تم تحميل وعرض المادة من

موقع كتبي



www.kottby.net

موقع كتبي يعرض لكم الكتب الدراسية الطبعة الجديدة
وحلولها، وشرح للمناهج الدراسية، توزيع المناهج، تحاضير،
أوراق عمل، نماذج إختبارات عرض مباشر وتحميل PDF

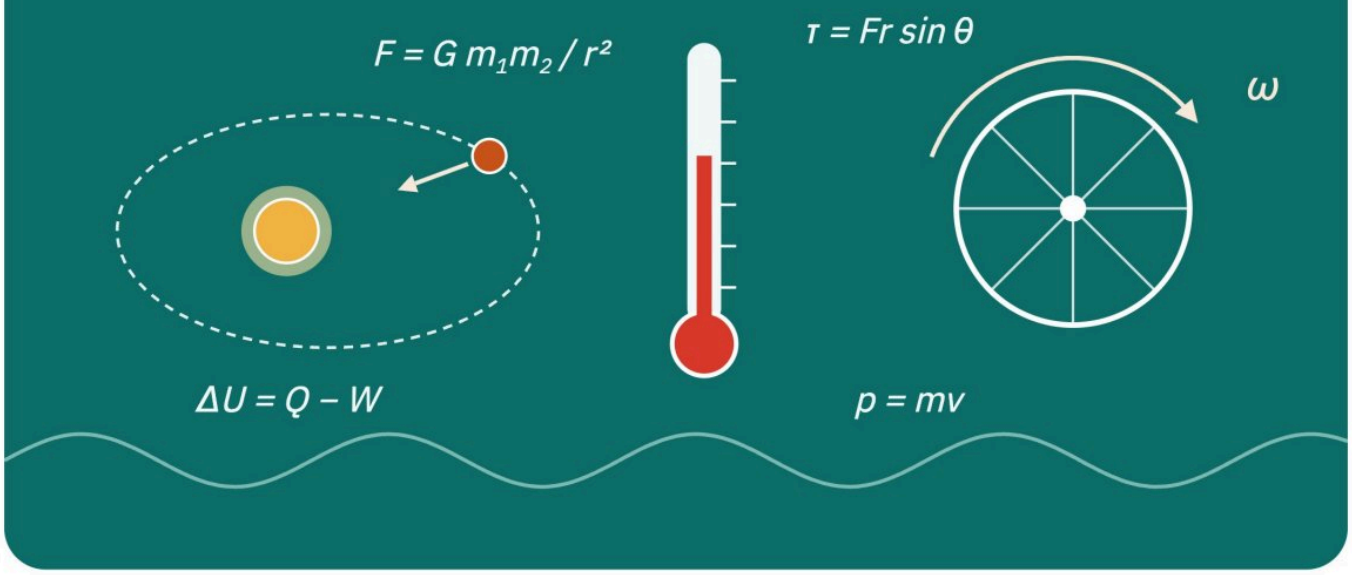
حمل التطبيق من هنا

احصل عليه من Google Play
تنزيل من App Store
احصل عليه من AppGallery

التعليم الثانوي

ملخصات فيزياء 2

ملخصات مبسّطة ومصمّمة لدروس الكتاب، مع رسوم توضيحية
ودليل شامل للقوانين الرياضية



محتويات الملخصات

6 فصول · 13 درسًا · دليل القوانين

١ الفصل الأول — الجاذبية
٢ الفصل الثاني — الحركة الدورانية
٣ الفصل الثالث — الزخم وحفظه
٤ الفصل الرابع — الشغل والطاقة والآلات البسيطة
٥ الفصل الخامس — الطاقة وحفظها
٦ الفصل السادس — الطاقة الحرارية

إعداد

الأستاذ فؤاد الغامدي

معلم الفيزياء

شرح مبسّط · رسوم توضيحية · قوانين وخلاصات

يُسمح باستخدامه وإعادة نشره **مجانًا** ، ويُمنع **بيعه**

فهرس الملخصات

١ الفصل الأول الجاذبية

1-1	حركة الكواكب والجاذبية Planetary Motion and Gravitation	ص 9–17	3 صفحات
1-2	استخدام قانون الجذب الكوني Using the Law of Universal Gravitation	ص 18–27	3 صفحات

٢ الفصل الثاني الحركة الدورانية

2-1	وصف الحركة الدورانية Describing Rotational Motion	ص 37–41	2 صفحات
2-2	ديناميكا الحركة الدورانية Rotational Dynamics	ص 42–46	2 صفحات
2-3	الاتزان Equilibrium	ص 47–55	3 صفحات

٣ الفصل الثالث الزخم وحفظه

3-1	الدفع والزخم Impulse and Momentum	ص 67–73	2 صفحات
3-2	حفظ الزخم Conservation of Momentum	ص 74–83	2 صفحات

٤ الفصل الرابع الشغل والطاقة والآلات البسيطة

4-1	الطاقة والشغل Work and Energy	ص 97–107	3 صفحات
4-2	الآلات Machines	ص 109–116	3 صفحات

٥ الفصل الخامس الطاقة وحفظها

5-1	الأشكال المتعددة للطاقة The Many Forms of Energy	ص 131–139	3 صفحات
5-2	حفظ الطاقة Conservation of Energy	ص 141–150	3 صفحات

٦ الفصل السادس الطاقة الحرارية

6-1	درجة الحرارة والطاقة الحرارية Temperature and Thermal Energy	ص 165–177	4 صفحات
6-2	تغيرات حالة المادة وقوانين الديناميكا الحرارية Changes of State and the Laws of Thermodynamics	ص 178–189	4 صفحات

$f(x)$ **ملحق: دليل القوانين الرياضية**
جميع قوانين الفصول الستة، مع متى يُستخدم كل قانون والرموز والوحدات — 4 صفحات

حركة الكواكب والجاذبية

ملخص الدرس · Planetary Motion and Gravitation · صفحات الكتاب 9–17

الدرس 1-1

أهداف الدرس

١. أربط بين قوانين كبلر وقانون الجذب الكوني.
٢. أحسب الزمن الدوري ومقدار السرعة المدارية.
٣. أصف أهمية تجربة كافندش.

المفردات

القانون الأول لكبلر · القانون الثاني لكبلر · القانون الثالث لكبلر · قوة الجاذبية · قانون الجذب الكوني (العام)

1 من كوبرنيكس إلى كبلر

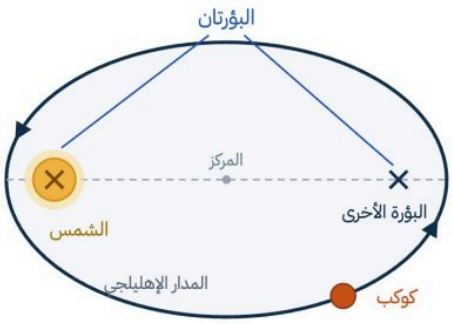
كان يُعتقد قديمًا أن الشمس والقمر والكواكب والنجوم تدور حول الأرض، إلى أن بيّن **كوبرنيكس** أن حركة الكواكب تُفهم أفضل إذا افترضنا أنها تدور حول **الشمس**. ثم رصد **تايكو براهي** الفلك بأجهزة ضخمة مثل الأسطرلاب والسُّدس (وهي في الأصل من ابتكار **علماء المسلمين**)، لكنه توصّل **خطأً** إلى أن الشمس والقمر يدوران حول الأرض.

1543م	1560م	بعد براهي	1666م	1798م
كوبرنيكس	**تايكو براهي**	**يوهان كبلر**	**نيوتن**	**كافندش**
الأرض وغيرها من الكواكب تدور حول الشمس	رصد الفلك 20 سنة بأجهزة صممها بنفسه دون تلسكوب	ورث بيانات براهي ودرس المريخ فاكتشف قوانينه الثلاثة	قانون الجذب الكوني بعد 45 سنة من كبلر	قاس ثابت الجذب الكوني G تجريبيًا

2 قوانين كبلر

القانون الأول · شكل المدار

مدارات الكواكب **إهليلجية** (بيضاوية)، وتكون الشمس في **إحدى البؤرتين**.

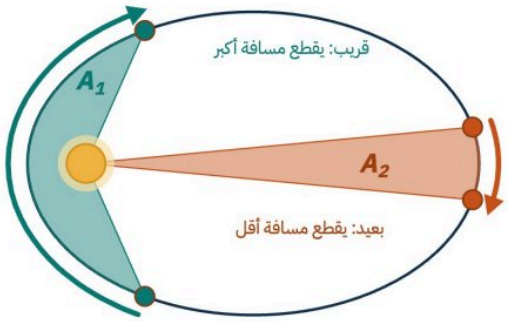


المذنبات أيضًا تدور في مدارات إهليلجية، وتنقسم حسب زمنها الدوري إلى مجموعتين:

- زمن دوري **أكبر** من 200 سنة — هال–بوب: 2400 سنة
- زمن دوري **أقل** من 200 سنة — هالي: 76 سنة

القانون الثاني · المساحات المتساوية

الخط الوهمي من الشمس إلى الكوكب يمسح **مساحات متساوية في فترات زمنية متساوية**؛ لذا يتحرك الكوكب **أسرع** عندما يكون **قريبًا** من الشمس، و**أبطأ** عندما يكون بعيدًا عنها.



في زمنين متساويين $A_1 = A_2$

القانونان **الأول والثاني** ينطبقان على **كل كوكب على حدة**، أما **الثالث** فيقارن حركة عدة أجرام تدور حول جسم واحد.

2 قوانين كبلر (تابع)

القانون الثالث · الأزمنة الدورية والمسافات

مربع النسبة بين الزمنين الدوريين لأي كوكبين يدوران حول الشمس يساوي مكعب النسبة بين متوسطي بُعديهما عن الشمس.

القانون الثالث لكبلر

$$\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^2 = \left(\frac{r_A}{r_B}\right)^3$$

T الزمن الدوري · r متوسط البعد عن الشمس

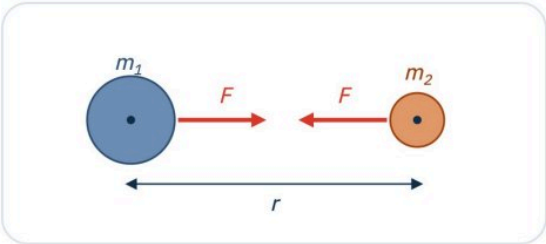
للتبسيط نعامل مدارات الكواكب على أنها **دائرية**؛ فمدار الزهرة وأقمار المشتري مثلًا قريبة جدًا من الدائرة. جدول **1-1** بيانات الأجرام:

الجرم	نصف القطر (m)	الكتلة (kg)	متوسط البعد عن الشمس (m)
الشمس	6.96×10^8	1.99×10^{30}	—
عطارد	2.44×10^6	3.30×10^{23}	5.79×10^{10}
الزهرة	6.05×10^6	4.87×10^{24}	1.08×10^{11}
الأرض	6.38×10^6	5.98×10^{24}	1.50×10^{11}
المريخ	3.40×10^6	6.42×10^{23}	2.28×10^{11}
المشتري	7.15×10^7	1.90×10^{27}	7.78×10^{11}
زحل	6.03×10^7	5.69×10^{26}	1.43×10^{12}
أورانوس	2.56×10^7	8.68×10^{25}	2.87×10^{12}
نبتون	2.48×10^7	1.02×10^{26}	4.50×10^{12}

3 قانون نيوتن في الجذب الكوني

عام **1666م** بيّن **نيوتن** أن القوة المؤثرة في كوكب تتناسب **عكسيًا مع مربع المسافة** بين مركزه ومركز الشمس، وتعمل على امتداد **الخط الواصل بين المركزين**. والقوة نفسها التي تُسقط **التفاحة** تُبقي **القمر** في مداره.

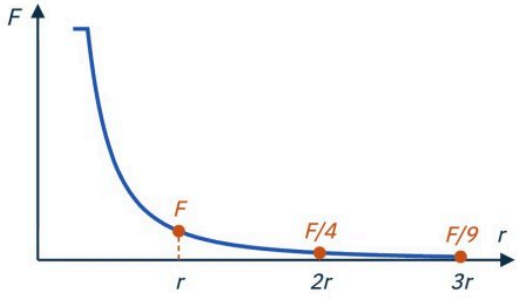
وحسب القانون الثالث لنيوتن، يؤثر الكوكب في الشمس بقوة مساوية مقدارًا ومعاكسة اتجاهًا؛ وتُسمّى هذه القوة **قوة الجاذبية**، وتتناسب طرديًا مع **الكتلتين**.



قانون الجذب الكوني (العام)

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

قوة الجاذبية = ثابت الجذب الكوني × كتلة الجسم الأول × كتلة الجسم الثاني ÷ مربع المسافة بين مركزي الجسمين



منحنى التربيع العكسي: تقل القوة بسرعة كلما زادت المسافة

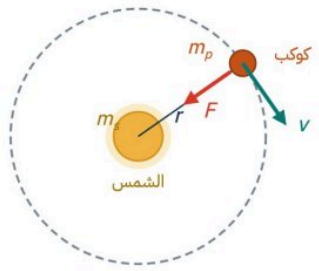
تغيير المسافة $F \propto 1/r^2$		
$2r$	←	$F/4$
$3r$	←	$F/9$
$r/2$	←	$4F$
$r/3$	←	$9F$

تغيير الكتلتين $F \propto m_1 m_2$		
$2m_1 m_2$	←	$2F$
$3m_1 m_2$	←	$3F$
$2m_1 3m_2$	←	$6F$
$\frac{1}{2}m_1 m_2$	←	$\frac{1}{2}F$

4 الجذب الكوني والقانون الثالث لكبلر

كوكب كتلته m_p يدور حول الشمس (كتلتها m_s) في مدار دائري نصف قطره r؛ قوة الجاذبية هي القوة المحصلة التي تُكسبه تسارعًا مركزيًا:

١ القانون الثاني لنيوتن	$F_{net} = m_p a_c$
٢ التسارع المركزي	$a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$
٣ نعوّض قوة الجاذبية	$G\frac{m_s m_p}{r^2} = m_p\frac{4\pi^2 r}{T^2}$
٤ نحذف m_p ونرتّب	$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_s}\right) r^3$



قوة الجاذبية تتجه نحو الشمس وتعمل قوةً مركزية

الزمن الدوري لكوكب يدور حول الشمس

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{Gm_s}}$$

يساوي 2π مضروبًا في الجذر التربيعي لمكعب نصف قطر المدار مقسومًا على حاصل ضرب G في كتلة الشمس

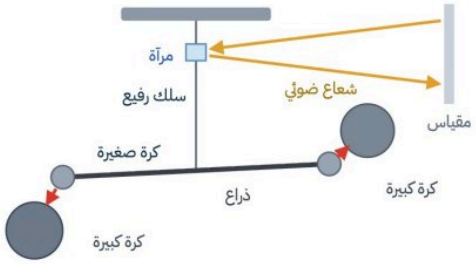
- هذه هي **صيغة القانون الثالث لكبلر**: $T^2 \propto r^3$.
- الثابت $4\pi^2/Gm_s$ يعتمد على **كتلة الشمس** وG فقط، فهو واحد لجميع الكواكب.
- الاشتقاق يصلح أيضًا للمدارات **الإهليلجية** بجعل r متوسط البعد.

5 قياس ثابت الجذب الكوني: تجربة كافندش

عام **1798م** استخدم **هنري كافندش** ذراعًا أفقية في طرفيها **كرتان رصاصيتان صغيرتان**، معلّقة من منتصفها بـ**سلك رفيع**:

- تُقرَّب **كرتان رصاصيتان كبيرتان** فتجذبان الصغيرتين فيدور الذراع.
- يتوقف الدوران عندما تتساوى **قوة لَيّ السلك** مع قوة التجاذب.
- تُقاس زاوية الدوران بـ**شعاع ضوئي منعكس عن مرآة** مثبّتة على السلك.

ومن معرفة m وr وF حُسبت قيمة G.



ميزان الليّ: الكرات الكبيرة تجذب الصغيرة فيدور الذراع

ثابت الجذب الكوني

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\ N\cdot m^2/kg^2$$

الكتلة بالكيلوجرام، والمسافة بالمتر، والقوة بالنيوتن

لماذا لا نشعر بتجاذب الأجسام حولنا؟ لأن G صغير جدًا؛ فقوة التجاذب بين كرتي بولنج كتلة كل منهما 7.26 kg والمسافة بين مركزيهما 0.30 m هي $3.9 \times 10^{-8}\ N$ فقط.

6 أهمية الثابت G: إيجاد كتلة الأرض

عند سطح الأرض: قوة الجاذبية = الوزن

$$G\frac{m_E m}{r_E^2} = mg$$

تسارع الجاذبية الأرضية

$$g = G\frac{m_E}{r_E^2}$$

كتلة الأرض

$$m_E = \frac{gr_E^2}{G} = 5.98 \times 10^{24}\ kg$$

قياس كافندش لـG أكّد توقّع نيوتن بأن جميع الأجسام يجذب بعضها بعضًا، ومكّن من حساب كتلة الأرض.

استخدام قانون الجذب الكوني

ملخص الدرس · Using the Law of Universal Gravitation · صفحات الكتاب 18–27

الدرس 1-2

أهداف الدرس

١. أحلّ مسائل على الحركة المدارية.
٢. أربط انعدام الوزن مع أجسام في حالة سقوط حر.
٣. أصف مجال الجاذبية.
٤. أقارن بين كتلة القصور وكتلة الجاذبية.
٥. أقارن بين وجهتي نظر نيوتن وأينشتاين حول الجاذبية.

المفردات

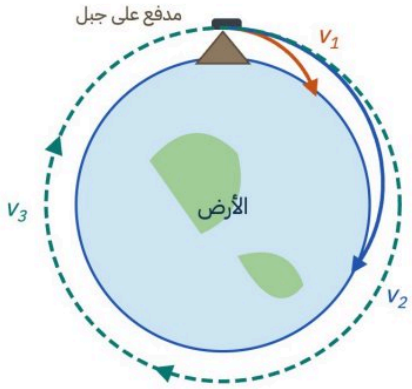
مجال الجاذبية · كتلة القصور · كتلة الجاذبية · مبدأ التكافؤ

1 مدارات الكواكب والأقمار الاصطناعية

تخيّل نيوتن **مدفعًا** يطلق قذيفة أفقيًا؛ لها سرعة أفقية وأخرى رأسية فيكون مسارها **قطعًا مكافئًا** ثم تسقط على الأرض.

- v_1 سرعة أفقية ليست كبيرة ← تسقط القذيفة قريبًا.
- v_2 سرعة أكبر ← تقطع مسافة أطول ثم تسقط.
- v_3 سرعة كافية ← تدور حول الأرض كاملةً في **مدار دائري**.

أهملت التجربة **مقاومة الهواء**؛ ولتجنّبها يجب الإطلاق من ارتفاع أكثر من **150 km** (قمة إفرست 8.85 km فقط)، فيصبح الجسم **قمرًا اصطناعيًا** يدور في مدار ثابت.



تجربة نيوتن الذهنية: $v_3 > v_2 > v_1$

2 سرعة القمر الاصطناعي وزمنه الدوري

القمر الذي يدور على ارتفاع ثابت يتحرك **حركة دائرية منتظمة**، وقوة الجاذبية هي القوة المركزية:

التسارع المركزي	$a_C = \frac{v^2}{r}$
القانون الثاني لنيوتن	$F_{\text{محصلة}} = \frac{mv^2}{r}$
مع قانون الجذب الكوني	$G\frac{m_E m}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$

سرعة القمر الاصطناعي

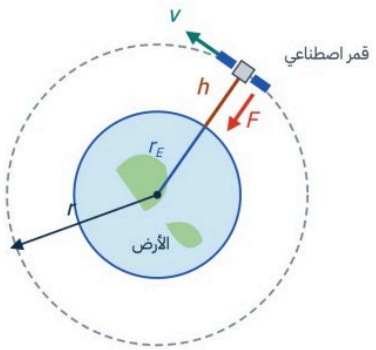
$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

حول الأرض

الزمن الدوري للقمر

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

يشبه الزمن الدوري لكوكب حول الشمس



نصف قطر المدار = نصف قطر الأرض + الارتفاع

$r = r_E + h$

استخدام قانون الجذب الكوني

قوة قانون الجاذبية — اكتشاف نبتون: اكتُشف **أورانوس** عام **1781م**، وبحلول **1830م** اتضح أن مداره المحسوب بقانون الجاذبية لا يتفق مع مداره الفعلي، فاقترح فلكيان وجود كوكب آخر يجذبه، وحسبا مداره عام **1845م**، وبعد سنة وجده فلكيو مرصد برلين: إنه **نبتون**.

- يحلّ محلّ m_E **كتلة الجسم المركزي** لأي جسم يدور حول جسم آخر، وr المسافة بين المركزين.
- السرعة المدارية v والزمن الدوري T **مستقلان عن كتلة القمر** الاصطناعي.

كتلة القمر الاصطناعي: تُسرَّع الأقمار بالصواريخ إلى مداراتها، ولأن $F = ma$ فكلما زادت كتلة القمر تطلّب **صاروخًا أقوى**. (لاندسات 7: كتلته 2200 kg ويدور على ارتفاع 705 km.)

المدار المتزامن مع الأرض: القمر GOES-12 للتوقعات الجوية يدور حول الأرض دورة كل يوم على ارتفاع 35,785 km، وتطابق سرعته المدارية معدل دوران الأرض؛ فيبدو ثابتًا فوق بقعة على خط الاستواء، فلا يلزم تغيير اتجاه طبق الاستقبال.

3 تسارع الجاذبية الأرضية

لجسم كتلته m يسقط سقوطًا حرًا:

القانون الثاني + الجذب الكوني: $F = G\frac{m_E m}{r^2} = ma$

إذن: $a = G\frac{m_E}{r^2}$

عند السطح: $r = r_E$ و $a = g$: $g = G\frac{m_E}{r_E^2}$

كتلة الأرض: $m_E = \frac{gr_E^2}{G}$

التسارع على بعد r من مركز الأرض

$$a = g\left(\frac{r_E}{r}\right)^2$$

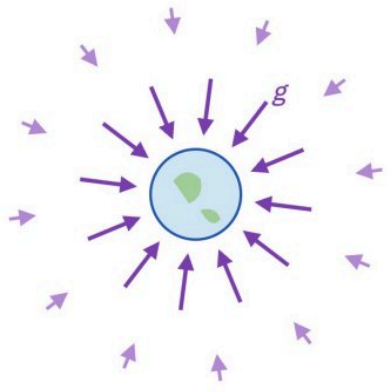
كلما ابتعدت عن الأرض قلّ تسارع الجاذبية تبعًا لعلاقة التربيع العكسي، فيقلّ وزنك F_g

انعدام الوزن (zero-g)

يدور المكوك على ارتفاع **400 km** حيث $g = 8.7\ m/s^2$ أي أقل قليلًا من قيمتها على السطح؛ فقوة الجاذبية على المكوك **ليست صفرًا**، وهي التي تجعله يدور حول الأرض.

لماذا يبدو الرواد عديمي الوزن؟ نشعر بوزننا عندما تؤثر فينا **قوة تماس** (الأرض أو الكرسي). وإذا تسارعتَ أنت والكرسي وأرض الغرفة بالكيفية نفسها نحو الأرض (سقوط حر) لا توجد قوى تماس، فيكون **وزنك الظاهري صفرًا**.

4 مجال الجاذبية



المتجهات تشير إلى مركز الأرض وتضعف بالابتعاد عنها

الجاذبية **ليست قوة تماس**؛ فهي تؤثر **عن بُعد** (في التفاحة والقمر). وفي القرن التاسع عشر طوّر **فارادي** مفهوم المجال لتفسير جذب المغناطيس، ثم طُبّق على الجاذبية: كل جسم له كتلة محاط بـ**مجال جاذبي** يؤثر بقوة في أي جسم آخر فيه.

المجال الجاذبي

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

ثابت الجذب الكوني × كتلة الجسم ÷ مربع البعد عن مركزه، واتجاهه نحو مركز الكتلة

القوة على كوكب كتلته m: $F = mg$ نحو الشمس؛ تنتج من تفاعل كتلته مع **المجال في مكانه** لا مع الشمس نفسها.

قياسه: $g = F/m$ بوحدة $N/kg = m/s^2$، وعند سطح الأرض **9.80 N/kg** نحو مركزها.

لعدة أجسام: يُحسب مجال كل جسم ثم **تُجمع جمعًا اتجاهيًا**. ومجال الأرض يتناسب عكسيًا مع مربع البعد عن مركزها، ويعتمد على كتلة الأرض **لا على كتلة الجسم**.

استخدام قانون الجذب الكوني

5 نوعا الكتلة

كتلة القصور

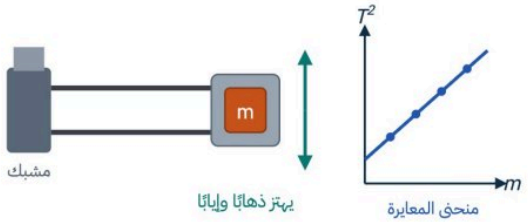
$$m_{\text{القصور}} = \frac{F_{\text{محصلة}}}{a}$$

القوة المحصلة المؤثرة في الجسم ÷ تسارعه

كتلة الجاذبية

$$m_{\text{الجاذبية}} = \frac{r^2 F_{\text{الجاذبية}}}{Gm}$$

مربع المسافة × قوة الجاذبية ÷ (G × كتلة الجسم الثاني)





وجه المقارنة	كتلة القصور	كتلة الجاذبية
ترتبط بـ	قصور الجسم: مقياس لممانعته للقوة؛ كلما كبرت قلّ تسارعه	مقدار قوة الجاذبية بين جسمين
تُقاس بـ	ميزان القصور	الميزان ذي الكفتين
مثال البطيخة	تتدحرج للخلف عند تسارع السيارة للأمام	تتدحرج للخلف عند صعود منحدر لأنها تنجذب للأرض

مبدأ التكافؤ: أعلن نيوتن أن كتلة القصور وكتلة الجاذبية **متساويتان مقدارًا**، وكل التجارب حتى الآن تدعمه، وجعله أينشتاين نقطة رئيسة في نظريته عن الجاذبية.

6 تطورات علم الفلك حول حركة الكواكب والجاذبية

370 ق.م — الإغريق: **مركزية الأرض** (يودوكسوس وأرسطو)

علماء المسلمين — أوقات الصلاة والقبلة ورؤية الهلال؛ وجعلوا الفلك **علمًا خالصًا** يعتمد على النظرية والبرهان

1543م — كوبرنيكس: **مركزية الشمس**

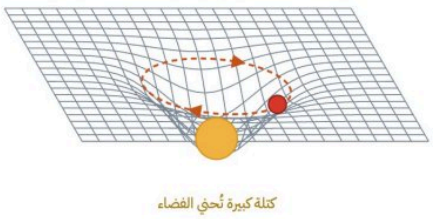
1600م تقريبًا — كبلر: مدارات **إهليلجية** دون نظرية تفسرها

نيوتن — **قانون الجذب العام** فسّر ما عجزت عنه قوانين كبلر

1916م — أينشتاين: **النسبية العامة** — الجاذبية خاصية هندسية للزمكان

7 نظرية أينشتاين في الجاذبية

افترض أينشتاين أن الجاذبية **ليست مجرد قوة** بل تأثير من الفضاء نفسه: الكتل **تُحني الفضاء (الزمكان)** المحيط بها، وتتسارع الأجسام الأخرى بسبب سيرها في هذا الفضاء المنحني؛ فالشمس والأرض تجذب كلٌّ منهما الأخرى بسبب تشوّه الفضاء الناجم عنهما.



الكرة الصفراء تُحني الشبكة والحمراء تدور حولها



انحراف الضوء: يتبع الضوء الفضاء المنحني قرب الأجسام الكبيرة جدًا فينحني؛ ولاحظ الفلكيون في **كسوف الشمس 1919م** انحراف ضوء النجوم البعيدة قرب الشمس كما تنبأ أينشتاين.

الثقوب السوداء: كتلة وكثافة كبيرتان جدًا فلا يخرج الضوء منها أبدًا؛ ويُستدل عليها بتأثيرها في النجوم القريبة وبالأشعة الناتجة عن سقوط المادة فيها.

النظرية **غير مكتملة**: لا توضح أصل الكتلة ولا كيف تحني الفضاء. • نوبل 2017: رصد **موجات الجاذبية** (تموجات الزمكان).

وصف الحركة الدورانية

ملخص الدرس · Describing Rotational Motion · صفحات الكتاب 41–37

الدرس 2-1

أهداف الدرس

١. أصف الإزاحة الزاوية.
٢. أحسب السرعة الزاوية المتجهة.
٣. أحسب التسارع الزاوي.
٤. أحلّ مسائل تتعلق بالحركة الدورانية.

المفردات

الراديان | الإزاحة الزاوية | السرعة الزاوية المتجهة | التسارع الزاوي

1 قياس الدوران: الراديان

لقياس دوران قرص CD نضع إشارة على القرص وأخرى عند نقطة البداية، وندير القرص في **عكس اتجاه عقارب الساعة**؛ فإذا عادت الإشارة إلى البداية يكون القرص قد أكمل **دورة كاملة**.

الدرجة: تعادل $\frac{1}{360}$ من الدورة الكاملة.

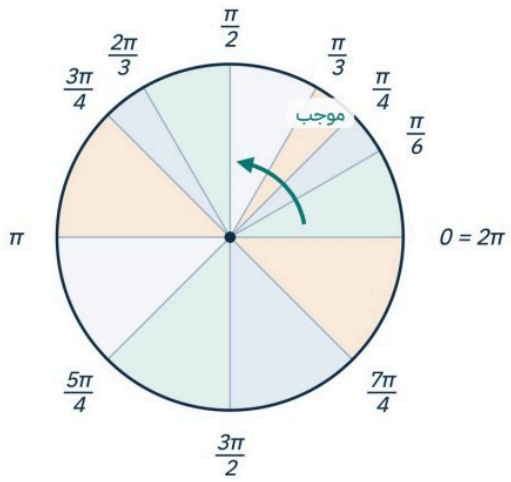
الراديان (rad): يعادل $\frac{1}{2\pi}$ من الدورة الكاملة.

عندما يُتم القرص دورة كاملة تقطع أي نقطة على حافته مسافة تساوي **2π مضروبة في نصف القطر**.

الدورة الكاملة

$$1\ rev = 2\pi\ rad = 360°$$

ويُستعمل الراديان كثيرًا في الرياضيات والفيزياء لقياس زوايا الدوران



القياس بالراديان للزوايا الشهيرة، مقيسة من θ = 0 في عكس اتجاه عقارب الساعة

2 الإزاحة الزاوية

يُرمز لزاوية الدوران بالرمز θ (ثيتا)، و**التغير في الزاوية** في أثناء دوران الجسم يسمى **الإزاحة الزاوية**.

عكس عقارب الساعة	مع عقارب الساعة
موجب +	**سالب −**

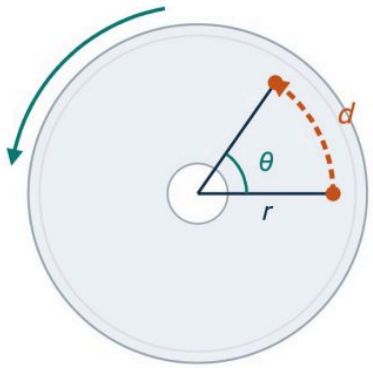
دوران الأرض حول محورها: $2\pi\ rad$ في 24 h، و$\pi\ rad$ في 12 h، و$\pi/2\ rad$ في 6 h؛ ويُعدّ دورانها كما يُرى من **القطب الشمالي** موجبًا.

المسافة التي تقطعها نقطة على جسم دوّار

$$d = r\theta$$

نقطة على بعد r من المركز تدور بزاوية θ

تنبيه: تُقاس d بوحدة **m** وليس m·rad؛ لأن الراديان يمثّل **النسبة** بين d وr.



المسار الذي تسلكه نقطة على CD يدور حول مركزه

وصف الحركة الدورانية

3 السرعة الزاوية المتجهة

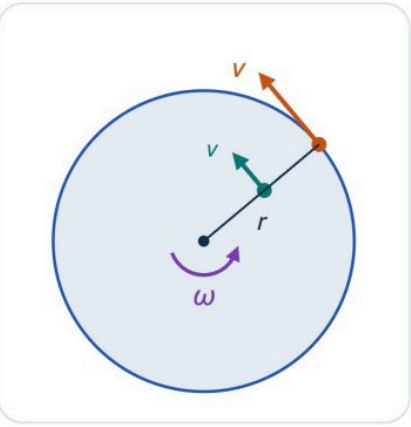
السرعة الزاوية المتجهة

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

الإزاحة الزاوية مقسومة على الزمن الذي يتطلبه حدوث الدوران
وحدتها **rad/s**

العلاقة تعطي السرعة الزاوية **المتوسطة** خلال Δt، أما **اللحظية** فتساوي **ميل منحنى** الموقع الزاوي مع الزمن.

الدوران عكس عقارب الساعة يجعل الإزاحة الزاوية **موجبة**، ويجعل السرعة الزاوية المتجهة موجبة أيضًا.



السرعة الخطية لنقطة على بعد r من محور الدوران

$$v = r\omega$$

كلما بعدت النقطة عن المحور زادت سرعتها الخطية

السرعة الزاوية للأرض	$\omega_E = (2\pi\ rad)/(24.0\ h)(3600\ s/h) = 7.27 \times 10^{-5}\ rad/s$
سرعة جسم على خط الاستواء	$v = r\omega = (6.38 \times 10^{6}\ m)(7.27 \times 10^{-5}\ rad/s) = 464\ m/s$

الجسم الصلب (كالأرض): نقاطه تقطع مسافات مختلفة لكنها تدور خلال **الزاوية نفسها وبالمعدل نفسه**. أما **الشمس** فليست جسمًا صلبًا، فتدور أجزاؤها بمعدلات مختلفة.

4 التسارع الزاوي

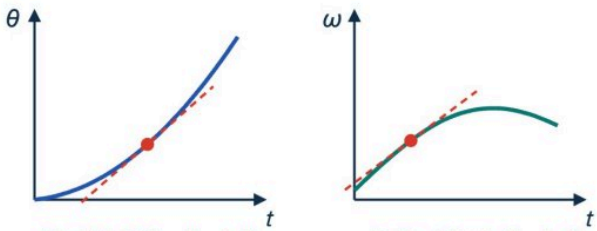
إذا تسارعت سيارة من 0.0 m/s إلى 25 m/s خلال 15.0 s ونصف قطر إطاراتها 32 cm، تتغير السرعة الزاوية لإطاراتها من 0.0 rad/s إلى 78 rad/s؛ أي يكون للإطارات **تسارع زاوي**.

التسارع الزاوي

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

التغير في السرعة الزاوية المتجهة مقسومًا على الفترة الزمنية التي حدث خلالها
وحدته **rad/s²**

إذا كان التغير في السرعة الزاوية **موجبًا** كان التسارع الزاوي موجبًا. والعلاقة تعطي التسارع **المتوسط**، أما **اللحظي** فهو ميل منحنى السرعة الزاوية مع الزمن.



التسارع الخطي لنقطة على بعد r من المحور: $a = r\alpha$

جدول 2-1: قياسات خطية وزاوية

الكمية	الخطية	الزاوية	العلاقة
الإزاحة	$d\ (m)$	$\theta\ (rad)$	$d = r\theta$
السرعة المتجهة	$v\ (m/s)$	$\omega\ (rad/s)$	$v = r\omega$
التسارع	$a\ (m/s^2)$	$\alpha\ (rad/s^2)$	$a = r\alpha$

التردد الزاوي

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

عدد الدورات الكاملة التي يدورها الجسم في الثانية الواحدة

يُرمز للتردد في الكيمياء بالرمز ν (نيو) وفي الفيزياء بالرمز f، وكلاهما صحيح.

ديناميكا الحركة الدورانية

ملخص الدرس · Rotational Dynamics · صفحات الكتاب 42–46

الدرس 2-2

أهداف الدرس

١. أصف العزم.
٢. أحدّد العوامل التي يعتمد عليها العزم.
٣. أحسب محصلة العزم.

المفردات

ذراع القوة — العزم

كيف تبدأ الحركة الدورانية لجسم؟ وكيف تتغير سرعته الزاوية المتجهة؟

1 كيف يبدأ الجسم بالدوران؟

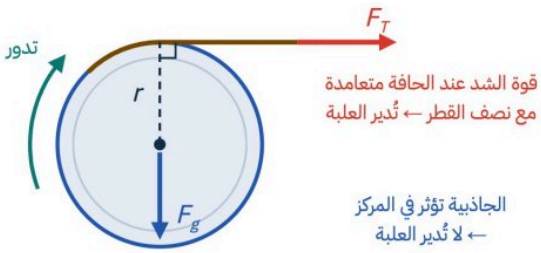
لتدوير علبة أسطوانية نلفّ حولها خيطًا ونسحبه، وكلما سحبنا بقوة أكبر زادت سرعة دورانها. تؤثر في العلبة قوتان:

الجاذبية الأرضية: تؤثر في **مركز** العلبة فلا تؤدي إلى تدويرها.

قوة الشد: تؤثر في **الحافة الخارجية** متعامدةً مع الخط الواصل بين المركز ونقطة التلامس.

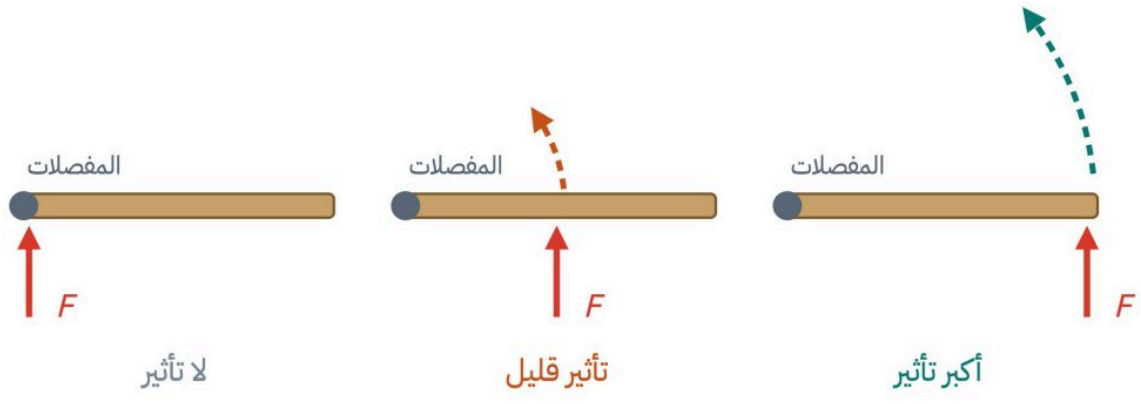
القوة المؤثرة في **جسم نقطي** تغيّر **سرعته الخطية** المتجهة

القوة المؤثرة في **جسم ثابت الشكل والحجم** قد تغيّر **سرعته الزاوية** المتجهة



2 فتح الباب: أين نؤثر بالقوة؟

نريد **أكبر أثر بأقل قوة**؛ لذا نجعل نقطة تأثير القوة **أبعد ما يمكن عن محور الدوران**. محور دوران الباب خط وهمي رأسي يمر بـ**المفصّلات**، ونؤثر بالقوة في **المقبض** (بعيدًا عن المفصّلات) **وبزاوية قائمة** على الباب.



القوة نفسها تُحدث أثرًا أكبر كلما ابتعدت نقطة تأثيرها عن المفصّلات

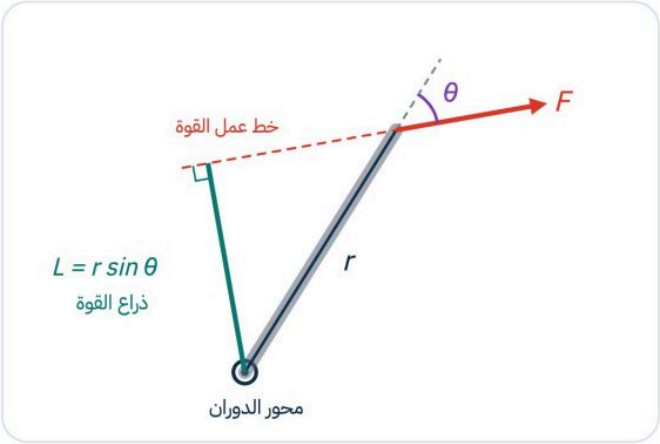
التغير في السرعة الزاوية المتجهة يحدّده: مقدار القوة واتجاهها، والمسافة بين المحور ونقطة تأثير القوة.

3 ذراع القوة والعزم

ذراع القوة: المسافة العمودية من محور الدوران حتى خط عمل القوة. وعند تأثير قوة معينة يعتمد التغير في السرعة الزاوية المتجهة على ذراع القوة.

القوة متعامدة مع نصف القطر (العلبة، أو الباب): ذراع القوة = البعد عن المحور = r.

القوة غير متعامدة: يقلّ ذراع القوة؛ نمدّ خط القوة ونُسقط عليه عمودًا من المحور.



طول ذراع القوة

$$L = r \sin \theta$$

r المسافة بين محور الدوران ونقطة تأثير القوة، و θ الزاوية بين القوة ونصف القطر

العزم τ

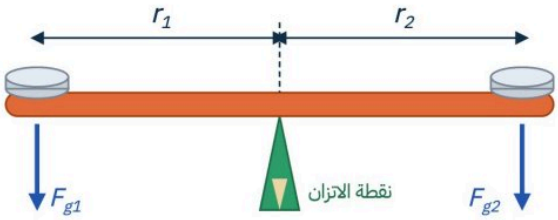
$$\tau = Fr \sin \theta$$

العزم يساوي حاصل ضرب القوة في طول ذراعها
ويقاس بوحدة **N·m**

العزم: مقياس لمقدرة القوة على إحداث الدوران.

- يكون أكبر ما يمكن عندما $\theta = 90°$ (القوة عمودية على نصف القطر).
- يكون صفرًا إذا أثّرت القوة في محور الدوران نفسه ($r = 0$)؛ ولهذا لا تُدير الجاذبيةُ العلبةَ لأنها تؤثر في مركزها.

4 إيجاد محصلة العزم



العزمان متساويان مقدارًا ومتعاكسان اتجاهًا فيتزن القلم

ثبّت قطعتي نقد متماثلتين بطرفي قلم رصاص ودعه يتزن فوق قلم آخر؛ تؤثر كل قطعة بعزم يساوي وزنها F_g مضروبًا في بعدها r عن نقطة الاتزان:

$$\tau = F_g\, r$$

العزمان متساويان مقدارًا ومتعاكسان اتجاهًا، فمحصلة العزم **صفر**:

شرط عدم الدوران (محصلة العزم صفر)

$$\tau_1 + \tau_2 = 0$$

أو

$$F_{g1}\, r_1 - F_{g2}\, r_2 = 0$$

كيف نجعل القلم يدور؟

- نضيف قطعة نقد أخرى فوق إحدى القطعتين ← تصبح **القوتان مختلفتين**.
- أو نزيح نقطة الاتزان نحو إحدى القطعتين ← تصبح **المسافتان مختلفتين**.

يعتمد العزم على

- **مقدار القوة** F
- **بُعد نقطة التأثير** عن المحور r
- **الزاوية** بين القوة ونصف القطر θ

الاتزان

ملخص الدرس · Equilibrium · صفحات الكتاب 47–55

الدرس 2-3

أهداف الدرس

١. أعرّف مركز الكتلة.
٢. أوضّح تأثير موقع مركز الكتلة في استقرار الجسم.
٣. أتعرّف شروط الاتزان.
٤. أصف كيف يؤدي دوران الأطر المرجعية (محاور الإسناد) إلى ظهور قوى ظاهرية.

المفردات

مركز الكتلة | القوة الطاردة المركزية | قوة كوريوليس

لماذا تنقلب بعض المركبات أكثر من غيرها؟ السبب يكمن في تصميمها.

1 مركز الكتلة

عند دوران مفتاح شدّ وهو ينزلق، لا تتحرك نقاطه في خطوط مستقيمة إلا **نقطة واحدة** تسلك مسارًا مستقيمًا كأن المفتاح استُبدل بجسم نقطي موضوع فيها.



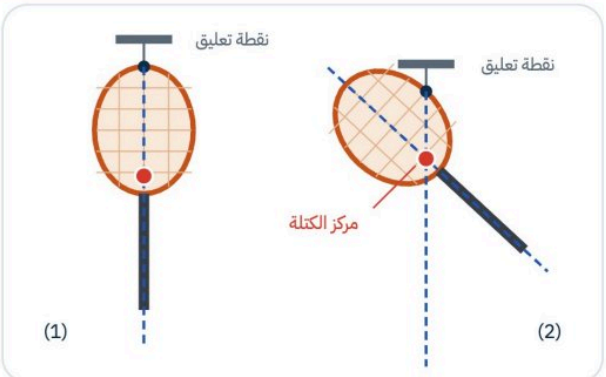
مركز الكتلة

نقطة في الجسم تتحرك بالطريقة نفسها التي يتحرك بها الجسيم النقطي

وكل الأجسام التي تتحرك حركة دورانية حرة تدور حول محور يمر بمركز كتلتها

كيف نحدّد موقع مركز الكتلة؟

١. علّق الجسم من أي نقطة، وعندما يتوقف عن التأرجح يكون مركز الكتلة على **الخط الرأسي** المرسوم من نقطة التعليق؛ ارسم هذا الخط.
٢. علّقه من نقطة أخرى وارسم خطًا رأسيًا جديدًا.
٣. مركز الكتلة هو **نقطة تقاطع الخطين**.

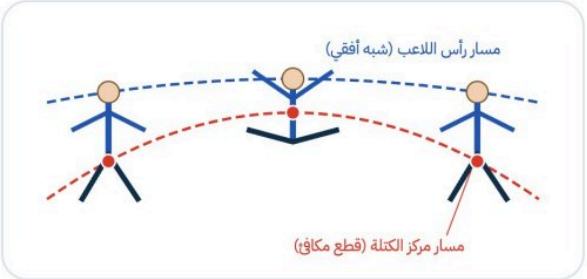


مركز الكتلة لجسم الإنسان

شخص واقف ويداه متدليتان: مركز كتلته على بُعد سنتمترات أسفل السرّة، في منتصف المسافة بين جزأي الجسم الأمامي والخلفي.

الأطفال الصغار: مركز الكتلة أعلى قليلًا؛ لأن رأس الطفل كبير بالنسبة إلى جسمه.

الجسم مرن: إذا رفعت يديك فوق رأسك يرتفع مركز كتلتك من 6 cm إلى 10 cm. ولاعب الجمباز يرفع ذراعيه ورجليه فيرتفع مركز كتلته الذي يسلك **قطعًا مكافئًا**، ويبقى رأسه على الارتفاع نفسه تقريبًا فيبدو كأنه يحلّق.

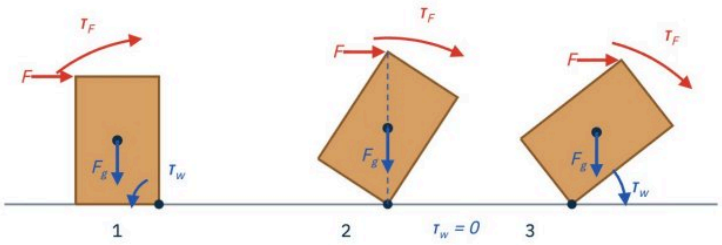


الاتزان

تطبيق — قفزة فوسبري: تقنية في القفز بالزانة تسمح للاعب بالمرور فوق العارضة دون أن يمسّها عندما يكون عند أعلى موضع له؛ وذلك ممكن لأن مركز كتلة اللاعب يكون **أسفل العارضة** عندما ينقلب فوقها بحيث يكون ظهره في اتجاهها.

2 مركز الكتلة والاستقرار (الثبات)

لماذا ينقلب الصندوق المرتفع القليل العرض أسرع من المنخفض العريض؟ لقلب صندوق يجب تدويره حول إحدى حوافه:



١. القوة F في أعلى الصندوق تولّد عزمًا τ_F، والوزن F_g في مركز الكتلة يولّد عزمًا **معاكسًا** τ_w.

٢. عندما يصبح مركز الكتلة **فوق نقطة الإسناد مباشرة** يصبح τ_w صفرًا ويبقى العزم الخارجي فقط.

٣. بدوران أكثر يبتعد مركز الكتلة عن نقطة الإسناد، فيؤثر العزمان **في الاتجاه نفسه** وينقلب الصندوق بسرعة.

الاستقرار: يكون الجسم مستقرًا إذا احتاج إلى قوة خارجية لقلبه أو تحريكه؛ فالصندوق يبقى مستقرًا ما دام عزم وزنه يُبقيه على قاعدته، أي ما دام **مركز كتلته فوق قاعدته**. ولقلبه يجب رفع مركز كتلته؛ لذا كلما كانت **القاعدة أعرض** كان أكثر استقرارًا.



مركز كتلة مرتفع: يكفي ميل صغير ليصبح فوق نقطة الارتكاز

مركز كتلة منخفض: يلزم ميل كبير ليصبح فوق نقطة الارتكاز

السيارات: السيارة المرتفعة مركز كتلتها مرتفع، فيكفي ميل قليل لقاعدتها ليخرج مركز الكتلة عن القاعدة فتنقلب؛ وكلما كان مركز الكتلة **منخفضًا** كانت أكثر استقرارًا.

في الحافلة: تباعد بين قدميك لتزيد المسافة بينهما فتتجنب السقوط.

على أصابع القدمين: يتحرك مركز كتلتك فوق مقدمة القدمين فتكون أقل استقرارًا. وفي الجودو يُدار الخصم بحيث لا يكون مركز كتلته فوق قدميه.

مركز الكتلة **خارج القاعدة**
غير مستقر: يدور أو ينقلب دون عزم إضافي

مركز الكتلة **فوق القاعدة**
مستقر

قاعدة **ضيقة** ومركز الكتلة فوقها **مستقر**، لكن أي قوة صغيرة تقلبه

3 شرطا الاتزان

لكي يبقى قلم ساكن ساكنًا يجب التأثير فيه بقوة إلى أعلى تعادل الجاذبية، ومنعه من الدوران. يكون الجسم في حالة **اتزان ميكانيكي** إذا كانت سرعته المتجهة وسرعته الزاوية المتجهة **صفرًا أو ثابتتين**، ويتطلب ذلك شرطين:

الأول: الاتزان الانتقالي

$$\Sigma F = 0$$

محصلة القوى المؤثرة في الجسم تساوي صفرًا

الثاني: الاتزان الدوراني

$$\Sigma \tau = 0$$

محصلة العزوم المؤثرة في الجسم تساوي صفرًا

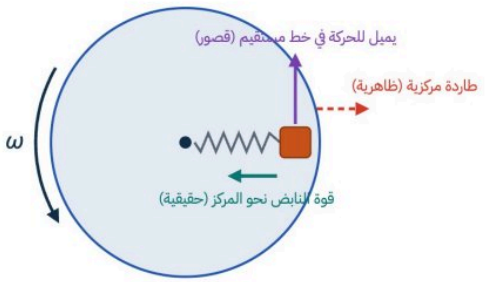
الاتزان

4 دوران الأطر المرجعية

في عربة دوارة بمدينة الألعاب تشعر كأن قوة كبيرة تدفعك إلى الخارج، وتتسارع حصاة على أرضيتها إلى الخارج **دون قوة خارجية** في ذلك الاتجاه، ولا تتحرك في خط مستقيم. فركاب الألعاب الدوارة والأفعوانيات في **أطر متسارعة**، والقوة الطاردة المركزية تحقق الإثارة فيها.

الأطر المرجعية الدوارة **أطر متسارعة**، وقوانين نيوتن تُطبَّق فقط في الأطر **غير المتسارعة (القصورية)**. ودراستها مهمة لأن الأرض تدور؛ وتأثير دورانها كبير في **الغلاف الجوي والطقس والمناخ**.

5 القوة الطاردة المركزية



نابض مثبت في مركز منصة دوارة وفي طرفه الآخر جسم: يلاحظ المراقب على المنصة أن الجسم يشدّ النابض، فيظن أن قوة تسحبه إلى الخارج؛ تُسمّى **القوة الطاردة المركزية**.

قوة ظاهرية غير حقيقية: لا توجد قوة تدفع الجسم إلى الخارج؛ والشعور بالاندفاع ناتج عن **القصور الذاتي**، إذ يميل الجسم إلى الحركة بسرعة ثابتة في خط مستقيم.

القوة الحقيقية: قوة تسحب الجسم **نحو المركز** (القوة الجاذبة المركزية) وتجبره على الاستمرار في المسار الدائري.

التسارع المركزي

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

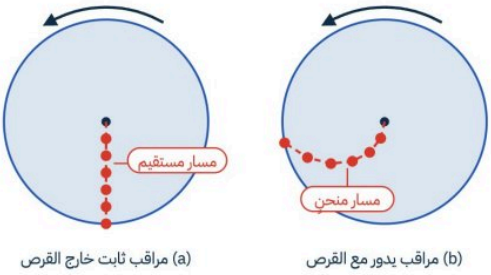
يرى المراقب على الأرض أن الجسم يتسارع نحو المركز بسبب قوة النابض.
ويعتمد التسارع المركزي على **المسافة من مركز الدوران** وعلى **مربع السرعة الزاوية المتجهة**.

6 قوة كوريوليس

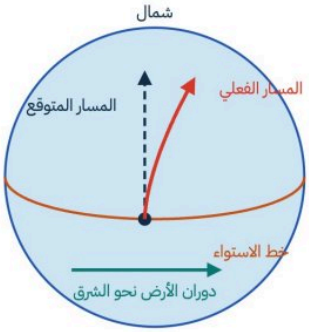
شخص في مركز قرص دوار يقذف كرة إلى حافته (نهمل الحركة الرأسية):

(a) مراقب خارج القرص: يرى الكرة تتحرك في **خط مستقيم** بسرعة ثابتة المقدار.

(b) مراقب يدور مع القرص: يراها تتحرك في **مسار منحنٍ**، فيبدو أن قوة تحرفها؛ تُسمّى **قوة كوريوليس**.



قوة كوريوليس — مثل الطاردة المركزية — **ليست حقيقية**؛ نشعر بها لأننا نلاحظ الانحراف في الحركة الأفقية ونحن في **إطار مرجعي دوّار**.



قوة كوريوليس الناشئة عن دوران الأرض: قذيفة تُطلق شمالًا من خط الاستواء لها مركّبة سرعة نحو **الشرق** بسبب دوران الأرض، وهي عند خط الاستواء أكبر منها عند أي خط عرض آخر؛ فتتحرك شرقًا أسرع من النقاط تحتها و**تسقط شرق الهدف**. والأجسام المتحركة نحو خط الاستواء تنحرف نحو **الغرب**.

الرياح: تتجه من الضغط المرتفع إلى المنخفض وتنحرف بقوة كوريوليس؛ فتدور حول مناطق الضغط المنخفض **عكس عقارب الساعة** في النصف الشمالي، و**مع عقارب الساعة** في النصف الجنوبي.

الدفع والزخم

ملخص الدرس · Impulse and Momentum · صفحات الكتاب 67–73

الدرس 3-1

أهداف الدرس

١. أتعرّف مفهوم الزخم.
٢. أحدّد مقدار الدفع الواقع على جسم.

المفردات

الدفع | الزخم | نظرية الدفع – الزخم

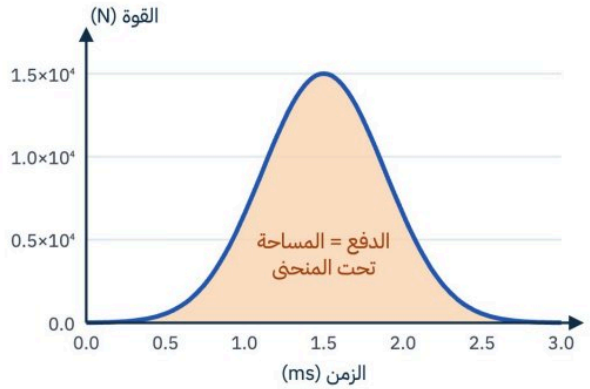
يضرب لاعب البيسبول الكرة فترتد بسرعة كبيرة. في هذا الفصل نركّز على **التفاعل بين الجسمين المتصادمين**: نصف ما حدث للكرة والمضرب **قبل التصادم وفي أثنائه وبعده**، ونبسّط الدراسة بافتراض أن جميع الحركات **أفقية**.

1 الدفع

قوة المضرب تغيّر السرعة المتجهة للكرة، وهذه القوة **تتغير مع الزمن**: تنضغط الكرة وتزداد القوة حتى قيمة عظمى (أكبر من وزن الكرة بأكثر من **10000 مرة**)، ثم تستعيد الكرة شكلها وتبتعد فتصبح القوة صفرًا، خلال 3.0 ms فقط.

١ القانون الثاني لنيوتن $F = ma = m\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)$

٢ بضرب الطرفين في Δt $F\Delta t = m\Delta v$



الشكل 1-3: تزداد القوة ثم تتناقص خلال التصادم

الدفع

$$F\Delta t$$

حاصل ضرب متوسط القوة المؤثرة في جسم في زمن تأثيرها
ويقاس بوحدة **N·s**

- إذا كانت القوة **ثابتة**: الدفع = القوة × الزمن.
- إذا كانت القوة **متغيرة**: نستخدم **متوسط القوة**، أو نحسب **المساحة تحت منحنى القوة – الزمن**.

2 الزخم

الطرف الأيمن $m\Delta v$ يحتوي على التغير في السرعة المتجهة:

$$\Delta v = v_f - v_i \quad \Longrightarrow \quad m\Delta v = mv_f - mv_i$$

الزخم (الزخم الخطي)

$$p = mv$$

زخم جسم ما يساوي حاصل ضرب كتلته في سرعته المتجهة
ويقاس بوحدة **kg·m/s**

- الزخم **كمية متجهة** لأن السرعة متجهة، والدفع كمية متجهة لأن القوة متجهة.
- لذا يجب أخذ **الإشارات** في الاعتبار عند التعامل مع الحركة في بعد واحد.
- 1 N·s = 1 kg·m/s

دلالة الألوان في الرسوم: الزخم والدفع (برتقالي) القوة (أزرق) التسارع (بنفسجي) الإزاحة (أخضر) السرعة (أحمر)

3 نظرية الدفع - الزخم

بما أن الزخم النهائي والابتدائي هما:

$$p_f = mv_f \quad , \quad p_i = mv_i \quad \Longrightarrow \quad F\Delta t = m\Delta v = p_f - p_i$$

والطرف الأيمن هو **التغير في زخم الجسم**:

نظرية الدفع – الزخم

$$F\Delta t = p_f - p_i$$

الدفع على جسم ما يساوي زخمه النهائي مطروحًا منه زخمه الابتدائي

تطبيق: التغير في زخم كرة البيسبول

الدفع = المساحة تحت منحنى الشكل 3-1 ≈ **13.1 N·s** في اتجاه القوة، فالكرة تكتسب زخمًا **13.1 kg·m/s**.

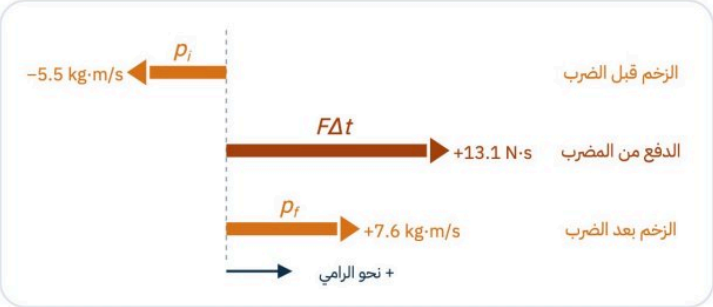
كرة كتلتها 0.145 kg سرعتها قبل الضرب 38 m/s− (الموجب نحو الرامي):

$$p_i = (0.145)(-38) = -5.5 \ kg{\cdot}m/s$$

$$p_f = p_i + F\Delta t = -5.5 + 13.1 = +7.6 \ kg{\cdot}m/s$$

$$v_f = p_f / m = 7.6 / 0.145 = +52 \ m/s$$

سرعة 52 m/s في الاتجاه الصحيح تكفي لاجتياز حدود الملعب.

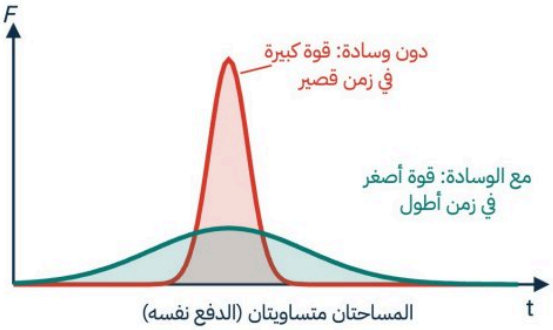


4 نظرية الدفع - الزخم والحفاظ على الحياة

يحدث تغير كبير في الزخم عندما يكون الدفع كبيرًا، والدفع الكبير ينتج عن **قوة كبيرة في زمن قصير** أو **قوة صغيرة في زمن طويل**.

عند توقف السيارة فجأة يكون الزخم النهائي صفرًا ($p_f = 0$)، والزخم الابتدائي p_i لا يتأثر بوجود الوسادة؛ لذا يكون **الدفع** $F\Delta t$ **نفسه** في الحالتين.

عمل الوسادة الهوائية: توفّر الدفع المطلوب لكنها **تقلّل القوة بزيادة زمن تأثيرها**، وتوزّع القوة على مساحة أكبر من الجسم، فيقلّ احتمال الإصابات.



المساحتان متساويتان (الدفع نفسه)

تطبيق – أحذية الركض: عندما يضرب العدّاء الأرض بقدمه تؤثر الأرض في القدم بقوة تساوي **أربعة أمثال وزنه**؛ لذا يُزوّد نعل الحذاء الرياضي بوسائد امتصاص تقلّل القوة مع المحافظة على دفع جيد، من خلال **إطالة زمن تأثير القوة**.

الربط مع رؤية 2030: من أهدافها **تعزيز السلامة المرورية**؛ وتطبيق مفاهيم الدفع والزخم في تصميم أنظمة الأمان في السيارات يسهم في الحفاظ على الأرواح.

خلاصة الدرس

الكمية	العلاقة	الوحدة	النوع
الدفع	$F\Delta t$	N·s	متجهة (في اتجاه القوة)
الزخم	$p = mv$	kg·m/s	متجهة (في اتجاه السرعة)
نظرية الدفع – الزخم	$F\Delta t = p_f - p_i$	1 N·s = 1 kg·m/s	الدفع = التغير في الزخم

حفظ الزخم

ملخص الدرس · Conservation of Momentum · صفحات الكتاب 83–74

الدرس 3-2

أهداف الدرس

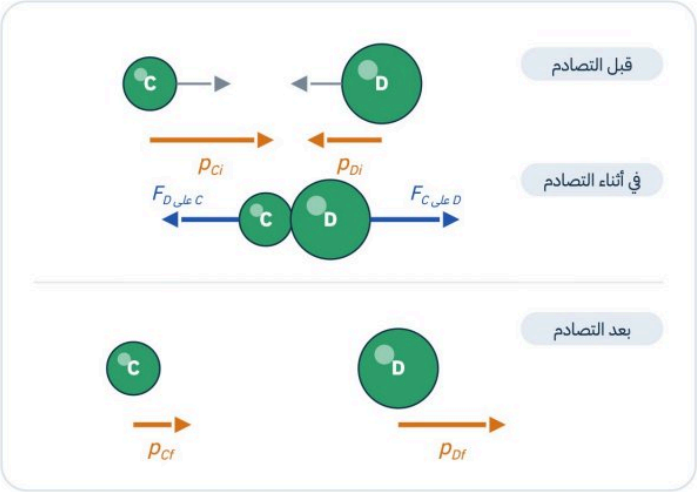
١. أربط بين القانون الثالث لنيوتن وحفظ الزخم.
٢. أتعرّف الظروف اللازمة لحفظ الزخم.
٣. أحلّ مسائل حفظ الزخم.

المفردات

النظام المغلق | النظام المعزول | قانون حفظ الزخم

1 تصادم جسمين

حسب القانون الثالث لنيوتن: عندما يؤثر المضرب في الكرة بقوة تؤثر الكرة فيه بالمقدار نفسه وفي الاتجاه المعاكس. ولأن المضرب واليد والأرض تتفاعل معًا، ندرس نظامًا أبسط: **تصادم كرتين C و D**.



١. القانون الثالث لنيوتن: القوتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا رغم اختلاف حجمي الكرتين وسرعتيهما:

$$F_{D\text{ على }C} = -F_{C\text{ على }D}$$

٢. الدفعان: أثّرت القوتان خلال الفترة الزمنية نفسها، فالدفعان متساويان مقدارًا ومتعاكسان اتجاهًا. ومن نظرية الدفع – الزخم:

$$C: \; p_{Cf} - p_{Ci} = F_{C\text{ على }D}\,\Delta t$$
$$D: \; p_{Df} - p_{Di} = F_{D\text{ على }C}\,\Delta t$$

٣. لأن الدفعين متساويان ومتعاكسان:

$$p_{Cf} - p_{Ci} = -(p_{Df} - p_{Di}) \implies p_{Cf} + p_{Df} = p_{Ci} + p_{Di}$$

مجموع زخم الكرتين **قبل** التصادم يساوي مجموع زخميهما **بعد** التصادم؛ فالزخم الذي تكتسبه D يساوي الزخم الذي تفقده C، وزخم النظام **ثابت (محفوظ)**.

2 الزخم في نظام مغلق ومعزول

الشرط الأول – النظام المغلق: نظام لا يكتسب كتلة ولا يفقدها.

الشرط الثاني – النظام المعزول: نظام مغلق محصلة القوى الخارجية عليه صفر؛ أي القوى المؤثرة فيه **داخلية** فقط.

لا يوجد على سطح الأرض نظام معزول تمامًا بسبب تفاعل النظام مع محيطه، لكن هذه التفاعلات غالبًا صغيرة جدًا فتُهمل عند حل المسائل. ويمكن أن يحتوي النظام على أي عدد من الأجسام، قد يلتحم بعضها ببعض أو تتفكك عند التصادم.

قانون حفظ الزخم

زخم أي نظام مغلق ومعزول لا يتغير

$$p_i = p_f$$

يربط بين ظروف النظام قبل التفاعل وبعده دون الحاجة إلى معرفة تفاصيل التفاعل

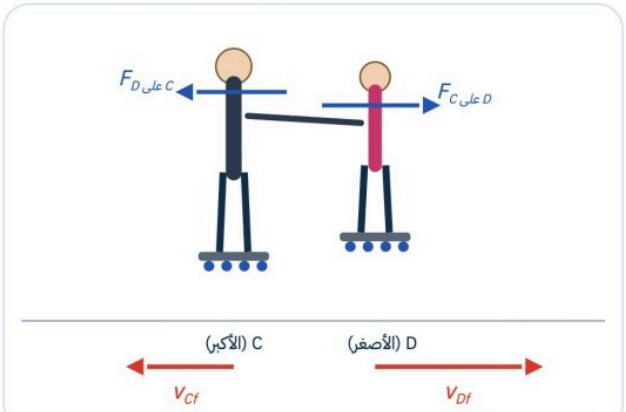
حفظ الزخم

3 الارتداد

يجب تعريف النظام بدقة: كرة البيسبول وحدها **ليست نظامًا معزولًا** لأن قوة المضرب خارجية عليها.

متزلجان ساكنان على سطح ناعم، يدفع C (الأكبر) المتزلج D (الأصغر) فيتحركان في اتجاهين متعاكسين. قوة الدفع **داخلية**، والزخم الكلي قبل الدفع **صفر**:

$$p_{Cf} + p_{Df} = 0 \implies m_D v_{Df} = -m_C v_{Cf}$$



السرعة المتجهة للمتزلج C (الارتداد)

$$v_{Cf} = -\frac{m_D}{m_C} v_{Df}$$

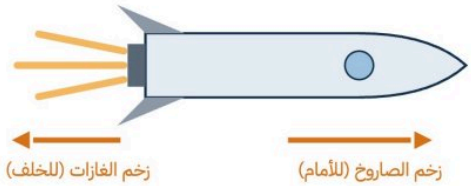
رجوع المتزلج C إلى الخلف مثال على الارتداد

زخما المتزلجين بعد الدفع متساويان مقدارًا ومتعاكسان اتجاهًا، أما السرعتان فتعتمدان على **نسبة الكتلتين**: إذا كانت الكتلتان 68.0 kg و 45.4 kg فنسبة السرعتين 1.50، و**الأقل كتلة أسرع**. ولا يمكن حساب السرعتين دون معرفة مقدار قوة الدفع.

4 الدفع في الفضاء

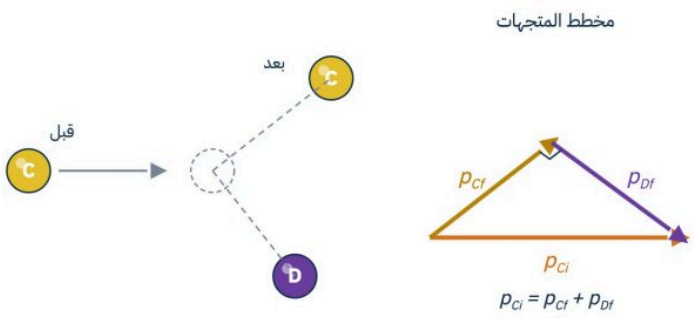
يُزوَّد الصاروخ بالوقود والمادة المؤكسدة، فيحترقان وتخرج غازات حارة من فوهة العادم بسرعة كبيرة. الصاروخ والمواد الكيميائية **نظام مغلق**، والقوى التي تنفث الغازات **داخلية** فالنظام **معزول**؛ لذا تتسارع الأجسام في الفضاء بحفظ الزخم والقانون الثالث لنيوتن.

المحرك الأيوني (المسبار Deep Space 1): تنطلق ذرات الزينون بسرعة 30 km/s مولّدة قوة 0.092 N فقط، لكنه يعمل أيامًا وأسابيع بل أشهرًا، فيكون الدفع كافيًا لزيادة زخم مركبة كتلتها 490 kg.



5 التصادم في بعدين

قانون حفظ الزخم يطبّق على جميع الأنظمة المغلقة المعزولة **بغض النظر عن اتجاهات الحركة**. تصطدم كرة البلياردو C بالكرة D الساكنة؛ زخم النظام قبل التصادم p_{Ci}، وبإهمال الاحتكاك يبقى محفوظًا:



متجهيًا
$p_{Ci} = p_{Cf} + p_{Df}$

المركبات الرأسية (y) مجموعها صفر
$p_{Cf,y} + p_{Df,y} = 0$

المركبات الأفقية (x)
$p_{Ci} = p_{Cf,x} + p_{Df,x}$

المركبتان الرأسيتان بعد التصادم متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا، لذا تختلف إشارتاهما.

الطاقة والشغل

ملخص الدرس · Work and Energy · صفحات الكتاب 97–107

الدرس 4-1

أهداف الدرس

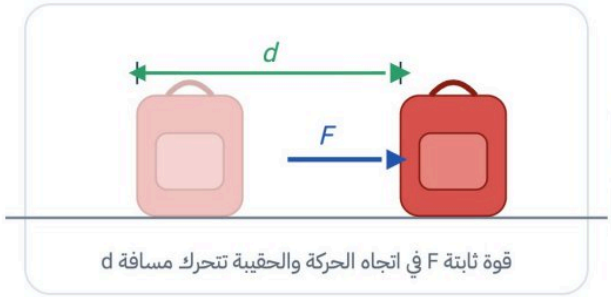
١. أصف العلاقة بين الشغل والطاقة.
٢. أحسب الشغل.
٣. أحسب القدرة المستهلكة.

المفردات

الشغل · الطاقة · الطاقة الحركية · نظرية الشغل – الطاقة · الجول · القدرة · الواط

الزخم محفوظ في التصادمات، لكن عندما تصطدم سيارتان ثم تتوقفان، أو يلتحم متصادمان فتلتوي المعادن ويتهشم الزجاج، لا بد أن **كمية فيزيائية أخرى قد تغيرت** بسبب تأثير القوة؛ فما هي؟ وكيف تتغير؟

1 الشغل والطاقة



قوة ثابتة F في اتجاه الحركة والحقيبة تتحرك مسافة d

جسم يتحرك مسافة d تحت تأثير قوة ثابتة F فيتسارع:

١ معادلة الحركة بتسارع ثابت — $2ad = v_f^2 - v_i^2$

٢ نعوّض $a = F/m$ ونضرب في $m/2$ — $Fd = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$

الشغل

$$W = Fd$$

حاصل ضرب القوة الثابتة المؤثرة في جسم في اتجاه حركته في إزاحة الجسم تحت تأثيرها

الطاقة الحركية

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

نصف كتلة الجسم مضروبًا في مربع سرعته

لكلمة «شغل» معانٍ يومية كثيرة، لكن لها عند الفيزيائيين **معنى محدد**. والطرف الأيسر Fd يصف التغير الذي طرأ على النظام بسبب المحيط الخارجي.

الطاقة: الخاصية المتمثلة في قدرة الجسم على إحداث تغيير في ذاته أو فيما يحيط به؛ فللمركبة الثقيلة وكرة البيسبول السريعة طاقة مرتبطة بحركتهما تُسمّى **الطاقة الحركية**.

2 نظرية الشغل - الطاقة

$$W = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = KE_f - KE_i$$

نظرية الشغل – الطاقة

$$W = \Delta KE$$

الشغل يساوي التغير في الطاقة الحركية؛ فإذا بُذل شغل على جسم تغيرت طاقته

الجول (J): وحدة الطاقة والشغل، نسبة إلى العالم **جيمس بريسكوت جول** (القرن التاسع عشر).

$$1\ J = 1\ kg{\cdot}m^2/s^2 = 1\ N{\cdot}m$$

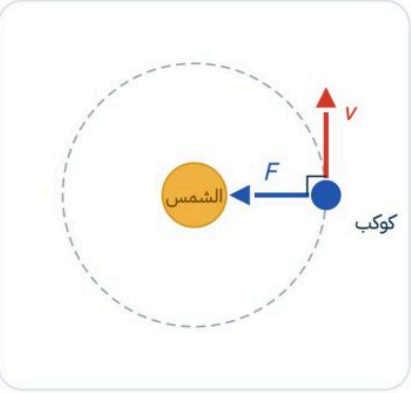
جسم كتلته 2 kg يتحرك بسرعة 1 m/s طاقته 1 J.

الطاقة والشغل

النظام والمحيط: النظام هو الجسم موضع الدراسة، والمحيط الخارجي كل ما عداه؛ وتنتقل الطاقة بينهما في الاتجاهين خلال إنجاز الشغل.

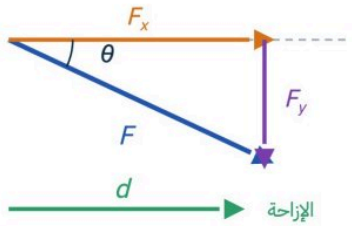
إذا بذل المحيط شغلًا على النظام: W **موجب** وتزداد طاقة النظام. وإذا بذل النظام شغلًا على المحيط: W **سالب** وتتناقص طاقته. والشغل **كمية قياسية**؛ إشارته تدل على كسب الطاقة أو فقدها لا على الاتجاه.

3 حساب الشغل



القوة العمودية على الحركة لا تبذل شغلًا: في المدار الدائري تكون قوة جذب الشمس دائمًا عمودية على اتجاه حركة الكوكب، فلا تغيّر مقدار سرعته بل اتجاهها فقط؛ لذا تبقى طاقته الحركية ثابتة، أي $\Delta KE = 0$ و $W = 0$.

يُبذل جول واحد عندما تؤثر قوة 1 N في جسم فتحرّكه 1 m في اتجاهها؛ فرفع تفاحة وزنها 1 N مسافة 1 m يبذل شغلًا 1 J.



قوة تميل بزاوية على الإزاحة: نحلّل القوة إلى مركبتين؛ المركبة الموازية للإزاحة $F_x = F\cos\theta$ هي التي تبذل الشغل، أما المركبة العمودية F_y فلا تبذل شغلًا.

مثال من الكتاب: شخص يدفع سيارة بقوة 125 N تميل 25.0° أسفل الأفقي: $F_x = -113\ N$ و $F_y = -52.8\ N$.

الشغل في حالة وجود زاوية بين القوة والإزاحة

$$W = Fd\cos\theta$$

حاصل ضرب القوة والإزاحة في جيب تمام الزاوية المحصورة بين القوة واتجاه الإزاحة

القوة في اتجاه الإزاحة	الجاذبية والقوة العمودية	قوة الاحتكاك
$\theta = 0°,\ \cos\theta = 1$	على مركبة تُدفع أفقيًا	(عكس الحركة)
شغل **موجب**	$\theta = 90°,\ \cos\theta = 0$	$\theta = 180°,\ \cos\theta = -1$
	لا تبذلان شغلًا	شغل **سالب** يقلّل الطاقة الحركية

استراتيجية حل مسائل الشغل

١. ارسم مخططًا توضيحيًا ووضّح القوة التي تبذل شغلًا.

٢. ارسم متجهات القوة والإزاحة.

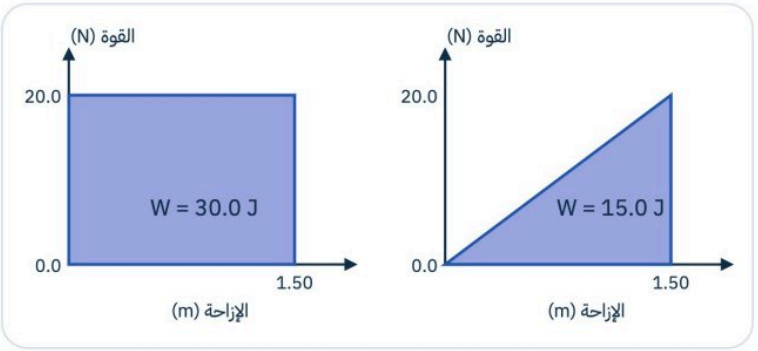
٣. أوجد الزاوية θ بين كل قوة والإزاحة.

٤. احسب شغل كل قوة: $W = Fd\cos\theta$

٥. اجمع الأشغال وتأكد من الإشارة حسب انتقال الطاقة.

الطاقة والشغل

4 إيجاد الشغل عندما تتغير القوى المؤثرة



قوة ثابتة 20.0 N ترفع جسمًا 1.50 m: المساحة (مستطيل) $= W = Fd = 30.0\ J$

قوة نابض تتغير خطيًا من 0.0 إلى 20.0 N خلال 1.50 m: المساحة (مثلث) $= \frac{1}{2}(20.0)(1.50) = 15.0\ J$

الشغل = المساحة تحت منحنى القوة – الإزاحة؛ وتصلح هذه الطريقة عندما تكون القوة متغيرة.

الشغل الذي تبذله عدة قوى: احسب شغل كل قوة ثم اجمع النتائج؛ فالشغل الكلي يساوي التغير في الطاقة الحركية.

5 القدرة

الشغل اللازم لرفع صندوق كتب إلى رف لا يتغير، سواء رُفع كاملًا خلال 2 s أو كتابًا كتابًا خلال 20 min؛ لكن **معدل بذل الشغل** مختلف. ثلاثة طلاب متساوو الكتلة يصعدون السلّم: الذي يصعد مسرعًا وحده يبذل الشغل نفسه في زمن أقل فقدرته أكبر.

القدرة

$$P = \frac{W}{t}$$

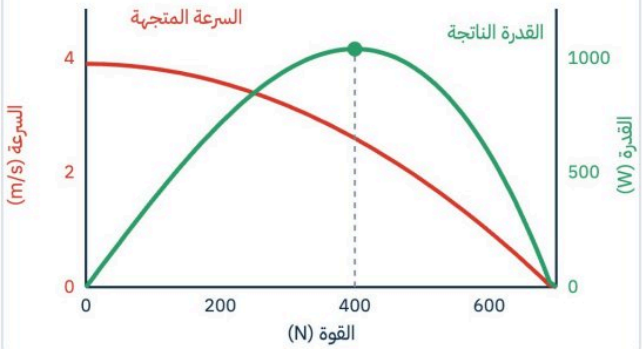
الشغل المبذول مقسومًا على الزمن اللازم لإنجازه، أي معدل تغيّر طاقة النظام

الواط (W): انتقال طاقة 1 J خلال 1 s، أي 1 W = 1 J/s. رفع كأس ماء وزنه 2 N مسافة 0.5 m خلال 1 s قدرته 1 W.
1 kW = 1000 W ، والحصان الميكانيكي = 746 W.

عندما تكون القوة والإزاحة في الاتجاه نفسه: $P = Fd/t$ ، ولأن d/t هي السرعة:

$$P = Fv$$

الدراجة متعددة السرعات: القدرة صفر عندما تكون السرعة صفرًا أو القوة صفرًا، وعضلاتنا تعجز عن قوى كبيرة جدًا وسرعات كبيرة جدًا؛ لذا تعطي القوة والسرعة المعتدلتان أكبر قدرة: نحو 1000 W عند 400 N و2.6 m/s.



تطبيق – سباق جولات الدراجات في فرنسا: يقود المتسابق بسرعة 8.94 m/s أكثر من 6 h يوميًا، وقدرته نحو 1 kW؛ يُستهلك ربعها في تحريك الدراجة ضد مقاومة الهواء والعجلات، وثلاثة أرباعها لتبريد جسمه. وتُصمَّم المحركات كذلك لتلائم القوة والسرعة المطلوبتين، وهذا أساس **الآلات البسيطة**.

الآلات

ملخص الدرس · Machines · صفحات الكتاب 116–109

الدرس 4-2

أهداف الدرس

١. أوضّح فوائد الآلات البسيطة.
٢. أقارن بين كفاءة الآلات المثالية والحقيقية.
٣. أحلّل الآلات المركّبة مبيّنًا الآلات البسيطة التي تكونت منها.
٤. أحسب كفاءة الآلات البسيطة والمركّبة.

المفردات

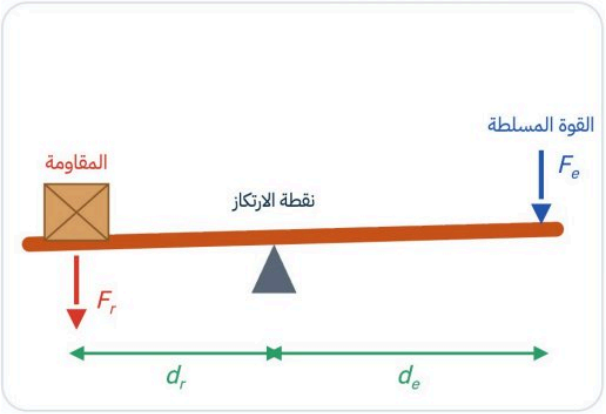
الآلة · القوة المسلّطة · المقاومة · الفائدة الميكانيكية · الفائدة الميكانيكية المثالية · الكفاءة · الآلة المركّبة

من الآلات أدوات بسيطة كفتّاحة الزجاجات ومفك البراغي، ومنها المركّبة كالدراجة الهوائية والسيارة. وسواء أُديرت بالمحركات أو بقوى بشرية فإن **الآلة** تسهّل أداء المهام؛ إذ تخفف الحمل بتغيير **مقدار القوة أو اتجاهها** لتتناسب مع مقدرة الآلة أو الشخص.

1 فوائد الآلات

عند استخدام فتّاحة الزجاجات ترفع طرفها البعيد فتبذل شغلًا عليها، فتبذل هي شغلًا على الغطاء:

الشغل الذي تبذله أنت	الشغل الذي تبذله الأداة
الشغل المبذول W_i	**الشغل الناتج** W_o



الآلة **لا تعدّ مصدر طاقة**؛ فهي تنقل الطاقة فقط، ولا يكتسب الغطاء طاقة أكبر مما خزّنته فيها. لذا **لا يمكن أن يكون الشغل الناتج أكبر من الشغل المبذول.**

القوة المسلّطة F_e : القوة التي يؤثر بها الشخص في الآلة.

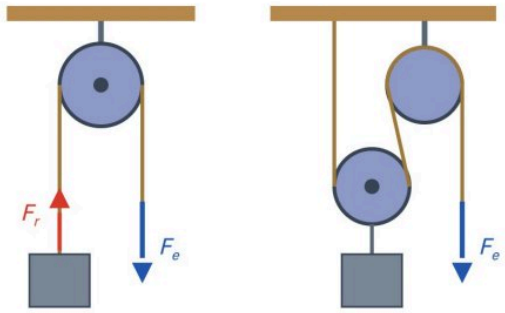
المقاومة F_r : القوة التي تؤثر بها الآلة في الجسم (الغطاء).

الفائدة الميكانيكية

$$MA = \frac{F_r}{F_e}$$

الفائدة الميكانيكية لآلة تساوي ناتج قسمة المقاومة على القوة المسلّطة

2 البكرات والفائدة الميكانيكية المثالية



(a) بكرة ثابتة: MA = 1 (b) نظام بكرة متحركة: MA > 1

البكرة الثابتة: القوتان متساويتان فـ $MA = 1$؛ وهي مفيدة لأنها **تغيّر اتجاه القوة** لا مقدارها.

فتّاحة الزجاجات ونظام البكرات: لهما $MA > 1$؛ فالآلة **تزيد القوة** التي أثّر بها الشخص.

الشغل المبذول $W_i = F_e d_e$ والناتج $W_o = F_r d_r$؛ والآلة تزيد القوة لكنها **لا تزيد الطاقة**.

في **الآلة المثالية** تنتقل الطاقة كلها، فالشغل الناتج يساوي المبذول:

$$W_o = W_i \implies F_r d_r = F_e d_e \implies \frac{F_r}{F_e} = \frac{d_e}{d_r}$$

الفائدة الميكانيكية المثالية

$$IMA = \frac{d_e}{d_r}$$

إزاحة القوة مقسومة على إزاحة المقاومة

لاحظ: نقيس **المسافات** لحساب الفائدة الميكانيكية المثالية IMA، ونقيس **القوى** المؤثرة لإيجاد الفائدة الميكانيكية الفعلية MA.

3 الكفاءة

في الآلات الحقيقية يكون الشغل المبذول **أكبر** من الناتج؛ فإزالة الطاقة من النظام تعني نقصانًا في الشغل الذي تنتجه الآلة، فتكون أقل كفاءة (فاعلية).

الكفاءة (بدلالة الشغل)

$$e = \frac{W_o}{W_i} \times 100$$

الشغل الناتج مقسومًا على الشغل المبذول مضروبًا في 100

الكفاءة (بدلالة الفائدة الميكانيكية)

$$e = \frac{MA}{IMA} \times 100$$

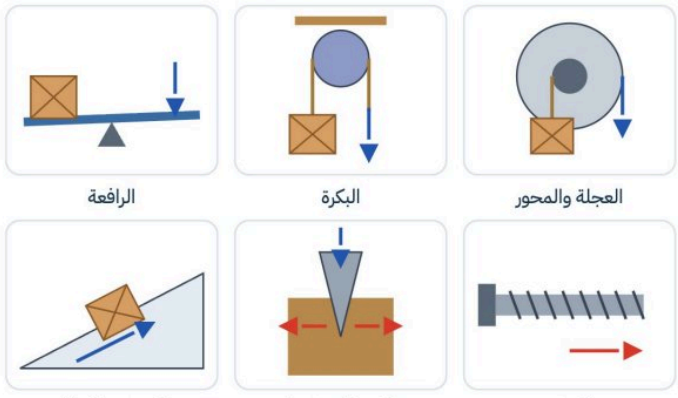
الفائدة الميكانيكية مقسومة على الفائدة الميكانيكية المثالية مضروبة في 100

الآلة المثالية: $W_o = W_i$ فكفاءتها 100%، وجميع الآلات الحقيقية كفاءتها **أقل من 100%**.

الاشتقاق: $W_o/W_i = F_r d_r / F_e d_e$، و $MA = F_r/F_e$، $IMA = d_e/d_r$

التصميم يحدّد IMA؛ والآلة عالية الكفاءة لها MA يساوي IMA تقريبًا، أما متدنية الكفاءة فتحتاج **قوة مسلّطة أكبر** للمقاومة نفسها.

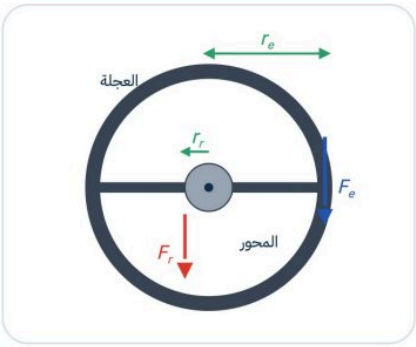
4 الآلات المركّبة



تتركب معظم الآلات من آلة بسيطة واحدة أو أكثر من: **الرافعة، البكرة، العجلة والمحور، المستوى المائل، الوتد (الإسفين)، البرغي**.

في الرافعة والعجلة والمحور تُستبدل نسبة المسافات المقطوعة بنسبة المسافات بين النقاط التي أثّرت عندها القوة والمقاومة ونقطة الارتكاز.

الآلة المركّبة: آلة تتكوّن من آلتين بسيطتين أو أكثر ترتبطان معًا، بحيث تصبح المقاومة لإحداها قوة (مسلّطة) للآلة الأخرى.



عجلة القيادة مثال شائع للعجلة والمحور؛ فائدتها الميكانيكية المثالية هي النسبة بين نصفي قطري العجلة والمحور:

$$IMA = \frac{r_e}{r_r}$$

5 الدراجة الهوائية: آلة مركّبة

الدوّاسة وناقل الحركة الأمامي يعملان عمل العجلة والمحور: القوة المسلّطة هي قوة السائق على الدوّاسة، والمقاومة قوة ناقل الحركة الأمامي في السلسلة. والسلسلة تؤثر بقوة في ناقل الحركة الخلفي، وهو والإطار عجلة ومحور آخر؛ والمقاومة النهائية قوة الإطار على الطريق، وتدفع الأرض الإطار للأمام (القانون الثالث لنيوتن).

الفائدة الميكانيكية للآلة المركّبة

$$MA = MA_1 \times MA_2$$

حاصل ضرب الفوائد الميكانيكية للآلات البسيطة التي تتكوّن منها

الفائدة المثالية للدراجة:

$$IMA = \left(\frac{\text{ذراع الدوّاسة}}{\text{نصف قطر الإطار}}\right)\left(\frac{\text{مسننات الخلفي}}{\text{مسننات الأمامي}}\right)$$

صعود تلة أو تسارع: يختار السائق ناقلًا خلفيًا كبيرًا وأماميًا صغيرًا فيزيد IMA: قوة أكبر على الطريق، لكن عدد دورات الدوّاسة أكبر لكل دورة إطار.

سرعة كبيرة على طريق مستوٍ: ناقل خلفي صغير وأمامي كبير فتقل IMA: قوة أقل، لكن مسافة أكبر لكل دورة. ويعمل ناقل الحركة في **السيارة** بالطريقة نفسها.

الدوّاسة أكثر فاعلية عندما تؤثر القوة **عموديًا** على ذراعها، فيكون العزم أكبر ما يمكن.

6 آلة المشي البشرية

قضيب صلب	مصدر قوة	نقطة ارتكاز	مقاومة
العظام	انقباض العضلات	المفاصل المتحركة	وزن الجزء المراد رفعه

جسم الإنسان مزوّد بآلات بسيطة على هيئة روافع، لكن كفاءة روافعه **ليست عالية** وفوائدها الميكانيكية **منخفضة**؛ وهذا يفسّر حاجة الجسم إلى الطاقة (حرق السعرات) في المشي أو العدو البطيء، مما يساعد على تقليل الوزن.

الأشكال المتعددة للطاقة

ملخص الدرس · The Many Forms of Energy · صفحات الكتاب 131–139

الدرس 5-1

أهداف الدرس

١. أستخدم نموذجًا لربط الشغل بالطاقة.
٢. أحسب الطاقة الحركية.
٣. أحدّد طاقة الوضع الجاذبية لنظام ما.
٤. أبيّن كيفية تخزين طاقة الوضع المرونية.

المفردات

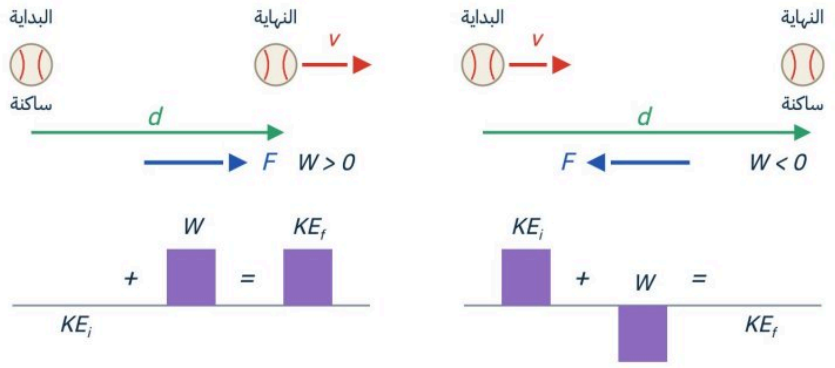
طاقة الحركة الدورانية · طاقة الوضع الجاذبية · مستوى الإسناد · طاقة الوضع المرونية

تُستخدم كلمة «الطاقة» في سياقات يومية مختلفة، لكن العلماء والمهندسين يستخدمونها بصورة أكثر تحديدًا: يسبّب الشغل تغيرًا في طاقة النظام، أي أن **الشغل ينقل الطاقة بين النظام والمحيط الخارجي**. وفي هذا الفصل نتعرف كيف يمتلك الجسم الطاقة بطرائق مختلفة، وكيف تتحول من شكل إلى آخر.

1 نموذج لنظرية الشغل - الطاقة

تشبيه بالمال: تزداد طاقة النظام عندما يُبذل عليه شغل، وتقل عندما يبذل هو شغلًا؛ كما يزداد مالك عندما تستلم راتبك ويقل عندما تنفق منه. ويمكن تمثيل ذلك بالأعمدة.

الأعمدة: العمود الأول ما بدأت به، والثاني ما أُضيف أو أُخذ (التدفق المالي: موجب إذا دُفع لك، سالب إذا أنفقت)، والثالث المجموع الكلي. الطاقة تشبه عملية صرف المال: الشغل إما يضيف إلى طاقة النظام أو يأخذ منها.



(a) قذف الكرة (b) التقاط الكرة

(a) قذف الكرة: قوة ثابتة F تحرك الكرة الساكنة مسافة d في اتجاهها، فيُبذل شغل **موجب** $W = Fd$ وتكتسب الكرة طاقة حركية تساوي هذا الشغل.

(b) التقاط الكرة: قوة يدك تعاكس اتجاه حركتها فتبذل عليها شغلًا **سالبًا** يجعلها تتوقف؛ فطاقتها الحركية النهائية صفر.

$$KE_i + W = KE_f$$

الطاقة الحركية موجبة دائمًا؛ وفي جميع الحالات تكون الطاقة الحركية النهائية مجموع الطاقة الحركية الابتدائية والشغل المبذول.

الأشكال المتعددة للطاقة

2 الطاقة الحركية

الطاقة الحركية الخطية

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

تتناسب طرديًا مع الكتلة ومع مربع السرعة

كرة حديدية كتلتها 7.26 kg لها طاقة حركية أكبر من كرة بيسبول 0.148 kg لها السرعة نفسها.

سيارة سرعتها 20 m/s طاقتها **أربعة أمثال** طاقة سيارة مماثلة سرعتها 10 m/s.

طاقة الحركة الدورانية: البلبل الذي يدور حول مركز كتلته لا يتنقل، لكنك بذلت عليه شغلًا فله طاقة. تعتمد على **السرعة الزاوية** ω وعلى توزيع الكتلة، لا على الكتلة فقط.

الغطّاس: يدفع لوح الغطس بقدميه إلى أسفل فيبذل اللوح شغلًا عليه، فتتولد طاقة حركية **خطية** (حركة مركز كتلته) و**دورانية** (دورانه حول مركز كتلته)، وعند دخوله الماء بقامة مفرودة تظهر طاقته على شكل طاقة حركية خطية.

3 الطاقة المختزنة

صخور رُفعت إلى أعلى تلّ بعمليات جيولوجية اختزنت طاقة؛ وعند حدوث الانزلاقات تتحول هذه الطاقة إلى طاقة حركية. وتختزن الطاقة في **النابض المشدود** وفي الصخور، والسيارة تختزن الطاقة في صورة **كيميائية** في خزان البنزين؛ وعمومًا تتحول الطاقة من شكل إلى آخر لتكون مفيدة أو لتسبّب حركة الأشياء.

تشبيه بالأوراق النقدية: عشرة ريالات قد تكون ورقة من فئة 10، أو ورقتين من فئة 5، أو عشر ورقات من فئة ريال؛ القيمة الكلية لا تتغير رغم اختلاف الأشكال، وكذلك **الطاقة الكلية** لنظام قد تأخذ أشكالًا مختلفة.

4 طاقة الوضع الجاذبية

الصعود: قوة الجاذبية F_g إلى أسفل والإزاحة h إلى أعلى، فتبذل الجاذبية شغلًا **سالبًا**: $W_g = -mgh$ يبطئ الكرة حتى تتوقف.

الهبوط: القوة والإزاحة في الاتجاه نفسه فيكون الشغل **موجبًا**: $W_g = mgh$ تستعيد به الكرة طاقتها الحركية.

لنظام من جسم والأرض تبذل قوة التجاذب بينهما شغلًا؛ فإذا ابتعد الجسم عن الأرض اختُزنت الطاقة في النظام بسبب قوة الجاذبية، وتُسمّى **طاقة الوضع الجاذبية** PE. ويُحدَّد الارتفاع من **مستوى الإسناد**: المستوى الذي تكون عنده $PE = 0$.

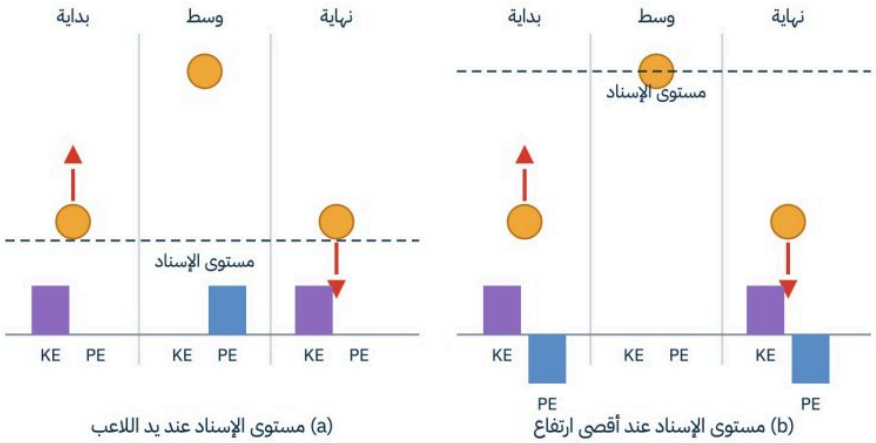
طاقة الوضع الجاذبية

$$PE = mgh$$

كتلة الجسم × تسارع الجاذبية الأرضية × ارتفاعه الرأسي عن مستوى الإسناد، وتقاس بالجول

5 طاقة الحركة وطاقة الوضع لنظام

نظام من الكرة والأرض: عند القذف تكون الطاقة حركية، وفي أثناء الصعود تتحول تدريجيًا إلى طاقة وضع حتى تصبح السرعة صفرًا عند أقصى ارتفاع، ثم تتحول في أثناء السقوط إلى طاقة حركية. ويبقى **مجموع** الطاقتين **ثابتًا** لأنه لم يُبذل شغل على النظام من قوة خارجية.



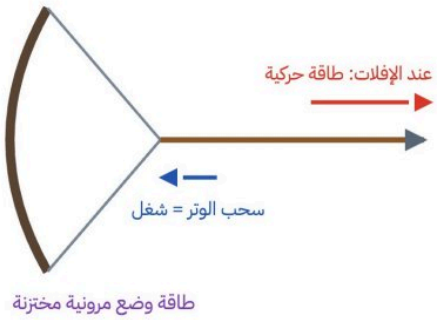
(a) الإسناد عند يد اللاعب: $h = 0\ m$ و $PE = 0\ J$ عند القذف والالتقاط.

(b) الإسناد عند أقصى ارتفاع: $PE = 0$ عند أعلى نقطة، فتكون طاقة الوضع **سالبة** عند يد اللاعب.

يمكن اختيار **مستوى الإسناد** بشكل عشوائي؛ فالمجموع الكلي يختلف باختلافه، لكنه يبقى ثابتًا خلال الحركة، و**التغيرات** في الطاقة هي وحدها التي تحدد حركة النظام.

6 طاقة الوضع المرونية

عند سحب وتر القوس يُبذل شغل فتزداد طاقة نظام القوس والسهم والأرض. الطاقة المختزنة في الوتر المشدود تُسمّى **طاقة الوضع المرونية**، وتُختزن عادة في كرات المطاط، والأربطة المطاطية، والمقاليع، ومنصات القفز. وعند إفلات الوتر تتحول إلى **طاقة حركية** للسهم.



القفز بالزانة: تنثني الزانة فيتحول جزء من طاقة اللاعب الحركية إلى طاقة وضع مرونية، وعند استقامتها تتحول إلى طاقة وضع جاذبية وطاقة حركية فيرتفع إلى نحو 6 m. والزانات الحديثة من الألياف الزجاجية أكثر مرونة من الخيزران أو المعدن، فرفعت الأرقام القياسية.

7 الكتلة شكل من أشكال الطاقة

الطاقة السكونية (أينشتاين)

$$E_0 = mc^2$$

الطاقة السكونية لجسم = كتلته × مربع سرعة الضوء

ضغط نابض أو ثني زانة يُكسبها كتلة، لكن التغير صغير جدًا يصعب الكشف عنه. أما في قوى نواة الذرة (القوى النووية) فإن الطاقة المتحررة نتيجة تغيرات الكتلة تظهر بأشكال أخرى كالطاقة الحركية، وتكون **كبيرة جدًا**.

تطبيق — طاقة وضع الذرة: رفع ذرة كربون كتلتها 2×10^{-26} kg مسافة 1 m يعطيها طاقة وضع جاذبية 2×10^{-25} J، بينما طاقة الوضع الكهروسكونية للإلكترون 10^{-19} J تقريبًا، والطاقة النووية أكبر من 10^{-12} J؛ أي أكبر مليون مرة على الأقل من طاقة الوضع الجاذبية.

حفظ الطاقة

ملخص الدرس · Conservation of Energy · صفحات الكتاب 150–141

الدرس 5-2

أهداف الدرس

١. أحلّ مسائل باستخدام قانون حفظ الطاقة.

٢. أحلّل التصادمات لإيجاد التغير في الطاقة الحركية.

المفردات

قانون حفظ الطاقة · الطاقة الميكانيكية · التصادم فوق المرن · التصادم المرن · التصادم عديم المرونة

1 حفظ الطاقة

عندما تتحرك كرة قريبًا من سطح الأرض يكون المجموع الكلي لطاقة الوضع الجاذبية والطاقة الحركية في النظام ثابتًا. وقد لا يبدو ذلك واضحًا في حياتنا اليومية: فالقرص المطاطي في لعبة الهوكي يفقد طاقته الحركية ويتوقف، والبندول يتوقف بعد فترة؛ لكن، كما في نموذج المال، إذا نقص مالك فلا بد أنه ذهب إلى مكان ما.

قانون حفظ الطاقة: في النظام المعزول المغلق لا تفنى الطاقة ولا تُستحدث إلا بقدرة الله تعالى، أي تبقى الطاقة محفوظة تحت هذه الشروط، وتتحول من شكل إلى آخر بحيث يبقى المجموع الكلي للطاقة في النظام ثابتًا.

الطاقة الميكانيكية لنظام

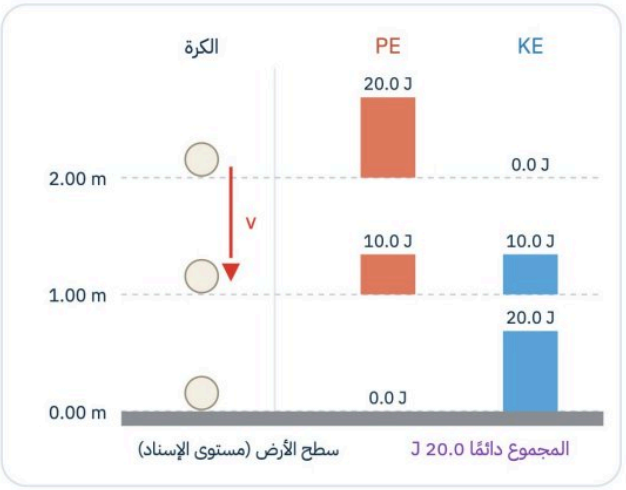
$$E = KE + PE$$

مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع الجاذبية إذا لم يكن هناك أنواع أخرى من الطاقة

حفظ الطاقة الميكانيكية

$$KE_{\text{قبل}} + PE_{\text{قبل}} = KE_{\text{بعد}} + PE_{\text{بعد}}$$

مجموع الطاقتين قبل وقوع الحدث يساوي مجموعهما بعده



كرة وزنها 10.0 N على ارتفاع 2.00 m (مستوى الإسناد سطح الأرض) لا تتحرك:

$$PE = mgh = (10.0\ N)(2.00\ m) = 20.0\ J$$

عند 1.00 m: $PE = 10.0\ J$ ، ولأن النظام مغلق ومعزول يبقى $E = 20.0\ J$:

$$KE = E - PE = 20.0\ J - 10.0\ J = 10.0\ J$$

عند سطح الأرض: $PE = 0$ و $KE = 20.0\ J$. النقص في طاقة الوضع يساوي الزيادة في الطاقة الحركية.

حفظ الطاقة

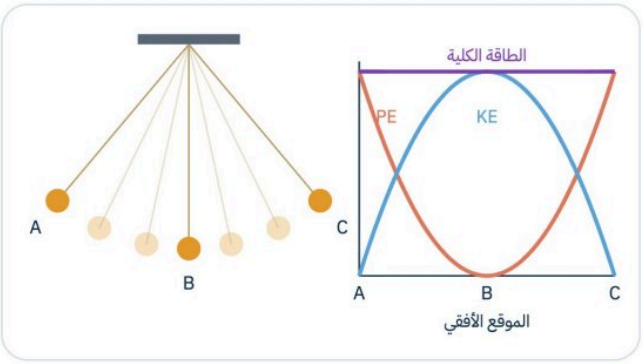
2 تطبيقات على حفظ الطاقة الميكانيكية

السطح المائل: إذا تدحرجت الكرة على سطح مائل مهمل الاحتكاك بدل أن تسقط رأسيًا، يبقى النظام مغلقًا ومعزولًا؛ فتفقد طاقة وضع 20.0 J وتكتسب طاقة حركية 20.0 J، **لا يتأثر بالمسار** الذي تسلكه.

عربة التزلج (الأفعوانية): العربة الساكنة في أعلى منحدر: طاقتها الميكانيكية كلها طاقة وضع؛ ولا تستطيع صعود منحدر أعلى من الأول لأن الطاقة اللازمة أكبر من الطاقة الميكانيكية للنظام.

التزلج: عند الهبوط على منحدر تتحول طاقة الوضع الجاذبية إلى طاقة حركية فتزداد السرعة؛ وفي القفز عن المنحدر يحدّد ارتفاع القفزة مقدار الطاقة الحركية عند بدء الهبوط.

البندول: الإسناد عند أدنى نقطة. سحبه إلى أحد الجانبين يبذل شغلًا يكسبه طاقة ميكانيكية على شكل طاقة وضع، وعند إفلاته تتحول إلى طاقة حركية عند أدنى نقطة.



عند أدنى نقطة (B) طاقة الوضع **صفر** والطاقة الحركية تساوي الطاقة الميكانيكية الكلية؛ وعند الطرفين (A و C) العكس.

الطاقة الميكانيكية الكلية تبقى **ثابتة** في أي موقع، على افتراض أن الاحتكاك معدوم.

3 فقدان الطاقة الميكانيكية

البندول يتوقف في النهاية، والكرة المرتدة لا تعود إلى ارتفاعها، وعربة التزلج تبطئ؛ لأن الأجسام تتعرض لقوة **مقاومة الهواء**، وعربة الملاهي لقوة **الاحتكاك** بين عجلاتها والسكة. وعند ارتداد الكرة يتحول جزء من الطاقة إلى **طاقة حرارية وصوتية**. فتتحول بعض الطاقة الميكانيكية الابتدائية إلى أشكال أخرى داخل النظام أو خارجه، وترفع عادةً درجة حرارة الجسم (الطاقة الحرارية في الفصل 6).

استراتيجية حل مسائل حفظ الطاقة

١. حدّد النظام بدقة وتأكد أنه مغلق.

٢. عيّن أشكال الطاقة في النظام.

٣. حدّد الوضعين الابتدائي والنهائي.

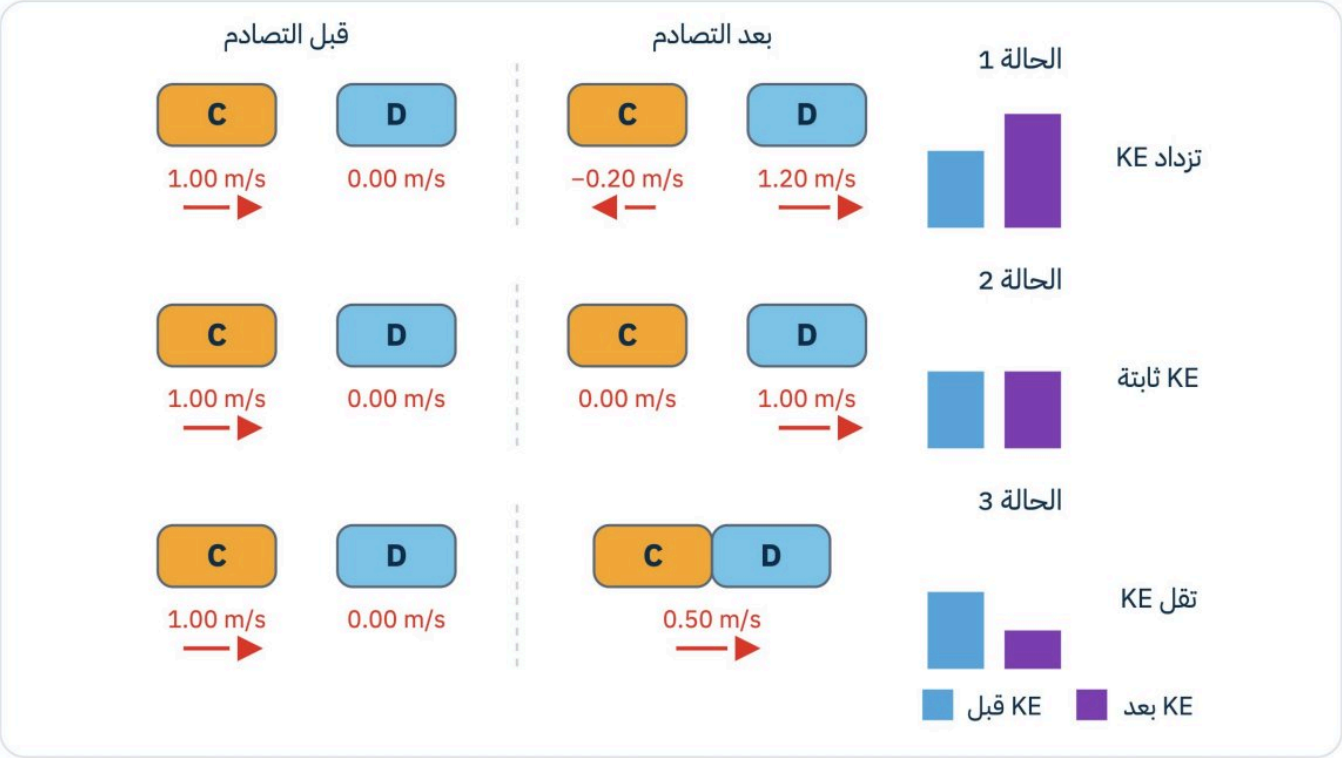
٤. هل النظام معزول؟ لا قوة خارجية: $E_{\text{بعد}} = E_{\text{قبل}}$ ، وإلا: $E_{\text{بعد}} = E_{\text{قبل}} + W$

٥. إذا حُفظت الطاقة حدّد مستوى الإسناد ومثّل الطاقة الابتدائية والنهائية بالأعمدة.

حفظ الطاقة

4 تحليل التصادمات

تفاصيل التصادم معقدة، لذا ندرس حركة الأجسام **قبل التصادم وبعده مباشرة**. إذا كان النظام معزولًا فالزخم والطاقة الكلية محفوظان، لكن الطاقة الحركية قد تزيد أو تقل أو تبقى ثابتة؛ فكيف نقرر؟



الزخم في الحالات الثلاث محفوظ ويساوي $1.00\ kg·m/s$، مثلًا في الحالة 1:

$$p_i = (1.00)(1.00) + (1.00)(0.00) = 1.00\ kg·m/s \quad , \quad p_f = (1.00)(-0.20) + (1.00)(1.20) = 1.00\ kg·m/s$$

الحالة 1 — تصادم فوق مرن (انفجاري): KE تزداد من 0.50 J إلى 0.74 J؛ ربما انفلت نابض مضغوط زوّد النظام بطاقة حركية.

الحالة 2 — تصادم مرن: KE لا تتغير (0.50 J). يحدث تقريبًا بين الأجسام الصلبة كالفولاذ والزجاج والبلاستيك الصلب.

الحالة 3 — تصادم عديم المرونة: KE تقل إلى 0.25 J، فيتحول جزء منها إلى طاقة حرارية؛ ومثاله الطين والمواد الناعمة.

5 الزخم والطاقة: الفرق بينهما

الزخم غالبًا ما يكون **محفوظًا في أي تصادم**، أما الطاقة الحركية فتكون محفوظة فقط في **التصادمات المرنة**.

جسم 10.0 kg بسرعة 5.00 m/s له الزخم نفسه لجسم 20.0 kg بسرعة 2.50 m/s، لكن طاقة الأول 125 J والثاني 62.5 J؛ فإيقاف الأول يتطلب شغلًا أكبر. في تصادم السيارات **الزخم** يوقفها، أما **الطاقة** فتسبّب الضرر.

عربتان بينهما نابض مضغوط: الزخم الكلي صفر، وعند إفلات النابض تتحول طاقة الوضع فيه إلى طاقة حركية للعربتين، ويبقى مجموع الزخم صفرًا.

مثالان بسيطان: كرة بلياردو تصطدم مرنًا بكرة ساكنة مماثلة فتتوقف الأولى وتتحرك الثانية بالسرعة نفسها. ومتزلجان متساويان يلتحمان بعد التصادم يتحركان بسرعة $\frac{1}{2}v$، وطاقتهما الحركية النهائية **نصف** الابتدائية: تصادم عديم المرونة.

درجة الحرارة والطاقة الحرارية

الدرس 6-1

ملخص الدرس · Temperature and Thermal Energy · صفحات الكتاب 165–177

أهداف الدرس

١. أصف الطاقة الحرارية وأقارنها بطاقة الوضع والطاقة الحركية.
٢. أميّز بين درجة الحرارة والطاقة الحرارية.
٣. أتعرّف الحرارة النوعية.
٤. أحسب الحرارة المنقولة.

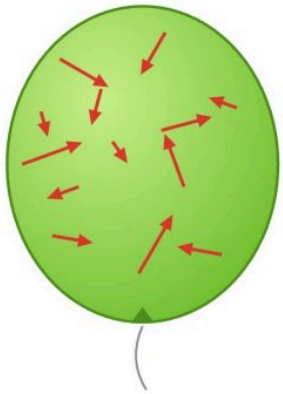
المفردات

الطاقة الحرارية · التوصيل الحراري · الاتزان الحراري · الحرارة · الحمل الحراري · الإشعاع الحراري · الحرارة النوعية

1 الطاقة الحرارية

تسمى دراسة تحولات الحرارة إلى أشكال أخرى من الطاقة **بالديناميكا الحرارية**، وقد بدأت في القرن الثامن عشر مع صناعة المحركات البخارية، ويستخدم المهندسون قوانينها اليوم في تطوير الثلاجات ومحركات المركبات والطائرات. لجزيئات الغاز طاقات حركية خطية ودورانية، ولها طاقة وضع خلال اهتزازها وترابطها، وتتصادم باستمرار فتتبادل الطاقة؛ لذا نتحدث عن الطاقة الكلية ومتوسط طاقة الجزيء.

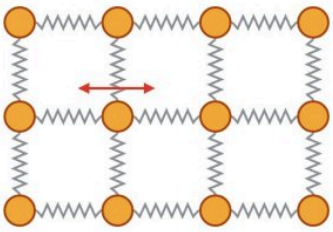
الطاقة الحرارية: الطاقة الكلية لجزيئات الجسم (الحركية + الوضع). ويرتبط **متوسط** طاقة الجزيء بدرجة حرارة الجسم.



بالون هيليوم

الأجسام الساخنة: تصطدم ذرات الهيليوم بجدار البالون المطاطي باستمرار فتدفعه للخارج. عند تعريض البالون للشمس تتحرك الذرات أسرع وتصطدم بالجدار بمعدل أكبر وبقوة أكبر **فيتمدد**، وإذا برد **ينكمش** قليلًا لأن تصادماتها لا تنقل زخمًا كافيًا، رغم أن عدد الذرات ثابت.

المواد الصلبة: ذراتها لا تتحرك بحرية، بل نتصوّرها مربوطة بنوابض تهتز للأمام والخلف، فلكل ذرة طاقة حركية وطاقة وضع. فإذا احتوت المادة على N ذرة، فإن طاقتها الحرارية = متوسط (الحركية + الوضع) لكل ذرة × N.



ذرات مربوطة بنوابض تهتز للأمام والخلف

2 الطاقة الحرارية ودرجة الحرارة

للجسم الساخن طاقة حرارية أكبر من جسم بارد مماثل له؛ أي أن متوسط طاقة جزيئاته أكبر. ولا يعني ذلك أن لكل جزيئاته الطاقة نفسها، فلها مدى واسع من القيم؛ كما أن متوسط طول طلاب الصف الثالث الثانوي أكبر من متوسط طول طلاب الصف الثاني المتوسط، مع أن بعض طلاب الثاني المتوسط أطول من بعض طلاب الثالث الثانوي.

درجة الحرارة: تعتمد على **متوسط الطاقة الحركية** للجزيئات في الجسم فقط، ولا تعتمد على عدد الذرات فيه.

قالبان من الحديد بدرجة الحرارة نفسها: كتلة الأول 1 kg والثاني 2 kg: متوسط الطاقة الحركية لجزيئاتهما واحد، لكن الطاقة الحركية الكلية للثاني **ضعف** الأول. فالطاقة الحرارية تتناسب مع عدد الجزيئات، ودرجة الحرارة لا تعتمد عليه.

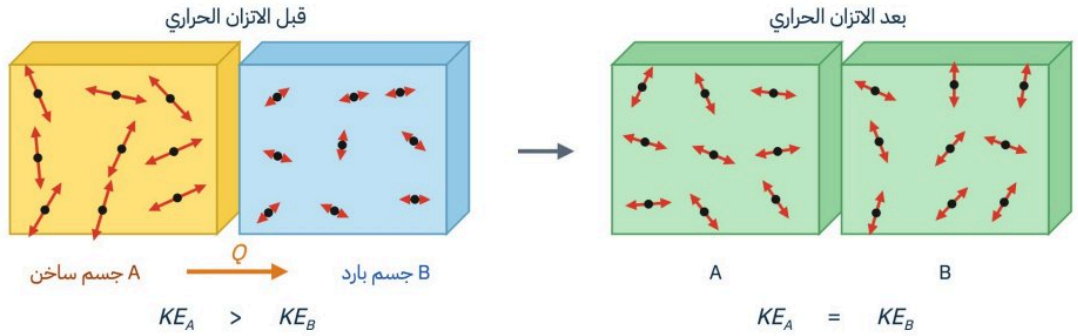
درجة الحرارة والطاقة الحرارية

3 الاتزان والقياس الحراري

عند قياس درجة حرارة جسمك تضع المقياس في فمك وتنتظر دقيقتين إلى ثلاث؛ فالقياس يتضمن تصادمات وانتقالات للطاقة بين المقياس وجسمك. جزيئات جلدك الأسخن تتحرك أسرع وتصطدم بجزيئات الزجاج الأبطأ فتنتقل الطاقة إلى الزجاج.

التوصيل الحراري: انتقال الطاقة الحركية عندما تتصادم الجزيئات؛ فتزداد الطاقة الحرارية لجزيئات المقياس وتتناقص في الجلد.

الاتزان الحراري: الحالة التي يصبح عندها معدل تدفق الطاقة بين جسمين متساويًا، ويكون للجسمين درجة الحرارة نفسها.



قبل الاتزان تنتقل الطاقة من الجسم الساخن إلى البارد، وعند الاتزان يتساوى انتقال الطاقة بين الجسمين.

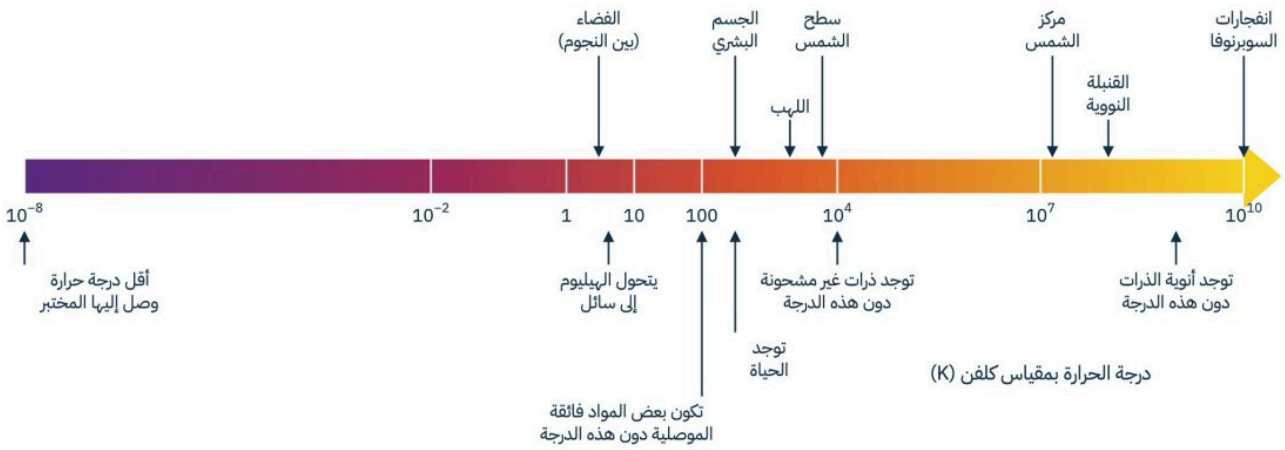
المقياس المنزلي: يعتمد على خاصية تتغير بتغير درجة الحرارة كالحجم؛ فالكحول الملون يتمدد ويرتفع في أنبوب ضيق.

المقياس السائل – البلوري: تترتب بلورات الجزيئات عند درجة حرارة محددة فيتغير لون البلورة، فيشير اللون إلى درجة الحرارة.

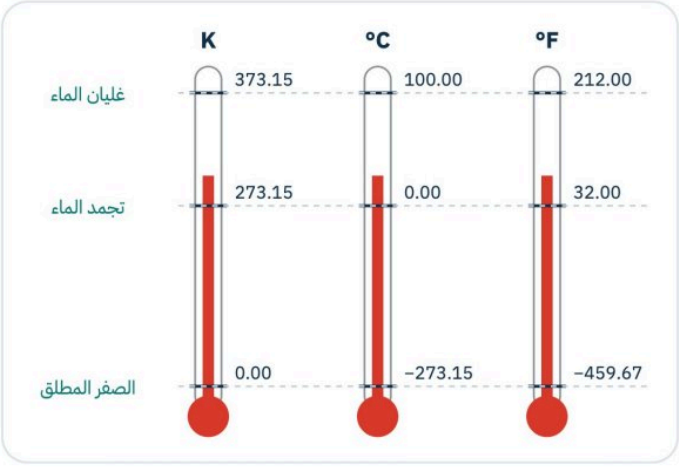
المقاييس الطبية ومقاييس المحركات: تستخدم دوائر إلكترونية حساسة للحرارة فتقيس درجات الحرارة بسرعة.

4 مقياسا درجة الحرارة: السلسيوس والكلفن

ابتكر العالم السويدي **أندريه سلسيوس** عام 1741 م مقياسًا يعتمد على خصائص الماء: نقطة تجمد الماء النقي 0 °C ونقطة غليانه عند مستوى سطح البحر 100 °C. ويوجد مدى واسع جدًا لدرجات الحرارة في الكون؛ أعلاها نظريًا **درجة حرارة بلانك**، أما أدناها فهو **الصفر المطلق**.



درجة الحرارة والطاقة الحرارية



عند تبريد الهيليوم في بالون إلى 273.15 °C− يصبح حجمه مساويًا لحجم ذراته فقط، وتفقد الذرات طاقتها الحرارية كاملة؛ فلا توجد درجة حرارة أقل منها، وتعرف **بالصفر المطلق**.

مقياس كلفن: صفره هو الصفر المطلق؛ يتجمد الماء عند 273 K تقريبًا ويغلي عند 373 K، والتدريج الواحد فيه يساوي تدريجًا واحدًا بمقياس سلسيوس.

$$T_C + 273 = T_K$$

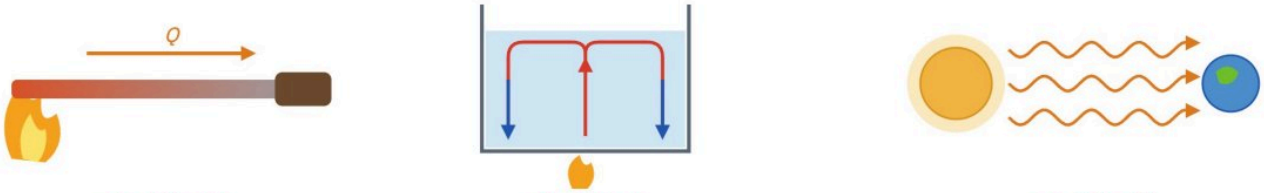
مقياس سلسيوس غير عملي في المسائل العلمية لأنه يحتوي قيمًا سالبة توحي بطاقة حركية سالبة، بينما الطاقة الحركية دائمًا موجبة. ويصبح الهيليوم سائلًا عند 4.2 K أو 269 °C−.

5 الحرارة وتدفق الطاقة الحرارية

الحرارة: الطاقة التي تنتقل بين جسمين متلامسين، وتتدفق دائمًا من الجسم **الأسخن إلى الأبرد**، ولا تنتقل تلقائيًا أبدًا من الأبرد إلى الأسخن. ويرمز لها بـ Q ووحدتها الجول.

$Q > 0$: الجسم **امتص** الحرارة

$Q < 0$: الحرارة **تنبعث** من الجسم



الإشعاع الحراري
موجات كهرومغناطيسية لا تحتاج إلى وسط

الحمل الحراري
حركة المائع الساخن لأعلى والبارد لأسفل

التوصيل الحراري
تلامس مباشر بين الجزيئات

التوصيل: ضع طرف قضيب معدني في لهب؛ تتصادم جزيئات الغاز الحار بالقضيب فتصل الحرارة إليه، ثم يصبح طرفه الآخر دافئًا لأن جزيئاته متلامسة.

الحمل: حركة المائع (سائل أو غاز) بسبب اختلاف درجة الحرارة؛ فالماء الساخن في قاع الدورق يصعد والبارد ينزل. ويسبب الاضطراب الجوي والعواصف الرعدية وتيارات المحيطات.

الإشعاع: انتقال الطاقة بالموجات الكهرومغناطيسية دون الحاجة إلى مادة؛ فالشمس تسخّن الأرض عبر الفضاء من بُعد 150 مليون كيلومتر.

الربط مع الأحياء: تنقسم الحيوانات إلى مجموعتين: معظمها متغيرة درجة الحرارة تتغير درجات حرارة أجسامها تبعًا للبيئة المحيطة، ومنها السحلية التي تنظّم حرارة جسمها بالاختباء تحت صخرة أو التعرض للشمس، وبقية الحيوانات ثابتة درجة الحرارة تتحكم في درجات حرارة أجسامها داخليًا، كالإنسان بدرجة 37 °C تقريبًا؛ وقد تلجأ بعضها إلى البيات الشتوي لخفض درجة حرارة أجسامها.

تطبيق الفيزياء — التدفئة بالبخار: في نظام التدفئة بالبخار لمبنى ما يُحوَّل الماء إلى بخار في مرجل أسفل البناء، ثم يتدفق البخار داخل أنابيب معزولة ليصل إلى كل غرفة، فيتكثف داخل مشعاع حراري على شكل ماء ويعود عبر الأنابيب إلى المرجل ليُعاد تبخيره. يحمل البخار الحرارة من المرجل، وتتحرر تلك الطاقة عندما يتكثف داخل المشعاع؛ ومن سلبياته أنه يتطلب مراجل وأنابيب مرتفعة التكلفة لتتحمل البخار المضغوط.

درجة الحرارة والطاقة الحرارية

6 الحرارة النوعية

في يوم صيفي مشمس تسخّن الشمس ماء البحر والرمل بالمقدار نفسه، لكن الرمل يصبح أكثر سخونة؛ فالأجسام تختلف في اكتسابها للحرارة، ومقدار الزيادة في درجة الحرارة يعتمد على كتلة الجسم ونوع مادته.

الحرارة النوعية C: كمية الطاقة التي يجب أن تكتسبها وحدة الكتل من المادة لترتفع درجة حرارتها درجة سلسيوس (أو كلفن) واحدة، ووحدتها J/kg·K. فمثلًا يلزم 897 J لرفع درجة حرارة 1 kg من الألومنيوم 1 K.

كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة

$$Q = mC\Delta T = mC(T_f - T_i)$$

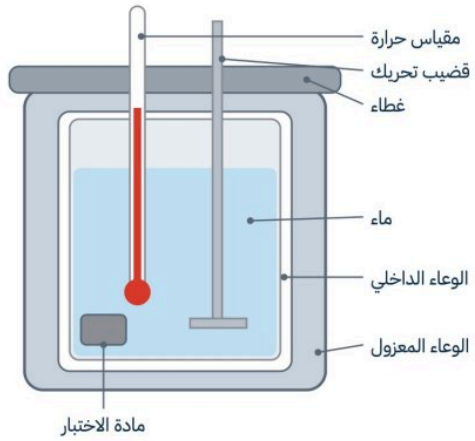
تساوي كتلة الجسم × حرارته النوعية × الفرق بين درجتي حرارته النهائية والابتدائية

للماء حرارة نوعية مرتفعة مقارنة بالمواد الأخرى. ولأن التدريج الواحد في كلفن يساوي تدريجًا واحدًا في سلسيوس، يمكن حساب ΔT بأيٍّ منهما.

الجدول 6-1: الحرارة النوعية للمواد الشائعة

المادة	C (J/kg·K)	المادة	C (J/kg·K)
الألومنيوم	897	الرصاص	130
النحاس الأصفر	376	الميثانول	2450
الكربون	710	الفضة	235
النحاس	385	بخار الماء	2020
الزجاج	840	**الماء**	**4180**
الجليد	2060	الخارصين	388
الحديد	450		

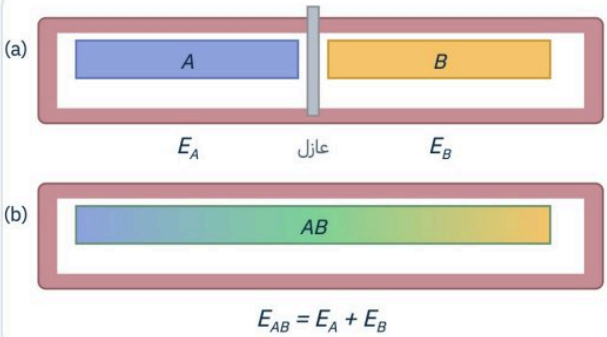
7 المسعر: قياس الحرارة النوعية



المسعر أداة لقياس التغير في الطاقة الحرارية، معزول تمامًا ليكون انتقال الطاقة إلى المحيط أقل ما يمكن. توضع فيه كتلة مقيسة من مادة ساخنة مع كتلة معروفة من الماء البارد، فتنتقل الحرارة المفقودة من المادة إلى الماء، ويُحسب التغير في طاقة المادة من الزيادة في درجة حرارة الماء.

يعتمد على مبدأ **حفظ الطاقة** في النظام المغلق والمعزول: إذا ازدادت طاقة جزء نقصت طاقة جزء آخر بالمقدار نفسه.

حفظ الطاقة ثابت $= E_A + E_B$



عند تلامس القالبين تتدفق الحرارة من الأسخن إلى الأبرد حتى الاتزان الحراري:

$$\Delta E_A + \Delta E_B = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta E_A = -\Delta E_B$$

$$\Delta E = Q = mC\Delta T \quad , \quad \Delta T = T_f - T_i$$

$$m_A C_A \Delta T_A + m_B C_B \Delta T_B = 0$$

بفك الأقواس والحل بالنسبة لـ T_f نحصل على درجة الحرارة النهائية للقالبين

$$T_f = \frac{m_A C_A T_A + m_B C_B T_B}{m_A C_A + m_B C_B}$$

تغيرات حالة المادة وقوانين الديناميكا الحرارية

الدرس 6-2

ملخص الدرس · Changes of State & the Laws of Thermodynamics · صفحات الكتاب 178–189

أهداف الدرس

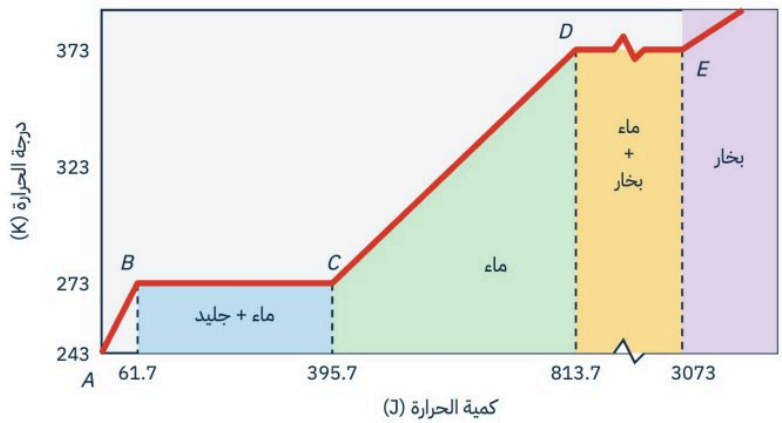
١. أتعرّف الحرارة الكامنة للانصهار.
٢. أتعرّف الحرارة الكامنة للتبخر.
٣. أتعرّف القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية.
٤. أميّز بين الحرارة والشغل.
٥. أتعرّف الإنتروبي.

المفردات

الحرارة الكامنة للانصهار · الحرارة الكامنة للتبخر · القانون الأول في الديناميكا الحرارية · المحرك الحراري · الإنتروبي · القانون الثاني في الديناميكا الحرارية

1 تغير حالة المادة

استخدم صانعو المحرك البخاري في القرن الثامن عشر الحرارة لتحويل الماء إلى بخار يدفع المكبس، ثم يبرد البخار ويتكثف سائلًا. فإمداد الماء بالطاقة الحرارية لا يغيّر درجة حرارته فقط، بل يغيّر **بنيته التركيبية** أيضًا دون تغيير بنيته الجزيئية. والحالات الثلاث الأكثر شيوعًا للمادة: **الصلبة والسائلة والغازية**؛ فتتحول الصلبة إلى سائلة عند رفع درجة حرارتها، وتصبح غازًا عند درجات حرارة أعلى.



الشكل 6-10: تغيرات حالة 1 g من الماء من جليد عند 243 K إلى بخار فوق 373 K

من A إلى B: يسخن الجليد حتى 273 K، وتكتسب الجزيئات طاقة تجعلها تتحرك بسرعة كافية للتغلب على القوى التي تثبتها، فتبقى متلامسة لكن بحرية حركة أكبر.

درجة الانصهار (من B إلى C): الدرجة التي تتغير عندها المادة من الحالة الصلبة إلى السائلة. تعمل الطاقة المكتسبة كلها على التغلب على قوى الربط بين الجزيئات **دون زيادة طاقتها الحركية**، فتبقى درجة الحرارة ثابتة عند 273 K.

درجة الغليان (من D إلى E): بعد الانصهار التام ترفع الطاقة درجة حرارة السائل (من C إلى D)، وعند درجة الغليان تؤدي أي زيادة في الطاقة إلى تغير الحالة من سائلة إلى غازية وتبقى درجة الحرارة ثابتة. وبعد تحوّل المادة كليًا إلى غاز ترتفع درجة الحرارة فوق 373 K.

ميل الخطوط في الشكل 6-10: ميل A–B مقلوب الحرارة النوعية للجليد، وميل C–D مقلوب الحرارة النوعية للماء، والميل بعد E مقلوب الحرارة النوعية للبخار. وميل خط الماء أقل من ميلي الجليد والبخار لأن للماء حرارة نوعية أكبر منهما.

معلومة: فاز ثلاثة علماء بريطانيين بجائزة نوبل في الفيزياء لعام 2016 تقديرًا لأبحاثهم حول المادة التي أتاحت إحراز تقدم في الفهم النظري لأسرارها الغامضة، وفتحت آفاقًا جديدة في تطوير مواد مبتكرة.

تغيرات حالة المادة وقوانين الديناميكا الحرارية

2 الحرارة الكامنة

الحرارة الكامنة للانصهار H_f: كمية الطاقة الحرارية اللازمة لانصهار 1 kg من المادة. للجليد 3.34×10^5 J/kg؛ فالطاقة المكتسبة تُبعد الجزيئات بعضها عن بعض دون زيادة سرعتها. ويمثلها الخط الأفقي **B–C**.

الحرارة الكامنة للتبخر H_v: كمية الطاقة الحرارية اللازمة لتبخير 1 kg من السائل. للماء 2.26×10^6 J/kg (يغلي عند 373 K تحت الضغط الجوي العادي). ويمثلها الخط **D–E**.

كمية الحرارة اللازمة لصهر الكتلة الصلبة

$$Q = mH_f$$

تساوي كتلة المادة مضروبة في الحرارة الكامنة لانصهارها

كمية الحرارة اللازمة لتبخير السائل

$$Q = mH_v$$

تساوي كتلة السائل مضروبة في الحرارة الكامنة لتبخر مادته

عند التجمد أو التكثف: يفقد السائل المتجمد كمية من الحرارة $Q = -mH_f$، ويفقد البخار المتكثف $Q = -mH_v$؛ والإشارة السالبة تعني أن الحرارة تنتقل من المادة إلى المحيط الخارجي.

لكل مادة حرارة كامنة للانصهار وأخرى للتبخر خاصة بها.

الجدول 6-2: الحرارة الكامنة لبعض المواد

المادة	(J/kg) H_f	(J/kg) H_v
النحاس	2.05×10^5	5.07×10^6
الزئبق	1.15×10^4	2.72×10^5
الذهب	6.30×10^4	1.64×10^6
الميثانول	1.09×10^5	8.78×10^5
الحديد	2.66×10^5	6.29×10^6
الفضة	1.04×10^5	2.36×10^6
الرصاص	2.04×10^4	8.64×10^5
الماء (الجليد)	$\mathbf{3.34 \times 10^5}$	$\mathbf{2.26 \times 10^6}$

3 القانون الأول في الديناميكا الحرارية

يمكنك تسخين مسمار بوضعه فوق لهب أو بطرقه بمطرقة؛ أي تزيد طاقته الحرارية إما **بإضافة حرارة** أو **ببذل شغل** عليه. والشغل الذي يبذله المسمار على المطرقة يساوي سالب الشغل الذي تبذله المطرقة على المسمار.

القانون الأول في الديناميكا الحرارية

$$\Delta U = Q - W$$

التغير في الطاقة الحرارية لجسم يساوي كمية الحرارة المضافة إلى الجسم مطروحًا منها الشغل الذي يبذله الجسم. والكميات Q و ΔU و W كلها بوحدة الجول.

يُعد القانون الأول إعادة صياغة **لقانون حفظ الطاقة**: الطاقة لا تفنى ولا تُستحدث، وإنما تتغير من شكل إلى آخر.

المضخة اليدوية: عند ضغطها لنفخ إطار دراجة يصبح الهواء وأسطوانتها دافئين؛ لأن الطاقة الميكانيكية للمكبس تتحول إلى طاقة حرارية للغاز.

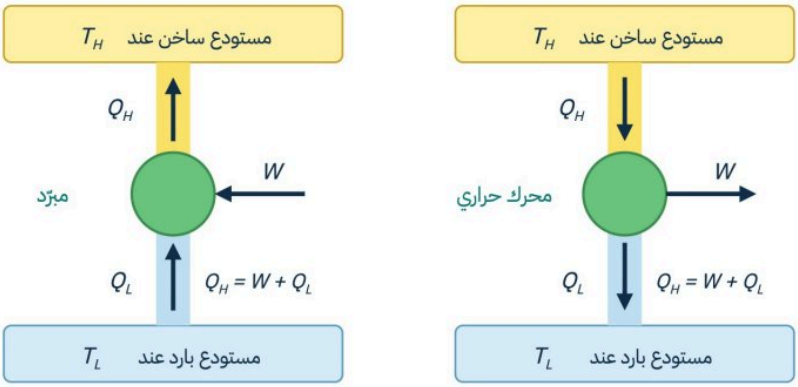
أشكال أخرى: الضوء والصوت والطاقة الكهربائية تتحول إلى طاقة حرارية؛ فالكهربائية تتحول إلى حرارة في محمصة الخبز، والشمس تدفّئ الأرض بالضوء.

تغيرات حالة المادة وقوانين الديناميكا الحرارية

4 المحركات الحرارية

الدفء الذي تشعر به عند فرك يديك نتيجة تحوّل الطاقة الميكانيكية إلى حرارية، وهذا يحدث بسهولة، أما التحول العكسي فأكثر صعوبة.

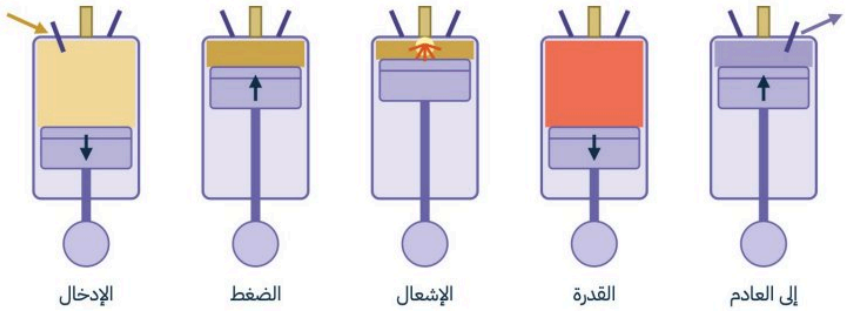
المحرك الحراري: أداة قادرة على تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية بصورة مستمرة. يتطلب مصدرًا ذا درجة حرارة مرتفعة يمتص منه الحرارة، ومستقبِلًا ذا درجة حرارة منخفضة يسمى **المصرف**، وطريقة لتحويل الحرارة إلى شغل.



الحرارة الضائعة Q_L : الطاقة المنتقلة إلى خارج المحرك غير المتحولة إلى شغل؛ فالعادم وأجزاء المحرك تسخن وتنقل الحرارة إلى الهواء الخارجي وعبر المبرّد.

عندما يعمل المحرك بصورة دائمة لا تتغير طاقته الداخلية: $\Delta U = 0 = Q - W$ ، ومحصلة الحرارة الداخلة $Q = Q_H - Q_L$.

$$W = Q_H - Q_L \quad , \quad \text{الكفاءة} = W / Q_H$$



محرك الاحتراق الداخلي: يتمدد الهواء الساخن فيدفع المكبس، ثم يُطرد ويحل محله هواء جديد

يشتعل بخار الجازولين المخلوط بالهواء فتنتج شعلة مرتفعة الحرارة، وتتدفق Q_H إلى الهواء في الأسطوانة فيتمدد ويدفع المكبس، وتتكرر الدورة عدة مرات كل دقيقة.

تولد جميع المحركات حرارة ضائعة؛ لذا **لا يوجد محرك** يحوّل الطاقة كلها إلى شغل، ولا تصل كفاءة أغلبها إلى 100%.

المحركات الشمسية: تتجمّع الحرارة في المجمعات الشمسية عند درجة حرارة عالية، فتنتقل الطاقة الشمسية إليها موجاتٍ كهرومغناطيسية تزيد طاقتها الداخلية، ثم تنتقل حرارةً إلى المحرك الذي يحوّلها إلى شغل نافع وحرارة مفقودة.

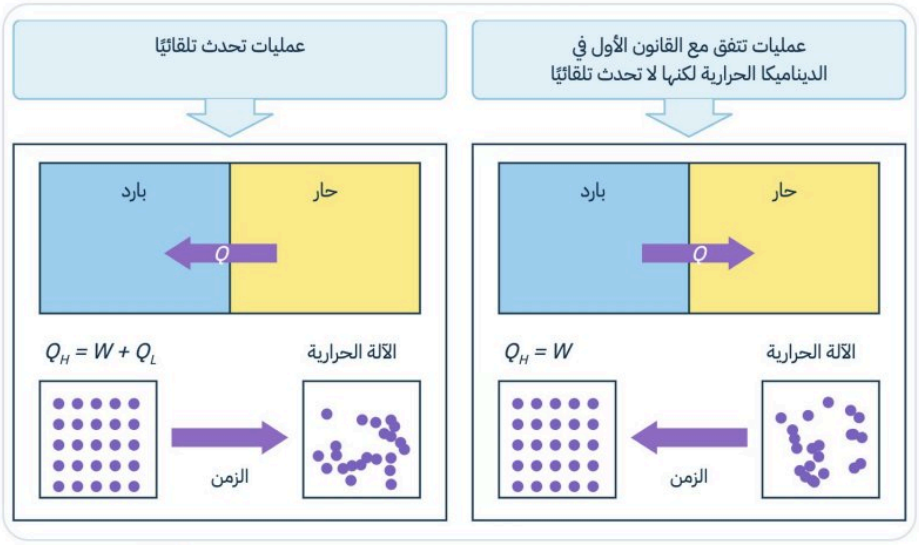
5 المبردات والمضخات الحرارية

المبرّد (الثلاجة): تتدفق الحرارة تلقائيًا من الساخن إلى البارد، لكن يمكن انتزاعها من الأبرد وإضافتها إلى الأسخن بذل شغل؛ فالمحرك يضغط الغاز الذي ينقل الحرارة إلى ملفات التكثيف خلف الثلاجة. وحسب القانون الأول: $Q_H = W + Q_L$.

المضخة الحرارية: مبرّد يعمل في اتجاهين: في الصيف تنتزع الحرارة من المنزل فتبرّده، وفي الشتاء تنتزعها من الهواء البارد في الخارج وتنقلها إلى داخل المنزل لتدفئته؛ وفي الحالتين تحتاج إلى طاقة ميكانيكية.

تغيرات حالة المادة وقوانين الديناميكا الحرارية

6 القانون الثاني في الديناميكا الحرارية



عمليات كثيرة تتفق مع القانون الأول لكنها **لا تحدث تلقائيًا**؛ فالقانون الأول لا يحظر تدفق الحرارة من البارد إلى الساخن، ومع ذلك لم يحدث أن أصبحت الأجسام الساخنة أكثر سخونة عند ملامستها لأجسام باردة.

ولو حوّلت الآلات الحرارية الطاقة الحرارية كليًا إلى شغل دون حرارة ضائعة لتحقق القانون الأول، لكن الحرارة الضائعة تتولد دائمًا.

الإنتروبي: درس المهندس الفرنسي سادي كارنو في القرن التاسع عشر قدرة الآلات على تحويل الطاقة الحرارية إلى ميكانيكية، وأثبت منطقيًا أن الآلات كلها حتى المثالية منها تولد بعض الحرارة الضائعة. ووُصفت نتيجته بكمية تسمى **الإنتروبي**: قياس لعدم الانتظام (الفوضى) في النظام.

التغير في الإنتروبي

$$\Delta S = Q / T$$

يساوي كمية الحرارة المضافة إلى الجسم مقسومة على درجة حرارته بالكلفن، ووحدته J/K

كرة بيسبول تسقط: تصطدم بجزيئات الهواء فتمتص بعض طاقتها وتتحرك في اتجاهات وسرعات عشوائية، فيزداد عدم الانتظام والإنتروبي؛ ومن المستبعد جدًا أن تعود الجزيئات معًا فترفع الكرة.

الإنتروبي كالطاقة الحرارية: إضافة حرارة إلى الجسم تزيده، وانتزاعها ينقصه، أما بذل شغل دون تغير درجة الحرارة فلا يغيّره ما دام الاحتكاك مهملًا.

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية: العمليات الطبيعية تجري في اتجاه المحافظة على الإنتروبي الكلي للكون أو زيادته؛ أي أن الأشياء كلها ستصبح أكثر عشوائية وأقل انتظامًا ما لم يُتخذ إجراء يحافظ على انتظامها، كاختلاط صبغة الطعام بالماء تلقائيًا، أو فوضى الغرفة إذا لم يُبذل شغل عليها.

قضيب حديد ساخن في ماء بارد: عند الاتزان تتماثل متوسطات الطاقة الحركية، ولم تعد الجزيئات السريعة مقتصرة على الحديد، فالحالة النهائية أقل ترتيبًا وإنتروبيها أكبر.

مخالفات للقانون الثاني: ملعقة تسخن من طرف فيصبح طرف محمرًا والآخر متجمدًا، أو جزيئات ماء البركة تقذفك إلى منصة الغطس؛ لا تخالف القانون الأول لكنها تخالف الثاني.

أزمة الطاقة: عند استخدام الغاز الطبيعي لا تُستهلك الطاقة بل تتحول، لكن الإنتروبي يزداد؛ فالإنتروبي مقياس لعدم توافر طاقة مفيدة، ونقص الطاقة القابلة للاستخدام هو فائض في الإنتروبي.

إسهامات بعض العلماء في تطور الديناميكا الحرارية

1790s ظهر علم الديناميكا الحرارية يدرس تحوّل الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي، وعليه وُضعت الأسس النظرية للآلات الحرارية.

1824 درس كارنو كمية الحرارة التي تعمل عليها الآلة البخارية (دورة كارنو).

1840 درس هس الحرارة الناتجة عن التفاعلات الكيميائية وإمكانية تحول الطاقة من حالة إلى أخرى.

1841 توصل يوليوس ماير إلى قانون بقاء الطاقة (الطاقة في نظام مغلق تبقى ثابتة).

1844 أوجد جيمس جول المكافئ الميكانيكي الحراري.

1845 ربط كلاوسيوس تحويل الطاقة إلى شغل ميكانيكي.

1862 توصل مارسيلين برتلوت إلى إمكانية الحصول على قوة دافعة من حرارة التفاعلات الكيميائية.

1999 قدّم إليوت ليب منظومة الثرموديناميكا لتفسير الإنتروبي.

دليل القوانين الرياضية

جميع القوانين الواردة في الفصول من الأول إلى السادس، مع متى يُستخدم كل قانون

كيف تقرأ الجدول؟ القانون في العمود الأيمن، وبجانبه اسمه ورقم الدرس الذي ورد فيه، ثم متى يُستخدم، وأخيرًا الرموز والوحدات.

1 الفصل الأول: الجاذبية

القانون الثالث لكبلر 1-1 مربع نسبة الزمنين الدوريين لكوكبين حول الشمس يساوي مكعب نسبة متوسطي بعديهما عنها. T الزمن الدوري · r متوسط البعد عن الشمس	$\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^2 = \left(\frac{r_A}{r_B}\right)^3$
قانون الجذب الكوني 1-1 قوة التجاذب بين جسمين تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب كتلتيهما، وعكسيًا مع مربع المسافة بين مركزيهما. $G = 6.67 \times 10^{-11}\ N{\cdot}m^2/kg^2$	$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$
الزمن الدوري لكوكب حول الشمس 1-1 لإيجاد الزمن الدوري لكوكب من نصف قطر مداره وكتلة الشمس. m_s كتلة الشمس	$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G m_s}}$
كتلة الأرض 1-1 حساب كتلة الأرض من تسارع الجاذبية g ونصف قطرها بعد معرفة G. $m_E = 5.98 \times 10^{24}$ kg	$m_E = \frac{g r_E^2}{G}$
سرعة القمر الاصطناعي 1-2 سرعة جسم في مدار دائري نصف قطره r حول الأرض، ولا تعتمد على كتلته. r نصف قطر المدار من مركز الأرض	$v = \sqrt{\frac{G m_E}{r}}$
الزمن الدوري للقمر الاصطناعي 1-2 زمن دورة كاملة لقمر اصطناعي حول الأرض.	$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G m_E}}$
تسارع الجاذبية على بعد r 1-2 يقل التسارع الناتج عن جاذبية الأرض بزيادة البعد عن مركزها. $g = 9.80\ m/s^2$ عند سطح الأرض	$a = g\left(\frac{r_E}{r}\right)^2$
المجال الجاذبي 1-2 شدة مجال الجاذبية لجسم كتلته M على بعد r من مركزه. N/kg	$g = \frac{GM}{r^2}$
كتلة القصور 1-2 تقيس مقاومة الجسم لأي نوع من القوى المؤثرة فيه.	$m_{\text{القصور}} = \frac{F_{\text{محصلة}}}{a}$
كتلة الجاذبية 1-2 تحدد مقدار قوة التجاذب بين الجسم والأرض؛ وهي تساوي كتلة القصور.	$m_{\text{الجاذبية}} = \frac{r^2 F_{\text{الجاذبية}}}{G m_E}$

2 الفصل الثاني: الحركة الدورانية

الدورة الكاملة 2-1 للتحويل بين الدورات والراديان والدرجات.	$1\ rev = 2\pi\ rad = 360°$
المسافة التي تقطعها نقطة على جسم دوّار 2-1 نقطة على بعد r من محور الدوران تدور بزاوية θ. θ بالراديان	$d = r\theta$
السرعة الزاوية المتجهة 2-1 التغير في الإزاحة الزاوية مقسومًا على الزمن. rad/s	$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$
السرعة الخطية لنقطة على جسم دوّار 2-1 تزداد السرعة الخطية بزيادة البعد عن محور الدوران.	$v = r\omega$
التسارع الزاوي 2-1 التغير في السرعة الزاوية المتجهة مقسومًا على الزمن. rad/s²	$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$
التردد الزاوي 2-1 عدد الدورات الكاملة التي يدورها الجسم في الثانية. rev/s	$f = \frac{\omega}{2\pi}$
العزم وذراع القوة 2-2 العزم مقياس لقدرة القوة على إحداث الدوران؛ θ الزاوية بين القوة ونصف القطر. τ العزم (N·m) · L ذراع القوة (m)	$\tau = Fr\sin\theta \quad L = r\sin\theta$
شرط عدم الدوران 2-2 محصلة العزوم صفر، أي $F_{g1}\ r_1 = F_{g2}\ r_2$ كما في الأرجوحة المتزنة.	$\tau_1 + \tau_2 = 0$
شرطا الاتزان 2-3 الاتزان الانتقالي (محصلة القوى صفر) والاتزان الدوراني (محصلة العزوم صفر).	$\Sigma F = 0 \quad \Sigma\tau = 0$
التسارع المركزي 2-3 تسارع جسم يتحرك في مسار دائري، واتجاهه نحو المركز. m/s²	$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$

3 الفصل الثالث: الزخم وحفظه

الزخم (الزخم الخطي) 3-1 حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته المتجهة، وله اتجاه السرعة. kg·m/s	$p = mv$
الدفع 3-1 حاصل ضرب القوة في زمن تأثيرها. N·s	$F\Delta t$
نظرية الدفع – الزخم 3-1 الدفع المؤثر في جسم يساوي التغير في زخمه.	$F\Delta t = p_f - p_i$
قانون حفظ الزخم 3-2 زخم أي نظام مغلق ومعزول لا يتغير: $p_{Ci} + p_{Di} = p_{Cf} + p_{Df}$.	$p_i = p_f$
سرعة الارتداد 3-2 عندما يدفع جسمان ساكنان أحدهما الآخر، فيتحركان في اتجاهين متعاكسين.	$v_{Cf} = -\frac{m_D}{m_C}\, v_{Df}$

4 الفصل الرابع: الشغل والطاقة والآلات البسيطة

الشغل 4-1 قوة ثابتة في اتجاه الإزاحة. الجول J = N·m	$W = Fd$
الشغل بوجود زاوية 4-1 θ الزاوية بين القوة والإزاحة.	$W = Fd\cos\theta$
الطاقة الحركية 4-1 طاقة الجسم الناتجة عن حركته. J	$KE = \frac{1}{2}mv^2$
نظرية الشغل – الطاقة 4-1 الشغل المبذول على جسم يساوي التغير في طاقته الحركية.	$W = \Delta KE$
القدرة 4-1 الشغل المبذول مقسومًا على الزمن اللازم لإنجازه. الواط W = J/s	$P = \frac{W}{t} = Fv$
الفائدة الميكانيكية 4-2 نسبة قوة المقاومة إلى القوة المسلّطة. بلا وحدة	$MA = \frac{F_r}{F_e}$
الفائدة الميكانيكية المثالية 4-2 نسبة إزاحة القوة المسلّطة إلى إزاحة المقاومة.	$IMA = \frac{d_e}{d_r}$
الكفاءة 4-2 نسبة الشغل الناتج إلى الشغل المبذول كنسبة مئوية. أقل من 100% في الآلات الحقيقية	$e = \frac{W_o}{W_i} \times 100 = \frac{MA}{IMA} \times 100$
الآلة المركّبة 4-2 الفائدة الميكانيكية للآلة المركّبة حاصل ضرب الفوائد الميكانيكية للآلات البسيطة المكوّنة لها.	$MA = MA_1 \times MA_2$

5 الفصل الخامس: الطاقة وحفظها

$PE = mgh$	**طاقة الوضع الجاذبية** (5-1) h الارتفاع عن مستوى الإسناد. g = 9.80 m/s²
$E_0 = mc^2$	**الطاقة السكونية (أينشتاين)** (5-1) الطاقة الكامنة في كتلة الجسم. c = 3.00 × 10⁸ m/s
$E = KE + PE$	**الطاقة الميكانيكية** (5-2) مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع الجاذبية للنظام.
$KE_{\text{قبل}} + PE_{\text{قبل}} = KE_{\text{بعد}} + PE_{\text{بعد}}$	**حفظ الطاقة الميكانيكية** (5-2) في نظام مغلق ومعزول مهمل الاحتكاك.

6 الفصل السادس: الطاقة الحرارية

$T_K = T_C + 273$	**التحويل من سلسيوس إلى كلفن** (6-1) التدريج الواحد في كلفن يساوي تدريجًا واحدًا في سلسيوس. 0 K الصفر المطلق = −273.15 °C
$Q = mC\Delta T = mC(T_f - T_i)$	**كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة** (6-1) Q موجبة إذا امتص الجسم الحرارة، وسالبة إذا فقدها. C الحرارة النوعية (J/kg·K)
$m_A C_A \Delta T_A + m_B C_B \Delta T_B = 0$	**حفظ الطاقة في المسعر** (6-1) الطاقة التي يفقدها الجسم الساخن يكتسبها البارد في نظام مغلق ومعزول.
$T_f = \frac{m_A C_A T_A + m_B C_B T_B}{m_A C_A + m_B C_B}$	**درجة الحرارة النهائية للخليط** (6-1) درجة حرارة الاتزان لجسمين متلامسين في مسعر.
$Q = mH_f \quad Q = mH_v$	**الحرارة اللازمة للانصهار والتبخر** (6-2) H_f الحرارة الكامنة للانصهار، H_v للتبخر؛ وتكون سالبة عند التجمد والتكثف. للماء: $H_f = 3.34\times10^5$ J/kg · $H_v = 2.26\times10^6$ J/kg
$\Delta U = Q - W$	**القانون الأول في الديناميكا الحرارية** (6-2) التغير في الطاقة الحرارية يساوي الحرارة المضافة مطروحًا منها الشغل الذي يبذله الجسم.
$W = Q_H - Q_L \quad e = \frac{W}{Q_H}$	**شغل المحرك الحراري وكفاءته** (6-2) Q_H الحرارة الممتصة من المصدر الساخن، و Q_L الحرارة الضائعة. للمبرّد: $Q_H = W + Q_L$
$\Delta S = \frac{Q}{T}$	**التغير في الإنتروبي** (6-2) الحرارة المضافة إلى الجسم مقسومة على درجة حرارته بالكلفن. J/K