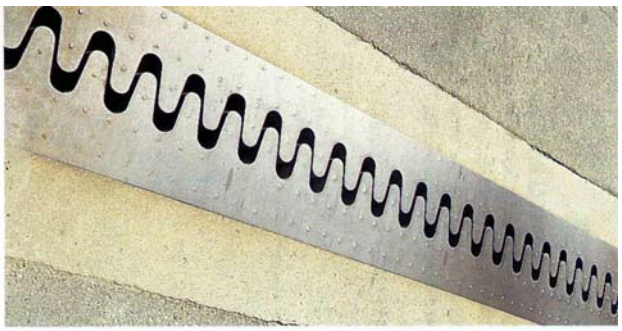
$$A = l.w = l_0(1+\alpha\Delta T).w_0(1+\alpha\Delta T) = l_0 w_0(1+2\alpha\Delta T+\alpha^2\Delta T^2)$$

ولكن $A_0=l_0w_0$ تمثل المساحة الأصلية للجسم، كما أن المقدار $\alpha^2\Delta T^2$ صغير جدا بالمقارنة مع بقية الحدود ولذلك نهمله ونكتب العلاقة الأخيرة بالشكل:

$$A = A_0(1+\beta\Delta T) \qquad (20-2)$$

حيث وضعنا $\beta=2\alpha$ وتسمى **معامل التمدد السطحي**.
ونكتب التغير النسبي في السطح في هذه الحالة بالشكل:

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \beta\Delta T \qquad (21-2)$$



الشكل (2-18): توضع فواصل معدنية على الجسور تحسبا لتمدد الطرقات في الصيف

2-12 جـ **التمدد الحجمي**:

يمكننا بنفس الطريقة التي وجدنا بها كيف تتمدد الأجسام سطحيا أن نجد العلاقة التي تعطي التمدد الحجمي لها ونكتب:

$$V = V_0(1+\gamma\Delta T) \qquad (22-2)$$

حيث نسمي γ معامل التمدد الحجمي للأجسام ويساوي $\gamma=3\alpha$ (برهن ذلك). ونكتب التغير النسبي في الحجم على النحو:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma\Delta T \qquad (23-2)$$

وتخضع معظم المواد لقواعد التمدد المذكورة أعلاه باستثناء الماء الذي تبين أنه يتقلص عندما ترتفع درجة حرارته من صفر إلى أربع درجات مئوية، ويتمدد عندما تنخفض من أربع درجات إلى صفر مئوية. ولهذه النتيجة أهمية كبيرة على الحياة المائية في المناطق الباردة في فصل الشتاء حيث تتشكل على السطح طبقة جليدية درجة حرارتها 0°C بينما يكون الماء تحتها عند درجة حرارة 4°C محافظا على الحياة المائية فيه! فسبحان الله على قدرته والحمد له على فضله.

2-13 التبادل الحراري وقانون المسعر الحراري

من المعروف أننا عندما نريد أن نشرب كأسا من عصير البرتقال في يوم من أيام الصيف الملتهب فإننا نضع فيه قطعا من الجليد لتبريده بعض الشئ ولو انتظرنا لفترة وجيزة نجد أن الجليد ذاب فيما برد العصير اللذيذ. لاشك

إذا أن الجليد أعطى "برودته" للعصير بينما أعطاه هذا الأخير بعضا من "سخونته". لذا نستنتج أن الأجسام المتماسة تتبادل الحرارة مع بعضها فيأخذ البارد من الحار والعكس بالعكس. وتتناسب كمية الحرارة التي يأخذها أو يعطيها جسم من أو إلى غيره على عدة عوامل هي: كتلته m والفرق بين درجة حرارته ودرجة حرارة الجسم الآخر ΔT وبالطبع على نوعه ولهذا نكتب:

$$Q = mc\Delta T \qquad (24\text{-}2)$$

حيث تدل c على كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من الجسم بمقدار درجة واحدة وتسمى **الحرارة النوعية**. وتختلف الأجسام عن بعضها بهذه الكمية فالأجسام جيدة النقل تتبادل الحرارة مع غيرها بسهولة، كالمعادن، أما الأجسام رديئة النقل فبعكس ذلك، كالخشب والبلاستيك. ويعطي الجدول (2-4) الحرارة النوعية لبعض الأجسام الشائعة.

وتقدر Q في النظام الدولي بالجول لكن جرت العادة على استخدام الحريرة التي تمثل كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الجسم بمقدار درجة مئوية واحدة، أي أن:

$$1\ \text{cal} = 4.18\ \text{J}$$

ولذلك تكون الحرارة النوعية للماء هي 1 cal/g.°C أو 4180 J/kg.°C .

يطلق على العلاقة (2-24) اسم **قانون المسعر الحراري** الذي ينظم تبادل الحرارة بين الأجسام المختلفة.

الجدول (2-4): الحرارة النوعية لبعض المواد

المادة	c(kJ/kg.C)	المادة	c(kJ/kg.C)
الماء	4.18	النحاس	0.39
ماء البحر	3.89	الألمنيوم	0.91
الكحول	2.52	الغرانيت	0.80
الزئبق	0.14	الفضة	0.23
الجليد	2.11	التنغستين	0.13
الزجاج التاجي	0.67	الرصاص	0.13

مثال (2-8):

توضع قطعة رصاص كتلتها 0.5 kg ودرجة حرارتها 300 °C في مسعر نحاسي معزول كتلته 0.2 kg يحوي ماءا كتلته 0.5 kg عند درجة حرارة الغرفة 25 °C. مادرجة حرارة النظام النهائية؟

الحل:

لتحديد درجة الحرارة النهائية للنظام كله، T_f، نلاحظ أن المسعر والماء سيكسبان حرارة من الرصاص لذلك نكتب $Q_{Pb} = Q_{Cu+H_2O}$ حيث:

$$Q_{Pb} = m_{Pb}c_{Pb}(\Delta T)_{Pb} = (0.5\text{kg})(0.13\text{kJ/kg.C})(300 - T_f)^\circ\text{C}$$

و

$$Q_{Cu+H_2O} = (m_{Cu}C_{Cu} + m_{H_2O}c_{H_2O})(\Delta T)$$
$$= [(0.2\,kg)(0.39\text{kJ/kg°C}) + (0.5\text{kg})(4180\text{kJ/kg°C})](T_f - 25)^\circ\text{C}$$

وبمساواة كميتي الحرارة نجد:

$$T_f = 32.8^\circ\text{C}$$

14-2 تغير الحالة (Phase Change)

ذكرنا فيما سبق أن القوى بين ذرات وجزيئات الأجسام الصلبة أكبر مماهي عليه في السوائل والغازات، ولذا تبقى ذرات المادة محدودة الحركة ويحافظ الجسم على شكله. ولكن إذا امتص الجسم حرارة كافية فإن ذراته تكتسب طاقة حركية رويدا رويدا مما قد يؤدي لتحررها من القوى الرابطة لها من الذرات المجاورة، ونقول عندئذ إن حالة الجسم تغيرت وقد ينصهر أو يتبخر. ويحتاج جسم كتلته m لكمية حرارة معينة Q لتتغير حالته (من صلب لسائل أو من سائل لغاز) تعطى بالعلاقة:

$$Q = ml \qquad (25-2)$$

حيث تسمى l **حرارة الانصهار الكامنة** (latent heat of fusion) إذا انصهر الجسم ويرمز لها عندئذ بـ l_f، أو **حرارة التبخر الكامنة** (latent heat of vaporization) إذا تبخر الجسم ويرمز لها حينئذ بـ l_v. ويعطي الجدول (6-5) قيم l_f و l_v لبعض المواد الشائعة.

الجدول (2-5): حرارة الانصهار والتبخر لبعض المواد

المادة	درجة حرارة الانصهار (°C)	l_f (kJ/kg)	درجة حرارة التبخر (°C)	l_v (kJ/kg)
الماء	0	334	100	2256
النتروجين	210	25.9	196	200
الأوكسجين	218	13.8	183	213

الهيليوم	_	_	269	25
الهيدروجين	259	62.8	253	448
الألمنيوم	660	399	2467	10549
الهيليوم	1083	205	2567	5191
الهيدروجين	1535	272	2750	6781
الألمنيوم	328	28.5	1740	850

مثال (2-9):

ماعدد مكعبات الجليد اللازم إضافتها لكيلوغرام ماء يغلي لتصير درجة حرارة المزيج 20 °C إذا كانت كتلة المكعب الواحد 20 g ؟

الحل:

نحسب مقدار الحرارة التي يفقدها الماء عندما تتغير درجة حرارته من 100 °C إلى 20 °C فنكتب من العلاقة (2-24):

$$Q = mc\Delta T = (1\text{kg})(4.18\text{kJ/kg.°C})(100\text{-}20)\text{°C}=334.4\text{ kJ}$$

ويستهلك جزء Q_1 من هذه الحرارة لصهر الجليد والجزء الباقي Q_2 لتسخينه حتى درجة 20 °C.

فإذا افترضنا أن هناك n مكعب من الجليد فنجد Q_1 من العلاقة (1-25):

$$Q_1 = m_{ice}l_v = n(20\text{g})(334\text{kJ/kg}) = n(0.02\text{kg})(334\text{kJ/kg}) = n(6.68\text{kJ})$$

كما نجد كمية الحرارة اللازمة لتسخين الجليد المنصهر لدرجة حرارة 20 °C فنكتب:

$$Q_2 = mc\Delta T = n(0.02\,\text{kg})(4.18\,\text{kJ/kg.°C})(20\text{-}0)\text{°C}=n(1.67\,\text{kJ})$$

أخيرا نضع $Q_1+ Q_2= Q$ فنجد:

$$334.4\,kJ = n(6.68\,\text{kJ}) + n(1.67\,\text{kJ})=n(8.35\,\text{kJ})$$

أي أن:

$$n = \frac{334.4}{8.35} \cong 40$$

15-2 التبادل الحراري وانتقال الحرارة

تتبادل الأجسام الحرارة فيما بينها بثلاث طرق هي:

15-2 أ **التوصيل**

إذا وضعنا ملعقة معدنية في كوب شاي ساخن فإن يدها تسخن بعد فترة زمنية معينة مما يعني أن الحرارة انتشرت من أسفلها لأعلاها بدون أن تتحرك جزيئاتها من مكانها طبعا. نسمي هذا الشكل من انتقال الحرارة **التوصيل**. وتحدث هذه الظاهرة عندما يكون هناك فرق في درجة الحرارة بين وسطين، كغرفة الجلوس المكيفة وحديقة المنزل الحارة أيام الصيف فتنتقل الحرارة عبر جدار الغرفة بالتوصيل. ويمكن معرفة كمية الحرارة المارة عبر الحائط في الثانية، أي مايسمى **التيار الحراري** (H heat current) بملاحظة أنه يتناسب طردا مع مساحة الحائط A وعكسا مع سمكه

L، كما يزداد H كلما كان الفرق في درجة الحرارة بين الوسطين، ΔT، كبيرا. وبالطبع فإن التيار الحراري المار عبر أي حاجز أو حائط يعتمد على طبيعة الحائط والمادة المصنوع منها. لذلك نكتب التيار الحراري على النحو:

$$H = K\frac{A\Delta T}{L} \qquad (26\text{-}2)$$

حيث K ثابت يعتمد على طبيعة السطح الفاصل بين الوسطين ويسمى **معامل التوصيل الحراري** (coefficient of thermal conduction)، ووحدته هي W/K.m. وتختلف قيم K للمواد بحسب قابليتها لتوصيل الحرارة، فبعضها ناقل جيد كالمعادن، وبعضها الآخر ردئ التوصيل كالخشب والبلاستيك. ويعطي الجدول (2-6) قيم K لبعض المواد شائعة الاستعمال.

الجدول (2-6): معامل التوصيل الحراري لبعض المواد

المادة	K(W/K.m)	**المادة**	K(W/K.m)
الآجر	0.6	الاسمنت	0.1
الخشب المضغوط	0.05	الزجاج	1.0
الجليد	2.0	الخشب	0.15
الماء	0.59	الهواء	0.024
النحاس	365	الحديد	72
الفضة	418	الزئبق	8.0

مثال (2-10):

ما التيار الحراري المفقود عبر نافذة زجاجية مساحة وجهها $2\ m^2$ وسمكها $2\ mm$ في غرفة درجة حرارتها $25\ °C$ إذا كانت درجة الحرارة في الخارج $0\ °C$ ؟

الحل:

نستعمل العلاقة (2-26) ونكتب:

$$H = K\frac{A\Delta T}{L} = (1\text{W/K.m})\frac{(2m^2)(25-0)\text{K}}{2\times10^{-3}\text{m}} = 25\text{kW}$$

وهذه طاقة ضائعة كبيرة جدا مما يعني أن هناك عوامل أخرى تتدخل في عملية انتشار الحرارة عبر الأجسام. وهذا ماسنأتي عليه في الفقرة القادمة.

2-15 ب الحمل

إذا سخنا سائلا في إناء فإن درجة حرارة طبقاته السفلى تسخن قبل تلك التي فوقها مما يجعل الذرات في الأسفل تتحرك أكثر فأكثر وتتباعد عن بعضها لتنخفض كثافة السائل هناك ويرتفع للأعلى بينما يحل مكانه الجزء البارد الأكثف الموجود فوقه لتتكرر العملية ثانية وتستمر حركة السائل على هذا النحو ليسخن كله. تسمى هذه العملية **الحمل المحايد** لأننا لم نتدخل في حركة طبقات السائل بتاتا. أما لو قمنا بتحريك السائل، عند الطبخ مثلا أو عند استخدام مروحة كهربائية في المنزل لتحريك الهواء، فإن الحمل يسمى عندئذ **حملا قسريا**. ولاشك أن تفاصيل عملية انتقال الحرارة بالحمل معقدة رياضيا بحيث يكون من الصعب وصفها بمعادلات محددة نظرا لكثرة العوامل الداخلية والخارجية التي يمكن أن تؤثر على انتقال الحرارة هكذا. ولكن يمكن القول أنه تتشكل طبقة حرارية راكدة قرب سطح أي جسم ساخن

مما يجعل انتقال الحرارة عبرها بطيئا ولذلك يكون الفرق في درجة الحرارة بين سطح النافذة والوسط الخارجي في المثال (2-6) أقل بكثير من 25 °C ولذلك يكون الضياع في الطاقة أقل مما وجدناه بكثير ولاتتعدى قيمته 80 W فقط.

2-15 جـ الإشعاع

تنتشر الحرارة من الشمس للأرض بواسطة أشعتها القوية، وكذلك نستشعر بدف المدفأة المنزلية بواسطة أشعة الحرارة المنطلقة منها وإن كنا لانراها. ولهذا نقول إن الأجسام تشع أمواجا حرارية غير مرئية. وإذا كان الجسم مشعا جيدا للحرارة فإنه يكون ماص جيدا للحرارة أيضاً، ويطلق على الجسم الذي يمتص كل الأشعة الساقطة عليه اسم **الجسم الأسود** لأنه لايعكس أي شئ فيبدو أسودا. ويعتبر جلد الإنسان قريبا جدا من الجسم الأسود ولو أنه يعكس بعض الأمواج المرئية (ولذلك نرى بعضنا !).
وتتناسب كمية الحرارة التي يشعها الجسم الأسود في الثانية من واحدة المساحة من سطحه مع درجة حرارته بحيث نكتب:

$$\varepsilon = \sigma T^4 \qquad (27\text{-}2)$$

حيث يسمى الثابت σ **ثابت ستيفان** (Stefan constant) في الإشعاع ويساوي 5.67×10^{-8} W/m^2.K بينما T درجة حرارة الجسم الأسود مقدرة بالكلفن. ويطلق على العلاقة (2-27) اسم **قانون ستيفان وبولتزمان بالإشعاع.**

ملخص الفصل

الكثافة = نسبة كتلة الجسم على حجمه.

ضغط قوة = مقدار مركبة القوة العمودية مقسوما على السطح المتؤثر عليه.

علاقة المانومتر: $p = p_a + \rho gh$

قاعدة باسكال: يتنتشر الضغط في سائل موضوع في وعاء إلى كل نقاط السائل وإلى جدران الوعاء.

قاعدة أرخميدس: يؤثر أي سائل على جسم فيه بقوة تساوي وزن السائل الذي أزاحه الجسم.

قاعدة الأواني المستطرقة: يرتفع سائل في أناء له عدة أذرع مفتوحة إلى نفس الارتفاع.

السوائل المثالية غير قابلة للانضغاط وغير لزجة.

معادلة الاستمرار: $A_1 v_1 = A_2 v_2$

معادلة برنولي: $\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 + p_2$

الإجهاد = ضغط قوة على جسم.

الإنفعال = الزيادة النسبية في طول الجسم.

معامل يانغ: الإجهاد على الانفعال.

درجة الحرارة معيار للطاقة الحرارية التي يملكها الجسم

علاقة المسعر الحراري: $Q = mc\Delta T$

التمدد الحراري: تتمدد أبعاد الأجسام بحسب العلاقة: $\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$

تغير الحالة: كمية الحرارة اللازمة لتغيير حالة جسم هي: $Q = ml$

تنتقل الحرارة بين الأجسام بالتوصيل والحمل والإشعاع.

في حالة التوصيل يكون التيار الحراري المنتشر هو $H = K\frac{A\Delta T}{L}$

أما في الإشعاع فتكون الطاقة المشعة من واحدة المساحة لجسم أسود في ثانية هي $\varepsilon = \sigma T^4$.

أسئلة

2-1 ماوزن باب من البلوط كثافته $500\ kg/m^3$ وارتفاعه $2\ m$ وعرضه $75\ cm$ وسمكه $4\ cm$ ؟

2-2 ماكتلة كرة من النحاس نصف قطرها $2\ cm$ ؟

2-3 ماوزن الهواء في غرفة أبعادها $3\times4\times5\ m$ ؟

2-4 يتصدع سلك نحاسي عندما يصير الإجهاد عليه $3\times10^8\ N/m^2$ (أ) ما أكبر حمل يمكن تعليقه بالسلك إذا كان نصف قطره $0.4\ mm$ ؟ (ب) مامعدل استطالة السلك عندما يعلق به نصف الحمل الأعظم ؟

2-5 في تجربة لقياس معامل يانغ للعظام توضع كتلة $10\ kg$ فوق مقطع عظمة اسطوانية مساحتها $1.5\ cm^2$ مثبتة شاقوليا فتنضغط بمقدار 0.0065% . ماقيمة Y لهذه العظمة ؟

2-6 تصمم غواصة لتصل لعمق $600\ m$ تحت سطح البحر. (أ) ما الضغط هناك ؟ (ب) ما القوة المؤثرة على نافذة الغواصة إذا كان قطرها $15\ cm$ ؟

2-7 تغطي طبقة زيت سمكها $15\ cm$ ماءا ارتفاعه $25\ cm$ في برميل مفتوح. (أ) مافرق الضغط بين الماء والزيت إذا كانت كثافة الزيت $600\ kg/m^3$ ؟ (ب) مافرق الضغط بين سطح الزيت وقعر البرميل ؟

2-8 يسكب زئبق في ذراع انبوب مفتوح على شكل حرف U فيما يسكب ماء في الذراع الأخرى فيصل طول عمود الماء إلى $15\ cm$. (أ) ما الفرق بين الضغط الجوي والضغط عند السطح الفاصل بين السائلين ؟ (ب) ما الفرق في ارتفاع الزئبق والماء ؟

2-9 ماحجم قطعة نحاس تزن $125\ N$ في الهواء ؟ وماوزنها في الماء ؟

2-10 تربط كرة بلاستيكية مفرغة حجمها $0.2\ m^3$ بسلسلة مثبتة بقاع مسبح فيصير الشد في الأخيرة 600 N. (أ) ماقوة الطفو المؤثرة على الكرة ؟ (ب) ماكتلة الكرة؟ (جـ) مانسبة الحجم الذي سيبقى مغمورا من الكرة لو انقطعت السلسلة وطفت الكرة على سطح الماء ؟

2-11 ماحجم جسم يزن في الهواء 12 N وفي الماء 10 N ؟

2-12 ما أكبر عدد من الأشخاص يمكن لطوافة خشبية أبعادها $2\times2\times0.3$ m حملهم إذا كانت كتلة الواحد 65 kg وكانت كثافة الخشب $500\ kg/m^3$ ؟

2-13 يتدفق ماء في انبوب غير منتظم فيمر من منطقة مساحة مقطعها $0.8\ cm^2$ بسرعة 4 m/s. (أ) ماسرعة السائل عند نقطة مساحة مقطعها $0.06\ cm^2$ ؟ (ب) ماحجم الماء المتدفق في ثانية واحدة ؟

2-14 يتدفق سائل في انبوب فيمر من نقطة مساحة المقطع عندها 0.2 m^2 . (أ) ماذا يجب أن تكون سرعة السائل هناك حتى يكون معدل التدفق $0.8\ m^3/s$ ؟ (ب) مانصف قطر الأنبوب عند نقطة سرعة السائل عندها 3.8 m/s؟

2-15 يتدفق ماء في أنبوب مساحة مقطعه $10\ cm^2$ ثم يمر من منطقة مساحتها $5\ cm^2$. ماحجم الماء الخارج من هذه المنطقة بالثانية إذا كان فرق الضغط بين المنطقتين 300 Pa ؟

2-16 يرتفع عمود الزئبق في ميزان حرارة 4 cm عند وضعه في الجليد و 24 cm عند وضعه في ماء يغلي. (أ) كم يرتفع الزئبق إذا وضع في ماء درجة حرارته 20 °C ؟ (ب) مادرجة حرارة محلول كيميائي يصل فيه الزئبق لارتفاع 25.4 cm ؟

2-17 تبلغ درجة غليان الأوكسجين –182.86 °C. ماهي هذه الدرجة بالفهرنهايت والكلفن ؟

2-18 توضع شظايا من الألمنيوم الساخن كتلتها 100 g ودرجة حرارتها 100 °C في 500 g من الماء درجة حرارته 18.3 °C فتصل درجة حرارة المزيج إلى 21.7 °C. ما الحرارة النوعية للألمنيوم ؟

2-19 توضع قطعة من الرصاص كتلتها 200 g ودرجة حرارتها 90 °C في 500 g من الماء درجة حرارته 20 °C. مادرجة الحرارة النهائية للخليط ؟

التمدد الحراري

2-20 كم يتغير طول مسطرة من الفولاذ عندما تتغير درجة حرارتها من 20 °C إلى 100 °C إذا كان طولها عند 20 °C هو 30 cm ؟

2-21 ترتفع درجة حرارة قطعة مستطيلة من الحديد بمقدار 50 C ؟ ما الزيادة النسبية في سطحها ؟

2-22 توضع قطعة جليد كتلتها 200 g في 500 g من الماء درجة حرارته 20 °C. (أ) مادرجة الحرارة النهائية للنظام ؟ (ب) مامقدار الجليد الذائب ؟

2-23 تبرد قطعة من الأمنيوم كتلتها 50 g من 20 °C إلى 190 °C– بوضعها في نيتروجين سائل. ماكمية النيتروجين المتبخر ؟

2-24 يوضع قضيب نحاسي طوله 2 m ونصف قطر مقطعه 1 cm بحيث تقع ‘حدى نهايتيه عند درجة حرارة 100 °C والثانية عند 0 °C. (أ) ما التيار الحراري المار عبر القضيب ؟ (ب) مادرجة حرارة نقطة تبعد 25 cm عن الطرف الحار ؟

2-25 ما الطاقة التي تشعها الشمس من واحدة السطح فيها في كل ثانية إذا اعتبرناها جسما أسود درجة حرارته 5000 °C ؟ ما الطاقة الكلية المشعة إذا كان نصف قطر الشمس 700 مليون متر ؟