الديناميكا الحرارية هي دراسة الحرارة والشغل. أمّا الحرارة، فهي انتقال الطاقة نتيجة الاختلاف في درجات الحرارة. في حين يعرف الشغل بأنّه انتقال الطاقة بطرق ميكانيكية وليس بسبب الاختلاف في درجات الحرارة. وأن قانون الديناميكا الحرارية الأول ما هو إلا صيغة عامة لحفظ الطاقة: الحرارة Q المضافة إلى النظام ناقص محصلة الشغل W المبذول على النظام يعادل التغير في الطاقة الداخلية ΔU للنظام: $\Delta U = Q - W$.
وتظهر الصور استخدامين للآلة البخارية: محطة طاقة حديثة تعمل بحرق الفحم الحجري وقطار بخاري قديم. وكلاهما يولد بخارًا يبذل شغلًا على توربينات لتولد الكهرباء، وعلى صباب يحرك ذراعا لإدارة عجلات القطار. وتحد الطبيعة من فاعلية أي آلة كما وصفت في القانون الثاني للديناميكا الحرارية. وأفضل طريقة لصياغة هذا القانون تكون بدلالة كمية تدعى أنتروبي(القصور الحراري) وهي غير محافظة وبدلًا من ذلك، فهي مجبرة على الزيادة في أي عملية حقيقية. ويمكن اعتبار الأنتروبي على أنها مقياس عدم الترتيب. ويخبرنا القانون الثاني للدنياميكا الحرارية أنّه كلّما تقدم الزمن زاد مقدار عدم الترتيب في الكون.

الفصل 15

قوانين الديناميكا الحرارية

تمييز الحرارة من الشغل

الديناميكا الحرارية هو الاسم الذي يشير إلى دراسة العمليات التي تنتقل الطاقة من خلالها كحرارة وشغل. رأينا في الفصل السادس أن الشغل يبذل عندما تنتقل الطاقة من جسم إلى آخر بالطرق الميكانيكية. ورأينا في الفصل الرابع عشر أن الحرارة عبارة عن انتقال للطاقة من جسم إلى آخر عند درجة حرارة أقل. وعليه، فإن الحرارة كالشغل تماماً. وللتمييز بينهما؛ فقد تمّ تعريف الحرارة على أنها انتقال الطاقة نتيجة اختلاف في درجات الحرارة. أمّا الشغل فهو انتقال الطاقة ولكن ليس نتيجة الاختلاف في درجات الحرارة.

وعند تناول الديناميكا الحرارية غالباً ما نشير إلى أنظمة معينة. والنظامُ جسمٌ أو مجموعة أجسام نرغب في دراستها (انظر البند 14 – 4). وأما كل شيء آخر في الكون فسوف نشير إليه على أنه "البيئة" أو "المحيط" الخارجي للنظام.

وسوف نختبر في هذا الفصل القانونين الرائعين في الديناميكا الحرارية. فالقانون الأول في الديناميكا الحرارية يربط بين انتقال الشغل والحرارة مع التغير في الطاقة الداخلية للنظام. ويمثل بعبارة عامة لحفظ الطاقة. أما القانون الثاني للديناميكا الحرارية، فيعبر عن حدود القدرة على عمل شغل نافع، وغالباً ما يوصف بدلالة القصور الحراري وهو مقياس لعدم الترتيب. وبالإضافة إلى هذين القانونين المهمّين فسوف نستعرض بعض الأجهزة العلمية المهمة ذات العلاقة مثل: الآلات الحرارية، والثلاجات، والمضخات الحرارية ومكيّفات الهواء.

15-1 القانون الأول في الديناميكا الحرارية

لقد عرّفنا الطاقة الداخلية للنظام في (البند 14 – 2) على أنها المجموع الكلي لطاقة جزيئات النظام. ومن المتوقع أن تزداد الطاقة الداخلية للنظام إذا بُذِل شغلٌ على النظام، أو إذا أضيفت إليه حرارة. وبالمثل، فمن المتوقع أن تقل الطاقة الداخلية للنظام إذا فقدت الحرارة منه أو انسابت إلى الخارج، أو إذا قام النظام ببذل شغل على شيء من محيطه الخارجي. وعليه، فمن المنطقي أن يُوسَّع مبدأ الشغل والطاقة، وهنا يُقترح القانون المهم الآتي: التغير في الطاقة الداخلية لنظام مغلق ما ΔU يُعادل الطاقة المضافة إلى النظام عن طريق التسخين ناقص الشغل المبذول بواسطة النظام على محيطه الخارجي. ونكتب بلغة المعادلات التالي:

القانون الأول في الديناميكا الحرارية

$$\Delta U = Q - W \qquad \textbf{(1 – 15)}$$

حرارة مضافة +
حرارة مفقودة -
شغل مبذول على النظام -
شغل يبذله النظام +

حيث Q هي محصلة الحرارة المضافة إلى النظام، أمّا W فهي محصلة الشغل المبذول بواسطة النظام. ويجب أن نكون حذرين ومتناغمين في اتباع الإشارات المتفق عليها لكل من Q و W. وبما أن W في (المعادلة 15 – 1) هو الشغل المبذول بواسطة النظام، فإنها ستكون سالبة في حالة أن الشغل بذل على النظام. وعليه، فإنّ الطاقة الداخلية U سوف تزداد. وبالمثل، فإن Q ستكون موجبة عند إضافة حرارة إلى النظام، وبذلك ستكون Q سالبة نتيجة مغادرة الحرارة للنظام.

تُعرف (المعادلة 15 – 1) **بالقانون الأول للديناميكا الحرارية**. وهو أحد أهم قوانين الفيزياء وتستند صلاحية هذا القانون إلى التجارب (مثل تجربة جول) حيث لم تسجل أي ملاحظة ضده. وبما أنّ Q و W تمثلان انتقال الطاقة إلى داخل النظام أو إلى خارجه، فإن الطاقة الداخلية ستتغير تبعاً لذلك. وعليه، يمكن اعتبار القانون الأول في الديناميكا الحرارية على أنه صيغةعامة ورائعة لقانون حفظ الطاقة.

القانون الأول في الديناميكا هو حفظ الطاقة.

ومن الجدير بالذكر أن قانون حفظ الطاقة لم يُصَغ إلاّ في القرن الثامن عشر وبعد الاعتماد على تفسير الحرارة على أنها شكل من أشكال انتقال الطاقة.

ويمكن لنظام ما في حالة معينة وفي أي لحظة أن يمتلك مقداراً معيناً من الطاقة الداخلية U. ولكن النظام لا يمتلك مقداراً معيناً من الحرارة أو الشغل. وفي الواقع، عندما يُبذلُ شغلٌ على النظام (ومثال ذلك انضغاط غاز ما) أو عندما تضاف أو تؤخذ حرارة من النظام، فإن حالة النظام ستتغير. لذا، فإن الشغل والحرارة يرتبطان بعمليات ديناميكية حرارية تستطيع أن تنقل النظام من حالة إلى أخرى، ومع هذا فهما لا يميزان الحالة نفسها. وتُسمى الكمياتُ التي تصف حالة النظام مثل: الطاقة الداخلية U، والضغط P، والحجم V، ودرجة الحرارة T، والكتلة m، أو عدد المولات n، **متغيرات الحالة**. ولا تعدّ كلّ من Q وW من متغيرات الحالة.

الطاقة الداخلية هي صفة من صفات النظام، وليس الشغل ولا الحرارة.

المثال 15-1 استخدام القانون الأول

أُضِيف 2500 J إلى نظام ما، وبُذل شغل مقداره 1800 J عليه. فما التغير في الطاقة الداخلية للنظام؟

النهج: نطبق القانون الأول في الديناميكا الحرارية (معادلة 15 – 1) على نظامنا.

الحل: إن مقدار الحرارة المضافة إلى النظام هو $Q = 2500\ \text{J}$. والشغل W المبذول بواسطة النظام هو $-1800\ \text{J}$. وهنا نلاحظ أنّ الإشارة سالبة؛ لأنه تمّ بذل 1800 J على النظام (كما أعطيت) وهذا يكافيء $-1800\ \text{J}$ المبذول بواسطة النظام، علماً بأن المقدار الأخير هو الذي نحتاج إليه للتعويض في (المعادلة 15 – 1) حسب اصطلاح الإشارات المشار إليه في الأعلى. وعليه:

$$\Delta U = 2500\ \text{J} - (-1800\ \text{J}) = 2500\ \text{J} + 1800\ \text{J} = 4300\ \text{J}$$

وقد تكون قد ظننت بالحدس بأنّك يجب أن تجمع 2500 J مع 1800 J علماً بأن الرقمين يعودان إلى مقدار الطاقة المضافة إلى النظام. فإذا كان هذا ظنّك فإنّك على صواب.

ملحوظة: لقد أجرينا هذه الحسابات بالتفصيل؛ للتأكيد على أهمية المتابعة الدقيقة للإشارات.

التمرين أ: ما مقدار التغير في الطاقة الداخلية في (المثال 15 – 1) لو أن 2500 J من الحرارة أضيفت إلى النظام، وأنّ النظام قد بذل 1800 J (أي كناتج)؟

* القانون الأول الموسّع في الديناميكا الحرارية

لمعرفة القانون الأول جيّدًا؛ خذ بالحسبان نظامًا متحركًا يمتلك طاقةً حركيّةً KE وافترض وجود طاقة وضع أيضاً. وعليه، فإنّ القانون الأول في الديناميكا الحراريّة يجب أن يضمّ هذين الحدّين، وبذلك يصبح:

$$\Delta \text{KE} + \Delta \text{PE} + \Delta U = Q - W. \qquad \textbf{(2 – 15)}$$

المثال 15-2 تحول الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية.

تخترق رصاصة كتلتها 3.0-g، تتحرك بسرعة 400 m/s شجرةً، وتخرج من جانبها الآخر بسرعة 200 m/s. أين ذهبت طاقة الرصاصة الحركية KE المفقودة؟ وإلامَ تحولت هذه الطاقة؟

النهج: افترض أنّ النظام مكون من الرصاصة والشجرة. وبما أنّه لا توجد طاقة وضع مرتبطة بالنظام، وكذلك لم يقم النظام ببذل أي شغل، ولم يبذل عليه بواسطة قوة خارجية، ولم يُضَف أيّ مقدار من الحرارة إلى الجسم لعدم انتقال أي مقدار من الطاقة للنظام أو من النظام بسبب اختلاف درجات الحرارة- فإن طاقة النظام الحركية ستتحول إلى طاقة داخلية للرصاصة والشجرة.

الحل: من القانون الأول في الديناميكا الحرارية كما هو مبين في (المعادلة 15 – 2)،

لدينا: $Q = W = \Delta \text{PE} = 0$ وعليه:

$$\Delta \text{KE} + \Delta U = 0$$

أو

$$\Delta U = -\Delta \text{KE} = -(\text{KE}_\text{f} - \text{KE}_\text{i}) = \tfrac{1}{2}m(v_\text{i}^2 - v_\text{f}^2)$$
$$= \tfrac{1}{2}(3.0 \times 10^{-3}\,\text{kg})\left[(400\,\text{m/s})^2 - (200\,\text{m/s})^2\right] = 180\,\text{J}.$$

ملحوظة: تزداد الطاقة الداخلية للشجرة وللرصاصة نتيجة ارتفاع درجة حرارة كل منهما. ولو أننا اخترنا الرصاصة لتمثل النظام بمفردها، لرأينا أن شغلاً بذل عليها، ولرأينا انتقالاً للحرارة أيضا

15-2 عمليات في الديناميكا الحرارية والقانون الأول

دعنا نحلل بعض العمليات في الديناميكا الحرارية في ضوء قانونها الأول. وسنختار نظامًا بسيطًا جدًّا كبداية: كتلة محددة من غاز مثالي، توضع في وعاء له ذراع متحرك كما هو موضح في (الشكل 15 – 1).

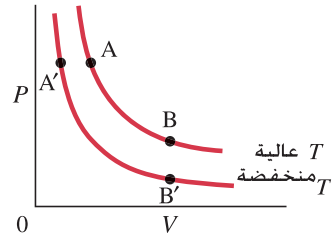
الشكل 15 – 1 غاز مثالي داخل أسطوانة ذات ذراع متحرك

وسنراقب أولاً عملية مثالية تجري عند درجة حرارة ثابتة. وسندعو هذه العملية بأحادية درجة الحرارة (أي أنها تبدأ وتستمر وتنتهي عند درجة الحرارة نفسها). وإذا أجريت عملية أحادية درجة الحرارة على غاز مثالي فإنّ $PV = nRT$ (المعادلة 13 – 3) تصبح PV = ثابت. وعليه، فإنّ العملية تتبع منحنًى مثل AB على مخطّطٍ PV المبين في (الشكل 15 – 12)، وهو منحنًى يمثّل PV = ثابت (كما في الشكل 13 – 12). وتمثل كلُّ نقطة على المنحنى مثل النقطة A حالةً من حالات النظام: أيْ ضغط النظام P وحجمه V عند لحظةٍ معيّنة. ويمكن تمثيل عمليّةٍ أخرى أحاديّة درجة الحرارة ولكن عند درجة حرارة أقلّ من سابقتها بمنحنى آخر مثل A′ B′ في (الشكل 15 – 2) (وسيكون الناتج: ثابت = $PV = nRT$ أقلّ عندما تكون T أقلّ). ويشار إلى المنحنيين في (الشكل 15 – 2) على أنّهما أحاديًّا درجة الحرارة.

عملية ثابتة درجة الحرارة ($\Delta T = 0$)

ونفترض أنّ الغاز ملامس لخزّان الحرارة (جسم ذو كتلة كبيرة جداً بحيث لن يحدث أيّ تغيير يذكر على درجة حرارته نتيجة تبادله الحرارة مع نظامنا). ونفترض أيضاً أنّ عملية الانضغاط (انخفاض الحجم) أو التمدد (زيادة الحجم) تحدث ببطء شديد لدرجة أنّ الغاز ككل يبقى في وضع الاتزان عند درجة الحرارة الثابتة. وإذا كان النظام يُمثّلُ في البداية بالنقطة A في (الشكل 15 – 2) وأضيف مقدار من الحرارة Q إلى النظام، فإن حجم النظام وضغطه سيتغيران. وعليه، ستمثّل حالة النظام الجديدة بنقطة أخرى B على المنحنى. وإذا بقيت درجة الحرارة ثابتة، فإن الغاز سيتمدد وسيبذل مقداراً من الشغل على محيطه الخارجي (وسيؤثر بقوة في الذراع في (الشكل 15 – 1) ليحركه مسافة ما). وعندما تبقى درجة الحرارة في (المعادلة 14 – 1) ثابتة، فإن الطاقة الداخلية للنظام لن تتغير: $\Delta U = \frac{3}{2}nR\,\Delta T = 0$. وعليه، فمن القانون الأول في الديناميكا الحرارية (معادلة 15 – 1) $\Delta U = Q - W = 0$ و $W = Q$: أي أنّ الشغل المبذول بواسطة الغاز خلال عمليّةٍ أحاديّة درجة الحرارة يعادل كمية الحرارة المضافة إلى الغاز.

خزان حرارة

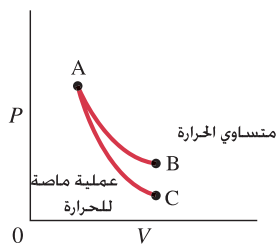


الشكل 15 – 2 مخطط PV لغاز مثالي يخضع لعمليات عند درجتي حرارة مختلفتين مع ثبوت درجة الحرارة في كلٍّ منهما.

عملية ثابتة درجة الحرارة (غاز مثالي)
T = ثابت, $Q = W$, $\Delta U = 0$

إنّ العملية ثابتة الحرارة (الكظمية) هي العملية التي لا يُسمح خلالها بانسياب الحرارة إلى داخل النظام أو خارجه: $Q = 0$. ويمكن لهذه الحالة أن تحدث عندما يكون النظام معزولاً عزلاً تاماً، أو عندما تحدث العملية بسرعة كبيرة لدرجة لا تترك وقتاً كافياً للحرارة التي تنساب عادة ببطء شديد للانسياب إلى الداخل ولا إلى الخارج. ويعدّ تمدد الغازات السريع جداً في محرك الاحتراق الداخلي للآلة مثالاً على هذه العملية التي يمكن اعتبارها كظمية. ويتبع التمدد البطيء الكظمي للغاز المثالي منحنى مثل المنحنى AC في (الشكل 15 – 3). وبما أن $Q = 0$، فإن $\Delta U = -W$: أي أن الطاقة الداخلية ستتناقص عندما يتمدد الغاز. لذا، فإن درجة الحرارة ستنخفض أيضاً (لأن $\Delta U = \frac{3}{2} nR\,\Delta T$). وهذا واضح في (الشكل 15 – 3) علماً بأن الناتج $PV\ (= nRT)$ هو أقل عند النقطة C منه عند النقطة B (منحنى AB للعملية أحادية درجة الحرارة حيث $\Delta U = 0$ و $\Delta T = 0$). وفي العملية العكسية خلال الانضغاط الكظمي (ومثالٌ على ذلك الذهاب من C إلى A) عند بذل الشغل على الغاز، فإنّ طاقته الداخلية ستزداد وترتفع بذلك درجة حرارته. وفي آلة الديزل، ينضغط مزيج الوقود والهواء كظمياً بسرعة وبمعدل 15 ضعفاً أو أكثر لترتفع درجة الحرارة بمقدار هائل نتيجة ذلك لدرجة كافية لتحفز عندها الاحتراق التلقائي للمزيج.

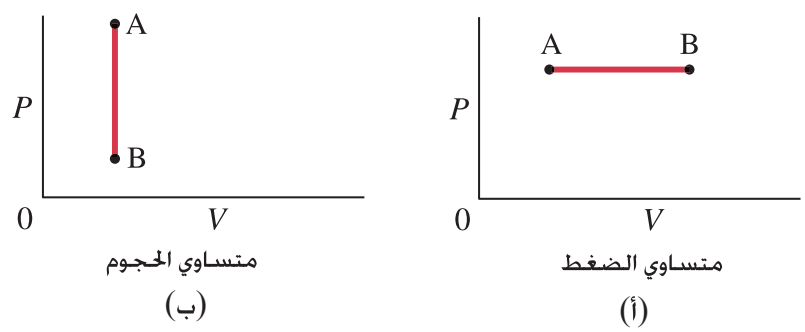
عملية كظمية ($Q = 0$)



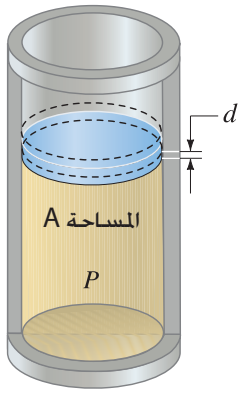
الشكل 15 – 3 منحي PV للعملية (AC) وأحادية درجة الحرارة (AB) لغاز مثالي.

وتُعدّ العمليات عند درجة حرارة ثابتة، وتلك ذات الحرارة الثابتة عمليات قابلة للحدوث. وهناك عمليات بسيطة أخرى من الممكن حدوثها في الديناميكا الحرارية ممثلة على منحنيات PV في (الشكل 15 – 4): (أ) العملية أحادية الضغط: وهي العملية التي تحدث عند ضغط ثابت والتي يمكن تمثيلها بيانياً بخط أفقي منتظم على المنحنى PV (الشكل 15 – 4أ). (ب) العملية أحادية الحجم: وهي العملية التي لا يتغير الحجم خلالها (الشكل 15 – 4ب). ويبقى قانون الديناميكا الحرارية الأول صالحاً للتطبيق خلال هذه العمليات وخلال العمليات الأخرى جميعها.

عملية ثابتة الضغط:
$W = P\,\Delta V$ و P = ثابت
عملية أحادية الحجم:
$W = 0$ و V = ثابت



الشكل 15 - 4 (أ) عملية أحادية الضغط (ضغط ثابت)
(ب) عملية أحادية الحجم (حجم ثابت).



الشكل 15 – 5 يبذل شغل على المكبس عند تمدد الغاز، فيتحرك ال مسافة d.

إنّ حساب الشغل خلال أيّ عملية أمر مفيد. ويمكن حساب الشغل بسهولة خلال العملية عند ثبات الضغط (أحادي الضغط). وعلى سبيل المثال، إذا تمدّد الغاز خلال العملية كما في (الشكل 15 – 5) ببطء ليدفع الذراع، فإنّ قيمة الشغل المبذول على الغاز لرفع الذراع هو حاصل ضرب القوة F في المسافة d. ولكن القوة ما هي إلّا ضغط الغاز P مضروب في مساحة الذراع A. $F = PA$. وعليه:

$$W = Fd = PAd$$

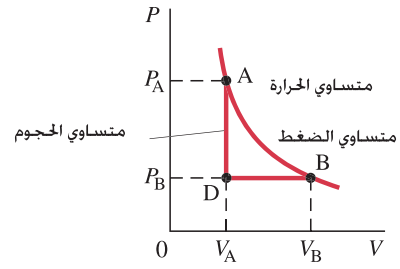
لأن $Ad = \Delta V$. وهو التغير في حجم الغاز، أي:

الشغل المبذول خلال تغير الحجم

$$W = P\,\Delta V \qquad \text{[ضغط ثابت]} \quad \textbf{(3 – 15)}$$

وتبقى (المعادلة 15 – 3) صالحة عندما يتقلّص الغاز تحت تأثير ضغط ثابت. لتكون ΔV في تلك الحالة سالبة (لأن V تتناقص)؛ وتصبح W عندها سالبة لتعطي انطباعاً بأن الشغل قد بُذل على الغاز. كما أنّ (المعادلة 15 – 3) صالحة ويمكن تطبيقها على السوائل والمواد الصلبة. طالما بقي الضغط ثابتاً خلال العملية.

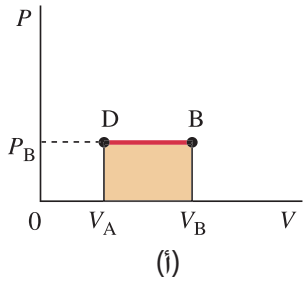
ولا يتغيّر الحجم في العملية أحادية الحجم (الشكل 15 – 4 ب) ويترتب على ذلك انعدام الشغل: $W = 0$.



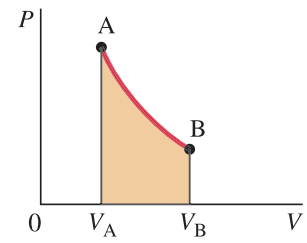
الشكل 15 – 6 منحنى PV لعمليات مختلفة (انظر االنص) حيث يتغير النظام من A إلى B.

الشغل = المساحة تحت المنحنى PV.

الشكل 15 – 7 الشغل المبذول بواسطة الغاز يساوي المساحة تحت المنحى PV.



(أ)



(ب)

يظهر (الشكل 15 – 6) أحاديّ درجة الحرارة AB الذي رأيناه في (الشكل 15 – 2)، بالإضافة إلى عملية أخرى ممكنة ممثلة بالمسار ADB. وعند الانتقال من A إلى D لا يقوم الغاز ببذل أيّ شغل نتيجة لعدم تغير الحجم. أمّا عند الانتقال من D إلى B، فإن الغاز يبذل شغلاً مساوياً لـ $P_B(V_B - V_A)$، وهذا هو الشغل الكلي المبذول خلال العملية ADB.

وإذا تغير الضغط خلال عملية ما مثل تلك أحادية درجة الحرارة AB في (الشكل 15 – 2)، عندها لا يمكن استخدام (المعادلة 15 – 3) مباشرةً لتحديد الشغل. ولكن يمكن الحصول على تقدير تقريبي باستخدام قيمة "متوسطة"لِـP في (المعادلة 15 – 3). وبدقة أكثر، فإنّ الشغل المبذول يعادل المساحة تحت المنحنى PV. وقد يكون هذا أكثر وضوحاً عندما يكون الضغط ثابتاً : كما يظهر في (الشكل 15 – 7أ) فإنّ الشغل المبذول هو $P_B(V_B - V_A)$ وهو المساحة المظللة. وبالمثل، فإنّ الشغل المبذول خلال العملية أحادية درجة الحرارة يساوي المساحة المظللة الظاهرة في (الشكل 15 – 7ب). ويمكن حساب الشغل المبذول في هذه الحالة باستخدام الرياضيات، أو عن طريق تقدير المساحة على ورقة بيانية.

المثال المفاهيمي 15-3 الشغل في العمليات أحادية الحرارة وأحادية درجة الحرارة.

لقد رأينا في (الشكل 15 –3) منحنيين PV لتمدد غاز بطريقتين هما: أحادية الحرارة، وأحادية درجة الحرارة. ولقد كان الحجم الابتدائي هو نفسه V_A في الحالتين، أمّا الحجم النهائي فكان متساوياً $(V_B = V_C)$. أيّ أنّ العمليتين تتطلبان من الغاز شغلاً أكبر لإنجازهما؟

الإجابة: نظامنا هو الغاز. يبذل الغاز شغلاً أكثر خلال العملية أحادية درجة الحرارة، ويمكن لنا أن نرى ذلك بطريقتين بسيطتين بالنظر إلى (الشكل 15 – 3). أولاً، إنّ "متوسط" الضغط كان أعلى خلال العملية AB أحادية الحرارة. وعليه، فإن $W = P_{av}\,\Delta V$ كانت أكبر (ΔV كانت نفسها في العمليتين). ثانياً، نستطيع النظر إلى المساحة تحت كل منحنى: المساحة تحت المنحنى AB التي تمثل الشغل المبذول هي الأكبر (لأن المنحنى AB أعلى) من تلك تحت المنحنى AC.

التمرين ب: هل الشغل المبذول بواسطة الغاز في العملية ADB في (الشكل 15 – 6) أكبر من الشغل المبذول في العلمية AB أحادية الحرارة أم أقل منه أم يساويه؟

المثال المفاهيمي 15-4 عملية أحادية الحرارة (كظمية) بسيطة.

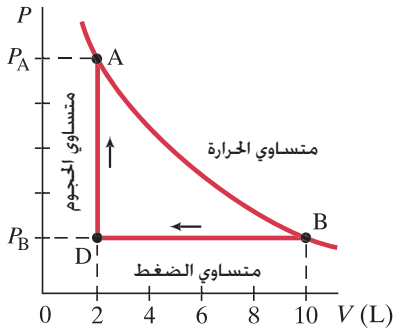
هذا مثال بسيط لعملية كظمية تستطيع عملها باستخدام رباط مطاطي. امسك رباطاً مطاطياً رقيقاً ومرخياً بيديك وقرّبه من شفتيك لتشعر بدرجة حرارته. مدّد الرباط فجأة وقرّبه مباشرة من شفتيك . يجب أن تشعر بارتفاع في درجة حرارته. فسّر بوضوح سبب ارتفاع درجة حرارة الرباط.

الإجابة: تمدد الرباط المطاطي الفجائي يجعل العملية كظمية لعدم وجود وقت كافٍ كي تدخل إلى النظام الرباط المطاطي أو تخرج منه. وعليه فإنّ $Q = 0$. وبما أنك تبذل شغلاً على النظام، فإن W هي مقدار سالب في (المعادلة 15–1) $(\Delta U = Q - W)$. لذا، فإن ΔU يجب أن تكون موجبة. وأي ارتفاع في الطاقة الداخلية للنظام يعزى إلى الارتفاع في درجة الحرارة (للغاز المثالي يعطى هذا بالمعادلة 14–1).

يعرض (الجدول 15 - 1) ملخصاً مختصراً للعمليات التي ناقشناها.

الجدول 15 – 1 عمليات ديناميكية حرارية بسيطة والقانون الأول

العملية	ما هو الثابت	ما يتنبأ به القانون الأول
أحادية درجة الحرارة	T = ثابت	$\Delta T = 0$ تجعل $\Delta U = 0$ وعليه $Q = W$
أحادية الضغط	P = ثابت	$Q = \Delta U + W = \Delta U + P\,\Delta V$
أحادية الحجم	V = ثابت	$\Delta V = 0$ تجعل $W = 0$ وعليه $Q = \Delta U$
أحادية الحرارة	$Q = 0$	$\Delta U = -W$



الشكل 8 – 15 (مثال 5 - 15).

المثال 5-15 **القانون الأول في عمليات أحادية الضغط وأحادية الحجم.**

تقلّص غاز مثالي ببطء تحت ضغط ثابت مقداره 2.0 atm من 10.0 L إلى 2.0 L . وتمثل هذه العملية في (الشكل 15 – 8) بالمسار B إلى D. (وتنساب الحرارة خلال هذه العملية إلى خارج الغاز وتنخفض درجة الحرارة). ثمّ تضاف الحرارة إلى الغاز مع إبقاء الحجم ثابتاً والسماح للضغط ودرجة الحرارة بالارتفاع (الخط DA) إلى أن تصل درجة الحرارة إلى قيمتها الأولية ($T_A = T_B$). احسب (أ) الشغل الكلي المبذول بواسطة الغاز في العملية BDA . (ب) الحرارة الكلية المنسابة إلى الغاز.

النهج: (أ) يبذل الشغل فقط خلال عملية التقلص BD فقط. أما خلال العملية DA فيبقى الحجم ثابتاً؛ أي $\Delta V = 0$. وعليه، فلن يُبذل أي شغلٍ (المعادلة 15 – 3). (ب) نستخدم القانون الأول في الديناميكا الحرارية (المعادلة 15 – 1).

الحل: (أ) الضغط خلال التقلص BD وهو $2(1.01 \times 10^5\ \text{N/m}^2) = 2.0\ \text{atm}$ والتغير في الحجم هو:

$$\Delta V = (2.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3) - (10.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3) = -8.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$$

وعليه، فإنّ الشغل المبذول هو:

$$W = P\,\Delta V = (2.02 \times 10^5\ \text{N/m}^2)(-8.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3) = -1.6 \times 10^3\ \text{J}$$

والشغل الكلي المبذول بواسطة الغاز وهو $-1.6 \times 10^3\ \text{J}$ حيث تعني الإشارة السالبة أن $+1.6 \times 10^3\ \text{J}$ من الشغل قد بُذِل على الغاز.

(ب) بما أنّ درجة الحرارة متساوية عند بدء العملية BDA ونهايتها، فلن يحصل أيُّ تغيُّرٍ في الطاقة الداخلية : $\Delta U = 0$. ومن القانون الأوّل في الديناميكا الحرارية فإنّ :

$$0 = \Delta U = Q - W$$

ولذلك:

$$Q = W = -1.6 \times 10^3\ \text{J}$$

وبما أنّ Q سالبة، فإنّ 1600 J من الحرارة سينساب إلى خارج الغاز خلال العملية الكلية BDA.

التمرين جـ: في (المثال 15 – 5)، إذا كانت الحرارة المفقودة من الغاز خلال العملية BD $8.4 \times 10^3\ \text{J}$، فما التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال العملية BD؟

أمثلة إضافية

المثال 6-15 **الشغل المبذول داخل آلة.**

يتمدد 0.25 moles من الغاز المثالي أحادي الذرة بسرعة مع ثبات حرارته داخل أسطوانة آلة. وخلال هذه العملية، تُدفع الذراع، وتنخفض درجة حرارة الغاز من 1150 K إلى 400 K. فما مقدار الشغل الذي يبذله الغاز؟

النهج: نفترض الغاز نظامنا (أما الذراع فيعدّ جزءاً من محيطه الخارجي). وبما أن الضغط غير ثابت، فلن نستطيع استخدام (المعادلة 15 – 3). وبدلاً من ذلك سنستخدم القانون الأول في الديناميكا الحرارية لأنه يمكن تحديد ΔU بدلالة $Q = 0$ (عملية كظمية).

الحل : يتم تحديد ΔU من (المعادلة 14 – 1) لإيجاد الطاقة الداخلية للغاز المثالي أحادي الذرة:

$$\begin{aligned}\Delta U = U_f - U_i &= \tfrac{3}{2} nR(T_f - T_i) \\ &= \tfrac{3}{2}(0.25\ \text{mol})(8.314\ \text{J/mol}\cdot\text{K})(400\ \text{K} - 1150\ \text{K}) \\ &= -2300\ \text{J}.\end{aligned}$$

وعليه، من القانون الأول في الديناميكا الحرارية (المعادلة 15–1) فإنّ:

$$W = Q - \Delta U = 0 - (-2300\ \text{J}) = 2300\ \text{J}$$

المثال 15-7 ΔU **لتحول الماء المغلي إلى بخار.**

حدّد التغير في الطاقة الداخلية لِـ 1.00 liter من ماء (كتلته 1.00 kg) عند 100°C عندما يتحول من سائل إلى غاز لينتج من ذلك 1671 liter من البخار عند 100°C افترض أن العملية جرت عند الضغط الجوي المعياري

النهج: الماء هنا هو نظامنا. ولا تُسبّبُ الحرارة الضرورية هنا أي ارتفاع في درجة الحرارة، ولكنها تغير في طور المادة أو حالتها. ونستطيع تحديد الحرارة Q الضرورية باستخدام حرارة الماء الكامنة كما في (البند 15 – 5). أما قيمة الشغل الذي سيبذل فهي: $W = P\,\Delta V$. إذن، سيعطي القانون الأول في الديناميكا الحرارية ΔU.

الحل: إن حرارة التبخر الكامنة للماء (الجدول 14 – 3) هي $L_V = 22.6 \times 10^5\,\text{J/kg}$، والحرارة الضرورية اللازمة لهذه العملية هي:

$$\begin{aligned} Q = mL &= (1.00\,\text{kg})(22.6 \times 10^5\,\text{J/kg}) \\ &= 22.6 \times 10^5\,\text{J} \end{aligned}$$

أمّا الشغل المبذول بواسطة الماء (المعادلة 3 – 15) فهو:

حيث
$$\begin{aligned} W = P\,\Delta V &= (1.01 \times 10^5\,\text{N/m}^2)[(1671 \times 10^{-3}\,\text{m}^3) - (1 \times 10^{-3}\,\text{m}^3)] \\ &= 1.69 \times 10^5\,\text{J}, \end{aligned}$$

استخدمنا $1\,\text{atm} = 1.01 \times 10^5\,\text{N/m}^2$ و $1\,\text{L} = 10^3\,\text{cm}^3 = 10^{-3}\,\text{m}^3$.

وعليه:

$$\begin{aligned} \Delta U = Q - W &= (22.6 \times 10^5\,\text{J}) - (1.7 \times 10^5\,\text{J}) \\ &= 20.9 \times 10^5\,\text{J}. \end{aligned}$$

ملحوظة: تعمل معظم الحرارة المضافة على زيادة الطاقة الداخلية للماء (زيادة الطاقة الجزيئية للتغلب على التجاذب الذي يربط الجزيئات القريبة بعضها إلى بعض في الحالة السائلة). ويستخدم جزء صغير فقط ($< 10\%$) لعمل شغل.

التمرين د: (المعادلة 14 – 1)، $U = \frac{3}{2}nRT$ تبين أن $\Delta U = 0$ في (المثال 15-7) وذلك لأن $\Delta T = 0$. و على الرغم من ذلك فقد حددنا ان $\Delta U = 21 \times 10^5\,\text{J}$. أين الخطأ؟

* 15-3 الأيض في الإنسان والقانون الأول

تطبيق الفيزياء
الطاقة في الجسم البشري

تبذل الكائنات الحية جميعها كالإنسان والحيوان شغلاً. ويبذل الإنسان الشغل عندما يمشي أو يركض أو يرفع حملاً ثقيلاً. وهذا الشغل يتطلب طاقة، حيث تعدّ هذه الطاقة ضرورية للنمو لعمل خلايا جديدة، واستبدال الخلايا القديمة الميتة. ويشار إلى العمليات العديدة لتحويل الطاقة والتي تحدث خلال الكائنات الحية بالأيض.

ونستطيع تطبيق القانون الأول في الديناميكا الحرارية

$$\Delta U = Q - W$$

لأي كائن حي، ولنقل للجسم البشري. ويبذل الجسم الشغل خلال نشاطاته المتنوعة. ولكي لا ينجم عن ذلك نقصان في الطاقة الداخلية للجسم (ولدرجة حرارته أيضاً) فيجب أن تُضاف الطاقة بطريقة ما للتعويض. ومع هذا، فإنّ الطاقة الداخلية للجسم لا يمكن المحافظة عليها عن طريق انسياب الحرارة Q إلى داخله. والوضع الطبيعي للجسم البشري أن يبقى عند درجة حرارة أعلى من محيطه الخارجي. وعليه، فإنه من الطبيعي أن تنساب الحرارة منه إلى الخارج. وفي الأيام شديدة الحرارة عندما يمتص الجسم الحرارة، عندها لا توجد أي طريقة للجسم لكي يوظف هذه الحرارة أو يستفيد منها في عملياته الحيوية. ويبقى السؤال الأهم: ما مصدر الطاقة الذي يمكّننا من بذل الشغل؟ والحل هو الطاقة الداخلية (الطاقة الكيميائية الكامنة) المختزنة في الطعام (الشكل 15–9). وتتحوّل الطاقة الداخلية في النظام المغلق فقط نتيجة لانسياب الحرارة أو لبذل شغل. أما في النظام المفتوح، وعندما نتناول الطعام، فإنّنا نأتي بالطاقة إلى داخل أجسادنا مباشرة، حيث تعمل على زيادة الطاقة الداخلية الكلية U. وفي النهاية، تتحول هذه الطاقة إلى شغل وحرارة تنساب في الجسد حسب القانون الأول.

الشكل 15 – 9 تتزود راكبة الدراجة بالطاقة المدخلة.

إنّ المعدّلَ الأيضيَّ هو معدّلُ انتقال الطاقة الداخلية خلال الجسم. وغالبًا ما يُوصف بدلالة كيلو سعر/ساعة أو بالواط. ويعطي (الجدول 15 – 2) معدلات أيضية لنشاطات بشرية اعتيادية لشخصٍ متوسّط بالغ كتلته 65 كغم.

المثال 15-8 **الشغل المبذول داخل آلة.**

ما مقدار الطاقة المتحوّلة خلال 24 ساعة من قِبل شخص ما كتلته 65 كغم إذا قضى 8.0 ساعات نائماً و1.0 ساعة بعمل جسماني معتدل، و 4.0 ساعات في نشاطات خفيفة، و 11.0 ساعة في العمل المكتبي أو الاسترخاء؟

النهج: تعادل الطاقة المتحولة خلال أي نشاط المعدل الأيضي (الجدول 15-2) مضروباً بالزمن.

الحل: يعطي (الجدول 15 – 2) المعدل الأيضي بدلالة الواط (جول/ثانية). وبما أنّ الساعة تساوي 3600 ثانية، فإن الطاقة الكلية المتحولة هي:

$$\left[\begin{array}{l}(8.0\,\text{h})(70\,\text{J/s}) + (1.0\,\text{h})(460\,\text{J/s}) \\ + (4.0\,\text{h})(230\,\text{J/s}) + (11.0\,\text{h})(115\,\text{J/s})\end{array}\right](3600\,\text{s/h}) = 1.15 \times 10^7\,\text{J}.$$

ملحوظة : بما أن $1\ \text{kcal} = 4.186 \times 10^3\ \text{J}$ سعر فهذا مكافئ لـ 2800 kCal. وتناول طعام مكافئ لـ 2800 Cal سيعوض الطاقة الناتجة. وعليه، فإنّ شخصاً كتلته 65 kg ويرغب في فقدان وزن يجب أن يأكل أقلَّ من 2800 Cal في اليوم ، أو عليه أن يزيد من مستوى نشاطه.

الجدول 15 – 2
معدلات الأيض (إنسان كتلته 65 كغم)
المعدل الأيضي (بالتقريب)

النشاط	كيلو سعر watts	كيلو سعر kcal/h
النوم	70	60
الجلوس السوي	115	100
نشاط خفيف (الأكل و اللبس والواجبات المنزلية	230	200
شغل متوسط (لعب التنس والمشي)	460	400
الركض (15كم/س)	1150	1000
ركوب الدراجة(السباق)	1270	1100

15-4 القانون الثاني في الديناميكا الحرارية– مقدمة

يخبرنا القانون الأول في الديناميكا الحرارية أنّ الطاقة محفوظة. ومع هذا، فهناك عمليّاتٌ كثيرةٌ يمكنها أن تحفظ الطاقة ولكنّها لا تحدث في الطبيعة. فعلى سبيل المثال، عند ملامسة جسمٍ حارٍّ لجسمٍ باردٍ فإنّ الحرارة ستنساب من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد، ولن يحدث العكس نهائياً من تلقاء نفسه . ومع أنّ الطاقة ستحفظ لو انسابت الحرارة من الجسم الأبرد إلى الجسم الأسخن، إلا أن هذه العملية لا تحدث تلقائيًّا.* وكمثال آخر، خذ بالحسبان ما يحدث عند إلقاء صخرة نحو الأسفل لتصطدم بالأرض. إن طاقة الصخرة الكامنة ستتحول إلى طاقة حركية خلال سقوط الصخرة. وعند اصطدام الصخرة بالأرض، فإن هذه الطاقة ستتحول إلى طاقة داخلية في الصخرة وفي منطقة التصادم المجاورة، ممّا يحفز جزيئات الصخرة على التحرك بسرعة أكبر لترتفع درجة حرارة الصخرة قليلاً. ولكن، هل شاهدت حدوث العكس – تقفز صخرة راكدة على الأرض فجأة إلى الأعلى في الهواء لأن طاقة جزيئاتها الحرارية قد تحولت إلى طاقة حركية ؟ ومع أن الطاقة ستكون محفوظة في هذه العملية، إلا أننا لن نرى حدوثها أبداً.

وهناك أمثلة أخرى كثيرة عن عمليات من الممكن أن تحدث في الطبيعة وليس عكسها. وهناك مثالان آخران: (1) إذا وضعت طبقة من الملح في إناء ثم غطيتها بطبقة من الفلفل المطحون فستحصل على خليط من الملح والفلفل. ولو حاولت بعد ذلك فصل مكونات الخليط إلى طبقتين منفصلتين من الملح والفلفل كما في السابق، فلن تستطيع ذلك وإن استغرقت زمناً طويلاً جداً في الهز. (2) تنكسر أكواب القهوة والزجاج تلقائياً عند إلقائها أرضاً. ولن تعود إلى ما كانت عليه قبل الكسر تلقائياً (الشكل 15 – 10) . ولن ينتهك القانون الأول في الديناميكا الحرارية (حفظ الطاقة) ولو أن أي من هذه العمليات السابقة قد حدث في الاتجاه المعاكس. ولتفسير هذه الحالات غير القابلة للتحقق في الاتجاه المعاكس، قام العلماء في النصف الثاني من القرن التاسع عشر بصياغة مبدأ جديد يعرف بالقانون الثاني في الديناميكا الحرارية.

*ونعني بالتلقائي بأنها تحدث من تلقاء نفسها دون الحاجة إلى أي شغل مدخل من أي نوع. (تقوم الثلاجة بنقل الحرارة من المحيط البارد إلى المحيط الأكثر دفئاً فقط بعد بذل الشغل).

(أ) الحالة الإبتدائية. (ب) لاحقاً: يعود الكوب صحيحاً ويرتفع إلى الأعلى. (جـ) لاحقاً أيضاً: يستقر الكوب على الطاولة.

الشكل 15 – 10 هل لاحظت هذه العملية، كوب مكسور يعود تلقائياً صحيحاً ويرتفع بمفرده إلى سطح الطاولة؟

يُعدّ **القانون الثاني في الديناميكا الحرارية** بياناً حول العمليات التي تحدث في الطبيعة والتي لا يمكن أن تحدث. ويمكن لهذه العبارة أن تصاغ بعدة طرق متكافئة. ومن هذه العبارات صياغة "كلاوسياس" (1822 – 1888) وهي:

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (عبارة كلاوسياس)

يمكن للحرارة أن تنساب تلقائيًّا من الجسم الساخن إلى الجسم البارد، ولا يمكن أن تنساب تلقائيًّا من الجسم البارد إلى الجسم الساخن.

ومع أنّ هذه العبارة تنطبق على عملية واحدة بعينها، فليس واضحاً كيف يمكن لها أن تنطبق على العمليات الأخرى. لذا، هناك ضرورة واضحة لصياغة أخرى للقانون بعبارة أشمل وأعم تضم العمليات الممكنة جميعها بصورة أكثر وضوحاً.

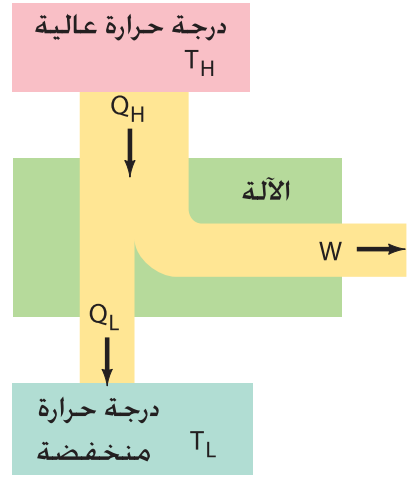
وتم الاعتماد على دراسة الآلات الحرارية لتطوير عبارة عامة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. إنّ الآلة الحرارية هي أي جهاز قادر على تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي مثل الآلات البخارية وآلات السيارات. وسوف نختبر الآن الآلات البخارية من وجهة النظر العملية، ومن حيث أهميتها في تطوير القانون الثاني في الديناميكا الحرارية.

الآلة الحرارية

5-15 الآلات الحرارية

إنّ تولد طاقة حرارية نتيجة بذل شغل يُعدّ أمرًا سهلًا. وقد يحدث هذا على سبيل المثال عند دلك يديك بعضهما ببعض بسرعة، أو عن طريق أي عملية احتكاك أخرى. ولكنّه من الصعب عمل عكس ذلك؛ أي أنّ نحصل على شغل من الطاقة الحرارية. ولقد تم اختراع آلة عملية تقوم بذلك في القرن الثامن عشر عند تطوير الآلة البخارية.

والفكرة الأساسية وراء أيّ آلة بخارية هي إمكانية الحصول على الطاقة الميكانيكية من الطاقة الحرارية، وقد يحدث هذا فقط عندما يسمح للحرارة بالانسياب من درجة حرارة مرتفعة إلى درجة حرارة منخفضة. وخلال هذه العملية، يتحوّل جزء من الحرارة إلى شغل ميكانيكي كما هو مبين في مخطط الرسم البياني في (الشكل 15 – 11). وما يثير الاهتمام هو الآلات القادرة على العمل لدورات متتابعة (أي عندما يكون النظام قادرًا على العودة إلى نقطة البداية باستمرار). ويكون التغيير في الطاقة الداخلية للنظام $\Delta U = 0$ بسبب عودته إلى نقطة البداية. وعليه، فإن جزءًا من الحرارة المدخلة Q_H عند درجة الحرارة المرتفعة T_H سيتحوّل إلى شغل W وجزءًا آخر سيصرف كحرارة نحو الخارج Q_L عند درجة حرارة منخفضة T_L (الشكل 15 – 11). ونتيجة لحفظ الطاقة، فإن $Q_H = W + Q_L$. وتسمى درجتا الحرارة المرتفعة والمنخفضة T_H و T_L بدرجتي حرارة التشغيل للآلة. لاحظ الآن بتمعن بأننا نستخدم اصطلاحًا جديدًا لنظام الإشارات حيث سنفترض كلّا من Q_H ، Q_L و W موجبة دائمًا. وسنوضح اتجاه كلٍّ تحول في الطاقة في المخطط المعني كما هو مبيّن في (الشكل 15 – 11).



الشكل 15 – 11 مخطط رسم بياني لانتقال طاقة آلة حرارية.

تنويه:

اتفاقية جديدة للإشارات

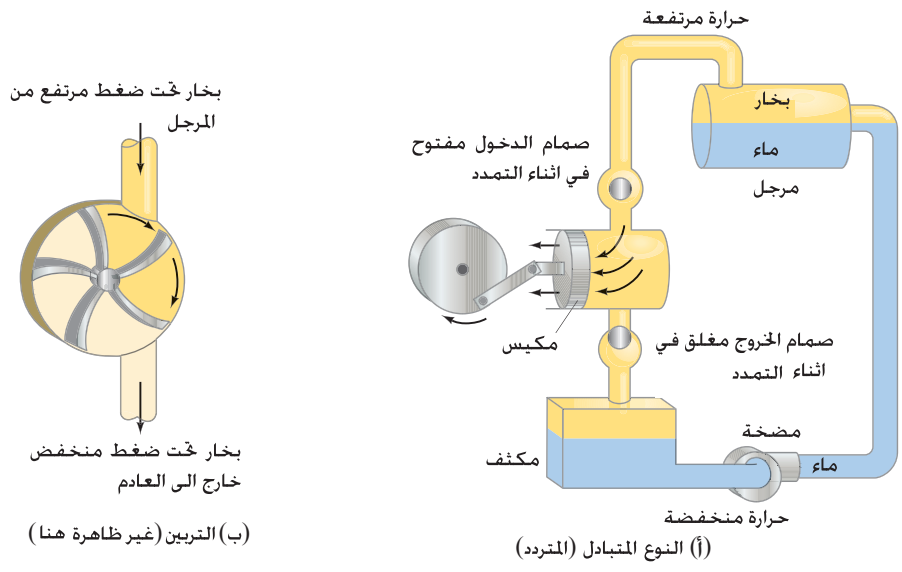
$Q_H > 0, Q_L > 0, W > 0$

الآلة البخارية وآلة الاحتراق الداخلي

تطبيق الفيزياء

الآلات

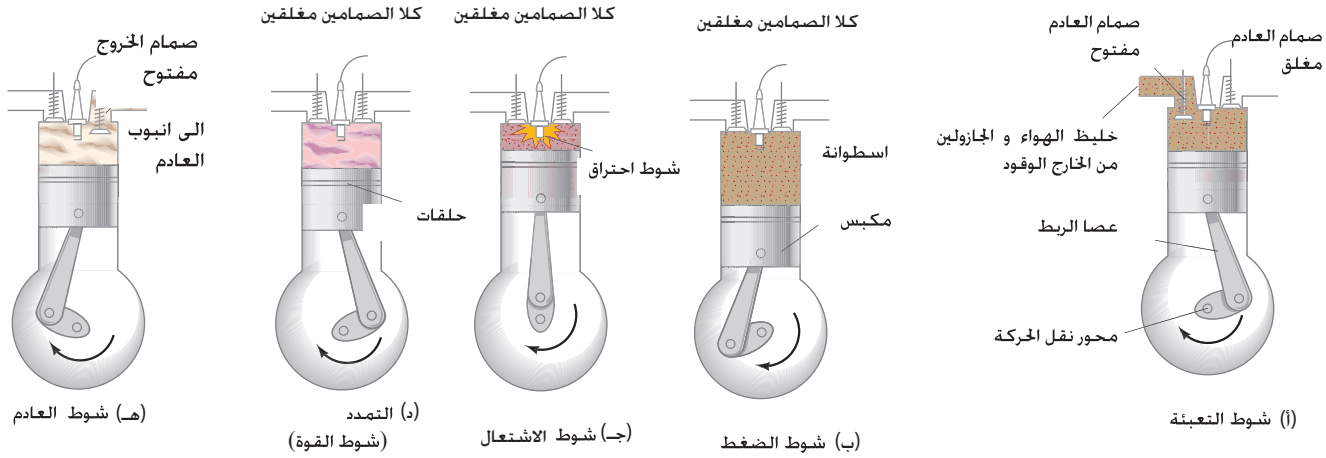
لقد تمّ إيضاح طريقة عمل الآلة البخارية في (الشكل 15 – 12). وهناك نوعان من الآلات البخارية كلٌّ منهما يستعمل البخار المسخن الناجم عن احتراق الفحم والزيت



الشكل 15 – 12 الآلات البخارية

والغاز أو الطاقة النووية. ويمرُّ البخار المسخّن في الآلة البخارية من النوع المتبادل كما في (الشكل 15 – 12أ) خلال صمّام السحب، ويتمدّد فيدفع المكبس لإجباره على الحركة. وعندما يرتد المكبس إلى موضعه الأصلي، يدفع الغاز إلى خارج صمام العادم. وتبقى طريقة العمل في المحرك البخاري كما في (الشكل 15 – 12ب) هي الطريقة السابقة نفسها مع استعمال عجلة تحريك بمحرك دوراني يشبه عجلة تجديف ذات شفرات عديدة، علمًا بأنّ معظم الكهرباء المولدة في أيامنا هذه تستخدم المحركات البخارية.* وتُسَمّى المادة التي تبرد وتسخن (البخار في هذه الحالة) بالمادة العاملة. ويتم الحصول على درجة الحرارة المرتفعة في الآلة البخارية عن طريق حرق الفحم أو النفط، أو أي مصدر آخر للوقود القادر على تسخين البخار.

وفي آلة الاحتراق الداخلي (المستخدمة في معظم الحافلات)، يتم الوصول إلى درجة الحرارة المرتفعة عن طريق حرق مزيج الوقود – الهواء داخل أسطوانة (يتم إشعاله بواسطة شمعة إشتعال) كما هو موضح في (الشكل 15 – 13).



الشكل 15 – 13 آلة احتراق داخلي تعمل بدورة من أربعة أشواط: (أ) ينساب مزيج الوقود – الهواء إلى داخل الأسطوانة بعد حركة المكبس نحو الأسفل. (ب) يتحرك المكبس إلى الأعلى ليضغط الغاز. (جـ) لحظة اطلاق شرارة شمعة الاشتعال واحتراق مزيج الوقود -الهواء والمضغوط بشدة لترتفع درجة حرارته لدرجة عالية. (د) تصبح الغازات الآن عند درجة حرارة مرتفعة وضغط مرتفع فتتمدد خلف المكبس. (هـ) تُدفع الغازات المحترقة إلى أنبوب العادم، وعند وصول المكبس إلى القمة يغلق صمام العادم ويفتح صمام السحب، و تعود الدورة لتتكرر مرة أخرى. وتمثل (أ) و(ب) و(د) و(هـ) الأربعة أشواط .

لماذا تحتاج الآلة البخارية إلى ΔT لتعمل؟

سنختبر الآلة البخارية الآن لنرى ضرورة الاختلاف في درجات الحرارة لعمل مثل هذه الآلات.ولنفترض في الآلة المتبادلة على سبيل المثال عدم وجود مكثف أو مضخة (الشكل 13–12أ) وأنّ البخار سيبقى عند درجة الحرارة نفسها خلال النظام ككل. وهذا سيعني أن ضغط الغاز العادم هو نفسه ضغط الغاز المسحوب إلى الداخل. وعليه، وبالرغم من أنّ الغاز سيبذل شغلاً على المكبس خلال تمدده، إلّا أنّه يجب على المكبس أن يبذل شغلاً مساوياً لإرغام المكبس على دفع البخار إلى العادم، وفي النتيجة تكون محصلة الشغل الكلي صفراً. أمّا في الآلات الحقيقية، فإن غاز العادم يبرد إلى درجة حرارة أقل ويتكاثف فيصبح ضغطه أقل من ضغط الغاز المدخل . لذا، فإن الشغل الذي سيبذله المكبس في طرد الغاز العادم إلى الخارج سيكون أقل من الشغل المبذول بواسطة الغاز ضد المكبس خلال حركة الغاز إلى الداخل . ويترتب على ذلك فرق في الشغل المبذول مرتبط بالفرق في درجات الحرارة . وبالمثل في المحركات الغازية، فإذا لم يبرد الغاز، فإن الضغط على جانبي الفراشات سيصبح متساويًا. أمّا عند تبريد الغاز من جهة العادم، فإنّ الضغط على الجانب الخلفي للفراشات سيقل مما يعمل على دوران المحرك.

* وحتى محطات الطاقة النووية تستخدم المحركات البخارية. ويعمل الوقود النووي– اليورانيوم – كوقود لتسخين البخار.

الكفـــاءة

يمكن تعريف **الكفاءة**، e، لأيّ آلةٍ حراريّةٍ على أنّها نسبة الشغل W الذي تبذله الآلة إلى الحرارة المدخلة Q_H عند درجة الحرارة المرتفعة (الشكل 15 – 11):

$$e = \frac{W}{Q_H}.$$

وهذا تعريف منطقي حيث W هي الناتج (ما نحصل عليه من الآلة) أمّا Q_H فهي ما يدخل إليها وتدفع ثمنه على شكل وقود محترق. وبما أن الطاقة محفوظة، فيجب أن تعادل الحرارة المدخلة Q_H مقدار الشغل المبذول بالإضافة إلى الحرارة المنسابة إلى الخارج (Q_L) عند درجة الحرارة المنخفضة:

$$Q_H = W + Q_L$$

لذا، $W = Q_H - Q_L$. وتصبح كفاءة الآلة:

كفاءة أي آلة حرارية

$$e = \frac{W}{Q_H} \qquad \textbf{(15 – 4 أ)}$$

$$= \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}. \qquad \textbf{(15 – 4 ب)}$$

ولجعل الكفاءة كمية مئوية: نضرب (المعادلة 15 – 4) في 100. ولاحظ أنه يمكن للكفاءة e أن تعادل 1.0 (أو 100%) فقط عندما تكون Q_L تساوي الصفر – أي أنه في حالة عدم صرف أيّ حرارةٍ للمحيط الخارجي.

المثال 15-9 **كفاءة السيارة.**

تصل كفاءة محرك السيارة إلى 20%، وتنتج بالمتوسط شغلًا ميكانيكيًّا يعادل 23,000 J خلال كلّ ثانية من عملها. (أ) ما مقدار الحرارة المدخلة الضرورية؟ (ب) ما مقدار الحرارة المنسابة إلى خارج الآلة خلال الثانية؟

النهج: نريد الحصول على الحرارة المدخلة Q_H وكذلك على الحرارة المنسابة إلى الخارج Q_L، علماً بأن W= 23,000 J خلال كل ثانية والكفاءة $e = 0.20$. ونستطيع استخدام تعريف الكفاءة حسب (معادلة 15 – 4) بشكليها لإيجاد Q_H أولاً ومن ثمّ إيجاد Q_L.

الحل : (أ) من (المعادلة 15 – 4) فإن $e = W/Q_H$ ونحل لإيجاد Q_H :

$$Q_H = \frac{W}{e} = \frac{23{,}000\ \text{J}}{0.20}$$
$$= 1.15 \times 10^5\ \text{J} = 115\ \text{kJ}$$

أي أن الآلة تحتاج إلى 115 kJ/s = 115 kW من الحرارة المدخلة.

(ب) ونستخدم الجزء الثاني من (المعادلة 15 – 4): $(e = 1 - Q_L/Q_H)$ للحصول على Q_L :

$$\frac{Q_L}{Q_H} = 1 - e$$

أي:

$$Q_L = (1 - e)Q_H = (0.80)115\ \text{kJ}$$
$$= 92\ \text{kJ}$$

وتخرج الآلة الحرارة إلى محيطها الخارجي بمعدل 92 kW = 92 kJ/s.

ملحوظة: إنّ 23 kJ من الحرارة الكلية المدخلة إلى الآلة 115 kJ فقط قادرة على بذل شغلٍ مفيدٍ. في حين يتم هدر 92 kJ كحرارة مخرجة.

ملحوظة: لقد تم التعامل مع هذا السؤال بدلالة الطاقة لكل وحدة زمن. وكان من الممكن أن نتعامل مع السؤال بدلالة القدرة ببساطة حيث 1 W = 1 J/s .

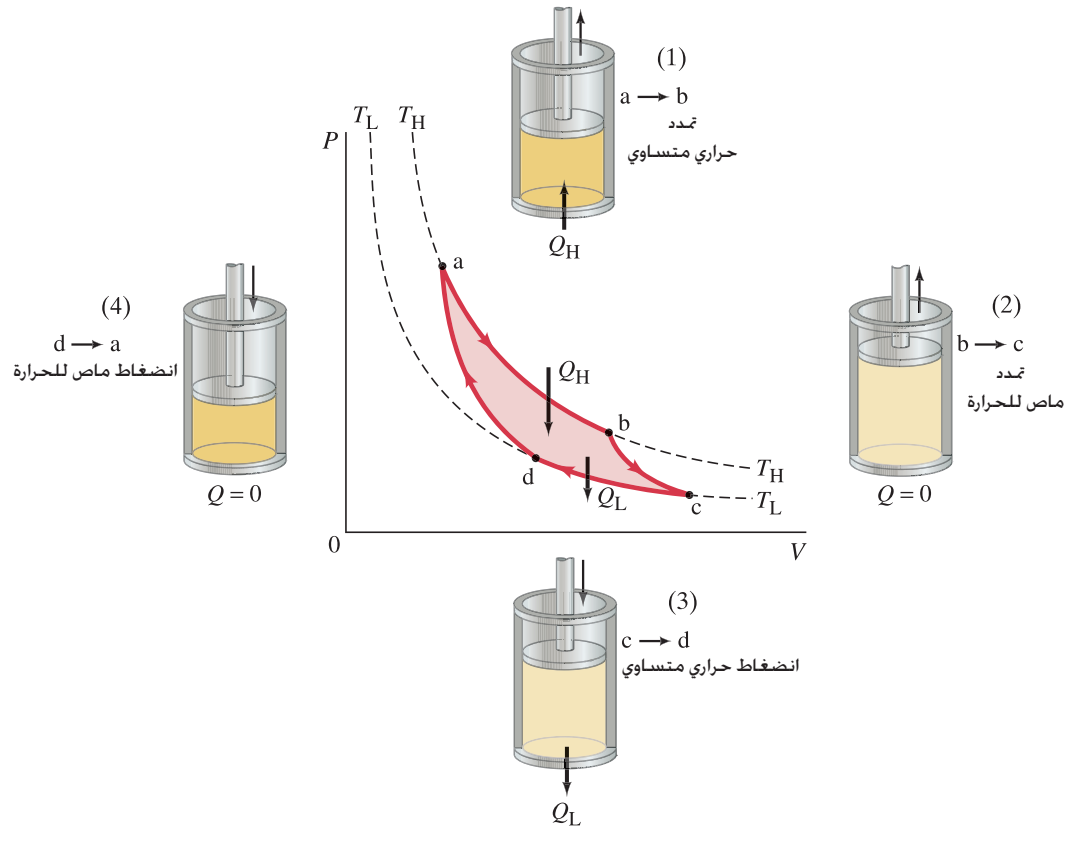
آلة كارنو

آلة (كارنو) المثالية

فحص العالم الفرنسي كارنو (1796 – 1832) مميزات الآلة المثالية (تُعرف الآن بآلة كارنو) ليرى كيفية رفع كفاءتها. ومع أنّ آلة كارنو غير موجودة في الواقع، إلاّ أنّها قامت بدور مهم كفكرة نظرية في تطور الديناميكا الحرارية.

وتتكون آلة كارنو المثالية من دورة مكونة من أربع عمليات: اثنتين منهما كظميتين ($Q = 0$) واثنتين أحاديتي الحرارة ($\Delta T = 0$). وتظهر هذه الدورة في (الشكل 15 – 14). واعتبرت كل عملية من هذه العمليات الأربع قابلة للتطبيق عكسياً. أي أن كل عملية من هذه العمليات الأربع تمت ببطء شديد لدرجة يمكن اعتبار النظام في وضع الاتزان عند كل لحظة، وعند عكس اتجاه العملية، فإنّ مقدار الشغل الضروري بذله وكمية الحرارة المتبادلة لا يتغيران نهائياً. وعلى الوجه الآخر، فهذا لا يحدث خلال العملية الحقيقية؛ لأنّ العملية تحدث بسرعة أكبر، وتحدث اضطرابات في الغاز، وهناك احتكاك، وهكذا دواليك. وبسبب هذه العوامل، لا يمكن إجراء العملية في الاتجاه المعاكس دون حدوث اضطرابات في الغاز وفقدان جزء من الطاقة الحرارية خلال الاحتكاك. ولهذا، لا يمكن للعمليات الحقيقية إلا أن تكون **غير عكسية**.

الشكل 15 -14 دورة كارنو. تعمل الآلات الحرارية في دورات. وتبدأ دورة آلة كارنو عند النقطة a على المخطط PV. (1) يتمدد الغاز أولاً عند درجة حرارة ثابتة، وتضاف طاقة حرارية Q_H خلال المسار ab عند درجة حرارة T_H. (2) يتمدد الغاز كظمياً من b إلى c دون تبادل حرارة مع انخفاض درجة الحرارة إلى T_L. (3) يتقلص الغاز عند درجة حرارة ثابتة T_L خلال المسار cd وتنساب الحرارة Q_L نحو الخارج. (4) أخيراً، يتقلص الغاز كظمياً خلال المسار da إلى حجمه الأصلي كما كان أولاً.



أثبت كارنو أنّ الحرارة Q_{H} و Q_{L} لآلة مثالية عكسية تتناسب مع درجتي حرارة التشغيل T_H و T_{L} (بدلالة كلفن). لذلك، يمكن التعبير عن الكفاءة كما يلي :

كفاءة كارنو (المثالية)

$$e_{\text{ideal}} = \frac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} = 1 - \frac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}. \qquad [\text{كفاءة كارنو (المثالية)}] \quad \textbf{(5 – 15)}$$

تعبّرُ (المعادلة 15 – 5) عن الحد الأعلى الأساسي للكفاءة. إنّ الآلات الحقيقية تمتلك دائمًا كفاءة أقلّ من هذه بسبب الاحتكاك وما شابهه. وتصل كفاءة الآلات الحقيقية رفيعة التصميم من حوالي 60 إلى 80% من كفاءة كارنو.

المثال 15-10 كفاءة الآلة البخارية.

تعمل آلة بخارية بين درجتي حرارة 500°C و 270°C. فما أعلى كفاءة ممكنة لهذه الآلة؟

النهج: إن أعلى كفاءة ممكنة هي التي تمتاز بها آلة كارنو المثالية حسب (المعادلة 15 – 5). ويجب أن تُستخدم درجات الحرارة بدلالة الكلفن.

الحل : نحوّل أولاً درجات الحرارة إلى الكلفن بإضافة 273 إلى درجات الحرارة المئوية :
$T_H = 773\ \text{K}$ و $T_{\mathrm{L}} = 543\ \text{K}$. وعليه:

$$e_{\text{ideal}} = 1 - \frac{543}{773} = 0.30.$$

وللحصول على كفاءة مئوية؛ نضرب في 100. وعليه، فإنّ الكفاءة العظمى (أو كفاءة كارنو) هي 30%. وفي الواقع، من الممكن لكفاءة آلة حقيقية أن تصل إلى 0.70 من هذه القيمة أي 21%.

ملحوظة: لا تزال درجة حرارة العادم في هذا المثال مرتفعة، 270°C. وغالباً ترتب الآلات البخارية على التوالي بحيث يستخدم العادم من الآلة الأولى كمُدخلٌ إلى الآلة الثانية أو الثالثة.

المثال 15-11 إدعاء باطل!

يدّعي صانع آلة أنّ الحرارة المدخلة إلى آلته خلال الثانية هي 9.0 كيلو جول عند 435 كلفن. وأن الحرارة الناتجة خلال كل ثانية هي 4.0 kJ عند 285 K. فهل تصدق هذا الادعاء؟

النهج: يمكن حساب كفاءة الآلة من التعريف في (المعادلة 15 –4)، ويجب أن تكون أقلّ من القيمة العظمى الممكنة حسب (المعادلة 15 – 5).

الحل : تعطى كفاءة الآلة حسب الادعاء كالتالي :

$$e = \frac{Q_{\mathrm{H}} - Q_{\mathrm{L}}}{Q_{\mathrm{H}}} = \frac{9.0\ \text{kJ} - 4.0\ \text{kJ}}{9.0\ \text{kJ}} = 0.56.$$

ولكن القيمة العظمى الممكنة للكفاءة تعطى حسب كفاءة كارنو و(معادلة 5 – 15) كما يلي :

$$e_{\text{ideal}} = \frac{T_{\mathrm{H}} - T_L}{T_{\mathrm{H}}} = \frac{435\ \text{K} - 285\ \text{K}}{435\ \text{K}} = 0.34.$$

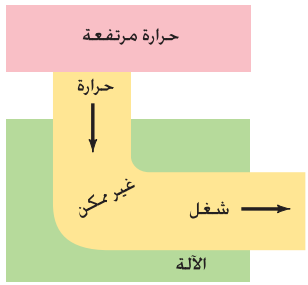
وعليه، فإنّ ادعاء الصّانع يتعارض مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية، ولا يمكن تصديقه.

ويتضح من (المعادلة 15 – 5) أنّه لا يمكن الوصول إلى كفاءة 100% عند درجات الحرارة الاعتيادية، بل يعدّ هذا مستحيلا. ولن تتحقق هذه الكفاءة إلا عندما تكون درجة حرارة العادم T_{L} عند الصفر المطلق، ولكن الوصولِ إلى الصفر المطلق من المستحيلات العملية (و النظرية أيضًا).*

* تقترح التجارب الدقيقة عدم القدرة على الوصول إلى الصفر المطلق. و هذا ما يعرف **بالقانون الثالث في الديناميكا الحرارية**.

وبسبب عدم وجود أيّ آلة ذات كفاءة 100%، نستطيع القول:
يستحيل إيجاد آلة يكون تأثيرها الوحيد هو تحويل مقدار ما من الحرارة كليًّا إلى شغل.
وهذا ما يعرف **بصيغة كلفن –بلانك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية**. ويظهر (الشكل 15 – 15) مخطّطًا لآلة حرارية مثالية كاملة لا وجود لها على أرض الواقع. وإذا كان القانون الثاني في الديناميكا الحرارية غير صحيح، فعندها يمكن بناء الآلة المثالية الكاملة. ويمكن أن تحدث أشياء مثيرة. فعلى سبيل المثال، لو أنّ سفينة ما لا تحتاج إلى خزان ذي درجة حرارة منخفضة لتخرج الحرارة العادمة إليه، عندها ستصبح هذه السّفينة قادرة على الإبحار عبر المحيطات مستخدمة الطاقة الداخلية لماء المحيطات. وعندئذٍ لن نعاني من مشكلة توافر الوقود من عدمه.

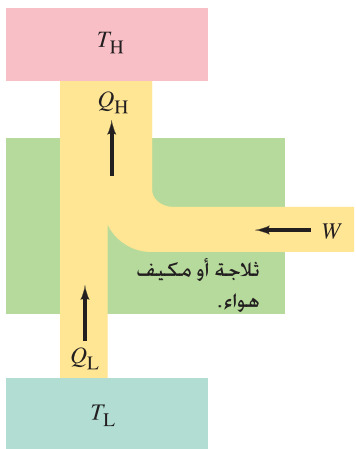
القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (صيغة كلفن-بلانك)



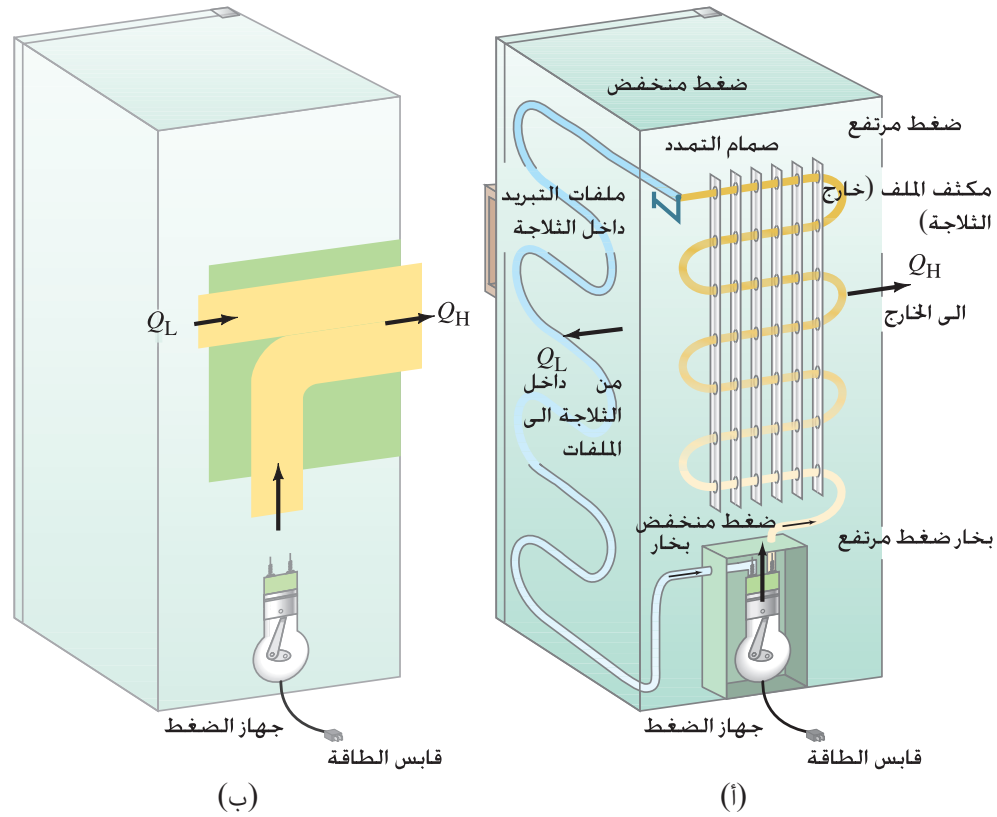
الشكل 15 – 15 مخطط لآلة حرارية كاملة مستحيلة حيث تستخدم خلالها الحرارة المدخلة كلها لعمل شغل.

6-15 الثلاجات ومكيفات الهواء ومضخات الحرارة

إنَّ مبدأ عمل كل من الثلاجات ومكيفات الهواء ومضخات الحرارة هو العكس تماماً لمبدأ عمل الآلة الحرارية، حيث يعمل كل منها على نقل الحرارة من محيطه البارد إلى محيطه الدافيء. وكما هو مخطط في (الشكل 15 – 16) ونتيجة لبذل الشغل W، فإن كمية من الحرارة ستنقل من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة T_L (كتلك داخل الثلاجة) وتتخلص من كمية أكبر من الحرارة إلى منطقةٍ ذات درجة حرارةٍ مرتفعةٍ T_H (أي إلى الغرفة). وتستطيع أن تشعر بهبوب الحرارة الساخنة عادةً من أسفل الثلاجة. وعادةً ما يبذل الشغل بواسطة محرك ضاغط كهربائي حيث يقوم بضغط الموائع كما هو مبيّن في (الشكل 15 – 17).



الشكل 15 – 16 رسم تخطيطي لانتقال الطاقة إلى ثلاجة أو مكيف هواء.



الشكل 15 – 17 (أ) نظام ثلاجة اعتيادي. يرغم محرك ضاغط كهربائي غازًا تحت ضغط عالٍ على المرور خلال مبادل حراري (مكثف) قرب الجدار الخلفي الخارجي للثلاجة حيث تفقد Q_H ويبرد الغاز ليصبح سائلاً. ثم يُمرر السائل من منطقة الضغط العالي خلال صمام إلى أنابيب ضغط منخفض تتوزع قرب جدران الثلاجة الداخلية، ويتبخر السائل عند هذا الضغط المنخفض ويبدأ بامتصاص الحرارة (Q_L) من داخل الثلاجة. ثمّ تعود الموائع إلى الضاغط لتبدأ الدورة مرة أخرى من جديد. (ب) رسم تخطيطي مشابه (للشكل 15 - 16).

تطبيق الفيزياء
الثلاجة

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (صيغة كلاوسياس)

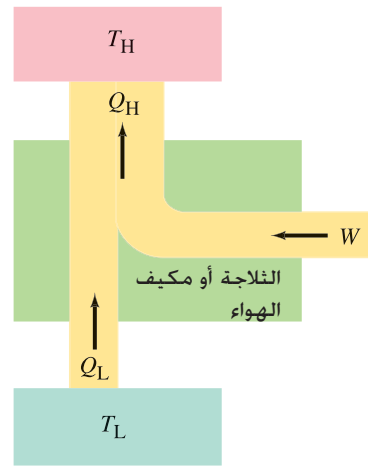
إنّ الثلاجة المثالية التي لا تحتاج إلى بذل أي شغل لنقل الحرارة من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة إلى المنطقة ذات درجة الحرارة المرتفعة، تُعدّ من المستحيلات.
وهذه هي **صيغة كلاوسياس للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية** والتي تم ذكرها في (البند 15 – 14)، ويمكن صياغتها بصورة اصطلاحية كالآتي:

يستحيل إيجاد آلة يكون تأثيرها الوحيد هو نقل الحرارة من نظام ما درجة حرارته منخفضة T_L إلى نظام آخر درجة حرارته مرتفعة T_H.

ويجب بذل شغل لإرغام الحرارة على الانسياب من جسم (أو نظام) ذي درجة حرارة منخفضة إلى جسم أو نظام آخر ذي درجة حرارة مرتفعة. لذا، فإنّ الثلاجة المثالية لا وجود لها.

ويعرف **معامل أداء الثلاجة** (COP) على أنه الحرارة Q_L المزالة من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة (داخل الثلاجة) مقسومة على الشغل W المبذول لإزالة الحرارة (الشكل 15 – 16):

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} \qquad \text{[الثلاجة ومكيف الهواء] (15 – 6أ)}$$



الشكل 15 – 16 (معاد) رسم تخطيطي لانتقال الطاقة إلى ثلاجة أو إلى مكيف هواء.

ويُعدّ هذا منطقيًّا؛ لأنّه كلما ازدادت كميّةُ الحرارة Q_L الممكن إزالتها من داخل الثلاجة مقابل قدرٍ معيَّنٍ من الشغل المبذول أصبحت الثلاجة فاعلة أكثر وأفضل. وبما أن الطاقة محفوظة، نستطيع أن نكتب من القانون الأول في الديناميكا الحرارية: $W = Q_H - Q_L$ أو $Q_L + W = Q_H$ (أنظر الشكل 15 – 16). وعليه ستُصبِحُ (المعادلة 15 – 6أ) كالتالي:

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \qquad \text{[الثلاجة ومكيف الهواء] (15 – 6ب)}$$

ولثلاجة نموذجية (وليست مثالية مستحيلة) فإنّ أفضل معامل أداء يمكن الحصول عليه هو:

$$\text{COP}_{\text{ideal}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \qquad \text{[الثلاجة ومكيف الهواء] (15 – 6جـ)}$$

وهي مكافئة لآلة (كارنو) النموذجية (معادلة 15 – 5).

تطبيق الفيزياء
مكيف هواء.

ويعمل **مكيف الهواء** بطريقة عمل الثلاجة نفسها، على الرّغم من اختلاف تفاصيل بنائهما: حيث يأخذ مكيف الهواء الحرارة Q_L من داخل الغرفة (أو المبنى) ذات درجة الحرارة المنخفضة ويرسل الحرارة Q_H إلى المحيط الخارجي ذي درجة الحرارة المرتفعة. وتصف (المعادلات 15 – 6) أيضاً معامل أداء مكيف الهواء.

المثال 15-12 صناعة الثلج.

برّادٌ مُعامِلُ أدائه 3.8 ويستخدم 200 W من القدرة. ما الزمن اللازم لعمل مكعبات ثلجية داخل وعاءٍ يحتوي على 600 g من الماء عند 0°C؟

النهج: من (المعادلة 15 –6ب)، تمثل Q_L الحرارة اللازم إزالتها من الماء لكي يُصبح ثلجاً. ولتحديد قيمة Q_L: يجب استخدام حرارة التجمد الكامنة للماء و(المعادلة 14 – 3) حيث $Q = mL$.

الحل: من (الجدول 14 – 3)، $L = 333\ \text{kJ/kg}$. وعليه، فإن:

$$Q = \text{mL} = (0.600\ \text{kg})(3.33 \times 10^5\ \text{J/kg}) = 2.0 \times 10^5\ \text{J}$$

وهي الطاقة الكلية اللازم إزالتها من الماء. ويعمل البراد شغلا بمعدل $200\ \text{W} = 200\ \text{J/s} = W/t$ ويعادل W وهو الشغل الذي يستطيع بذله خلال زمن t بالثواني. ونحل لإيجاد t: $t = W/(200\ \text{Js})$. وللحصول على W فإننا نستعمل (المعادلة 15 –6ب): $W = Q_L/\text{COP}$

$$t = \frac{W}{200\ \text{J/s}} = \frac{Q_L/\text{COP}}{200\ \text{J/s}} = \frac{2.0 \times 10^5\ \text{J}}{(3.8)(200\ \text{J/s})} = 260\ \text{s},$$

أو حوالي $4\frac{1}{2}\ \text{min}$.

وتنساب الحرارة بشكل طبيعي من درجات الحرارة المرتفعة إلى درجات الحرارة المنخفضة. ويبذل كلٌّ من الثلاجة ومكيف الهواء شغلاً لإنجاز عكس ذلك: أي لجعل الحرارة تنساب من المنطقة الباردة إلى المنطقة الساخنة. ويمكن لنا أن نقول بأنهما يضخان الحرارة من المناطق الباردة إلى المناطق الساخنة، وهي عكس ميل الحرارة الطبيعي للانسياب من الأجسام الساخنة إلى الباردة، تماماً مثل ضخ المياه إلى أعلى تلة والمعاكس تماماً لميل المياه الطبيعي للانسياب أو السقوط إلى الأسفل.

يستعمل مصطلح **المضخّة الحراريّة** غالبًا للتعبير عن جهاز قادر على تسخين المنزل في الشتاء باستخدام محرك كهربائي قادر على بذل شغل لامتصاص الحرارة Q_L من المحيط الخارجي ذي درجة الحرارة المنخفضة ونقلها Q_H إلى داخل المنزل الساخن، انظر (الشكل 18 – 15). وكالثلاجة تمامًا، هناك مبادل خارجي وداخلي للحرارة (ملفات الثلاجة) ومحرّك ضاغط كهربائي. ويتشابه مبدأ عمل كلٍّ من الثلاجة ومكيف الهواء مع مضخة الحرارة، إلّا أنّ الهدف الأساس من عمل مضخة الهواء هو التسخين (إضافة Q_H) بدلاً من التبريد (إزالة Q_L). وعليه، فإن معامل الأداء للمضخة الحرارية يُعرف بطريقة مختلفة عن ذلك لمكيف الهواء؛ لأنّ الحرارة Q_H المضافة إلى داخل المنزل هي ما يهمنا الآن :

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W} \qquad \text{[المضخة الحرارية]} \quad \textbf{(7 – 15)}$$

لذا، فإنّ COP أكبر من 1 بالضرورة. ويمكن عكس عمل المضخات الحرارية لتستخدم مكيفات للهواء خلال فترة الصيف

المثال 15-13 المضخة الحرارية.

تمتلك مضخة حراريّة معامل أداء مقداره 3.0، وتصنف لبذل شغل بمعدل 1500 W. (أ) ما مقدار الحرارة القادرة على إضافتها إلى غرفةٍ ما في الثانية الواحدة؟ (ب) إذا عكس عمل المضخة لتعمل كمكيف للهواء خلال فترة الصيف، فما معامل أداء مكيف الهواء المتوقع مفترضًا بقاء القيم السابقة جميعها على حالها؟

النهج: نستخدم معامل الأداء مع مراعاة اختلاف تعريفه لكلا الحالتين (أ) و (ب).

الحل : نستخدم (المعادلة 15 – 7) للمضخة الحرارية. وبما أن الجهاز يبذل شغلاً مقداره 1500 J لكلّ ثانية فهو قادر على إضافة الحرارة إلى الغرفة بمعدل

$$Q_H = \text{COP} \times W = 3.0 \times 1500\ \text{J} = 4500\ \text{J}$$

لكل ثانية، أو بمعدل 4500 W.

(ب) وعندما يتم عكس عمل المضخة الحرارية لتعمل كمكيف للهواء خلال فترة الصيف، فإنّها ستسحب الحرارة Q_L من داخل المنزل وتبذل شغلاً مقداره 1500 J خلال كلّ ثانية، ومن ثم تطرد $Q_H = 4500$ J خلال كل ثانية إلى خارج المنزل الساخن. وبما أنّ الطاقة محفوظة، فإن $Q_L + W = Q_H$ (أنظر الشكل 15 – 18، ولكن مع عكس داخل المنزل بخارجه). وعليه:

$$Q_L = Q_H - W = 4500\ \text{J} - 1500\ \text{J} = 3000\ \text{J}$$

إذن، سيصبح معامل أداء مكيف الهواء كما يلي (المعادلة 6 – 15أ):

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{3000\ \text{J}}{1500\ \text{J}} = 2.0.$$

ملحوظة: يعرف معامل الأداء بصورة مختلفة لكلٍّ من المضخات الحرارية ومكيفات الهواء.

تنويه:
يعرف COP بطريقتين مختلفتين لكل من المضخات الحرارية ومكيفات الهواء.

يمكن للمضخات الحرارية أن توفر المال والطاقة في بعض الأحيان بالاعتماد على ثمن كلّ من كلفتها الأصلي وكلفة تركيبها. ونقارن على سبيل المثال بين المضخة الحرارية في (المثال 15 – 13) مع سخان حراري مصنف 1500-W. فعند إيصال السخان الكهربائي بمصدر فرق الجهد، فسيعمل على استهلاك 1500-W من الكهرباء وسيزود الغرفة بـ 1500-W من الحرارة. أما بالنسبة إلى المضخة الحرارية فستستهلك 1500-W من الكهرباء ولكنها ستزود الغرفة بـ 4500 W من الحرارة.

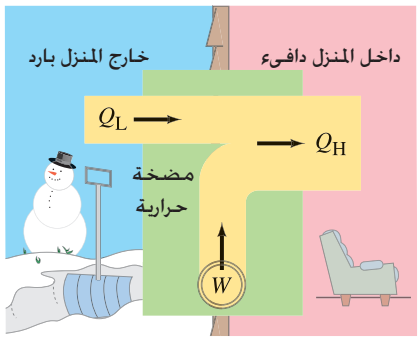
* تصنيف SEER

غالباً ما تخضع الأجهزة مثل الثلاجات ومكيفات الهواء لتصنيف يعرف بـ SEER (نسبة فعالية الطاقة الموسمية) والتي تعرف كالتالي:

$$\text{SEER} = \frac{\text{(الحرارة المفقودة Btu)}}{\text{(ساعة-واط بدلالة المدخلات الكهربائي)}}$$

وتقاس عن طريق أخذ القيمة المتوسطة خلال (المواسم) الظروف المختلفة. إنّ تعريف SEER مشابه بالأساس لتعريف COP مع الاختلاف الواضح في الوحدات المستخدمة. حيث 1 Btu = 1055 J (انظر البند 1 – 14 ومسألة 4 في الفصل 14). وعليه، فإن SEER = 1 يُعادل COP = (1 Btu/1 W.h) =(1055 J)/(1 J/s × 3600 s) = 0.29 . أمّا COP = 1 فيُعادل SEER =1/0.29=3.4

تطبيق الفيزياء
المضخة الحرارية



الشكل 18 – 15 تستخدم المضخة الحرارية محركاً كهربائياً لضخ الحرارة من الخارج البارد إلى داخل المنزل الدافيء.

تطبيق الفيزياء
تصنيف SEER

7-15 القصور الحراري (الأنتروبي) والقانون الثاني في الديناميكا الحرارية

لقد رأينا عدّة جوانب من القانون الثاني في الديناميكا الحراريّة؛ ويمكن إثبات أنّ العبارات المختلفة التي وصفته متكافئة تمامًا. ولكن ما نحتاج إليه هو صيغة عامة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. ولم يكن هذا ممكنًا حتى النصف الثاني من القرن التاسع عشر عندما أدخل كلاوسياس كمية تعرف بالقصور الحراري(الأنتروبي)عام 1860. ويُعدّ القصور الحراري بخلاف الحرارة دالة يصف حالة النظام. أي أنّ النظام في حالة ما سَيُعَرَّفُ بدلالة كلٍّ من درجة حرارته، وحجمه، وضغطه، وقصوره الحراري أيضًا. وسوف نرى في البند التالي كيف يمكن تفسير قصور النظام الحراري كمقياس لدرجة ترتيب النظام أو عدم ترتيبه.

الانتروبيا

وعندما نتعامل مع قصور النظام الحراري- تمامًا مثلما نتعامل مع طاقة الوضع - فإنّ ما يهمّنا هو مقدار التغيّر في القصور الحراري خلال عملية ما وليست القيمة المطلقة له. وحسب مايراه كلاوسياس، فإنّ التغيّر في القصور الحراري s لنظامٍ ما عند إضافة كميّةٍ من الحرارة Q إلى النظام خلال عملية عكسية* أحاديّة الحرارة يُعطى كالتالي:

تغير الانتروبيا

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad \textbf{(8 – 15)}$$

وتُمثّلُ T درجة الحرارة بالكلفن.

المثال 15-14 تغير القصور الحراري نتيجة الانصهار.

أُخرج مكعب ثلجٍ كتلته 56 غم من غرفة تخزين درجة حرارتها 0°C، ووُضع في كوبٍ ورقي. وبعد عدّةِ دقائق تحولت نصف كتلة مكعب الثلج إلى ماءٍ درجة حرارته 0°C. أوجد التغير في القصور الحراري لكلّ من الثلج والماء.

النهج: سنفترض في البداية أن النظام يتكون من 56 g من الثلج. ولتحديد مقدار التغير في القصور الحراري، يجب علينا أن نحدد أولاً مقدار الحرارة الضرورية لصهر الثلج عن طريق استخدام حرارة التجمد الكامنة للماء: $L = 333\ \text{kJ/kg}$ (بند 14 – 5).

الحل: الحرارة الضرورية لصهر 28 g من الثلج (نصف كتلة مكعب الثلج) هي:

$$Q = mL = (0.028\ \text{kg})(333\ \text{kJ/kg}) = 9.3\ \text{kJ}$$

وتبقى درجة الحرارة ثابتة خلال العملية. لذلك، نستطيع إيجاد التغير في القصور الحراري من (المعادلة 8 –15):

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{9.3\ \text{kJ}}{273\ \text{K}} = 34\ \text{J/K}$$

ملحوظة: لم يُحْسبِ التغير في القصور الحراري للمحيط الخارجي (الهواء والكوب).

لقد كانت الحسابات في (المثال 15 – 14) سهلة؛ لأن درجة الحرارة كانت ثابتة. ولكن عندما تتغير درجة الحرارة خلال العملية، فسنحتاج إلى إضافة انسياب الحرارة خلال فترة تغير درجات الحرارة باستخدام الرياضيات أو الحاسوب. أما إذا كان التغير في درجات الحرارة غير كبير، فيمكننا عندئذٍ استخدام تقريب مناسب لمتوسط قيمة درجة الحرارة كما هو موضح في المثال الآتي.

المثال 15-15 تغير القصور الحراري بمزج المياه.

قُدّر التغير في القصور الحراري الناتج من مزج 50.0 kg من عينة ماء درجة حرارتها 20.00°C مع 50.0 kg من الماء درجة حرارتها 24.00°C.

النهج: إنّ درجة الحرارة النهائية للماء هي 22.00°C حيث بدأنا بكميتين متساويتين من الماء. ونستخدم الحرارة النوعية للماء وطريقة المسعرية (البندان 14 – 13 و 14 – 4) لتحديد الحرارة المنقولة. ثم نستخدم متوسط درجة الحرارة لكل عينة من الماء لتقدير التغير في القصور الحراري ($\Delta Q/T$).

* العمليات الحقيقية غير عكسية. ولأن القصور الحراري هو متغير حالة، فإنه يمكن تحديد التغير في القصور الحراري ΔS لعملية غير عكسية عن طريق حساب ΔS لعملية عكسية بين الحالتين نفسيهما.

الحل: كمية من الحرارة مقدارها

$$Q = mc\,\Delta T = (50.0\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(2.00\,\text{C}^\circ) = 4.186 \times 10^5\,\text{J}$$

تنساب إلى خارج الماء الساخن فيبرد من 24°C إلى 22°C، وتنساب إلى داخل الماء البارد فيُسَخّن من 20°C إلى 22°C. وعليه، فإنّ التغير الكلي في القصور الحراري ΔS هو مجموع التغير في القصور الحراري للماء الساخن ΔS_H والتغير في القصور الحراري للماء البارد ΔS_C:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_C.$$

ونقدّر التغيّر في القصور الحراري فنكتب: $\Delta S = Q/T_{av}$، حيث تمثل T_{av} "متوسط" درجة الحرارة لكلّ عملية، ونعدّ قيمة التغير مقبولة لأنّ التغير في قيمة درجة الحرارة صغير. ونستخدم للماء الساخن متوسط درجة حرارة 23°C (296 K) وللماء متوسط درجة حرارة 21°C (294 K). إذن،

$$\Delta S_H \approx -\frac{4.186 \times 10^5\,\text{J}}{296\,\text{K}} = -1414\,\text{J/K}$$

وهذه القيمة سالبة لأن هذه الكمية من الحرارة قد انتقلت إلى الخارج حيث أضيفت إلى الماء البارد.

$$\Delta S_C \approx \frac{4.186 \times 10^5\,\text{J}}{294\,\text{K}} = 1424\,\text{J/K}.$$

ولاحظ هنا نقصان القصور الحراري للماء الساخن (S_H) لانسياب الحرارة خارج الماء الساخن. في حين يزداد القصور الحراري للماء البارد (S_C) بمقدار أكبر من سابقه. ويكون التغير الكلي في القصور الحراري كالتالي:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_C \approx -1414\,\text{J/K} + 1424\,\text{J/K} \approx 10\,\text{J/K}$$

ورأينا في (المثال 15 – 15) أن القصور الحراري لجزء من النظام قد قلّ، أمّا القصور الحراري لجزء آخر من النظام فقد زاد بمقدار أكبر، لتكون المحصلة النهائية للقصور الحراري للنظام ككل موجبة. وقد وُجِدَ أن هذه الحالة الخاصة (المثال 15 – 15) تنطبق على الحالات الأخرى التي تمّ اختبارها جميعها. أي أنّ القصور الحراري الكلي لنظام معزول يزداد في الحالات الطبيعية جميعها. ويمكن للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية أن يصاغ بدلالة القصور الحراري كالتالي: لا يمكن أبداً للقصور الحراري لنظام معزول أن يتناقص. ويمكن له فقط أن يبقى كما هو أو أن يزداد. ويمكن للقصور الحراري أن يبقى كما هو فقط خلال عملية (عكسية) نموذجية. ولأي عملية حقيقية، فإن التغير في القصور الحراري ΔS هو أكبر من الصفر:

لا يتناقص القصور الحراري للنظام المعزول أبداً.

$$\Delta S > 0 \qquad \textbf{(9 – 15)}$$

أما إذا كان النظام غير معزول، فإن التغير في القصور الحراري للنظام ΔS_s بالإضافة إلى التغير في القصور الحراري لمحيط النظام الخارجي ΔS_{env} يجب أن يساوي صفرا أو أكبر من الصفر :

$$\Delta S = \Delta S_s + \Delta S_{env} \geq 0 \qquad \textbf{(15 – 10)}$$

وتتحقق العلاقة $\Delta S = 0$ في العمليات النموذجية فقط. أمّا للعمليات الحقيقية، فإنّ $\Delta S > 0$. وبذلك تكون الصيغة العامة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية كالتالي:

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية(صيغة عامة)

يزداد القصور الحراري الكلي لأي نظام بالإضافة إلى القصور الحراري لمحيطه الخارجي كنتيجة لأي عملية طبيعية.

وبالرغم من احتمال نقصان القصور الحراري لجزء من الكون (انظر المثال 15 – 15) إلاّ أنّ القصور الحراري لجزء آخر من الكون سيزداد بمقدار أكبر. لذا، فإن القصور الحراري الكلي سيزداد دائماً.

الآن، وبعد أن حصلنا على صيغة نهائية عامة تصف لنا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية نكتشف بأنّ هذا القانون غير اعتيادي . وهو يختلف عن أي قانون آخر من قوانين الفيزياء التي تحتوي على التساوي في نصوصها (مثل $F = ma$) أو عن قوانين الحفظ (مثل حفظ الطاقة والزخم الخطي). ويقدم القانون الثاني في الديناميكا الحرارية كمية جديدة وهي القصور الحراري S، ولكنه لا يتكلم عن حفظ هذه الكمية. بل العكس تمامًا، حيث إنّها كمية غير محفوظة وخصوصًا خلال العمليات الطبيعية وهي تزداد دائمًا مع الزمن.

8-15 من النظام إلى الفوضى

قد يبدو القصور الحراري كما عرض ونوقش إلى الآن وكأنّه مفهومٌ تجريدي. ولكي يصبح مبدأ القصور الحراري أقرب إلى الواقع، سنحاول ربطه بمفهومي الترتيب والفوضى الاعتياديين. ويمكن في الحقيقة اعتبار القصور الحراري لنظام ما على أنه مقياس الفوضى (أو عدم الترتيب) في النظام. وبناءً على ذلك يمكن إعادة صياغة القانون الثاني في الديناميكا الحرارية ليصبح:

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية (صيغة عامة)

تميل العمليات الطبيعية نحو حالة فوضى أكبر

وما نقصد بعدم الترتيب تحديداً قد لا يكون دائماً واضحاً، ولذلك سنقدم عدة أمثلة. ونأمل أن توضِّحَ بعض هذه الأمثلة كيفية تطبيق القانون الثاني في الديناميكا الحرارية على الحالات التي تُعدُّ ما بعد الديناميكا الحرارية.

وسنعيد النظر الآن في العمليات المبسطة المذكورة في (البند 14 – 4). حيث يكون الوعاء المحتوي على طبقات منفصلة من الملح والبهار أكثر ترتيباً من الوعاء الذي يحتوي على الملح والبهار المخلوطين معاً. وأنّ هزّ الوعاء المحتوي على الطبقتين المنفصلتين من الملح والبهار سيعمل على خلطهما ببعض، ولا يمكن لأيّ مقدار اهتزاز لاحق أن يفصل الطبقتين بعد ذلك عن بعضها بعضا. وبذلك تكون العملية الطبيعية هي الانتقال من الحالة ذات الترتيب النسبي (الطبقات) إلى الحالة ذات عدم الترتيب النسبي (الخليط) وليس العكس. أي أن عدم الترتيب سيزداد. والمثال الثاني يتناول كوب قهوة صلب، غير مكسور، وهو بذلك يكون أكثر "ترتيباً" من قطعه المتناثرة بعد كسره. وتكسر الأكواب عند سقوطها، ولا يمكن لها أن تعود إلى وضعها الأصلي بعد كسرها من تلقاء نفسها (كما عرض تجاوزاً في المثال 15 – 10). ويعدّ التطور الطبيعي للأحداث هو اتجاهها نحو ازدياد عدم الترتيب. وعند ملامسة جسم ساخن لجسم آخرٍ بارد، فإن الحرارة ستنساب من الجسم ذي درجة الحرارة المرتفعة إلى الجسم ذي درجة الحرارة المنخفضة إلى أن يصل الجسمان إلى درجة حرارة متوسطة بينهما. ويمكن لنا أن نميز في بداية العملية صنفين من الجزيئات هما: جزيئات ذات متوسط طاقة حركية مرتفعة (الجسم الساخن)، وجزيئات أخرى ذات متوسط طاقة حركية منخفضة (الجسم الأبرد). وبعد عملية انسياب الحرارة تُصبِحُ الجزيئات جميعها تابعة لصنف واحد وستمتلك عندها متوسط طاقة حركية واحدة، ولن يكون لدينا الترتيب السابق للجزيئات في صنفين. ويكون الترتيب قد اتجّه نحو عدم الترتيب. وإضافة إلى ذلك، فإنه من الممكن تصنيف الجسمين المنفصلين الساخن والبارد على أنهما المنطقتان ذواتا درجتي الحرارة المرتفعة والمنخفضة للآلة الحرارية، ويمكن أن يستخدما للحصول على شغل مفيد. ولكن بعد تلامس الجسمين مع بعضهما ووصولهما إلى درجة الحرارة نفسها يصبح عندها من غير الممكن الحصول على شغل مفيد منهما. وبذلك يكون عدم الترتيب قد ازداد؛ لأن النظام القادر على بذل الشغل يكون أكثر ترتيباً من النظام غير القادر على بذل الشغل.

وعندما يسقطُ حجرٌ باتجاه سطح الأرض، فإنّ طاقته الحركية ستتحول إلى طاقةٍ حراريّةٍ عند اصطدامه . (وقد لاحظنا سابقاً أنّ العكس لا يحدث أبدا؛ أي أنّ الحجر لن يمتص طاقة حرارية من محيطه، وهو سطح الأرض في هذه الحالة، ليرتفع بعد ذلك في الهواء بمفرده). وهذا مثال آخر على الانتقال من الترتيب إلى عدم الترتيب. وبالرغم من ارتباط الطاقة بالحركة العشوائية وغير المرتبة للجزيئات، إلاّ أنّ جزيئات الحجر الساقط جميعها تمتلك السرعة المتجهة نحو الأسفل نفسها بالإضافة إلى سرعتها العشوائية الذاتية . لذلك، فإنّ الطاقة الحركية الأكثر ترتيباً للحجر قد تحولت إلى طاقة حرارية غير مرتبة بعد اصطدامه بالأرض. ويزداد عدم الترتيب في هذه العملية كما يزداد في العمليات جميعها التي تحدث في الطبيعة.

9-15 عدم توافر الطاقة، والموت الحراري

لقد رأينا خلال عملية التوصيل الحراري من الجسم الساخن إلى الجسم البارد أن القصور الحراري قد ازداد، وأنَّ الترتيب قد اتجّه إلى الفوضى، وأنّ الجسمين المنفصلين الساخن والبارد يمكن لهما أن يعملا كمنطقتي الحرارة المرتفعة والمنخفضة الضروريتين لعمل الآلة الحرارية اللتين يمكن استخدامها لعمل شغل مفيد. مع العلم بأنّه بعد أن تصبح درجة حرارة الجسمين متساوية نتيجة تلامسهما يصبح من غير الممكن الحصول على شغل منهما. وبالنظر إلى القدرة على بذل شغل مفيد، فإن الترتيب يكون قد توجّه إلى عدم الترتيب في هذه العملية.

ويمكن أن نعيد القول ذاته عند وصف صخرة تسقط باتجاه الأرض، وتسكن تماماً بعد اصطدامها بسطح الأرض. وكان من الممكن أن تستغل طاقة الصخرة الحركية في بذل شغل مفيد قبل اصطدامها بسطح الأرض. ولكن ما أن تتحول الطاقة الحركية الميكانيكية للصخرة إلى طاقة حرارية نتيجة الاصطدام فإنّ الصخرة تصبح غير قادرة على بذل شغل مفيد.
ويجسد المثالان السابقان ناحية أخرى مهمة للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية:

في أي عملية طبيعية هناك جزء من الطاقة يصبح غير متاح لبذل شغل مفيد.

استهلاك الطاقة

إنّ الطاقة محفوظة في أي عملية، ولا يفقد أي جزء منها أبداً. ونستطيع بدلاً من ذلك القول بأنّ الطاقة أصبحت أقلّ فائدة؛ بمعنى أنها أصبحت أقل قدرة على بذل شغل مفيد. وكلما تقدم الوقت تستهلك الطاقة أكثر من ذي قبل أي أنّها تُنقل من الأشكال الأكثر ترتيباً (مثل الميكانيكية منها) إلى الأشكال الأقل ترتيباً كالطاقة الداخلية أو الحرارية. ويقوم القصور الحراري بدور كبير هنا حيث يتناسب مقدار الطاقة غير القادر على بذل شغل مفيد طردياً مع التغير في القصور الحراري خلال أي عملية.
والنتيجة الحتمية لاستهلاك الطاقة هو التوقع بتوجه الكون نحو عدم الترتيب مع مرور الوقت. وستصبح المادة خليطاً منتظماً، وسيستمر انسياب الحرارة من المناطق الساخنة إلى المناطق الباردة إلى أن تصبح درجة حرارة الكون ثابتة وأحادية. وعندها ستختفي القدرة على بذل أي شغل. وستتحول طاقة الكون جميعها إلى طاقة حرارية. وعندها، سيتوقف أي تغير. ويُدعى هذا التوقع أو التنبؤ بالموت الحراري للكون كما يسميه الفلاسفة الذين تداولوا الموضوع باستفاضة. واستنادا إلى القانون الثاني في الديناميكا الحرارية، فإن هذه النهاية أمر لابُدَّ منه، وإنْ كان حدوثه بعيداً جدّاً في المستقبل.

"الموت الحراري"

* 10-15 التطور والنمو، "سهم الزمن"

تطبيق الفيزياء
التطور الحيوي

من الأمثلة المثيرة للاهتمام ذلك الذي يربط الزيادة في القصور الحراري بالتطور الحيوي ونمو الكائنات الحية. ومن الواضح أن الإنسان كائن حي عالي الترتيب. وتصف نظرية التطوّر عملية ازدياد الترتيب ابتداء من أشكال الحياة البسيطة في بداياتها المجهرية وصولاً إلى الانسان. ويعدّ التطور من خلية واحدة إلى إنسان كامل النمو عملية زيادة في الترتيب. فهل تخالف هذه العمليات القانون الثاني في الديناميكا الحرارية؟ والإجابة على ذلك هو "لا". ففي عمليات التطور والنمو وحتى خلال حياة الإنسان الناضج يتمّ التخلّص من الفضلات الناتجة. وهذه الجزيئات الصغيرة المتبقية من عملية الأيض هي جزيئات بسيطة بلا أي ترتيب. وهي بذلك تمثل زيادة في الفوضى أو قصورا حراريا أعلى نسبياً. وفي الحقيقة، فإن القصور الحراري الكلي للجزيئات الناتج من العمليات الحيوية خلال عمليات التطور والنمو هو أكبر من النقصان في القصور الحراري المرتبط بالترتيب الناتج من نمو الشخص أو تطور الأنواع.

ومن جهة أخرى، فإن القانون الثاني في الديناميكا الحرارية يخبرنا عن اتجاه تقدم العمليات. فإذا صادف أن شاهدت أحداث فيلم مصور تعرض أحداثه من النهاية إلى البداية، لعرفت ذلك بلا أدنى شك. وقد تبدو الأحداث غريبة نوعاً ما، فعلى سبيل المثال، فقد تشاهد تجمع الأجزاء المبعثرة لكوب مكسور وعودة الكوب إلى الرف، أو ترى بالوناً ممزقاً قد عاد إلى شكله المنتفخ المليء بالهواء. ونحن نعلم أنّ هذه العمليات لا تحدث في الطبيعة أبداً في هذا الاتجاه؛ إنّ هذا الاتجاه يعني ازدياد الترتيب ونقصان القصور الحراري. وهذا مخالف للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. وعندما نشاهد أحداث الفيلم معكوسة (أو عندما نتخيل أنّ الزمن يجري في الاتجاه المعاكس) نكون قد وصلنا إلى هذه القناعة بناءً على ملاحظتنا للقصور الحراري (والفوضى) سواء بازدياده أو نقصانه. وعليه، نستطيع أن نشير إلى القصور الحراري على أنّه "سهم الزمن أو السهم الزمني" لقدرته على إخبارنا عن اتجاه مرور الزمن.

* 11-15 التفسير الإحصائي للقصور الحراري والقانون الثاني

أصبحت الأفكار المرتبطة بالقصور الحراري وعدم الترتيب أكثر وضوحاً نتيجة استخدام التحليل الإحصائي أو الاحتمالي للحالة الجزيئية للنظام. وهذه الطريقة الإحصائية التي استخدمها لأول مرة العالم بولتزمان (1844 – 1906) قرب نهاية القرن التاسع عشر، تفرق وبوضوح تام بين "الحالة الجاهرية" و "الحالة دون المجهرية" للنظام. وتُحَدَّدُ الحالة دون المجهرية للنظام عند تحديد موضع وسرعة كل جسيم (أو جزيء) تابع للنظام. في حين تُحَدَّدُ الحالة الجاهرية للنظام عند إعطاء الصفات الجاهرية للنظام مثل: درجة حرارته، وضغطه، وعدد مولاته، وهكذا دواليك. وفي الحقيقة، فإننا لا نعرف إلا الحالة الجاهرية للنظام. هناك عددٌ كبيرٌ جدًّا من الجزيئات في النظام، ومن المستحيل تحديد موضع وسرعة كل منها على حدة وفي اللحظة نفسها. ومع هذا، فمن الأهمية بمكان أن نعلم أنّ هناك عدداً كبيراً من الحالات دون المجهرية المرتبطة بالحالة الجاهرية نفسها.

ولنتناول مثالاً سهلاً وبسيطاً، ولنفترض أنك تمسك بأربع قطع نقدية في يدك، ثم قمت بإسقاطها على الطاولة أمامك. فعندما تحدد عدد الكتابات وعدد الصور الظاهرة بعد اسقاطك للقطع الأربع، فإنّك تحدّد الحالة الجاهرية للنظام المكون من القطع النقدية المعدنية الأربع. أما عندما تحدد كل قطعة نقدية على حدة ما إذا كانت تظهر الكتابة أم الصورة عليها وهي ملقاة على الطاولة، فإنّك تحدّد الحالة دون المجهرية للنظام. ويظهر الجدول التالي عدد الحالات دون المجهرية لكلٍّ حالة جاهزيّة للنظام:

الحالة الجاهرية	الحالة دون المجهرية المحتملة (H صورة، T كتابة)	عدد الحالات دون المجهرية
4 صور	HHHH	1
3 صور، 1 كتابة	HHHT, HHTH, HTHH, THHH	4
2 صورتان، 2 كتابتان	HHTT, HTHT, THHT, HTTH, THTH, TTHH	6
1 صورة، 3 كتابات	TTTH, TTHT,THTT, HTTT	4
4 كتابات	TTTT	1

احتمالات

ويشير الافتراض الأساسي المستند إلى الطريقة الإحصائية إلى أنّ كل حالة دون مجهرية لها احتمالية الحدوث نفسها. وعليه، فإن عدد الحالات دون المجهرية والمرتبطة بالحالة الجاهرية نفسها لها علاقة مباشرة بالاحتمال النسبي لحدوث تلك الحالة الجاهرية. وتعدّ الحالةُ الجاهرية والمحتوية على صورتين وكتابتين الحالةَ الجاهرية ذات الاحتمال الأعظم حدوثاً عند إلقائنا القطع النقدية المعدنية الأربع علماً بأن هناك 16 احتمالاً (عدد الحالات دون المجهرية الكلية) والتي من ضمنها 6 حالات تحتوي كل منها على صورتين وكتابتين. لذلك، فإن احتمالية الحصول على صورتين وكتابتين هي 6 من ضمن 16 حالة ممكنة أو 38%. واحتمالية الحصول على صورة واحدة وثلاث كتابات هي 4 من ضمن 16 أو 25%. أمّا احتمالية الحصول على أربع صورٍ فهي 1 من 16 أو 6%. وعندما تُلقى القطع المعدنية 16 مرة، فليس من الضروري أن تحصل 6 مرات على صورتين وكتابتين أوليس من الضروري أن ترى 4 صور مرة واحدة فقط. هذه مجرد احتمالات حصول معدلات. ولكن عندما تقذف القطع المعدنية 1600 مرّة، فإنّ الأرقام قد تقترب من تلك التي ذكرت في الأعلى مثل 38% وهي احتمالية الحصول على صورتين وكتابتين. وكلما زاد عدد المحاولات، اقترب الرقم أكثر وأكثر من النسب المعلنة.

وإذا ألقينا عدداً أكبر من القطع المعدنية، ولنقل 100 قطعة في آنٍ واحدٍ، فإن الحالة التي تظهر القطع جميعها صوراً (أو القطع جميعها كتابةً) يقل احتمال حدوثها بدرجة واضحة وكبيرة. هناك حالة دون مجهرية واحدة مكونة جميعها من كتابة. وهناك 99 حالة ممكنة تحتوي على صورة واحدة. ويعرض (الجدول 15 – 3) الاحتمالات الأخرى. وهناك حوالي 10^{30} حالة دون مجهرية ممكنة.* وعليه، فإن احتمال الحصول على 100 صورة هو احتمال ضئيل جداً يصل إلى 1 من 10^{30} ويكاد يكون معدوماً. واحتمالية الحصول على 50 صورة و 50 كتابة (انظر الجدول 3 – 15) هو $0.10 = 10^{30}/(1.0 \times 10^{29})$ = أو 10%. أما احتمال الحصول على 45 إلى 55 صورة فهو 90%.

ومن هنا، فإننا نرى أنه كلما ازداد عدد القطع النقدية، أصبح الحصول على أفضل ترتيب هو الاحتمال الأكثر صعوبة (100 صورة أو 100 كتابة). وأصبح أفضل احتمال هو الحصول على 50 صورة و50 كتابة أقل التوزيعات ترتيبًا. وتزداد احتمالية أن نقترب بمعدل 5% من أكثر احتمال ممكن كلّما ازداد عدد القطع النقدية.

*هناك احتمالان لكل قطعة نقدية : صورة أو كتابة . وعليه، فإن عدد الحالات دون المجهرية الممكنة هي $2 \times 2 \times 2 \times ... = 2^{100} = 1.27 \times 10^{30}$ (باستخدام الآلة الحاسبة أو الطرق اللوغارتمية).

جدول 15 – 3
مختلف احتمالات الحالات الجاهرية عندما ترمي 100 قطعة نقدية معدنية

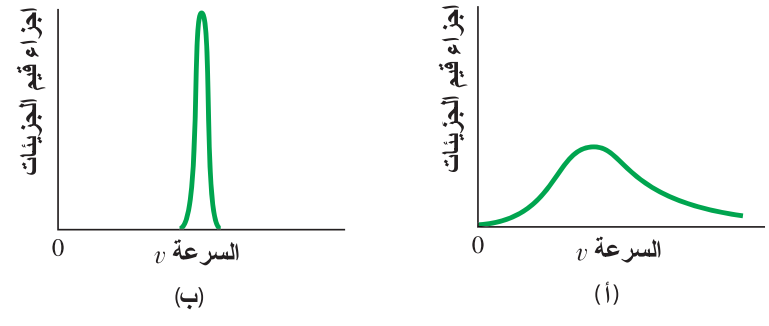
الحالات الجاهرية		عدد الحالات دون المجهرية	الاحتمالية
صورة	كتابة		
100	0	1	8.0×10^{-31}
99	1	1.0×10^{2}	8.0×10^{-29}
90	10	1.7×10^{13}	1.0×10^{-17}
80	20	5.4×10^{20}	4.0×10^{-10}
60	40	1.4×10^{28}	0.01
55	45	6.1×10^{28}	0.05
50	50	1.0×10^{29}	0.08
45	55	6.1×10^{28}	0.05
40	60	1.4×10^{28}	0.01
20	80	5.4×10^{20}	4.0×10^{-10}
10	90	1.7×10^{13}	1.0×10^{-17}
1	99	1.0×10^{2}	8.0×10^{-29}
0	100	1	8.0×10^{-31}

يمكن تطبيق هذه الأفكار على جزيئات النظام. وعلى سبيل المثال، فإنّ أكثر حالة يمكن حدوثها لغاز (كالهواء في الغرفة) هي تلك الحالة التي تصف انتشار جزيئات الغاز في فضاء الغرفة جميعه وهي تتحرّك عشوائياً، وترتبط هذه الحالة بتوزيع ماكسويل (الشكل 15 – 19 أ) (انظر الفصل 13). وفي الجانب الآخر، فإنّ أقلّ حالة يمكن حدوثها للغاز نفسه هي تلك التي تصف ترتيب الجزيئات جميعها في زاوية واحدة فقط من الغرفة وهي تتحرك بسرعة واحدة (الشكل 15 – 19 ب).

يتضح من هذه الأمثلة ارتباط الاحتمالات بعدم الترتيب وبالتالي بالقصور الحراري. أي أنّ الحالة ذات احتمالية الحدوث العظمى هي تلك المرتبطة بأعلى قصور حراري، أو بأقصى عدم ترتيب أو أعلى عشوائية.

القصور الحراري بدلالة الاحتمالية

وبدلالة الاحتمالية، فإنّ القانون الثاني في الديناميكا الحرارية – والذي يخبرنا بازدياد القصور الحراري نتيجة لأي عملية – قد يتقلص إلى صيغة أن تلك العمليات تحدث لأنها الأعلى احتمالاً. وعليه، يصبح القانون الثاني صيغة اعتيادية (بديهية) ولكن مع إضافة صغيرة. إنّ القانون الثاني بدلالة الاحتمالات لا يمانع النقصان في القصور الحراري. ولكنّه يخبرنا أنّ احتمالية الحدوث ضئيلة جدًّا. أي أنّه ليس من المستحيل أن تنفصل طبقات الملح والفلفل عن بعضها بعضا تلقائياً، أو أن يعود الكوب المكسور لِيُصلِحَ نفسه بنفسه. بل حتى من الممكن أن تتجمد بحيرة في يوم صيف حار (نتيجة انسياب الحرارة من البحيرة الباردة إلى محيطها الخارجي الساخن). ومع هذا، فإن احتمالية حدوث هذه العمليات تكاد تكون معدومة. ولقد رأينا في مثال القطع النقدية أنّ زيادة عددها من 4 إلى 100 تقلّص بشكل واضح احتمالية الابتعاد عن المتوسط (أو الترتيب الأكثر احتمالية). وعادة (في الحياة العملية) نتعامل مع رقم هائل جدًّا من الجزيئات قد يصل إلى 6×10^{23} جزيء في المول الواحد. ويترتب على ذلك احتمالية ضئيلة جدًّا للانحراف عن متوسط القيم. وعلى سبيل المثال، فقد تم حساب احتمالية أن يقوم حجر يستقر راكدًا على سطح الأرض بعد تحويله 1 كيلو سعر من الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية ليرتفع بعدها من موضعه في الهواء، وَوُجِدَ أنّ ذلك أقلّ احتمالًا من قيام مجموعة من القردة بإنتاج أعمال شكسبير جميعها بعد مجهود من الطباعة العشوائية.



الشكل 19 – 15 (أ) التوزيع الأكثر احتمالاً لسرعات جزيئات غاز ما (عشوائياً أو حسب ماكسويل). (ب) مرتب ومع هذا فهو ضئيل الاحتمال: توزيع السرعات وتكاد تمتلك الجزيئات جميعها السرعة ذاتها.

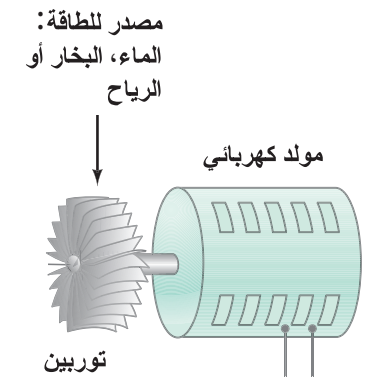
(أ)

(ب)

(جـ)

الشكل 20 – 15 (أ) تركز مجموعة من المرايا ضوء الشمس على سخان لإنتاج البخار قرب منشأة للطاقة الشمسية. (ب) محطة بخارية للوقود الأحفوري. (جـ) أبراج تبريد هائلة في محطة لتوليد الكهرباء.

الشكل 20 – 15 تحويل طاقة ميكانيكية أو حرارية إلى طاقة كهربائية بالاستعانة بمحرك ومولد.



12-15* التلوث الحراري والاحترار العالمي

إنّ معظم الطاقة التي نستهلكها في حياتنا اليومية، بدءاً من محركات السيارات إلى الكهرباء المولدة في محطات الطاقة، تستخدم الآلات الحرارية. وإذا أردنا عدم استخدام الآلات الحرارية في توليد الكهرباء (الشكل 15 – 20 أ) فنستطيع عندئذٍ توليدها عن طريق المياه الساقطة من السدود، أو باستخدام طواحين الهواء، أو الخلايا الضوئية. ومع هذا، فإن 90% من الكهرباء يتمّ توليدها في الولايات المتحدة الأمريكية في محطات بخارية للوقود الأحفوري (الفحم، أو النفط، أو الغاز)–(انظر الشكل 15 – 20) وهم بذلك يستخدمون الآلة الحراريّة (غالباً، الآلات البخارية). في محطّات توليد الطاقة الكهربائية، حيث يحرك البخار التوربينات والمولدات الكهربائية المنتجة للطاقة الكهربائية (الشكل 15 – 21). وقد تمّ مناقشة الوسائل المختلفة لتشغيل التوربينات باختصار في (الجدول 15 – 4) جنباً إلى جنب، مع ذكر بعض مزايا وعيوب كلّ منها. إضافة إلى أنّ محطات الطاقة النووية تستخدم الوقود النووي لتشغيل المحركات البخارية.

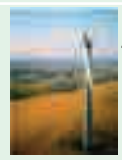
ويشار إلى الطاقة الحرارية Q_L الناتجة من الآلات الحرارية جميعها من محطات الطاقة إلى السيارات بالتلوث الحراري؛ لأنّ هذه الحرارة (Q_L) تمتصّ بالضرورة بواسطة المحيط الخارجي، ولنقل بواسطة المياه في المحيطات والبحيرات، أو بواسطة الهواء باستخدام أبراج تبريد هائلة (الشكل 15 – 20 جـ). وتعمل هذه الحرارة على رفع درجة حرارة مياه التبريد وتغيير البيئة الطبيعية للحياة البحرية (بسبب قلة نسبة الأكسجين في الماء الساخن). وفي حالة أبراج التبريد، فإنّ الحرارة الناتجة Q_L ترفع درجة حرارة الغلاف الجوي الذي يؤثر بدوره في المناخ.

نعني بتلوث الهواء انتشار الضباب الناتج من العوالق الكيميائية في الهواء، الناجمة عن احتراق الوقود الأحفوري في السيارات ومحطات الطاقة وأفران المصانع. ويشكل تراكم ثاني أكسيد الكربون في غلاف الأرض الجوي واحدة من أكبر المشكلات المرتبطة باحتراق الوقود الأحفوري. يمتص ثاني أكسيد الكربون بعض الأشعة تحت الحمراء التي تشعها الأرض (انظر الشكل 14 – 8) مما يتسبب في الاحتباس الحراري الكوني، وهي إحدى المشاكل التي يكمن حلها بالتقليل من عمليّة حرق الوقود الأحفوري. ومع هذا، فلا يمكن تجنّب التلوث الحراري. يستطيع المهندسون تصميم آلات أكثر كفاءة، ولكنهم لن يتخطوا كفاءة آلة كارنو. ويجب أن يتقبّلوا أنّ أفضل T_L يمكن الوصول إليها هي درجة حرارة الماء أو الهواء المعيارية. ويخبرنا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية بالحدود المفروضة من قبل الطبيعة. وما نستطيع عمله حسب القانون الثاني هو ترشيد استهلاكنا للوقود الأحفوري كي نحافظ على مصادره ووجوده لفترة أطول.

تطبيق الفيزياء

الآلات الحرارية والتلوث الحراري

الجدول 4–15 مصادر الطاقة الكهربائية

أشكال إنتاج الطاقة الكهربائية	نسبة الإنتاج % (تقريباً) USA	نسبة الإنتاج % (تقريباً) العالم	الإيجابيات	السلبيات
المحطات البخارية للوقود الأحفوري : حرق الفحم والنفط والغاز الطبيعي لغلي المياه، وتوليد بخار ذي ضغط عال يعمل على إدارة محركات المولدات *(الشكلان 15 – 12ب و 15 – 21)*. يتم استخدام الآلة الحرارية هنا.	*87*	*86*	نعرف كيف نبنيها وبأسعار غير مكلفة حالياً.	تلوث الهواء، والتلوث الحراري، والكفاءة المنخفضة واستنزاف للأرض عن طريق استخراج المواد الخام *(التعدين)*، والانحباس الحراري، والحوادث؛ مثل التسرب النفطي في المياه ومحدودية المخزون الطبيعي منها. *(قدر ذلك خلال سنتين إلى عقدين إلى عدة قرون)*.
الطاقة النووية الانشطار : تنشطر أنوية اليورانيوم أو ذرات البلوتونيوم مع إصدار طاقة *(الفصل 31)* تعمل على تسخين البخار. ويتم استخدام الآلة الحرارية هنا.	*8*	*6*	لا يوجد عادة أي تلوث للهواء بتاتاً. ولا يساهم في الانحباس الحراري و هو رخيص نسبياً.	تلوث حراري، وأي حادث يمكنه أن يسرب إشعاعات ضارة، وصعوبة التخلص من النفايات النووية، ويمكن استغلالها من قبل الإرهاب ومحدودية مصادر الوقود.
الاندماج: تنطلق طاقة هائلة عند اندماج نظائر الهيدروجين *(أو أي عناصر خفيفة أخرى)*. *(الفصل 31)*	*0*	*0*	نظيفة نسبياً. ومصادر هذه الطاقة متوافرة بغزارة *(الهيدروجين من جزيئات الماء في المحيطات)* ومساهمتها أقل في الانحباس الحراري.	لم تستخدم أو تستغل بعد.
الكهرباء من الماء اسقاط المياه يعمل على تحريك مولدات عند قاعدة سد.	*4*	*7*	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث مائي أو هوائي أو حراري، وغير مكلف نسبياً، وكفاءته مرتفعة ويمكن للسدود أن تمنع الفيضانات وتتحكم بها.	تغرق السدود الأراضي والأغادير، وتمنع هجرة الأحياء المائية وتكاثرها مثل سمك السلمون، وتساعد على جفاف الأراضي، وعددها قليل.
الحرارة الجوفية: البخار الطبيعي الناتج من باطن الأرض والقادم إلى السطح *(الينابيع الحارة والجداول الحارة، ومنافذ البخار)* أو تبخر المياه الباردة بعد ملامستها للصخور الجافة والساخنة.	*< 1*	*< 1*	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ومقدار ضئيل من التلوث الهوائي، وكفاءة مرتفعة ورخيصة نسبياً ونظيفة.	عدد قليل من الأماكن المناسبة، وانتاجية ضئيلة جداً، واحتمالية تلوث ناشئة عن وجود فلزات ذائبة في المياه الساخنة.
طاقة الرياح: طواحين هواء مصنفة *3* كيلو واط– *5* ميغا واط *(ذات شفرات يصل طولها إلى 50 م)* تحرك مولدات. 	*< 1*	*< 1*	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث هوائي أو مائي أو حراري، ورخيصة نسبياً.	هناك حاجة إلى عدد كبير من طواحين الهواء التي قد تؤثر في الجو وتؤذي الأعين، وخطرة على الطيور المهاجرة، ولا يوجد ضمان على سرعة الرياح أو قوتها.
الطاقة الشمسية **تدفئة شمسية نشطة:** تمتص الخلايا الشمسية المبنية على السطوح أشعة الشمس التي تسخن الماء في أنابيب لتعمل على تزويد المباني بالماء الساخن والطاقة الحرارية.	*< 0.1*	*< 1*	لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث هوائي أو حراري ومصدر للطاقة غير محدود.	محدودية المكان، وتحتاج إلى وسائل مساندة وغالية نسبياً، وتقل كفاءتها مع ازدياد الغيوم.
تدفئة شمسية خاملة: أجهزة وطرق معمارية مثل توجيه النوافذ إلى الجنوب لمنع أشعة الشمس من دخول المباني خلال فترة الصيف.			لا ضرورة لأي آلة حرارية، ولا تسبب أي تلوث هوائي أو حراري، ورخيصة نسبياً.	منعدمة تقريباً ، ولكن هناك حاجة إلى طرق مساندة أخرى.
الخلايا الضوئية (الخلايا الضوئية الجهودية): تعمل على تحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء دون الحاجة إلى استخدام آلة حرارية.			لا ضرورة لاستخدام أي آلة حرارية، ونسبة التلوث الحراري والمائي والهوائي ضئيلة جداً، وكفاءة عالية *(> 30%)* وبتحسن مستمر)	غالية، وتسبب تلوثا كيميائيا، وبحاجة إلى مساحة كبيرة لأن أشعة الشمس غير مركزة.

طريقة حل المسائل: الديناميكا الحرارية

1. عرّف **النظام** الذي تتعامل معه، وميز النظام من محيطه الخارجي.
2. انتبه عند استخدام **الإشارات** المرتبطة **بالشغل والحرارة** في القانون الأول للديناميكا الحرارية؛ لأنّ الشغل الذي يبذله النظام هو شغل موجب، أمّا الشغل الذي يبذل على النظام فهو شغل سالب. والحرارة المضافة إلى النظام تكون موجبة، في حين تكون الحرارة المفقودة من النظام سالبة. أما في الآلات الحرارية، فإن كلا من الحرارة المدخلة، والحرارة الناتجة، والشغل المبذول فهي موجبة دائماً.
3. انتبه للوحدات المستخدمة في الشغل والحرارة حيث **وحدة** الشغل هي الجول، ولكن وحدة الحرارة هي السعر أو الكيلو سعر أو الجول. ويجب عدم الخلط بين الوحدات فإذا بدأت بحلّ سؤال ما باستخدام وحدة، فعليك إنهاء السؤال مستخدما الوحدة نفسها.
4. يجب أن تستخدم **درجات الحرارة** بالكلفن، أما الفرق في درجات الحرارة فيمكن أن يعبر عنه إما بِـ C° أو الكلفن.
5. **الكفاءة (أو معامل الأداء)** هي النسبة بين انتقالين للطاقة: ناتج مفيد مقسوم على مدخل ضروري. وتُعطى الكفاءة دائماً بدلالة نسبة مئوية لأنها دائماً أقل من 1 (ولا ينطبق هذا على معامل الأداء).
6. يزداد **القصور الحراري** لنظام ما عندما تضاف حرارة إليه ويقل عند إزالة حرارة منه. وإذا انتقلت الحرارة من النظام A إلى النظام B، فإن التغير في القصور الحراري لـ A سالب أمّا التغير في القصور الحراري لـ B فموجب.

ملخص

ينصُّ القانون الأول في الديناميكا الحرارية على أن التغير في الطاقة الداخلية ΔU للنظام يساوي الحرارة المضافة إلى النظام Q ناقص الشغل المبذول بواسطة النظام W:

$$\Delta U = Q - W \qquad \textbf{(15 – 1)}$$

وهذا هو نصّ حفظ الطاقة. ووجد أنه يبقى صحيحاً لأنواع العمليات جميعها. إنّ العملية أحادية الحرارة هي العملية التي تحدث عند درجة حرارة ثابتة.

ولا يتم تبادل الحرارة خلال العملية الكظمية ($Q = 0$). ويعطى الشغل المبذول بواسطة الغاز عند ضغط ثابت كالتالي:

$$W = P\,\Delta V \qquad \textbf{(15 – 3)}$$

حيث ΔV هو التغير في حجم الغاز.

وتُعدّ الآلة الحرارية جهازاً لتحويل الطاقة الحرارية إلى شغل مفيد ناتج من انسياب الحرارة بين درجتي حرارة مختلفتين.

وتعرف كفاءة الآلة الحرارية e على أنها نسبة الشغل المبذول بواسطة الآلة إلى الحرارة المدخلة Q_H. ونتيجة لحفظ الطاقة، فإن الشغل الناتج يساوي $Q_H - Q_L$، حيث تمثل Q_L الحرارة المنسابة عند درجة الحرارة المنخفضة إلى المحيط الخارجي:

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}. \qquad \textbf{(15 – 4)}$$

ويمكن كتابة الحد الأعلى للكفاءة (كفاءة كارنو) بدلالة درجتي الحرارة العظمى T_H والدنيا T_L (بالكلفن) للآلة كالتالي:

$$e_{ideal} = 1 - \frac{T_L}{T_H}. \qquad \textbf{(15– 5)}$$

وتعمل **الثلاجات ومكيفات الهواء** بعكس عمل الآلة الحرارية: يبذل الشغل لإزالة الحرارة من المنطقة الباردة والتخلص منها في المنطقة ذات درجة الحرارة المرتفعة. ومعامل الأداء لكل منهما (COP) هو:

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} \qquad \textbf{(15 – 6 أ)}\ \text{(للثلاجة أو لمكيف الهواء)}$$

حيث تمثل W الشغل الضروري لإزالة الحرارة Q_L من المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة.

تبذل المضخة الحرارية شغلاً W لنقل الحرارة Q_L من الخارج البارد وتزويد الحرارة Q_H إلى الداخل الدافئ. ومعامل أداء المضخة الحرارية هو:

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W} \qquad \textbf{(15 – 7)}\ \text{[المضخة الحرارية]}$$

ويمكن صياغة القانون الثاني في الديناميكا الحرارية بعدة طرق متكافئة :

(أ) تتناسب الحرارة تلقائياً من الجسم الساخن إلى الجسم البارد والعكس غير صحيح.

(ب) لا وجود لأي آلة حرارة ذات كفاءة 100% قادرة على تحويل أيّ مقدار من الحرارة كليًّا إلى شغل.

(جـ) تميل العمليات الطبيعية إلى التحرك باتجاه ازدياد القصور الحراري أو ازدياد عدم الترتيب.

وتُعدّ (جـ) الصياغةَ العامة الأكثر انتشاراً للقانون الثاني في الديناميكا الحرارية. ويمكن عرضها بطريقة أخرى كالتالي: يزداد القصور الحراري S لأي نظام بالإضافة إلى القصور الحراري لمحيط النظام نتيجة لأيّ عملية طبيعية :

$$\Delta S > 0 \qquad \textbf{(15– 9)}$$

ويُعطى التغير في القصور الحراري في عملية ما يتمّ خلالها نقل للحرارة Q عند درجة حرارة ثابتة T كالتالي:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad \textbf{(15 – 8)}$$

ويمثّل القصور الحراري مقياس مقدار عدم ترتيب النظام. وكلما انقضى الوقت، استهلكت الطاقة وتحولت إلى شكل غير مفيد؛ أيْ أنّها أصبحت غير متاحة لبذل شغل مفيد.

[* ويخبرنا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية عن اتجاه سير العمليات ويفسر تسمية القصور الحراري" بالسهم الزمني].

[* تساهم الآلات الحرارية جميعها بالتلوث الحراري بسبب الحرارة التي تخرجها نحو المحيط الخارجي].

أسئلة

1. ماذا يحدث للطاقة الداخلية لبخار الماء في الهواء عندما يتكاثف على الجدار الخارجي لكوب زجاجي مليء بالماء البارد؟ هل سيتمّ بذل شغل أم تبادل للحرارة؟ وضح إجابتك.
2. استخدم حفظ الطاقة لتفسير ازدياد درجة حرارة الغاز عند تقلصه المفاجىء ونقصانها عند تمدده.
3. بذل غاز مثالي شغلاً مقداره 3700 J خلال عملية أحادية درجة الحرارة. هل هذه المعلومة كافية للدلالة على مقدار الحرارة المضافة إلى النظام؟ وإذا كانت كذلك فما مقدارها؟
4. هل من الممكن أن تبقى درجة حرارة النظام ثابتة بالرغم من انسياب الحرارة منه أو إليه؟ وإذا كان الحل نعم، أعط مثالا أو مثالين على ذلك.
5. وضح لماذا تزداد درجة حرارة النظام عندما يتقلص خلال عملية كظمية.
6. هل يمكن للطاقة الميكانيكية أن تتحول كلياً إلى حرارة أو طاقة داخلية؟ وهل يمكن حدوث العكس؟ وإذا كانت إجابتك في كل حالة لا، فسّر ذلك، أما إذا كانت إجابتك نعم، فاعط مثالًا أو مثالين.
7. هل تستطيع تدفئة المطبخ في الشتاء عن طريق إبقاء باب الفرن مفتوحاً؟ وهل تستطيع تبريد المطبخ في يوم صيف حار بترك باب الثلاجة مفتوحاً؟
8. وضح إجابتك. $e = W/Q_{\text{L}}$ هل يعدّ تعريف كفاءة آلة حرارية كالتالي مفيداً؟ وضح إجابتك.
9. كيف تفرق بين منطقتي درجة الحرارة العالية ودرجة الحرارة المنخفضة في: (أ) آلة الاحتراق الداخلي؟ (ب) الآلة البخارية؟
10. ما الذي سيؤثر في كفاءة آلة كارنو ويحسنها بشكل ملموس أكثر: زيادة درجة حرارة خزان ساخن بمقدار $10\,\text{C}^\circ$، أم نقصان درجة حرارة خزان بارد بمقدار $10\,\text{C}^\circ$؟ وضح إجابتك.
11. تحتوي المحيطات على كميات هائلة جداً من الطاقة (الداخلية) الحرارية. لماذا لا يمكن الاستفادة من هذه الطاقة على شكل شغلٍ مفيد؟
12. سُمِحَ لغازٍ أن يتمدد: (أ) كظمياً (ب) عند درجة حرارة ثابتة. فهل سيزداد القصور الحراري خلال كل عملية، أم سينقص، أم سيبقى ثابتاً؟ وضح إجابتك.
13. يمكن لغاز ما أن يتمدد لضعفي حجمه الأصلي إما كظميًّا أو تحت درجة حرارة ثابتة. ما العملية التي ينتج منها أكبر تغير في القصور؟ وضح إجابتك.
14. أعط ثلاثة أمثلة غير تلك التي ذكرت في هذا الفصل لعمليات تحدث في الطبيعة وتتجه من الترتيب إلى الفوضى. تكلم عن احتمالية حدوث العكس.
15. أي من التالي له قصور حراري أكبر: 1 kg من الحديد الصلب أم 1 kg من الحديد السائل؟ لماذا؟
16. (أ) ما الذي سيحدث عند رفع غطاء قارورة تحتوي على غاز الكلور؟ (ب) هل يمكن للعملية العكسية أن تحدث؟ إن كان الحل نعم فلماذا تحدث، وإن كان لا فلماذا لا تحدث؟ (ج) هل يمكن لك أن تفكر في مثالين آخرين لا يمكن أن يحدُثا في الاتجاه المعاكس؟
17. طُلب إليك أن تختبر آلة تسمى "مكيف هواء داخلي": الآلة صندوق يوضع في منتصف الغرفة، يمتد منه سلك كهربائي. وعندما يتم تشغيلها، تشعر بتيار الهواء البارد الصادر منها. الهواء البارد يخرج منها. كيف يمكنك معرفة ما إذا كانت هذه الآلة قادرة على تبريد الغرفة؟
18. فكر في عدة عمليات قد تُحقّق القانون الأول للديناميكا الحرارية (باستثناء العمليات التي ذُكرت) وفي حالة وجود مثل هذه العمليات فإنها لن تحقق القانون الثاني.
19. افترض أن عدداً كبيراً من الأوراق بعثرت على أرض الغرفة فقمت بجمعها وترتيبها. فهل هذا يخالف القانون الثاني في الديناميكا الحرارية؟ وضح إجابتك.
20. يمكن التعبير عن القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية بطريقة مختلفة وعلى الترتيب كالتالي: "لا يمكن الحصول على شيء من العدم" و"لا يمكنك تحقيق حتى التعادل". وضح كيف يمكن لهاتين العبارتين أن تكافئا نصي القانونين الأصليين.
21. * غالباً ما يدعى القصور الحراري "بالسهم الزمني" لأنه يخبرنا باتجاه حدوث العمليات الطبيعية. اذكر بعض العمليات التي ستخبرك بأن الزمن يتحرك في الاتجاه المعاكس خلال مشاهدتك لفيلم سينمائي يُعرض عكسياً.
22. * تحوّلُ الكائنات الحيّة خلال نموها جزيئات الغذاء البسيطة نسبياً إلى تركيب معقد. هل هذا مخالف لقانون الديناميكا الحرارية؟

مسائـل

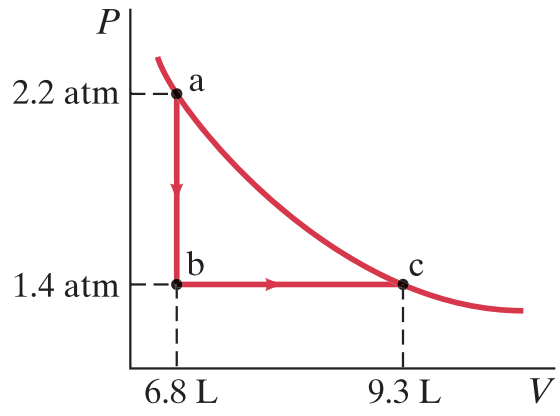
15 – 1 و15 – 2 القانون الأول في الديناميكا الحرارية

1. يبذل غاز مثالي خلال تمدده في عملية أحادية الحرارة شغلاً مقداره 3.40×10^3 J. احسب: (أ) التغير في الطاقة الداخلية للغاز. (ب) مقدار الحرارة الممتصة خلال هذا التمدد.
2. (I) يخضع غاز في أسطوانة ذات مكبس عديم الاحتكاك لضغط جوي معياري. ولوحظ أن حجم الغاز يزداد ببطء من $12.0\ \text{m}^3$ إلى $18.2\ \text{m}^3$ عند إضافة 1400 kcal. احسب: (أ) الشغل المبذول بواسطة الغاز. (ب) التغير في الطاقة الداخلية للغاز.
3. (I) تم تبريد لتر واحد من الغاز تحت ضغط ثابت إلى أن تقلص حجمه إلى النصف ثم سُمِحَ له بتمددٍ أحادي الحرارة إلى أن عاد إلى حجمه الأولي. ارسم العملية على مخطط PV.
4. (I) ارسم مخطط PV لكل من العمليات التالية: تم تبريد 2.0 L من الغاز المثالي عند الضغط الجوي المعياري إلى أن أصبح حجمه 1.0 L، ثمّ سُمِحَ له بالتمدُّد تحت درجة حرارةٍ ثابتة ليعود إلى حجمه الأصلي 2.0 L، ومن ثم سمح للضغط بالازدياد مع ثبات حجمه ليعود الضغط الجوى إلى ما كان عليه في البداية (أي ضغط جوي معياري).
5. (II) سُمِحَ لكمية من الهواء حجمها 1.0 L عند ضغط 4.5 atm مطلق بالتمدد أحادي الحرارة إلى أن أصبح ضغطها 1.0 atm. ثم قلّصت إلى حجمها الأصلي تحت ضغط ثابت، ثم أُعيدت أخيراً إلى ضغطها الأولي بتسخينها مع إبقاء حجمها ثابتاً. ارسم هذه العملية على مخطط PV متضمناً الأعداد واسمي المحورين.
6. (II) تم تخفيض ضغط غاز مثالي إلى النصف مع إبقائه في وعاءٍ ذي جدران صلبة. وفقد الغاز خلال هذه العملية 265 KJ من حرارته. (أ) ما مقدار الشغل المبذول خلال هذه العملية؟ (ب) ما التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال هذه العملية؟
7. (II) تمّ تقليص حجم غاز يكاد يكون مثالياً إلى النصف خلال عملية كظمية داخل آلة. وتمّ بذل شغل قدره 1850 J على الغاز خلال ذلك. (أ) ما مقدار الحرارة المنسابة إلى داخل الغاز أو خارجه؟ (ب) ما التغير في الطاقة الداخلية للغاز؟ (جـ) هل تزداد درجة حرارة الغاز أم تقل؟

8. (II) يتمدد غاز عند ضغط كُلّي ثابت مقداره 3.0 atm من 400 mL إلى 660 mL. ثم تنساب الحرارة منه إلى الخارج مع ثبات حجمه، ويسمح للضغط ودرجة الحرارة بعد ذلك بالنقصان إلى أن تصل درجة حرارته إلى ما كانت عليه في البداية. احسب: (أ) الشغل الكلي الذي يبذله الغاز خلال هذه العملية. (ب) الحرارة الكلية المنسابة إلى داخل الغاز.

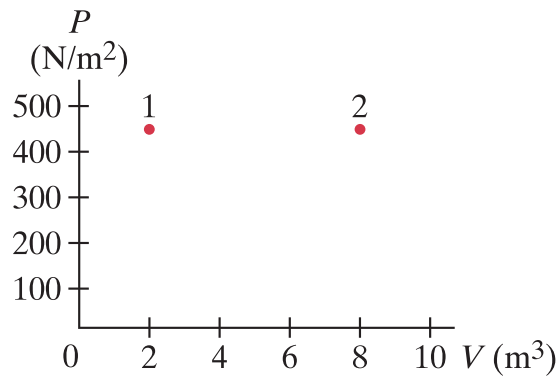
9. (II) يتمدد مول ونصف المول من غاز مثالي أحادي الذرة كظمياً فيبذل شغلاً مقداره 7500 J خلال العملية. ما التغير في درجة حرارة الغاز خلال التمدد؟

10. (II) خذ بالحسبان العملية التالية ثنائية الخطوة. تنساب الحرارة نحو الخارج من غاز مثالي مع ثبات حجمه، فيهبط ضغطه من 2.2 atm إلى 1.4 atm، ثمّ يتمدّد الغاز عند ضغط ثابت من حجم 6.8 L إلى 9.3 L. لتصل حرارته إلى قيمتها الأولى. انظر (الشكل 15 – 22). احسب: (أ) الشغل الكلي الذي يبذله الغاز خلال هذه العملية. (ب) التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال هذه العملية. (جـ) الحرارة الكلية المنسابة إلى داخل الغاز أو الخارجة منه.



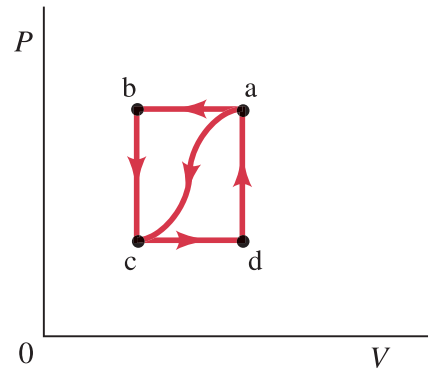
الشكل 15 - 22 (مسألة 10).

11. (II) يظهر المخطط PV في (الشكل 15 – 23) حالتين محتملتين لنظام يحتوي على 1.35 مول من غاز مثالي أحادي الذرة. ($P_1 = P_2 = 455\ \text{N/m}^2$ و $V_1 = 2.00\ \text{m}^3$ و $V_2 = 8.00\ \text{m}^3$). (أ) ارسم العملية التي تعكس تمدد أحادي الضغط من الحالة 1 إلى الحالة 2 وأُطلق على هذه العملية A. (ب) أوجد الشغل المبذول بواسطة الغاز والتغير في طاقة الغاز الداخلية خلال هذه العملية. (جـ) ارسم العملية ذات الخطوتين التي تعكس تمدد أحادي الحرارة من الحالة 1 إلى الحجم V_2 ، ثم يتبعها ازدياد في درجة الحرارة أحادي الحجم إلى الحالة 2، وأُطلق على هذه العملية B. (د) أوجد التغير في الطاقة الداخلية للغاز خلال العملية B ذات الخطوتين .



الشكل 15 - 23 (مسألة 11).

12. (III) عند أخذ الغاز من a إلى c خلال المسار المنحني في (الشكل 15 – 24)، كان الشغل المبذول بواسطة الغاز $W = -35$ J، والحرارة المضافة للغاز هي $Q =$ –63 J. وكان الشغل المبذول خلال المسار abc هو W = –48 J. (أ) ما هو Q للمسار abc؟ (ب) إذا كان $P_c = \frac{1}{2}P_b$، فما هو W للمسار eda. (جـ) ما هو Q للمسار cda؟ (د) ما هي $U_a - U_c$؟ (e) إذا كان $U_d - U_c = 5$ J، فما هو Q للمسار da؟



الشكل 15 - 24 (مسألة 12 و 13).

13. (III) خلال عملية أخذ الغاز من الحالة a إلى الحالة c على امتداد المسار المائل المبين في (الشكل 15 – 24)، فإن 80 جولا من الحرارة سيغادر النظام، وسيتم بذل 55 J من الشغل على النظام. (أ) حدد التغير في الطاقة الداخلية $U_a - U_c$. (ب) عند أخذ الغاز خلال المسار cda، بذل الغاز شغلاً $W =$ 38 J، فما مقدار الحرارة Q المضافة إلى الغاز خلال العملية cda؟ (جـ) إذا كان $P_a = 2.5\ P_d$، فما مقدار الشغل المبذول بواسطة الغاز خلال العملية abc؟ (د) ما هو Q خلال المسار abc؟ (هـ) إذا كان $U_a - U_b = 10$ J. فما هو Q للعملية bc؟

وهذا ملخص للمعطيات:

$$Q_{a\to c} = -80\ \text{J}$$
$$W_{a\to c} = -55\ \text{J}$$
$$W_{cda} = 38\ \text{J}$$
$$U_a - U_b = 10\ \text{J}$$
$$P_a = 2.5 P_d .$$

*15 – 3 أيض الإنسان

***14.** (I) ما مقدار الطاقة التي ستتحول لو أنّ الشخص في (المثال 15 – 8) أخذ راحة خلال فترة الظهيرة ثمّ ركض ساعة كاملة بدلاً من العمل مدة 11.0 ساعة يوميًّا؟

***15.** (I) احسب معدل أيض يومي لشخص ما ينام مدة 8.0 ساعات، ويجلس على مكتبه 8.0 ساعات، ويقوم بأعمال خفيفة 4.0 ساعات، ويراقب التلفاز مدة ساعتين، ثم يلعب كرة مضرب مدة 1.5 ساعة، وأخيراً يركض مدة نصف ساعة.

***16.** (II) قرّر شخص ما أن يفقد وزناً عن طريق انقاص ساعات نومه بمعدل ساعة واحدة يومياً يستغلها في إنجاز بعض الأعمال بمجهود خفيف. ما الوزن (أو الكتلة) الذي من المتوقع أن يخسره هذا الشخص لو أنه لم يغير نظام غذائه؟ افرض أن 1 kg من الدهن يختزن نحو 40.000 kJ من الطاقة.

15 – 5 الآلات الحرارية

17. (I) تخرج الآلة الحرارية 8200 J من الحرارة خلال بذلها شغلاً نافعاً بمقدار 3200 J. فما كفاءة هذه الآلة؟

18. (I) تبذل آلة حرارية شغلاً مقداره 9200 J خلال الدورة الواحدة، في حين تمتص 22.0 Kcal من الحرارة من خزان ذي درجة حرارة مرتفعة. فما كفاءة هذه الآلة؟

19. (I) ما الكفاءة العظمى لآلة حرارية تعمل بين درجتي الحرارة 580°C و 380°C؟

20. (I) درجة الحرارة الصادرة عن آلة حرارية هي 230°C. فما الحرارة المرتفعة الضرورية لجعل كفاءة كارنو 28%؟

21. (I) تعمل محطة طاقة نووية بمعدل 75% من كفاءتها العظمى النظرية (كارنو) بين درجتي الحرارة 625°C و 350°C. فإذا كانت هذه المحطة تنتج طاقة كهربائية بمعدّل 1.3 GW، فما مقدار الحرارة التي تطردها إلى الخارج خلال كل ساعة؟

22. (II) ليس من الضروري لدرجة الحرارة المرتفعة لمحيط الآلة الحراريّة أن تكون أعلى من درجة الحرارة المعيارية. وبما أنّ تكلفة النيتروجين السائل (عند 77 K) هي نفسها لزجاجة ماء شرب، فاحسب كفاءة الآلة التي ستعمل على تحويل الحرارة من درجة حرارة الغرفة (293 K) إلى درجة حرارة "وقود" النيتروجين السائل (الشكل 25 – 15).

الشكل **25 - 15** (مسألة 22).

23. (II) تبذل آلة كارنو شغلاً بمعدل 440 kW، في حين تستهلك 680 kcal من الحرارة خلال الثانية. فإذا كانت درجة حرارة مصدر الحرارة 570°C، فما درجة حرارة الحرارة المبددة إلى الخارج؟

24. (II) إذا كانت درجتا الحرارة الضروريتان لعمل آلة كارنو هما 210°C و 45°C، وكانت قدرة الآلة الناتجة 950 W. فاحسب معدل الحرارة الناتجة.

25. (II) تُنتج محطة طاقة ما 550 MW من القدرة الكهربائية. قدّر كمية الحرارة المبددة خلال كلّ ثانية مفترضًا أنّ كفاءة المحطة هي 38%.

26. (II) تستغل آلة حرارية لها كفاءة مثالية (كارنو) تعادل 28% مصدرا للحرارة درجة حرارته 550°C. فما درجة حرارة المصدر الضرورية لرفع كفاءة الآلة إلى 35%؟

27. (II) إنّ كفاءة كارنو لآلة حرارية هي 39% عندما تبدّد الحرارة عند 350°C. ما درجة الحرارة المبددة الضرورية لرفع كفاءة كارنو إلى 49%؟

28. (II) تعمل الآلات البخارية في محطة تعمل على القدرة البخارية كأزواج بحيث تكون الحرارة الناتجة من إحدى الآلتين هي الحرارة المدخلة إلى الآلة الثانية. ودرجات الحرارة التي تعمل عليها هذه الأزواج هي 670°C و 440°C للآلة الأولى، و 430°C و 290°C للآلة الثانية. فإذا كانت حرارة احتراق الفحم 2.8×10^7 J/kg، فما معدل احتراق الفحم الضروري لإنتاج 1100 MW من القدرة؟ افرض أنّ كفاءة الآلات هي 60% من الكفاءة المثالية لكارنو.

15 – 6 الثلاجات والمكيفات والمضخات الحرارية

29. (I) درجة الحرارة المنخفضة لملف التبريد في البراد هي 15°C–، ودرجة الحرارة المبددة هي 30°C. ما المعامل النظري الأعظم للأداء؟

30. (II) تعمل ثلاجة-براد مثالية ذات COP = 7.0 في غرفة درجة حرارتها 24°C. ما درجة الحرارة داخل البرّاد؟

31. (II) يعادل معامل أداء ثلاجة في مطعم 5.0. فإذا كانت درجة الحرارة في المطبخ خارج الثلاجة 29°C، فما أقلُّ درجة حرارة يمكن الوصول إليها داخل الثلاجة على اعتبار أنها مثالية؟

32. (II) تستخدم مضخة حرارية لإبقاء منزل ما دافئاً عند 22°C. ما مقدار الشغل الضروري الذي يجب أن تبذله المضخة لتزويد المنزل بمقدار 2800 J من الحرارة إذا كانت درجة الحرارة خارج المنزل هي: (أ) 0°C؟ (ب) 15°C–؟ افرض أداءاً مثالياً (كارنو) للمضخة.

33. (II) ما حجم الماء عند درجة حرارة 0°C الذي سيتحول إلى مكعبات ثلج خلال ساعة واحدة داخل براد إذا كان معامل أداء وحدة تبريده يعادل 7.0 وقدرته المدخلة 1.0 kw؟

34. (II) ما معامل أداء آلة (كارنو) مثالية كفاءتها 35% عند عكس طريقة عملها، وجعلها مضخة حرارية؟

15 – 7 القصور الحراري

35. (I) ما التغير في القصور الحراري لـ 250 g من البخار عند درجة حرارة 100°C عند تكاثفه إلى ماء عند 100°C؟

36. (I) قدّر التغير في القصور الحراري لـ 1 kg من الماء عند تسخينه من 0°C إلى 100°C.

37. (I) ما التغير في القصور الحراري لـ $1.00\ m^3$ من الماء عند 0°C عندما يتجمد إلى ثلج عند 0°C؟

38. (II) ما التغير الكلي في القصور الحراري خلال عملية تجمد $1.00\ m^3$ من المادة عند 0°C ثم عملية تبريد إلى 10°C– نتيجة ملامسته لكتلة هائلة جداً من الثلج عند 10°C–؟

39. (II) ينزلق صندوق كتلته 10.0 kg بسرعة ابتدائية مقدارها 3.0 m/s على سطح طاولة خشن إلى أن يقف وقوفاً كاملاً. قدّر التغير الكلي في القصور الحراري للكون. افترض أن درجة حرارة الأجسام جميعها هي درجة الغرفة (293 K).

40. (II) تمتلك صخرة هاوية طاقة حركية KE قبل اصطدامها مباشرة بسطح الأرض. ما التغير الكلي في القصور الحراري للصخرة ومحيطها الناجم عن التصادم؟

41. (II) يوصل عمود من الألمنيوم حرارة بمعدل 7.50 cal/s من مصدر للحرارة درجة حرارته 240°C إلى كتلة مائية درجة حرارتها 27°C. احسب معدل ازدياد القصور الحراري لكل وحدة زمن خلال هذه العملية.

42. (II) مُزج 1.0 kg من الماء درجة حرارته 30°C مع 1.0 kg من الماء درجة حرارته 60°C في وعاء معزول تماماً. قدر محصلة التغير في القصور الحراري للنظام.

43. (II) وضعت قطعة من الألمنيوم كتلتها 3.8 kg، ودرجة حرارتها 30°C في 1.0 kg من الماء داخل وعاء مصنوع من مادة الستايروفوم عند درجة حرارة الغرفة (20°C). احسب محصلة التغير التقريبي في القصور الحراري للنظام.

44. (III) تنتج آلة حرارية حقيقية تعمل بين خزاني حرارة درجتا حرارتهما 970 K و650 K مقدار 550 J من الشغل خلال كل دائرة عندما تكون الحرارة المدخلة 2200 J.(أ) قارن بين كفاءة هذه الآلة الحقيقية وآلة (كارنو) المثالية. (ب) احسب التغير الكلي للقصور الحراري للكون خلال الدورة الواحدة للآلة الحقيقية. (جـ) احسب التغير الكلي للقصور الحراري للكون خلال الدورة الواحدة لآلة كارنو تعمل بين درجتي الحرارة المعلنتين نفسيهما.

*15 - 11 تفسير إحصائي

*45. (II) احسب الاحتمالات الناجمة من إلقاء حجري نرد والحصول على (أ) 5. (ب) 11.

*46. (II) رتب خمس أوراق لعب حسب ازدياد احتمالية الحصول على: (أ) شيخ وأربع واحدات. (ب) الرقم 6 مع قلب، والرقم 8 مع شكل هندسي "معين" (دينار) والملكة الزيتونية، والرقم 3 مع القلب والولد الشجري. (جـ) ولدين وملكتين وواحدات (د) أي خمس أوراق دون تكرارٍ لأيّ رقم. ناقش ترتيبك بالنسبة إلى الحالات دون المجهرية والجاهرية.

*47. (II) افترض أنّك تقوم بخلط ست قطع نقدية معدنية في يدك، ثم ترمي هذه القطع على سطح الطاولة. ابنِ جدولاً يظهر عدد الحالات دون المجهرية لكل حالة جاهرية. وما احتمالية الحصول على: (أ) ثلاث صور وثلاث كتابات. (ب) ست صور؟

*15 – 12 مصادر الطاقة

*48. (I) تستطيع الخلايا الضوئية (الشكل 15 – 26) إنتاج حوالي 40 W من الكهرباء من كلِّ مترٍ مربّع من مساحة سطحية في مواجهة الشمس مباشرة. ما مساحة الخلايا الضوئية الضرورية إذا كانت حاجة المنزل هي 22 kWh/day؟ وهل يكفي سطح منزل متوسط المساحة لاحتواء هذه الخلايا؟ (افترض أن الشمس تبقى مضيئة 9 ساعات يوميًا).

الشكل **15 - 26** (مسألة 48).

*49. (II) يمكن أن تخزن الطاقة لاستخدامها خلال ساعات الذروة عن طريق ضخ المياه إلى خزان مرتفع خلال فترات انخفاض الطلب، ومن ثمّ تركها لتحرك المولدات عند الحاجة. افترض أنّ المياه تضخ إلى بحيرة على ارتفاع 135 m فوق مستوى المولدات بمعدّل 1.00×10^5 kg/s مدّة 10.0 ساعات خلال الليل: (أ) ما مقدار الطاقة (kW/h) اللازم لعمل هذا خلال كلّ ليلة؟ (ب) ما متوسط القدرة الناجمة عند تحريرها خلال 14 ساعة نهارًا وبكفاءة 75%؟

*50. (II) تخزن المياه في بحيرة اصطناعية خلف سد (الشكل 15 – 27). إذا كان عمق المياه قرب السد 45 m، ومعدل انسياب المياه على المولدات الكهرومائية 35 m^3/s، فما القدرة الكهربائية المولدة؟

الشكل **15 - 27** (مسألة 50).

مسائل عامة

51. يدّعي مطوّر أنّه صمّم وبنى آلة قادرة على بذل 1.50 MW من الشغل النافع ينتج عند امتصاصها 3.00 MW من الطاقة الحرارية عند درجة حرارة 425 K، وإخراجها 1.50 MW من الطاقة الحرارية عند درجة حرارة 215 K. هل هناك مغالطة في ادعائه؟ وضّح إجابتك.

52. لوحظ أنّ حجم الغاز المعبأ في أسطوانة ذات مكبس خفيف عديم الاحتكاك سيزداد من $1.9\ m^3$ إلى $4.1\ m^3$ عند إضافة 5.30×10^5 J من الحرارة إليه. احسب: (أ) الشغل الذي سيبذله الغاز. (ب) التغير في الطاقة الداخلية للغاز. ثم ارسم هذه العملية على مخطط PV.

53. كفاءة آلة ذات 4 أسطوانات تعمل على البنزين هي 0.25. وتولد هذه الآلة شغلاً مقداره 220 J خلال الدورة الواحدة في كل أسطوانة. عندما تشتغل الآلة بمعدل 45 دورة لكل ثانية: (أ) ما الشغل المبذول خلال الثانية الواحدة؟ (ب) ما الحرارة الكلية المدخلة من الوقود خلال كل ثانية؟ (جـ) إذا كان المحتوى الحراري للبنزين 35 MJ لكلّ لتر، فما فترة ديمومة اللتر الواحد؟

54. تمتص ثلاجة "كارنو" (وهي عكس آلة كارنو) الحرارة من غرفة البراد عند درجة حرارة −17°C، وتطرد الحرارة إلى داخل الغرفة عند 25°C. (أ) ما الشغل الذي يجب أن تبذله الثلاجة لتحويل 0.50 kg من الماء عند 25°C إلى ثلج عند −17°C؟ (ب) إذا كان ناتج الضاغط 210 w، فما أقلّ زمن ضروري للقيام بالمهمة السابقة؟

55. لقد اقترح أن يتم تطوير آلة حرارية تستخدم الاختلاف في درجات الحرارة بين الماء الموجود قرب سطح المحيط والماء الموجود على عمق عدة مئات من الأمتار تحت السطح. وربما تكون درجة الحرارة بين مداري السرطان والجدي هي 27°C و4°C على الترتيب. (أ) ما الكفاءة العظمى الممكنة لآلة كهذه؟ (ب) لماذا تعدّ آلة من هذا النوع ممكنة بالرغم من انخفاض كفاءتها؟ (جـ) هل يمكنك أن تتخيل حدوث أي آثار بيئية سيئة؟

56. سيارتان كتلة كلّ منهما 1100 kg، تُسافران بسرعة 95 km/h في اتجاهين متعاكسين، إذا اصطدمتا ببعضهما بعضًا ووقفتا وقوفًا كاملاً، فقدر التغير في القصور الحراري للكون نتيجة التصادم. افترض أن درجة الحرارة T=20°C

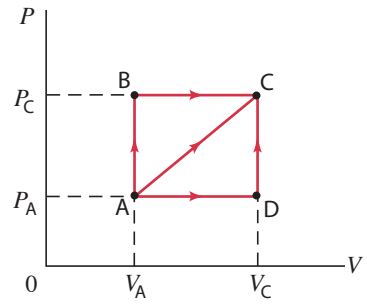
57. مُلئ كوب ألمنيوم معزول كتلته 120 g، ودرجة حرارته 15°C بماء كتلته 140 g، ودرجة حرارته 50°C. واستغرق النظام عدة دقائق ليصل بعدها إلى الاتزان. (أ) حدد درجة الحرارة النهائية . (ب) قدر التغير الكلي في القصور الحراري.

***58.** (أ) ما معامل الأداء لمضخة حرارة مثالية تأخذ الحرارة من هواء خارجي درجة حرارته 6°C، لتزود المنزل في الداخل بطاقة حرارية عند 24°C؟ (ب) إذا كانت هذه المضخة تعمل على قدرة كهربائية قدرها 1200 W، فما الطاقة الحرارية العظمى القادرة على رفد المنزل بها خلال كل ساعة؟

59. يطلق احتراق البنزين في السيارة نحو 3.0×10^4 kcal/gal إذا كان متوسط أداء السيارة 41 km/gat عندما تسير بسرعة 90 km/h، وهو ما يتطلب 25 hp، فما كفاءة هذه الآلة تحت هذه الظروف؟

60. إذا كانت درجة الحرارة المنخفضة T_L لآلة كارنو 20°C، وكفاءتها تعادل 30%، فما مقدار الزيادة الضرورية في درجة الحرارة المرتفعة T_H للآلة كي تصل إلى كفاءة تعادل 40%؟

61. احسب الشغل المبذول بواسطة غاز مثالي عند انتقاله من الحالة A إلى الحالة C في (الشكل 15 – 28) لكلّ من العمليات التالية: (أ) ADC، (ب) ABC، (جـ) AC مباشرة.



الشكل **15 - 28** (مسألة 61).

62. تولّد محطة كهربائية تعمل بكفاءة 33% قدرة كهربائية قدرها 850 MW، وتستخدم أبراج التبريد للتخلّص من الحرارة الناتجة. (أ) قدر حجم الهواء (km^3) المُسخّنُ خلال اليوم إذا سمح لدرجة الحرارة بالارتفاع 7.0°C، وهل سترتفع درجة الحرارة المحلية بصورة واضحة؟ (ب) إذا تكونت طبقة من الهواء الساخن بسمك 200 m، فقدر المساحة التي ستغطيها هذه الطبقة خلال 24 h من عمل المحطة. افترض أن كثافة الهواء 1.2 kg/m^3، وحرارته النوعية حوالي 1.0 kg/J.°C عند ضغط ثابت.

63. افترض أنّ محطة طاقة تولد 980 MW باستخدام مولدات بخارية. ويدخل البخار المسخن إلى 625 K إلى المولدات، ويتم التخلص من الحرارة غير المستخدمة إلى النهر عند 285 K. افترض أن المولدات تعمل كآلة كارنو مثالية. (أ) قدر متوسط ارتفاع درجة حرارة مياه النهر مباشرة بالقرب من محطة التوليد إذا علمت أنّ معدل انسياب النهر 37 m^3/s. (ب) ما الازدياد في القصور الحراري لكل كيلو غرام من مياه النهر بالقرب من محطة التوليد مباشرةً بدلالة J/kg·K؟

64. يعمل محرك سيارة قدرته 100 حصان بكفاءة 15%. افترض أن درجة حرارته الباردة (العادم) 85°C، ودرجة حرارته الساخنة (المدخلة) 495°C (درجة حرارة انفجار مزيج الوقود والهواء) . (أ) ما النسبة بين كفاءة هذه الآلة وكفاءة (كارنو) العظمى الممكنة؟ (ب) قدر كمية القدرة (بالواط) التي ستعمل على تحريك السيارة، وكذلك مقدار الحرارة (بدلالة الجول والكيلو سعر) التي ستطردها للهواء خلال ساعة واحدة.

65. وُضِعَ غاز مثالي في زجاجة أسطوانية طويلة مساحة مقطعها العرضي 0.080 m^2 ووضع مكبس متحرك عديم الاحتكاك كتلته 0.10 kg رأسياً داخل الزجاجة بحيث يعملُ ضغط الغاز داخل الزجاجة على تحمل وزن المكبس. وعند تسخين الغاز (تحت ضغط ثابت) من 25°C إلى 55°C ارتفع المكبس مسافة 1.0 cm. ما مقدار الحرارة اللازم لهذه العملية؟ افترض ضغطا جويا معياريا في الخارج.

66. يزود 1.0 kg من الدهون الجسم بـ 3.7×10^7J من الطاقة الداخلية. (أ) ما مقدار الدهون التي سيحرقها الجسم في يوم واحد للمحافظة على درجة حرارة شخص مستلق على سريره ومتوسط معدل أيضه 95 W؟ (ب) ما الفترة الزمنية الضرورية لحرق 1.0 kg من الدهون في هذه المدة؟

67. يحافظ جهاز تكييف مثالي على درجة حرارة الغرفة عند 21°C، أمّا درجة الحرارة خارج الغرفة فهي 32°C. ما مقدار التوفير في القدرة الكهربائية الناتج من عزل زجاج نوافذ الغرفة عن أشعة الشمس المباشرة، وانخفاض القدرة النافذة من الشمس إلى الغرفة من 5.3 kW إلى 500 W؟

68. يعدّ "المجفف" ثلاجة ذات باب مفتوح، حيث يتم سحب الهواء الرطب إلى الداخل بواسطة مروحة، ثم يُمرَّرُ على ملف بارد فتتكثف قطرات الماء من الهواء. وبعد فصل الماء عن الهواء، تعود درجة حرارة الهواء إلى ما كانت عليه من الدفء، ثم يطرد الهواء إلى الغرفة. ونتيجة تصميم المجفف بطريقة مثالية، يتم تبادل الحرارة بين الهواء الداخل والخارج. وفي هذه الطريقة، فإن الحرارة التي يزيلها ملف الثلاجة تأتي في معظمها من تكاثف بخار الماء في الهواء إلى سائل. قدّر كمية بخار الماء المزال خلال ساعة واحدة بواسطة المجفف إذا كانت درجة حرارة الغرفة 25°C. علماً بأنّ الماء يتكاثف عند 8°C ومعدل بذل المجفف للشغل 600 W من القدرة الكهربائية.

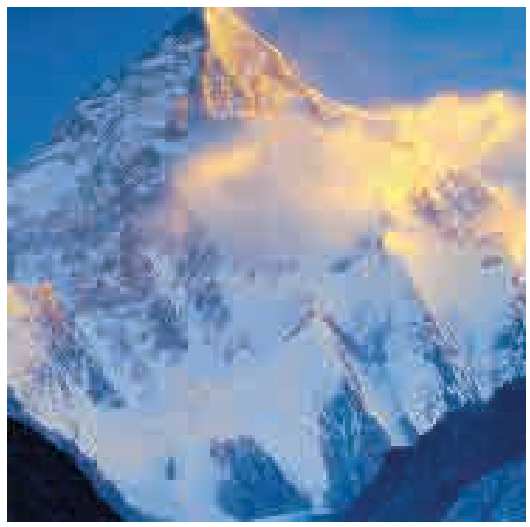
إجابات التمارين

أ. 700 J.

ب. أقل.

جـ. -6.8×10^3 J.

د. تطبق (المعادلة 14 – 1) على الغاز المثالي أحادي الذرة فقط ولا تطبق على الماء السائل.



صورة "لينو لاسيديللي" على قمة K2، وقام بتصويره "أشيللي كومبانوني" في يوليو 1954 ليُسجَّل بذلك أول تسلقٍ لثاني أعلى قمة (مبينة على الغلاف الخارجي لهذا الكتاب) والتي اعتبرت الأصعب بين الجبال الأعلى ذات القمم شاهقة الارتفاع، 8000 متر. انظر الجدول 1 - 6 والمثال 1 - 3 . ومضى 23 عاماً قبل أن يتم تسلق K2 للمرة الثانية.