قـررت وزارة الـتـعـلـيـم تـدريس
هـذا الـكـتـاب وطبعه عـلـى نفقتها

المملكة العربية السعودية

وزارة التعليم
Ministry of Education

الفيزياء 2

التعليم الثانوي- نظام المسارات

السنة الثانية

قام بالتأليف والمراجعة

فريق من المتخصصين

طبعة 1447 - 2025

يُوزع مجّانًا ولا يُباع

وزارة التعليم
Ministry of Education
2025 - 1447

ⓒ المركز الوطني للمناهج ، ١٤٤٦هـ

المركز الوطني للمناهج

فيزياء ٢ - التعليم الثانوي - السنة الثانية - نظام المسارات./ المركز الوطني للمناهج. - الرياض ، ١٤٤٦هـ

٢٤٢ ص ؛ ٢١ x ٢٥,٥ سم

رقم الإيداع : ١٦٣٧٨ / ١٤٤٦

ردمك : ٧- ٩١ - ٨٥٢٧ - ٦٠٣ - ٩٧٨

حقوق الطبع والنشر محفوظة لوزارة التعليم

www.moe.gov.sa

مواد إثرائية وداعمة على "منصة عين الإثرائية"

ien.edu.sa

أعزاءنا المعلمين والمعلمات، والطلاب والطالبات، وأولياء الأمور، وكل مهتم بالتربية والتعليم:

يسعدنا تواصلكم؛ لتطوير الكتاب المدرسي، ومقترحاتكم محل اهتمامنا.

fb.ien.edu.sa

وزارة التعليم

Ministry of Education

2025 - 1447

المخاطر والاحتياطات اللازم مراعاتها

رموز السلامة	المخاطر	الأمثلة	الاحتياطات	العلاج
التخلص من المخلفات	مخلفات التجربة قد تكون ضارة بالإنسان.	بعض المواد الكيميائية، والمخلوقات حية.	لا تتخلص من هذه المواد في المغسلة أو في سلة المهملات.	تخلص من المخلفات وفق تعليمات المعلم.
ملوثات حيوية بيولوجية	مخلوقات ومواد حية قد تسبّب ضررًا للإنسان.	البكتيريا، الفطريات ، الدم، الأنسجة غير المحفوظة، المواد النباتية.	تجنب ملامسة الجلد لهذه المواد، وارتد كمامة وقفازين.	أبلغ معلمك في حالة حدوث ملامسة للجسم، واغسل يديك جيدًا.
درجة الحرارة المؤذية	الأشياء التي قد تحرق الجلد بسبب حرارتها أو برودتها الشديدتين.	غليان السوائل، السخانات الكهربائية، الجليد الجاف، النيتروجين السائل.	استعمال قفازات واقية.	اذهب إلى معلمك طلباً للإسعاف الأولي.
الأجسام الحادة	استعمال الأدوات والزجاجيات التي تجرح الجلد بسهولة.	المقصات، الشفرات، السكاكين، الأدوات المدبّبة، أدوات التشريح، الزجاج المكسور.	تعامل بحكمة مع الأداة، واتبع إرشادات استعمالها.	اذهب إلى معلمك طلباً للإسعاف الأولي.
الأبخرة الضارة	خطر محتمل على الجهاز التنفسي من الأبخرة.	الأمونيا، الأستون، الكبريت الساخن، كرات العث (النفثالين).	تأكد من وجود تهوية جيدة، ولا تشم الأبخرة مباشرة، وارتد كمامة.	اترك المنطقة، وأخبر معلمك فوراً.
الكهرباء	خطر محتمل من الصعقة الكهربائية أو الحريق.	تأريض غير صحيح، سوائل منسكبة، تماس كهربائي، أسلاك معرّاة.	تأكد من التوصيلات الكهربائية للأجهزة بالتعاون مع معلمك.	لا تحاول إصلاح الأعطال الكهربائية، واستعن بمعلمك فوراً.
المواد المهيّجة	مواد قد تهيج الجلد أو الغشاء المخاطي للقناة التنفسية.	حبوب اللقاح، كرات العث، سلك المواعين، ألياف الزجاج، برمنجنات البوتاسيوم.	ضع واقيًا للغبار وارتد قفازين وتعامل مع المواد بحرص شديد.	اذهب إلى معلمك طلباً للإسعاف الأولي.
المواد الكيميائية	المواد الكيميائية التي قد تتفاعل مع الأنسجة والمواد الأخرى وتتلفها.	المبيضات مثل فوق أكسيد الهيدروجين والأحماض كحمض الكبريتيك، القواعد كالأمونيا وهيدروكسيد الصوديوم.	ارتد نظارة واقية، وقفازين، والبس معطف المختبر.	اغسل المنطقة المصابة بالماء، وأخبر معلمك بذلك.
المواد السامة	مواد تسبب التسمم إذا ابتُلعت أو استُنشقت أو لمست.	الزئبق، العديد من المركبات الفلزية، اليود، النباتات السامة.	اتبع تعليمات معلمك.	اغسل يديك جيدًا بعد الانتهاء من العمل، واذهب إلى معلمك طلباً للإسعاف الأولي.
مواد قابلة للاشتعال	بعض الكيماويات التي يسهل اشتعالها بوساطة اللهب، أو الشرر، أو عند تعرضها للحرارة.	الكحول، الكيروسين، الأستون، برمنجنات البوتاسيوم ، الملابس، الشعر.	تجنب مناطق اللهب عند استخدام هذه الكيماويات.	أبلغ معلمك طلبًا للإسعاف الأولي واستخدم مطفاة الحريق إن وجدت.
اللهب المشتعل	ترك اللهب مفتوحاً يسبب الحريق.	الشعر، الملابس، الورق، المواد القابلة للإشتعال.	اربط الشعر إلى الخلف، ولا تلبس الملابس الفضفاضة، واتبع تعليمات المعلم عند إشعال اللهب أو إطفائه.	أبلغ معلمك طلبًا للإسعاف الأولي واستخدم مطفاة الحريق إن وجدت.

سلامة العين
يجب دائماً ارتداء نظارة واقية عند العمل في المختبر.

وقاية الملابس
يظهر هذا الرمز عندما تسبب المواد بقعًا أو حريقًا للملابس.

سلامة الحيوانات
يشير هذا الرمز للتأكيد على سلامة المخلوقات الحية.

نشاط اشعاعي
يظهر هذا الرمز عند استعمال مواد مشعة.

غسل اليدين
اغسل يديك بعد كل تجربة بالماء والصابون قبل نزع النظارة الواقية.

وزارة التعليم
Ministry of Education
2025 - 1447

المقدمة

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين وعلى آله وصحبه أجمعين وبعد:

يأتي اهتمام المملكة العربية السعودية بتطوير المناهج الدراسية وتحديثها من منطلق أحد التزامات رؤية المملكة العربية السعودية (2030) وهو: «إعداد مناهج تعليمية متطورة تركز على المهارات الأساسية بالإضافة إلى تطوير المواهب وبناء الشخصية»، وذلك من منطلق تطوير التعليم وتحسين مُخرجاته ومواكبة التطورات العالمية على مختلف الصعد.

ويأتي كتاب (فيزياء2) لنظام المسارات في التعليم الثانوي داعماً لرؤية المملكة العربية السعودية (2030) نحو الاستثمار في التعليم «عبر ضمان حصول كل طالب على فرص التعليم الجيد وفق خيارات متنوعة»، بحيث يكون الطالب فيها هو محور العملية التعليمية التعلمية.

والفيزياء فرع من العلوم الطبيعية يهتم بدراسة الظواهر الطبيعية واستنباط النظريات وصياغة القوانين الرياضية التي تحكم المادة والطاقة والفراغ والزمن، ويحاول تفسير وإيجاد علاقات لما يدور في الكون من خلال دراسة تركيب المادة ومكوناتها الأساسية، والقوى بين الجسيمات والأجسام المادية، ونتائج هذه القوى، إضافة إلى دراسة الطاقة والشحنة والكتلة. لذا يهتم علم الفيزياء بدراسة الجسيمات تحت الذرية مرورًا بسلوك المواد في العالم الكلاسيكي إلى حركة النجوم والمجرات.

وقد تم بناء محتوى الكتاب بطريقة تتيح ممارسة العلم كما يمارسه العلماء، وبما يعزز مبدأ رؤية (2030) «نتعلم لنعمل»، وقد جاء تنظيم المحتوى بأسلوب شائق يعكس الفلسفة التي بنيت عليها سلسلة مناهج العلوم، من حيث إتاحة الفرص المتعددة للطالب لممارسة الاستقصاء العلمي بمستوياته المختلفة، المبني والموجه والمفتوح. فقبل البدء في دراسة محتوى كل فصل من فصول الكتاب، يطلع الطالب على الأهداف العامة للفصل التي تقدم صورة شاملة عن محتواه، وكذلك الاطلاع على أهمية الفصل من خلال عرض ظاهرة أو تقنية ترتبط بمحتوى الفصل، إضافة إلى وجود سؤال فكِّر الذي يحفز الطالب على دراسة الفصل. ثم ينفِّذ أحد أشكال الاستقصاء المبني تحت عنوان «تجربة استهلالية» والتي تساعد أيضًا على تكوين نظرة شاملة عن محتوى الفصل. وتتيح التجربة الاستهلالية في نهايتها ممارسة شكل آخر من أشكال الاستقصاء الموجه من خلال سؤال الاستقصاء المطروح. وهناك أشكال أخرى من النشاطات الاستقصائية التي يمكن تنفيذها في أثناء دراسة المحتوى، ومنها التجربة العملية، ويمكن الرجوع إلى دليل التجارب العملية على منصة عين الإثرائية، ومختبر الفيزياء الذي يرد في نهاية كل فصل، ويتضمن استقصاءً مفتوحًا في نهايته.

وزارة التعليم
Ministry of Education
1446 - 1447

يبدأ محتوى الدراسة في كل قسم بعرض الأهداف الخاصة والمفردات الجديدة التي سيتعلمها الطالب. وستجد أدوات أخرى تساعدك على فهم المحتوى، منها ربط المحتوى مع واقع الحياة من خلال تطبيق الفيزياء، والربط مع العلوم الأخرى، والربط مع محاور رؤية (2030) وأهدافها الاستراتيجية. وستجد شرحا وتفسيرا للمفردات الجديدة التي تظهر باللون الأسود الغامق، ومظللة باللون الأصفر، وأمثلة محلولة يليها مسائل تدريبية تعمق معرفة الطالب بمحتوى المقرر واستيعاب المفاهيم والمبادئ العلمية الواردة فيه. كما ستجد أيضًا في كل فصل مسألة تحفيز تطبق فيها ما تعلمته في حالات جديدة. ويتضمن كل قسم مجموعة من الصور والأشكال والرسوم التوضيحية بدرجة عالية الوضوح تعزز فهمك للمحتوى.

وقد وظفت أدوات التقويم الواقعي في التقويم بمراحله وأغراضه المختلفة: القبلي، والتشخيصي، والتكويني (البنائي)، والختامي (التجميعي)؛ إذ يمكن توظيف الصورة الافتتاحية في كل فصل والأسئلة المطروحة في التجربة الاستهلالية بوصفها تقويمًا قبليًّا تشخيصيًّا لاستكشاف ما يعرفه الطلاب عن موضوع الفصل. ومع التقدم في دراسة كل جزء من المحتوى تجد تقويمًا خاصًّا بكل قسم من أقسام الفصل يتضمن أفكار المحتوى وأسئلة تساعد على تلمّس جوانب التعلم وتعزيزه، وما قد يرغب الطالب في تعلمه في الأقسام اللاحقة. وفي نهاية كل فصل يأتي دليل مراجعة الفصل متضمنًا تذكيرًا بالمفاهيم الرئيسة والمفردات الخاصة بكل قسم. يلي ذلك تقويم الفصل الذي يشمل أسئلة وفقرات متنوعة تهدف إلى تقويم تعلم الطالب في مجالات عدة، هي: إتقان المفاهيم، وحل المسائل، والتفكير الناقد، والمراجعة العامة، والمراجعة التراكمية، ومهارات الكتابة في الفيزياء. وفي نهاية كل فصل يجد الطالب اختبارًا مقننًا يهدف إلى تدريبه على حل المسائل وإعداده للتقدم للاختبارات الوطنية والدولية، إضافة إلى تقويم فهمه لموضوعات كان قد درسها من قبل.

ونسأله سبحانه أن يحقق الكتاب الأهداف المرجوة منه، وأن يوفق الجميع لما فيه خير الوطن وتقدمه وازدهاره.

قائمة المحتويات

الفصل 1

الجاذبية 8

1-1 حركة الكواكب والجاذبية 9

1-2 استخدام قانون الجذب الكوني 18

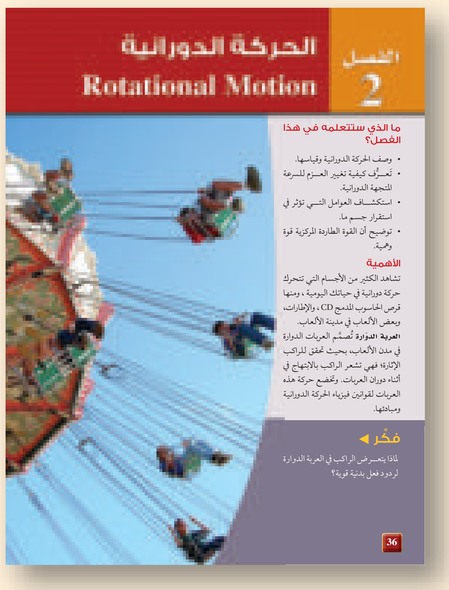
الفصل 2

الحركة الدورانية 36

2-1 وصف الحركة الدورانية 37

2-2 ديناميكا الحركة الدورانية 42

2-3 الاتزان 47



الفصل 3

الزخم وحفظه 66

3-1 الدفع والزخم 67

3-2 حفظ الزخم 74

وزارة التعليم
Ministry of Education
2025 - 1447

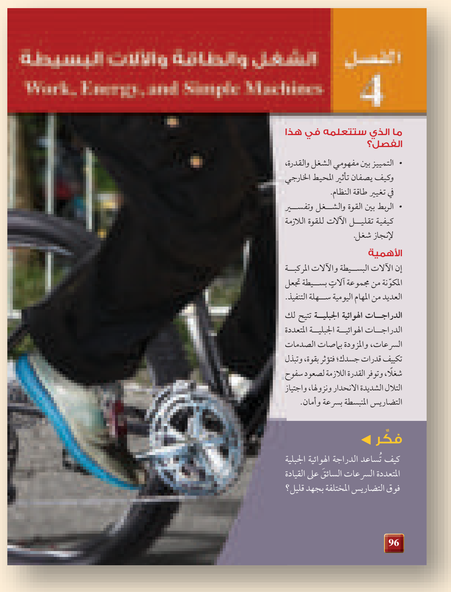
قائمة المحتويات

الفصل 4

الشغل والطاقة والآلات البسيطة 96

4-1 الطاقة والشغل 97

4-2 الآلات 109

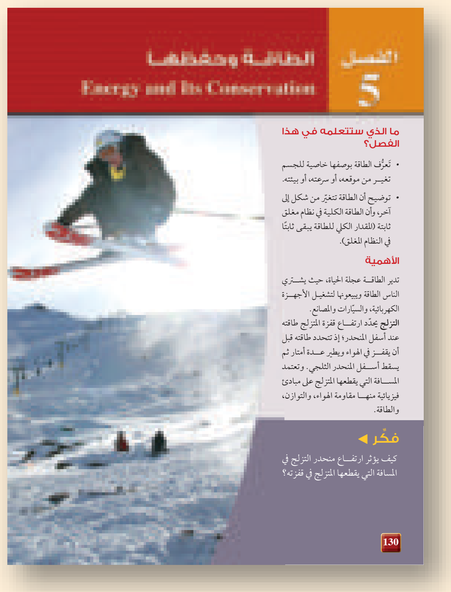


الفصل 5

الطاقة وحفظها 130

5-1 الأشكال المتعددة للطاقة 131

5-2 حفظ الطاقة 141



الفصل 6

الطاقة الحرارية 164

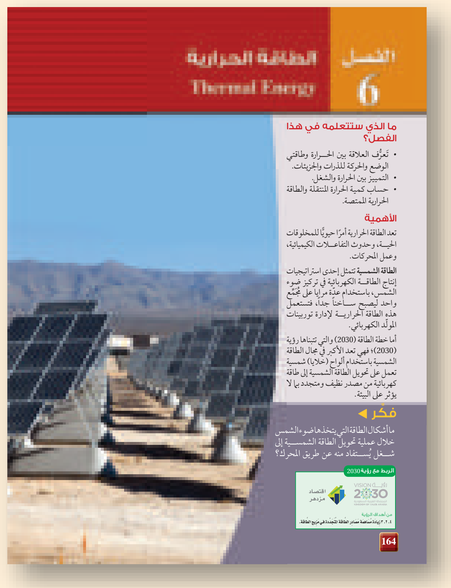
6-1 درجة الحرارة والطاقة الحرارية 165

6-2 تغيرات حالة المادة وقوانين الديناميكا الحرارية.. 178

دليل الرياضيات..... 201

الجداول..... 232

المصطلحات..... 236



وزارة التعليم
Ministry of Education
2025 - 1447

الفصل 1

الجاذبية
Gravitation

ما الذي ستتعلمه في هذا الفصل؟

- وصف طبيعة قوة الجاذبية.
- الربط بين قوانين كبلر في حركة الكواكب وقوانين نيوتن في الحركة.
- وصف مدارات الكواكب والأقمار الاصطناعية باستعمال قانون الجذب الكوني (العام).

الأهمية

تساعدك قوانين كبلر وقانون الجذب الكوني على فهم حركة الكواكب والأقمار الاصطناعية.

المُذنّبات اكتُشف مذنب هال- بوب على يد العالمين ألن هال وتوماس بوب عام 1995م. ودخل هذا المذنب نظامنا الشمسي عام 1997م، وكان مرئيًّا في كاليفورنيا، وظهرت مناظر لذيله الغباري الأبيض وذيله الأيوني الأزرق.

فكِّر ◄

تدور المذنبات حول الشمس كما تفعل الكواكب والنجوم. كيف تستطيع وصف مدار مذنب مثل مذنب هال- بوب؟

وزارة التعليم
Ministry of Education
2025 - 1447

مدار عطارد إهليلجي (بيضوي)، وتكون الشمس في إحدى بؤرتيه. المحور الرئيس هو الخط المستقيم الذي يمر عبر البؤرتين وعبر المدار.

تجربة استهلالية

هل يمكنك عمل نموذج لحركة عطارد؟

سؤال التجربة هل تتحرك الكواكب في نظامنا الشمسي في مدارات دائرية أم في مدارات لها أشكال أخرى؟

الخطوات

1. استعمل جدول البيانات لرسم مدار عطارد باستعمال مقياس الرسم $10\ cm = 1\ AU$. ولاحظ أن الوحدة الفلكية الواحدة AU تساوي بُعْدَ الأرض عن الشمس، $1\ AU = 1.5\times10^{8}\ km$.
2. احسب المسافة بوحدة cm لكل مسافة مقيسة بوحدة AU.
3. عيّن نقطة في مركز ورقتك، وارسم المحاور الرئيسة x و y عند هذه النقطة.
4. ضع المنقلة على الخط الأفقي على أن يكون مركزها منطبقًا على مركز الورقة، وقس الدرجات، ثم ضع علامة.
5. ضع المسطرة بحيث تمر بالمركز وعلامة الزاوية، وعلّم المسافة للزاوية المقصودة بالسنتمترات. قد تحتاج إلى وضع المنقلة على الخط الرأسي لقياس بعض الزوايا.
6. عندما تنتهي من وضع علامات لنقاط البيانات كلها ارسم خطًّا يجمعها.

التحليل

صف شكل مدار عطارد، وارسم خطًّا يمر بالشمس يمثل أطول محور للمدار، وسمّه المحور الرئيس.

التفكير الناقد كيف يمكن مقارنة مدار عطارد بمدار المذنب هال – بوب الظاهر في الصفحة السابقة؟

مسار عطارد	
d (AU)	θ (°)
0.35	4
0.31	61
0.32	122
0.38	172
0.43	209
0.46	239
0.47	266
0.44	295
0.40	330
0.37	350

1–1 حركة الكواكب والجاذبية Planetary Motion and Gravitation

كان يُعتقد قديمًا أن الشمس والقمر والكواكب والنجوم تدور كلها حول الأرض، إلا أن العالم البولندي كوبرنيكس لاحظ أن المشاهدات المتوافرة لحركة الكواكب والنجوم لا تتفق كليًّا مع هذا النموذج الذي مركزه الأرض. وقد نُشرت نتائج أعمال كوبرنيكس عام 1543م، حيث بيّن أن حركة الكواكب يمكن فهمها بصورة أفضل إذا افترضنا أن الأرض وغيرها من الكواكب تدور حول الشمس.

ثم جاء تايكو براهي، الذي ولد بعد سنوات قليلة من موت كوبرنيكس، حيث لاحظ –وهو في الرابعة عشرة من عمره في الدنمارك– كسوفًا للشمس عام 1560م، فقرّر أن يُصبح فلكيًّا، درس الفلك خلال سفره عبر أوربا مدة خمس سنوات. ولم يستعمل التلسكوب، بل استعمل أجهزة صممها بنفسه. وتوصل خطأً – كما سيتبين لاحقًا– إلى أن الشمس والقمر يدوران حول الأرض، في حين تدور الكواكب الأخرى حول الشمس.

رابط الدرس الرقمي
www.ien.edu.sa

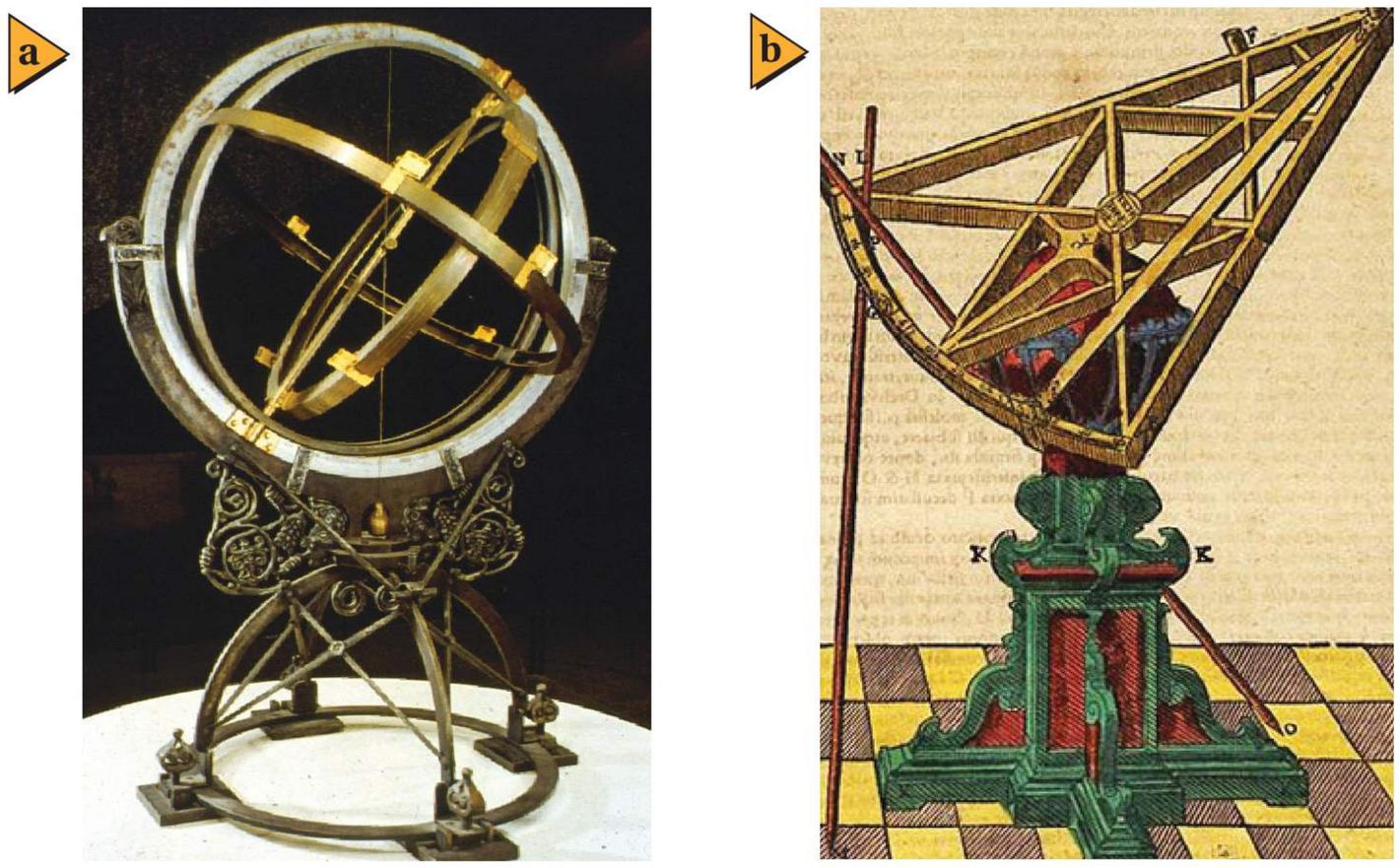
الأهداف

- **تربط** بين قوانين كبلر وقانون الجذب الكوني.
- **تحسب** الزمن الدوري ومقدار السرعة المدارية.
- **تصف** أهمية تجربة كافندش.

المفردات

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

مدار المذنب هالي-بوب إهليلجي بشكل حاد جدًا (شديد الاستطالة) مقارنة بمدار عطارد الذي يكون أقرب إلى الشكل الدائري.

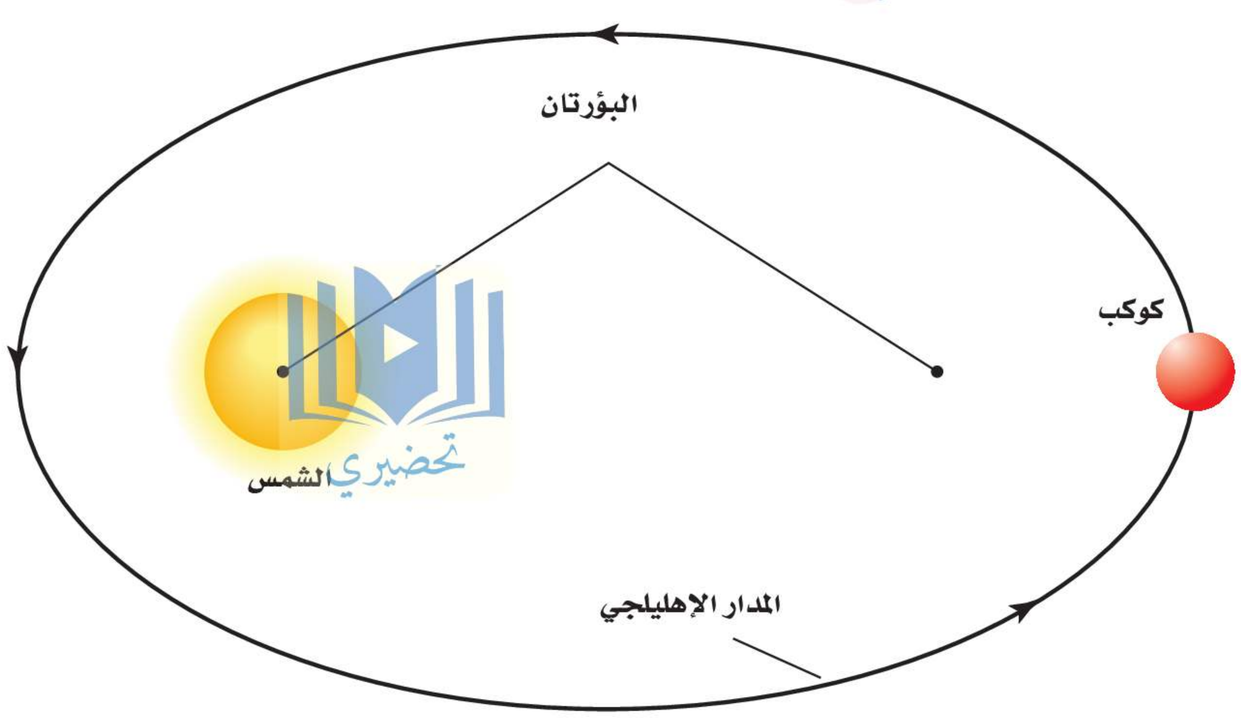


■ **الشكل 1-1** من بين الأجهزة الضخمة التي بناها براهي واستعملها على جزيرة Hven جهاز الأسطرلاب (**a**)، وآلة السُّدس (**b**)، وهي في الأصل من ابتكار علماء المسلمين.

قوانين كبلر Kepler's Laws

أصبح يوهان كبلر الألماني مساعدًا لبراهي عندما انتقل إلى براغ. ودرّب براهي مساعديه على كيفية استعمال أجهزة كالمبيَّنة في **الشكل 1–1**. وعندما تُوفي براهي ورث كبلر نتائج مشاهداته، ودرس البيانات. اعتقد كبلر أن الشمس تولّد قوة على الكواكب المحيطة، واعتبرها مركز المجموعة الشمسية. وبعد عدة سنوات من الدراسة التحليلية لبيانات حركة المريخ اكتشف كبلر القوانين التي تصف حركة كل كوكب.

ينص **القانون الأول لكبلر** على أن مدارات الكواكب إهليلجية، وتكون الشمس في إحدى البؤرتين؛ فالشكل الإهليلجي له بؤرتان كما في **الشكل 2–1**. و تدور المذنبات في مدارات إهليلجية أيضًا مثل الكواكب والنجوم، وتقسم إلى مجموعتين اعتمادًا على الزمن الدوري لها، وهو الزمن اللازم للمذنب ليكمل دورة واحدة. المجموعة الأولى لها زمن دوري أكبر من 200 سنة. أما الزمن الدوري للمجموعة الثانية فأقل من 200 سنة. إن الزمن الدوري للمذنب هال – بوب هو 2400 سنة، وهو مثال على المجموعة الأولى، في حين أن الزمن الدوري لمذنب هالي هو 76 سنة، ويُعدّ مثالاً على المجموعة الثانية.



■ **الشكل 2–1** تدور الكواكب حول الشمس في مدارات إهليلجية، وتكون الشمس في إحدى البؤرتين.

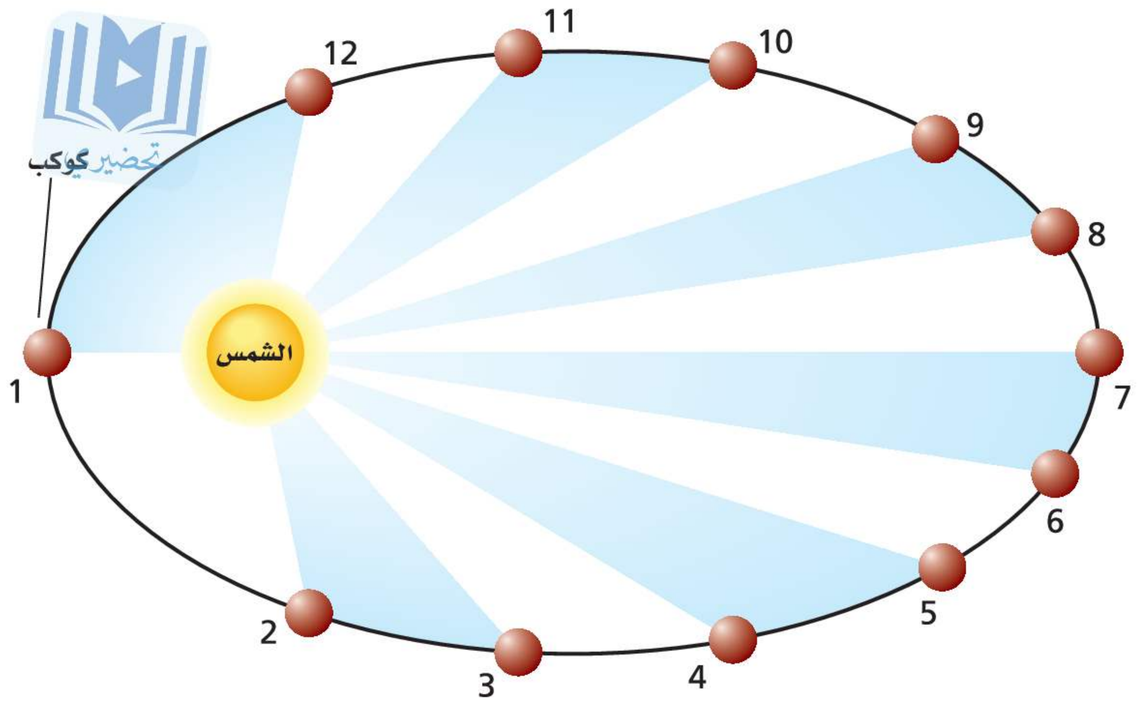
King Faisal PRIZE

مُنِح البروفيسور راشد عليفتش سنييف جائزة الملك فيصل لعام ١٤٣٠هـ-٢٠٠٩/م تقديرًا لإنجازه عملاً رائدًا ومساهمة أساسية في مجال فيزياء الفلك، حيث أسست بحوثه النظرية حول خلفية الإشعاع الكوني قاعدة للمشاهدات الفلكية واستكشاف بُنْية الكون والمجرّات. ويُعدُّ عمله المتعلِّق بالثقوب السوداء والنجوم الثنائية حاسمًا في تطوير مجال الأشعة السينية الكونية.

المصدر: موقع جائزة الملك فيصل/ فرع العلوم

تحضيري

وجد كبلر أن الكواكب تتحـــرك بسرعة أكبر عندما تكون قريبة من الشـــمس، بينما تتحـــرك أبطأ عندما تكون بعيدة عنها. وهكذا ينص **القانون الثاني لكبلر** على أن الخـــط الوهمي مـــن الشـــمس إلى الكوكب يمسح مساحات متســـاوية في أزمنة متساوية، كما في **الشـــكل 3–1**. وقد توصل كبلـــر كذلك إلى علاقة رياضية تربط بين الزمن الدوري للكوكب ومتوسط بُعده عن الشمس؛ حيث ينص **القانون الثالث لكبلر** على أن مربع النسبة بين زمنين دوريين لكوكبين حول الشمس يساوي مكعب النسبة بين متوسطي بُعديهما عن الشمس. وهكذا إذا كان الزمنان الدوريان لكوكبين هما T_A وT_B ومتوسط بعديهما عن الشمس r_A وr_B فيصبح القانون الثالث لكبلر على النحو الآتي:



■ **الشكل 3–1** يتحرك الكوكب بأقصى سرعة عندما يكون قريبًا من الشمس، ويتحرك أبطأ عندما يكون بعيدًا عنها. ويمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية.

القانون الثالث لكبلر

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

لاحـــظ أن القانونين الأول والثاني يطبقان على كل كوكب عـــلى حدة، أما القانون الثالث فيربط بين حركة أكثر من كوكب حول الجســـم نفسه. لذا يستعمل لمقارنة أبعاد الكواكب عن الشـــمس بأزمانها الدورية، كما في **الجدول 1–1**. ويستعمل لمقارنة الأبعاد والأزمان الدورية للقمر وللأقمار الاصطناعية حول الأرض.

ومما تجدر الإشـــارة إليه أن مـــدارات الكواكب حول النجوم تتفـــاوت في مدى إهليلجية أشـــكالها؛ فبعضها شـــبه دائري (مدار كوكب الزهرة مثلاً)، كما أن مدارات الأقمار حول الكواكب شـــبه دائرية. وســـنتعامل هنا مع مدارات الكواكب والأقـــمار على أنها دائرية؛ لتسهيل إجراء العمليات الرياضية.

الجدول 1–1

بيانات الأجرام

الجرم	متوسط 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}

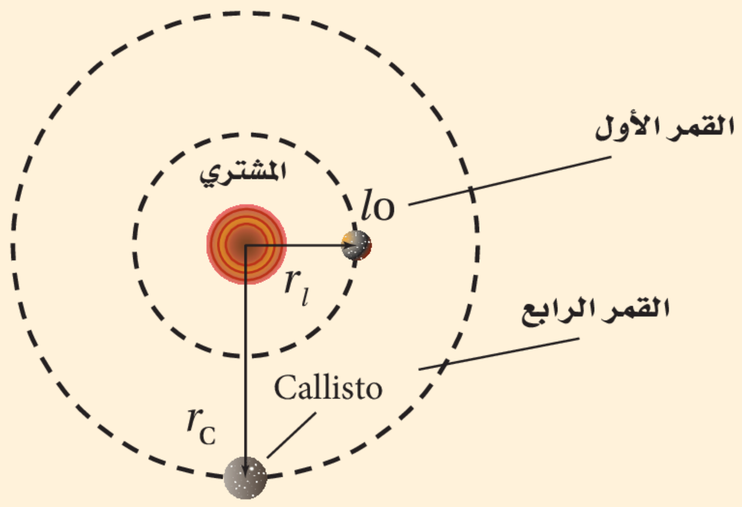
1. من معطيات المثال 1، نصف قطر مدار آيو يبلغ 4.2 وحدات.

نعم، الوحدات صحيحة. لأننا نأخذ نسبة بين قيمتين للزمن الدوري، فإن الوحدات تُلغى، وتبقى النتيجة النهائية (rc) بنفس وحدات القيمة المعطاة (rt).

2. باستخدام قانون كبلر الثالث: $(r_p/r_E)^3(T_p/T_E)^2 = (2r_E/r_E)^3 = 8(T_p/1\ year)^2$. بما أن $r_p = 2r_E$، فإن T_p = √8 ≈ 2.8 سنة أرضية.

مثـــال 1

بُعد القمر الرابع عن المشتري قاس جاليليو أبعاد مدارات أقمار المشتري مستعملًا قطر المشتري وحدةَ قياس. ووجد أن الزمن الدوري لأقرب قمر هو 1.8 يوم، وكان على بُعد 4.2 وحدات من مركز المشتري. أما القمر الرابع فزمنه الدوري 16.7 يومًا. احسب بُعد القمر الرابع عن المشتري باستعمال الوحدات التي استعملها جاليليو.



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم مداري القمرين الأول والرابع للمشتري.
- عيّن نصفيْ قطرَي المدارين.

المعلوم

$T_C = 16.7\ days \quad TI = 1.8\ days$

$r_I = 4.2\ units$

المجهول

$r_C = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

حل القانون الثالث لكبلر لإيجاد r_C

دليل الرياضيات
فصل المتغير 215

$$\left(\frac{r_C}{r_I}\right)^3 = \left(\frac{T_C}{T_I}\right)^2$$

$$r_C^3 = r_I^3\left(\frac{T_C}{T_I}\right)^2 w$$

بالتعويض: يوم $T_I = 1.8$ و يومًا $T_C = 16.7$، وحدة $r_I = 4.2$

$$r_C = \sqrt[3]{r_I^3\left(\frac{T_C}{T_I}\right)^2} = \sqrt[3]{(4.2\ units)^3\left(\frac{16.7\ days}{1.8\ days}\right)^2}$$

$$= \sqrt[3]{6.4\times10^3\ units^3}$$

$$= 19\ units$$

نعم، الجواب منطقي. بما أن الزمن الدوري لكاليستو أكبر من الزمن الدوري لآيو، فمن المنطقي أن يكون نصف قطر مداره أكبر، وهذا ما تؤكده العلاقة في قانون كبلر الثالث ($T^2 \propto r^3$).

3. باستخدام قانون كبلر الثالث: $(r_M/r_E)^3(T_M/T_E)^2$. بما أن $r_M = 1.52r_E$. إذن $(1.52)^3 \approx 3.51(T_M/365.25\ days)^2$. فإن $T_M = 365.25 \times \sqrt{3.51} \approx 684$ يومًا.

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** ستكون r_C بوحدات جاليليو مثل r_I.
- **هل الجواب منطقي؟** الزمن الدوري كبير، لذلك سيكون نصف القطر كبيرًا.

4. a. باستخدام قانون كبلر الثالث: $(T_S/T_M)^2 = (r_S/r_M)^3$. إذن $T_S = T_M (r_S/r_M)^{(3/2)} = 27.3$ يومًا × $(6.70\times10^3$ كم / 3.90×10^5 كم$)^{(3/2)} \approx 0.0614$ يومًا، أو ما يعادل 88.4 دقيقة.

مسائل تدريبية

1. الزمن الدوري لأحد أقمار المشتري 7.15 أيام. فكم وحدة يبلغ نصف قطر مداره؟ استعمل المعلومات المُعطاة في مثال 1.
2. يدور كويكب حول الشمس في مدار متوسط نصف قطره يساوي ضعف متوسط نصف قطر مدار الأرض. احسب زمنه الدوري بالسنوات الأرضية.
3. يمكنك أن تجد من **الجدول 1–1** أن بُعد المريخ عن الشـــمس أكبر 1.52 مرة من بُعد الأرض عن الشمس. احسب الزمن اللازم لدوران المريخ حول الشمس بالأيام الأرضية.
4. الزمن الدوري لدوران القمر حول الأرض 27.3 يومًا، ومتوسط بُعد القمر عن مركز الأرض 3.90×10^5 km.
   a. استعمل قوانين كبلر لحســاب الزمن الدوري لقمر اصطناعي يبعد مداره 6.70×10^3 km عن مركز الأرض.
   b. كم يبعد القمر الاصطناعي عن سطح الأرض؟
5. اســتعمل البيانات المتعلقة بالزمن الدوري للقمر ونصف قطر مداره التي يتضمنها السؤال السابق، لحساب متوسط بُعد قمر اصطناعي عن مركز الأرض والذي زمنه الدوري يساوي يومًا واحدًا.

4. b. بعد القمر الاصطناعي عن سطح الأرض = بعده عن المركز - نصف قطر الأرض. نصف قطر الأرض ≈ 6.38×10^3 كم. إذن البعد = 6.70×10^3 كم - 6.38×10^3 كم = 320 كم.

5. باستخدام قانون كبلر الثالث: $r_S = r_M (T_S/T_M)^{(2/3)} = (3.90\times10^8$ م) × (1 يوم / 27.3 يوم$)^{(2/3)} \approx 4.33\times10^7$ م.

قانون نيوتن في الجذب الكوني
Newton's Law of Universal Gravitation

في عام 1666م، بعد مضي 45 سنة على نشر كبلر نتائجه، بدأ نيوتن دراسة حركة الكواكب، فوجد أن مقدار قوة جذب الشمس F المؤثرة في كوكب تتناسب عكسيًّا مع مربع البعد r بين مركز الكوكب ومركز الشمس؛ أيْ أن F تتناسب طرديًّا مع $\frac{1}{r^2}$، وتؤثر القوة $\boldsymbol{F}$ في اتجاه الخط الواصل بين مركزي الجسمين.

يُقال إن مشاهدة سقوط تفاحة جعلت نيوتن يتساءل: ماذا لو امتد أثر هذه القوة التي تسببت في سقوط التفاحة إلى القمر أو حتى أبعد من ذلك؟ وجد نيوتن أن تسارع كل من التفاحة والقمر متوافق مع العلاقة $\frac{1}{r^2}$. وبحسب قانون نيوتن الثالث فإن القوة التي تؤثر بها الأرض في التفاحة تساوي تلك القوة التي تؤثر بها التفاحة في الأرض. ويجب أن تتناسب قوة التجاذب بين أي جسمين مع كتل هذه الأجسام، وتُسمى هذه القوة **قوة الجاذبية**.

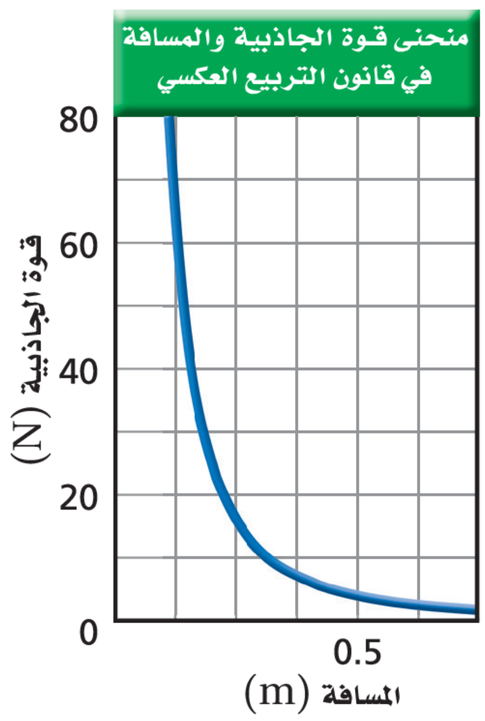
كان نيوتن واثقًا أن قوة التجاذب هذه موجودة بين أي جسمين في أي مكان من هذا الكون. وقد صاغ **قانونه في الجذب الكوني** الذي ينص على أن الأجسام تجذب أجسامًا أخرى بقوة تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب كتلها، وعكسيًّا مع مربع المسافة بين مراكزها. ويمكن تمثيل ذلك بالمعادلة الآتية:

قانون الجذب الكوني

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

قوة الجاذبية تساوي ثابت الجذب الكوني مضروبًا في كتلة الجسم الأول مضروبًا في كتلة الجسم الثاني مقسومًا على مربع المسافة بين مركزي الجسمين.

تبعًا لقانون نيوتن، تتناسب F طرديًّا مع m_1 و m_2، لذلك إذا تضاعفت كتلة الكوكب القريب من الشمس فإن القوة ستتضاعف. استعمل الرياضيات في الفيزياء في الجدول الآتي؛ لمساعدتك على إدراك أن تغير أحد المتغيرات يؤثر في الآخر. و يبين **الشكل 4 – 1** منحنى لقانون التربيع العكسي (العلاقة بين قوة الجاذبية والمسافة).



الشكل 4–1 تتغيّر قوة الجاذبية بتغير المسافة وفق قانون التربيع العكسي.

الرياضيات في الفيزياء

العلاقات الطردية والعكسية يحتوي قانون نيوتن في الجذب الكوني كلا التناسبين الطردي والعكسي.

$F \propto \frac{1}{r^2}$		$F \propto m_1 m_2$	
التغير	النتيجة	التغير	النتيجة
$2\,r$	$\frac{1}{4}F$	$2\,m_1 m_2$	$2F$
$3\,r$	$\frac{1}{9}F$	$3\,m_1 m_2$	$3F$
$\frac{1}{2}r$	$4\,F$	$2\,m_1 3m_2$	$6F$
$\frac{1}{3}r$	$9\,F$	$\frac{1}{2}\,m_1 m_2$	$\frac{1}{2}F$

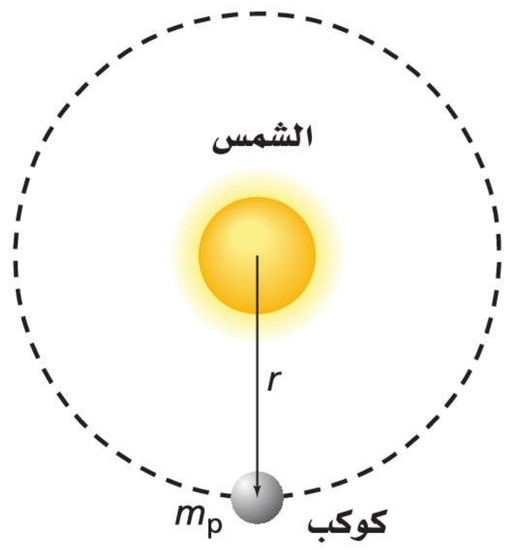
F/4 2F F/9 3F 4F F/2 9F

الجذب الكوني والقانون الثالث لكبلر

Universal Gravitation and Kepler's Third Law

وضع نيوتن قانون الجذب الكوني بتعابير تنطبق على حركة الكواكب حول الشمس. وهذا يتفق مع القانون الثالث لكبلر، ويؤكد أن قانون نيوتن في الجذب الكوني يتطابق مع أفضل المشاهدات الحديثة.

إذا اعتبرت كوكبًا ما يدور حول الشمس، كما في **الشكل 5–1**، فيمكن كتابة القانون الثاني لنيوتن في الحركة على الصورة $F_{\text{محصلة}} = m_p a_C$، حيث F قوة الجاذبية، و m_p كتلة الكوكب، وa_C التسارع المركزي للكوكب. ولتبسيط أكثر اعتبر المدارات دائرية الشكل. ولأنك درست في الفصل السادس أن التسارع المركزي في الحركة الدائرية المنتظمة يساوي $a_C = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$، لذا يمكن كتابة العلاقة الآتية $F_{\text{محصلة}} = m_p a_C$ على النحو الآتي: $F_{\text{محصلة}} = \frac{m_p 4\pi^2 r}{T^2}$. والمقصود بـ T في هذه المعادلة الزمن اللازم لدوران الكوكب دورة كاملة حول الشمس. وإذا ساويت الحد الأيمن في هذه المعادلة بالحد الأيمن لقانون الجذب الكوني تحصل على النتيجة الآتية:



■ **الشكل 5–1** كوكب كتلته m_p ونصف قطر مداره r، يدور حول الشمس التي كتلتها m_s.

$$G\frac{m_s m_p}{r^2} = \frac{m_p 4\pi^2 r}{T^2}$$

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_s}\right) r^3$$

$$T = \sqrt{\left(\frac{4\pi^2}{Gm_s}\right) r^3}$$

يمكن التعبير عن الزمن الدوري لكوكب يدور حول الشمس كما يأتي:

الزمن الدوري لكوكب يدور حول الشمس

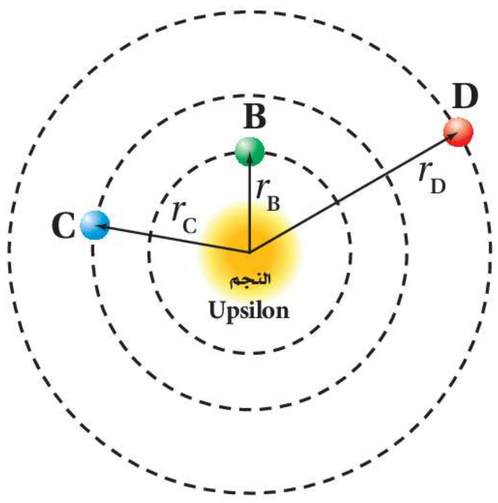
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{Gm_s}}$$

وبتربيع الطرفين يتبين أن هذه المعادلة هي القانون الثالث لكبلر في حركة الكواكب. حيث يتناسب مربع الزمن الدوري طرديًّا مع مكعب المسافة الفاصلة بين مراكز الأجسام. ويعتمد المعامل $\frac{4\pi^2}{Gm_s}$ على كتلة الشمس وثابت الجذب الكوني. وقد وجد نيوتن أن هذا الاشتقاق ينطبق كذلك على المدارات الإهليلجية.

1. نعم، تحقق الكواكب قانون كبلر الثالث. عند حساب النسبة T^2/r^3 لكل كوكب نجد أنها ثابتة تقريبًا: الكوكب B: 1.04×10^5، الكوكب C: 1.02×10^5، الكوكب D: 1.02×10^5 (بوحدات يوم^2/AU^3).

مسألة تحفيز

اكتشف الفلكيون ثلاثة كواكب تدور حول النجم Upsilon وهذه الكواكب هي: الكوكب B الذي يبلغ نصف قطر مداره 0.059 AU وزمنه الدوري 4.6170 أيام، والكوكب C يبلغ نصف قطر مداره 0.829 AU وزمنه الدوري 241.5 يومًا، والكوكب D الذي يبلغ نصف قطر مداره 2.53 AU وزمنه الدوري 1284 يومًا. (المسافة بين الأرض والشمس تساوي 1.00 AU)



1. هل تحقق هذه الكواكب القانون الثالث لكبلر؟
2. أوجد كتلة النجم Upsilon بدلالة كتلة الشمس.

2. كتلة النجم (M_star) تتناسب عكسيًّا مع النسبة T^2/r^3. بحساب النسبة للشمس (T=365.25 يوم، r=1 AU) نجدها 1.33×10^5. إذن M_star/M_sun = (T^2/r^3)_sun / (T^2/r^3)_star ≈ $(10^5\times1.02) / (10^5\times1.33)$ ≈ 1.3. أي أن كتلة النجم Upsilon تساوي 1.3 مرة كتلة الشمس تقريبًا.

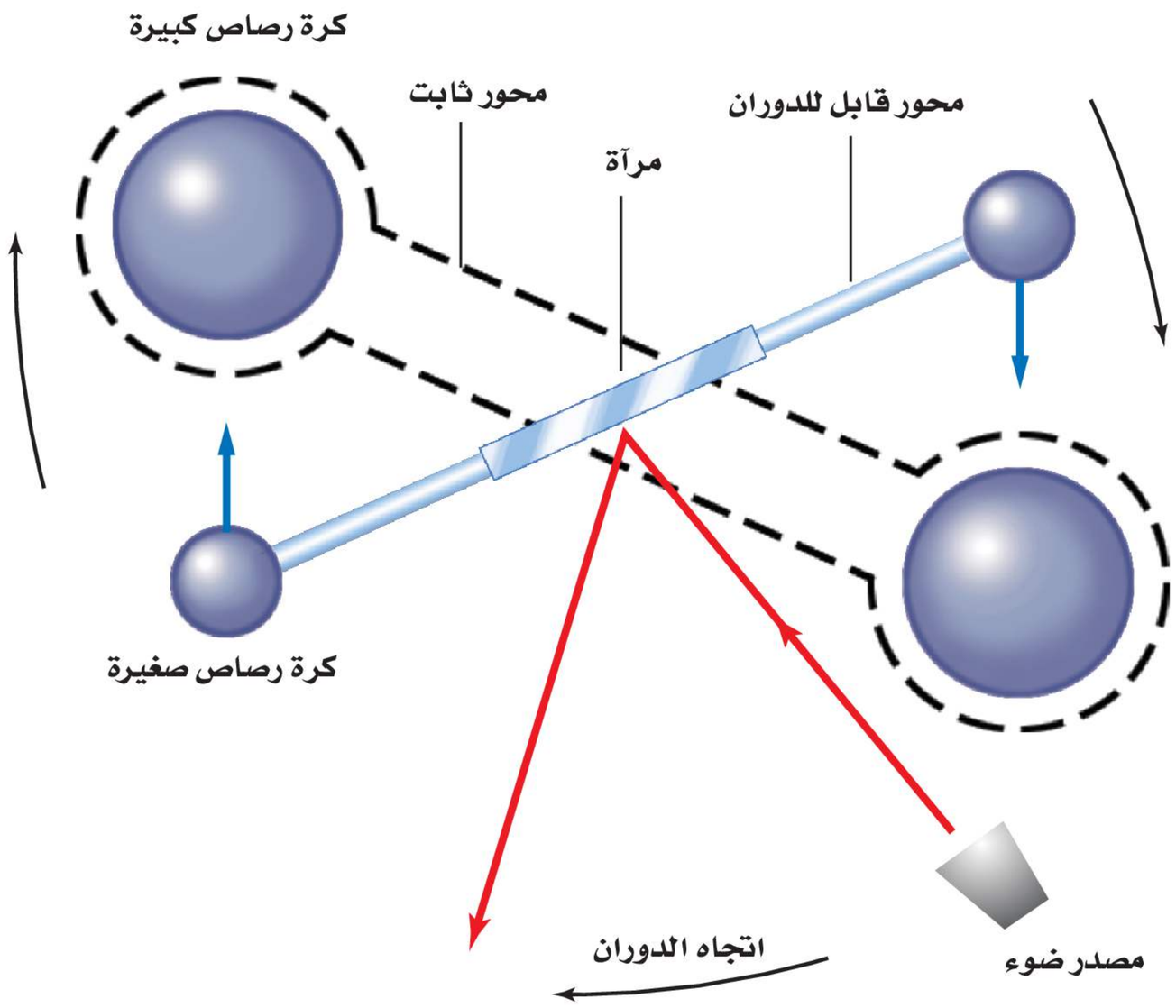
قياس ثابت الجذب الكوني

Measuring the Universal Gravitational Constant

ما قيمة ثابت الجذب الكوني G؟ تبدو قوة التجاذب بين جسمين على الأرض ضعيفة نسبيًّا، ويصعب الكشف عن هذه القوة بين كتلتي كرتي البولنج مثلًا. في الواقع استغرق الأمر 100 عام بعد نيوتن ليتمكن العلماء من تصميم جهاز حساس بما يكفي لقياس قوة الجاذبية.

تجربة كافندش استعمل العالم هنري كافندش في عام 1798م جهازًا، كما في **الشكل 6–1**، لقياس قوة الجاذبية بين جسمين. وللجهاز ذراع أفقية تحمل كرتين من الرصاص عند نهايتيها. وهذه الذراع معلقة من منتصفها بسلك رفيع قابل للدوران. ولأن الذراع معلقة بسلك رفيع فهي حساسة لأي قوة أفقية. ولقياس G، وضع كافندش كرتين ثقيلتين من الرصاص قريبتين من الكتلتين الصغيرتين، كما يبين **الشكل 7–1**. وقد أدت قوة التجاذب بين الكرتين الكبيرة والصغيرة إلى دوران الذراع. وعند تساوي قوة اللّيّ للسلك الرفيع وقوة التجاذب بين الكرات، تتوقف الذراع عن الدوران. وقد تمكن كافندش من قياس قوة التجاذب بين الكتل من خلال قياسه للزاوية التي شكَّلها دوران الذراع؛ حيث تقاس الزاوية التي يشكلها دوران الذراع بالشعاع المنعكس عن مرآة مستوية. وقد تمكن كافندش – من خلال قياس الكتل والمسافة بين مراكز الكرات، والتعويض بذلك مستعملًا قانون نيوتن في الجذب الكوني – من تحديد قيمة تجريبية للثابت G، حيث $G = 6.67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2$، وذلك عندما تكون وحدة قياس m_1 و m_2 بـ (kg)، و r بـ(m)، و F بـ (N).

الشكل 6–1 تستعمل موازين كافندش الحديثة لقياس قوى الجذب بين جسمين.



الشكل 7–1 عند وضع الكرات الكبيرة بالقرب من الصغيرة تؤدي قوة الجاذبية إلى دوران الذراع. ويقاس الدوران بمساعدة الشعاع الضوئي المنعكس.

أهمية الثابت G تسمى تجربة كافندش أحيانًا "إيجاد كتلة الأرض"؛ لأنها ساعدت على حساب كتلة الأرض. وبمعرفة قيمة الثابت G يمكن حساب كتلة الشمس أيضًا، إضافةً إلى حساب قوة الجاذبية بين أي كتلتين، وذلك بتطبيق قانون نيوتن في الجذب الكوني. فمثلاً، قوة التجاذب بين كرتي بولنج كتلة كل منهما 7.26 kg والمسافة بين مركزيهما 0.30 m يمكن حسابها على النحو الآتي:

$$F_g = \frac{(6.67 \times 10^{-11}\ \text{N.m}^2/\text{kg}^2)\ (7.26\ \text{kg})\ (7.26\ \text{kg})}{(0.30\ \text{m})^2}$$

$$F_g = 3.9 \times 10^{-8}\ \text{N}$$

وتعلم أن وزن جسم كتلته m على سطح الأرض هو مقياس لقوة جذب الأرض له $F_g = mg$. فإذا سميت كتلة الأرض m_E ونصف قطر الأرض r_E فإن:

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

وينتج عن ذلك أن

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

ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة بدلالة m_E، أي $m_E = \frac{g\, r_E^2}{\text{G}}$

وبما أن $r_E = 6.38 \times 10^6\ \text{m}$، $g = 9.80\ \text{m/s}^2$؛ وكذلك $\text{G} = 6.67 \times 10^{-11}\ \frac{\text{N.m}^2}{\text{kg}^2}$

فإننا نحصل على القيمة الآتية لكتلة الأرض:

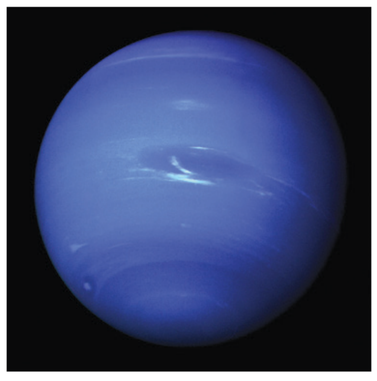
$$m_E = \frac{(9.80\ \text{m/s}^2) \times (6.38 \times 10^6\ \text{m})^2}{(6.67 \times 10^{-11}\ \text{N.m}^2/\text{kg}^2)}$$

$$= 5.98 \times 10^{24}\ \text{kg}$$

وعندما تقارن كتلة الأرض بكتلة كرة البولنج تدرك لماذا لا تظهر بوضوح قوة التجاذب بين الأجسام التي نشاهدها في حياتنا اليومية. لقد ساعدت تجربة كافندش على تحديد قيمة الثابت G، وأكدت توقعات نيوتن من حيث وجود قوة تجاذب بين أي جسمين، وساعدت أيضًا على حساب كتلة الأرض.

تحضيري

1–1 مراجعة



الشكل 8–1

6. **الزمن الدوري لنبتون** يدور نبتون حول الشمس في مدار نصف قطره $4.495 \times 10^{12}\ m$، مما يسمح للغازات– ومنها الميثان– بالتكثف وتكوين جوٍّ كما يوضحه **الشكل 8–1**. إذا كانت كتلة الشمس $1.99 \times 10^{30}\ kg$، فاحسب الزمن الدوري لنبتون.

7. **الجاذبية** إذا بدأت الأرض في الانكماش، ولكن كتلتها بقيت ثابتة، فماذا يمكن أن يحدث لقيمة تسارع الجاذبية ***g*** على سطحها؟

8. **قوة الجاذبية** ما قوة الجاذبية بين جسمين كتلة كل منهما 15 kg والمسافة بين مركزيهما 35 cm؟ وما نسبة هذه القوة إلى وزن أي منهما؟

9. **ثابت الجذب الكوني** أجرى كافندش تجربته باستعمال كرات مصنوعة من الرصاص. افترض أنه استبدل بكرات الرصاص كرات من النحاس ذات كتل متساوية فهل تكون قيمة G هي نفسها أم تختلف؟ وضح ذلك.

10. **التفكير الناقد** يحتاج رفع صخرة على سطح القمر إلى قوة أقل من التي تحتاج إليها على الأرض.
   a. كيف تؤثر قوة الجاذبية الضعيفة على سطح القمر في مسار الحجر عند قذفه أفقيًّا؟
   b. إذا سقط الحجر على إصبع شخص، فأيهما يؤذيه أكثر: سقوطه –من الارتفاع نفسه– على سطح القمر، أم على سطح الأرض؟ فسّر ذلك.

6. باستخدام قانون الزمن الدوري $T = 2\pi\sqrt{(r^3/GM)}$: $T = 2\pi\sqrt{((4.495\times10^{12}\ m)^3 / (6.67\times10^{-11}\ N\cdot m^2/kg^2 \times 1.99\times10^{30}\ kg))} \approx 5.20\times10^{9}\ s$، وهو ما يعادل 165 سنة أرضية.

7. نعم، يمكن أن تكون قيمة g ثابتة تقريبًا. لكن في الواقع، قيمة g تتغير قليلاً على سطح الأرض بسبب دورانها (مما يسبب قوة طرد مركزي تقلل الجاذبية الظاهرية) وتفلطحها عند القطبين، بالإضافة إلى الاختلافات في الكثافة من مكان لآخر.

8. القوة $F = G(m_1m_2/r^2) = (6.67\times10^{-11})(15\times15)/(0.35)^2 \approx 1.22\times10^{-7}\ N$. وزن أحد الجسمين $W = mg = 15\ kg \times 9.8\ N/kg = 147\ N$. النسبة $F/W = (1.22\times10^{-7}\ N) / (147\ N) \approx 8.3\times10^{-10}$. وهي نسبة ضئيلة جدًا.

9. لن تتغير قيمة G المقاسة. ثابت الجذب الكوني G هو ثابت كوني أساسي لا يعتمد على نوع المادة المكونة للأجسام. طالما أن الكرات النحاسية لها نفس كتلة وأبعاد كرات الرصاص، فستكون قوة الجذب بينها هي نفسها، وبالتالي ستكون نتيجة التجربة نفسها.

10. a. بسبب ضعف الجاذبية على القمر، فإن الحجر المقذوف أفقيًا سيتخذ مسارًا منحنيًا بشكل أقل حدة، وسيقطع مسافة أفقية أكبر بكثير قبل أن يرتطم بالسطح مقارنة بقذفه بنفس السرعة الابتدائية على الأرض.

10. b. السقوط على الأرض سيؤذي أكثر. لأن تسارع الجاذبية على الأرض أكبر، سيكتسب الحجر سرعة نهائية أكبر ($v^2 = 2gh$) وطاقة حركية أكبر ($KE = 1/2\ mv^2$) عند سقوطه من نفس الارتفاع، مما يسبب تأثيرًا وأذى أكبر عند الاصطدام.

2–1 استخدام قانون الجذب الكوني Using the Law of Universal Gravitation

الأهداف

- **تحل** مسائل على الحركة المداريّة.
- **تربط** انعدام الوزن مع أجسامٍ في حالة سقوطٍ حر.
- **تصف** مجال الجاذبية.
- **تقارن** بين كتلة القصور وكتلة الجاذبية.
- **تقارن** بين وجهتي نظر نيوتن وأينشتاين حول الجاذبية.

المفردات

مجال الجاذبية

كتلة القصور

كتلة الجاذبية

مبدأ التكافؤ

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

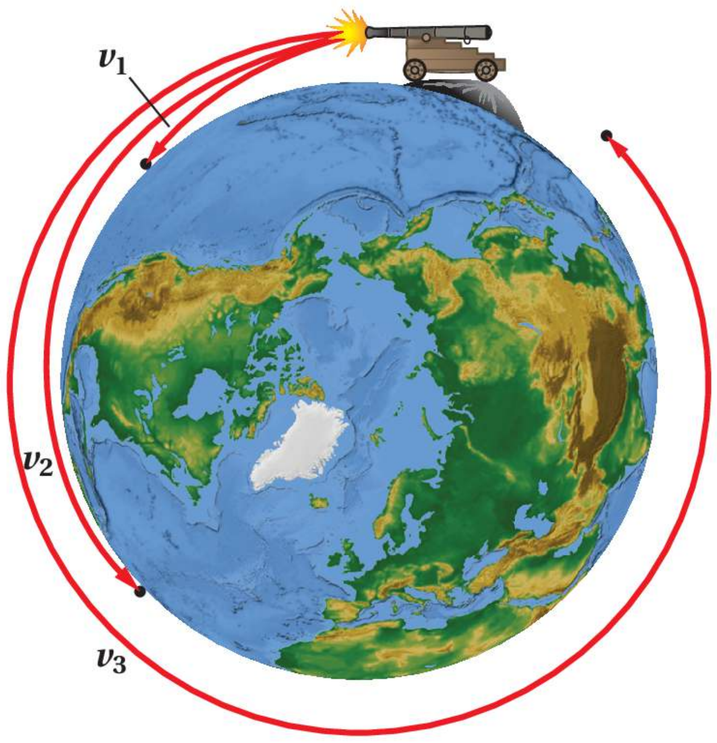
اكتُشف الكوكب أورانوس عام 1781م، وبحلول عام 1830م كان واضحًا أن مدار أورانوس الذي تم حسابه بقانون الجاذبية لا يتَّفق مع المدار الفعلي لهذا الكوكب. فاقترح عالمان فلكيان وجود كوكب آخر غير مكتشف يجذب أورانوس بالإضافة إلى جذب الشمس له. وقد قاما بحساب مدار هذا الكوكب عام 1845م، وبعد سنة أعلن فلكيون في مرصد برلين أنهم وجدوا ذلك الكوكب الذي يعرف اليوم بنبتون.

مدارات الكواكب والأقمار الاصطناعية
Orbits of Planets and Satellites

استخدم نيوتن رسمًا، كما في **الشكل 9–1**؛ ليوضح تجربة ذهنية، فتخيّل مدفعا يطلق قذيفة في اتجاه أفقي بسرعة معينة. هذه القذيفة لها سرعة أفقية وأخرى رأسية، ولذلك يكون مسارها قطعًا مكافئًا، ثم تسقط على الأرض.

إذا زادت السرعة الأفقية للقذيفة ستقطع مسافة أطول على سطح الأرض، ولكنها ستسقط في النهاية على سطحها. أما إذا كان هناك مدفع ضخم تنطلق منه القذيفة بسرعة مناسبة فإن القذيفة تسير المسافة كاملةً حول الأرض وتستمر في ذلك، أي أن القذيفة ستتحرك في مدار دائري حول الأرض.

لقد أهملت تجربة نيوتن الذهنية مقاومة الهواء المحيط بالأرض. ولكي تتخلص القذيفة من مقاومة الهواء يجب أن تُطلق من مدفع على جبل ارتفاعه أكثر من 150 km فوق سطح الأرض. وبالمقارنة فإن الجبل سيكون أعلى كثيرًا من قمة جبل إفرست التي يبلغ ارتفاعها 8.85 km. إن قذيفة تطلق من ارتفاع 150 km لن تواجه مقاومة الهواء؛ لأنها تكون خارج معظم الغلاف الجوي الأرضي. لذا فإن قذيفة أو قمرًا اصطناعيًّا عند هذا الارتفاع سيدور في مدار ثابت حول الأرض.



الشكل 9–1 السرعة الأفقية v_1 ليست كبيرة، لذا ستسقط القذيفة على الأرض. وعند سرعة أكبر v_2 فإن القذيفة تقطع مسافة أكبر. وتقطع القذيفة المسار كله حول الأرض عندما تكون السرعة v_3 كبيرة بدرجة كافية.

يتحرك القمر الاصطناعي الذي يدور على ارتفاع ثابت عن الأرض حركة دائرية منتظمة. تذكّر أن تسارعه المركزي يُعبّر عنه بالعلاقة الآتية: $\boldsymbol{a}_C = \frac{v^2}{r}$، لذا يكتب القانون الثاني لنيوتن على الصورة الآتية: $\boldsymbol{F}_{\text{محصلة}} = \frac{mv^2}{r}$. فإذا كانت كتلة الأرض m_E، ودُمج هذا القانون مع قانون نيوتن في الجذب الكوني، فإنه يُعبّر عنه بالعلاقة:

$$G\frac{m_E m}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

ولذا تحصل على مقدار سرعة القمر الاصطناعي الذي يدور حول الأرض بالعلاقة:

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

الزمن الدوري للقمر الاصطناعي مدار القمر الاصطناعي حول الأرض يشبه مدار كوكب حول الشمس. وتعلم أن الزمن الدوري للكوكب حول الشمس يُعبّر عنه بالعلاقة:

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

لذا فإن الزمن الدوري للقمر الاصطناعي حول الأرض يُعبّر عنه بالعلاقة:

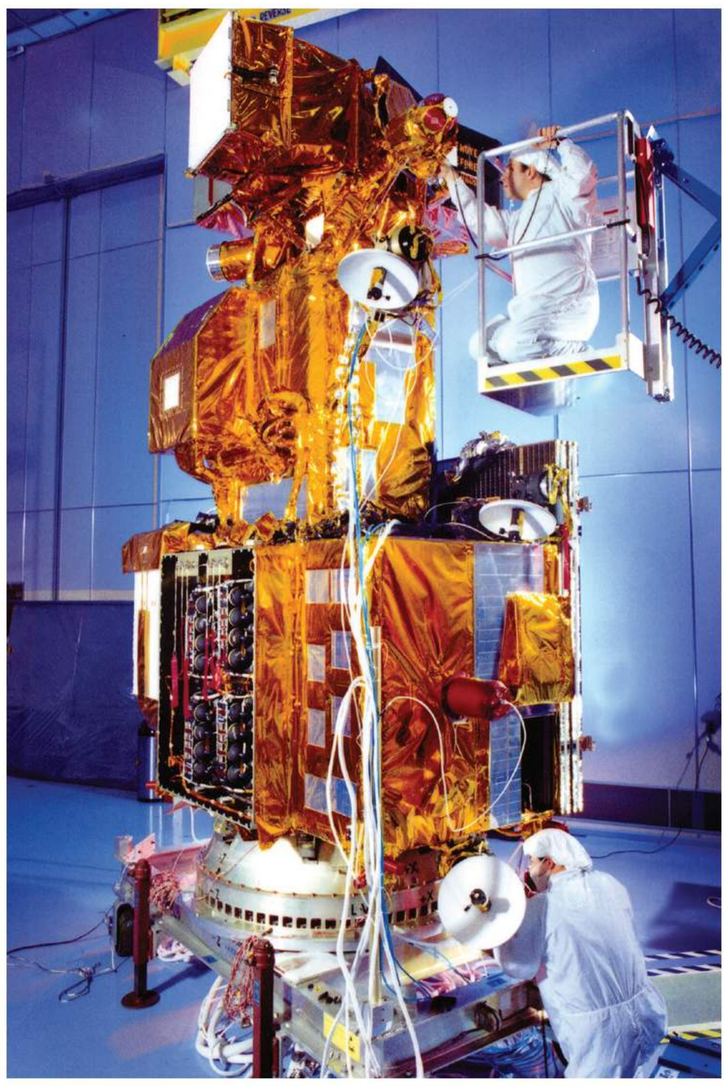
$$T=2\pi\sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

يمكن استعمال معادلتي سرعة القمر الاصطناعي وزمنه الدوري لأي جسم آخر يتحرك في مدار حول جسم ثانٍ. ويحل محل m_E في المعادلتين كتلة الجسم المركزي، وستكون r المسافةَ بين مركز الجسم الذي يتحرك في المدار ومركز الجسم المركزي. أمّا إذا كانت كتلة الجسم المركزي أكبر كثيرًا من كتلة الجسم الذي يتحرك في المدار فإن r ستكون المسافةَ بين الجسم الذي يتحرك في المدار ومركز الجسم المركزي. إن السرعة المدارية v والزمن الدوري T مستقلان عن كتلة القمر الاصطناعي. فهل هناك أي عوامل تحد من كتلة القمر الاصطناعي؟

كتلة القمر الاصطناعي يزودنا القمر الاصطناعي لاندسات 7 الموضح في الشكل 10–1 بصور سطحية للأرض، تستعمل في رسم الخرائط ودراسة الاستغلال الأمثل للأرض، كما يقوم هذا القمر بعمل مسح للمصادر الأرضية والخامات والتغيرات التي تحدث على الكرة الأرضية. ويمكن تسريع مثل هذه الأقمار باستعمال الصواريخ التي تزوِّدها بالسرعة المناسبة من أجل وضعها في مداراتها حول الأرض. ولأن تسارع أي جسم يحسب بقانون نيوتن الثاني في الحركة، $\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$، فإنه كلما زادت كتلة القمر تطلَّب ذلك صاروخًا أقوى لإيصاله إلى مداره.

تطبيق الفيزياء

المدار المتزامن مع الأرض يدور القمر الاصطناعي GOES–12 للتوقعات الجوية حول الأرض دورة كل يوم على ارتفاع 35,785 km. وتطابق السرعة المدارية للقمر معدل دوران الأرض، لذا يبدو القمر بالنسبة لمراقب على الأرض كأنه فوق بقعة معينة على خط الاستواء. ولذلك يُوجّه طبق الاستقبال على الأرض في اتجاه معين، ولا يلزم تغيير اتجاهه لالتقاط الإشارات المرسلة من القمر الاصطناعي.



الشكل 10–1 يوجّه القمر الاصطناعي لاندسات 7 عن بُعد، وكتلته 2200 kg، ويدور حول الأرض على ارتفاع 705 km.

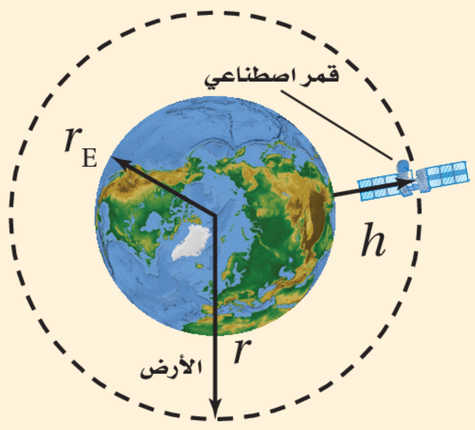
الربط مع علم الأرض

11. باستخدام المعادلة v = √(Gm/r)، وبما أن نصف القطر الجديد أكبر قليلاً (r_new = 6.61x10^6 m + 2400 m = 6.6124x10^6 m)، فإن السرعة الجديدة ستكون أقل قليلاً من السرعة الأصلية. الحساب الدقيق يعطي v ≈ 7.76x10^3 m/s، وهي سرعة أقل.

مثـــــال 2

السرعة المدارية والزمن الدوري افترض أن قمرًا اصطناعيًّا يدور حول الأرض على ارتفاع 225 km فوق سطحها. فإذا علمت أن كتلة الأرض تساوي 5.97×10^{24} kg ونصف قطر الأرض 6.38×10^{6} m، فما مقدار سرعة القمر المدارية وزمنه الدوري؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- ارسم الوضع مبينًا ارتفاع المدار.

المعلوم		المجهول
$r_E = 6.38\times10^{6}$ m	$h = 2.25\times10^{5}$ m	$v = ?$
$G = 6.67\times10^{-11}$ N.m²/kg²	$m_E = 5.97\times10^{24}$ kg	T = ?

2 إيجاد الكمية المجهولة

أوجد نصف قطر المدار بإضافة ارتفاع القمر عن الأرض إلى نصف قطر الكرة الأرضية.

$$r = h + r_E$$
$$= 2.25\times10^{5}\text{ m} + 6.38\times10^{6}\text{ m} = 6.61\times10^{6}\text{ m}$$

بالتعويض $h = 2.25\times10^{5}$ m، $r_E = 6.38\times10^{6}$ m

احسب السرعة

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}} = \sqrt{\frac{(6.67\times10^{-11}\text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97\times10^{24}\text{ kg})}{6.61\times10^{6}\text{ m}}}$$
$$= 7.76\times10^{3}\text{ m/s}$$

بالتعويض $G = 6.67\times10^{-11}$N.m²/kg² و$m_E = 5.97\times10^{24}$kg و$r = 6.61\times10^{6}$m

احسب الزمن الدوري

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G\,m_E}}$$
$$= 2\pi\sqrt{\frac{(6.61\times10^{6}\text{ m})^3}{(6.67\times10^{-11}\text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97\times10^{24}\text{ kg})}}$$
$$= 5.35\times10^{3}\text{ s}$$

بالتعويض $G = 6.67\times10^{-11}$N.m²/kg² و$m_E = 5.97\times10^{24}$kg و$r = 6.61\times10^{6}$m

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** وحدة السرعة هي m /s، ووحدة الزمن الدوري هي الثانية.

12. أ. نحسب نصف القطر المداري: r = r_E + h = 6.38x10^6 m + 1.50x10^5 m = 6.53x10^6 m. ثم نحسب السرعة: v = √(G*m_E/r) = √((6.67x10^-11 * 5.97x10^24) / 6.53x10^6) = 7.81x10^3 m/s.
ب. نحسب الزمن الدوري: T = 2π√(r^3/(G*m_E)) = 2π√((6.53x10^6)^3 / (6.67x10^-11 * 5.97x10^24)) = 5254 s، وهو ما يعادل 87.6 دقيقة.

مسائل تدريبية

افترض أن مدار الأقمار دائري عند حل المسائل الآتية:

11. افترض أن القمر في المثال الســـابق تحرك إلى مدار نصف قطره أكبر 24 km من نصف القطر الســـابق، فكم يصبح مقدار سرعته؟ وهل هذه السرعة أكبر أم أقل ممّا في المثال السابق؟

12. استعمل تجربة نيوتن الذهنية في حركة الأقمار الاصطناعية لحل ما يأتي:

a. حساب مقدار سرعة إطلاق قمر اصطناعي من مدفع بحيث يصبح في مدار يبعد 150 km عن سطح الأرض.

b. احسب الزمن الذي يستغرقه القمر الاصطناعي (بالثواني والدقائق) ليكمل دورة حول الأرض ويعود إلى المدفع.

13. استعمل البيانات المتعلقة بعطارد المعطاة في **الجدول 1–1** لإيجاد ما يأتي:

a. مقدار سرعة قمر اصطناعي في مدار على بُعد 260 km من سطح عطارد.

b. الزمن الدوري لهذا القمر

13. باستخدام بيانات عطارد (m_M = 3.30x10^23 kg, r_M = 2.44x10^6 m) من الجدول 1-1.
أ. نحسب نصف القطر المداري: r = r_M + h = 2.44x10^6 m + 2.60x10^5 m = 2.70x10^6 m. ثم نحسب السرعة: v = √(G*m_M/r) = √((6.67x10^-11 * 3.30x10^23) / 2.70x10^6) = 2.86x10^3 m/s.
ب. نحسب الزمن الدوري: T = 2π√(r^3/(G*m_M)) = 2π√((2.70x10^6)^3 / (6.67x10^-11 * 3.30x10^23)) = 5.94x10^3 s.

1. أتوقع أن الماء لن ينسكب من الثقوب أثناء سقوط الكأس سقوطًا حرًا.

2. عند إسقاط الكأس، نلاحظ أن الماء يتوقف عن التدفق من الثقوب أثناء السقوط.

تسارع الجاذبية الأرضية
Acceleration Due To Gravity

يمكن إيجاد تسارع الأجسام الناشئ عن الجاذبية الأرضية باستعمال القانون الثاني لنيوتن وقانون الجذب الكوني، وذلك من خلال تطبيق المعادلة الآتية على الجسم الذي كتلته m ويسقط سقوطًا حرًّا:

$$F = \frac{Gm_E m}{r^2} = ma$$

ولذلك فإن

$$a = \frac{Gm_E}{r^2}$$

وبما أن $a = g$ و $r = r_E$ عند سطح الأرض، لذا يمكن التعبير عن ذلك بالعلاقتين:

$$g = \frac{Gm_E}{r_E^2}$$

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

وإذا عوضنا عن m_E في العلاقة $a = \frac{Gm_E}{r^2}$ للجسم الساقط سقوطًا حرًّا سنحصل على:

$$a = G\frac{\frac{g\, r_E^2}{G}}{r^2}$$

وبالتالي فإن

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

يوضح هذا أنه كلما ابتعدت عن الأرض فإن التسارع الناتج عن الجاذبية الأرضية يقل تبعًا لعلاقة التربيع العكسي هذه. ترى، ماذا يحدث لوزنك F_g كلما ابتعدت أكثر وأكثر عن مركز الأرض؟

الوزن وانعدام الوزن من المحتمل أنك شاهدت صورًا مشابهة لتلك الموضحة في **الشكل 11–1**، حيث يظهر رواد الفضاء في مركبة فضائية في حالة تسمى (zero–g) أو انعدام الوزن. يدور المكوك على ارتفاع 400 km فوق سطح الأرض، وعند هذه المسافة يكون $g = 8.7\ \text{m/s}^2$؛ أيْ أقل قليلاً من قيمته على سطح الأرض. لذا فإن قوة الجاذبية الأرضية المؤثرة في المكوك لا تساوي صفرًا بالتأكيد. وتسبب هذه الجاذبية دوران المكوك حول الأرض. فلماذا يبدو رواد الفضاء إذًا عديمي الوزن؟

تذكّر أنك تشعر بوزنك عندما يؤثر فيك شيء بقوة تماسّ كالأرض أو الكرسي. لكن إذا كنت أنت والكرسي وأرض الغرفة، تتسارعون بالكيفية نفسها في اتجاه الأرض فإنه لا توجد قوى تماس تؤثر فيك. لذا يكون وزنك الظاهري صفرًا وتشعر بانعدام الوزن. وكذلك يشعر رواد الفضاء في المكوك.

3. عندما كانت الكأس ثابتة، كان الماء ينسكب من الثقوب. ولكن عندما سقطت الكأس سقوطًا حرًا، توقف انسكاب الماء.

تجربة

ماء عديم الوزن

يُجرى هذا النشاط خارج الفصل.

استعمل قلم رصاص لإحداث فتحتين في كأس ورقية: إحداهما في قاع الكأس والأخرى في جانبها، ثم أغلق الفتحتين بإصبعيك واملأ ثلثي الكأس بالماء الملون.

1. **توقع** ما يحدث عندما تُسقط الكأس سقوطًا حرًّا.
2. **اختبر توقعك**: أسقط الكأس، وراقب ما يحدث.

التحليل والاستنتاج

3. **صف** مشاهداتك.
4. **فسّر** النتائج.

■ **الشكل 11–1** يظهر أحد رواد الفضاء في حالة انعدام الوزن في مكوك الفضاء كولومبيا، حيث يسقط المكوك بما فيه سقوطًا حرًّا في اتجاه الأرض

4. في حالة السقوط الحر، يتسارع كل من الكأس والماء بنفس المعدل (g)، فلا يؤثر الماء بقوة ضغط على جدران الكأس، مما يجعله في حالة انعدام وزن ظاهري بالنسبة للكأس، وهذا يمنع الماء من الخروج من الثقوب.

مجال الجاذبية
The Gravitational Field

تذكر من الفصل الرابع أن الكثير من القوى هي قوى تماس. فالاحتكاك يتولد عند تلامس جسمين، ومن ذلك دفع الأرض أو الكرسي عليك. لكن الجاذبية مختلفة؛ فهي تؤثر في التفاحة التي تسقط من الشجرة، وتؤثر في القمر. أيْ أن الجاذبية تؤثر عن بُعد، وهي تعمل بين أجسام غير متلامسة، أو قد تكون بعيدة. وقد انشغل نيوتن بذلك وكان يتساءل: كيف تؤثر الشمس بقوة في الأرض البعيدة؟

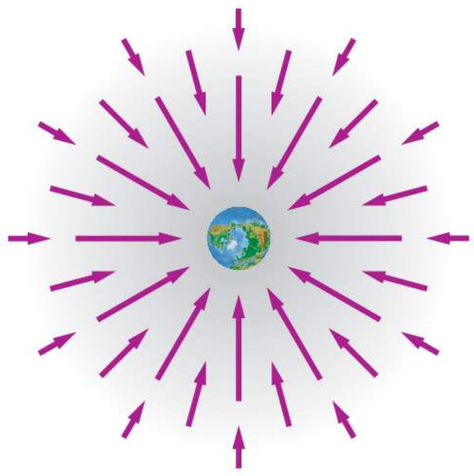
جاء الجواب عن هذا التساؤل من خلال دراسة المغناطيسية. ففي القرن التاسع عشر طوّر فارادي مفهوم المجال لتفسير كيفية جذب المغناطيس للأشياء. ثم طُبق مبدأ المجال على الجاذبية. فكل جسم له كتلة محاط **بمجال جاذبي** يؤثر من خلاله بقوة في أي جسم آخر يوجد في ذلك المجال نتيجة التفاعل المتبادل بين كتلته والمجال الجاذبي **g**. ويوصف ذلك بالمعادلة الآتية:

المجال الجاذبي $$g = \frac{GM}{r^2}$$

المجال الجاذبي يساوي ثابت الجذب الكوني مضروبًا في كتلة الجسم، مقسومًا على مربع البعد عن مركز الجسم. ويكون اتجاهه في اتجاه مركز الكتلة.

افترض أن هناك مجالاً جاذبيًّا ناتجًا عن الشمس، فإن أي كوكب كتلته m سيخضع لقوة تؤثر فيه، تعتمد على كتلة الكوكب ومقدار المجال في ذلك المكان؛ أيْ $\boldsymbol{F = mg}$ في اتجاه الشمس.

تنتج القوة بسبب تفاعل كتلة الكوكب مع المجال الجاذبي في مكان وجود الكوكب وليس مع الشمس نفسها التي تبعد ملايين الكيلومترات. وإذا أردنا إيجاد المجال الجاذبي الذي يسببه أكثر من جسم فيجب حساب المجال الجاذبي لكل جسم، ثم تُجْمع جمعًا اتجاهيًّا. ويمكن حساب مجال الجاذبية بوضع جسم كتلته m في المجال، ثم تقاس القوة المؤثرة فيه، وتقسم القوة F على الكتلة m، كما في العلاقة الآتية: $g = F/m$، حيث يُقاس المجال الجاذبي بوحدة N/kg التي تساوي أيضًا m/s^2 .



الشكل 12–1 تشير كل المتجهات الممثلة لمجال الجاذبية إلى اتجاه مركز الأرض. ويضعف المجال كلما ابتعدنا عن الأرض.

إن شدة المجال الجاذبي عند سطح الأرض تساوي 9.80 N/kg في اتجاه مركز الأرض. ويمكن تمثيل المجال بمتجه طوله g يشير إلى مركز الجسم الذي يُنتج هذا المجال. ويمكنك تصور مجال الأرض بمجموعة من المتجهات تحيط بالأرض وتشير إلى مركزها، **الشكل 12–1**. ويتناسب المجال عكسيًّا مع مربع البعد عن مركز الأرض، كما يعتمد على كتلة الأرض لا على كتلة الجسم.

نوعا الكتلة

Two Kinds of Mass

لقد درست سابقًا مفهوم الكتلة وتم تعريف ميل المنحنى في الرسم البياني للتسارع – القوة أنه مقلوب الكتلة ، ويعبر عنه بالعلاقة $k=\frac{1}{m}$. ومن العلاقة الخطية بين القوة والتسارع تم التوصل إلى أن: $a \propto F$، ومنها $a=kF$، ومن ثم فإن $a=\frac{1}{m}F$، ولذا فإن $m=\frac{F}{a}$؛ أيْ أن الكتلة هي نسبة مقدار القوة المحصلة المؤثرة في جسم ما إلى مقدار تسارعه. ويسمى هذا النوع من الكتلة المرتبط بقصور الجسم **كتلة القصور**، وتُمثل بالمعادلة:

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

كتلة القصور تساوي مقدار القوة المحصلة المؤثرة في الجسم مقسومة على مقدار تسارعه.

تُقاس كتلة القصور بالتأثير بقوة في الجسم ثم قياس تسارعه باستعمال ميزان القصور، ومنها الميزان الموضح في **الشكل 13–1**. وكلما كانت كتلة الجسم أكبر كان الجسم أقل تأثرًا بأي قوة، لذا يكون تسارعه أقل. وتُعد كتلة القصور مقياسًا لممانعة أو مقاومة الجسم لأي نوع من أنواع القوى المؤثرة فيه.

يحتوي قانون نيوتن في الجذب الكوني على كتلة، غير أنها نوع آخر من الكتل. وتحدد الكتلة المستعملة في هذا القانون مقدار قوة الجاذبية بين جسمين، وتسمى **كتلة الجاذبية**. ويمكن

تجربة عملية

هل كتلة القصور تساوي كتلة الجاذبية؟

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية

■ **الشكل 13–1** يُمكِّنك ميزان القصور من حساب كتلة القصور لجسم ما من خلال الزمن الدوري T لحركة الذهاب والإياب للجسم. وتستعمل كتل معايرة كما في الشكل للحصول على منحنى بين T^2 والكتلة، ثم يقاس الزمن الدوري للكتلة المجهولة التي يمكن معرفتها من الرسم.

الشكل 14–1 يُمكِّننا الميزان ذو الكفتين المبين في الشكل من قياس كتل الأجسام؛ وذلك بمقارنة قوة جذب الأرض لها بقوة جذبها لكتل معيارية.

يمكن قياس كتلة الجاذبية باستخدام ميزان ذي كفتين، حيث تتم مقارنة قوة الجاذبية المؤثرة في الجسم بقوة الجاذبية المؤثرة في كتل معيارية معروفة. ويمكن قياس كتلة القصور عن طريق تطبيق قوة معروفة على الجسم وقياس تسارعه الناتج ثم استخدام قانون نيوتن الثاني ($m = F/a$).

تجربة عملية

كيف تقيس الكتلة؟

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية

قياسها باستعمال الميزان ذي الكفتين كما في **الشكل 14–1**. فإذا قِسْتَ قوة الجذب المؤثرة في جسم من جسم آخر كتلته m، وعلى بُعد r أمكنك تعريف كتلة الجاذبية بالطريقة الآتية:

كتلة الجاذبية

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

كتلة الجاذبية لجسم ما تساوي مربع المسافة بين الجسمين مضروبة في مقدار قوة الجاذبية بين الجسمين مقسومة على حاصل ضرب ثابت الجذب الكوني في كتلة الجسم الثاني.

الشكل 15–1 التطورات التي شهدها علم الفلك حول حركة الكواكب والجاذبية.

600

في نحو عام 370 ق.م صمم الإغريق نظامًا ميكانيكيًّا لشرح حركات الكواكب. اقترح يودوكسوس أن الكواكب والشمس والقمر والنجوم تدور كلها حول الأرض. وفي القرن الرابع قبل الميلاد أدخل أرسطو هذه النظرية الهندسية، وهي نظرية مركزية الأرض، في نظامه الفلسفي.

1400

اهتم المسلمون بدراسة علم الفلك، لمعرفة أوقات الصلاة بحسب الموقع الجغرافي والفصل الموسمي، وتحديد اتجاه القبلة، ورؤية هلال رمضان، واخترعوا حسابات وطرائق بديعة لم يسبقهم إليها أحد. ويعود إلى المسلمين فضل تخليص علم الفلك من الشعوذة والدجل وجعله علمًا خالصًا يعتمد على النظريّة والبرهان.

في عام 1543 م في عصر النهضة الأوربية، قدم نيكولاس كوبرنيكس نموذج مركزية الشمس؛ حيث تدور الكواكب حول الشمس، لا حول الأرض.

كيــف يختلف نوعا الكتلتــين؟ إذا كان لديك بطيخة في أرضية صندوق ســيارتك، فإذا تسارعت الســيارة في اتجاه الأمام فإن البطيخة ستتدحرج إلى الخلف بالنسبة إلى السيارة، وهذا بسبب كتلة قصور البطيخة التي تقاوم التسارع، وإذا بدأت السيارة بصعود منحدر ، فإن البطيخة ســتتتدحرج إلى الخلف مرة أخرى ولكنها ستنجذب هذه المرة بسبب كتلة الجاذبية إلى أســفل في اتجاه الأرض. وقد أعلــن نيوتن أن كتلة القصــور وكتلة الجاذبية متساويتان من حيث المقدار. ويسمى هذا **مبدأ التكافؤ**. وكل التجارب التي أُجريت حتى الآن توصلــت إلى نتائج تدعم صحة هذا المبدأ. وكان العالم ألبرت أينشــتاين أيضًا مهتمًّا بمبدأ التكافؤ وجعله نقطة رئيسة في نظريته عن الجاذبية. ويبين **الشكل 15–1** التطورات التي شهدها علم الفلك حول حركة الكواكب والجاذبية.

نظرية أينشتاين في الجاذبية
Einstein's Theory of Gravity

يمكِّننا قانون نيوتن في الجذب الكوني من حساب قوة الجاذبية المتبادلة بين جسمين بسبب كتلتيهما.

إن مفهوم مجال الجاذبية يتيح لنا تصور طريقة تأثير الجاذبية في الأجسام عندما تكون بعيدة بعضها عن بعض. افترض أينشــتاين أن الجاذبية ليست مجرد قوة، بل هي تأثير من الفضاء نفسه، وبناءً على فرضية أينشــتاين فإن الكتل تغير الفضاء (الزمكان) المحيط بها، فتجعله منحنيًا، وتتسارع الأجسام الأخرى بسبب الطريقة التي تسير بها في هذا الفضاء المنحني.

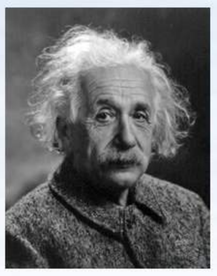
فاز ثلاثة علــماء أمريكيين بجائزة نوبــل في الفيزياء لعــام 2017 تقديرا لإســهاماتهم الحاســمة في رصد موجــات الجاذبيــة، وهي تموجات في نسيج الزَّمْكان تنبأت بها النظرية النسبية العامة لألبرت أينشتاين.

1600

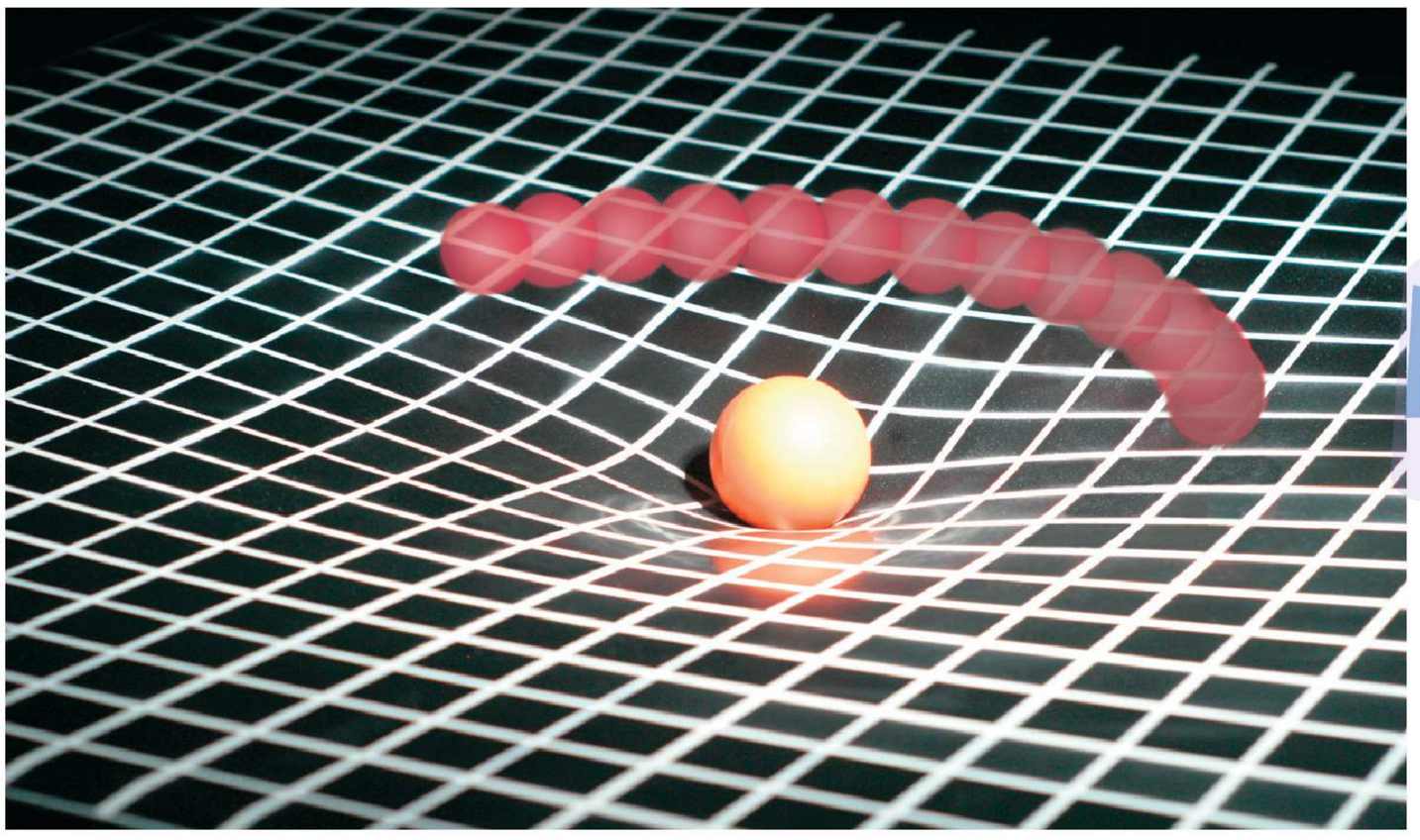
يعد كبلر أول من وضع نظامًا لوصف تفاصيل حركــة الكواكب حــول الشــمس في مدارات إهليلجيــة. ورغم ذلك، لم ينجح كبلر في صياغة نظرية تدعم القوانين التي سجّلها.

قدم نيوتن قانــون الجاذبية العــام ليفسّر حركة الكواكب، واستطاع تفســير الإشكالات التي لم تستطع قوانين كبلر تفسيرها.

1900



النظرية النســبية العامة هي نظرية هندسية للجاذبية، نشرها ألبرت أينشــتاين عــام 1916 م، وتمثّــل الوصف الحالي للجاذبيــة في الفيزياء الحديثــة، وذلك بتعميمها للنســبية الخاصة وقانون الجذب العام لنيوتن، وإعطاء وصف موحّد للجاذبية كخاصية هندسية للمكان والزمان، أو الزَّمْكان.



■ **الشكل 16–1** تسبب المادة انحناء الفضاء (الزمكان) تماما كما يؤثر جسم في شبك مطاطي حوله. الأجسام المتحركة بالقرب من الكتلة تسلك مسارًا منحنيًا في الفضاء. تتحرك الكرة الحمراء في اتجاه حركة عقارب الساعة حول الكتلة المركزية.

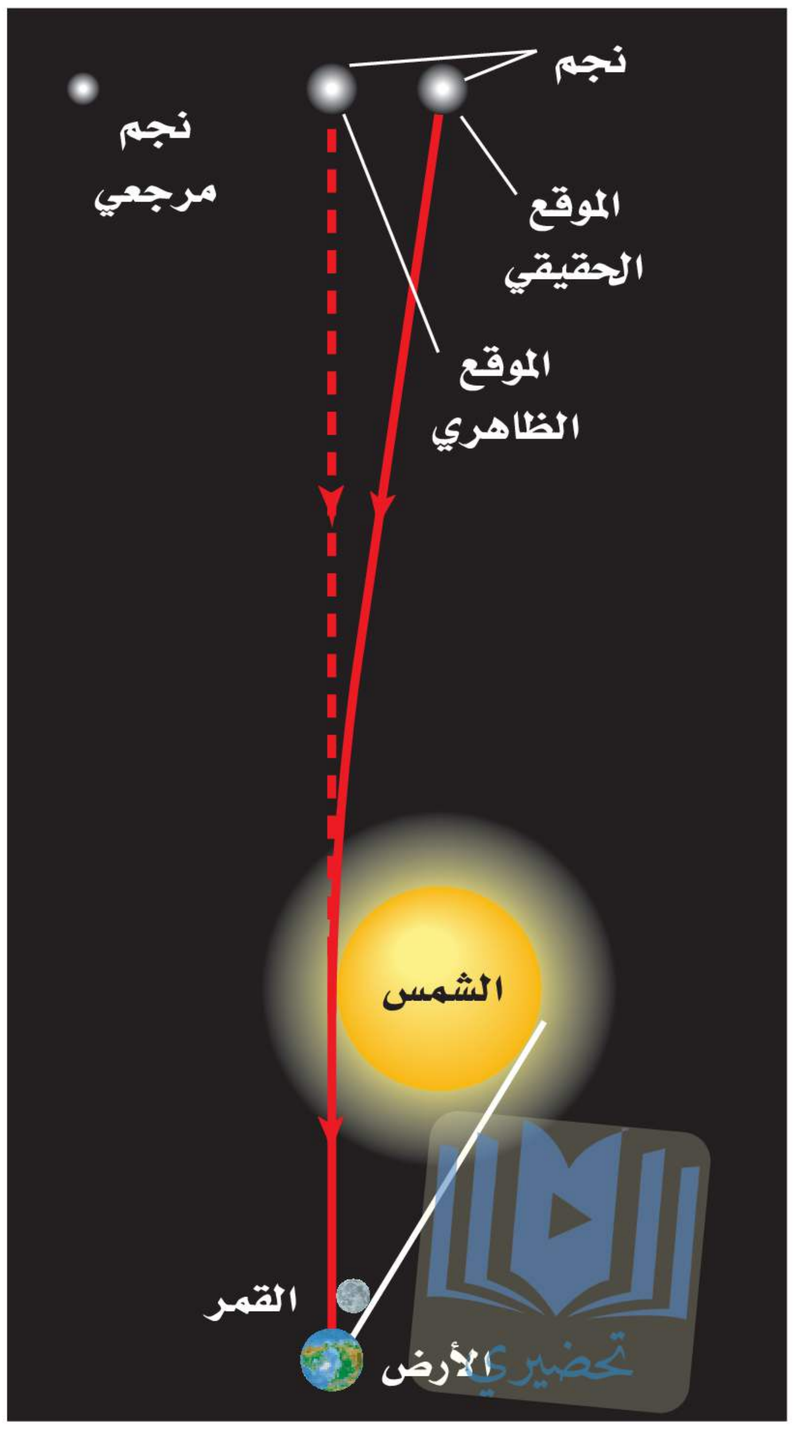
من طُرق تصور كيفية تأثر الفضاء بالكتلة، مقارنة الفضاء بشبكة كبيرة من المطاط ثنائية الأبعاد، كما هو موضح في **الشكل 16– 1**، حيث تمثل الكرة الصفراء جسمًا كتلته كبيرة جدًّا على الشبكة، وهي تسبب الانحناء. والكرة الحمراء تدور عبر الشبكة، وتحاكي حركة كوكب حول نجم في الفضاء (الزمكان).

تتسارع الكرة الحمراء عندما تتحرك بالقرب من المنطقة المنحنية من الشبكة. وبالطريقة نفسها فإن كلًّا من الشمس والأرض تجذب الأخرى؛ بسبب طريقة تشوه الفضاء الناجم عن الجسمين.

وقد تنبأت نظرية أينشتاين ـ التي تسمى النظرية النسبية العامة ـ بعدة تنبؤات حول كيفية تأثير الأجسام ذات الكتل الكبيرة بعضها في بعض. وقد أعطت نتائج صحيحة لكل الاختبارات التي أجريت في الفترات اللاحقة.

انحراف الضوء تنبأت نظرية أينشتاين بانحراف الضوء عند مروره بالقرب من أجسام ذات كتل كبيرة جدًّا، حيث يتبع الضوء الفضاء المنحني حول الأجسام ذات الكتل الكبيرة مما يؤدي إلى انحنائه، كما هو موضح في **الشكل 17 –1**.

لاحظ علماء الفلك في أثناء كسوف الشمس سنة 1919م أن الضوء القادم من النجوم البعيدة، الذي يمر بالقرب من الشمس، قد انحرف عن مساره بما يحقق تنبؤات أينشتاين.



■ **الشكل 17–1** الضوء القادم من النجوم البعيدة يتأثر بمجال جاذبية الشمس. الرسم للتوضيح ولا يمثل مقياس رسم حقيقي.

ومن نتائج النسبية العامة أيضًا تأثير الأجسام ذات الكتل الكبيرة في الضوء. فإذا كانت كتلة الجسم كبيرة جدًّا وكثافته كبيرة بشكل كاف فإن الضوء الخارج

منه يرتدّ إليه بشـــكل كامل، وبذلك لا يستطيع الضوء الخروج منه أبدًا. وتسمى مثل هذه الأجســـام الثقوب السوداء. ويســـتدل على وجودها من خلال تأثيرها في النجوم القريبة منها. كما يُستفاد من الأشعة الناتجة عن انجذاب المادة إلى الثقوب السوداء وسقوطها فيها في تحديد هذه الثقوب والكشف عن أماكن وجودها.

وعلى الرغم من أن نظرية أينشتاين تنبأت بشكل دقيق في تأثيرات الجاذبية، إلا أنها لا تزال غير مكتملـــة؛ فهي لا توضح أصل الكتلة، ولا كيف تعمـــل الكتلة على تحدب (انحناء) الفضاء. ويعمل الفيزيائيون على فهم الجاذبية وأصل الكتلة نفسها بشكل أعمق.

2–1 مراجعة

14. مجالات الجاذبية يبعد القمر مسافة 3.9×10^{5} km عن مركز الأرض، في حين يبعد 1.5×10^{8} km عن مركز الشمس. وكتلتا الأرض والشمس 6.0×10^{24} kg، و 2.0×10^{30} kg على الترتيب.

a. أوجد النسبة بين مجال جاذبية الأرض وبين مجال جاذبية الشمس عند مركز القمر.

b. عندما يكون القمر في طـــور ربعه الثالث (ليلة 21 في الشهر)، **الشـــكل 18–1**، يكون اتجاهه بالنســـبة إلى الأرض عموديًّا على اتجاه الأرض بالنسبة إلى الشـــمس. ما محصلة المجال الجاذبي للأرض والشمس عند مركز القمر؟

القمر

الشمس

الأرض

الشكل 18–1

15. مجال الجاذبية كتلة القمر 7.3×10^{22} kg ونصف قطـــره 1785 km، ما شـــدة مجـــال الجاذبية على سطحه؟

16. الزمن الـدوري والسـرعة قمـــران اصطناعيـــان في مداريـــن دائريـــين حـــول الأرض؛ يبعد الأول 150 km عن سطح الأرض، والثاني 160 km.

a. أي القمرين له زمن دوري أكبر؟

b. أي القمرين سرعته أكبر؟

17. حالـة انعـدام الـوزن تكـــون المقاعـــد داخل محطة الفضاء عديمة الوزن. إذا كنت على متن إحدى هذه المحطات وكنت حافي القدمين فهل تشعر بالألم إذا ركلت كرسيًّا؟ فسر ذلك.

18. التفكير الناقد لمـــاذا يُعد إطلاق قمر اصطناعي من الأرض إلى مدار ليدور في اتجاه الشرق أســـهل من إطلاقه ليدور في اتجاه الغرب؟ وضّح.

14. أ. مجال جاذبية الأرض عند القمر: $g_E = G*m_E/r_{ME}^2 \approx 0.0026$ N/kg. مجال جاذبية الشمس عند القمر: $g_S = G*m_S/r_{MS}^2 \approx 0.0059$ N/kg. النسبة هي $g_E/g_S \approx 0.44$.

ب. بما أن المجالين متعامدان، فإن المحصلة $g_{net} = \sqrt{(g_E^2 + g_S^2)} = \sqrt{((0.0026)^2 + (0.0059)^2)} \approx 0.0065$ N/kg.

15. شدة مجال الجاذبية على سطح القمر $g = G*m_{moon}/r_{moon}^2 = (6.67\times10^{-11} * 7.3\times10^{22}) / (1.785\times10^{6})^2 \approx 1.53$ N/kg.

16. أ. القمر الثاني (الأبعد عن الأرض) له زمن دوري أكبر؛ لأن الزمن الدوري يتناسب طرديًا مع $r^{(3/2)}$.

ب. القمر الأول (الأقرب إلى الأرض) سرعته أكبر؛ لأن السرعة المدارية تتناسب عكسيًا مع $\sqrt{r}$.

17. نعم، سأشعر بالألم. انعدام الوزن الظاهري لا يلغي كتلة القصور للكرسي. وفقًا لمبدأ الفعل ورد الفعل، عندما أركل الكرسي فإنه يؤثر على قدمي بقوة مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه، مما يسبب الألم.

18. تدور الأرض شرقًا، مما يمنح أي جسم على سطحها سرعة ابتدائية في هذا الاتجاه. إطلاق قمر اصطناعي شرقًا يستفيد من هذه السرعة الابتدائية، مما يقلل من كمية الوقود اللازمة للوصول إلى السرعة المدارية. أما الإطلاق غربًا فيتطلب التغلب على هذه السرعة الابتدائية أولاً، مما يتطلب طاقة ووقودًا أكبر بكثير.

تجربة استهلالية

كيف يتزن الجسم دورانيًّا؟

سؤال التجربة هل يمكن جعل مسطرة معلّقة من منتصفها في حالة اتزان دوراني عند تعليق أثقال مختلفة على جانبيها؟

الخطوات

1. ستحتاج في هذه التجربة إلى: مسطرة مترية خشبية، وشريط قياس متري، وأثقال مختلفة، وخيوط، ومقص.
2. علّق المسطرة من منتصفها على حامل رأسي، بحيث يمكن تدويرها حول نقطة التعليق. واربط كل ثقل من الأثقال بخيط.
3. علّق ثقلًا على أحد جانبي المسطرة، وقس بعده عن نقطة التعليق وسجله.
4. علّق ثقلًا آخر مختلفًا على الجانب الآخر للمسطرة، بحيث تجعلها تتزن أفقيًّا ولا تدور، وقس بُعده عن نقطة التثبيت، وسجله.
5. كرّر الخطوتين 3 و4 بتعليق أثقال مختلفة.

التحليل

أوجد حاصل ضرب كل قوة (وزن الثقل) في بُعدها عن نقطة التعليق (محور الدوران). قارن بين بيانات كل محاولة، هل تأخذ هذه البيانات نمطًا محددًا؟ وضح ذلك

التفكير الناقد ما شرط اتزان جسم دورانيًّا؟

التحليل: لجعل النظام متزنًا، فإن حاصل ضرب القوة في بعدها عن محور الدوران (العزم) يجب أن يكون متساويًا على طرفي المسطرة. النمط هو أن العزم اللازم لتحقيق الاتزان ثابت.

التفكير الناقد: شرط اتزان جسم دورانيًا هو أن يكون صافي (محصلة) العزوم المؤثرة عليه يساوي صفرًا.

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

1–2 وصف الحركة الدورانية Describing Rotational Motion

لا بدَّ أنك لاحظت كثيرًا من الأجسام التي تتحرك حركة دورانية. فكيف تقيس الحركة الدورانية لهذه الأجسام؟ خذ جسمًا دائريًّا كقرص CD مثلًا، وضع إشارتين: إحداهما على القرص، والأخرى في المكان الذي تحدِّدُ فيه نقطة البداية. ثم دوّر القرص إلى اليسار (في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة)، وراقب موضع العلامة. وعندما تعود الإشارة إلى نقطة البداية يكون القرص قد أكمل دورة كاملة واحدة. ولكن كيف تقيس جزءًا من الدورة؟ هناك وحدات مختلفة لقياس زوايا الدوران، منها وحدة الدرجة التي تعادل $\frac{1}{360}$ من الدورة الكاملة. وهناك وحدة أخرى تُستعمل كثيرًا في الرياضيات والفيزياء لقياس زوايا الدوران، وهي وحدة **الراديان**؛ فعندما يُتم قرصٌ دورةً كاملة فإن أي نقطة واقعة على حافته تقطع مسافة تساوي 2π مضروبة في نصف قطر القرص. لذا يُعرّف الراديان (radian) بأنه $\frac{1}{2\pi}$ من الدورة الكاملة (Revolution)، أيْ أن الدورة الكاملة تساوي 2π radians. ويرمز إلى الراديان بالرمز rad .

الأهداف

- تصف الإزاحة الزاويّة.
- تحسب السرعة الزاويّة المتجهة.
- تحسب التسارع الزاويّ.
- تحل مسائل تتعلق بالحركة الدورانية.

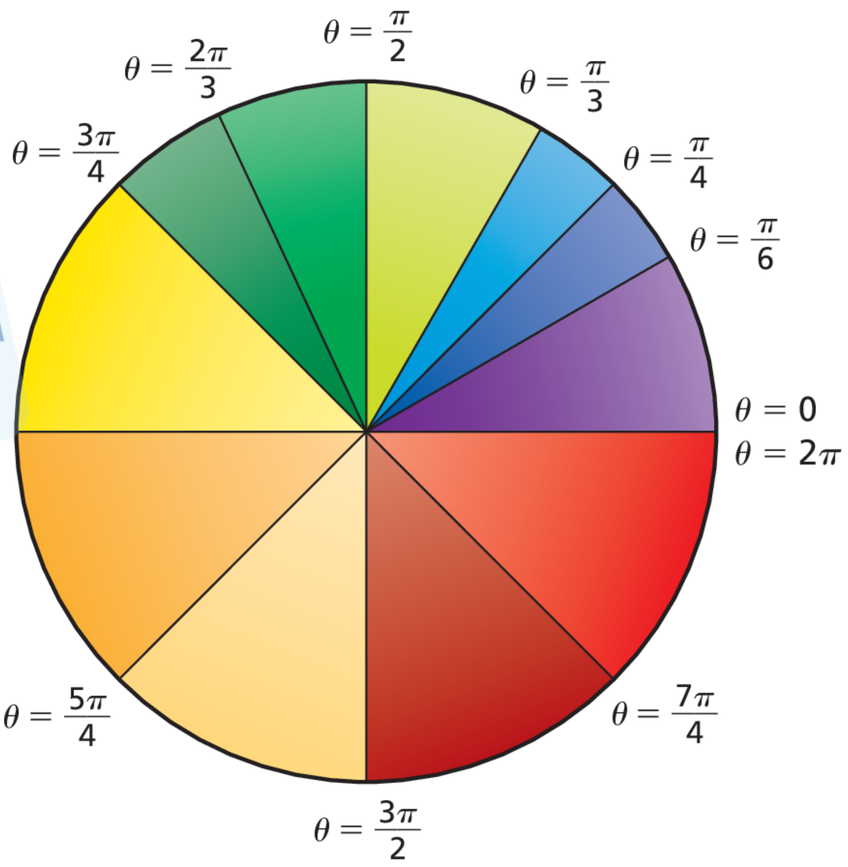
المفردات

الراديان

الإزاحة الزاويّة

السرعة الزاويّة المتجهة

التسارع الزاويّ



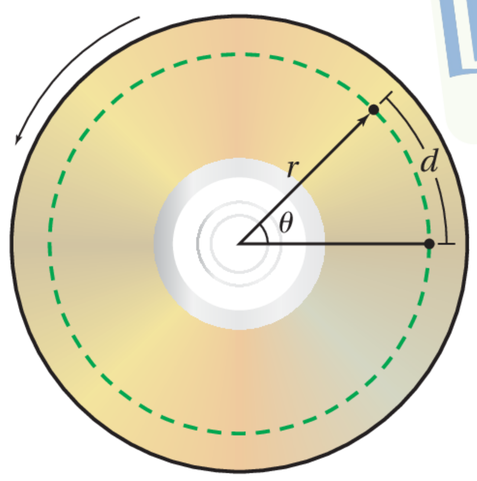
الشكل 1–2 يبين الرسم تمثيل بياني بالقطاع الدائري قياس الراديان لمعظم الزوايا الشهيرة مقيسة في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة، وكل زاوية مقيسة من الزاوية $\theta = 0$.

الإزاحة الزاويّة Angular Displacement

يبين **الشكل 1 – 2** القياس بالراديان لمعظم الزوايا الشهيرة، والتي تمثل أجزاء من الدورة الكاملة، ويرمز لزاوية الدوران بالرمز θ (ثيتا). وقد اعتُبِرَ أن اتجاه الدوران في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة يُعدّ موجبًا، ويعد سالبًا إذا كان في اتجاه حركة عقارب الساعة. أما التغير في الزاوية في أثناء دوران الجسم فيسمى **الإزاحة الزاويّة**.

تدور الأرض حول محورها دورة واحدة كل يوم، أي 2π rad في 24 h، وتدور π rad في 12 h. فما زاوية دوران الأرض خلال 6 h؟ بما أن 6 h تمثل ربع اليوم، فإن الأرض تدور بزاوية ($\frac{\pi}{2}$ rad) خلال هذه الفترة. ويُعد دوران الأرض كما يُرى من القطب الشمالي موجبًا، فهل يكون دوران الأرض موجبًا أم سالبًا أيضًا عندما تُشاهده من القطب الجنوبي؟

ما المسافة التي تتحركها نقطة واقعة على جسم يدور؟ عندما يُتم الجسم الدوار دورة كاملة فإن النقطة الواقعة على حافته تتحرك مسافة تساوي 2π مضروبة في نصف قطر الجسم. فإذا دارت نقطة على بعد r من المركز بزاوية θ، كما في الشكل **2 – 2**، فإن المسافة التي تتحركها النقطة يُعبّر عنها بالعلاقة $d = r\,\theta$. والبعض يظن أنه إذا قيست r بالمتر فإن ذلك يجعل d مقيسة بوحدة m.rad، وهذا ليس صحيحًا؛ فالراديان يمثل النسبة بين d و r، لذا تقاس d بوحدة m.



الشكل 2–2 يمثل الخط المنقط المسار الذي تسلكه نقطة على CD عندما يدور الـ CD في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول مركزه.

السرعة الزاويّة المتجهة Angular Velocity

ما سرعة دوران قرص الـ CD؟ وكيف تُحدّد مقدار سرعته الدورانية؟ تعرف أن السرعة هي ناتج قسمة الإزاحة على الزمن الذي يتطلبه حدوث الإزاحة. وبالمثل، فإن **السرعة الزاويّة المتجهة** لجسم هي ناتج قسمة الإزاحة الزاويّة على الزمن الذي يتطلبه حدوث

هذه الإزاحة. لذا يُعبر عن السرعة الزاويّة المتجهة ω بالمعادلة الآتية:

السرعة الزاويّة المتجهة $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$

"السرعة الزاويّة المتجهة تساوي الإزاحة الزاوية مقسومة على الزمن الذي يتطلبه حدوث الدوران".

عندما تتغير السرعة المتجهة خلال فترة زمنية معينة فإن السرعة المتجهة المتوسطة لا تساوي السرعة المتجهة اللحظية عند كل لحظة خلال تلك الفترة. وينطبق الأمر نفسه على حساب السرعة الزاويه المتجهة؛ فعند حساب السرعة الزاويه المتجهة المتوسطة خلال فترة زمنية Δt فإننا نكون قد حسبنا السرعة الزاوية المتجهة المتوسطة خلال تلك الفترة. أما السرعة الزاوية المتجهة اللحظية فتساوي ميل المنحنى للعلاقة بين الموقع الزاوي والزمن. تقاس السرعة الزاوية المتجهة بوحدة rad /s . تكون السرعة الزاوية للأرض مثلاً

$$\omega_E = (2\,\pi \text{ rad}) \;/\; (24.0 \text{ h})\,(3600 \text{ s /h}) = 7.27\times10^{-5} \text{ rad /s}$$

إن الدوران في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة يجعل الإزاحة الزاوية موجبة، ويجعل السرعة الزاوية المتجهة موجبة أيضًا. فإذا كانت السرعة الزاوية المتجهة لجسم ما ω فإن السرعة الخطية المتجهة v لنقطة على بعد r من محور الدوران تساوي $v = r\,\omega$، ويعبر عن مقدار سرعة جسم على خط الاستواء يتحرك نتيجة دوران الأرض بالعلاقة: $v = r\,\omega = (6.38\times10^{6} \text{ m})\,(7.27\times10^{-5} \text{ rad /s}) = 464 \text{ m /s}$

وتُعد الأرض مثالاً على حركة جسم صلب حركة دورانية. وعلى الرغم من أن النقاط المختلفة على الأرض تقطع مسافات مختلفة في كل دورة، إلا أن هذه النقاط جميعها تدور خلال الزاوية نفسها، وكل أجزاء الجسم الصلب تدور بالمعدل نفسه. أما الشمس فليست جسمًا صلبًا، لذا تدور الأجزاء المختلفة منها بمعدلات مختلفة. وستدرس في هذا الفصل دوران الأجسام الصلبة.

الربط مع الفلك

التسارع الزاويّ Angular Acceleration

ماذا لو تغيرت السرعة الزاويّة المتجهة؟ إذا تسارعت سيارة مثلاً من 0.0 m /s إلى 25 m /s خلال 15.0 s، وكان نصف قطر إطاراتها 32 cm فإن السرعة الزاوية المتجهة لإطارات السيارة تتغير أيضًا من 0.0 rad /s إلى 78 rad /s خلال الفترة الزمنية نفسها. أيْ يكون لإطارات السيارة **تسارع زاويّ** يُعرّف بأنه التغير في السرعة الزاويّة المتجهة مقسومًا على الزمن الضروري لحدوث هذا التغير، وعمومًا يعبَّر عن التسارع الزاوي α بالعلاقة:

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

التسارع الزاوي يساوي التغير في السرعة الزاوية المتجهة مقسومًا على الفترة الزمنية التي حدث خلالها هذا التغير.

ويقاس التسارع الزاوي بوحدة rad/s^2، فإذا كان التغير في السرعة الزاوية المتجهة موجبًا كان التسارع الزاوي موجبًا أيضًا. إن التسارع الزاوي المعبر عنه بهذه العلاقة هو نفسه التسارع الزاوي المتوسط خلال الفترة الزمنية Δt. ومن طرائق حساب التسارع الزاوي اللحظي إيجاد ميل العلاقة البيانية بين السرعة الزاوية المتجهة والزمن. ويمكن حساب التسارع الخطي لنقطة على بعد r من محور جسم إذا علم تسارعه الزاوي α، وفقًا للعلاقة $a = r\alpha$. والجدول 1–2 يبين ملخص العلاقات بين الكميّات الخطية والزاوية.

الجدول 1–2

قياسات خطية وزاويّة

الكمية	الخطّيّة	الزاويّة	العلاقة
الإزاحة	d (m)	θ (rad)	$d = r\theta$
السرعة المتجهة	v (m/s)	ω (rad/s)	$v = r\omega$
التسارع	a (m/s^2)	α (rad/s^2)	$a = r\alpha$

مسائل تدريبية

1. ما الإزاحة الزاويّة لعقارب ساعة يد خلال 1 h؟ اكتب إجابتك بثلاثة أرقام معنوية، وذلك لـ:
   a. عقرب الثواني
   b. عقرب الدقائق
   c. عقرب الساعات.
2. إذا كان التسارع الخطي لعربة نقل $1.85\ m/s^2$، والتسارع الزاوي لإطاراتها $5.23\ rad/s^2$ فما قطر الإطار الواحد للعربة؟
3. إذا كانت العربة التي في السؤال السابق تسحب قاطرة قطر كل من إطاراتها 48 cm، قارن بين:
   a. التسارع الخطي للقاطرة والتسارع الخطي للعربة.
   b. التسارع الزاوي للقاطرة والتسارع الزاوي للعربة.
4. إذا استبدلت بإطارات سيارتك إطارات أخرى قطرها أكبر فكيف تتغير السرعة الزاوية المتجهة وعدد الدورات إذا قمت بالرحلة نفسها، وقطعت المسافة نفسها ملتزمًا بالسرعة الخطية نفسها؟

.1

a. الإزاحة الزاوية لعقرب الثواني: $\Delta\theta$
$= -60\ rev \times (2\pi\ rad/rev) = -120\pi\ rad \approx -377\ rad.$

b. الإزاحة الزاوية لعقرب الدقائق: $\Delta\theta$
$= -1\ rev \times (2\pi\ rad/rev) = -2\pi\ rad \approx -6.28\ rad.$

c. الإزاحة الزاوية لعقرب الساعات: $\Delta\theta$
$= -(1/12)\ rev \times (2\pi\ rad/rev) = -\pi/6\ rad \approx -0.524\ rad.$

2. باستخدام العلاقة $a = r\alpha$، يكون نصف القطر $r = a/\alpha = (1.85\ m/s^2)/(5.23\ rad/s^2) \approx 0.354\ m$. وعليه، فإن القطر $d = 2r = 2 \times 0.354\ m \approx 0.707\ m$.

.3

a. التسارع الخطي للقاطرة والعربة متساوٍ ($a = 1.85\ m/s^2$) لأنهما تتحركان معًا كوحدة واحدة.

b. التسارع الزاوي لإطارات القاطرة ($\alpha = a/r = 1.85/0.24 \approx 7.71\ rad/s^2$) أكبر من التسارع الزاوي لإطارات العربة ($5.23\ rad/s^2$) لأن نصف قطر إطاراتها أصغر.

4. عند استخدام إطارات ذات قطر أكبر (نصف قطر أكبر)، ستقل السرعة الزاوية المتجهة ($\omega = v/r$) وكذلك سيقل عدد الدورات ($\Delta\theta/2\pi$) اللازمة لقطع نفس المسافة بنفس السرعة الخطية.

التردد الزاوي يُكمل الجسم المتحرك حركة دورانية عدة دورات خلال فترة زمنية محددة. يدور دولاب الغزل مثلاً عدة دورات في الدقيقة الواحدة، ويسمّي عدد الدورات الكاملة التي يدورها الجسم في الثانية الواحدة التردد الزاوي ω؛ حيث $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

رموز الكتب

يرمز لكمية التردد Frequency في كتاب الكيمياء بالرمز (نيو) ν، وبالرمز f في كتاب الفيزياء؛ وكلاهما صحيحان ويعبران عن نفس الكمية.

تحضيري

.5

a. زمن الدوران بالثواني: T = 27.3 يوم × (24 ساعة/يوم) × (3600 ث/ساعة) = 2.36 × 10^6 s.

b. السرعة الزاوية: ω = 2π/T = 2π / (2.36 × 10^6 s) = 2.66 × 10^-6 rad/s.

c. السرعة الخطية: v = rω = (1.74 × 10^6 m)(2.66 × 10^-6 rad/s) = 4.63 m/s

d. النسبة = v_الأرض / v_القمر = 4.63 m/s / 464 m/s ≈ 0.00998، أو حوالي 1/100

.6 الإزاحة الزاوية θ = d/r = 12 cm / 1.0 cm = 12 rad

2–1 مراجعة

5. **السرعة الزاوية المتجهة** يدور القمر حول محوره دورة كاملة خلال 27.3 يومًا، فإذا كان نصف قطر القمر 1.74×10^6 m، فاحسب:
   a. زمن دوران القمر بوحدة الثانية.
   b. السرعة الزاوية لدوران القمر بوحدة rad /s.
   c. مقدار السرعة الخطية لصخرة على خط الاستواء للقمر (الناتجة فقط عن دوران القمر)؟
   d. النسبة بين مقدار السرعة الخطية في الفقرة السابقة والسرعة الخطية الناتجة عن دوران الأرض لشخص يقف على خط الاستواء. علمًا بأن سرعة الأرض عند خط الاستواء 464 m /s.

6. **الإزاحة الزاوية** إذا كان قطر الكرة المستخدمة في فأرة الحاسوب 2.0 cm، وحَرّكت الفأرة 12 cm، فما الإزاحة الزاوية للكرة؟

7. **الإزاحة الزاوية** هل لكل أجزاء عقرب الدقائق الإزاحة الزاوية نفسها؟ وهل لها إزاحة خطية متماثلة؟

8. **التسارع الزاوي** يدور الملف الأسطواني في محرك غسالة الملابس 635 rev /min (أي 635 دورة في الدقيقة)، وعند فتح غطاء الغسالة يتوقف المحرك عن الدوران. فإذا احتاج الملف 8.0 s حتى يتوقف بعد فتح الغطاء فما التسارع الزاوي للملف الأسطواني؟

9. **التفكير الناقد** يبدأ مسار لولبي على قرص مضغوط CD على بُعد 2.7 cm من المركز، وينتهي على بُعد 5.5 cm. ويدور القرص المضغوط بحيث تتغير السرعة الزاوية كلما ازداد نصف قطر المسار، ويبقى مقدار السرعة الخطية المتجهة للمسار اللولبي ثابتًا ويساوي 1.4 m /s. احسب ما يأتي:
   a. السرعة الزاوية المتجهة للقرص (بوحدة rad /s وrev /min) عند بداية المسار.
   b. السرعة الزاوية المتجهة للقرص عند نهاية المسار.
   c. التسارع الزاوي للقرص إذا كان زمن قراءته كاملًا 76 min.

المسار اللولبي على قرص (CD)

7. نعم، لكل أجزاء عقرب الدقائق الإزاحة الزاوية نفسها لأن العقرب جسم صلب يدور. لا، ليس لها نفس الإزاحة الخطية، فالنقاط الأبعد عن المركز تقطع مسافة خطية أكبر (d = rθ).

.9

a. عند بداية المسار: ω_i = v/r_i = 1.4 m/s / 0.027 m ≈ 52 rad/s ≈ 5.0 × 10^2 rev/min

b. عند نهاية المسار: ω_f = v/r_f = 1.4 m/s / 0.055 m ≈ 25 rad/s.

c. التسارع الزاوي: α = (ω_f - ω_i)/Δt = (25 rad/s - 52 rad/s) / (76 min × 60 s/min) ≈ -5.8 × 10^-3 rad/s² .

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

2–2 ديناميكا الحركة الدورانية Rotational Dynamics

الأهداف

- **تصف** العزم.
- **تحدّد** العوامل التي يعتمد عليها العزم.
- **تحسب** محصلة العزم.

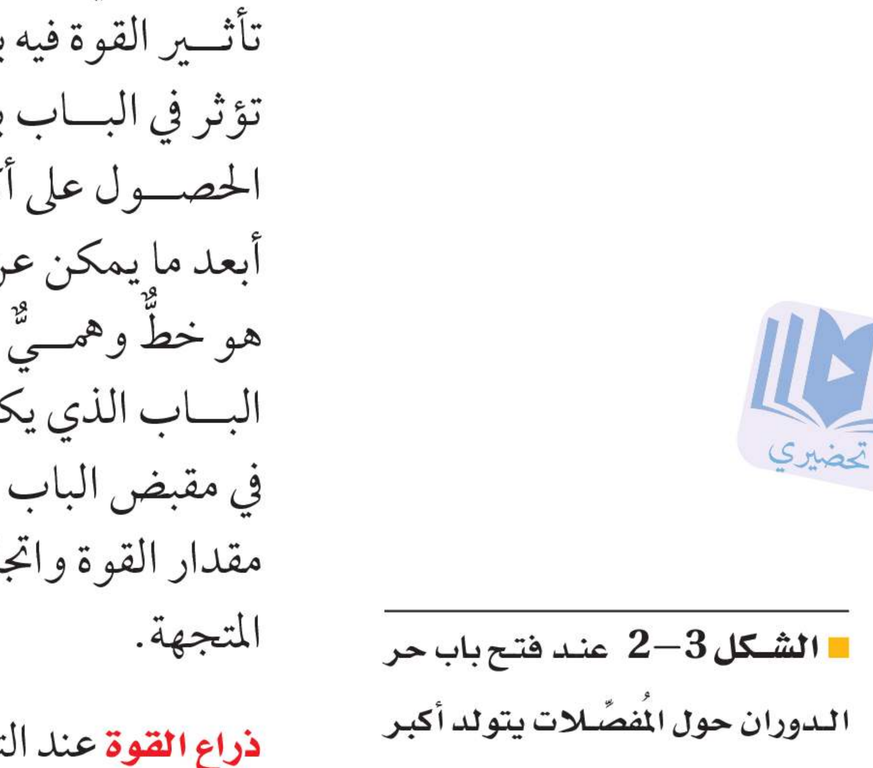
المفردات

ذراع القوة

العزم

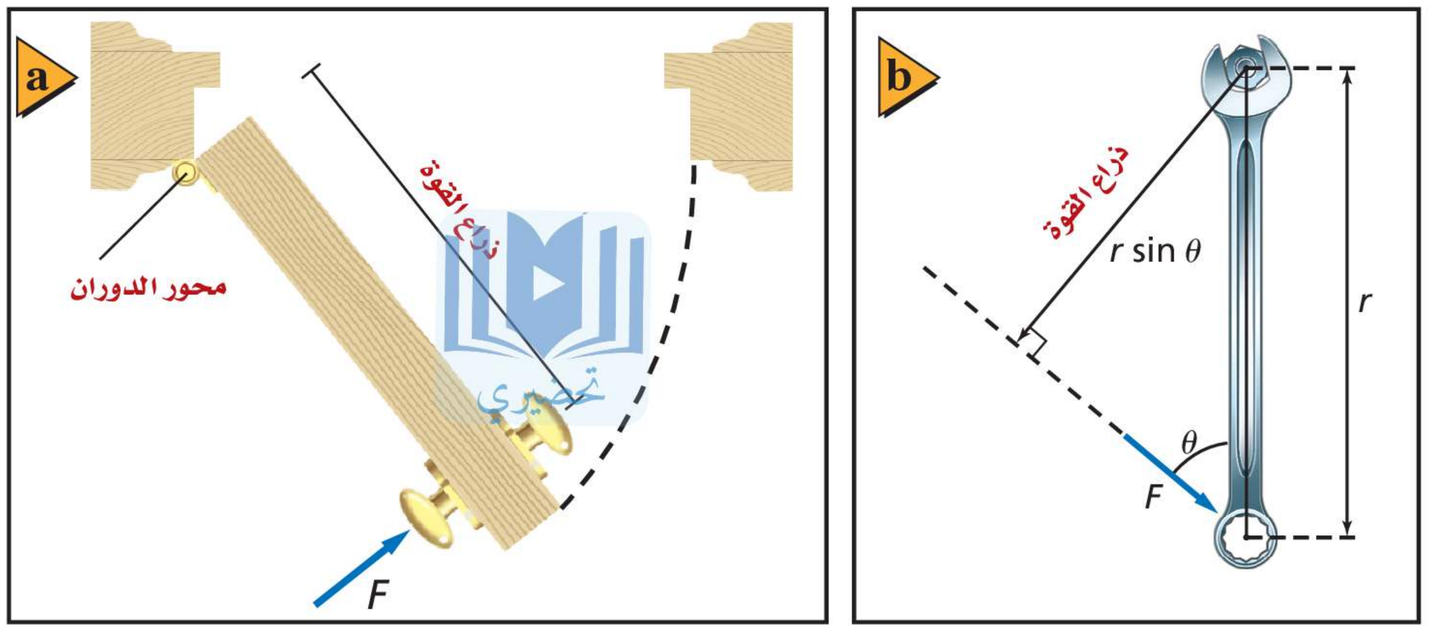
كيف تبدأ الحركة الدورانية لجسم ما؟ كيف تتغير سرعته الزاوية المتجهة؟ إذا كان لديك علبة أسطوانية، وأردت أن تديرها حول نفسها فما عليك إلا أن تلف خيطًا حولها ثم تسحبه بقوة فتدور، وكلما سحبت الخيط بقوة أكبر زادت سرعة دورانها. تؤثر في العلبة – في هذه الحالة – قوتان، هما قوة الجاذبية الأرضية، وقوة الشد في الخيط. أما قوة الجاذبية الأرضية فتؤثر في مركز العلبة، ولذلك لا تؤدي إلى تدوير العلبة (ستعرف السبب لاحقًا). وأما قوة الشد في الخيط فتؤثر في الحافة الخارجية للعلبة، ويكون اتجاه قوة الشد متعامدًا مع اتجاه الخط الواصل بين مركز العلبة والنقطة التي يلامس عندها الخيط سطح العلبة مبتعدًا عنها.

وكما تعلمت، فإن القوة المؤثرة في جسم نقطي تغير من سرعته الخطية المتجهة، أما الجسم غير النقطي والذي يكون ثابتًا في الشكل والحجم– كما في حالة العلبة الأسطوانية– فإن تأثير القوة فيه بطريقة معينة يغير سرعته الزاوية المتجهة. تأمل حالة فتح باب مغلق؛ إنك تؤثر في الباب بقوة لكي تفتحه، ولكن ما أسهل طريقة لفتح الباب؟ إن ما يعنينا هو الحصول على أكبر أثر عند التأثير بأقل قوة ممكنة. ولتحقيق هذا نجعل نقطة تأثير القوة أبعد ما يمكن عن محور الدوران، انظر **الشكل 3 –2**. إن محور الدوران في حالة الباب هو خطٌّ وهميٌّ رأسيٌّ يمرّ من خلال مُفصِّلات الباب. أما نقطة تأثير القوة فهي مقبض الباب الذي يكون بجانب الطرف الخارجي للباب. ولضمان أثر فعال للقوة فإننا نؤثر بها في مقبض الباب (بعيدًا عن المُفصِّلات) وبزاوية قائمة بالنسبة للباب ، حيث يحدّد كل من مقدار القوة واتجاهها، والمسافة بين المحور ونقطة تأثير القوةِ، التغيرَ في السرعة الزاوية المتجهة.



■ **الشكل 3–2** عند فتح باب حر الدوران حول المُفصِّلات يتولد أكبر عزم عندما تؤثر القوة في أبعد نقطة عن المُفصِّلات (a) بزاوية متعامدة مع الباب (b)

ذراع القوة عند التأثير بقوة معينة، فإن التغير في السرعة الزاوية المتجهة يعتمد على **ذراع القوة**، وهي المسافة العمودية من محور الدوران حتى نقطة تأثير القوة. فإذا كانت القوة متعامدة مع نصف قطر الدوران –كما هو الحال في العلبة الأسطوانية– فإن ذراع القوة تساوي البعد عن المحور، وتساوي r. أما بالنسبة للباب فإن ذراع القوة تساوي البعد بين المفصّلات ونقطة تأثير القوة، انظر **الشكل 4a – 2**. وإذا لم تكن القوة متعامدة مع محور الدوران نأخذ المركبة العمودية للقوة. فالقوة التي يؤثر بها الخيط حول العلبة متعامدة مع نصف قطر العلبة، وإذا كانت القوة المؤثرة غير متعامدة مع نصف القطر فإن مقدار ذراع القوة يقل. ولإيجاد ذراع القوة نمدّ خط متّجه القوة حتى يشكّل زاوية قائمة مع الخط الممتد من مركز الدوران، فتكون المسافة بين نقطة التقاطع والمحور هي ذراع القوة. وباستخدام حساب المثلثات يمكن إيجاد طول ذراع القوة L بالمعادلة $L = r \sin \theta$، انظر **الشكل 4b – 2**. وتمثل r المسافة بين محور الدوران ونقطة تأثير القوة، أما θ فهي الزاوية المحصورة بين القوة المؤثرة ونصف القطر (المتجه الممتد من محور الدوران إلى نقطة تأثير القوة).



■ **الشكل 4–2** تكون ذراع القوة محاذية لعرض الباب من المُفصّلات حتى نقطة تأثير القوة **(a)**، تحسب ذراع القوة (L) من المعادلة $L = r \sin \theta$ عندما تكون الزاوية θ بين القوة ونصف قطر الدوران لا تساوي $90°$ **(b)**.

العـــزم مقياس لمقدرة القوة على إحداث الدوران، ومقدار العزم يســاوي حاصل ضرب القوة في طول ذراعها. ولأنّ القوة مقيســة بوحدة النيوتن والمسافة بوحدة المتر فإن العزم يقاس بوحدة (N.m)، ويرمز له بالحرف اللاتيني τ، ويُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

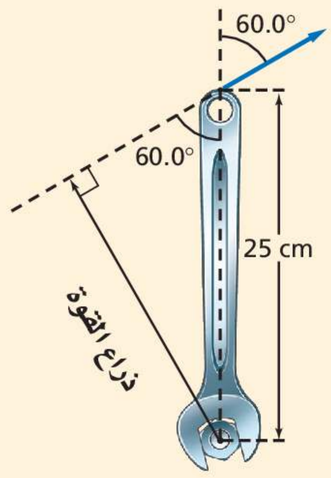
العزم $\tau = Fr \sin \theta$

العزم يساوي حاصل ضرب القوة في طول ذراعها.

مثـــال 1

ذراع القوة يتطلب شد صامولة في محرك سيارة عزمًا مقداره 35 N.m. إذا استخدمت مفتاح شد طوله 25 cm، فأثرت في نهاية المفتاح بقوة تميل بزاوية $60.0°$ بالنسبة إلى الرأسي فما طول ذراع القوة؟ وما مقدار القوة التي يجب أن تُؤثر بها؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- مثّل الوضع، وجد طول ذراع القوة بسحب متجه القوة من نهايته حتى يتقاطع الخط العمودي عليه مع محور الدوران.

المعلوم

$r = 0.25 \text{ m}$ ، $\tau = 35 \text{ N.m}$ ، $\theta = 60.0°$

المجهول

$L = ?$ $F = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

جد طول ذراع القوة باستخدام العلاقة.

عوّض مستخدمًا $r = 0.25 \text{ m}$ ، $\theta = 60.0°$

$$L = r \sin \theta$$
$$= (0.25 \text{ m})(\sin 60.0) = 0.22 \text{ m}$$

عوّض مستخدمًا $\tau = 35 \text{ N.m}$ ، $r = 0.25 \text{ m}$ ، $\theta = 60.0°$

$$\tau = Fr \sin \theta \text{ ، } F = \frac{\tau}{r \sin \theta}$$
$$F = \frac{35 \text{ N.m}}{(0.25 \text{m})(\sin 60°)}$$
$$= 1.6 \times 10^2 \text{ N}$$

دليل الرياضيات

النسب المثلثية 229–228

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس القوة بوحدة النيوتن.
- **هل الإشارات مهمة هنا؟** تم حساب مقدار القوة اللازمة فقط لتدوير المفتاح في اتجاه حركة عقارب الساعة.

نعم، الوحدات صحيحة. حيث إن القوة تقاس بالنيوتن (N) والمسافة بالمتر (m)، فإن وحدة قياس العزم هي نيوتن.متر (N.m).

نعم، الإشارات مهمة لتحديد اتجاه الدوران. في هذه المسألة تم حساب مقدار القوة فقط، ولكن بشكل عام، يُعتبر الدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة موجبًا، وفي اتجاه عقارب الساعة سالبًا.

10. $F = \tau / (r \sin\theta) = 55.0\ \text{N.m} / (0.25\ \text{m} \times \sin 60.0^\circ) = 2.5 \times 10^2\ \text{N}$

11. من معادلة العزم $\tau = F \times l$، حيث l هو ذراع القوة. $l = \tau / F = 55.0\ \text{N.m} / 135\ \text{N} = 0.407\ \text{m}$

12. بما أن القوة عمودية على الباب، فإن $\sin\theta = 1$. إذن $F = \tau / r = 32.4\ \text{N.m} / 0.234\ \text{m} = 138\ \text{N}$

مسائل تدريبية

10. بالرجوع إلى مفتاح الشد في المثال 1، ما مقدار القوة التي يجب التأثير بها عموديًّا في مفتاح الشد؟

11. إذا تطلب تدوير جسم عزمًا مقداره 55.0 N.m، في حين كانت أكبر قوة يمكن التأثير بها 135 N، فما طول ذراع القوة الذي يجب استخدامه؟

12. لديك مفتاح شد طوله 0.234 m، وتريد أن تستخدمه في إنجاز مهمة تتطلب عزمًا مقداره 32.4 N.m، عن طريق التأثير بقوة مقدارها 232 N. ما مقدار أقل زاوية تصنعها القوة المؤثرة بالنسبة إلى الرأسي، وتسمح بتوفير العزم المطلوب؟

13. إذا كانت كتلتك 65 kg ووقفت على بدالات دراجة هوائية، بحيث يصنع البدال زاوية مقدارها 35° على الأفقي، وتبعد مسافة 18 cm عن مركز حلقة السلسلة، فما مقدار العزم الذي تؤثر فيه؟ وما مقدار العزم الذي تؤثر فيه إذا كانت البدّالات رأسيَّة؟

إيجاد محصلة العزم Finding Net Torque

نفذ التجربة التالية: خذ قلمي رصاص، وقطع نقد معدنية، وشريطًا لاصقًا شفافًا، وثبت قطعتي نقد متماثلتين بنهايتي أحد القلمين، ودعه يتزن فوق القلم الثاني، كما في **الشكل 5–2**. تؤثر كل من قطعتي النقد بعزم مساوٍ لوزنها F_g مضروبًا في المسافة r من نقطة الاتزان إلى مركز قطعة النقد على النحو الآتي:

$$\tau = F_g r$$

ولكن العزمين متساويان في المقدار ومتعاكسان في الاتجاه، لذا تساوي محصلة العزم صفرًا.

$$\tau_1 + \tau_2 = 0$$

أو

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

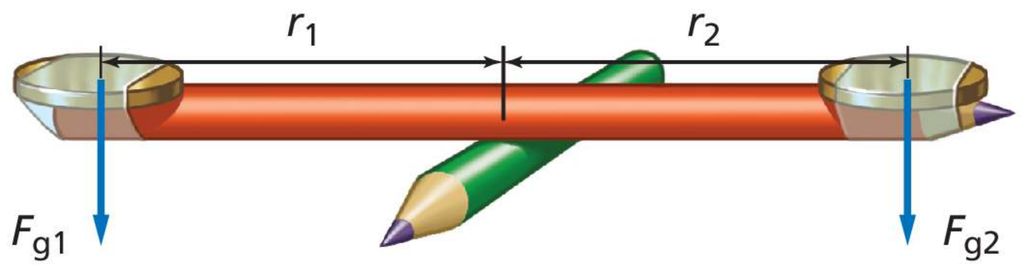
والآن، كيف تجعل القلم يدور؟ يجب إضافة قطعة نقد أخرى فوق إحدى القطعتين النقديتين، ممّا يجعل القوتين مختلفتين، كما يمكن إزاحة نقطة الاتزان نحو إحدى قطعتي النقد، مما يجعل المسافتين مختلفتين.

تجربة عملية

العزوم

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية

الشكل 5 – 2 عندما يتزن قلم الرصاص فإن العزم المؤثر بواسطة القطعة النقدية الأولى $F_{g1}\ r_1$ يساوي العزم المؤثر بواسطة القطعة النقدية الثانية $F_{g2}\ r_2$ في المقدار ويعاكسه في الاتجاه.



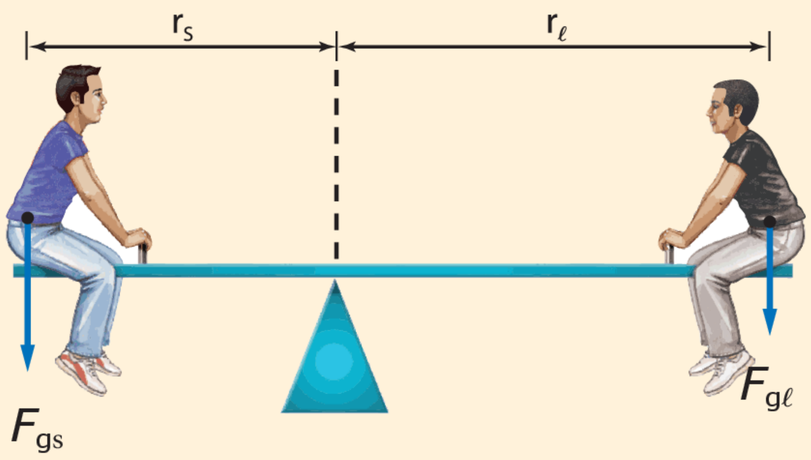
13. القوة المؤثرة هي الوزن $F_g = 65\ \text{kg} \times 9.80\ \text{m/s}^2 = 637\ \text{N}$. عندما يكون البدال بزاوية 35° مع الأفقي، يكون العزم $\tau = r\, F_g \cos(35^\circ) = (0.18\ \text{m})(637\ \text{N})\cos(35^\circ) = 94\ \text{N.m}$. عندما يكون البدال رأسيًا، تكون القوة موازية لذراع القوة، وبالتالي يكون العزم صفرًا.

مثـــــال 2

اتزان العزوم يلعب سعيد ولؤي على أرجوحة أفقية طولها 1.75 m بحيث يحافظان على وضع الاتزان للعبة، فإذا كانت كتلة سعيد 56 kg وكتلة لؤي 43 kg فما بُعد نقطة الارتكاز عن كل منهما؟ (أهمل وزن لوح الأرجوحة).

1 تحليل المسألة ورسمها

- مثّل الوضع.
- ارسم المتجهات ثمّ سمِّها.



المعلوم

$m_s = 56\ \text{kg}$

$m_\ell = 43\ \text{kg}$

$r_s + r_\ell = 1.75\ \text{m}$

المجهول

$r_s = ?$

$r_\ell = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

احسب مقدار القوتين.

سعيد:

$F_{gs} = m_s g = (56\ \text{kg})\ (9.80\ \text{m/s}^2)$

$= 5.5 \times 10^2\ \text{N}$

عوض مستخدمًا $g = 9.80\ \text{m/s}^2,\ m_s = 56\ \text{kg}$

لؤي:

$F_{g\ell} = m_\ell g = (43\ \text{kg})\ (9.80\ \text{m/s}^2)$

$= 4.2 \times 10^2\ \text{N}$

عوّض مستخدمًا $g = 9.80\ \text{m/s}^2,\ m_\ell = 43\ \text{kg}$

احسب بعد سعيد عن نقطة الارتكاز بدلالة طول لعبة الميزان وكذلك بُعد لؤي. $r_s = 1.75\ \text{m} - r_\ell$

عندما لا يحدث الدوران يكون مجموع العزوم صفرًا.

$F_{gs}\, r_s = F_{g\ell}\, r_\ell \rightarrow F_{gs}\, r_s _ F_{g\ell} r_\ell = 0.0\ \text{N.m}$

عوض مستخدمًا $r_s = 1.75\ \text{m} - r_\ell$

$F_{gs}\ (1.75\ \text{m} - r_\ell) - F_{g\ell}\, r_\ell = 0.0\ \text{N.m}$

$F_{gs}\ (1.75\ \text{m}) - F_{gs}\, r_\ell - F_{g\ell}\, r_\ell = 0.0\ \text{N.m}$

$F_{gs}\, r_\ell + F_{g\ell}\, r_\ell = F_{gs}\ (1.75\ \text{m})$

$(F_{gs} + F_{g\ell})\, r_\ell = F_{gs}\ (1.75\ \text{m})$

حل المعادلة لإيجاد r_ℓ

$$r_\ell = \frac{F_{gs}\ (1.75\ \text{m})}{(F_{gs} + F_{g\ell})}$$

$$= \frac{(5.5 \times 10^2\ \text{N})\ (1.75\ \text{m})}{(5.5 \times 10^2\ \text{N} + 4.2 \times 10^2\ \text{N})}$$

$= 0.99\ \text{m}$

عوّض مستخدمًا $F_{g\ell} = 4.2 \times 10^2\ \text{N},\ F_{gs} = 5.5 \times 10^2\ \text{N}$

دليل الرياضيات

فصل المتغير 215

نعم، الوحدات صحيحة. تم استخدام المتر للمسافة والنيوتن للقوة، مما ينتج عنه وحدة نيوتن.متر للعزم.

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس المسافة بالمتر.
- **هل للإشارات المستخدمة معنى؟** المسافات تكون موجبة.

نعم، للإشارات معنى مهم. فهي تحدد اتجاه الدوران (موجب لعكس عقارب الساعة وسالب مع عقارب الساعة). ولتحقيق الاتزان، يجب أن يكون مجموع العزوم يساوي صفرًا.

- **هل الجواب منطقي؟** لؤي على بُعد 1 m تقريبًا من المركز، لذا يكون سعيد على بُعد 0.75 m من المركز. ولأن وزن سعيد أكبر من وزن لؤي، فيكون ذراع القوة لديه أقل مما لدى لؤي، أيْ أن لؤيًّا على بُعد أكبر من نقطة الاتزان.

نعم، الجواب منطقي. بما أن كتلة سعيد أكبر من كتلة نواف، يجب أن يجلس على مسافة أقرب إلى نقطة الارتكاز لتحقيق الاتزان. النتائج التي تم التوصل إليها ($r_{\text{سعيد}} \approx 0.76\ \text{m}$ و $r_{\text{نواف}} \approx 0.99\ \text{m}$) تحقق هذا الشرط.

14. في حالة الاتزان، $m_1r_1 = m_2r_2$. إذن، $r_2 = (m_1r_1) / m_2 = (52\ kg \times 1.8\ m) / 43\ kg = 2.2\ m$.

15. القوة المماسية تكون عمودية على نصف القطر، لذا $F = \tau / r = 0.770\ N.m / 0.045\ m = 17\ N$.

16. القوة تساوي وزن السلة ($F = mg$)، إذن $m = F / g = 17\ N / 9.80\ m/s^2 = 1.7\ kg$.

18. عزم الشخص: $\tau = Fg\ r \sin\theta = (65.0\ kg \times 9.80\ m/s^2)(0.170\ m)\sin(45.0°) = 76.5\ N.m$.

يجب أن يكون عزم السلسلة مساويًا له. قوة السلسلة $F = \tau / r_sprocket = 76.5\ N.m / 0.0970\ m = 789\ N$.

مسائل تدريبية

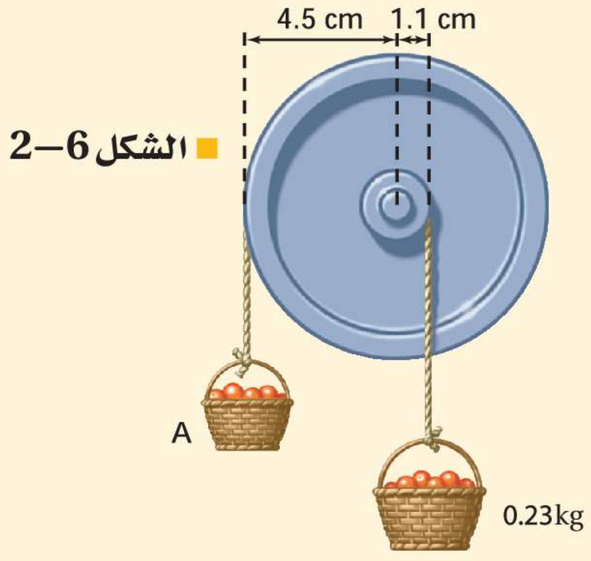
14. يجلس عــليّ على بُعد 1.8 m من مركز الأرجوحة، فعلى أي بعد من مركــز الأرجوحة يجب أن يجلس عبدالله حتى يتزن؟ علمًا بأنَّ كتلة عليّ 43 kg وكتلة عبدالله 52 kg.

15. إذا كان نصف قطر إطار دراجة هوائية 7.70 cm، وأثرت السلســلة بقوة عمودية مقدارها 35.0 N في الإطار في اتجاه حركة عقارب الساعة فما مقدار العزم اللازم لمنع الإطار من الدوران؟

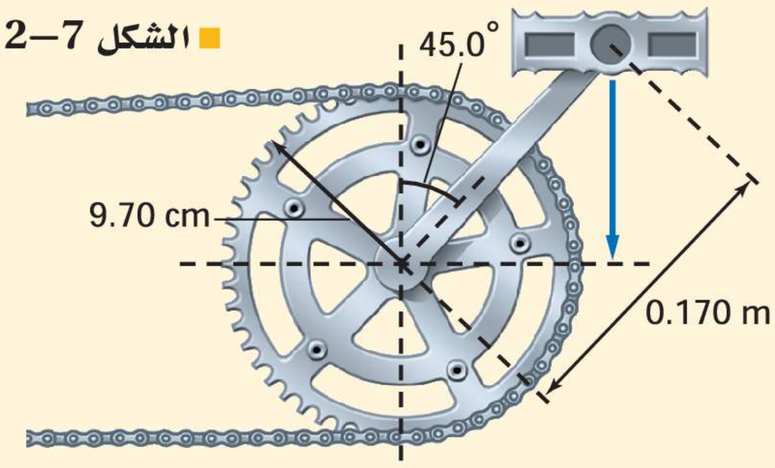
16. عُلقت ســلتا فواكه بحبلين يمران على بكرتين قطراهما مختلفان، فاتزنتا كما في **الشكل 6–2**. ما مقدار كتلة السلة A؟

17. افترض أن نصف قطر البكرة الكبرى في الســؤال السابق أصبح 6.0 cm فما مقدار كتلة السلة A؟

18. يقف شــخص كتلته 65.0 kg على بــدال دراجة هوائية، فإذا كان طول ذراع التدوير 0.170 m ويصنع زاوية 45.0° بالنسبة إلى الرأسي كما في **الشــكل 7–2**. وكانت ذراع التدوير متصلةً بالإطار الخلفي (الذي تديره السلسلة عادة)، فما مقدار القوة التي يجب أن تؤثر فيها السلسلة لمنع الإطار من الدوران، علمًا بأن نصف قطر الإطار 9.70 cm؟



الشكل 6–2



الشكل 7–2

17. أولاً نحسب القوة: $F = \tau / r = 0.770\ N.m / 0.060\ m = 13\ N$. ثم نحسب الكتلة: $m = F / g = 13\ N / 9.80\ m/s^2 = 1.3\ kg$.

2–2 مراجعة

19. **العزم** يريد عبد الرحمن أن يدخل من باب دوّار ساكن، وضّح كيف يدفع الباب ليولد عزمًا بأقل مقدار من القوة المؤثرة؟ وأين يجب أن تكون نقطة تأثير تلك القوة؟

20. **ذراع القــوة** حاول فيصل فتح باب، ولم يستطع دفعه بزاوية قائمة، فدفعه بزاوية 55° بالنسبة للعمودي، فقارن بين قوة دفعه للباب في هذه الحالة وبين القوة اللازمة لدفعه عندما تكون القوة عمودية عليه (90°) مع تساوي سرعة الباب في الحالتين.

21. **محصلة العزم** يسحب شخصان حبلين ملفوفين حول حافة إطار كبير، فإذا كانت كتلة الإطار 12 kg وقطره 2.4 m، ويســحب أحد الشخصين الحبل الأول في اتجاه حركة عقارب الســاعة بقوة 43 N، ويسحب الشخص الآخر الحبل الثاني في اتجاه معاكس لاتجاه حركة عقارب الساعة بقوة 67 N، فما محصلة العزم على الإطار؟

22. **التفكير الناقد** إذا وضعت كرة عند أعلى سطح مائل مهمل الاحتكاك فسوف تنزلق إلى أسفل السطح دون دوران، ولكن إذا كان السطح خشنًا فإنّ الكرة ستتدحرج في أثناء انزلاقها إلى أسفل. وضح سبب ذلك، مستخدمًا مخطط الجسم الحر.

19. لأن العزم هو ناتج ضرب القوة في طول ذراعها ($\tau = Fr$). كلما زاد طول ذراع القوة (مقبض المفتاح)، قلت القوة اللازمة لإحداث نفس العزم.

20. ينتج العزم الأكبر عند التأثير بالقوة بشكل عمودي، لأن العزم يتناسب مع جيب الزاوية بين القوة وذراعها ($\sin\theta$)، وتكون قيمة $\sin\theta$ أكبر ما يمكن (تساوي 1) عند زاوية 90 درجة.

21. لتحقيق الاتزان، $m_A\ r_A = m_B\ r_B$. الشخص A عند الطرف، أي $r_A = 1.2\ m$. إذن، $r_B = (m_A\ r_A) / m_B = (43\ kg \times 1.2\ m) / 52\ kg = 0.99\ m$ من نقطة الارتكاز.

22. لكي يتدحرج القلم، يجب أن توفر قوة الاحتكاك السكوني بينه وبين السطح عزمًا كافيًا لبدء الدوران. إذا كان الاحتكاك ضعيفًا أو القوة الدافعة كبيرة جدًا، فإن القلم سينزلق بدلاً من التدحرج.

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

2–3 الاتزان Equilibrium

لماذا لبعض المركبات قابلية للانقلاب أكثر من غيرها عند تعرضها لحادثٍ ما؟ ما الذي يجعل المركبة تنقلب؟ إن السبب يكمن في تصميم المركبة. وسوف تتعرّف في هذا الجزء بعض العوامل التي تؤدي إلى انقلاب الأجسام.

الأهداف

- **تُعرِّف** مركز الكتلة.
- **توضح** تأثير موقع مركز الكتلة في استقرار الجسم.
- **تتعرف** شروط الاتزان.
- **تصف** كيف يؤدي دوران الأطر المرجعية (محاور الإسناد) إلى ظهور قوى ظاهرية.

المفردات

مركز الكتلة

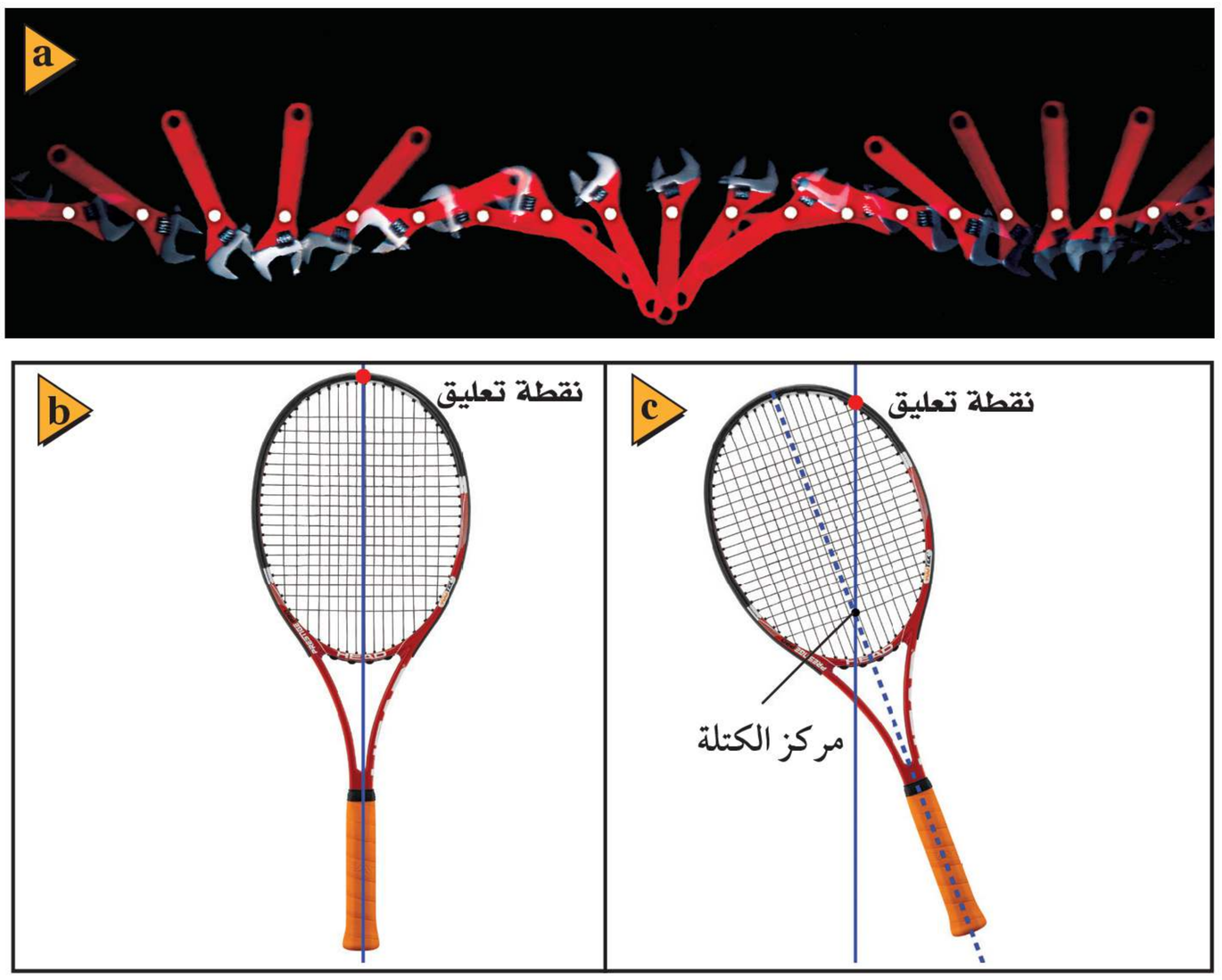
القوة الطاردة المركزية

قوة كوريوليس

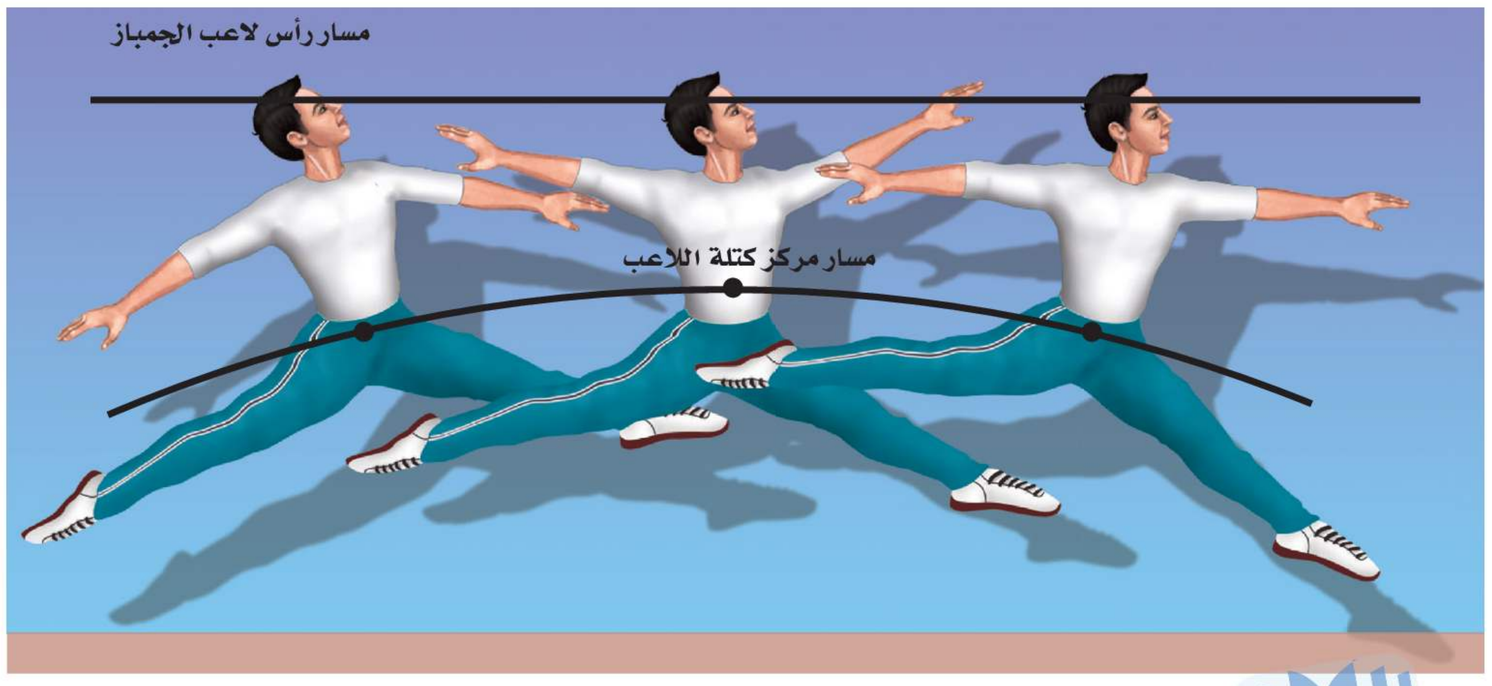
مركز الكتلة The Center of Mass

كيف يدور الجسم حول مركز كتلته؟ قد يدور مفتاح الشد حول مقبضه أو حول أحد طرفيه، فهل تتحرك أي نقطة مادية على مفتاح الشد في مسار مستقيم؟ يوضح **الشكل 2–8a** حركة مفتاح الشد، ويمكنك ملاحظة أن هناك نقطة واحدة تسلك مسارًا في صورة خطّ مستقيم، كما لو أنه استعيض عن مفتاح الشد بجسم نقطي موضوع في تلك النقطة. إن **مركز الكتلة** لجسم ما عبارة عن نقطة في الجسم تتحرك بالطريقة نفسها التي يتحرك بها الجسيم النقطي.

تحديد موقع مركز الكتلة كيف تحدّد موقع مركز الكتلة لجسم ما؟ أولاً علِّق الجسم من أي نقطة، وعندما يتوقف الجسم عن التأرجح يكون مركز الكتلة على الخط الرأسي المرسوم من نقطة التعليق، كما في **الشكل 2–8b**. ارسم هذا الخط، ثم علِّق الجسم مرة أخرى من أي نقطة. ارسم خطًّا رأسيًّا من نقطة التعليق الجديدة، ومرة أخرى سيكون مركز الكتلة على الخط المستقيم تحت نقطة التعليق. وهذا يعني أن مركز الكتلة في النقطة التي يتقاطع فيها الخطان. إن مفتاح الشد والمضرب –في المثال السابق– وكل الأجسام التي تتحرك حركة دورانية حرة إنما تدور حور محور يمر خلال مركز كتلتها. والآن، أين يقع مركز الكتلة لشخص ما؟



الشكل 2–8 يكون مسار مركز الكتلة لمفتاح الشد خطًّا مستقيمًا (a). يمكن إيجاد مركز الكتلة لجسم مثل مضرب تنس بتعليقه من أي نقطة ثم تكرار تعليقه من نقطة أخرى (b). النقطة التي تتقاطع عندها الخطوط المرسومة هي مركز كتلة المضرب (c).



الشكل 9–2 الحركة الرأسية لرأس لاعب الجمباز أقل من الحركة الرأسية لمركز الكتلة، حيث إنّ الرأس والجذع يتحركان أفقيًّا تقريبًا، فيبدو ذلك وكأنه تحليق في الهواء.

مركز الكتلة لجسم الإنسان بالنسبة لشخص يقف ويداه متدليتان يكون مركز الكتلة على بعد سنتمترات أسفل السرة في منتصف المسافة بين جزأي الجسم الأمامي والخلفي. ويكون أعلى من ذلك قليلًا لدى الأطفال الصغار؛ لأن رأس الطفل الصغير يكون كبيرًا بالنسبة إلى جسمه. ولأن جسم الإنسان مرن فإن مركز كتلته غير ثابت؛ فإذا رفعت يديك فوق رأسك فإن مركز كتلتك يرتفع من 6 cm إلى 10 cm. فمثلاً يبدو لاعب الجمباز وكأنه يحلِّق في الهواء؛ وذلك بتغيير مركز كتلته عندما يقفز، فهو يرفع ذراعيه ورجليه في الهواء، كما في **الشكل 9–2**، مما يؤدي إلى رفع مركز كتلته إلى أعلى، ويكون مسار مركز الكتلة على شكل قطع مكافئ، لذا يبقى رأس اللاعب على الارتفاع نفسه تقريبًا لوقت طويل نسبيًّا.

تطبيق الفيزياء

قفزة فوسبري

هناك تقنية في القفز بالزانة تسمى قفزة فوسبري، وهي تسمح للاعب بالمرور فوق العارضة دون أن يمسها عندما يكون عند أعلى موضع له. وهذا ممكن لأن مركز كتلة اللاعب يكون عند أسفل العارضة عندما ينقلب فوقها، بحيث يكون ظهره في اتجاهها.

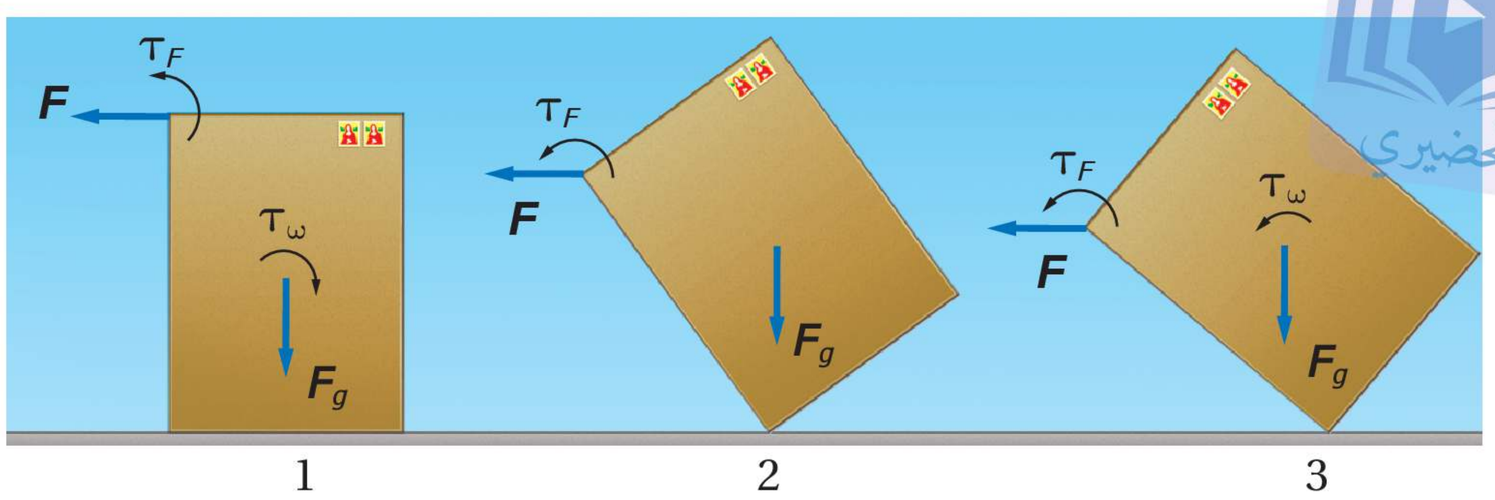
مركز الكتلة والاستقرار (الثبات) Center of Mass and stability

ما العوامل التي يعتمد عليها استقرار مركبة أو تعرضها للانقلاب أو الدوران عند تعرضها لحادثٍ ما؟ لكي تتعرف كيفية حدوث ذلك فكر في عملية قلب صندوق. لماذا ينقلب الصندوق المرتفع القليل العرض أسرع من الصندوق المنخفض والعريض؟ لقلب صندوق، كما في **الشكل 10–2**.

1- يجب تدويره حول إحدى حوافه (زواياه)، بحيث تؤثر في أعلى الصندوق بقوة F لتولد عزما τ_F،ويؤثر وزن الصندوق في مركز الكتلة بقوة F_g فتولد عزما معاكسا τ_ω.

2- يُصبح مركز الكتلة فوق النقطة الداعمة (الإسناد) مباشرة يصبح τ_ω صفرا، ويبقى تأثير العزم الخارجي فقط، وبدوران الصندوق أكثر يبتعد مركز الكتلة عن النقطة الداعمة.

3- يُؤثر العزمان في الاتجاه نفسه، فينقلب الصندوق بسرعة.



الشكل 10–2 توضح الأسهم المنحنية اتجاه العزم الناتج عن القوة المؤثرة لقلب الصندوق.

الاستقرار يُعد الجسم في حالة استقرار إذا احتاج إلى قوة خارجية لقلبه أو تحريكه؛ فالصندوق في **الشكل 10–2** يبقى مستقرًّا ما دام اتجاه العزم الناتج عن وزنه τ_w يُبقيه مستقرًّا على قاعدته. ويتحقق ذلك عندما يكون مركز كتلة الصندوق فوق قاعدته. ولقلب الصندوق أو تدويره يجب تدوير مركز كتلته حول محور الدوران حتى يبتعد مركز الكتلة عن القاعدة، ولتدوير الصندوق يجب أن ترفع مركز كتلته. لذلك كلما كانت قاعدة الجسم عريضة كان أكثر استقرارًا (يتطلب قلبه تسليط عزم يدور مركز الكتلة مسافة طويلة حتى يصبح خارج القاعدة)، فعندما تقف في حافلة، وتتمايل في أثناء سيرها فإنك تباعد بين قدميك قليلًا بحيث تزيد المسافة بينهما لتتجنب السقوط.

لماذا تنقلب السيارات؟ يُبين **الشكل 11–2** سيارتين توشكان على الانقلاب. لاحظ أن السيارة ذات الارتفاع الأكبر يكون مركز كتلتها مرتفعًا، لذلك يؤدي ميل قاعدتها قليلاً إلى خروج مركز كتلتها عن القاعدة، فتنقلب السيارة، وكلما كان مركز كتلة الجسم منخفضًا تكون السيارة أكثر استقرارًا.

أمّا أنت فتكون أكثر استقرارًا عندما تقف مستويًا على قدميك. فإذا وقفت على أصابع قدميك فإن مركز كتلتك يتحرك مباشرة إلى الأمام، ويصبح فوق مقدمة القدمين، وتكون في حالة أقل استقرارًا. وفي لعبة الجودو وألعاب الدفاع عن النفس الأخرى يستخدم اللاعب فيها العزم لتدوير الخصم، بحيث لا يكون مركز كتلته فوق قدميه، مما يجعله في وضع أقل استقرارًا أو ثباتًا.

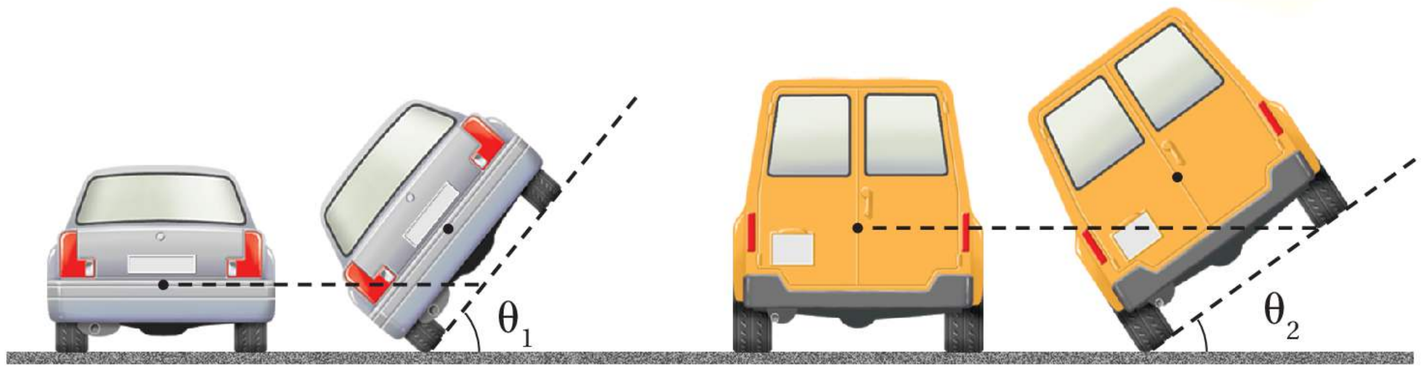
نستنتج مما سبق أنه إذا كان مركز الكتلة خارج قاعدة الجسم كان الجسم غير مستقر، ويدور أو ينقلب دون تأثير عزم إضافي، وإذا كان مركز الكتلة فوق قاعدة الجسم فإن الجسم يكون مستقرًّا، وإذا كانت قاعدة الجسم ضيقة ومركز الكتلة فوق القاعدة فإن الجسم يكون مستقرًّا، إلا أنّ أي قوة صغيرة تجعله ينقلب أو يدور.

شرطا الاتزان Conditions of Equilibrium

إذا كان قلم الحبر ساكنًا، فماذا يحتاج لكي يبقى كذلك؟ يمكن أن تحمله بيدك بحيث يكون في وضع رأسي، أو تضعه على الطاولة، أو على أي سطح آخر، أي يجب أن تؤثر في القلم بقوة إلى أعلى حتى تعادل قوة الجاذبية التي تؤثر فيه إلى أسفل. كما يجب أن تمنعه من الدوران، كأن تمسك به بيدك. ويُعد الجسم في حالة اتزان ميكانيكي إذا كانت سرعة الجسم المتجهة وسرعته الزاويّة المتجهة صفرًا، أو ثابتتين. وحتى يكون الجسم في حالة اتزان ميكانيكي يجب توافر شرطين:

الأول: يجب أن يكون في حالة اتزان انتقالي، أيْ أن محصلة القوى المؤثرة فيه تساوي صفرًا؛ $\Sigma F = 0$.

الثاني: يجب أن يكون في حالة اتزان دوراني، أيْ أن محصلة العزوم المؤثرة فيه تساوي صفرًا؛ $\Sigma \tau = 0$.



■ **الشكل 11–2** مركز كتلة السيارة الصفراء أعلى من مركز كتلة السيارة الرمادية. وكلما كان مركز كتلة السيارة مرتفعًا احتجنا إلى ميل أقل لجعله يتحرك خارج القاعدة مسببًا انقلابها.

تجربة

التدوير والاستقرار

1. قص قرصين من الكرتون المقوى قطراهما 10 cm و 15 cm.
2. استخدم قلم رصاص ذا ممحاة ليس لها حواف، وإذا كانت كذلك فافركها على ورق لكي تزيل الحواف المستقيمة.
3. دوّر قلم الرصاص حول نفسه، وحاول أن تجعله يقف على الممحاة. كرّر هذه الخطوة عدة مرات، وسجل ملاحظاتك.
4. ادفع قلم الرصاص برفق في مركز القرص الأول (10 cm).
5. دوّر القلم والقرص معًا محاولاً جعل القلم يقف على الممحاة.
6. حرّك القرص على نقاط مختلفة على القلم وأدرهما معًا، وسجل ملاحظاتك.
7. كرّر الخطوات 6–4 مع القرص الآخر 15 cm.

التحليل والاستنتاج

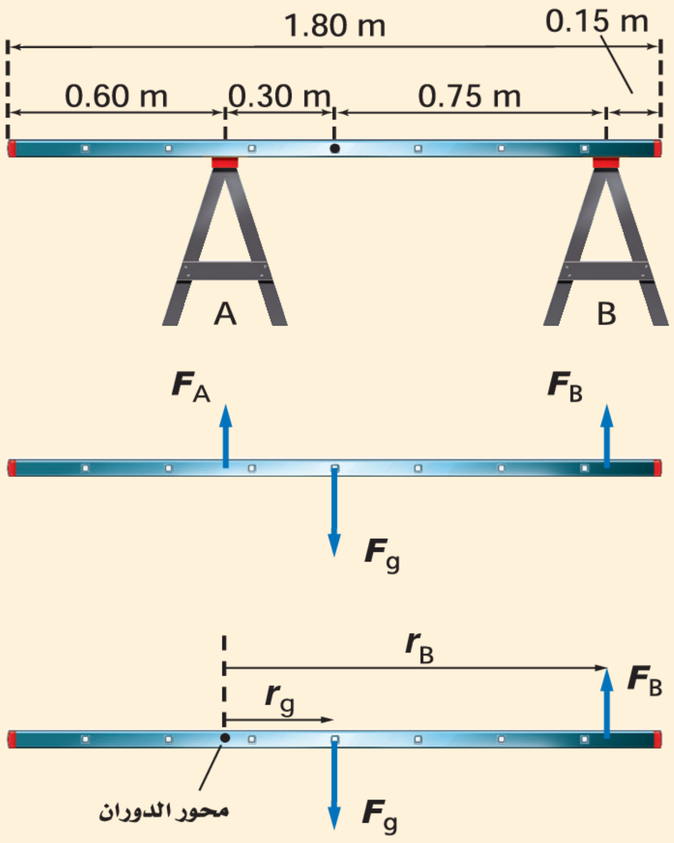
8. رتب المحاولات التجريبية الثلاث تصاعديًا بحسب استقرارها.
9. صف موقع مركز كتلة قلم الرصاص.
10. حلّل تأثير موقع القرص في الاستقرار.

مثـــــال 3

الاتزان الميكانيكي سُلّم خشبي كتلته 5.8 kg وطوله 1.80 m يستقر أفقيًّا على حاملين داعمين. يبعد الحامل الأول A مسافة 0.60 m عن طرف السلّم، ويبعد الحامل الثاني B مسافة 0.15 m عن الطرف الآخر له. ما مقدار القوة التي يؤثر بها كل من الحاملين في السلّم؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- مثّل الوضع، ثم اختر محور الدوران عند النقطة التي تؤثر فيها إحدى القوتين المجهولتين؛ وذلك لتقليل المجاهيل في المعادلة؛ حيث عزم القوة حول محور دورانها صفرًا. اختر النقطة التي تؤثر فيها F_A في السُلّم محور دوران، فيكون العزم الناتج عن هذه القوة F_A صفرًا.



المعلوم	المجهول
$m = 5.8\ \text{kg}$	$F_A = ?$
$\ell = 1.8\ \text{m}$	$F_B = ?$
$\ell_A = 0.60\ \text{m}$	
$\ell_B = 0.15\ \text{m}$	

2 إيجاد الكمية المجهولة

يكون مركز كتلة السلم الذي كثافته ثابته (منتصف الطول والعرض)، ومحصلة القوة المؤثرة في السلم هي مجموع القوى المؤثرة فيه.

بما أن السلم في حالة اتزان ميكانيكي إذا نطبق شرطي الاتزان الميكانيكي.

أولاً: السلم في وضع اتزان انتقالي. لذا محصلة القوى المؤثرة فيه صفر

$$\boldsymbol{F}_{\text{محصلة}} = \boldsymbol{F}_A + \boldsymbol{F}_B + \boldsymbol{F}_g$$

$$F_{\text{محصلة}} = F_A + F_B + (-F_g)$$

$$0.0\ \text{N} = F_A + F_B - F_g$$

$$F_A = F_g - F_B$$

مستخدمًا المعادلة $r_s = 1.75\ \text{m} - r_\ell$

أوجد F_A

أوجد العزم الناشئ عن F_B ، F_g

$$\tau_g = -r_g F_g$$

τ_g في اتجاه حركة عقارب الساعة

$$\tau_B = +r_B F_B$$

τ_B في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة

$$\tau_{\text{محصلة}} = \tau_B + \tau_g$$

محصلة العزوم هي مجموع كل العزوم المؤثرة في الجسم.

تحضيري

ثانياً: السلم في وضع اتزان دوراني لذا فإن

$$0.0\ \text{N.m} = \tau_B + \tau_g$$

$$\tau_B = -\tau_g$$

عوض مستخدمًا τ_B ، τ_g

$$r_B F_B = r_g F_g$$

أوجد F_B

$$F_B = \frac{r_g F_g}{r_B}$$

عوض مستخدمًا $F_g = mg$

$$= \frac{r_g m\ g}{r_B}$$

$$F_A = F_g - F_B$$

استخدم العلاقة $F_A = F_g - F_B$ وعوض F_B ، F_g

$$F_A = F_g - \frac{r_g m\ g}{r_B}$$

عوض مستخدمًا $F_B = \frac{r_g F_g}{r_B}$

$$= mg - \frac{r_g m\ g}{r_B} = (1 - \frac{r_g}{r_B})\ mg$$

يكون مركز كتلة السلم الذي كثافته ثابتة في مركزه.

ويمكنك التوصل من الرسم إلى أن

$$r_g = 0.30\ \text{m}$$

$$r_B = 1.05\ \text{m}$$

دليل الرياضيات

فصل المتغير 215

احسب F_B :

$$F_B = \frac{r_g m\ g}{r_B}$$

عوض مستخدمًا $r_g = 0.30\ \text{m}, g = 9.80\ \text{m/s}^2, m = 5.8\ \text{kg}, r_B = 1.05\ \text{m}$

$$F_B = \frac{(0.30)(5.8\ \text{kg})\ (9.80\ \text{m/s}^2)}{(1.05\ \text{m})} = 16\ \text{N}$$

احسب F_A:

$$F_A = mg\ (1 - \frac{r_g}{r_B})$$

عوض مستخدمًا $m = 5.8\ \text{kg}$ ، $r_g = 0.30\ \text{m}$

$$= (5.8\ \text{kg})\ (9.80\ \text{m/s}^2)\ (1 - \frac{(0.30\ \text{m})}{(1.05\ \text{m})})$$

$r_B = 1.05\ \text{m}$ ، $g = 9.80\ \text{m/s}^2$

$$= 41\ \text{N}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تُقاس القوى بوحدة النيوتن.
- **هل الإشارات المستخدمة صحيحة؟** نعم؛ فالقوتان إلى أعلى.
- **هل الجواب منطقي؟** مجموع القوتين لأعلى يساوي وزن السلّم، والقوة التي يؤثر بها الحامل القريب من مركز الكتلة هي القوة الأكبر، وهذا صحيح.

مسائل تدريبية

23. يتزن لوح خشبي كتلته 24 kg وطوله 4.5 m على حاملين، أحدهما تحت مركز اللّــوح مباشرة، والثاني عند الطرف. ما مقــدار القوتين اللتين يؤثر بهما كل من الحاملين الرأسيين في اللوح؟

24. يتحرك غطاس كتلته 85 kg نحو الطرف الحر للوح القفز، فإذا كان طول اللّوح 3.5 m وكتلته 14 kg، وثبت بداعمين، أحدهما عند مركز الكتلة، والآخر عند أحد طرفي اللّوح، فما مقدار القوة المؤثرة في كل داعم؟

دوران الأطر المرجعية Rotating Frames of Reference

عندمــا تركب عربة دوّارة في مدينــة الألعاب، وتدور بك بسرعة، تشــعر كأن قوة كبيرة تدفعك إلى الخارج. وإذا وجدت حصاة على أرضية العربة، فســوف تتسارع إلى خارجها دون أن تؤثر فيها قوة خارجية في الاتجاه نفســه. ولا تتحرك هذه الحصاة في خط مستقيم، ولا نســتطيع تطبيق قوانين نيوتن هنا؛ لأن الأطر المرجعية الدوّارة أطر متسارعة، وقوانين نيوتن تطبق فقط في حالة الأطر المرجعية غير المتسارعة (القصورية).

إنّ دراســة الحركة في إطار مرجعي يتحرك حركــة دورانية شيء مهمٌّ؛ لأنّ الأرض تدور. وتأثــير دوران الأرض قليل جدًّا لا يُمكن ملاحظته في الصف أو المختبر، ولكنّه ذو أهمية وتأثير كبيرين في الغلاف الجوي، ومن ثم في الطقس والمناخ.

القوة الطاردة المركزية Centrifugal Force

إذا ثُبّت أحد طرفي نابض في مركز منصّة دوّارة، وثُبت جسم في الطرف الآخر للنابض فإن الشــخص المراقب الذي يقف على المنصة سيلاحظ أن الجسم يشدّ النابض، أيْ أنه سيظن أنّ هناك قوة تؤثر في الجسم وتسحبه إلى الخارج بعيدًا عن مركز المنصة. وتُسمى هذه القوة الظاهرية **القوةَ الطاردةَ المركزيةَ**، وهي قوة غير حقيقية؛ لأنّه لا توجد قوة تدفع الجســم إلى الخارج، ولكنك تشعر بالفعل بأنك تُدفع إلى الخارج عندما تكون في سيارة تتحرك على مسار دائري. فإذا كانت القوة الطاردة المركزية غير حقيقية فما تبرير شعورك بالاندفاع بعيدًا عن مركز الدوران؟ كما تعلمت سابقًا فإن للأجسام قصورًا ذاتيًّا؛ حيث تميل الأجسام المتحركة إلى الاســتمرار في الحركة في سرعة ثابتة وفي خط مستقيم، ولذلك يميل الجسم المتحرك في مسار دائري إلى الخروج عن مســاره عند كل نقطة ليتحرك بسرعة ثابتة وفي خط مستقيم غير أن القوة التي تســحبه في اتجاه المركز (القوة الجاذبة المركزية) تجبره على الاســتمرار في مساره الدائري. ويمكن أن نستنتج مما سبق أن الأجسام المتحركة في مسارات دائرية تخضع لقوة حقيقية تســحبها في اتجاه المركز، أما الدفع إلى الخارج فلا توجد قوة تســببه، وإنما هو

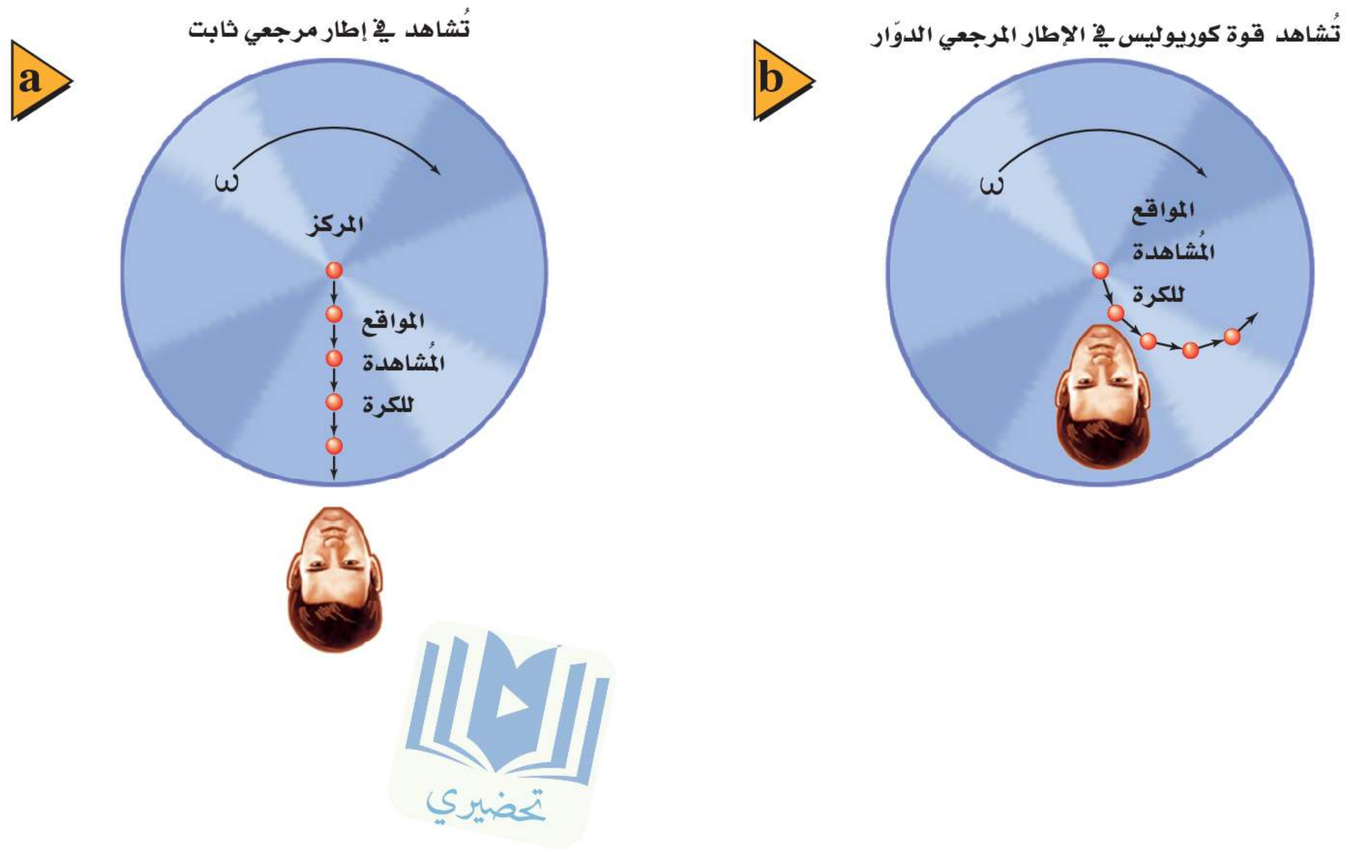
ناتج عن القصور الذاتي للأجسام. وفي حالة المنصة الدوارة يرى الشخص الواقف على الأرض أن الجسم يتحرك في مسار دائري ويتسارع نحو المركز بسبب قوة النابض، ويعبر عن تسارعه المركزي بعلاقة $a_c = \frac{v^2}{r}$. ويمكن كتابته بدلالة السرعة الزاوية المتجهة على النحو التالي: $a_c = \omega^2 r$؛ حيث يعتمد التسارع المركزي على المسافة من مركز الدوران، وعلى مربع السرعة الزاويّة المتجهة.

قوة كوريوليس The Coriolis Force

يظهر التأثير الثاني للدوران في **الشكل 12–2**. افترض أن شخصًا يقف في مركز قرص دوّار، ويقذف كرة إلى حافته الخارجية. لندرس الحركة الأفقية للكرة كما يراها مراقبان، على أن تهمل الحركة الرأسية للكرة في أثناء سقوطها.

إذا كان المراقب واقفًا خارج القرص، كما هو موضح في **الشكل 12a–2**، فسيرى الكرة تتحرك في خط مستقيم بسرعة ثابتة المقدار إلى طرف القرص الخارجي. أما المراقب الآخر الذي على القرص ويدور معه، فسيرى الكرة تتحرك في مسار منحنٍ بسرعة ثابتة مقدارًا، كما هو موضح في **الشكل 12b–2**، حيث يبدو أن هناك قوة تحرف الكرة عن مسارها، هذه القوة الظاهرية تُسمى **قوة كوريوليس**، وكما في القوة الطاردة المركزية، فإنّ قوة كوريوليس ليست حقيقية. ويعود سبب الإحساس بتأثيرها إلى أننا نلاحظ الانحراف في الحركة الأفقية عندما نكون في إطار مرجعي دوّار.

قوة كوريوليس الناشئة عن دوران الأرض افترض أن مدفعًا يطلق قذيفة من نقطة على خط الاستواء نحو الشمال. فإذا أطلقت القذيفة في اتجاه الشمال مباشرة، فسيظهر لها مركّبة سرعة في اتجاه الشرق؛ بسبب دوران الأرض، ويكون مقدار هذه المركبة عند خط الاستواء أكبر منه عند أي خط عرض آخر؛ لذا فإنه في أثناء حركة القذيفة شمالاً فإنها تتحرك أيضًا نحو



الشكل 12–2 قوة كوريوليس توجد فقط في الأطر المرجعية الدوّارة.

تحضيري

■ **الشكل 13–2** يرى مراقب على الأرض أن القذيفة التي تطلق إلى الشمال تنحرف إلى يمين الهدف بسبب قوة كوريوليس.

الشرق بسرعة أكبر من النقاط التي تحتها على الأرض. ومن ثم ستسقط القذيفة شرق الهدف المقصود، انظر إلى **الشكل 13–2**. إن المراقب الذي في الفضاء سيلاحظ دوران الأرض، بينما المراقب الذي على الأرض سيفسر انحراف القذيفة عن هدفها بسبب تأثير قوة كوريوليس. أما الأجسام المتحركة نحو خط الاستواء فستنحرف بسبب قوة كوريوليس الظاهرية نحو الغرب، أي ستسقط القذيفة غرب الهدف المقصود عند قذفها نحو الجنوب.

إنّ اتجاه الرياح حول مناطق الضغط المرتفع والضغط المنخفض ناتجة عن قوة كوريوليس؛ حيث تتجه الرياح من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض. وبسبب قوة كوريوليس تنحرف الرياح القادمة من الجنوب إلى شرق مناطق الضغط المنخفض في نصف الكرة الأرضية الشمالي، بينما تنحرف الرياح القادمة من الشمال إلى غرب مناطق الضغط المنخفض؛ لذا تدور الرياح في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول مناطق الضغط المنخفض في نصف الكرة الأرضية الشمالي. أما في نصف الكرة الأرضية الجنوبي فتدور الرياح في اتجاه حركة عقارب الساعة حول مناطق الضغط المنخفض.

الربط مع الأرصاد الجوية

لنعد إلى العربات التي تتحرك حركة دورانية في مدينة الألعاب، هذه العربات تهز الركاب؛ لأنهم في أطر مرجعية متسارعة في أثناء حركة العربة. إن القوى التي يشعر بها ركاب الأفعوانية عند أسفل المنحدر وأعلاه، وعندما تتحرك رأسيًّا إلى أسفل تعود إلى التسارع الخطي.

تُحقق القوة الطاردة المركزية الإثارة والمتعة في العربات والألعاب الدوارة والمسارات المتعرجة في الأفعوانيات.

تحضيري

3–2 مراجعة

25. مركز الكتلة هل يمكن أن يكون مركز كتلة جسم في نقطة خارج الجسم؟ وضح ذلك.

26. استقرار الجسم لماذا تكون المركبة المعدّلة التي أضيف إليها نوابض لتبدو مرتفعة، أقل استقرارًا من مركبة مشابهة غير معدّلة؟

27. شرطا الاتزان أعط مثالاً على جسم في الحالات التالية:

a. متزن دورانيًّا، ولكنه غير متزن انتقاليًّا.

b. متزن انتقاليًّا، ولكنه غير متزن دورانيًّا.

28. تعيين مركز الكتلة وضّح كيف يمكنك إيجاد مركز كتلة كتاب الفيزياء؟

29. دوران الأطر المرجعية إذا وضعت قطعة نقد على قرص دوّار، وبدأت في الانزلاق إلى الخارج عند زيادة سرعة دورانها، فما القوى المؤثرة فيها؟

30. التفكير الناقد عندما تستخدم الكوابح ينخفض الجزء الأمامي للسيارة إلى أسفل. لماذا؟

تحضيري تحضيري تحضيري

ستتحرك الكرة المصمتة للأمام، بينما من المرجح أن ترتد الكرة البلاستيكية الجوفاء خفيفة الوزن في الاتجاه المعاكس.

العوامل التي تؤثر في سرعة الكرتين واتجاه حركتهما بعد التصادم هي كتلتا الكرتين وسرعتاهما المتجهة قبل التصادم.

تجربة استهلالية

ماذا يحدث عندما تصطدم كرة بلاستيكية جوفاء بكرة مصمتة؟

سؤال التجربة ما الاتجاه الذي تتحرك فيه كل من الكرتين البلاستيكيتين الجوفاء والمصمتة بعد تصادمهما مباشرة؟

الخطوات

1. دحرج كرة مصمتة وكرة بلاستيكية جوفاء إحداهما في اتجاه الأخرى على سطح أملس.
2. لاحظ اتجاه حركة كل كرة بعد تصادمهما معًا.
3. أعد التجربة، على أن تحافظ على الكرة المصمتة ساكنة، وتدحرج الكرة البلاستيكية الجوفاء نحوها.
4. لاحظ اتجاه حركة كل كرة بعد تصادمهما معًا.
5. أعد التجربة مرة أخرى على أن تحافظ هذه المرة على بقاء الكرة البلاستيكية الجوفاء ساكنة، وتدحرج الكرة المصمتة نحوها.
6. لاحظ اتجاه حركة كل كرة بعد تصادمهما.

التحليل

ما العوامل التي تؤثر في سرعة الكرتين بعد تصادمهما؟ وما العوامل التي تحدّد اتجاه حركة كل منهما بعد تصادمهما؟

التفكير الناقد ما العامل أو العوامل التي تسبب ارتداد الكرة المصمتة إلى الخلف بعد اصطدامها بالكرة البلاستيكية الجوفاء؟

تحضيري

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

3–1 الدفع والزخم Impulse and Momentum

إن مشاهدة لاعب البيسبول وهو يضرب الكرة ليحرز النقاط أمر مثير للدهشة. حيث يرمي لاعب المرمى الكرة في اتجاه اللاعب ذي المضرب، الذي يضربها بدوره لترتد بسرعة كبيرة تحت تأثير دفع المضرب. ستقوم بدراسة التصادم في هذا الفصل بطريقة مختلفة عما فعلت في الفصول السابقة؛ حيث كان التركيز على القوتين المتبادلتين بين الكرة والمضرب وما ينتج عنهما من تسارع. أما في هذا الفصل فالتركيز على التفاعل الفيزيائي بين الجسمين المتصادمين. إن الخطوة الأولى في تحليل التفاعل الفيزيائي بين الجسمين هي وصف ما حدث للكرة والمضرب قبل التصادم وفي أثنائه وبعده. ونستطيع تبسيط دراسة التصادم بين الكرة والمضرب بافتراض أن جميع الحركات أفقية؛ حيث تحركت الكرة في اتجاه المضرب قبل التصادم، وتأثرت الكرة بالمضرب مما أدى إلى انضغاطها في أثناء التصادم، فتحركت الكرة بسرعة أكبر مبتعدة عن المضرب بعد تصادمهما، وأكمل المضرب مساره ولكن بسرعة أقل.

الأهداف

- **تتعرّف** مفهوم الزخم.
- **تحدّد** مقدار الدفع الواقع على جسم.

المفردات

الدفع

الزخم

نظرية الدفع – الزخم

تحضيري

يرتد الجسم الأخف عادة. لكي ترتد الكرة المصمتة، يجب أن تكون أخف من الكرة الجوفاء، أو أن تكون مرونة الكرة الجوفاء عالية جدًا فتخزن طاقة الصدمة ثم تدفع الكرة المصمتة بقوة للخلف.

الدفع والزخم Impulse and Momentum

ما العلاقة بين السرعتين المتجهتين للكرة قبل التصادم وبعده والقوة المؤثرة فيها؟ يصف القانون الثاني لنيوتن في الحركة كيف تتغير السرعة المتجهة لجسم بفعل القوة المحصلة المؤثرة فيه؛ إذ يحدث التغير في السرعة المتجهة للكرة بسبب قوة المضرب المؤثرة في الكرة، وتتغير القوة خلال الزمن، كما في **الشكل 1 – 3**. تنضغط الكرة بعد التلامس مباشرة، وتستمر القوة في التزايد حتى تصل إلى أقصى قيمة لها (أكبر من وزن الكرة أكثر من 10000 مرة)، ثم تستعيد الكرة شكلها، وتتحرك مبتعدة عن المضرب بسرعة، ويقل مقدار القوة مباشرةً ليصبح صفرًا. ويستغرق هذا الحدث فترة زمنية مقدارها 3.0 ms. فكيف تستطيع حساب التغير في السرعة المتجهة لكرة البيسبول؟

الدفع يمكن إعادة كتابة القانون الثاني لنيوتن، $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$، باستخدام تعريف التسارع بأنه حاصل قسمة التغير في السرعة المتجهة على الزمن الضروري لإحداث التغير. ويمثل ذلك بالمعادلة:

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} = m\left(\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}\right)$$

بضرب طرفي المعادلة في الفترة الزمنية Δt ، نحصل على المعادلة التالية: $\boldsymbol{F}\Delta t = m\Delta \boldsymbol{v}$

إن **الدفع**، أو $\boldsymbol{F}\Delta t$ هو حاصل ضرب متوسط القوة المؤثرة في جسم في زمن تأثير القوة. ويقاس الدفع بوحدة N.s. ويتم إيجاد مقدار الدفع في الحالات التي تتغير فيها القوة مع الزمن من خلال تحديد المساحة تحت منحنى العلاقة البيانية للقوة مع الزمن. انظر إلى **الشكل 1–3**.

يحتوي الجانب الأيمن من المعادلة، $m\Delta \boldsymbol{v}$ على التغير في السرعة المتجهة:

$\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_f - \boldsymbol{v}_i$. حيث يكون $m\Delta \boldsymbol{v} = m\boldsymbol{v}_f - m\boldsymbol{v}_i$. ويعرف حاصل ضرب كتلة الجسم m في سرعته المتجهة $\boldsymbol{v}$ **بزخم** الجسم؛ حيث يقاس الزخم بوحدة kg.m/s. ويعرف زخم الجسم بالزخم الخطي أيضًا، ويُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

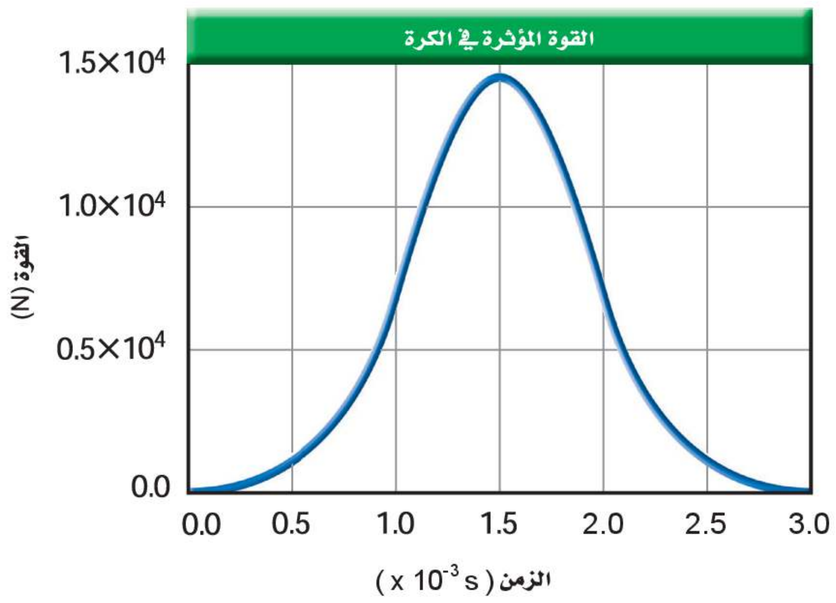
الزخم

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$$

زخم جسم ما يساوي حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته المتجهة.

دلالة الألوان

- متجهات الزخم والدفع باللون البرتقالي.
- متجهات القوة باللون الأزرق.
- متجهات التسارع باللون البنفسجي.
- متجهات الإزاحة باللون الأخضر.
- متجهات السرعة باللون الأحمر



الشكل 1–3 تزداد القوة المؤثرة في الكرة، ثم تتناقص بسرعة خلال عملية التصادم، كما في هذا الشكل البياني الذي يوضح منحنى القوة — الزمن.

بالرجوع إلى المعادلة $\boldsymbol{F}\Delta t = m\Delta \boldsymbol{v} = m\,\boldsymbol{v}_{\mathrm{f}} - m\,\boldsymbol{v}_{\mathrm{i}}$ ، حيث إن $m\,\boldsymbol{v}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{f}}$ و $m\,\boldsymbol{v}_{\mathrm{i}} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{i}}$ ، فإنه يمكننا إعادة كتابة هذه المعادلة على النحو الآتي:

$$\boldsymbol{F}\Delta t = m\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{f}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{i}}$$

يصف الجانب الأيمن من هذه المعادلة $\boldsymbol{p}_{\mathrm{f}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{i}}$ التغير في زخم جسم ما. وبذلك يكون الدفع على جسم ما يساوي التغير في زخمه. وهذا يسمى **نظرية الدفع – الزخم**. ويعبر عن هذه النظرية من خلال المعادلة الآتية:

نظرية الدفع – الزخم $\boldsymbol{F}\Delta t = \boldsymbol{p}_{\mathrm{f}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{i}}$

الدفع على جسم ما يساوي زخم الجسم النهائي مطروحًا منه زخمه الابتدائي.

إذا كانت القوة المؤثرة في جسم ثابتة فإن الدفع عبارة عن حاصل ضرب القوة في الفترة الزمنية التي أثرت خلالها هذه القوة. وعمومًا لا تكون القوة ثابتة، لذا يتم إيجاد الدفع باستخدام متوسط القوة مضروبًا في الفترة الزمنية التي أثرت خلالها، أو عن طريق إيجاد المساحة تحت منحنى القوة – الزمن.

ولأنّ السرعة كمية متجهة فإن الزخم أيضًا كمية متجهة. وبشكل مشابه لا بد أن يكون الدفع كمية متجهة؛ لأنَّ القوة كمية متجهة. وهذا يعني ضرورة أخذ الإشارات في الاعتبار عند التعامل مع الحركة في بعد واحد.

استخدام نظرية الدفع – الزخم
Using the Impulse Momentum Theorem

مـا التغير في زخم كرة البيسبول؟ بناءً على نظرية الدفع – الزخم، فإن التغير في الزخم يساوي الدفع المؤثر في الجسم. ويمكن حساب الدفع المؤثر في كرة بيسبول باستخدام منحنى القوة – الزمن؛ حيث يساوي المساحة تحت المنحنى. في **الشكل 1–3**، الدفع يساوي 13.1 N.s تقريبًا. ويكون اتجاه الدفع في اتجاه القوة نفسه. لذا فإنّ التغير في زخم الكرة يساوي 13.1 N.s أيضًا، ولأنّ 1 N.s تساوي 1 kg.m /s، فإنَّ الزخم الذي تكتسبه الكرة يساوي 13.1 kg.m /s، ويكون اتجاهه في نفس اتجاه القوة المؤثرة في الكرة.

افترض أنَّ لاعبًا ما ضرب كرة كتلتها 0.145 kg بمضرب، وأن السرعة المتجهة للكرة قبل اصطدامها بالمضرب تساوي 38 m /s – . وبافتراض الاتجاه الموجب نحو رامي الكرة، يكون الزخم الابتدائي لكرة البيسبول:

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{i}} = (0.145\ \mathrm{kg})\ (-38\ \mathrm{m/s}) = -5.5\ \mathrm{kg.m/s}$$

ما زخم الكرة بعد التصادم؟ طبّق نظرية الدفع – الزخم لإيجاد الزخم النهائي:

$\boldsymbol{p}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{i}} + \boldsymbol{F}\Delta t$. أي أن الزخم النهائي هو مجموع الزخم الابتدائي والدفع. ويحسب

تطبيق الفيزياء

أحذية الركض

يُعد الركض على الأقدام عملاً شاقًّا؛ فعندما يضرب العدّاء الأرض بقدمه تؤثر الأرض في القدم بقوة تساوي أربعة أمثال وزنه. ويصمم الحذاء الرياضي بحيث يكون نعله مزودًا بوسائد امتصاص؛ لتقليل القوة المؤثرة في القدم، مع المحافظة على دفع جيد، من خلال إطالة زمن تأثير القوة.

الزخم النهائي للكرة على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} p_f &= p_i + 13.1\ \text{kg . m/s} \\ &= -5.5\ \text{kg . m/s} + 13.1\ \text{kg . m/s} \\ &= +7.6\ \text{kg . m/s} \end{aligned}$$

ما السرعة المتجهة النهائية للكرة؟ بما أنّ $\boldsymbol{p}_f = m\boldsymbol{v}_f$ ، فإنه يمكن حساب $\boldsymbol{v}_f$ كالآتي:

$$v_f = \frac{p_f}{m} = \frac{+7.6\ \text{kg .m /s}}{0.145\ \text{kg}} = +52\ \text{m/s}$$

إن ضرب الكرة في الاتجاه الصحيح بسرعة 52 m /s يكفي لاجتياز حدود الملعب.

نظرية الدفع – الزخم والحفاظ على الحياة

يحدث تغير كبير في الزخم عندما يكون الدفع كبيرًا. وينتج الدفع الكبير إما عن قوة كبيرة تؤثر خلال فترة زمنية قصيرة، أوعن قوة صغيرة تؤثر خلال فترة زمنية طويلة، وقد روعيت هذه المفاهيم الفيزيائية عند تصميم أنظمة الأمان في السيارات الحديثة، ومن ذلك تزويدها بوسائد هوائية.

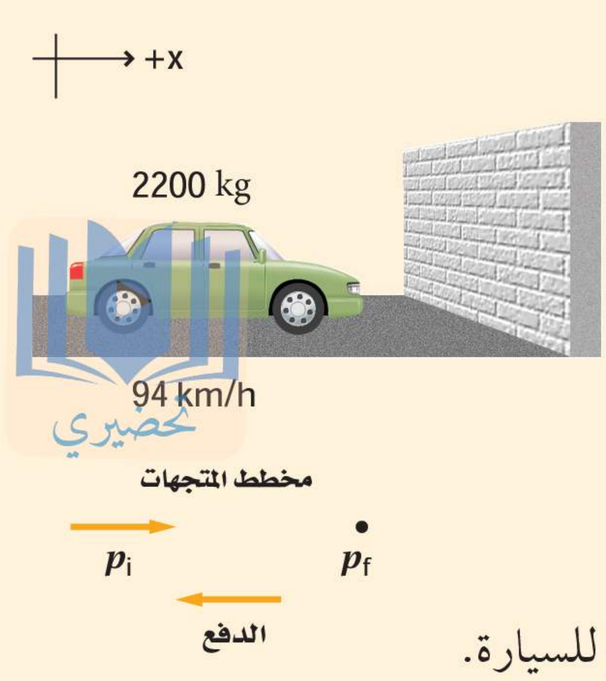
ماذا يحدث للسائق عندما تتوقف السيارة فجأة نتيجة تصادم؟ يساوي الزخم النهائي $\boldsymbol{p}_f$ في حالات التصادم صفرًا، أما الزخم الابتدائي $\boldsymbol{p}_i$ فلا يتأثر بوجود الوسادة الهوائية أو عدمه، وتبعًا لذلك يكون الدفع $\boldsymbol{F}\,\Delta t$ هو نفسه في الحالتين؛ في وجود الوسادة وفي عدم وجودها. ما عمل الوسادة الهوائية؟ تعمل الوسادة الهوائية، كتلك المبينة في **الشكل 2 – 3** على توفير الدفع المطلوب، لكنها تقلل القوة عن طريق زيادة زمن تأثيرها، كما أنّها توزع تأثير القوة على مساحة أكبر من جسم الشخص، ممّا يقلّل من احتمال حدوث الإصابات.

الشكل 2–3 تنتفخ الوسادة الهوائية في أثناء التصادم، حيث تسبب القوة الناجمة عن التصادم تحفيز المجس الذي يحفز بدوره تفاعلًا كيميائيًّا ينتج غازًا، مما يؤدي إلى انتفاخ الوسادة الهوائية بسرعة.

الربط مع رؤية 2030
رؤية VISION 2030
المملكة العربية السعودية KINGDOM OF SAUDI ARABIA
مجتمع حيوي
من أهداف الرؤية
٤.٣.٢ تعزيز السلامة المرورية

مثـــال 1

متوسط القوة تتحرك مركبة كتلتها 2200 kg بسرعة (26 m /s) 94 km /h ، حيث يمكنها التوقف خلال 21 s، عن طريق الضغط على الكوابح برفق، ويمكن أن تتوقف المركبة خلال 3.8 s إذا ضغط السائق على الكوابح بشدة، بينما يمكن أن تتوقف خلال 0.22 s إذا اصطدمت بحائط أسمنتي. ما متوسط القوة المؤثرة في المركبة في كل حالة من حالات التوقف؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم النظام.
- اختر نظام إحداثيات وحدِّد الاتجاه الموجب ليكون في اتجاه السرعة المتجهة للسيارة.
- اعمل رسمًا تخطيطيًّا لمتجهات الزخم والدفع.

المعلوم			المجهول
$\Delta t_{\text{الضغط على الكوابح برفق}} = 21\ \text{s}$	$m = 2200\ \text{kg}$		$F_{\text{الضغط على الكوابح برفق}} = ?$
$\Delta t_{\text{الضغط على الكوابح بشدة}} = 3.8\ \text{s}$	$v_i = +26\ \text{m / s}$		$F_{\text{الضغط على الكوابح بشدة}} = ?$
$\Delta t_{\text{الاصطدام بحائط}} = 0.22\ \text{s}$	$v_f = +0.0\ \text{m / s}$		$F_{\text{الاصطدام بحائط}} = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

أولاً: نحسب الزخم الابتدائي p_i :

عوّض مستخدمًا $m = 2200\ \text{kg}$ ، $v_i = +26\ \text{m/s}$

$$\begin{aligned} p_i &= mv_i \\ &= (2200\ \text{kg})\ (+26\ \text{m/s}) \\ &= +5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s} \end{aligned}$$

ثانيًا: نحسب الزخم النهائي، p_f :

عوّض مستخدمًا $m = 2200\ \text{kg}$ ، $v_f = +0.0\ \text{m/s}$

$$\begin{aligned} p_f &= mv_f \\ &= (2200\ \text{kg})\ (+0.0\ \text{m/s}) \\ &= 0.0\ \text{kg.m/s} \end{aligned}$$

ثالثًا: نطبق نظرية الدفع – الزخم للحصول على القوة المطلوبة لإيقاف المركبة:

عوّض مستخدمًا $p_i = 5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$ ، $p_f = 0.0\ \text{kg.m/s}$

$$\begin{aligned} F\Delta t &= p_f - p_i \\ &= (+0.0\ \text{kg.m/s}) - (5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s}) \\ &= -5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s} \end{aligned}$$

$$F = \frac{-5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s}}{\Delta t}$$

عوّض مستخدمًا $\Delta t_{\text{الضغط على الكوابح برفق}} = 21\ \text{s}$.

$$\begin{aligned} F_{\text{الضغط على المكابح برفق}} &= \frac{-5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s}}{21\ \text{s}} \\ &= -2.7 \times 10^3\ \text{N} \end{aligned}$$

عوّض مستخدمًا $\Delta t_{\text{الضغط على الكوابح بشدة}} = 3.8\ \text{s}$.

$$\begin{aligned} F_{\text{الضغط على المكابح بشدة}} &= \frac{-5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s}}{3.8\ \text{s}} \\ &= -1.5 \times 10^4\ \text{N} \end{aligned}$$

عوّض مستخدمًا $\Delta t_{\text{الاصطدام بحائط}} = 0.22\ \text{s}$.

$$\begin{aligned} F_{\text{الاصطدام بحائط}} &= \frac{-5.7 \times 10^4\ \text{kg.m/s}}{0.22\ \text{s}} \\ &= -2.6 \times 10^5\ \text{N} \end{aligned}$$

دليل الرياضيات

إجراء العمليات الحسابية باستخدام الأرقام المعنوية

204–205

هل الوحدات صحيحة؟ نعم، القوة تقاس بالنيوتن N، وهو ما تم الحصول عليه.

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس القوة بالنيوتن، وكان الجواب بالوحدة N نفسها.
- **هل للاتجاه معنى؟** تؤثر القوة في الاتجاه المعاكس لسرعة السيارة، لذا يكون اتجاه القوة في الاتجاه السالب.
- **هل الجواب منطقي؟** يزن الشخص عدة مئات نيوتن، لذا فمن المنطقي أن تكون القوة اللازمة لإيقاف سيارة عدة آلاف نيوتن، ولأن الدفع في عمليات الإيقاف الثلاثة هو نفسه؛ فكلما قلّ زمن التوقف أكثر من عشر مرات ازدادت القوة أكثر من عشر مرات.

هل للاتجاه معنى؟ نعم، الإشارة السالبة للقوة تعني أن اتجاه القوة معاكس لاتجاه السرعة الابتدائية للسيارة، أي أنها قوة إعاقة (فرملة).

هل الجواب منطقي؟ نعم، القوة اللازمة لإيقاف السيارة خلال فترة زمنية أطول تكون أقل من القوة اللازمة لإيقافها في فترة زمنية أقصر. وهذا يؤكد على أهمية زيادة زمن التصادم لتقليل القوة.

1. a. زخم السيارة يساوي 2.32×10^4 kg.m/s في اتجاه الشرق.
b. سرعة السيارة الأخرى 10.7 m/s في اتجاه الشرق.

مسائل تدريبية

1. تتحرك سيارة صغيرة كتلتها 725 kg بسرعة 115 km /h في اتجاه الشرق. عبر عن حركة السيارة برسم تخطيطي.

a. احسب مقدار زخمها وحدد اتجاهه، وارسم سهما على الرسم التخطيطي يعبر عن الزخم.

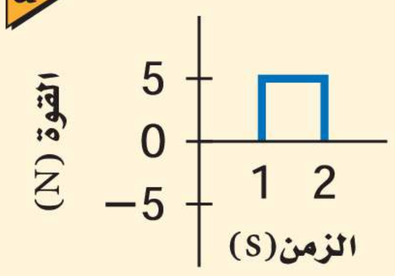
b. إذا امتلكت سيارة أخرى الزخم نفسه، وكانت كتلتها 2175 kg، فما سرعتها المتجهة؟

2. إذا ضغط السائق في السؤال السابق على الكوابح بشدة لإبطاء السيارة خلال 2.0 s. وكان متوسط القوة المؤثرة في السيارة لإبطائها يساوي 5.0×10^3 N،

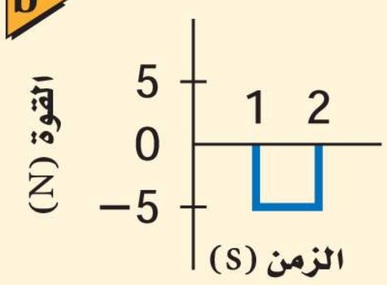
a. ما التغير في زخم السيارة؟ ما مقدار واتجاه الدفع على السيارة؟

b. أكمل الرسمين لما قبل الضغط على الكوابح وبعده، ثمّ حدّد الزخم والسرعة المتجهة للسيارة بعد الانتهاء من الضغط على الكوابح.

a



b



■ **الشكل 3 – 3**

3. تتدحرج كرة بولنج كتلتها 7.0 kg على ممر الانزلاق بسرعة متجهة مقدارها 2.0 m /s. احسب سرعة الكرة، واتجاه حركتها بعد تأثير كل دفع من الدفعين المبينين في **الشكلين 3a–3 و3b – 3**.

4. سرّع سائق عربة ثلج كتلتها 240.0 kg، وذلك بالتأثير بقوة أدت إلى زيادة سرعتها من 6.0 m /s إلى 28.0 m /s خلال فترة زمنية مقدارها 60.0 s.

a. ارسم مخططًا يمثل الوضعين الابتدائي والنهائي للعربة.

b. ما التغير في زخم العربة؟ وما الدفع على العربة؟

c. ما مقدار متوسط القوة التي أثرت في العربة؟

5. افترض أنَّ شخصًا كتلته 60.0 kg موجود في المركبة التي اصطدمت بالحائط الأسمنتي في المثال 1، حيث السرعة المتجهة للشخص مساوية للسرعة المتجهة للمركبة قبل التصادم وبعده، وتغيرت هذه السرعة المتجهة خلال 0.2 s. ارسم مخططًا يمثل المسألة.

a. ما متوسط القوة المؤثرة في الشخص؟

b. يعتقد بعض الأشخاص أنّ بإمكانهم أن يوقفوا اندفاع أجسامهم إلى الأمام في مركبة ما عندما تتوقف فجأة، وذلك بوضع أيديهم على لوحة العدادات. احسب كتلة جسم وزنه يساوي القوة التي حسبتها في الفرع **a**. وهل تستطيع رفع مثل هذه الكتلة؟ وهل أنت قويّ بدرجة كافية لتوقف جسمك باستخدام ذراعيك؟

2. a. التغير في الزخم = -1.0×10^4 kg.m/s. مقدار الدفع يساوي 1.0×10^4 N.s واتجاهه معاكس لاتجاه الحركة.
b. الزخم النهائي = 1.3×10^4 kg.m/s، والسرعة النهائية = 18 m/s في اتجاه الشرق.

3. بعد الدفع في الشكل 3a، تكون سرعة الكرة 1.4 m/s في الاتجاه الموجب. وبعد الدفع في الشكل 3b، تكون سرعتها 1.4 m/s في الاتجاه السالب.

4. متوسط القوة التي أثرت في العربة يساوي 0.898 N.

5. b. مقدار القوة المؤثرة في الشخص هو 7.1×10^3 N.
c. لا، هذه القوة تعادل وزن جسم كتلته تقارب 724 kg، وهي قوة هائلة جدًا لا يمكن لشخص رفعها أو إيقافها بذراعيه.

3–1 مراجعة

6. **الزخم** هل يختلف زخم سيارة تتحرك جنوبًا عن زخم السيارة نفسها عندما تتحرك شمالاً، إذا كان مقدار السرعة في الحالتين متساويًا؟ ارسم متجهات الزخم لتدعم إجابتك.

7. **الدفع والزخم** عندما تقفز من ارتفاع معين إلى الأرض فإنك تثني رجليك لحظة ملامسة قدميك الأرض. بيّن لماذا تفعل هذا اعتمادًا على المفاهيم الفيزيائية التي تعلمتها في هذا الفصل.

8. **الزخم** أيّهما له زخم أكبر، ناقلة نفط راسية بثبات في رصيف ميناء، أم قطرة مطر ساقطة؟

9. **الدفع والزخم** قذفت كرة بيسبول كتلتها 0.174 kg أفقيًّا بسرعة 26.0 m/s. وبعد أن ضُربت الكرة بالمضرب تحركت في الاتجاه المعاكس بسرعة 38.0 m/s.

   a. ارسم متجهات الزخم للكرة قبل ضربها بالمضرب وبعده.

   b. ما التغير في زخم الكرة؟

   c. ما الدفع الناتج عن المضرب؟

   d. إذا بقي المضرب متصلاً بالكرة مدة 0.80 ms فما متوسط القوة التي أثر بها المضرب في الكرة؟

10. **الزخم** إن مقدار سرعة كرة السلة لحظة اصطدامها بالأرض هو نفسه بعد التصادم مباشرة. هل يعني ذلك أن التغير في زخم الكرة يساوي صفرًا عند اصطدامها بالأرض؟ إذا كان الجواب بالنفي ففي أيّ اتجاه يكون التغير في الزخم؟ ارسم متجهات الزخم لكرة السلة قبل أن تصطدم بالأرض وبعده.

11. **التفكير الناقد** يصوّب رام سهامه في اتجاه هدف، فتنغرز بعض السهام في الهدف، ويرتد بعضها الآخر عنه. افترض أن كتل السهام وسرعاتها المتجهة متساوية، فأيّ السهام ينتج دفعًا أكبر على الهدف؟ تلميح: *ارسم مخططًا تبيّن فيه زخم السهام قبل إصابة الهدف وبعدها في الحالتين.*

6. مقدار الزخم متساوٍ في الحالتين لأن الكتلة ومقدار السرعة لم يتغيرا. لكن اتجاه الزخم متعاكس، لذا فمتجها الزخم غير متساويين ($p_1 = -p_2$).

7. عند ثني الركبتين، يزداد الزمن (Δt) الذي يستغرقه الجسم ليتوقف. ووفقًا لنظرية الدفع-الزخم ($F\Delta t = \Delta p$)، فإن زيادة زمن التلامس تقلل من متوسط القوة (F) المؤثرة على الجسم، مما يقلل من خطر الإصابة.

8. قطرة المطر الساقطة لها زخم أكبر. زخم ناقلة النفط الراسية يساوي صفرًا لأن سرعتها صفر، بينما زخم قطرة المطر أكبر من صفر لأن لها سرعة وكتلة.

10. لا، هذا غير صحيح. الزخم كمية متجهة. بما أن اتجاه سرعة الكرة ينعكس بعد اصطدامها بالأرض، فإن التغير في زخمها لا يساوي صفرًا، بل يساوي ضعف زخمها الابتدائي تقريبًا ($\Delta p \approx 2mv$).

11. السهم الذي يرتد (B) ينتج دفعًا أكبر. لأن التغير في زخمه ($\Delta p = p_f - p_i$) يكون أكبر. فالسهم الذي يستقر (A) يكون تغير زخمه $\Delta p = mv$، بينما السهم المرتد (B) يكون تغير زخمه $\Delta p > mv$ لأنه يعكس اتجاه حركته.

9. b. التغير في زخم الكرة يساوي 11.1 kg.m/s في اتجاه حركة الكرة بعد ضربها.
c. الدفع الناتج عن المضرب يساوي 11.1 N.s في نفس الاتجاه.
d. متوسط القوة التي أثر بها المضرب يساوي 1.4×10^4 N.

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

3–2 حفظ الزخم Conservation of Momentum

الأهداف

- **تربط** بين القانون الثالث لنيوتن وحفظ الزخم.
- **تعرّف** الظروف اللازمة لحفظ الزخم.
- **تحل** مسائل حفظ الزخم.

المفردات

النظام المغلق

النظام المعزول

قانون حفظ الزخم

لقد درســت في الدرس الأول من هذا الفصل، كيف تغير القوة المؤثرة في فترة زمنية زخمَ كرة بيسبول. ولقد تعلمت من القانون الثالث لنيوتن أنّ القوى هي نتيجة للتفاعلات بين جسمين؛ فعندما يؤثر المضرب في الكرة بقوة فإنّ الكرة تؤثر في المضرب بمقدار القوة نفسه ولكن في الاتجاه المعاكس. فهل يتغير زخم المضرب؟

تصادم جسمين Two - Particle Collisions

عندما يضرب اللاعب كرة البيســبول فإنّ المضرب ويد اللاعب وذراعيه والأرض التي يقــف عليها تتفاعل معًا، لذا لا يمكن اعتبار المضرب جســمًا منفصلاً. لتيســير دراســة التصادم يمكن أن نتفحص نظامًا أبســط، مقارنة بالنظام المركب الســابق، كالتصادم بين كرتين. انظر **الشكل 4–3** .

إن كل كرة تؤثر في الأخرى بقوة في أثناء عمليــة تصادم الكرتين معًا، وإن القوتين اللتين تؤثر بهما كلّ كرة في الأخرى متســاويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه، على الرغم من اختلاف حجمي الكرتين وسرعتيهما المتجهتين؛ وذلك اســتنادًا إلى القانون الثالث لنيوتن في الحركة، وتُمثل هاتان القوتان بالمعادلة الآتية: $\boldsymbol{F}_{\text{C في D}} = -\boldsymbol{F}_{\text{D في C}}$.

ما العلاقة بين الدفعين اللذين تبادلت الكرتان التأثير بهما؟ بما أنّ القوتين أثرتا خلال الفترة الزمنية نفسها فإنّ دفعَي الكرتين يجب أن يكونا متساويين في المقدار ومتعاكسين في الاتجاه. كيف تغير زخم الكرتين نتيجة للتصادم؟

استنادًا إلى نظرية الدفع–الزخم فإنّ التغير في الزخم يساوي الدفع، وتبعًا لذلك فإن التغير في الزخم لكل من الكرتين كالآتي:

للكرة C: $p_{Cf} - p_{Ci} = \boldsymbol{F}_{\text{C في D}}\,\Delta t$

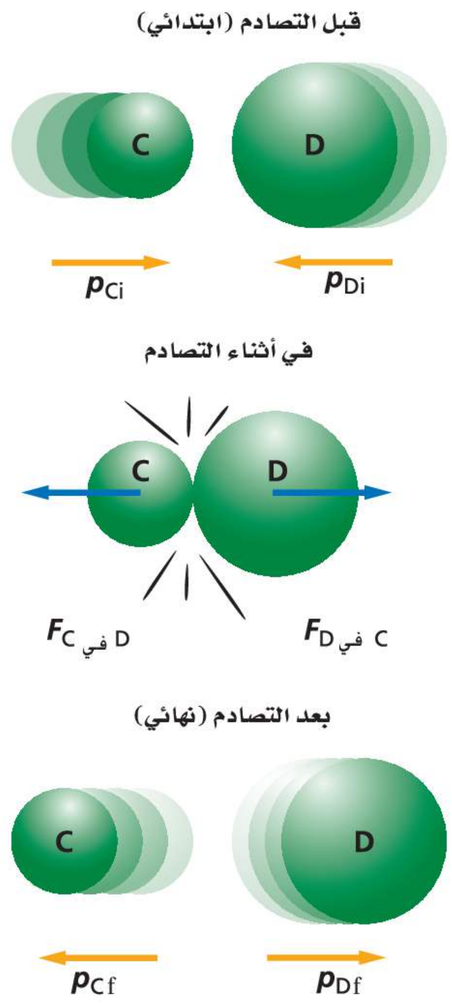
وللكرة D: $p_{Df} - p_{Di} = \boldsymbol{F}_{\text{D في C}}\,\Delta t$

والآن نقــارن بين التغير في الزخم لــكل من الكرتين؛ حيث إن الفــترة الزمنية التي تؤثر خلالها القوتان هي نفسها، كما أن $\boldsymbol{F}_{\text{C في D}} = -\boldsymbol{F}_{\text{D في C}}$ وفقًا للقانون الثالث لنيوتن في الحركة، فإنّ دفعَي الكرتين متســاويان في المقدار ومتعاكسان في الاتجاه. وتبعًا لذلك فإن:

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

وبإعادة ترتيب المعادلة نحصل على الآتي: $p_{Cf} + p_{Df} = p_{Ci} + p_{Di}$

وتشــير هذه المعادلة إلى أنّ مجموع زخم الكرتين قبل التصادم يساوي مجموع زخميهما بعد التصادم. وهذا يعني أنّ الزخم المكتسب من الكرة D يساوي الزخم المفقود من الكرة C. فإذا كان النظام يتكوّن من الكرتين فإنّ زخم النظام يكون ثابتًا أو محفوظًا.



الشكل 4–3 عندما تصطدم كرتان فإن كلًا منهما تؤثر في الأخرى بقوة مما يؤدي إلى تغير زخميهما.

الزخم في نظام مغلق معزول

Momentum in a Closed، Isolated System

مـــا الشروط التي يكون عندها زخم النظام المكون مـــن كرتين محفوظًا؟ إنّ الشرط الأول والأكثر وضوحًا هو عدم فقدان النظام أو اكتسابه كتلة. ويُسمى النظام الذي لا يكتسب كتلة ولا يفقدها **بالنظام المغلق**. أما الـــشرط الثاني لحفظ الزخم في أيّ نظام فهـــو أن تكون القوى المؤثرة فيه قوى داخلية؛ أي لا تؤثر في النظام قوى من أجسام موجودة خارجه.

يوصف النظام المغلق بأنه **نظام معزول** عندما تكون محصلة القوى الخارجية عليه تساوي صفرًا. ولا يوجد على سطح الكرة الأرضية نظام يمكن وصفه بأنّه معزول تمامًا؛ بسبب وجود تفاعلات بين النظام ومحيطه. وغالبًا ما تكون هذه التفاعلات صغيرة جدًّا، بحيث يمكن إهمالها عند حل المسائل الفيزيائية.

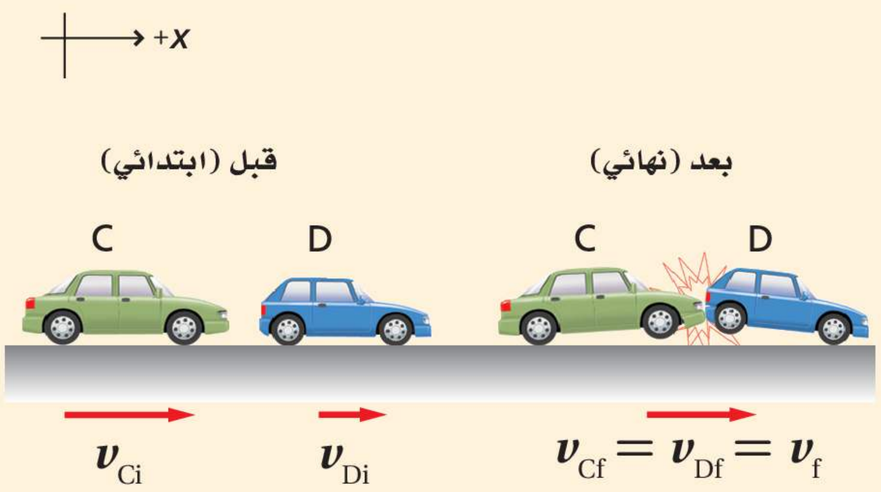
يمكن للأنظمة أن تحتوي على أيّ عدد من الأجســـام، وهذه الأجســـام يمكن أن يلتحم (يلتصق) بعضها ببعـــض أو تتفكك عند التصادم. وينص **قانون حفظ الزخم** على أن زخم أي نظام مغلق ومعزول لا يتغير. وســـيجعلك هذا القانون قادرًا على الربط بين ظروف النظام قبل التفاعـــل وبعده، دون الحاجة إلى معرفة تفاصيل هذا التفاعل.

مثـــــال 2

السرعة تحركت سيارة كتلتها 1875 kg بسرعة 23 m/s ، فاصطدمت بمؤخرة سيارة صغيرة كتلتها 1025 kg تسير على الجليد بسرعة 17 m /s في الاتجاه نفسه، فالتحمت السيارتان إحداهما بالأخرى. ما السرعة التي تتحرك بها السيارتان معًا بعد التصادم مباشرة؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- تعريف النظام
- بناء نظام إحداثيات
- رسم تخطيطي يمثل حالتي السيارتين قبل التصادم وبعده.
- رسم تخطيطي لمتجهات الزخم.



المعلوم

$m_C = 1875\ kg$

$v_{Ci} = +23\ m/s$

$m_D = 1025\ kg$

$v_{Di} = +17\ m/s$

المجهول

$v_f = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

الزخم محفوظ لأنّ الأرضية الملساء (الجليد) تجعل القوة الخارجية الكلية على السيارتين صفرًا تقريبًا. $p_i = p_f$

$$p_{Ci} + p_{Di} = p_{Cf} + p_{Df}$$

$$m_C v_{Ci} + m_D v_{Di} = m_C v_{Cf} + m_D v_{Df}$$

12. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: p_i = p_f، فإن m1*v1i + m2*v2i = (m1+m2)*vf.
بالتعويض: (3.0e5 kg)*(2.2 m/s) + (3.0e5 kg + 3.0e5 kg)*vf = 0. إذن السرعة النهائية vf = 1.1 m/s في اتجاه حركة العربة الأولى.

بما أن السيارتين التحمتا معًا فإن لهما السرعة المتجهة نفسها بعد التصادم ($\boldsymbol{v}_f$).

دليل الرياضيات

ترتيب العمليات 213

$$\boldsymbol{v}_{Cf} = \boldsymbol{v}_{Df} = \boldsymbol{v}_f$$

$$m_C \boldsymbol{v}_{Ci} + m_D \boldsymbol{v}_{Di} = (m_C + m_D)\boldsymbol{v}_f$$

نعيد ترتيب المعادلة لنحسب $\boldsymbol{v}_f$.

عوّض مستخدمًا $m_C = 187\ \text{kg}$، $v_{Di} = +17\ \text{m/s}$

$m_D = 1025\ \text{kg}$، $v_{ci} = +23\ \text{m/s}$

$$\boldsymbol{v}_f = \frac{(m_C \boldsymbol{v}_{Ci} + m_D \boldsymbol{v}_{Di})}{(m_C + m_D)}$$

$$= \frac{(1875\ \text{kg})\ (+23\ \text{m/s}) + (1025\ \text{kg})\ (+17\ \text{m/s})}{(1875\ \text{kg} + 1025\ \text{kg})}$$

$$= +21\ \text{m/s}$$

17. بافتراض أن التصادم مرن، يتم حفظ الزخم والطاقة الحركية. بحل معادلتي الحفظ، نجد أن السرعة النهائية للكرة الثانية هي 0 m/s.

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس السرعة بـ m/s ، وكان الجواب بهذه الوحدات نفسها.
- **هل للاتجاه معنى؟** $\boldsymbol{v}_i$ و $\boldsymbol{v}_f$ ، في الاتجاه الموجب، لذا يجب أن تكون قيمة $\boldsymbol{v}_f$ موجبة.
- **هل الجواب منطقي؟** إنّ مقدار السرعة النهائية $\boldsymbol{v}_f$ يقع بين سرعة كل من السيارتين قبل التصادم، ولكنه أقرب إلى سرعة السيارة الكبيرة، وهذا منطقي.

13. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: p_i = p_f، فإن m_puck*v_puck_i + m_goalie*v_goalie_i = vf*(m_puck+m_goalie). بالتعويض: 0 = (0.105 kg + 75 + (24 m/s)*(kg 0.105) vf = 0.034 m/s. إذن السرعة النهائية vf في اتجاه حركة القرص.

مسائل تدريبية

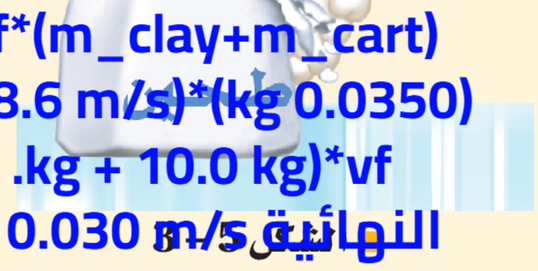
12. اصطدمت سيارتا شحن كتلة كل منهما $3.0 \times 10^5\ \text{kg}$، فالتصقتا معًا، فإذا كانت سرعة إحداهما قبل التصادم مباشرة 2.2 m/s، وكانت الأخرى ساكنة، فما سرعتهما النهائية؟

13. يتحرك قرص لعبة هوكي كتلته 0.105 kg بسرعة 24 m/s ، فيمسك به حارس مرمى كتلته 75 kg في حالة سكون. ما السرعة التي ينزلق بها حارس المرمى على الجليد؟

14. اصطدمت رصاصة كتلتها 35.0 g بقطعة خشب ساكنة كتلتها 5.0 kg، فاستقرت فيها، فإذا تحركت قطعة الخشب والرصاصة معًا بسرعة 8.6 m/s فما السرعة الابتدائية للرصاصة قبل التصادم؟

14. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: p_i = p_f، فإن m_clay*v_clay_i + m_cart*v_cart_i = vf*(m_clay+m_cart). بالتعويض: 0 = (0.0350 + (8.6 m/s)*(kg 0.0350 kg + 10.0 kg). إذن السرعة النهائية vf = 0.030 m/s في اتجاه حركة الطين.

15. تحركت رصاصة كتلتها 35.0 g بسرعة 475 m/s ، فاصطدمت بكيس من الطحين كتلته 2.5 kg موضوع على أرضية ملساء في حالة سكون، فاخترقت الرصاصة الكيس، انظر إلى **الشكل 5–3**، وخرجت منه بسرعة 275 m/s. ما سرعة الكيس لحظة خروج الرصاصة منه؟



16. إذا اصطدمت الرصاصة المذكورة في السؤال السابق بكرة فولاذية كتلتها 2.5 kg في حالة سكون، فارتدت الرصاصة عنها بسرعة مقدارها 5.0 m/s ، فكم تكون سرعة الكرة بعد ارتداد الرصاصة؟

17. تحركت كرة كتلتها 0.50 kg بسرعة 6.0 m/s، فاصطدمت بكرة أخرى كتلتها 1.00 kg تتدحرج في الاتجاه المعاكس بسرعة مقدارها 12.0 m/s. فإذا ارتدت الكرة الأقل كتلة إلى الخلف بسرعة مقدارها 14 m/s بعد التصادم فكم يكون مقدار سرعة الكرة الأخرى بعد التصادم؟

15. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: p_i = p_f، فإن m_bullet*v_bullet_i + 0 = m_bullet*v_bullet_f + m_block*v_block_f. بالتعويض: (475 m/s)*(kg 0.0350) = v_block_f*(2.5 kg) + (275 m/s)*(kg 0.0350). إذن سرعة الكيس v_block_f = 2.8 m/s.

16. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: p_i = p_f، فإن m1*v1i + 0 = m1*v1f + m2*v2f. بالتعويض: (5.0 m/s)*(0.0350 kg) = (5.0 m/s-)*(kg 0.0350) + v2f*(kg 2.5). إذن سرعة الكرة v2f = 0.14 m/s.

الارتداد Recoil

مـــن المهم جدًّا تعريـــف أيّ نظام بدقة، فمثـــلاً يتغير زخم كرة بيســـبول عندما تؤثر قوة خارجية ناتجة عن المضرب فيها. وهذا يعني أن كرة البيســـبول ليســـت نظامًا معزولاً. من جهة أخرى فإن الزخم الـــكلي لكرتين متصادمتين ضمن نظام معزول لا يتغير؛ لأنّ جميع القوى تكون بين الأجســـام الموجودة داخل النظام. هل تســـتطيع إيجاد السرعات المتجهة النهائية للمتزلجين الموجودين في **الشـــكل 6 – 3**؟ افترض أنهما يتزلجان على سطح ناعم، دون وجود قوى خارجية، وأنهما انطلقا من السكون، وكان أحدهما خلف الآخر.

دفع المتزلـــجُ C "الصبي الأكـــبر"، المتزلجَ D "الصبـــي الأصغر"، فتحـــركا في اتجاهين متعاكســـين، ولأن قوة الدفع قوة داخلية، فإنه يمكن استخدام قانون حفظ الزخم لإيجاد السرعات النسبية للمتزلجين. كان الزخم الكلي للنظام قبل الدفع يساوي صفرًا، لذا يجب أن يكون الزخم الكلي صفرًا بعد الدفع أيضًا.

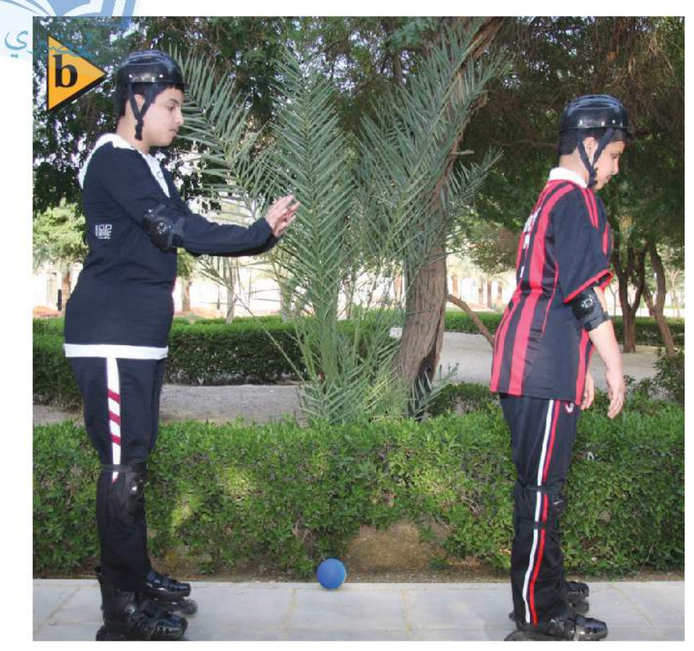
	قبل		بعد
$p_{Cf} + p_{Df}$	=	$p_{Ci} + p_{Di}$	
$p_{Cf} + p_{Df}$	=	0	
p_{Df}	=	$-p_{Cf}$	
$m_D v_{Df}$	=	$-m_C v_{Cf}$	

تم اختيار نظام الإحداثيات ليكون الاتجاه الموجـــب إلى اليمين. يكون زخما المتزلجين بعد الدفع متساويين في المقدار ومتعاكســـين في الاتجاه. ويعد رجوع المتزلج C إلى الخلف بعد الدفع مثالًا على حالة الارتداد. فهل تكون السرعتان المتجهتان للمتزلجين متســـاويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه أيضًا؟

يمكن إعادة كتابة المعادلة الأخيرة أعلاه، لإيجاد السرعة المتجهة للمتزلج C، على النحو الآتي:

$$v_{Cf} = \left(\frac{m_D}{-m_C}\right) v_{Df}$$

لـــذا فإن السرعتين المتجهتين تعتمدان على نســـبة كتلتي المتزلجـــين إحداهما إلى الأخرى. فمثلاً إذا كانت كتلة المتزلج C 68.0 kg وكتلة المتزلج D 45.4 kg، كانت نسبة السرعتين المتجهتين لهما 68.0 :45.4، أو 1.50، لذا فإنّ المتزلج الذي كتلته أقل يتحرك بسرعة متجهة أكبر. ولا يمكنك حســـاب السرعة المتجهة لكلا المتزلجين إذا لم يكن لديك معلومات عن مقدار قوة دفع المتزلج C للمتزلج D.



■ **الشـكل 6–3** القوى الداخلية المؤثرة بواسطة المتزلج C "الصبي الأكبر"، والمتزلج D "الصبي الأصغر" لا تستطيع أن تغير الزخم الكلي للنظام.

تجـربة

ارتفاع الارتداد

زخم أيّ جسم يساوي حاصل ضرب كتلته في سرعته المتجهة.

1. **أسقط كرة مطاطية كبيرة عن ارتفاع 15 cm فوق طاولة.**
2. **سجل ارتفاع ارتداد الكرة.**
3. **أعد الخطوتين 1 و 2 مستخدمًا كرة مطاطية صغيرة.**
4. **ارفع الكرة الصغيرة وضعها فوق الكرة الكبيرة على أن تكونا متلامستين معًا.**
5. **اترك الكرتين لتسقطا معًا من الارتفاع نفسه.**
6. **قس ارتفاع ارتداد كلتا الكرتين.**

التحليل والاستنتاج

7. **صف ارتفاع ارتداد كل من الكرتين عندما تسقط كل كرة على حدة.**
8. **قارن بين ارتفاعات الارتداد في الخطوتين 6 و7.**
9. **فسّر ملاحظاتك.**

تجربة عملية

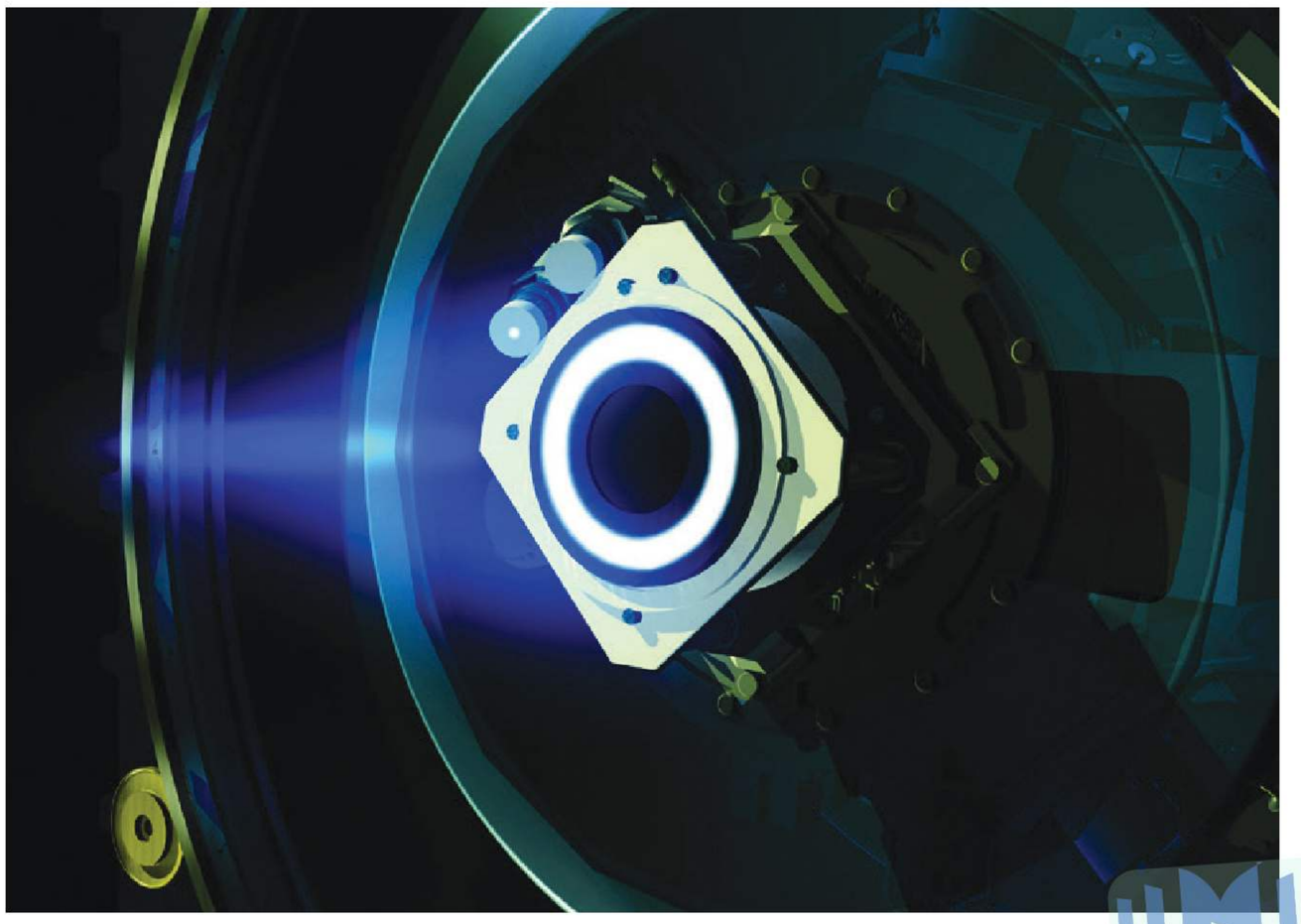
هل الزخم محفوظ؟

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية

الدفع في الفضاء Propulsion in Space

كيف تتغير السرعة المتجهة للصاروخ في الفضاء؟ يُزوَّد الصاروخ بالوقود والمادة المؤكسدة، وعندما يمتزجان معًا في محرك الصاروخ تنتج غازات حارة بسبب الاحتراق، وتخرج من فوهة العادم بسرعة كبيرة. فإذا كان الصاروخ والموادّ الكيميائية هما النظام، فإن النظام يكون مغلقًا. وتكون القوى التي تنفث الغازات قوى داخلية، لذا يكون النظام معزولاً أيضًا. ولذلك فإنّ الأجسام الموجودة في الفضاء يمكنها أن تتسارع، وذلك باستخدام قانون حفظ الزخم وقانون نيوتن الثالث في الحركة.

تمكن مسبار ناسا الفضائي، والمسمى "Deep Space 1" من المرور بأحد الكويكبات منذ بضعة سنوات، وذلك بفضل استخدام تقنية حديثة فيه، تتمثل في "محرك أيوني" يؤثر بقوة مماثلة للقوة الناتجة عن ورقة مستقرة على يد شخص. يبين **الشكل 7–3** المحرك الأيوني، الذي يعمل بشكل مختلف عن المحرك التقليدي للصاروخ؛ والذي فيه تندفع نواتج التفاعل الكيميائي– التي تحدث داخل حجرة الاحتراق –بسرعة عالية من الجزء الخلفي من الصاروخ. أما في المحرك الأيوني فإنّ ذرات الزينون تنطلق بسرعة مقدارها 30 km /s، مولِّدة قوة مقدارها 0.092 N فقط. ولكن كيف يمكن لمثل هذه القوة الصغيرة أن تنتج تغيرًا كبيرًا في زخم المسبار؟ على عكس الصواريخ الكيميائية التقليدية والتي يعمل محركها لدقائق قليلة فقط، فإنّ المحرك الأيوني في المسبار يمكن أن يعمل أيامًا، أو أسابيع أو حتى أشهرًا؛ لذا فإنّ الدفع الذي يوفِّره المحرك يكون كبيرًا بدرجة كافية تسمح بزيادة زخم المركبة الفضائية التي كتلتها 490 kg حتى تصل إلى السرعة المطلوبة لإنجاز مهمتها.



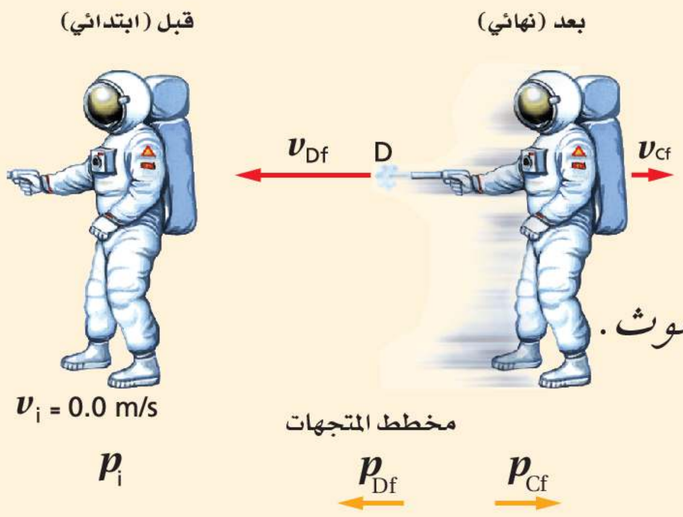
■ **الشكل 7–3** تتأين ذرات الزينون الموجودة في المحرك الأيوني عن طريق قذفها بالإلكترونات، ثم تسرع أيونات الزينون الموجبة إلى سرعات عالية.

مثـــــال 3

السرعة أطلق رائد فضاء في حالة سكون غازًا من مسدس دفع، ينفث 35 g من الغاز الساخن بسرعة 875 m /s ، فإذا كانت كتلة رائد الفضاء والمسدس معًا 84 kg، فما مقدار سرعة رائد الفضاء؟ وفي أيّ اتجاه يتحرك بعد أن يطلق الغاز من المسدس؟

1 تحليل المسألة ورسمها

$\longrightarrow +x$



- تعريف النظام
- بناء محور إحداثيات
- رسم الظروف " قبل" و"بعد"
- رسم مخطط يبين متجهات الزخم.

ملاحظة: *يشير الحرف C إلى رائد الفضاء والمسدس معًا، والحرف D إلى الغاز المنفوث.*

المعلوم	المجهول
$m_C = 84\ \text{kg}$ ، $m_D = 0.035\ \text{kg}$ $v_{Ci} = v_{Di} = +0.0\ \text{m/s}$ $v_{Df} = -875\ \text{m/s}$	$v_{Cf} = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

يتكون النظام من رائد الفضاء والمسدس والمواد الكيميائية التي أنتجت الغاز.

$$p_i = p_{Ci} + p_{Di} = +0.0\ \text{kg.m/s}$$

قبل أن يطلق المسدس الغاز، كانت جميع أجزاء النظام في حالة سكون، لذا يكون الزخم الابتدائي صفرًا.

نستخدم قانون حفظ الزخم لإيجاد p_f

$$p_i = p_f$$

$$+0.0\ \text{kg.m/s} = p_{Cf} + p_{Df}$$

زخم رائد الفضاء والمسدس معًا يساوي زخم الغاز المنطلق من المسدس في المقدار ويعاكسه في الاتجاه.

$$p_{Cf} = -p_{Df}$$

نحل لإيجاد السرعة المتجهة النهائية للرائد، v_{Cf}.

دليل الرياضيات

فصل المتغير 215

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

$$v_{Cf} = \left(\frac{-m_D v_{Df}}{m_C}\right)$$

عوّض مستخدمًا $m_D = 0.035\ \text{kg}$ ، $v_{Df} = -875\ \text{m/s}$ ، $m_C = 84\ \text{kg}$

$$= \frac{(-0.035\ \text{kg})(-875\ \text{m/s})}{84\ \text{kg}} = +0.36\ \text{m/s}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس السرعة بـ m /s ، والجواب بوحدة m /s.
- **هل للاتجاه معنى؟** سرعة الرائد المتجهة في الاتجاه المعاكس لاتجاه انبعاث الغاز.
- **هل الجواب منطقي؟** كتلة الرائد أكبر كثيرًا من كتلة الغاز المنبعث؛ لذا من المنطقي أن تكون سرعة الرائد المتجهة أقل بكثير من سرعة الغاز المتجهة.

مسائل تدريبية

18. أطلق نموذج لصاروخ كتلته 4.00 kg، بحيث نفث 50.0 g من الوقود المحترق من العادم بسرعة مقدارها 625 m /s، ما سرعة الصاروخ المتجهة بعد احتراق الوقود؟ تلميح: أهمل القوتين الخارجيتين الناتجتين عن الجاذبية ومقاومة الهواء.

19. ترتبط عربتان إحداهما مع الأخرى بخيط يمنعهما من الحركة، ولدى احتراق الخيط دفع نابض مضغوط بينهما العربتين في اتجاهين متعاكسين، فإذا اندفعت إحدى العربتين وكتلتها 1.5 kg بسرعة متجهة 27 cm /s إلى اليسار، فما السرعة المتجهة للعربة الأخرى التي كتلتها 4.5 kg؟

20. قامت صفاء وديمة بإرساء زورق، فإذا تحركت صفاء التي كتلتها 80.0 kg إلى الأمام بسرعة 4.0 m /s عند مغادرة الزورق، فما مقدار واتجاه سرعة الزورق وديمة إذا كانت كتلتاهما معًا تساوي 115 kg؟

18. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: $p_{i} = p_{f}$ فإن $0 = m_{rocket} * v_{rocket_f}$ + $m_{fuel} * v_{fuel_f}$. بالتعويض: $0 = (3.95\ kg) * (-625\ m/s) + (0.0500\ kg) * v_{rocket_f}$. إذن سرعة الصاروخ $v_{rocket_f} = 7.91\ m/s$

19. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: $p_{i} = p_{f}$ فإن $m_1 * v_{1i} + m_2 * v_{2i} = (m_1 + m_2) * v_f$. بالتعويض: $(1.5\ kg) * (27\ m/s) + (4.5\ kg) * (-11\ m/s) = (1.5\ kg + 4.5\ kg) * v_{2i}$. إذن السرعة الابتدائية للعربة الأخرى $v_{2i} = -5.7\ m/s$، أي $5.7\ m/s$ إلى اليسار.

20. بالاعتماد على قانون حفظ الزخم: $p_{i} = p_{f}$ فإن $0 = m_{safaa} * v_{safaa_f} + m_{raft_deema} * v_{raft_deema_f}$. بالتعويض: $0 = (80.0\ kg) * (4.0\ m/s) + (115\ kg) * v_{raft_deema_f}$. إذن سرعة الزورق وديمة $v_{raft_deema_f} = -2.8\ m/s$، أي $2.8\ m/s$ في الاتجاه المعاكس.

Two- Dimensional Collisions التصادم في بعدين

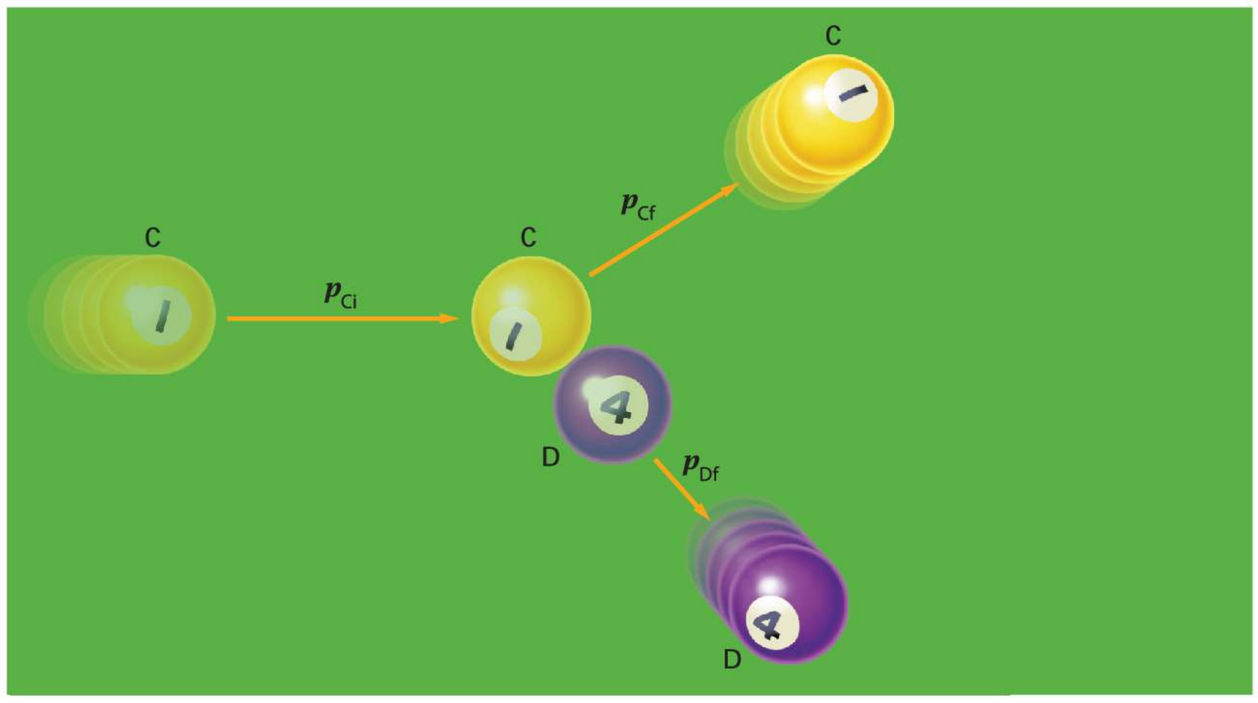
لقد درست الزخم في بعد واحد فقط، ولكن يجب أن تعلم أن قانون حفظ الزخم يطبق على جميع الأنظمة المغلقة التي لا تؤثر فيها قوى خارجية، بغض النظر عن اتجاهات حركة الأجسام قبل تصادمها وبعده. ولكن ما الذي يحدث عندما تتصادم الأجسام في بعدين أو ثلاثة؟ يبين الشكل 8–3 ما يحدث عندما تصطدم كرة البلياردو C بالكرة D التي كانت في حالة سكون. فإذا اعتبرنا أن النظام المكون من كرتي البلياردو هما النظام، فيكون الزخم الابتدائي للكرة المتحركة p_{Ci}، وللكرة الثابتة صفرًا؛ لذا يكون زخم النظام قبل التصادم p_{Ci}.

تتحرك الكرتان بعد التصادم، وتمتلكان زخمًا، وإذا أهمل الاحتكاك مع الطاولة، فيكون النظام معزولًا ومغلقًا؛ لذا يمكن استخدام قانون حفظ الزخم (الزخم الابتدائي يساوي مجموع الزخم النهائي) أيْ أن $p_{Ci} = p_{Cf} + p_{Df}$، وتساوي الزخم قبل التصادم وبعده يعني أنّ مجموع مركبات المتجهات قبل التصادم وبعده يجب أن يكون متساويًا. إذا كان الاتجاه الأفقي (x) في اتجاه الزخم الابتدائي، تكون المركبة الرأسية (y) للزخم الابتدائي تساوي صفرًا. ويجب أن يساوي مجموع المركبات الرأسية (y) النهائية للزخم صفرًا أيضًا.

$$p_{Cf,y} + p_{Df,y} = 0$$

تكون المركبتان الرأسيتان متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه، وتبعا لذلك لابد أن تكون إشارتاهما مختلفتين. أمّا مجموع المركبات الأفقية للزخم فيساوي:

$$p_{Ci} = p_{Cf,x} + p_{Df,x}$$



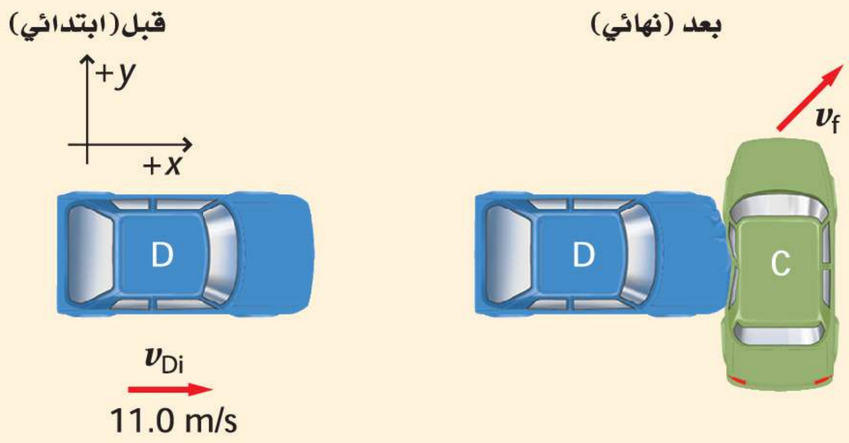
الشكل 8–3 يطبق قانون حفظ الزخم على جميع الأنظمة المعزولة والمغلقة، بغض النظر عن اتجاهات حركة الأجسام قبل التصادم وبعده.

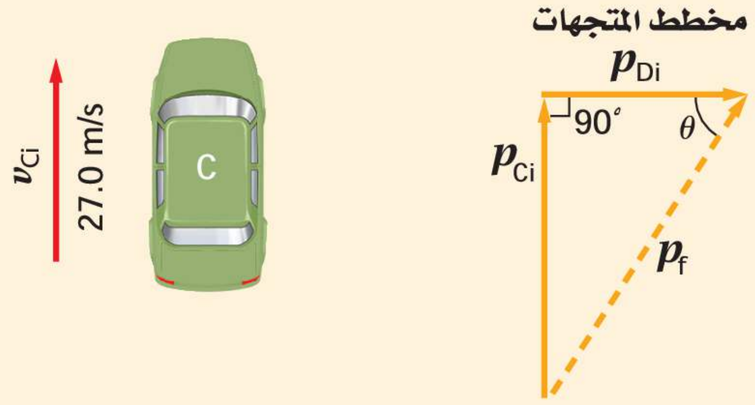
مثـــال 4

السرعة تحركت السيارة C شمالاً بسرعة 27 m /s ، فاصطدمت بالسيارة D التي كانت تتحرك شرقًا بسرعة 11.0 m /s، فسارت السيارتان وهما متصلتان معًا بعد التصادم. فإذا كانت كتلة السيارة C (1325 kg) ، وكتلة السيارة D (2165 kg) ، فما مقدار سرعتهما واتجاههما بعد التصادم؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- تعريف النظام
- رسم الحالتين قبل التصادم وبعده
- بناء محاور الإحداثيات، بحيث يمثل المحور الرأسي (y) الشمال، والمحور الأفقي (x) الشرق.
- رسم مخطط لمتجهات الزخم.





المعلوم

$m_C = 1325\ \text{kg}$
$m_D = 2165\ \text{kg}$
$v_{Ci,y} = 27.0\ \text{m/s}$
$v_{Di,x} = 11.0\ \text{m/s}$

المجهول

$v_{f,x} = ?$
$v_{f,y} = ?$
$\theta = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

حدد الزخم الابتدائي للسيارتين، وزخم النظام.

عوّض مستخدمًا $m_C = 1325\ \text{kg}$ ، $v_{Ci,y} = 27.0\ \text{m/s}$

$$p_{Ci} = m_C\, v_{Ci,y}$$
$$= (1325\ \text{kg})(27.0\ \text{m/s})$$
$$= 3.58 \times 10^4\ \text{kg.m/s}\ \text{(شمالاً)}$$

عوّض مستخدمًا $m_D = 2165\ \text{kg}$ ، $v_{Di,y} = 11.0\ \text{m/s}$

$$p_{Di} = m_D\, v_{Di,x}$$
$$= (2165\ \text{kg})(11.0\ \text{m/s})$$
$$= 2.38 \times 10^4\ \text{kg.m/s}\ \text{(شرقًا)}$$

نستخدم قانون حفظ الزخم لإيجاد p_f

عوّض مستخدمًا $p_{i,x} = p_{Di} = 2.38 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$

$$p_{f,x} = p_{i,x} = 2.38 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$$

عوّض مستخدمًا $p_{i,y} = p_{Ci} = 3.58 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$

$$p_{f,y} = p_{i,y} = 3.58 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$$

نستخدم المخطط لصياغة المعادلات لـ $p_{f,x}$ و $p_{f,y}$

عوّض مستخدمًا $p_{f,x} = 2.38 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$ ، $p_{f,y} = 3.58 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$

$$p_f = \sqrt{(p_{f,x})^2 + (p_{f,y})^2}$$
$$= \sqrt{(2.38 \times 10^4\ \text{kg.m/s})^2 + (3.58 \times 10^4\ \text{kg.m/s})^2}$$
$$= 4.30 \times 10^4\ \text{kg.m/s}$$

نحل لإيجاد θ:

عوّض مستخدمًا $p_{f,y} = 3.58 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$

$p_{f,x} = 2.38 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$

نحدد مقدار السرعة النهائية:

عوّض مستخدمًا $p_f = 4.3 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$

$m_C = 1325 \text{ kg}$ ، $m_D = 2165 \text{ kg}$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{p_{f,y}}{p_{f,x}}\right)$$
$$= \tan^{-1}\left(\frac{3.58 \times 10^4 \text{ kg.m/s}}{2.38 \times 10^4 \text{ kg.m/s}}\right)$$
$$= 56.4^\circ$$

$$v_f = \frac{p_f}{(m_c + m_d)}$$
$$= \frac{4.30 \times 10^4 \text{ kg.m/s}}{(1325 \text{ kg} + 2165 \text{ kg})}$$
$$= 12.3 \text{ m/s}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس السرعة بـ m/s وكذلك كانت وحدات السرعة في الإجابة.
- **هل للإشارات معنى؟** الإجابتان موجبتان والزوايا كذلك مناسبة.
- **هل الجواب منطقي؟** بما أن السيارتين التحمتا معًا فإنه يجب أن تكون v_f أصغر من v_{Ci}.

21. بحل معادلات حفظ الزخم في بعدين (x, y)، نجد أن السرعة النهائية للحطام هي v = 11.2 m/s، واتجاهها 53.4° جنوب الشرق.

22. بحل معادلات حفظ الزخم في بعدين (x, y)، نجد أن السرعة النهائية للحطام هي v = 18.1 m/s، واتجاهها 74.1° جنوب الشرق.

مسائل تدريبية

21. تحركت سيارة كتلتها 925 kg شمالاً بسرعة 20.1 m/s، فاصطدمت بسيارة كتلتها 1865 kg متحركة غربًا بسرعة 13.4 m/s، فالتحمتا معًا. ما مقدار سرعتهما واتجاههما بعد التصادم؟

23. بحل معادلات حفظ الزخم في بعدين (x, y)، نجد أن مقدار سرعة الكرة الثانية بعد التصادم هو 2.1 m/s، واتجاهها 47° أسفل الاتجاه الأصلي للكرة الأولى.

22. اصطدمت سيارة كتلتها 1732 kg متحركة شرقًا بسرعة 31.3 m/s، بسيارة أخرى كتلتها 1383 kg متحركة جنوبًا بسرعة 11.2 m/s، فالتحمتا معًا. ما مقدار سرعتهما واتجاههما بعد التصادم؟

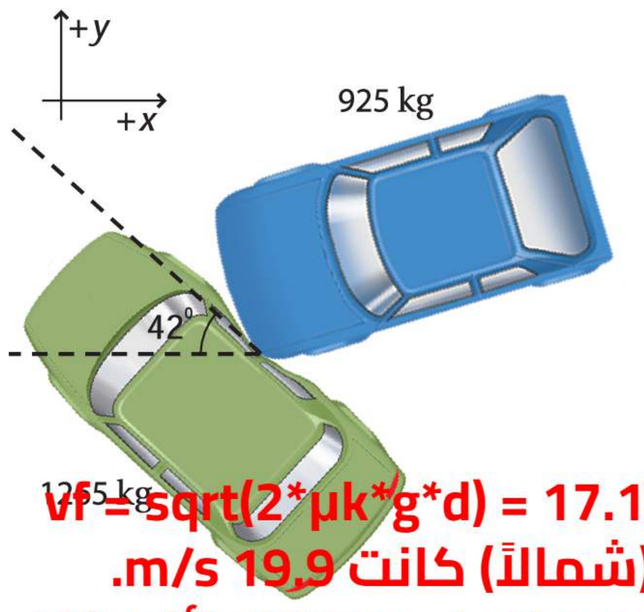
24. بحل معادلات حفظ الزخم في بعدين (x, y)، نجد أن السرعة النهائية للحطام هي v = 4.72 m/s، واتجاهها 55.7° جنوب الشرق.

23. تعرضت كرة بلياردو ساكنة كتلتها 0.17 kg للاصطدام بكرة مماثلة لها متحركة بسرعة 4.0 m/s، فتحركت الكرة الثانية بعد التصادم في اتجاه يميل 60.0° إلى يسار اتجاهها الأصلي، في حين تحركت الكرة الأولى في اتجاه يميل 30° إلى يمين الاتجاه الأصلي للكرة المتحركة. ما سرعة كل من الكرتين بعد التصادم؟

24. تحركت سيارة كتلتها 1923 kg شمالاً، فاصطدمت بسيارة أخرى كتلتها 1345 kg متحركة شرقًا بسرعة 15.7 m/s، فالتحمتا معًا وتحركتا بسرعة مقدارها 14.5 m/s وتميل على الشرق بزاوية مقدارها 63.5°. فهل كانت السيارة المتحركة شمالاً متجاوزة حدّ السرعة 20.1 m/s قبل التصادم؟

مسألة تحفيز

كان صديقك يقود سيارة كتلتها 1265 kg في اتجاه الشمال، فصدمته سيارة كتلتها 925 kg متجهة غربًا، فالتحمتا معًا، وانزلقتا 23.1 m في اتجاه يصنع زاوية 42° شمال الغرب. وكانت السرعة القصوى المسموح بها في تلك المنطقة 22 m/s. افترض أنّ الزخم كان محفوظًا خلال التصادم، وأنّ التسارع كان ثابتًا في أثناء الانزلاق، ومعامل الاحتكاك الحركي بين الإطارات والأسفلت 0.65.



1. ادّعى صديقك أنه لم يكن مسرعًا، لكن السائق الآخر كان مسرعًا. كم كانت سرعة سيارة صديقك قبل التصادم؟
2. كم كانت سرعة السيارة الأخرى قبل التصادم؟ وهل يمكنك أن تدعم ادعاء صديقك؟

1. أولاً، نحسب السرعة بعد التصادم من مسافة الانزلاق: vf = sqrt(2*μk*g*d) = 17.15 m/s. بتطبيق حفظ الزخم، نجد أن سرعة سيارة صديقك (شمالاً) كانت 19.9 m/s.
2. سرعة السيارة الأخرى (غرباً) كانت 30.2 m/s. نعم، يمكن دعم ادعاء صديقك لأنه كان يسير بسرعة أقل من الحد المسموح به (22 m/s)، بينما كان السائق الآخر مسرعًا.

3–2 مراجعة

25. **السرعة** تحركت عربة وزنها 24.5 N من السكون على مستوى طوله 1.0 m ويميل على الأفق بزاوية 30.0°. انظر الشكل 9–3. إذا قفزت العربة النهاية المستوى المائل، فصدمت عربة أخرى وزنها 36.8 N موضوعة عند أسفل المستوى المائل.

a. احسب مقدار سرعة العربة الأولى عند أسفل المستوى المائل. من أين يأتي الزخم الرأسي عندما يقفز اللاعب فوق العارضة؟

b. إذا التحمت العربتان معًا فما سرعة انطلاقهما بعد التصادم؟

25. a. من حفظ الطاقة، v = sqrt(2gh) = 3.1 m/s. b. من حفظ الزخم، m1v1i = vf(m1+m2)، فتكون السرعة بعد الالتحام 1.3 m/s.

26. **حفظ الزخم** يستمرّ مضرب لاعب كرة التنس في التقدم إلى الأمام بعد ضرب الكرة، فهل يكون الزخم محفوظًا في التصادم؟ فسّر ذلك، وتنبّه إلى أهمية تعريف النظام.

27. **الزخم** يركض لاعب القفز بالزانة في اتجاه منقطة موضوعة عند أسفل المستوى المائل.

a. احسب مقدار سرعة العربة الأولى عند أسفل المستوى المائل. من أين يأتي الزخم الرأسي عندما يقفز اللاعب فوق العارضة؟

28. **زخم الزخم والاتجاه** يركض لاعبان في ممرات متقابلة، فاصطدما وجهًا لوجه عندما كانا يتحركان بسرعتين متساويتين في مقدارهما ومتعاكستين في اتجاهيهما. حاولا ضرب الكرة برأسيهما، فاستقرَّا في الجو، ثم سقطا على الأرض. صف زخميهما الابتدائيين.

29. **الشرح والتحليل** أنت واقف على لوح تزلج فإنك ستندفع إلى الخلف. أما إذا كنت تقف على الأرض فإنه يمكنك تجنب الحركة عندما تلتقط الكرة. اشرح كلتا الحالتين باستخدام قانون حفظ الزخم، موضحًا أي نظام استخدمتَ في كلتا الحالتين.

الشكل 9 – 3

26. يكون الزخم محفوظاً لنظام (الكرة + المضرب) المعزول، حيث تكون القوى الداخلية أكبر بكثير من أي قوى خارجية خلال فترة التصادم القصيرة. لا يكون الزخم محفوظاً للكرة أو المضرب كل على حدة بسبب القوة الخارجية التي يؤثر بها كل منهما على الآخر.

27. يأتي الزخم الرأسي من الدفع الرأسي الذي تؤثر به الأرض على نظام (اللاعب + الزانة). القوة الخارجية التي تبذلها الأرض على النظام هي المسؤولة عن تغيير زخمه الرأسي من صفر إلى قيمة موجبة.

28. بما أن زخمهما النهائي الكلي كان صفراً (لأنهما توقفا)، فإن زخمهما الابتدائي الكلي يجب أن يكون صفراً أيضاً. هذا يعني أن زخميهما الابتدائيين كانا متساويين في المقدار ومتعاكسين في الاتجاه.

29. على لوح التزلج، النظام هو (أنت + اللوح + الكرة)، وهو نظام معزول أفقيًا، لذا عند اكتساب زخم الكرة، يجب أن يتحرك النظام بأكمله للحفاظ على الزخم الكلي. على الأرض، يشمل النظام الأرض أيضاً (أنت + الكرة + الأرض). قوة الاحتكاك مع الأرض هي قوة خارجية تمنعك من الحركة، وبالتالي لا يحفظ زخم نظام (أنت والكرة) وحده.

تعتمد على كتلة الكرة وارتفاعها عن الرمل.

الطاقة هي القدرة على بذل شغل. الشغل الذي تبذله الكرة على الرمل (تكوين الحفرة) يساوي طاقتها عند الاصطدام. تزداد طاقة الكرة بزيادة كتلتها أو بزيادة الارتفاع الذي تسقط منه.

تجربة استهلالية

ما العوامل المؤثرة في الطاقة؟

سؤال التجربة ما العوامل التي تؤثر في طاقة الأجسام الساقطة رأسيًّا ومقدرتها على إنجاز شغل؟

الخطوات

1. ضع 2 cm من الرمل الناعم في طبق مرتفع الحافة.
2. أحضر مجموعة من الكرات المعدنية أو من الزجاج بحجوم وكتل مختلفة.
3. أمسك مسطرة مترية بإحدى يديك بحيث تنغرس نهايتها السفلى في الرمل، ويكون صفر التدريج للمسطرة على سطح الرمل تماماً وأسقط إحدى الكرات باليد الأخرى على الرمل. وسجّل الارتفاع الذي أُسقطت منه الكرة.
4. أزل الكرة من الرمل بعناية على ألاّ تؤثر في الفوهة التي أحدثتها، وسجّل عمق الفوهة والمسافات التي وصل إليها الرمل بعد تناثره منها.
5. سجّل كتلة الكرة.
6. أعد تسوية سطح الرمل في الطبق، وكرر الخطوات 5–3 باستخدام كرات مختلفة الكتل، على أن تسقطها من ارتفاعات مختلفة. تنبه أيضًا إلى ضرورة إسقاط الكرات المختلفة من الارتفاع نفسه، وكذلك الكرة نفسها من ارتفاعات مختلفة.

التحليل

قارن بين البيانات التي سجلتها. هل تأخذ هذه البيانات نمطًا محددًا؟ وضح ذلك.

التفكير الناقد عندما تسقط الكرات على الرمل فإنها تنجز شغلاً. ولأنه يمكن تعريف طاقة جسم ما بأنها قدرة الجسم على إنجاز شغل على نفسه أو على الوسط المحيط فيه، لذا فإن الشغل الذي أنجزته الكرات في الرمل هو طاقتها. اربط بين بياناتك وطاقة الكرات، ووضح كيف يمكن أن تزداد طاقة الكرة.

نعم، هناك نمط محدد. كلما زادت كتلة الكرة أو زاد ارتفاع السقوط، زاد عمق الحفرة واتساعها، مما يدل على أن الكرة بذلت شغلاً أكبر.

4–1 الطاقة والشغل Work and Energy

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

لقد درست في الفصل السابق حفظ الزخم، وتعلمت كيفية تحديد حالة نظام قبل أن يؤثر فيه دفع وبعده دون الحاجة إلى معرفة تفاصيل هذا الدفع. وقد تبين لك أن لقانون حفظ الزخم فائدة خاصة عند دراسة التصادمات التي تتغير خلالها القوى أحيانًا بشكل كبير جدًّا.

تذكّر المناقشة التي وردت في الفصل السابق والمتعلقة بالمتزلجين اللذين يدفع كل منهما الآخر، فعلى الرغم من أن الزخم محفوظٌ في هذه الحالة، فإن المتزلجين يستمران في الحركة بعد أن يدفع كل منهما الآخر، مع أنهما كانا ساكنين قبل التصادم.

من جهة أخرى، يكون الزخم محفوظًا عندما تصطدم سيارتان، لكنهما تتوقفان عن الحركة على الرغم من أنهما كانتا متحركتين قبل التصادم، على عكس مثال المتزلجين. وبالإضافة إلى التغير الحادث في الحالة الحركية لكلا الجسمين المتصادمين فإنه غالبًا ما يؤدي التصادم إلى التواء كبير في المعادن وتهشم الزجاج، ومن المنطقي هنا أن نعتقد أنه لا بد من حدوث تغير في كمية فيزيائيةٍ ما نتيجة تأثير القوة في كل نظام، فما الكمية التي تتغير؟ وكيف؟

الأهداف

- **تصف** العلاقة بين الشغل والطاقة.
- **تحسب** الشغل.
- **تحسب** القدرة المستهلكة.

المفردات

الشغل	الجول
الطاقة	القدرة
الطاقة الحركية	الواط
نظرية الشغل – الطاقة	

الشغل والطاقة Work and Energy

تذكّر أن التغير في الزخم يكون نتيجة تأثير الدفع الذي يساوي حاصل ضرب متوسط القوة المؤثرة في جسم ما في زمن تأثير القوة. افترض أن جسمًا يتحرك مسافة معينة وهو واقع تحت تأثير قوة ما فيه، لابد أن الجسم سيتسارع بحسب العلاقة $a = \frac{F}{m}$، وستزداد سرعته المتجهة؛ وذلك لأنه واقع تحت تأثير قوة محصلة. انظر إلى البيانات التي في **الجدول 3–3** في كتاب فيزياء 1 (المستوى الأول) الفصل الثالث، الذي يتضمن مجموعة معادلات تصف العلاقات بين الموقع، والسرعة المتجهة والزمن للأجسام المتحركة بتسارع ثابت. واختر المعادلة التي تتضمن التسارع، السرعة المتجهة والمسافة:

$$2ad = v_f^2 - v_i^2$$

إذا استخدمت قانون نيوتن الثاني لتعويض F/m بدلاً من a، وضربت طرفي المعادلة في الحدّ $\frac{m}{2}$، فستحصل على المعادلة الآتية:

$$Fd = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

الشغل يصف الطرف الأيسر من المعادلة التغير الذي طرأ على النظام نتيجة تأثير الوسط الخارجي (المحيط). فقد أثرت القوة F في جسم ما، بينما كان هذا الجسم يتحرك مسافة d كما في **الشكل 1–4**. فإذا كانت F قوة ثابتة تؤثر في الاتجاه نفسه لحركة الجسم فإن **الشغل** W يكون حاصل ضرب القوة في إزاحة الجسم.

الشغل

$$W = Fd$$

الشغل يساوي حاصل ضرب القوة الثابتة المؤثرة في جسم في اتجاه حركته في إزاحة الجسم تحت تأثير هذه القوة.

ربما استخدمت كلمة شغل لتعطي معاني أخرى غير هذا المعنى، فمثلاً تقول: إن جهاز الحاسوب يشتغل جيدًا، أو إن فهم الفيزياء يتطلب "شغلًا" كثيرًا، أو إنك ستشتغل بدوام جزئي بعد انتهاء العمل في المدرسة. ولكن الشغل عند الفيزيائيين له معنى آخر أكثر تحديدًا.

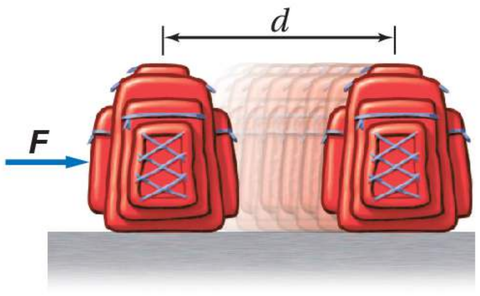
تذكّر أن $Fd = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$، وبإعادة كتابة هذه المعادلة مستخدمين $W = Fd$ ينتج:

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

فالطرف الأيمن للمعادلة يتضمن كتلة الجسم وسرعته بعد تأثير القوة وقبله، والكمية $\frac{1}{2}mv^2$ تصف خاصية مميزة للنظام.

الطاقة الحركية ما الخاصية المميزة للنظام التي تصفها الكمية $\frac{1}{2}mv^2$؟ إن المركَبة الثقيلة التي تتحرك بسرعة كبيرة تستطيع تدمير الأجسام من حولها، كما أن كرة البيسبول ترتفع إلى مسافات عالية عند قذفها بسرعة كبيرة في الهواء، أيْ أن امتلاك جسم ما لهذه الخاصية يمكّنه من إحداث تغير في ذاته أو فيما يحيط به. وهذه الخاصية المتمثلة في قدرة الجسم على

■ **الشكل 1–4** يُبذل شغلٌ عندما تؤثر قوة ثابتة F في حقيبة كتب في اتجاه الحركة، وتتحرك الحقيبة مسافة d.



إحداث تغيير في ذاته أو فيما يحيط به تسمى **الطاقة**. فلكل من المركبة وكرة البيسبول طاقة مرتبطة مع حركة كل منهما. والطاقة الناتجة عن الحركة تسمى **الطاقة الحركية**، ويعبر عنها بالرمز KE.

الطاقة الحركية $KE = \frac{1}{2}mv^2$

الطاقة الحركية لجسمٍ ما تساوي حاصل ضرب نصف كتلة الجسم في مربع سرعته.

عــوّض KE في المعادلــة $W = \frac{1}{2}mv_f^{\,2} - \frac{1}{2}mv_i^{\,2}$ فينتــج $W = KE_f - KE_i$، حيث يُمثل الطرف الأيمن من المعادلة الأخيرة الفرق أو التغير في الطاقة الحركية. وهذا يسمى **نظرية الشغل – الطاقة**، والتي تنص على أنه إذا بُذل شغل على جسمٍ ما فإن طاقة حركته تتغير. ويمكن تمثيل هذه النظرية بالمعادلة الآتية:

نظرية الشغل – الطاقة $W = \Delta KE$

الشغل يساوي التغير في الطاقة الحركية.

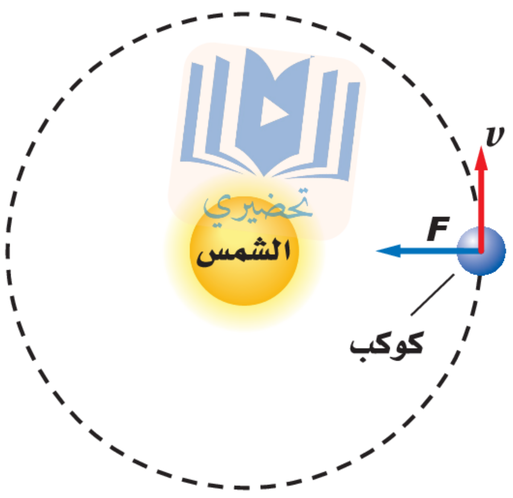
إن العلاقة بين الشــغل المبذول والتغير في الطاقة الناتجة تم تحديدها في القرن التاسع عشر على يد العالم جيمس بريســكوت جول، وتكريمًا لجهوده أطلق اســمه "**جول**" على وحدة الطاقة (J) **joule**. فمثلاً، إذا تحرّك جســم كتلتــه 2 kg بسرعة 1 m /s فإن طاقته الحركية $1\ kg.m^2/s^2$ أو 1 J.

تذكّر أن النظام هو الجسم موضع الدراسة، والمحيط الخارجي هو كل شيء ما عدا الجسم. فمثلاً قد يكون أحد الأنظمة صندوقًا في مســتودع، ويمكــن أن يتكون المحيط الخارجي منك أنت وكتلة الأرض وكل ما هو خارج الصندوق. ويمكن أن تنتقل الطاقة بين المحيط الخارجي والنظام خلال عملية إنجاز الشغل.

ويمكن أن تنتقــل الطاقة في كلا الاتجاهين. فإذا بَذل المحيط الخارجي شــغلاً على النظام فإن الشــغل W يكون موجبًا، وتزداد طاقة النظام. أما إذا بَذل النظام شــغلاً على المحيط الخارجي فإن الشــغل W يكون ســالبًا، وتتناقص طاقة النظام. أيْ أن الشغل هو انتقال الطاقة بطرائق ميكانيكية. وليس لإشــارة الشــغل دلالة اتجاهية؛ فالشغل كمية قياسية، ونستدل من الإشارة على كسب أو فقد النظام للطاقة.

حساب الشغل Calculating Work

إن المعادلة الأولى التي اســتخدمت لحساب الشغل هي $W = Fd$، وتستخدم هذه المعادلة عندما تؤثر قوى ثابتة في اتجاه حركة الجسم فقط. والآن، ماذا يحدث عندما تؤثر القوة في اتجاه متعامد مع اتجاه الحركة؟ للإجابة عن هذا السؤال سندرس حركة كوكبٍ ما حول الشمس، انظر **الشــكل 2–4**. فإذا كان المدار دائريًّا فإن القوة تكون دائمًا متعامدة مع اتجاه الحركة. وقد درست سابقًا أن القوة العمودية على اتجاه حركة جسم ما لا تغير مقدار سرعته، وإنما تغير اتجاه حركته؛ لذا فإن مقدار سرعة الكوكب لا يتغير، أيْ أن طاقته الحركية ثابتة أيضًا.

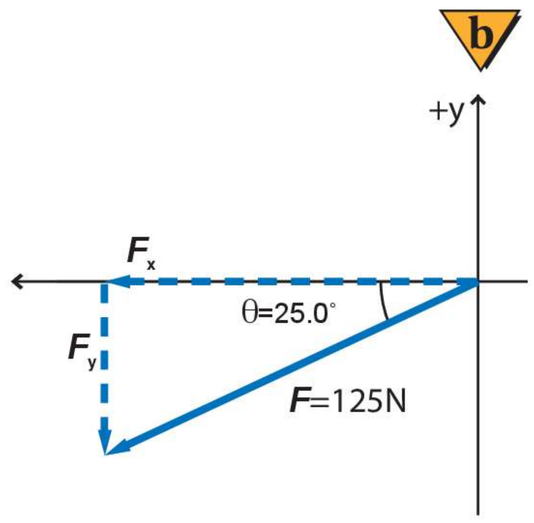


الشكل 2–4 إذا كان كوكب يدور في مدار دائري، فإن القوة التي يتأثر بها تكون متعامدة مع اتجاه حركته؛ ولذا فإن قوة الجذب لا تبذل شغلاً على الكوكب.

وباستخدام المعادلة $W = \Delta KE$ ستلاحظ أنه عندما تكون الطاقة الحركية ثابتة فإن $\Delta KE = 0$، لذا فإن $W = 0$. وهذا يعني أنه إذا كانت القوة $\boldsymbol{F}$ والإزاحة $\boldsymbol{d}$ متعامدتين فإن $W = 0$.

ولأن الشغل المبذول على جسم ما يساوي التغير في الطاقة، فإن الشغل يُقاس بوحدة الجول أيضًا. يبذل جول واحد من الشغل عندما تؤثر قوة مقدارها 1N في جسم، وتحركه مسافة 1m في اتجاهها. فعندما ترفع تفاحة تزن 1N مسافة 1m فإنك تبذل شغلاً عليها مقداره 1 J.

قوة ثابتة تميل بزاوية على الإزاحة تعلمت سابقًا أن القوة التي تؤثر في اتجاه الحركة تبذل شغلاً يُعبر عنه بالمعادلة $W = Fd$، وأن القوة التي تؤثر في اتجاه متعامد مع اتجاه الحركة لا تبذل شغلاً. فما الشغل الذي تبذله القوة التي تؤثر بزاوية مع اتجاه الحركة؟ فمثلاً، ما الشغل الذي يبذله الشخص الذي يدفع المركبة في **الشكل 3a–4**؟ تعلم أنه يمكن التعامل مع مركّبتي القوة بدلًا من القوة، فإذا استخدمت نظام الإحداثيات في **الشكل 3b–4**، فإن القوة F التي تؤثر في اتجاه ذراع الشخص لها مركبتان: مركبة أفقية F_x، ومركبة رأسية F_y. وباستخدام المعلومات في الرسم، مقدار F يساوي 125 N، والزاوية التي تميل بها على الأفقي 25.0°، يمكن حساب المركّبتين: مقدار المركبة الأفقية F_x يرتبط بمقدار القوة F من خلال اقتران جيب التمام: حيث $\cos 25.0^\circ = F_x / F$. وبحل المعادلة للمركّبة F_x نحصل على $F_x = -F \cos 25.0^\circ = -(125\ \text{N})\ (\cos 25.0^\circ) = -113\ \text{N}$، والإشارة السالبة تعني أن المركّبة الأفقية للقوة في اتجاه اليسار. وباستخدام الطريقة نفسها لحساب المركّبة الرأسيّة نحصل على:



الشكل 3–4 إذا أثرت قوة في مركبة بزاوية، فإن القوة المحصلة التي تبذل الشغل هي مركبة القوة التي تؤثر في اتجاه إزاحة الجسم.

$$F_y = -F \sin 25.0^\circ = -(125\ \text{N})\ (\sin 25.0^\circ) = -52.8\ \text{N}$$

الإشارة السالبة تعني أن القوة إلى أسفل. وحيث إن الإزاحة في اتجاه المحور x؛ لذا فإن المركّبة الأفقية للقوة هي التي تبذل شغلاً فقط، أما المركّبة الرأسية فلا تبذل شغلاً.

إن الشغل الذي تبذله عندما تؤثر بقوة في جسم في اتجاه يصنع زاوية مع اتجاه حركته يساوي حاصل ضرب مركبة القوة في اتجاه إزاحة الجسم في الإزاحة التي تحركها. ويمكن إيجاد مقدار مركّبة القوة المؤثرة في اتجاه الإزاحة؛ وذلك بضرب مقدار القوة $\boldsymbol{F}$ في جيب تمام الزاوية المحصورة بين اتجاه القوة $\boldsymbol{F}$ واتجاه الإزاحة، $F_x = F \cos \theta$. ويمكن تمثيل الشغل المبذول بالمعادلة الآتية:

الشغل (في حالة وجود زاوية بين القوة والإزاحة) $W = Fd \cos \theta$

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

تتأثر السيارة في أثناء دفعها بقوى أخرى، فأيّ هذه القوى تبذل شغلاً؟

تؤثر قوة الجاذبية إلى أسفل، ويؤثر سطح الأرض بقوة رأسية إلى أعلى، ويؤثر الاحتكاك بقوة أفقية في عكس اتجاه الحركة. أما القوتان المؤثرتان إلى أعلى وإلى أسفل فتكونان متعامدتين مع اتجاه الحركة، ولا تبذلان شغلاً، وتكون الزاوية التي تصنعها هاتان القوتان مع الإزاحة°90، مما يجعل $\cos\theta = 0$؛ لذا فإن $W = 0$.

إن الشغل المبذول من قوة الاحتكاك يؤثر في اتجاه معاكس لاتجاه الحركة، أي بزاوية °180. ولأن $\cos 180° = -1$ فإن الشغل المبذول من قوة الاحتكاك يكون دائمًا سالبًا. والشغل السالب المبذول من قوة مؤثرة من المحيط الخارجي يقلّل من الطاقة الحركية للنظام. فإذا توقف الشخص في **الشكل 3a–4** عن الدفع فإن السيارة ستتوقف عن الحركة، أي ستقل طاقتها الحركية.

يزيد الشغل الموجب المبذول بواسطة قوة من طاقة النظام، في حين يؤدي الشغل السالب إلى نقصانها. استخدم "استراتيجيات حل المسألة" الآتية عندما تحلّ المسائل المتعلقة بالشغل.

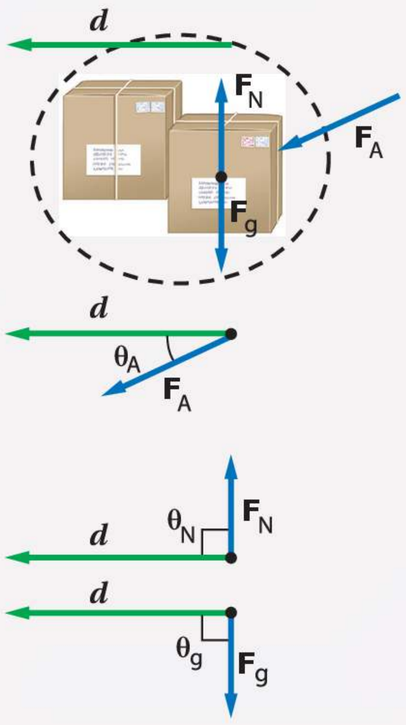
استراتيجية حلّ المسائل

الشغل

إذا أردت حل مسائل تتعلق بالشغل فاستخدم استراتيجية الحل الآتية:

1. ارسم مخطّطًا توضيحيًّا للنظام، ثم وضّح القوة التي تبذل شغلاً.
2. ارسم متجهات القوة والإزاحة للنظام.
3. أوجد الزاوية θ بين كل قوة والإزاحة.
4. احسب الشغل المبذول من كل قوة باستخدام المعادلة $W = Fd\cos\theta$.
5. احسب الشغل الكلي المبذول. وتأكد من إشارة الشغل معتمدًا على اتجاه انتقال الطاقة، فإذا ازدادت طاقة النظام فإن الشغل المبذول من تلك القوة يكون موجبًا، أما إذا تناقصت طاقة النظام فإن الشغل المبذول من تلك القوة يكون سالبًا.

مخطط توضيحي للشغل

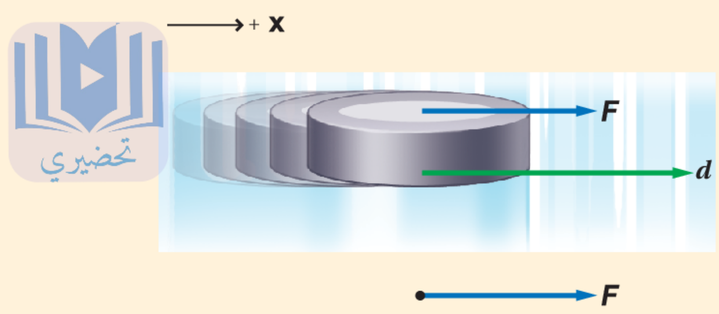


مثـــــال 1

الشغل والطاقة ينزلق قرص هوكي كتلته 105 g على سطح جليدي، فإذا أثر لاعب بقوة ثابتة مقدارها 4.50 N في القرص فحرّكه لمسافة 0.150 m في اتجاه القوة نفسه، فما مقدار الشغل الذي بذله اللاعب على القرص؟ وما مقدار التغير في طاقة القرص؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم مخطّطًا توضيحيًّا للحالة يوضح الظروف الابتدائية.
- كوّن نظامًا إحداثيًّا على أن تكون +x في اتجاه اليمين.
- ارسم مخطط المتجهات.



المعلوم

$m = 105\ \text{g}$

$F = 4.50\ \text{N}$

$d = 0.150\ \text{m}$

المجهول

$W = ?$

$\Delta KE = ?$

دليل الرياضيات

إجراء العمليات الحسابية باستخدام الأرقام المعنوية 205–204

2 إيجاد الكمية المجهولة

استخدم معادلة الشغل عندما تؤثر قوة ثابتة في اتجاه إزاحة الجسم نفسه.

$W = Fd$

عوّض مستخدمًا $d = 0.150\ \text{m}, F = 4.50\ \text{N}$

$= (4.50\ \text{N})(0.150\ \text{m})$

$= 0.675\ \text{N.m}$

$1\ \text{J} = 1\ \text{N.m}$

$= 0.675\ \text{J}$

استخدم نظرية الشغل – الطاقة لحساب التغير في طاقة النظام.

$W = \Delta KE$

عوّض مستخدمًا $W = 0.675\ \text{J}$

$\Delta KE = 0.675\ \text{J}$

نعم، الوحدات صحيحة. فالشغل هو حاصل ضرب القوة (N) في المسافة (m)، ووحدة N.m تكافئ الجول (J).

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** يُقاس الشغل بوحدة الجول.
- **هل للإشارة معنى؟** إن اللاعب (المحيط الخارجي) يبذل شغلاً على القرص (النظام)؛ لذا فإن إشارة الشغل يجب أن تكون موجبة.

نعم، للإشارة معنى. الإشارة الموجبة تعني أن الشغل يُبذل على النظام (القرص)، مما يؤدي إلى زيادة طاقته الحركية.

a. إذا تضاعفت القوة، يتضاعف الشغل المبذول. الشغل الأصلي J 0.675 = W. الشغل الجديد J 0.675 × 2 = W' = 1.35 J. والتغير في الطاقة الحركية يساوي الشغل المبذول، أي J 1.35 = ΔKE.

b. الشغل المبذول J 0.675 = (9.00 N)(0.075 m) = Fd = W. التغير في الطاقة الحركية J 0.675 = W = ΔKE.

مسائل تدريبية

1. اعتمد على المثال 1 لحل المسألة الآتية:
   a. إذا أثر لاعب الهوكي في القرص، بضعف القوة أي 9.00N، فكيف تتغير طاقة حركة القرص؟
   b. إذا أثر اللاعب بقوة مقدارها 9.00 N في القرص، ولكن بقيت العصا ملامسة للقرص لنصف المسافة فقط، أيْ 0.075 m، فما مقدار التغير في الطاقة الحركية؟

a. الشغل المبذول J 28875 = (825 N)(35 m) = Fd = W ≈ 2.9 × 10⁴ J.

2. يؤثر طالبان معًا بقوة مقدارها 825 N لدفع سيارة مسافة 35 m.
   a. ما مقدار الشغل الذي يبذله الطالبان على السيارة؟
   b. إذا تضاعفت القوة المؤثرة، فما مقدار الشغل المبذول لدفع السيارة إلى المسافة نفسها؟

b. إذا تضاعفت القوة، يتضاعف الشغل. الشغل الجديد J 5.8 × 10⁴ = (J 2.9 × 10⁴) × 2 = W'.

3. يتسلق رجل جبلاً وهو يحمل حقيبة كتلتها 7.5 kg، وبعد 30.0 min وصل إلى ارتفاع 8.2 m فوق نقطة البداية.
   a. ما مقدار الشغل الذي بذله المتسلق على حقيبة الظهر؟
   b. إذا كان وزن المتسلق 645 N، فما مقدار الشغل الذي بذله لرفع نفسه هو وحقيبة الظهر؟
   c. ما مقدار التغير في طاقة المتسلق والحقيبة؟

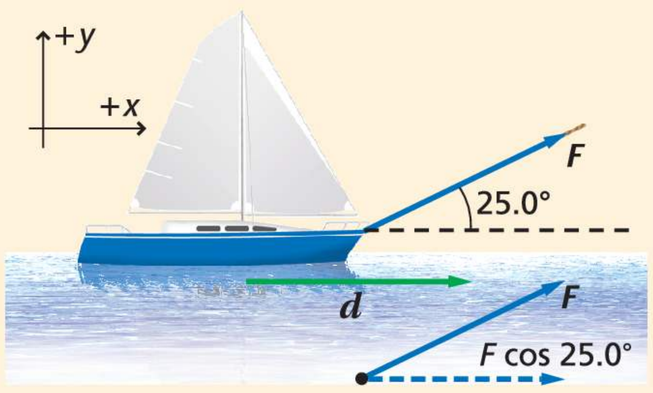
a. الشغل الذي بذله المتسلق على حقيبة الظهر J 602.7 = (7.5 kg)(9.8 m/s²)(8.2 m) = mgh = Fd = W ≈ 6.0 × 10² J.

مثـــــال 2

القوة والإزاحة بينهما زاوية يسحب بحّار قاربًا مسافة 30.0 m في اتجاه رصيف الميناء مستخدمًا حبلاً يصنع زاوية 25.0° فوق المحور الأفقي. ما مقدار الشغل الذي يبذله البحّار على القارب إذا أثر بقوة مقدارها 255 N في الحبل؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- أنشئ محاور الإسناد.
- ارسم مخطّطًا توضيحيًّا للحالة يوضح الشروط الابتدائية للقارب.
- ارسم مخطط المتجهات موضحًا القوة ومركبتها في اتجاه الإزاحة.



المعلوم	المجهول
$F = 255\ \text{N}, d = 30.0\ \text{m}, \theta = 25.0°$	$W = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

استخدم معادلة الشغل عندما توجد زاوية بين القوة والإزاحة.

عوّض مستخدمًا $F = 255\ \text{N}, d = 30.0\ \text{m}, \theta = 25.0°$

$$W = Fd\cos\theta$$
$$= (255\ \text{N})(30.0\ \text{m})(\cos 25.0°)$$
$$= 6.93 \times 10^3\ \text{J}$$

دليل الرياضيات

النسب المثلثية 228

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** يُقاس الشغل بوحدة الجول.
- **هل للإشارة معنى؟** يبذل البحار شغلًا على القارب، يتوافق مع الإشارة الموجبة للشغل.

نعم، الوحدات صحيحة. حاصل ضرب N.m يكافئ الجول (J)، وهي وحدة قياس الشغل.

نعم، للإشارة معنى. الإشارة الموجبة تعني أن هناك مركبة للقوة في اتجاه الإزاحة، مما يؤدي إلى زيادة طاقة القارب.

6. القوة موازية للإزاحة على طول السطح المائل، لذا θ = 0. الإزاحة هي طول السطح المائل d = 4.60 m. الشغل W = Fd = (215 N)(4.60 m) = 989 J.

5. القوة الكلية F_total = 2 × 225 N = 450 N. الشغل W = F_total d cosθ = (450 N)(15 m)cos(15°) = 6519 J ≈ 6.5 × 10³ J

4. W = Fd cosθ = (255 N)(30.0 m)cos(50.0°) = 4917 J ≈ 4.9 × 10³ J

مسائل تدريبية

4. إذا كان البحار في المثال 2 يسحب القارب بالقوة نفسها إلى المسافة نفسها ولكن بزاوية 50.0°، فما مقدار الشغل الذي يبذله؟

5. يرفع شخصان صندوقًا ثقيلاً مسافة 15 m بحبلين يصنع كل منها زاوية 15° مع الرأسي، ويؤثر كل من الشخصين بقوة مقدارها 225 N. ما مقدار الشغل الذي يبذلانه؟

6. يحمل مسافر حقيبة سفر وزنها 215 N إلى أعلى سُلّم، بحيث يعمل إزاحة مقدارها 4.20 m في الاتجاه الرأسي و4.60 m في الاتجاه الأفقي.

   a. ما مقدار الشغل الذي بذله المسافر؟

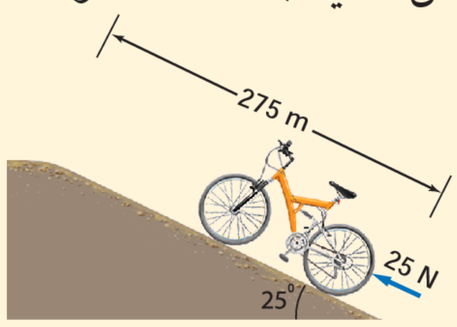
   b. إذا حمل المسافر نفسه حقيبة السفر نفسها إلى أسفل السلم نفسه، فما مقدار الشغل الذي يبذله؟

7. يُستخدم حبل في سحب صندوق مسافة 15.0 m على سطح الأرض، فإذا كان الحبل مربوطًا بحيث يصنع زاوية مقدارها 46.0° فوق سطح الأرض وتؤثر قوة مقدارها 628 N في الحبل، فما مقدار الشغل الذي تبذله هذه القوة؟

8. دفع سائق دراجة هوائية كتلتها 13 kg إلى أعلى تل ميله 25° وطوله 275 m، في اتجاه موازٍ للطريق وبقوة مقدارها 25 N، كما في **الشكل 4–4**، فما مقدار الشغل الذي:

   a. يبذله السائق على دراجته الهوائية؟

   b. تبذله قوة الجاذبية الأرضية على الدراجة الهوائية؟



الشكل 4–4

7. a. الشغل الذي يبذله الحبل W_rope = Fd cosθ = (628 N)(15.0 m)cos(46.0°) = 6544 J ≈ 6.54 × 10³ J.

   b. قوة الجاذبية رأسية لأسفل والإزاحة أفقية، فالزاوية بينهما 90°. الشغل الذي تبذله الجاذبية W_g = F_g d cos(90°) = 0 J.

إيجاد الشغل المبذول عندما تتغير القوى المؤثرة إن الرسم البياني للقوة – الإزاحة يمكّنك من حساب الشغل التي تبذله القوة، وتستخدم هذه الطريقة البيانية في حل مسائل تكون فيها القوة المؤثرة متغيرة. ويوضح **الشكل 4–5a** الشغل المبذول من خلال قوة ثابتة مقدارها 20.0 N، والتي تؤثر في جسم ما لرفعه إلى أعلى مسافة 1.50 m. الشغل الذي تبذله هذه القوة الثابتة يمكن تمثيله بالمعادلة:

$$W = Fd = (20.0\ \text{N})\ (1.50\ \text{m}) = 30.0\ \text{J}$$

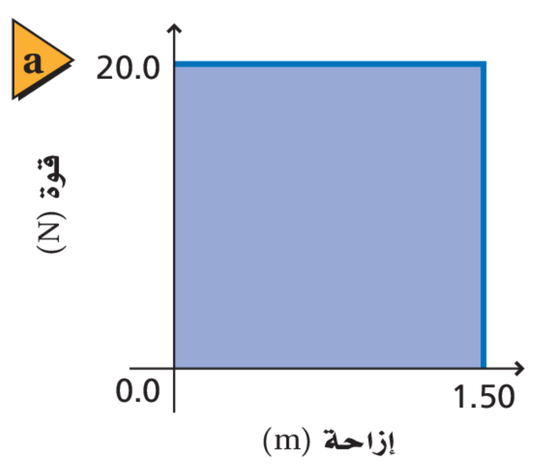
أما المساحة المظللة تحت المنحنى البياني فتساوي (20.0 N) (1.50 m)، أو 30.0 J، أي أن المساحة تحت المنحنى البياني (القوة – الإزاحة) تساوي الشغل الذي تبذله تلك القوة حتى لو تغيرت تلك القوة.

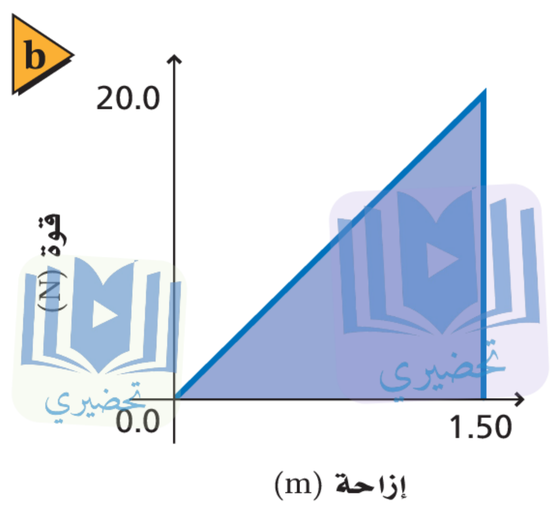
يوضح **الشكل 4–5b** القوة التي تؤثر في نابض، والتي تتغير خطيًّا من 0.0 إلى 20.0 N عند تعرضه للانضغاط مسافة 1.50 m. إن الشغل الذي بذلته القوة التي عملت على انضغاط النابض يساوي المساحة تحت المنحنى البياني، والتي تمثل مساحة مثلث، حيث تساوي $\frac{1}{2}$ (القاعدة)(الارتفاع)، أو:

$$W = \tfrac{1}{2}\ (20.0\ \text{N})\ (1.50\ \text{m}) = 15.0\ \text{J}$$

الشغل الذي تبذله عدة قوى يربط قانون نيوتن الثاني في الحركة القوة المحصلة المؤثرة في جسم ما مع تسارعه. وبالطريقة نفسها، تربط نظرية الشغل – الطاقة بين الشغل الكلي المبذول على نظام ما والتغير في طاقته الحركية. فإذا أثرت عدة قوى في نظام، فاحسب الشغل الذي تبذله كل قوة، ثم اجمع النتائج.

الشكل 4–5 يمكن حساب الشغل المبذول بيانيًا بإيجاد المساحة تحت المنحنى البياني للقوة – الإزاحة.





8. (بافتراض أن طول التل 25m والقوة 275N من النص)

   a. الشغل الذي يبذله السائق W_plumber = Fd = (275 N)(25 m) = 6875 J ≈ 6.9 × 10³ J.

   b. (بافتراض أن "ميله 25m" تعني ميل بنسبة 25%، أي tanθ = 0.25 g θ=14.0°) الارتفاع الرأسي h = d sinθ = 25 sin(14.0°) = 6.05 m. الشغل الذي تبذله الجاذبية W_g = -mgh = -(13 kg)(9.8 m/s²)(6.05 m) = -772 J.

القدرة Power

لم تتطرق المناقشات السابقة المتعلقة بالشغل إلى الزمن اللازم لتحريك جسم ما. إن الشغل الذي يبذله شخص ما لرفع صندوق من الكتب إلى رف مثلًا لا يتغير، سواء رُفع الصندوق كاملًا إلى الرف خلال 2 s، أم رفع كل كتاب من الصندوق على حدة، بحيث استغرق رفع كافة كتب الصندوق إلى الرف 20 min، وعلى الرغم من تساوي الشغل في الحالتين إلا أن معدل بذل الشغل يكون مختلفًا في كل حالة، ويطلق مصطلح القدرة على المعدل الزمني لبذل الشغل، أي أن **القدرة** هي الشغل المبذول مقسومًا على الزمن اللازم لبذل الشغل. أو أن القدرة هي المعدل الذي تُغيّر فيه القوة الخارجية طاقة النظام، ويمكن حساب القدرة وفقًا للمعادلة الآتية:

القدرة $$P = \frac{W}{t}$$

القدرة تساوي الشغل المبذول مقسومًا على الزمن اللازم لإنجاز الشغل.

انظر **الشكل 6–4** الذي يوضّح ثلاثة طلاب وهم يصعدون سُلّمًا. إذا افترضنا أن كتل الطلاب الثلاثة متساوية، فهذا يعني أن كلًّا منهم ينجز الشغل نفسه، لكن الطالب الذي يسير منفردًا يصعد السلّم مسرعًا مقارنة بالطالبين الذين يسيران معًا، أي أن قدرته على الصعود أكبر من قدرة أي منهما؛ فالطالب المنفرد ينجز الشغل نفسه في وقت أقل. من جهة أخرى، قدرة كل من الطالبين اللذين يسيران معًا على صعود السلّم متساوية؛ لأن كلًّا منهما ينجز الشغل نفسه خلال الفترة الزمنية نفسها.

تُقاس القدرة بوحدة **الواط** (W)، ويساوي الواط الواحد انتقال طاقة مقدارها 1 J خلال فترة زمنية مقدارها 1 s. ووحدة الواط صغيرة بالنسبة للقدرة، فمثلاً إذا رفعت كأس ماء وزنه 2 N مسافة 0.5 m إلى فمك تكون قد بذلت شغلاً مقداره 1 J، وإذا رفعت الكأس خلال 1 s تكون قد بذلت شغلاً بمعدل 1 W، ولأن وحدة الواط صغيرة فإن القدرة تُقاس غالبًا بوحدة الكيلوواط (kW)، وهي تساوي 1000 W. كما تستخدم وحدة الحصان الميكانيكي لقياس القدرة، وهو يساوي 746 W.

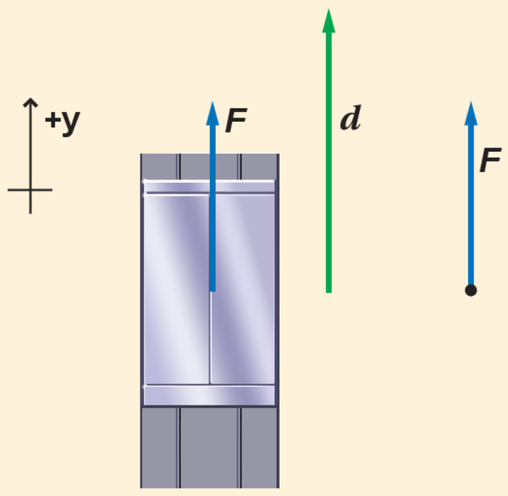
الشكل 6–4 يبذل هؤلاء الطلاب شغلاً بمعدلات مختلفة عندما يصعدون السلم.

مثـــال 3

القدرة يرفع محرك كهربائي مصعدًا مسافة 9.00 m خلال 15.0 s بالتأثير بقوة رأسيَّة إلى أعلى مقدارها $1.20\times10^4\text{N}$. ما القدرة التي ينتجها المحرك بوحدة kW؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم مخططًا توضيحيًّا للحالة يوضح المصعد مع الشروط الابتدائية.
- اختر محاور إسناد على أن يكون الاتجاه الموجب رأسيًّا إلى أعلى.
- ارسم مخطط المتجهات للقوة والإزاحة.



المعلوم	المجهول
$d = 9.00\text{ m}$	$P = ?$
$t = 15.0\text{ s}$	
$F = 1.20\times10^4\text{ N}$	

2 إيجاد الكمية المجهولة

حل بالنسبة للقدرة.

دليل الرياضيات

إجراء العمليات الرياضية بدلالتها العلمية 212–213

عوّض مستخدمًا $W=Fd$

عوّض مستخدمًا $F=1.20\times10^4\text{ N}, d=9.00\text{ m}, t=15.0\text{ s}$

$$\begin{aligned} P &= \frac{W}{t} \\ &= \frac{Fd}{t} \\ &= \frac{(1.20\times10^4\text{ N})(9.00\text{ m})}{(15.0\text{ s})} \\ &= 7.20\text{ kW} \end{aligned}$$

نعم، الوحدات صحيحة. N.m/s تكافئ J/s وهي وحدة الواط (W).

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تُقاس القدرة بوحدة J/s.
- **هل للإشارة معنى؟** تتفق الإشارة الموجبة مع الاتجاه الرأسي للقوة المؤثرة إلى أعلى.

نعم، للإشارة معنى. الإشارة الموجبة للقدرة تعني أن الشغل يُبذل على النظام (المصعد) لزيادة طاقته (الوضعية).

مسائل تدريبية

9. رُفع صندوق يزن 575 N رأســيًّا إلى أعلى مسافة 20.0 m بحبل قوي موصول بمحرك. فإذا تم إنجاز العمل خلال 10.0 s، فما القدرة التي يولدها المحرك بوحدة W ووحدة kW؟

10. إذا كنت تدفع عربة يدوية مســافة 60.0 m وبسرعة ثابتة المقدار مدة 25.0 s، وذلك بالتأثير بقوة مقدارها 145 N في اتجاه أفقي

a. فما مقدار القدرة التي تولدها؟

b. وإذا كنت تحرك العربة بضعف مقدار السرعة، فما مقدار القدرة التي تولدها؟

11. ما مقدار القدرة التي تولدها مضخة في رفع 35 L من الماء كل دقيقة من عمق 110 m؟ [كل 1 L من الماء كتلته 1.00 kg]

12. يولــد محرك كهربائي قدرة 65 kW لرفع مصعد مكتمل الحمولة مســافة 17.5 m خــلال 35 s. ما مقدار القوة التي يبذلها المحرك؟

9. الشغل $W = Fd = (575\text{ N})(20.0\text{ m}) = 11500\text{ J}$. القدرة $P = W/t = 11500\text{ J} / 10.0\text{ s} = 1150\text{ W} = 1.15\text{ kW}$.

10. a. السرعة $v = d/t = 60.0\text{ m} / 25.0\text{ s} = 2.4\text{ m/s}$. القدرة $P = Fv = (145\text{ N})(2.4\text{ m/s}) = 348\text{ W}$.

b. إذا تضاعفت السرعة، تتضاعف القدرة. $P' = 2 \times 348\text{ W} = 696\text{ W}$.

11. الكتلة في الدقيقة $m = 35\text{ L} \times 1\text{ kg/L} = 35\text{ kg}$.

الزمن $t = 60\text{ s}$. القدرة $P = W/t = mgh/t = (35\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2)(110\text{ m}) / 60\text{ s} = 629\text{ W} \approx 6.3 \times 10^2\text{ W}$.

12. القدرة التي يبذلها المحرك معطاة في السؤال وهي 65 kW.

13. الشغل اللازم لرفع الجسم هو W = Fd، حيث d هو الارتفاع الرأسي (4 m). الزمن t = W/P = Fd/P = (5.8 × 10³ N)(4 m) / (0.30 × 10³ W) = 23200 J / 300 W = 77.3 s.

13. صُمّمت رافعة ليتم تثبيتها على شاحنة كما في **الشكل 7–4**، ولدى اختبار قدرتها ربطت الرافعة بجسم وزنه يعادل أكبر قوة تستطيع الرافعة التأثير بها، ومقدارها $6.8 \times 10^3\ \text{N}$، فرفعت الجسم مسافة 15 m مولدة قدرة مقدارها 0.30 kW. ما الزمن الذي احتاجت إليه الرافعة لرفع الجسم؟

14. توقفت سيارتك فجأة وقمت بدفعها، ولاحظت أن القوة اللازمة لجعلها تستمر في الحركة آخذة في التناقص مع استمرار حركة السيارة. افترض أنه خلال مسافة 15 m الأولى تناقصت قوتك بمعدل ثابت من 210.0 N إلى 40.0 N، فما مقدار الشغل الذي بذلته على السيارة؟ ارسم المنحنى البياني القوة – الإزاحة لتمثل الشغل المبذول خلال هذه الفترة.

■ **الشكل 7–4**

لاحظت في المثال 3 أنه عندما تكون القوة والإزاحة في الاتجاه نفسه فإن $P = \frac{Fd}{t}$.

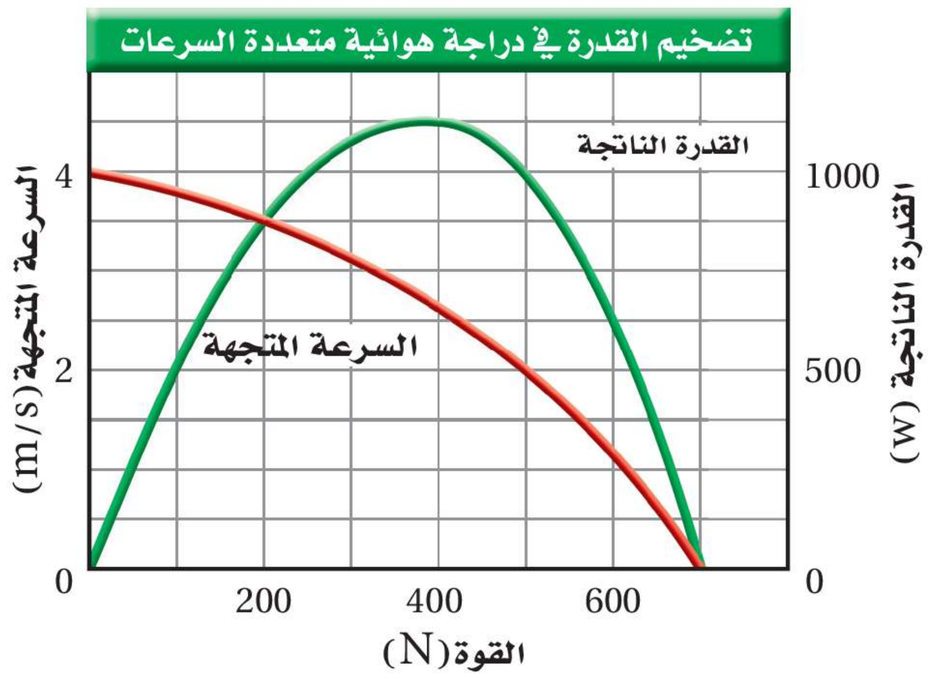
ولأن النسبة $\frac{d}{t}$ تمثل مقدار السرعة فإن القدرة يمكن حسابها باستخدام العلاقة $P = Fv$ أيضًا.

تطبيق الفيزياء

سباق جولات الدراجات في فرنسا

يقود سائق دراجته الهوائية في مسابقة جولات الدراجات الهوائية في فرنسا بسرعة 8.94 m/s أكثر من 6 h يوميًا. القدرة الناتجة للمتسابق 1 kW تقريبًا، حيث يُستهلك ربع تلك القدرة في تحريك الدراجة الهوائية ضد مقاومة الهواء ومبدّل السرعات والعجلات، ثلاثة أرباع تلك القدرة تُستهلك لتبريد جسم المتسابق.

كيف تحدد الوضع المناسب لناقل السرعات عندما تركب دراجة هوائية متعددة السرعات؟ بكل تأكيد أنت ترغب في جعل جسمك ينتج أكبر قدرة ممكنة. إذا أخذت المعادلة $P = Fv$ في الاعتبار فسوف تلاحظ أن القدرة تكون صفرًا عندما تكون السرعة صفرًا، أو تكون القوة صفرًا. وفي المقابل لكي تكون القدرة أكبر ما يمكن لا بد أن تكون كل من القوة والسرعة أكبر ما يمكن، لكن عضلات أجسامنا تعجز عن التأثير بقوى كبيرة جدًّا، كما تعجز عن التحرك بسرعات كبيرة جدًّا، ولذلك فإن مزيجًا من سرعة معتدلة وقوة معتدلة سينتج أكبر كمية من القدرة. وكما تخضع عضلات أجسامنا لمحددات تخضع المحركات أيضًا لمحددات. يوضح **الشكل 8–4** ذلك عن طريق حالة خاصة لمحرك؛ حيث إن أقصى قدرة منتجة تفوق 1000 W عندما تكون القوة 400 N تقريبًا ومقدار السرعة 2.6 m /s تقريبًا، وجميع المحركات عليها محددات، ولذلك تصمم الآلات البسيطة بحيث تتلاءم القوة ومقدار السرعة اللتان يولدهما المحرك بحسب ما يتطلبه إنجاز عمل ما دون تجاوز محددات المحرك. وستتعلم المزيد عن الآلات البسيطة في القسم الآتي.



■ **الشكل 8–4** عندما تركب دراجة هوائية متعددة السرعات فإنها تضخم قدرتك؛ فإذا أثرت عضلاتك بقوة مقدارها 400 N، وكانت السرعة 2.6 m/s فإن القدرة الناتجة ستزيد على 1000 W. لاحظ أن الرسم البياني يعبر عن علاقتين؛ العلاقة بين السرعة والقوة (باللون الأحمر)، والعلاقة بين القدرة الناتجة والقوة (باللون الأخضر).

14. الشغل الكلي المبذول يساوي التغير في الطاقة الحركية W_net = ΔKE. الكتلة m = F_g/g = 10.0 N / 9.8 m/s² = 1.02 kg. الشغل W_net = ½mv_f² - ½mv_i² = ½(1.02 kg)(21.0 m/s)² - 0 = 225 J. الرسم البياني سيكون خطًا أفقيًا عند قوة ثابتة مقدارها F = W/d = 225 J / 15 m = 15 N، ويمتد على محور الإزاحة من 0 إلى 15 m.

16. بافتراض أن العامل يدفع الثلاجة بسرعة ثابتة، فإن قوته تساوي مجموع مركبة الجاذبية الموازية للسطح وقوة الاحتكاك. $F_{applied} = mg\sin\theta + \mu_k mg\cos\theta = (185)(9.8)\sin(11.0°) + (0.50)(185)(9.8)\cos(11.0°) = 345.5\ N + 888.5\ N = 1234\ N$. الشغل $W = F_{applied} * d = (1234\ N)(10.0\ m) = 12340\ J \approx 1.23 \times 10^4\ J$.

4–1 مراجعة

15. **الشغل** تدفع مريم جسمًا كتلته 20 kg مسافة 10 m على أرضية غرفة بقوة أفقية مقدارها 80 N. احسب مقدار الشغل الذي تبذله مريم.

16. **الشغل** يدفع عاملٌ ثلاجةً كتلتها 185 kg بسرعة ثابتة إلى أعلى لوح مائل عديم الاحتكاك طوله 10.0 m ويميل بزاوية 11.0° على الأفقي؛ لتحميلها على سيارة نقل. ما مقدار الشغل الذي يبذله العامل؟

17. **الشغل والقدرة** هل يعتمد الشغل اللازم لرفع كتاب إلى رف عالٍ، على مقدار سرعة رفعه؟ وهل تعتمد القدرة على رفع الكتاب على مقدار سرعة رفعه؟ وضح إجابتك.

18. **القدرة** يرفع مصعد جسمًا كتلته 1.1×10^3 kg مسافة 40.0 m خلال 12.5 s. ما القدرة التي يولدها المصعد؟

19. **الشغل** تسقط كرة كتلتها 0.180 kg مسافة 2.5 m، فما مقدار الشغل الذي تبذله قوة الجاذبية الأرضية على الكرة؟

20. **الكتلة** ترفع رافعة صندوقًا مسافة 1.2 m، وتبذل عليه شغلاً مقداره 7.0 kJ. ما مقدار كتلة الصندوق؟

21. **الشغل** تحمل أنت وزميلك صندوقين متماثلين من الطابق الأول في مبنى إلى غرفة تقع في نهاية ممر في الطابق الثاني. فإذا اخترت أن تحمل الصندوق إلى أعلى الدرج ثم تمر عبر الممر لتصل إلى الغرفة، في حين اختار زميلك أن يحمل صندوقه من الممر في الطابق الأول ثم يصعد به سلّما رأسيًّا إلى أن يصل إلى الغرفة، فأيكما يبذل شغلًا أكبر؟

22. **الشغل وطاقة الحركة** إذا تضاعفت الطاقة الحركية لجسم بفعل شغل مبذول عليه، فهل تتضاعف سرعة الجسم؟ إذا كان الجواب بالنفي فما النسبة التي تتغير بها سرعة الجسم؟

23. **التفكير الناقد** وضح كيفية إيجاد التغير في طاقة نظام إذا أثرت فيه ثلاث قوى في آنٍ واحد.

15. الشغل $W = Fd = (80\ N)(10\ m) = 800\ J$.

17. يعتمد الشغل على قوة الجاذبية (كتلة الكتاب) والمسافة الرأسية (ارتفاع الرف). نعم، تعتمد القدرة على سرعة الرفع، لأن القدرة $P = W/t$. لعمل نفس الشغل (W)، كلما قلت الفترة الزمنية (t) أي زادت السرعة، زادت القدرة المطلوبة.

18. الشغل $W = Fd = mgh = (1.1 \times 10^3\ kg)(9.8\ m/s^2)(40.0\ m) = 431200\ J$. القدرة $P = 1.1 \times 10^3\ kW = 1.1 \times 10^6\ W$. الزمن $t = W/P = 431200\ J / 1.1 \times 10^6\ W = 0.39\ s$.

19. الشغل الذي تبذله قوة الجاذبية $W_g = F_g d = mgh = (0.180\ kg)(9.8\ m/s^2)(2.5\ m) = 4.41\ J$.

20. الشغل $W = Fd = mgh$. إذن الكتلة $m = W / (gh) = 7.0 \times 10^3\ J / (9.8\ m/s^2 \times 1.2\ m) = 595\ kg \approx 6.0 \times 10^2\ kg$.

21. الشغل المبذول ضد الجاذبية يعتمد على التغير في الارتفاع الرأسي (Δh) وليس على المسار. بما أن كلا الطالبين انتقلا بين نفس الطابقين، فإن التغير في الارتفاع الرأسي لهما متساوٍ، وبالتالي فإن الشغل الذي بذله كل منهما ضد الجاذبية متماثل.

22. لا، سرعة الجسم لا تتضاعف. الشغل يساوي التغير في الطاقة الحركية ($W = \Delta KE$). إذا تضاعفت الطاقة الحركية ($KE' = 2KE$)، فإن $\frac{1}{2}mv'^2 = 2(\frac{1}{2}mv^2)$، مما يعني أن $v'^2 = 2v^2$، وبالتالي فإن السرعة الجديدة $v' = v\sqrt{2}$. تتغير السرعة بنسبة $\sqrt{2}$ أو 1.41 تقريبًا.

23. يتم إيجاد التغير في طاقة النظام (الطاقة الحركية) عن طريق حساب الشغل الكلي (أو الصافي) المبذول على النظام. الشغل الكلي هو المجموع الجبري للشغل الذي تبذله كل قوة على حدة: $W_{net} = W_1 + W_2 + W_3$. حسب نظرية الشغل-الطاقة، فإن $W_{net} = \Delta KE$.

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

4–2 الآلات Machines

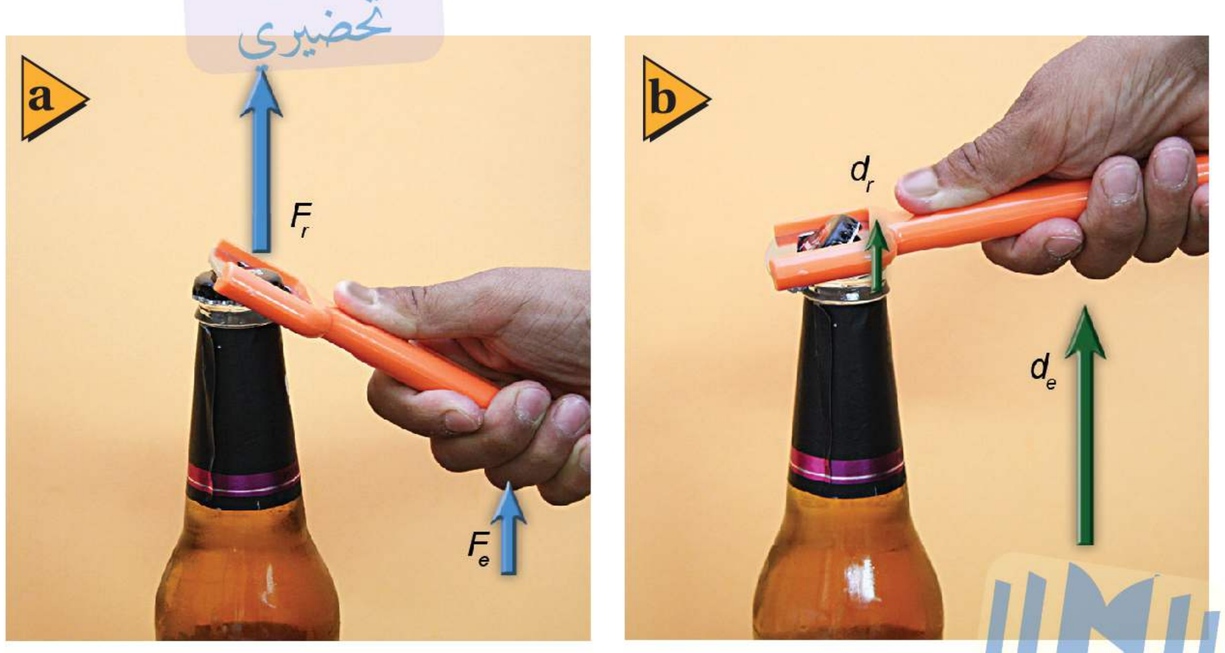
يستخدم الناس الآلات يوميًّا، فبعضها أدوات بسيطة، ومنها فتّاحة الزجاجات ومفك البراغي، وبعضها الآخر مركبًا، ومنها الدراجة الهوائية والسيارة. وسواء كانت هذه الآلات تُدار بالمحركات أم بقوى بشرية فهي تؤدي في النهاية إلى تسهيل أداء المهام، كما تؤدي **الآلة** إلى تخفيف الحمل، وذلك بتغيير مقدار القوة أو اتجاهها؛ حتى تتناسب القوة مع مقدرة الآلة أو الشخص.

فوائد الآلات Benefits of Machines

لندرس فتّاحة الزجاجات المبينة في **الشكل 9–4**، فعندما تستخدم هذه الأداة فإنك ترفع طرفها البعيد، لذا تكون قد بذلت شغلًا على الفتاحة، التي بدورها تبذل شغلا على الغطاء عندما ترفعه. ويُسمى الشغل الذي بذلته أنت في هذه الحالة الشغل المبذول W_i، أما الشغل الذي بذلته الأداة فيسمى الشغل الناتج W_o.

تذكّر أن الشغل هو عملية انتقال الطاقة بالطرائق الميكانيكية. فأنت خزنت شغلاً في الأداة كفتاحة الزجاجات مثلاً؛ لذا تكون قد نقلت طاقة إلى هذه الأداة. وفي المقابل بذلت فتاحة الزجاجات شغلاً على الغطاء؛ ولذا فقد نقلت الطاقة إليه. لا تعد فتاحة الزجاجات مصدر طاقة، ولذلك لا يكتسب الغطاء طاقة تزيد على كمية الطاقة التي خزنتها في فتاحة الزجاجات. وهذا يعني أن الشغل الناتج لا يمكن أن يكون أكبر من الشغل المبذول.

الفائدة الميكانيكية إن القوة التي أثرت في الآلة بواسطة شخص ما تسمى **القوة المسلّطة** F_e (المبذولة)، أو اختصارًا القوة. أما القوة التي أثرت بها الآلة فتُسمى **المقاومة** F_r. يبين لنا **الشكل 9a–4**، أن F_e (القوة) هي قوة رأسية إلى أعلى أثرت بواسطة الشخص عند استخدام فتاحة الزجاجات، وأن (المقاومة) F_r هي قوة رأسية إلى أعلى أثرت بواسطة فتاحة الزجاجات، وتُسمى نسبة المقاومة إلى القوة $\frac{F_r}{F_e}$ **الفائدة الميكانيكية** MA للآلة.



الشكل 9–4 تُعد فتّاحة الزجاجات مثالاً على الآلات البسيطة؛ إذ تسهّل عملية فتح الزجاجات، ولكنها لا تقلّل من الشغل اللازم لذلك.

تساعد الآلة على نقل الطاقة من الشخص إلى فتاحة الزجاجات بصورة بسيطة.

الأهداف

- **توضح** فوائد الآلات البسيطة.
- **قارن** بين كفاءة الآلات المثالية والحقيقية.
- **تحلّل** الآلات المركبة مبينًّا الآلات البسيطة التي تكونت منها.
- **تحسب** كفاءة الآلات البسيطة والمركبة.

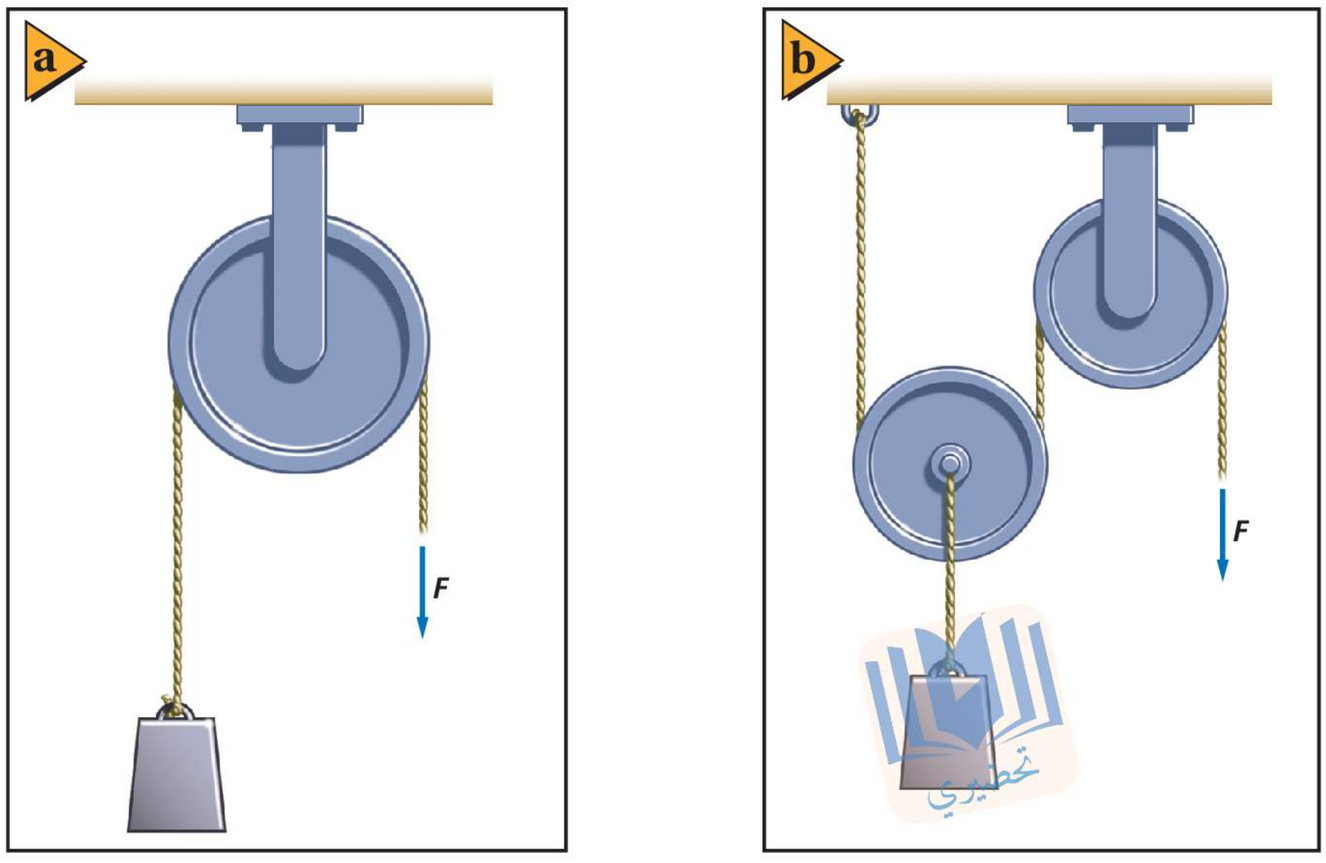
المفردات

الآلة
القوة (المسلّطة)
المقاومة
الفائدة الميكانيكية
الفائدة الميكانيكية المثالية
الكفاءة
الآلة المركبة

تحضيري

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

الفائدة الميكانيكية للآلة تساوي ناتج قسمة المقاومة على القوة.



■ **الشكل 10–4** الفائدة الميكانيكية للبكرة الثابتة تساوي 1 (**a**). ونظام البكرات الذي يحوي بكرة قابلة للحركة له فائدة ميكانيكية تزيد على 1 (**b**).

القوتان F_e و F_r متساويتان في نظام البكرة الثابتة الموضحة في **الشكل 10a–4** . لذا فإن MA تساوي 1، فما فائدة هذه الآلة؟ تُعد البكرة الثابتة مفيدة، ليس لأنها تقلّل من القوة المسلطة، ولكن لأنها تغير من اتجاهها. إن الكثير من الآلات– ومنها فتّاحة الزجاجات في **الشكل 9–4** ونظام البكرات في **الشكل 10b–4**– لهما فائدة ميكانيكية أكبر من 1، فعندما تكون الفائدة الميكانيكية أكبر من 1 فإن الآلة تعمل على زيادة القوة التي أثر بها شخص ما.

تستطيع أن تعبر عن الفائدة الميكانيكية للآلة بطريقة أخرى مستخدمًا تعريف الشغل؛ حيث إن الشغل المبذول يساوي حاصل ضرب القوة F_e التي يؤثر بها شخص ما في الإزاحة التي تحركتها يده (d_e)، والشغل الناتج يساوي حاصل ضرب المقاومة F_r في إزاحة المقاومة (d_r)، وكما أسلفنا لا تستطيع الآلة زيادة الطاقة، لكنها تستطيع زيادة القوة. أما الآلة المثالية فتستطيع نقل الطاقة كلها؛ لذا فإن الشغل الناتج يساوي الشغل المبذول.

$$F_r d_r = F_e d_e \quad \text{أو} \quad W_o = W_i$$

ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة على الصورة $\frac{F_r}{F_e} = \frac{d_e}{d_r}$. تذكّر أن الفائدة الميكانيكية يُعبر عنها بالمعادلة $MA = \frac{F_r}{F_e}$؛ لذا فإن **الفائدة الميكانيكية المثالية** (IMA) للآلة المثالية تساوي إزاحة القوة مقسومة على إزاحة المقاومة. ويمكن التعبير عن الفائدة الميكانيكية المثالية بالمعادلة الآتية:

الفائدة الميكانيكية المثالية $IMA = \frac{d_e}{d_r}$

الفائدة الميكانيكية المثالية للآلة المثالية تساوي إزاحة القوة مقسومة على إزاحة المقاومة.

لاحظ أنك قسِمت المسافات لحساب الفائدة الميكانيكية المثالية، في حين قست القوى المؤثرة لإيجاد الفائدة الميكانيكية الفعلية.

الكفاءة يكون الشغل المبذول في الآلات الحقيقية أكبر من الشغل الناتج. وأن إزالة الطاقة من النظام تعني أن هناك نقصانًا في الشغل الذي تنتجه الآلة، ونتيجة لذلك تكون الآلة أقل كفاءة (فاعلية) عند إنجاز المهمة. ويمكن تعريف **كفاءة** الآلة (e) على أنها نسبة الشغل الناتج إلى الشغل المبذول.

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

إن كفاءة الآلة (كنسبة مئوية %) تساوي الشغل الناتج مقسومًا على الشغل المبذول مضروبًا في العدد 100.

إن الآلة المثالية لها شغل ناتج يساوي الشغل المبذول، حيث إن $\frac{W_o}{W_i} = 1$ وكفاءتها تساوي 100 % . وجميع الآلات الحقيقية كفاءتها أقل من 100 %.

يمكن التعبير عن الكفاءة بدلالة الفائدة الميكانيكية والفائدة الميكانيكية المثالية، حيث تحتسب الكفاءة e من النسبة $\frac{W_o}{W_i}$ والتي يمكن كتابتها على النحو الآتي: $\frac{W_o}{W_i} = \frac{F_r d_r}{F_e d_e}$

ولأن $MA = \frac{F_r}{F_e}$ و $IMA = \frac{d_e}{d_r}$، فإنه يمكن التعبير عن الكفاءة على النحو الآتي:

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

إن كفاءة الآلة (كنسبة مئوية %) تساوي فائدتها الميكانيكية مقسومة على فائدتها الميكانيكية المثالية مضروبة في العدد 100.

يحدّد تصميم الآلات فائدتها الميكانيكية المثالية؛ فالآلة ذات الكفاءة العالية لها فائدة ميكانيكية تساوي غالبًا كفاءتها الميكانيكية المثالية، وللحصول على قوة المقاومة نفسها فإنه يجب التأثير بقوة أكبر في الآلة ذات الكفاءة المتدنية مقارنة بالآلة ذات الكفاءة العالية.

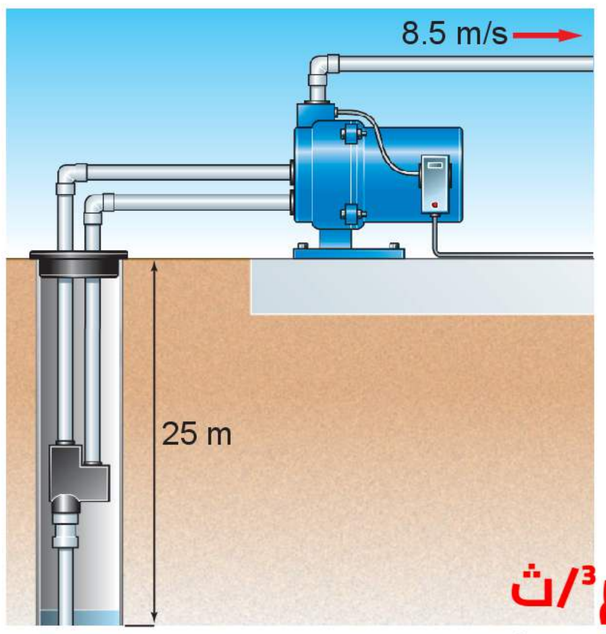
تجربة عملية

كيف تساعدك البكرات على رفع الأشياء؟

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية

مسألة تحفيز

تسحب مضخة كهربائية الماء بمعدل 0.25 m^3/s من بئر عمقها 25 m، فإذا كان الماء يتدفق خارجًا من المضخة بسرعة 8.5 m/s



(الأبعاد في الصورة ليست بمقياس رسم)

1. ما القدرة اللازمة لرفع الماء إلى السطح؟
2. ما القدرة اللازمة لزيادة الطاقة الحركية للمضخة؟
3. إذا كانت كفاءة المضخة 80 %، فما القدرة التي يجب تزويد المضخة بها؟

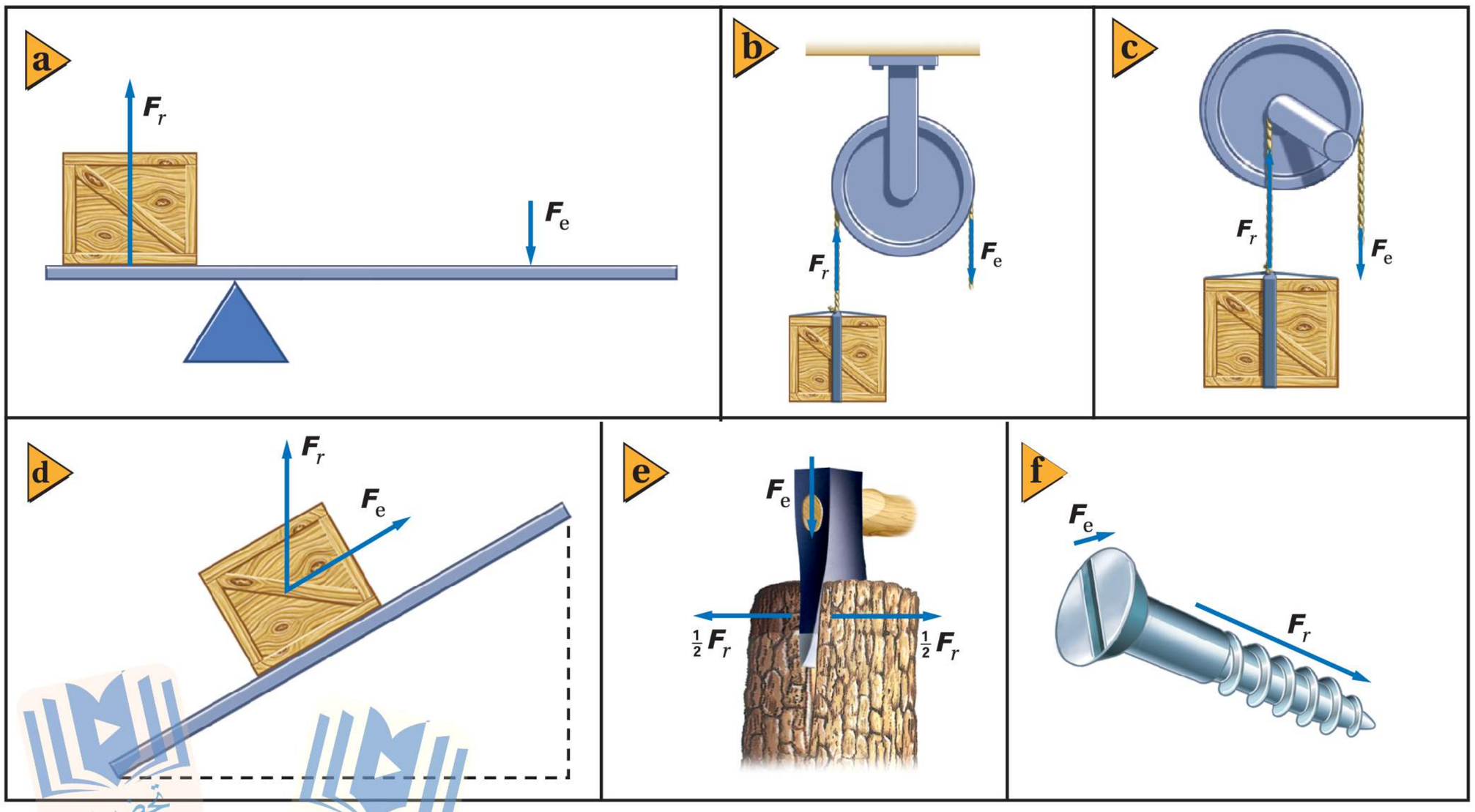
1. القدرة اللازمة لرفع الماء = (معدل تدفق الكتلة) × (0.25 × 1000 كجم/م³) × 9.8 م/ث² × 25 م = 6.1 × 10⁴ واط.

2. القدرة اللازمة لزيادة الطاقة الحركية = ½ (معدل تدفق الكتلة) × v^2 = ½ (250 كجم/ث) × (8.5 م/ث)² = 9.0 × 10³ واط.

3. القدرة الداخلة = القدرة الناتجة / الكفاءة = (6.1 × 10⁴ واط + 9.0 × 10³ واط) / 0.80 = 8.8 × 10⁴ واط.

الآلات المركّبة Compound Machines

تتركب معظم الآلات بغض النظر عن مستوى تعقيدها من آلة بسيطة واحدة أو أكثر من الآلات الآتية: الرافعة، البكرة، العجلة والمحور، المستوى المائل، الوتد (الإسفين) البرغي. انظر **الشكل 11–4**.

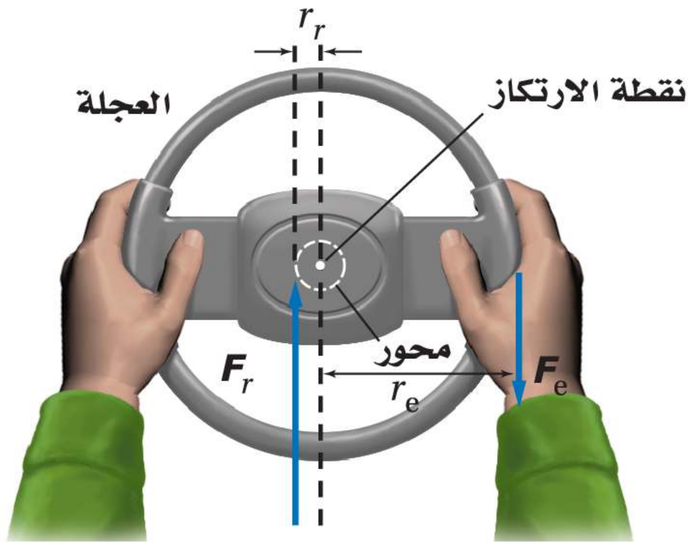


الشكل 11–4 آلات بسيطة تشتمل على (a) رافعة، (b) بكرة، (c) عجلة ومحور، (d) مستوى مائل، (e) إسفين (وتد) و (f) برغي.

إن الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) لكل الآلات الموضحة في **الشكل 11–4** هي النسبة بين المسافات المقطوعة، ويمكن استبدال هذه النسبة للآلات "كالرافعة" و"العجلة والمحور" مثلاً، بنسبة المسافات بين النقاط التي أثرت عندها كل من القوة والمقاومة ونقطة الارتكاز.

تعتبر عجلة القيادة –كما في **الشكل 12–4** – مثالًا شائعًا للعجلة والمحور؛ حيث تكون الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) هي النسبة بين نصفي قطري العجلة والمحور.

الآلة المركّبة هي الآلة التي تتكون من آلتين بسيطتين أو أكثر ترتبطان معًا، بحيث تصبح المقاومة لإحدى هذه الآلات قوة (مسلطة) للآلة الأخرى.



الشكل 12–4 الفائدة الميكانيكية المثالية (*IMA*) لعجلة القيادة تساوي $\frac{r_e}{r_r}$.

6. القوة التي أثرت بها (القوة المسلطة) أقل من وزن الجسم (القوة المقاومة).

■ **الشكل 13–4** تتراكب مجموعة من الآلات البسيطة لكي تنقل القوة التي يبذلها السائق على دوّاسة الدراجة إلى الطريق.

تعمل كل من الدوّاسة وناقل الحركة الأمامي، في الدراجة الهوائية، عمل العجلة والمحور. حيث تكون القوة (المسلّطة) هي القوة التي يؤثر بها السائق في الدوّاسة ($F_{\text{السائق على الدوّاسة}}$)، أما المقاومة فهي القوة التي يؤثر بها ناقل الحركة الأمامي في السلسلة ($F_{\text{ناقل الحركة على السلسلة}}$) كما في **الشكل 13–4**. وتؤثر السلسلة بقوة (مسلطة) في ناقل الحركة الخلفي ($F_{\text{السلسلة على ناقل الحركة}}$) تساوي القوة المؤثرة في السلسلة. ويعمل ناقل الحركة والإطار الخلفي عمل عجلة ومحور إضافيين.

المقاومة هي القوة التي يؤثر بها الإطار في الطريق ($F_{\text{الإطار على الطريق}}$). وبحسب قانون نيوتن الثالث، فإن الأرض تؤثر بقوة مساوية في الإطار نحو الأمام، مؤدية إلى تسارع الدراجة الهوائية إلى الأمام.

الفائدة الميكانيكية (MA) للآلة المُركّبة تساوي حاصل ضرب الفوائد الميكانيكية للآلات البسيطة التي تتكون منها، فمثلاً تكون الفائدة الآلية في حالة الدراجة الهوائية في **الشكل 13–4** على النحو الآتي:

$$\text{MA} = \text{MA}_{\text{الآلة 1}} \times \text{MA}_{\text{الآلة 2}}$$

$$\text{MA} = \left(\frac{F_{\text{ناقل الحركة على السلسلة}}}{F_{\text{السائق على الدوّاسة}}}\right)\left(\frac{F_{\text{الإطار على الطريق}}}{F_{\text{السلسلة على ناقل الحركة}}}\right) = \left(\frac{F_{\text{الإطار على الطريق}}}{F_{\text{السائق على الدواسة}}}\right)$$

إن الفائدة الميكانيكية المثالية IMA لكل آلة عجلة ومحور هي نسبة المسافات المقطوعة.

فبالنسبة للدوّاسة وناقل الحركة فإن:

$$\text{IMA} = \frac{\text{نصف قطر الدواسة}}{\text{نصف قطر ناقل الحركة الأمامي}}$$

وبالنسبة للإطار الخلفي فإن:

$$\text{IMA} = \frac{\text{نصف قطر ناقل الحركة الخلفي}}{\text{نصف قطر الإطار}}$$

وأمّا بالنسبة للدراجة الهوائية، فإن:

$$\text{IMA} = \left(\frac{\text{نصف قطر الدواسة}}{\text{نصف قطر ناقل الحركة الأمامي}}\right)\left(\frac{\text{نصف قطر ناقل الحركة الخلفي}}{\text{نصف قطر الإطار}}\right)$$

$$= \left(\frac{\text{نصف قطر ناقل الحركة الخلفي}}{\text{نصف قطر ناقل الحركة الأمامي}}\right)\left(\frac{\text{نصف قطر الدواسة}}{\text{نصف قطر الإطار}}\right)$$

ولأن ناقلي الحركة يستخدمان السلسلة نفسها ولهما حجم المسننات نفسه، فإنك تستطيع

تجربة

العجلة والمحور

يعمل ناقل الحركة في الدراجة الهوائية على مضاعفة المسافة التي تقطعها. فماذا يفعل بالنسبة للقوة؟

1. **ثبت نظام العجلة والمحور على قضيب دعم قوي.**
2. **لف سلكًا طوله 1 m في اتجاه حركة عقارب الساعة حول المحور.**
3. **لف قطعة سلك أخرى طولها 1 m في عكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول العجلة التي لها قطر كبير.**
4. **علّق جسمًا كتلته 500 g من نهاية السلك على العجلة الأكبر.**

تحذير: تجنب سقوط الجسم.

5. **اسحب السلك من المحور إلى أسفل بحيث يرتفع الجسم مسافة 10 cm.**

التحليل والاستنتاج

6. **ماذا لاحظت على القوة التي أثرت بها في السلك الذي في يدك؟**
7. **ماذا لاحظت على المسافة التي تحتاج إليها يدك لرفع الجسم؟ وضح النتائج بدلالة الشغل المبذول على كل من السلكين.**

7. المسافة التي تحركتها يدي أكبر من المسافة التي ارتفعها الجسم. الشغل المبذول (القوة × مسافة حركة اليد) يساوي تقريبًا الشغل الناتج (الوزن × مسافة ارتفاع الجسم)، مع إهمال الاحتكاك.

حساب عدد المسننات لإيجاد (IMA) على النحو الآتي:

$$IMA=\left(\frac{\text{طول ذراع الدواسة}}{\text{نصف قطر الإطار}}\right)\left(\frac{\text{عدد مسننات ناقل الحركة الخلفي}}{\text{عدد مسننات ناقل الحركة الأمامي}}\right)$$

يُعدّ تغيير ناقل الحركة في الدراجة الهوائية طريقة لتعديل نسبة أنصاف أقطار ناقل الحركة للحصول على الفائدة الميكانيكية المطلوبة. فإذا كانت دوّاسة الدراجة الهوائية في أعلى دورتها أو أسفلها، فإن مقدار القوة الرأسية التي تؤثر بها إلى الأسفل ليس مهمًّا؛ فالدوّاسة لن تدور. إن قوة قدمك تكون أكثر فاعلية عندما تؤثر القوة في اتجاه عمودي على ذراع الدوّاسة؛ حيث يكون عندها عزم الدوران أكبر ما يمكن. افترض دائمًا أن القوة المؤثرة في الدوّاسة يكون اتجاهها عموديًّا على ذراعها، أي أنها تعطي أكبر عزم ممكن.

مثال 4

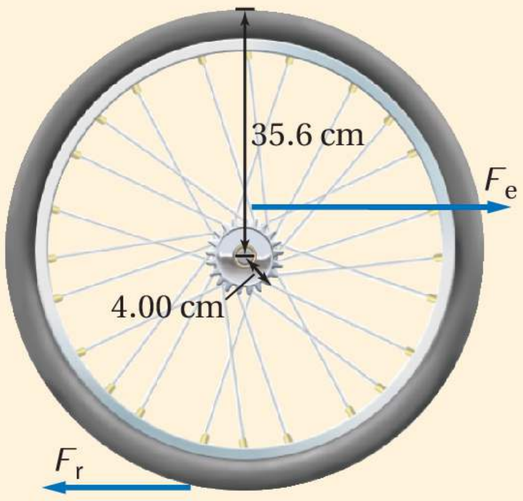
الفائدة الميكانيكية تفحصت الإطار الخلفي لدراجتك الهوائية فوجدت أن نصف قطره 35.6 cm، ونصف قطر ناقل الحركة 4.0 cm، وعندما تسحب السلسلة بقوة مقدارها 155 N فإن حافة الإطار تتحرك مسافة 14.0 cm، فإذا كانت كفاءة هذا الجزء من الدراجة الهوائية 95.0%، فاحسب مقدار:

a. الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) للإطار وناقل الحركة.

b. الفائدة الميكانيكية MA للإطار وناقل الحركة.

c. قوة المقاومة.

d. مسافة سحب السلسلة لتحريك حافة الإطار مسافة 14.0 cm.



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم مخططًا توضيحيًّا للعجلة والمحور.
- ارسم المخطط التوضيحي لمتجهات القوة.

المعلوم

$r_e = 4.00\ \text{cm},\ e = 95.0\ \%$

$r_r = 35.6\ \text{cm},\ d_r = 14.0\ \text{cm}$

$F_e = 155\ \text{N}$

المجهول

$\text{IMA} = ?\quad F_r = ?$

$\text{MA} = ?\quad d_e = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

a. إيجاد الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA).

بالنسبة لآلة العجلة والمحور فإن IMA تساوي نسبة نصفي قطريهما.

عوض مستخدمًا $r_e = 4.00\ \text{cm}$، $r_r = 35.6\ \text{cm}$

$$IMA = \frac{r_e}{r_r} = \frac{4.00\ \text{cm}}{35.6\ \text{cm}} = 0.112$$

b. إيجاد الفائدة الميكانيكية MA.

دليل الرياضيات

فصل المتغير 215

عوض مستخدمًا $\text{IMA} = 0.112$، $e = 95.0\%$

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

$$MA = \left(\frac{e}{100}\right) \times \text{IMA}$$

$$\text{MA} = \left(\frac{95.0}{100}\right) \times 0.112 = 0.106$$

نعم، الوحدات صحيحة. الجواب منطقي؛ فالفائدة الميكانيكية أقل من 1، وهذا يعني أن الآلة تضاعف المسافة والسرعة على حساب القوة، وهو المطلوب في هذا الترس من الدراجة.

c. إيجاد القوة.

24. الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) تقل إلى النصف وتصبح 0.0562. الفائدة الميكانيكية (MA) تقل وتصبح 0.0534. قوة المقاومة (Fr) تقل وتصبح 8.28 نيوتن.

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

$$F_r = [MA]\,[F_e] = [0.106]\,[155\ N] = 16.4\ N$$

عوض مستخدمًا $MA = 0.106$، $F_e = 155\ N$

d. إيجاد المسافة.

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

$$d_e = [IMA]\,[d_r]$$

$$= [0.112]\,[14.0\ cm] = 1.57\ cm$$

عوض مستخدمًا $IMA = 0.112$، $d_r = 14.0\ cm$

25. a. الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) = 1.5 م / 0.20 م = 7.5

b. الفائدة الميكانيكية (MA) = (20 كجم × 9.8 م/ث²) / 1.0 × 10² = 1.96 نيوتن

c. الكفاءة = (MA / IMA) × 100 = 26% × (1.96 / 7.5) = 100

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس القوة بوحدة نيوتن، والمسافة بوحدة السنتمتر.
- **هل الجواب منطقي؟** الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) قليلة للدراجة الهوائية؛ لأنّه في مقابل قوة مسلطة (F_e) كبيرة نحصل على d_r كبيرة. وتكون MA أقل من IMA دائمًا. ولأن MA قليلة فإن F_r ستكون قليلة أيضًا. إن المسافة القليلة التي يتحركها المحور تقابلها مسافة كبيرة يتحركها الإطار، ولذا فإن d_e ينبغي أن تكون قليلة.

مسائل تدريبية

24. إذا تضاعف نصف قطر ناقل الحركة في الدراجة الهوائية في المثال 4، في حين بقيت القوة المؤثرة في السلسلة والمسافة التي تحركتها حافة الإطار دون تغيير، فما الكميات التي تتغير؟ وما مقدار التغير؟

25. تُستخدم مطرقة ثقيلة لطرق إسفين في جذع شجرة لتقسيمه، وعندما ينغرس الإسفين مسافة 0.20 m في الجذع فإنه ينفلق مسافة مقدارها 5.0 cm. إذا علمت أن القوة اللازمة لفلق الجذع هي $1.7 \times 10^4\ N$، وأن المطرقة تؤثر بقوة $1.1 \times 10^4\ N$، فاحسب مقدار:

a. الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) للإسفين.

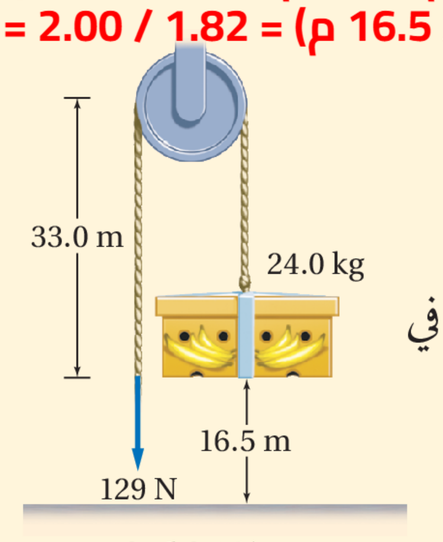
b. الفائدة الميكانيكية (MA) للإسفين.

c. كفاءة الإسفين إذا اعتبرناه آلة.

26. يستخدم عامل نظام بكرة عند رفع صندوق كرتون كتلته 24.0 kg مسافة 16.5 m كما في **الشكل 14–4**. فإذا كان مقدار القوة المؤثرة 129 N وسُحب الحبل مسافة 33.0 m.

a. ما مقدار الفائدة الميكانيكية (MA) لنظام البكرة؟

b. ما مقدار كفاءة النظام؟



الشكل 14–4

27. إذا أثرت بقوة مقدارها 225 N في رافعة لرفع صخرة وزنها $1.25 \times 10^3\ N$ مسافة 13 cm، وكانت كفاءة الرافعة 88.7% فما المسافة التي تحركتها نهاية الرافعة من جهتك؟

28. تتكون رافعة من ذراع نصف قطره 45 cm، يتصل الذراع بأسطوانة نصف قطرها 7.5 cm، ملفوف حولها حبل، ومن الطرف الثاني للحبل يتدلى الثقل المراد رفعه. عندما تدور الذراع دورة واحدة، تدور الأسطوانة دورة واحدة أيضًا.

a. ما مقدار الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) لهذه الآلة؟

b. إذا كانت فاعلية الآلة 75 % فقط نتيجة تأثير قوة الاحتكاك، فما مقدار القوة التي يجب التأثير بها في مقبض الذراع ليؤثر بقوة مقدارها 750 N في الحبل؟

26. a. الفائدة الميكانيكية (MA) = (24.0 كجم × 9.8 م/ث²) / 129 نيوتن = 1.82

b. كفاءة النظام = MA / IMA = 1.82 = (33.0 م / 16.5 م) = 2.00 / 1.82 = 0.910 أو 91.0%

27. الكفاءة = (de / dr) = MA / IMA = (Fr / Fe) = (1.25 × 10³ نيوتن / 225 نيوتن) / (88.7 سم / 13 سم) = 6.82 / 5.56 = 0.815 أو 81.5%

28.

a. الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) = 45 سم / 7.5 سم = 6.0

b. مقدار القوة المؤثرة = Fr / (e × IMA) = 750 نيوتن / (0.75 × 6.0) = 1.7 × 10² نيوتن

دراجة هوائية متعددة نواقل الحركة يستطيع السائق في الدراجة الهوائية المتعددة نواقل الحركة تغيير الفائدة الميكانيكية للآلة، وذلك باختيار الحجم المناسب لأحد ناقلي الحركة أو كليهما. ففي حالة التسارع أو صعود تلة فإن السائق يزيد الفائدة الميكانيكية المثالية لكي يزيد القوة التي يؤثر بها الإطار في الطريق. ولزيادة IMA يحتاج السائق إلى جعل نصف قطر ناقل الحركة الخلفي كبيرًا مقارنة بنصف قطر ناقل الحركة الأمامي (اعتمادًا على معادلة IMA). وهكذا عندما يؤثر السائق بالقوة نفسها يؤثر الإطار في الطريق بقوة أكبر، لكن على السائق أن يدور الدواسة عددًا أكبر من الدورات ليدور الإطار دورة واحدة.

من جهة أخرى، تحتاج قيادة الدراجة الهوائية بسرعة كبيرة على طريق مستوٍ إلى قوة أقل، ولذلك يتوجب على السائق اختيار مجموعة ناقل الحركة، بحيث يكون ناقل الحركة الخلفي صغيرًا وناقل الحركة الأمامي كبيرًا، وفي هذه الحالة تكون الفائدة الميكانيكية المثالية قليلة، أي أنه عندما يؤثر السائق بالقوة نفسها، فإن الإطار يؤثر في الطريق بقوة أقل، لكن لا يحتاج السائق إلى تدوير الدواسات بمقدار كبير لكل دورة واحدة للإطار.

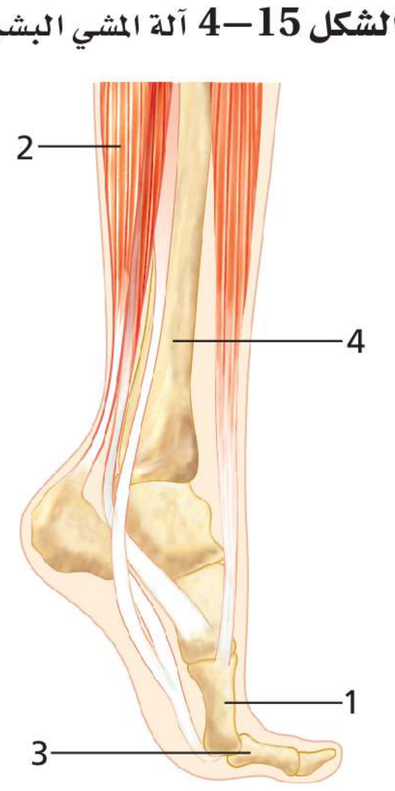
يعمل ناقل الحركة في السيارة بالطريقة السابقة نفسها، فمثلاً تحتاج السيارة إلى قوة كبيرة لتكتسب تسارعًا عندما تبدأ الحركة من السكون، ولتحقيق ذلك يزيد ناقل الحركة من الفائدة الميكانيكية المثالية. أما عندما تكون السيارة متحركة بسرعة عالية فهي تحتاج إلى قوة صغيرة، للمحافظة على سرعتها، لذلك يقلل ناقل الحركة من الفائدة الميكانيكية المثالية. وعلى الرغم من أن عدّاد السرعة يشير إلى سرعة كبيرة، فإن عدّاد الدورات يشير إلى سرعة زاويّة صغيرة للمحرك.

آلة المشي البشرية The Human Walking Machine

يمكن توضيح حركة الجسم البشري بالمبادئ نفسها للقوة والشغل التي تصف كل أنواع الحركة، فجسم الإنسان أيضًا مزود بآلات بسيطة على هيئة رافعات تمنحه القدرة على السير والركض، إلا أن أنظمة الرافعات في جسم الإنسان أكثر تعقيدًا ولكل نظام منها الأجزاءُ الرئيسة الآتية:

1. قضيب صلب (العظام)
2. مصدر قوة (انقباض العضلات)
3. نقطة ارتكاز (المفاصل المتحركة بين العظام)
4. مقاومة (وزن جزء الجسم أو الشيء الذي يتم رفعه أو تحريكه)

يوضح **الشكل 15–4** الأجزاء المكونة لنظام الرافعة في قدم الإنسان. إن قيمة كفاءة النظام للروافع في جسم الإنسان ليست عالية، والفوائد الميكانيكية لها محدودة. وهذا يفسر حاجة الجسم إلى الطاقة (حرق السعرات الحرارية) في حال المشي أو العدو البطيء، ممّا يساعد الناس على تقليل الوزن.



الشكل 15–4 آلة المشي البشرية.

30. البيانات في السؤال متناقضة. بافتراض أن القوة المبذولة تُحسب من الحالة الثانية (آلة مثالية ترفع 875 نيوتن مسافة 1.5 م بتحريك القوة 0.25 م)، فإن Fe = (875 × 1.5) / 0.25 = 5250 نيوتن. باستخدام هذه القوة على الآلة الأولى ذات IMA = 30، فإن أثقل وزن يمكن رفعه هو Fr = 5250 نيوتن × 30 = 1.6 × 10^5 نيوتن.

29. a. مفك براغي: عجلة ومحور (عند التدوير) أو إسفين (عند الفك). b. كماشة: رافعة مزدوجة. c. إزميل: إسفين. d. ذراع باب: عجلة ومحور.

عندما يسير الإنسان يعمل الورك بوصفه نقطة ارتكاز، ويتحرك عظم الورك خلال قوس دائري مركزه القدم، كما يتحرك مركز كتلة الجسم، باعتباره مقاومة، حول نقطة الارتكاز نفسها وعلى القوس نفسه، ويكون نصف قطر القوس الدائري هو طول الرافعة المكونة من عظام الساق. ويسعى الرياضيون في سباقات المشي إلى زيادة سرعتهم، وذلك بأرجحة الورك نحو الأعلى لزيادة نصف القطر.

إن الأشخاص الطوال القامة لديهم أنظمة رافعة فائدتها الميكانيكية أقل من الأشخاص القصار القامة، فعلى الرغم من أن الأشخاص الطوال القامة يستطيعون المشي أسرع من الأشخاص القصار القامة إلا أنه على الشخص الطويل التأثير بقوة أكبر لتحريك الرافعة الطويلة المكوّنة من عظام الساق.

فكيف يكون أداء الشخص الطويل في مسابقة المشي؟ وما العوامل التي تؤثر في أدائه؟ بسبب طول المسافة في سباقات المشي 20 km أو 50 km ،وانخفاض كفاءة أنظمة الرافعة لدى الطوال القامة وطول مضمار المشي؛ لذا تقل لديهم القدرة على الاحتمال والمواصلة للفوز.

تحضيري

2–4 مراجعة

29. **الآلات البسيطة** صنف الأدوات أدناه إلى رافعة، أو عجلة ومحور، أو مستوى مائل، أو إسفين، أو بكرة.

a. مفك براغي
b. كمّاشة
c. إزميل
d. نزّاعة الدبابيس

30. **الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA)** يتفحص عامل نظام بكرات متعددة؛ وذلك لتقدير أكبر جسم يمكن أن يرفعه. فإذا كانت أكبر قوة يمكن للعامل التأثير بها رأسيًّا إلى أسفل مساوية لوزنه 875 N، وعندما يحرك العامل الحبل مسافة 1.5 m فإن الجسم يتحرك مسافة 0.25 m، فما وزن أثقل جسم يمكنه رفعه؟

31. **الآلات المُركّبة** للونش ذراع نصف قطر دورانه 45 cm، يُدوِّر أسطوانة نصف قطرها 7.5 cm خلال مجموعة من نواقل الحركة، بحيث يدور الذراع ثلاث دورات لتدور الأسطوانة دورة واحدة. فما مقدار الفائدة الميكانيكية المثالية (IMA) لهذه الآلة المُركّبة؟

32. **الكفاءة** إذا رفعت كفاءة آلة بسيطة، فهل تزداد الفائدة الميكانيكية (MA)، والفائدة الميكانيكية المثالية (IMA)، أم تنقص، أم تبقى ثابتة؟

33. **التفكير الناقد** تتغير الفائدة الميكانيكية لدراجة هوائية متعددة نواقل الحركة بتحريك السلسلة بحيث تُدوّر ناقل حركة خلفيًّا مناسبًا.

a. عند الانطلاق بالدراجة عليك أن تؤثر في الدراجة بأكبر قوة ممكنة؛ لتكسبها تسارعًا، فهل ينبغي أن تختار ناقل حركة صغيرًا أم كبيرًا؟

b. إذا وصلت إلى مقدار السرعة المناسب وأردت تدوير الدواسة بأقل عدد ممكن من الدورات، فهل تختار ناقل حركة كبيرًا أم صغيرًا؟

c. بعض أنواع الدراجات الهوائية تمنحك فرصة اختيار حجم ناقل الحركة الأمامي. فإذا كنت بحاجة إلى قوة أكبر لتحدث تسارعًا في أثناء صعودك تلًّا، فهل تتحول إلى ناقل الحركة الأمامي الأصغر أم الأكبر؟

33. عند صعود تل، تحتاج إلى قوة أكبر (فائدة ميكانيكية أكبر)، فتستخدم ناقل حركة أصغر في الأمام وأكبر في الخلف. وعندما تصل إلى سرعة مناسبة وتريد الحفاظ عليها بأقل عدد من الدورات، تختار ناقل حركة كبير (كبير في الأمام، صغير في الخلف) للحصول على سرعة أكبر (فائدة ميكانيكية أقل). للحصول على قوة أكبر للتسارع صعودًا، تتحول إلى ناقل الحركة الأمامي الأصغر.

32. تزداد الكفاءة، لأن الكفاءة تساوي حاصل قسمة الفائدة الميكانيكية على الفائدة الميكانيكية المثالية (e = MA/IMA).

31. الفائدة الميكانيكية المثالية = نصف قطر ذراع التدوير / نصف قطر الأسطوانة = 45 سم / 7.5 سم = 6.0

1. إذا أسقطت الكرة من ارتفاع 0.0 m فإنها لن ترتد، أي أن ارتفاع الارتداد سيكون 0.0 m. العوامل المؤثرة في طاقة الكرة عندما ترتفع وتتهيأ للسقوط هي كتلتها وتسارع الجاذبية والارتفاع الذي تصل إليه.

2. لأن جزءًا من طاقة الكرة يتحول إلى طاقة حرارية وطاقة صوتية عند اصطدامها بالأرض، مما يقلل من الطاقة المتاحة للارتداد. هذا الفقد في الطاقة يمنعها من العودة إلى ارتفاعها الأصلي.

تجربة استهلالية

كيف تحلّل طاقة كرة السلة المرتدة؟

سؤال التجربة ما العلاقة بين الارتفاع الذي تسقط منه كرة السلة والارتفاع الذي تصل إليه عندما ترتد إلى أعلى؟

الخطوات

1. ثبت مسطرة مترية بجانب الحائط، ثم اختر ارتفاعًا ابتدائيًّا لتسقط منه كرة سلة، وسجل الارتفاع في جدول البيانات.
2. أسقط الكرة، ثم سجل الارتفاع الذي ترتد إليه.
3. كرّر الخطوتين 1 و 2 بإسقاط الكرة من ثلاثة ارتفاعات مختلفة.
4. **ارسم رسومًا بيانية واستخدمها** مثّل بيانيًّا العلاقة بين الارتفاع الذي ترتد إليه الكرة (y) والارتفاع الذي سقطت منه (x)، ثم ارسم أفضل خط يوائم البيانات.

التحليل

استخدم الرسم البياني لإيجاد الارتفاع الذي ترتد إليه الكرة إذا أسقطت من ارتفاع 10.0 m.

عندما ترتفع الكرة وتتهيأ للسقوط يكون لها طاقة، فما العوامل المؤثرة في هذه الطاقة؟

التفكير الناقد لماذا لا ترتد الكرة إلى الارتفاع نفسه الذي سقطت منه؟

تحضيري

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

1–5 الأشكال المتعددة للطاقة The Many Forms of Energy

تُستخدم كلمة طاقة في سياقات مختلفة في حديثنا اليومي؛ فمثلاً تعرض بعض الإعلانات التجارية أنواعًا من الأغذية باعتبارها مصادر للطاقة، ويستخدم الرياضيون كلمة الطاقة في حديثهم عن التمارين الرياضية، كما تُسمى الشركات التي تزود منزلك بالكهرباء والغاز الطبيعي أو وقود التدفئة بشركات الطاقة.

غير أن العلماء والمهندسين يستخدمون كلمة الطاقة بصورة أكثر تحديدًا. فكما تعلمت سابقًا يسبب الشغل تغيرًا في طاقة النظام؛ أيْ أن الشغل ينقل الطاقة بين النظام والمحيط الخارجي.

وستتعرف في هذا الفصل كيف يمتلك الجسم الطاقة بطرائق مختلفة، وكيف تتحول الطاقة من شكل إلى آخر، وكيف نتتبّع هذه التغيرات.

الأهداف

- **تستخدم** نموذجًا لتربط بين الشغل والطاقة.
- **تحسب** الطاقة الحركية.
- **تحدد** طاقة الوضع الجاذبية لنظام ما.
- **تبيّن** كيفية تخزين طاقة الوضع المرونية.

المفردات

طاقة الحركة الدورانية

طاقة الوضع الجاذبية

مستوى الإسناد

طاقة الوضع المرونية

تحضيري

نموذج لنظرية الشغل – الطاقة
A model of the Work – Energy Theorem

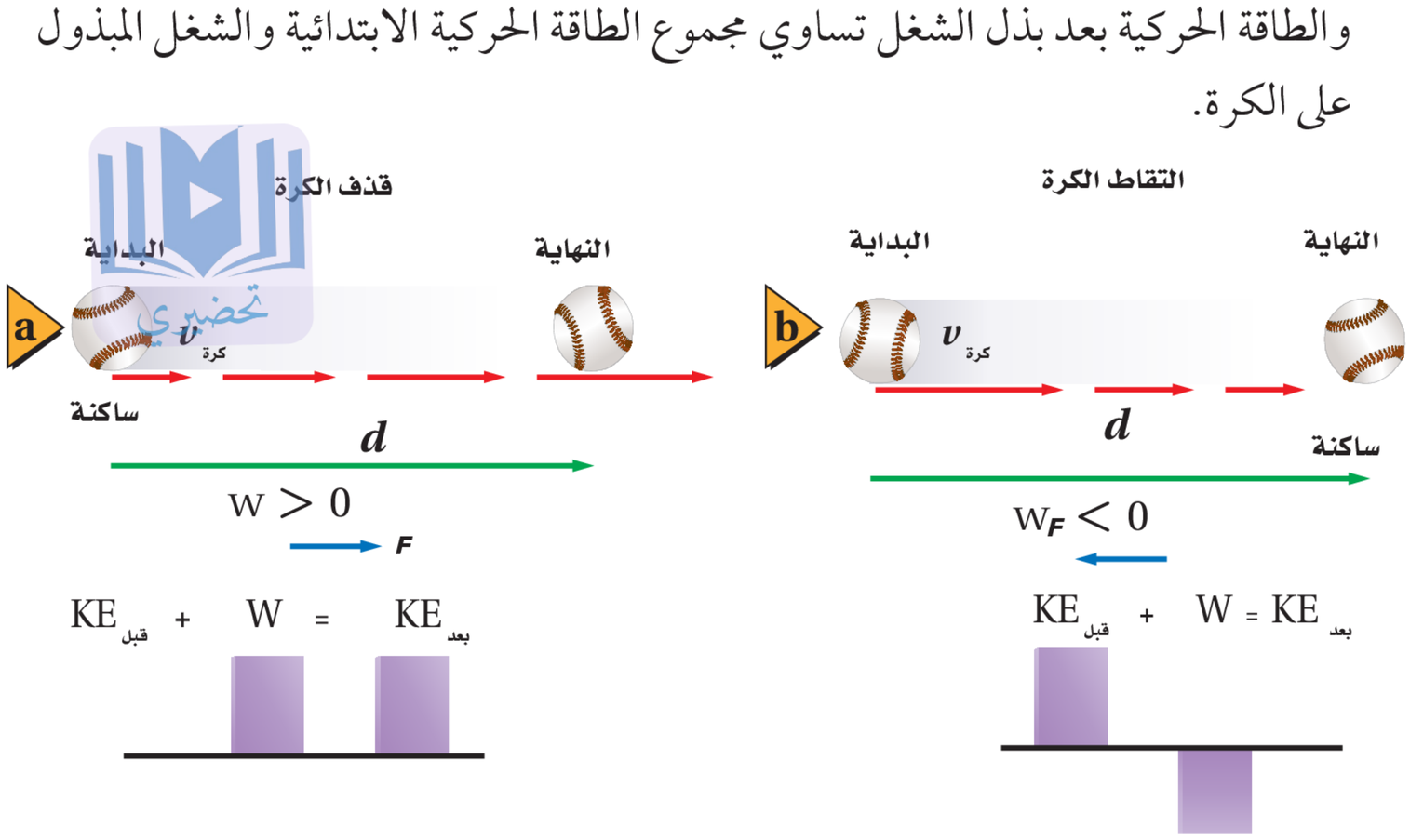
تعرّفت سابقًا نظرية الشغل – الطاقة، وتعلمت أنه عندما يُبذل شغلٌ على نظام معين تزداد طاقته، ومن جهة أخرى إذا بَذل النظامُ شـــغلاً تقل طاقته، وهذه هي فكرة الدرس بصورة عامة، ولكن تتبُّع الطاقة يشبه إلى حد كبير تتبُّع إنفاق المال.

فإذا كان لديك وظيفة فإن كمية المال التي تمتلكها تزداد في كل مرة تستلم فيها راتبك.

ويمكن تمثيل هذه العملية بيانيًّا بالأعمدة، كما في **الشكل 1a–5**، حيث يمثل العمود البرتقالي مقدار المال الذي بدأت به، ويمثل العمود الأزرق مقدار المال الذي دفعته أو اكتسبته، أما العمود الأخضر فيمثل المجموع الكلي للمال (بعد الدفع) سواء الذي دفعته أو كسبته. لاحظ أن المحاســـب يعتبر التدفق المالي لديك موجبًا إذا دُفع المال لك، أما إذا أنفقت المال الذي تمتلكه فسيكون التدفق المالي سالبًا، وبذلك يقل مجموع النقود الكلي، كما في **الشكل 1b–5**. فالعمود الذي يمثل مقدار المال الذي تمتلكه قبل أن تشتري قرصًا مدمجًا (CD) لحاسوبك أعلى من العمود الذي يمثل مقدار المال المتبقي بعد شراء ذلك القرص، والفرق يســـاوي تكلفة القرص. والتدفق المالي في هذه الحالة يبينه العمود أسفل المحور؛ لأنه يمثل المال الخارج ويكون سالبًا. والطاقة تشبه عملية صرفك للمال. فالطاقة إما أن يبذلها النظام أو تبذل عليه.

الشكل 1–5 عندما تكسب مالاً يزيد مقدار المال لديك (a)، وعندما تصرف المال يقل مقداره لديك (b).

قذف الكرة يمكن أن نبين كســـب الطاقة أو فقدها بقذف الكرة والتقاطها. تعلمت سابقًا أنه إذا أثرت بقوة ثابتة F في جسم، فتحرك هذا الجسم مسافة d في اتجاه القوة فإنك تكون قد بذلت شـــغلاً يُعبر عنه بالعلاقة $W = Fd$، ويكون الشغل موجبًا لأن القوة والحركة في الاتجاه نفسه، كما أن طاقة الجسم ازدادت بمقدار يساوي الشغل نفسه W. افترض أن هذا الجســـم كرة، وأثرت فيها بقوة وحركتها أفقيًّا، فاكتســـبت الكرة طاقة حركية نتيجة لتأثير القوة، و**الشكل 2a–5** يمثل هذه العملية. كما يمكنك استخدام التمثيل البياني بالأعمدة لتوضيح هذه العملية، حيث يمثل ارتفاع العمود مقدار الشغل المبذول أو الطاقة بالجول. والطاقة الحركية بعد بذل الشغل تساوي مجموع الطاقة الحركية الابتدائية والشغل المبذول على الكرة.



الشكل 2–5 الطاقة الحركية بعد قذف الكرة أو التقاطها تساوي الطاقة الحركية قبل عملية القذف أو الالتقاط+ الشغل المبذول.

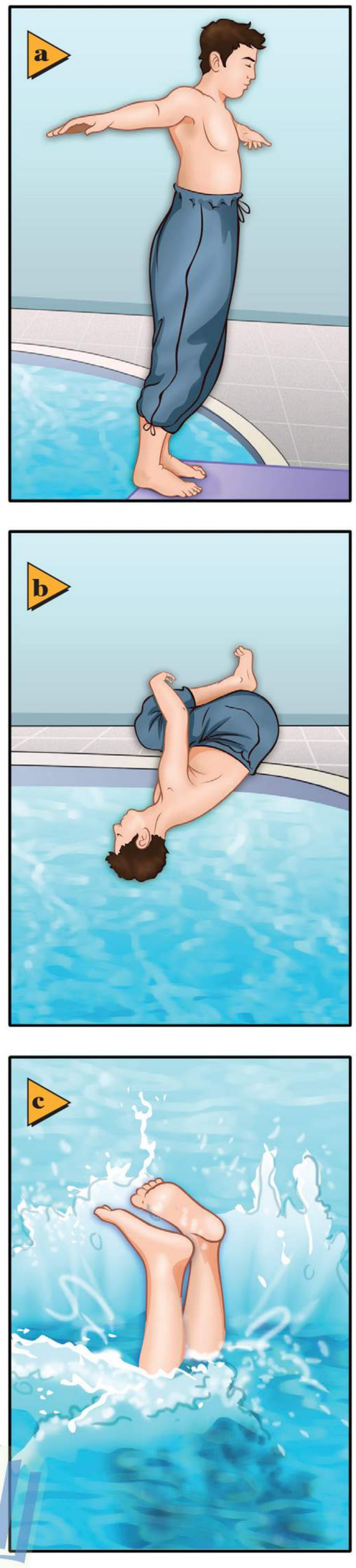
التقاط الكرة ماذا يحدث عندما تلتقط الكرة؟ لقد كانت الكرة تتحرك، ولها طاقة حركية قبل أن ترتطم بيدك. وعندما تلتقطها تؤثر فيها بقوة في الاتجاه المعاكس لاتجاه حركتها، لذا فإنك تبذل عليها شغلاً سالبًا، مما يجعلها تتوقف، لتصبح طاقتها الحركية في النهاية صفرًا. وهذه العملية ممثلة في **الشكل 2b–5**. لاحظ أن الطاقة الحركية موجبة دائمًا، ففي حالة التقاط الكرة مثلا، كانت الطاقة الحركية الابتدائية للكرة موجبة، والشغل المبذول على الكرة سالبًا، والطاقة الحركية النهائية صفرًا. مرة أخرى فإن الطاقة الحركية بعد توقف الكرة هي مجموع الطاقة الحركية الابتدائية والشغل الذي بُذل على الكرة.

الطاقة الحركية Kinetic Energy

تذكّر أن الطاقة الحركية يعبر عنها بالعلاقة الآتية: $KE=\frac{1}{2}mv^2$ حيث m كتلة الجسم، و v مقدار سرعة الجسم. وتتناسب الطاقة الحركية طرديًّا مع كتلة الجسم. فكرة حديدية مثلاً كتلتها 7.26 kg مقذوفة في الهواء لها طاقة حركية أكبر مما لكرة بيسبول كتلتها 0.148 kg لها السرعة نفسها؛ لأن كتلة الكرة الحديدية أكبر. كما تتناسب الطاقة الحركية لجسم طرديًّا مع مربع سرعته؛ فالطاقة الحركية لسيارة تتحرك بسرعة 20 m /s تعادل أربعة أضعاف الطاقة الحركية لسيارة مماثلة لها في الكتلة تتحرك بسرعة 10 m /s. وهناك أيضًا طاقة حركية ناتجة عن الحركة الدورانية، فإذا دوّرنا لعبة البلبل مثلاً مع الحفاظ على مركز كتلتها في نقطة محددة، فهل تكون له طاقة حركية؟ لعلك تعتقد أنه لا يوجد طاقة حركية للبلبل لأنه لم ينتقل قاطعًا أي مسافة، ولكن حتى تجعل البلبل يدور لا بد أن تبذل عليه شغلاً، لذا لابد أن يكون للبلبل **طاقة حركية دورانية**، وهذا نوع آخر من أنواع الطاقة المختلفة. وكما تعتمد الطاقة الحركية الخطية على سرعة الجسم تعتمد الطاقة الحركية الدورانية على السرعة الزاوية ω. ومن جهة أخرى فالطاقة الحركية الدورانية لا ترتبط بكتلة الجسم فقط وإنما بتوزيع هذه الكتلة أيضًا.

يمثل **الشكل 3a–5** غطّاسًا يقف على لوح الغطس، حيث يبذل شغلاً عندما يدفع لوح الغطس بقدميه إلى الأسفل، فيولد هذا الشغل طاقة حركية خطية وأخرى دورانية؛ حيث تتولد طاقة الحركة الخطية عندما يتحرك مركز كتلة الغطاس في أثناء الوثبة، أما طاقة الحركة الدورانية فتتولد عندما يدور حول مركز كتلته، كما في **الشكل 3b–5**، ولأن الغطاس يتحرك نحو الماء وفي الوقت نفسه يدور حول مركز كتلته، بينما هو في وضع الانثناء (القرفصاء)، فإن له طاقة حركية خطية وطاقة حركية دورانية. أما عندما يدخل الغطاس الماء بقامة مفرودة – كما في **الشكل 3c–5** – فإن طاقته الحركية تظهر على شكل طاقة حركية خطية.

■ **الشكل 3–5** يبذل الغطّاس شغلاً عندما يدفع لوح الغطس إلى أسفل ويثِب عنه إلى أعلى (a)، ويتحول جزء من طاقته الحركية المتولدة عن الشغل إلى طاقة حركية دورانية عندما يدور حول مركز كتلته (b)، ويكون له طاقة حركية خطية عندما يدخل إلى الماء (c).



تحضيري

1. الشغل المبذول لإيقاف المتزلج يساوي التغير في طاقته الحركية. $W = \Delta KE = 0 - \frac{1}{2}mv^2 = -\frac{1}{2}(52.0\ kg)(2.5\ m/s)^2 = -1.6 \times 10^2\ J$.

2. الطاقة الحركية الابتدائية: $KEi = \frac{1}{2}(875.0\ kg)(22.0\ m/s)^2 = 2.12 \times 10^5\ J$. الطاقة الحركية النهائية: $KEf = \frac{1}{2}(875.0\ kg)(44.0\ m/s)^2 = 8.47 \times 10^5\ J$. الشغل المبذول: $W = \Delta KE = KEf - KEi = 6.35 \times 10^5\ J$.

مسائل تدريبية

1. يتحـرك متزلج كتلته 52.0 kg بسرعة 2.5 m/s ، ويتوقف خلال مسـافة 24.0 m ما مقدار الشغل المبذول بفعل الاحتكاك مع الجليد لجعل المتزلج يتوقف؟ وما مقدار الشـغل الذي يجب على المتزلج أن يبذله ليصل إلى سرعة 2.5 m/s مرة أخرى؟
2. سيارة صغيرة كتلتها 875.0 kg زادت سرعتها من 22.0 m/s إلى 44.0 m/s عندما تجاوزت سيارة أخرى، فما مقدارا طاقتي حركتها الابتدائية والنهائية؟ وما مقدار الشغل المبذول على السيارة لزيادة سرعتها؟
3. ضرب مذنب كتلته $7.85 \times 10^{11}\ kg$ الأرض بسرعة 25.0 km/s. جد الطاقة الحركية للمذنب بوحدة الجول، وقارن بين الشغل المبذول من الأرض لإيقاف المذنب والمقدار $4.2 \times 10^{15}\ J$ والذي يمثل الطاقة الناتجة عن أكبر سلاح نووي على الأرض.

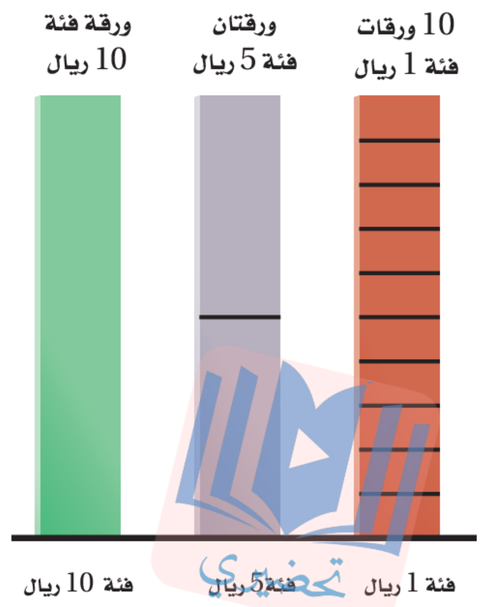
الطاقة المختزنة Stored Energy

تأمّل مجموعة من القطع الصخرية في أعلى تل؛ لابد أن هذه الصخور رُفعت إلى أعلى نتيجة عمليات جيولوجية ضد قوة الجاذبية الأرضية، ونتيجة للشغل المبذول على الصخور فقد اختُزِنت فيها طاقة، وعند حدوث الانزلاقات تصبح الصخور أقل تماسـكًا مع الوسـط المحيط بها مما يسـمح لها بالتسـاقط، وتتزايد سرعتها في أثناء السقوط بفعل تحول الطاقة المختزنة فيها إلى طاقة حركية.

والألعاب التي تعمل بشد النابض تخزن طاقة في النابض المشدود بالطريقة نفسها. ويعتبر اختـزان الطاقة في الصخـور وفي النوابض أمثلة على اختران الطاقـة بطرائق ميكانيكية، وهناك طرائق أخرى لاختزان الطاقة، فمثلاً، تختزن السيارة الطاقة في صورة طاقة كيميائية في خـزان البنزين. وعمومًا تتحول الطاقة من شـكل إلى آخر لتكون مفيدة، أو لتسـبب حركة الأشياء.

كيف يوضح نموذج المال الذي نوقش مؤخرا تحولات الطاقة من شكل إلى آخر؟ يأتي المال أيضا بأشـكال مختلفة؛ إذ يمكن أن يكون لديك ورقة نقدية من فئة 10ريالات، أو ورقتان من فئة 5 ريالات، أو عشر ورقات من فئة ريال واحد. وفي جميع الحالات سـيكون معك عشرة ريالات، فاختلاف أشكال الأوراق النقدية لم يغير من قيمتها الكلية، ويمكن تمثيل ذلك برسـم بياني بالأعمدة، كما في **الشكل 4–5**؛ حيث يبين ارتفاع العمود مقدار المال في كل حالة. وبالمثل يمكن اسـتخدام الرسم البياني بالأعمدة لتمثيل كمية الطاقة في أوضاع مختلفة للنظام وبالطريقة نفسها.

■ **الشـكل 4–5** يبين فئات نقدية مختلفة: 1ريال، 5ريال، 10ريالات.



طاقة الوضع الجاذبية
Gravitational Potential Energy

انظــر إلى الكرات المقذوفة في الهواء في **الشــكل 5–5**؛ إذا اعتبرنا أن النظام يتكون من كرة واحدة، فســيكون هناك عدة قوى خارجية تؤثر فيها؛ حيــث تبذل قوة يد اللاعب الذي يقذفها شــغلاً يعطي الكرة طاقة حركية ابتدائية. وبعد أن تخرج الكرة من يد اللاعب تتأثر بقوة الجاذبية الأرضية فقط، فما مقدار الشــغل المبذول من قوة الجاذبية على الكرة في أثناء تغير ارتفاعها؟

الشـغل الـذي تبذله قوة الجاذبيـة الأرضيـة تقع الكرة تحت تأثير قوة الجاذبية F_g في أثناء صعودها إلى أعلى، وبذلك فإن اتجاه إزاحتها (إلى أعلى) يكون معاكسًــا لاتجاه تأثير القوة عليها (أسفل)، أي أن الشغل الذي تبذله قوة الجاذبية الأرضية على الكرة في أثناء صعودها هو شــغل سالب، وإذا كان h هو الارتفاع الذي تصل إليه الكرة فوق يد اللاعب فيمكن التعبير عن شغل الجاذبية بالمعادلة الآتية: $W_g = -mgh$، وأمّا في طريق العودة (السقوط) إلى أســفل فإن قوة الجاذبية والإزاحة تكونان في الاتجاه نفســه، وعندئذ يكون شغل قوة الجاذبية الأرضية موجبًا $W_g = mgh$؛ أثناء صعود الكرة تبذل الجاذبية شــغلاً سالبًا يبطئ سرعة الكرة حتى تتوقف. وفي أثناء السقوط تبذل قوة الجاذبية الأرضية شغلاً موجبًا يزيد من سرعتها. لذا فإنّه يزيد من طاقتها الحركية؛ أيْ تستعيد الكرة طاقتها الحركية الابتدائية التي كانت فيها لحظــة قذفها من يد اللاعب إلى أعــلى. وكأن الطاقة الحركية اختزنت في الكرة بشــكل آخر من أشــكال الطاقة عندما ارتفعت إلى أعلى، ثم تحولت ثانية إلى طاقة حركية عندما سقطت إلى أسفل.

الشـكل 5–5 تتغير طاقة وضع الكرة وطاقتها الحركية باستمرار عند قذفها إلى أعلى كما يفعل اللاعب.

لنأخذ نظامًا مكونًا من جسم ما والأرض، حيث تبذل قوة التجاذب بين الجسم والأرض شــغلًا على الجسم ما دام الجســم يتحرك، فإذا تحرك الجســم بعيدًا عن الأرض اختُزنت في النظام طاقة نتيجة تأثير قوة الجاذبية بين الجســم والأرض، وتســمى هذه الطاقة **طاقة الوضع الجاذبية**، ويرمز لها بالرمز PE. ويُحدَّد الارتفاع الذي يصل إليه الجســم باستخدام **مستوى الإسناد**، وهو المستوى الذي تكون طاقة الوضع PE عنده صفرًا. فإذا كانت كتلة الجسم m، وارتفاع الجسم الرأسي عن مستوى الإسناد h، فإن طاقة الوضع الجاذبية يعبر عنها بالعلاقة:

طاقة الوضع الجاذبية

$$PE = mgh$$

طاقة الوضع الجاذبية الأرضية لجسم ما تساوي حاصل ضرب كتلته في تسارع الجاذبية الأرضية في ارتفاعه الرأسي عن مستوى الإسناد.

تمثل g تســارعَ الجاذبية الأرضية، وتقاس طاقة الوضع كــما تقاس الطاقة الحركية بوحدة الجول.

تطبيق الفيزياء

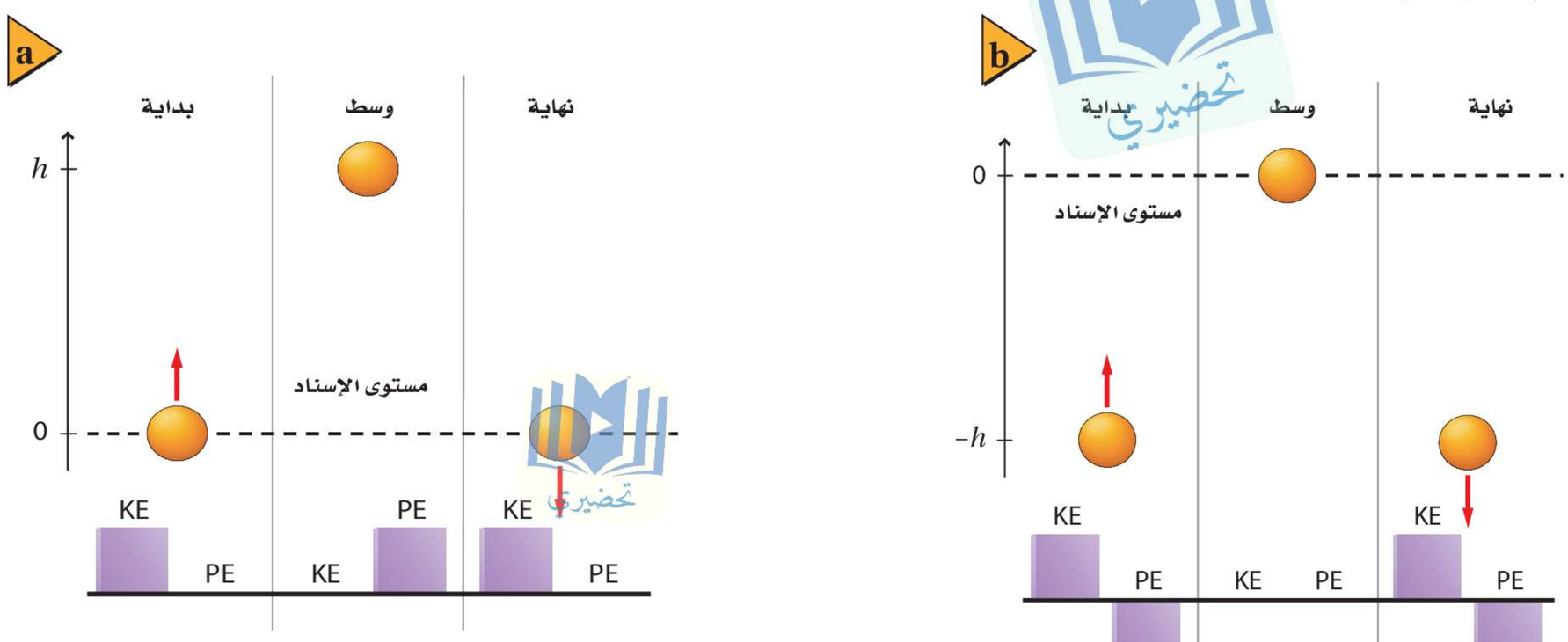
طاقة وضع الذرة

من المثير للاهتمام معرفة المقادير النسبية لطاقة الوضع لكل ذرة. فعلى سبيل المثال كتلة ذرة الكربون 2×10^{-26} kg؛ وإذا رفعتها مسافة 1 m فوق سطح الأرض تصبح طاقة الوضع الجاذبية لها 2×10^{-25} J، وطاقة الوضع الكهرسكونية التي تُبقي الإلكترون مرتبطًا مع ذرته تساوي 10^{-19} J تقريبًا، وطاقة الوضع النووية التي تربط مكونات النواة أكبر من 10^{-12} J، أيْ أن طاقة الوضع النووية أكبر مليون مليون مرة على الأقل من طاقة الوضع الجاذبية.

طاقة الحركة وطاقة الوضع لنظام لنأخذ حالة الكرة التي تقذف إلى أعلى ثم تعاود الهبوط، والتي سبق طرحها: يتكون النظام في هذه الحالة من الكرة والأرض، وتوجد الطاقة في النظام على شكل طاقة حركية، وطاقة وضع جاذبية. وعند بداية قذف الكرة فإن طاقة النظام تتخذ شكل الطاقة الحركية، كما في **الشكل 6a–5**، وفي أثناء صعود الكرة إلى أعلى تتحول الطاقة الحركية تدريجيًّا إلى طاقة وضع، حيث تصبح سرعة الكرة صفرًا عندما تبلغ أقصى ارتفاع لها، وعندئذٍ تصبح الطاقة كلها طاقة وضع جاذبية فقط، وفي أثناء السقوط تتحول طاقة الوضع الجاذبية إلى طاقة حركية. ويبقى مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع الجاذبية ثابتًا في جميع الأوقات؛ لأنه لم يُبذل شغل على النظام من قوة خارجية.

مستوى الإسناد تعدّ يد اللاعب الذي يقذف الكرة، ويتلقفها، هي مستوى الإسناد الذي يقاس منه ارتفاع الكرة، انظر **الشكل 6a–5**، ولذلك عندما تكون الكرة عند يد اللاعب فإن $h = 0\ \text{m}$ و $\text{PE} = 0\ \text{J}$، ويمكن أخذ مستوى الإسناد عند أي ارتفاع مناسب في أثناء حل المسألة. فلو افترضنا أننا أخذنا مستوى الإسناد عند أقصى ارتفاع للكرة، فعندئذ تكون $h=0\ \text{m}$، وطاقة الوضع للنظام $\text{PE} = 0\ \text{J}$ عند هذه النقطة كما في **الشكل 6b–5**، وتكون طاقة الوضع للنظام سالبة عند بداية قذف الكرة إلى أعلى.

أما عند حساب المجموع الكلي للطاقة في النظام فستكون النتيجة كما في **الشكل 6a–5** مختلفة عن المجموع الكلي للطاقة في النظام في **الشكل 6b–5**، ويعود هذا إلى اختلاف مستوى الإسناد في الحالتين. لكن المجموع الكلي لطاقة النظام يبقى مقدارًا ثابتًا في جميع الأوقات خلال تحليق الكرة، وإن كانت قيمة المقدار الثابت تختلف باختلاف مستوى الإسناد في كل حالة. من جهة أخرى فإن تغيرات الطاقة هي وحدها التي تحدد حركة النظام.



الشكل 6–5 تتحوّل طاقة الكرة من شكل إلى آخر في أثناء مراحل تحليقها المختلفة (a)، لاحظ أنه يمكن اختيار مستوى الإسناد بشكل عشوائي. وعلى الرغم من تغير المجموع الكلي للطاقة في النظام بتغير مستوى الإسناد إلا أن المجموع الكلي لطاقة النظام يبقى ثابتًا طوال مراحل التحليق (ما دام مستوى الإسناد محددًا) (b).

تحضيري

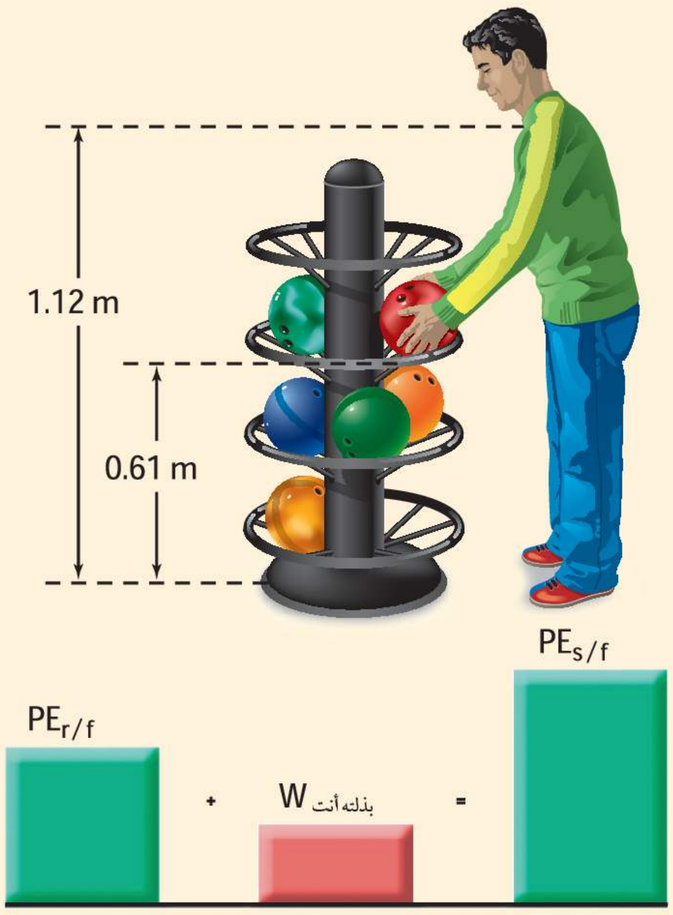
مثـــــال 1

طاقة الوضع الجاذبية إذا رفعت كرة بولنج كتلتها 7.30 kg من سلة الكرات إلى مستوى كتفك، وكان ارتفاع سلة الكرات عن سطح الأرض 0.610 m، وارتفاع كتفك عن سطح الأرض 1.12 m، فما مقدار:

a. طاقة الوضع الجاذبية لكرة البولنج وهي على كتفك بالنسبة إلى سطح الأرض؟

b. طاقة الوضع الجاذبية لكرة بولنج على كتفك بالنسبة إلى سلة الكرات؟

c. شغل الجاذبية عندما ترتفع الكرة من السلة إلى مستوى كتفك؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم مخطّطًا للحالة.
- اختر مستوى إسناد.
- ارسم أعمدة بيانية بين طاقة الوضع الجاذبية على اعتبار أن سطح الأرض هو مستوى الإسناد.
- يرمز الحرف s إلى الكتف، والحرف r إلى السلة، والحرف f إلى الأرض.

المعلوم	المجهول
$m = 7.30\ \text{kg}$ ، $g = 9.80\ \text{m/s}^2$	$PE_{s/f} = ?$
نسبة إلى سطح الأرض $h_r = 0.610\ \text{m}$	$PE_{s/r} = ?$
نسبة إلى سطح الأرض $h_s = 1.12\ \text{m}$	

2 إيجاد الكمية المجهولة

a. اختر مستوى الاسناد عند سطح الأرض.

جد طاقة الوضع الجاذبية للكرة عند مستوى الكتف.

عوض مستخدمًا $m = 7.30\ \text{kg}, g = 9.80\ \text{m/s}^2$
$h = 1.12\text{m}$

$$PE_{s/f} = mgh_s$$
$$= (7.30\ \text{kg})\ (9.80\ \text{m/s}^2)\ (1.12\ \text{m})$$
$$= 80.1\ \text{J}$$

b. افترض أن مستوى الإسناد هو سلة الكرات.

جد ارتفاع كتفك بالنسبة إلى سلة الكرات

$$h = h_s - h_r$$

دليل الرياضيات

ترتيب العمليات213

جد طاقة وضع الكرة.

عوض مستخدمًا $m = 7.30\ \text{kg}, g = 9.80\ \text{m/s}^2$
$h_s = 1.12\ \text{m}, h_r = 0.610\ \text{m}$

$$PE_{s/r} = mgh$$
$$= mg(h_s - h_r)$$
$$= (7.30\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)(1.12\ \text{m} - 0.610\ \text{m})$$
$$= 36.5\ \text{J}$$

وهذا يساوي الشغل الذي تبذله أنت.

تحضيري

c. الشغل المبذول من الجاذبية هو وزن الكرة مضروبًا في الارتفاع الذي وصلت إليه.

بما أن اتجاه الوزن معاكس لاتجاه حركة الكرة، فإن الشغل يكون سالبًا.

$$W = Fd$$
$$= -(mg)h$$
$$= -(mg)\,(h_s - h_r)$$
$$= -(7.30\,\text{kg})\,(9.80\,\text{m/s}^2)(1.12\,\text{m} - 0.610\,\text{m})$$
$$= -36.5\,\text{J}$$

عوض مستخدمًا $m = 7.30\ \text{kg}, g = 9.80\ \text{m/s}^2$

$h_s = 1.12\ \text{m}\ ,\ h_r = 0.610\ \text{m}$

- نعم، الوحدات صحيحة. تقاس كل من طاقة الوضع والشغل بوحدة الجول (J).

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** طاقة الوضع والشغل كلاهما يُقاس بوحدة الجول.
- **هل القيمة منطقية؟** يجب أن يكون للكرة طاقة وضع أكبر بالنسبة لسطح الأرض، مقارنة بطاقتها بالنسبة لسلة الكرات؛ لأن ارتفاع الكرة فوق مستوى الإسناد أكبر.

- نعم، القيمة منطقية. يجب أن تكون طاقة وضع الكرة أكبر بالنسبة لسطح الأرض مقارنة بطاقتها بالنسبة لسلة الكرات؛ لأن ارتفاع الكرة فوق الأرض أكبر من ارتفاعها فوق السلة.

مسائل تدريبية

4. ما مقدار طاقة الوضع لكرة البولنج في المثال 1، عندما تكون على سطح الأرض، على اعتبار مستوى الإسناد عند سلة الكرات؟

5. احسب الشغل الذي تبذله عندما تُنزل بتمهلٍ كيسَ رمل كتلته 20.0 kg مسافة 1.20 m من شاحنة إلى الرصيف؟

6. رفع طالب كتابًا كتلته 2.2 kg من فوق سطح طاولة ارتفاعها عن سطح الأرض 0.80 m ، ثم وضعه على رف الكتب الذي يرتفع عن سطح الأرض مسافة 2.10 m. ما مقدار طاقة الوضع للكتاب بالنسبة إلى سطح الطاولة؟

7. إذا سقطت قطعة طوب كتلتها 1.8 kg من مدخنة ارتفاعها 6.7 m إلى سطح الأرض، فما مقدار التغير في طاقة وضعها؟

8. رفع عامل صندوقًا كتلته 10.0 kg من الأرض إلى سطح طاولة ارتفاعها 1.1 m، ثم دفع الصندوق على سطح الطاولة مسافة 5.0 m، ثم أسقطه على الأرض. ما التغيرات في طاقة الصندوق؟ وما مقدار التغير في طاقته الكلية؟ (أهمل الاحتكاك)

.PE = mgh = (7.30 kg)(9.80 m/s²)(0.610 m) = 43.6 J .4

.W = ΔPE = mgh = (20.0 kg)(9.80 m/s²)(1.20 m) = 235 J .5

.PE = mgh = (2.2 kg)(9.80 m/s²)(2.10 m) = 45 J .6

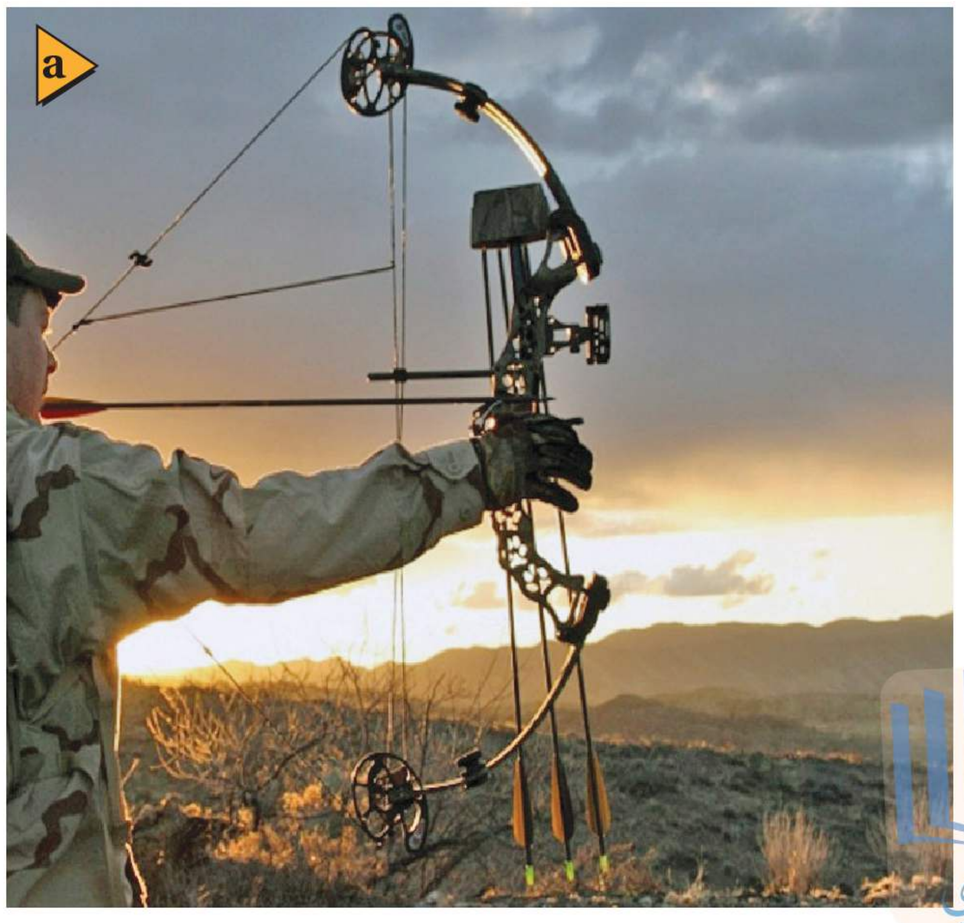
.ΔPE = mg(hf - hi) = (1.8 kg)(9.80 m/s²)(0 m - 6.7 m) = -1.2 × 10² J .7

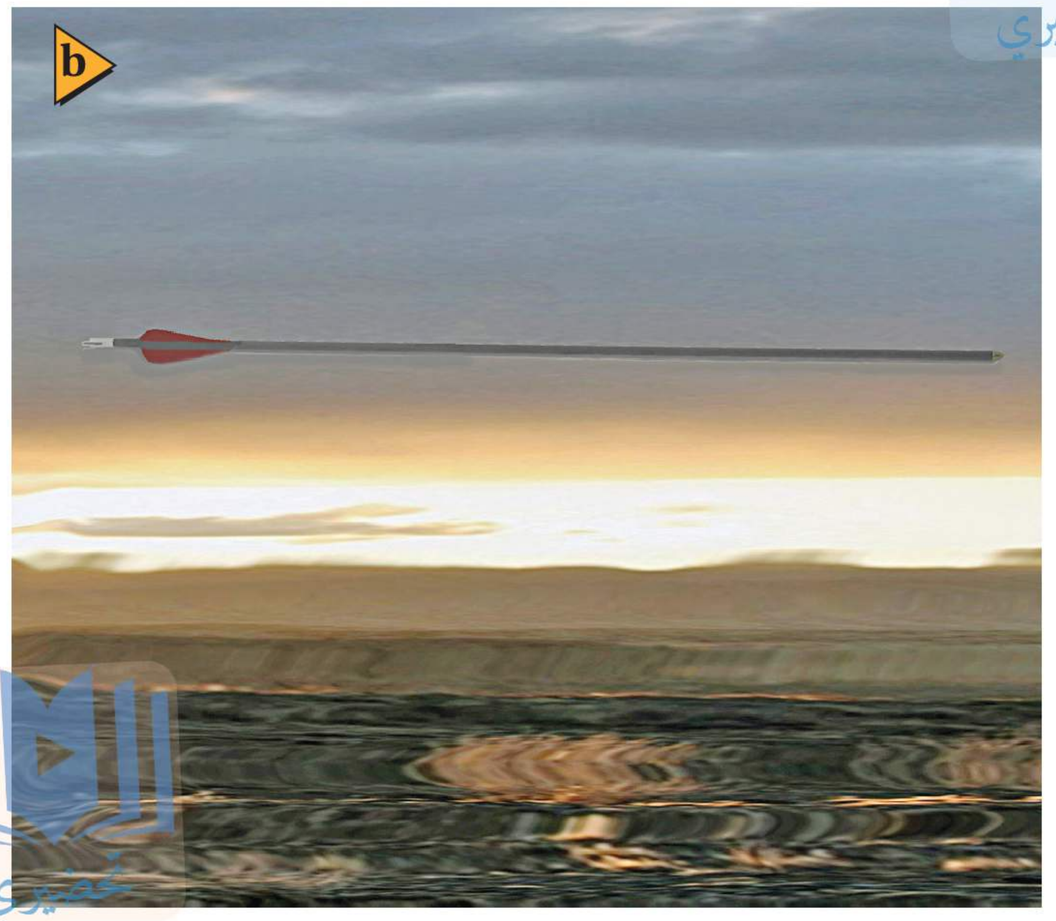
8. التغير الكلي في طاقة الوضع هو الفرق بين طاقة الوضع النهائية (على الأرض) والابتدائية (على الطاولة). ΔPE = mg(hf - hi) = (10.0 kg)(9.80 m/s²)(0 m - 1.1 m) = -1.1 × 10² J.

طاقة الوضع المرونية Elastic Potential Energy

عند سحب وتر كما في **الشكل 5–7a** يبذل شغل على القوس، مما يخزن طاقة فيه، لذا تزداد طاقة النظام المكوّن من القوس والسهم والأرض. وتسمى الطاقة المختزنة في الوتر المشدود **طاقة وضع مرونية**، والتي تُختزن عادة في كرات المطاط، والأربطة المطاطية، والمقاليع، ومنصات القفز. وعند إفلات الوتر يندفع السهم إلى الأمام وتتحول طاقته إلى طاقة حركية. كما في الشكل 5–7b .

■ **الشكل 7–5** تختزن طاقة الوضع المرونية في وتر القوس، حيث تتخذ الطاقة كلها شكل طاقة الوضع المرونية قبل إفلات الوتر(a). أما عند إفلات الوتر فتنتقل الطاقة إلى السهم على شكل طاقة حركية (b).





وتختزن الطاقة أيضًا في الجسم المثني أو المحني. ففي لعبة القفز بالزانة كانت الزانات المستخدمة سابقًا لا تخزن طاقة وضع كبيرة؛ لأنها من خشب الخيزران أو من مواد فلزية قاسية يصعب انحناؤها، ولذا يصعب بذل شغل عليها، ولكن بعد استحداث زانات مصنوعة من ألياف زجاجية عالية المرونة تمكن اللاعبون من تجاوز القفزات العالية السابقة، وتسجيل أرقام قياسية جديدة في اللعبة.

■ **الشكل 8–5** عندما يقفز اللاعب مستعينًا بالزانة تتحول طاقة الوضع المرونية إلى طاقة حركية وطاقة وضع جاذبية.

يركض لاعب القفز بالزانة حاملاً عصًا مرنة (الزانة)، ويغرز طرفها السفلي في تراب الملعب، وعندما يثني اللاعب العصا كما في **الشكل 8–5** فإن جزءًا من الطاقة الحركية للاعب تتحول إلى طاقة وضع مرونية. وعندما تستقيم العصا تتحول طاقة الوضع المرونية إلى طاقة وضع جاذبية، وطاقة حركية، فيرتفع اللاعب بالزانة إلى ارتفاع يصل إلى 6 m فوق سطح الأرض.

وعلى عكس القضبان الفلزية القاسية وعصي الخيزران فإن قضبان الألياف الزجاجية لها قابلية أكبر لتخزين طاقة الوضع المرونية، وقد أتاحت للاعبي القفز بالزانة الوثب عن عوارض على ارتفاعات أعلى من ذي قبل.

9. أ. عند سحب الشريط: يُبذل شغل على النظام ويُختزن على شكل طاقة وضع مرونية. ب. عند الانطلاق: تتحول طاقة الوضع المرونية إلى طاقة حركية. ج. عند أقصى ارتفاع: تتحول الطاقة الحركية إلى طاقة وضع جاذبية.

الكتلة قدم ألبرت أينشتاين شكلاً آخر لطاقة الوضع؛ وهو الكتلة ذاتها! حيث يقول إن الكتلة طاقة بطبيعتها، وتسمى هذه الطاقة E_0 الطاقة السكونية، ويعبر عنها بالعلاقة الآتية:

الطاقة السكونية

$$E_0 = mc^2$$

الطاقة السكونية لجسم تساوي كتلة الجسم مضروبة في مربع سرعة الضوء.

وفقًا للمعادلة السابقة، فإن ضغط النابض أو ثني الزانة يؤدي إلى إكساب كتلة للنابض أو الزانة، ويكون التغير في الكتلة في هذه الحالة قليلاً جدًّا، بحيث يصعب الكشف عنه، ولكن عندما نتعامل مع قوى كتلك الموجودة في نواة الذرة (القوى النووية) فإن الطاقة المتحررة نتيجة تغيرات الكتلة، والتي تظهر على أشكال مختلفة من الطاقة كالطاقة الحركية مثلاً، تكون كبيرة جدًا.

10. التغير في طاقة الوضع عند ارتفاع h هو 425 J. وعند ارتفاع 2h، يكون التغير في طاقة الوضع من سطح الأرض هو: $\Delta PE = mg(2h) = 2(mgh) = 2(425\ J) =$ 850 J.

11. تنص نظرية الشغل-الطاقة على أن الشغل المبذول (W) يساوي التغير في الطاقة الحركية (ΔKE). عندما تبذل قوة على الكرة في اتجاه حركتها، فإنك تبذل شغلاً موجبًا، مما يزيد من طاقتها الحركية، وبالتالي تزداد سرعتها.

12. باعتبار مستوى الإسناد عند خط النهاية (h=0)، يكون ارتفاع قمة التل 85.0 m. طاقة الوضع عند القمة: $PE = mgh = (90.0\ kg)(9.80\ m/s^2)(85.0$ m) = 7.50×10^4 J. طاقة الوضع عند خط النهاية (بعد هبوط 85.0 m) هي صفر جول بحكم تعريف مستوى الإسناد.

1–5 مراجعة

9. **طاقة الوضع المرونية** لديك مسدس لعبة، تدفع بداخله الطلقات المطاطية، فتضغط نابضًا، وعندما يتحرر النابض يطلق الرصاصات المطاطية، بفعل طاقة وضعه المرونية، إلى خارج المسدس. فإذا استخدمت هذا النظام لإطلاق الطلقات المطاطية إلى أعلى فارسم مخططًا بيانيًّا بالأعمدة يصف أشكال الطاقة في الحالات الآتية:
   a. عند دفع الطلقات المطاطية داخل ماسورة المسدس، مما يؤدي إلى انضغاط النابض.
   b. عند تمدد النابض وخروج الطلقات من ماسورة المسدس بعد سحب الزناد.
   c. عند وصول الخرزات إلى أقصى ارتفاع لها.

10. **طاقة الوضع** أطلقت قذيفة كتلتها 25.0 kg من مدفع على سطح الأرض. فإذا كان مستوى الإسناد هو سطح الأرض فما مقدار طاقة الوضع للنظام عندما تصبح القذيفة على ارتفاع 425 m؟ وما التغير في طاقة الوضع عندما تصل القذيفة إلى ارتفاع 225 m؟

11. **نظرية الشغل – الطاقة** كيف تطبق نظرية الشغل – الطاقة عند رفع كرة البولينج من سلة الكرات إلى كتفك؟

12. **طاقة الوضع** متسلق صخور كتلته 90.0 kg تسلق في البداية 45.0 m فوق سطح طبقة صخرية ليصل إلى قمة التل، ثم هبط إلى نقطة تبعد 85.0 m أسفل قمة التل. فإذا كان سطح الطبقة الصخرية هو مستوى الإسناد، فجد طاقة الوضع الجاذبية للنظام (المتسلق والأرض) عند أعلى ارتفاع وصله المتسلق، وكذلك عند أدنى نقطة. وارسم مخططًا بيانيًّا بالأعمدة لكلا الوضعين.

13. **التفكير الناقد** استخدم زياد خرطومًا هوائيًّا ليؤثر بقوة أفقية ثابتة في قرص مطاطي موجود فوق مضمار هوائي عديم الاحتكاك، فجعل الخرطوم مصوبًا نحو القرص طوال تحركه لمسافة محددة؛ ليضمن التأثير بقوة ثابتة في أثناء حركة القرص.
   a. وضح ما حدث بدلالة الشغل والطاقة، واستعن برسم مخططٍ بيانيٍّ بالأعمدة.
   b. افترض أن زيادًا استخدم قرصًا مطاطيًّا آخر كتلته نصف كتلة القرص الأول، وبقيت الظروف كلها كما هي، فكيف تتغير طاقة الحركة والشغل في هذا الوضع عن الوضع الأول؟
   c. وضح ما حدث في a و b بدلالة الدفع والزخم.

13. أ. الشغل المبذول (W=Fd) يتحول إلى طاقة حركية (ΔKE). بما أن القوة ثابتة، يزداد الشغل والطاقة الحركية خطيًا مع المسافة. ب. عندما تزداد القوة مع الاستطالة، يكون الشغل المبذول (المساحة تحت منحنى القوة-الإزاحة) أكبر مما كان عليه في الحالة الأولى لنفس الإزاحة، وبالتالي يكون التغير في الطاقة الحركية أكبر. ج. في الحالة (أ)، القوة الثابتة تعني معدل تغير ثابت للزخم (تسارع ثابت). في الحالة (ب)، القوة المتزايدة تعني معدل تغير متزايد للزخم (تسارع متزايد).

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

5–2 حفظ الطاقة Conservation of Energy

عندما تتحرك كرة قريبًا جدًّا من سطح الأرض يكون المجموع الكلي لطاقة الوضع الجاذبية والطاقة الحركية في النظام مقدارًا ثابتًا. وعند تغير ارتفاع الكرة تتحول الطاقة الحركية إلى طاقة وضع، ولكن يبقى المجموع الكلي للطاقة هو نفسه.

الأهداف

- **تحل** مسائل باستخدام قانون حفظ الطاقة.
- **تحلّل** التصادمات لإيجاد التغير في الطاقة الحركية.

المفردات

قانون حفظ الطاقة
الطاقة الميكانيكية
التصادم فوق المرن
التصادم المرن
التصادم العديم المرونة

حفظ الطاقة Conservation of Energy

قد لا تبدو الطاقة محفوظة في حياتنا اليومية. فالقرص المطاطي في لعبة الهوكي يفقد طاقته الحركية ويتوقف عن الحركة في النهاية، حتى على السطح الجليدي الأملس. ويتوقف البندول عن الحركة بعد فترة زمنية ما. ويمكننا استخدام نموذج المال مرة أخرى لنبيِّن ما يحدث في هذه الحالات.

افترض أن لديك 50 ريالاً، وقمت في أحد الأيام بعدّ نقودك فوجدتها ناقصة 10 ريالات. فهل اختفت النقود؟ ربما تحاول أن تتذكّر هل أنفقتها، وقد تحاول البحث عنها، لكنك بكل تأكيد لن تتخلى عن مبدأ "حفظ المال"، وستحاول أن تتذكر كيف أنفقت النقود، أو أين ذهبت.

قانون حفظ الطاقة يعمل العلماء كما فعلت عندما لم يكن مجموع المال صحيحًا، فإذا لاحظوا أن الطاقة تُفقد من النظام، فإنهم يبحثون عن شكل جديد يمكن أن تكون الطاقة قد تحولت إليه؛ هذا لأن المجموع الكلي للطاقة في أي نظام يبقى ثابتًا ما دام النظام مغلقًا ومعزولاً عن القوى الخارجية. وينص **قانون حفظ الطاقة** على أنه في النظام المعزول المغلق، لا تفنى الطاقة ولا تستحدث، إلا بقدرة الله تعالى، أيْ تبقى الطاقة محفوظة تحت هذه الشروط، وتتحول من شكل إلى آخر، بحيث يبقى المجموع الكلي للطاقة في النظام ثابتًا.

حفظ الطاقة الميكانيكية يُسمى مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع الجاذبية للنظام **الطاقة الميكانيكية** E. وفي أي نظام إذا لم يكن هناك أنواع أخرى من الطاقة فإن الطاقة الميكانيكية يُعبر عنها بالمعادلة:

الطاقة الميكانيكية لنظام $E = KE + PE$

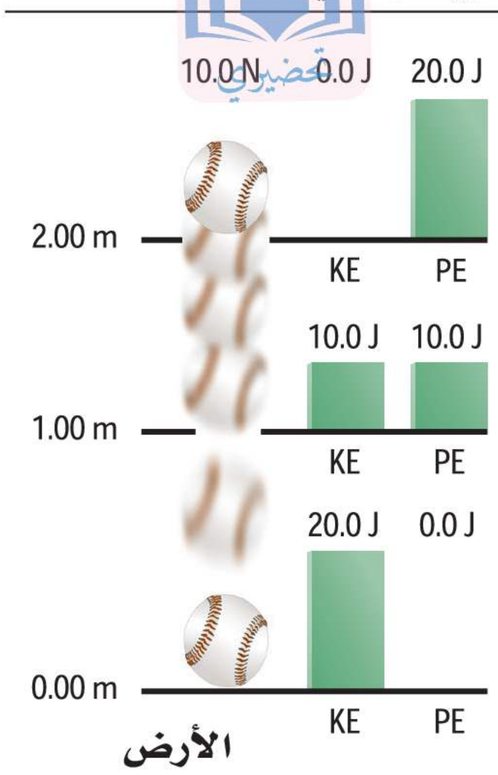
"الطاقة الميكانيكية لنظام تساوي مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع الجاذبية إذا لم يكن هناك أنواع أخرى من الطاقة".

تخيل نظامًا يتكون من كرة وزنها 10.0 N والأرض، كما في **الشكل 9–5**، وافترض أن الكرة موجودة على ارتفاع 2.00 m فوق سطح الأرض الذي سنعدّه مستوى الإسناد، ولأن الكرة الآن لا تتحرك فإنه ليس لها طاقة حركية. ويعبر عن طاقة وضعها بالمعادلة الآتية:

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

إن المجموع الكلي للطاقة الميكانيكية للكرة 20.0 J، وبسقوط الكرة فإنها تفقد طاقة وضع وتكتسب طاقة حركية، وعندما تصبح الكرة على ارتفاع 1.0m فوق سطح الأرض فإن:

$$PE = mgh = (10.0\ \text{N})\ (1.00\ \text{m}) = 10.0\ \text{J}$$



الشكل 9–5 النقص في طاقة الوضع يساوي الزيادة في الطاقة الحركية.

ما مقدار الطاقة الحركية للكرة عندما تكون على ارتفاع 1.00 m من سطح الأرض؟ يتكون النظام من الكرة والأرض وهو مغلق ومعزول؛ لأنه لا يوجد قوى خارجية تؤثر فيه؛ لذا فالمجموع الكلي لطاقة النظام E يبقى ثابتًا عند 20.0 J.

$$E = KE + PE$$

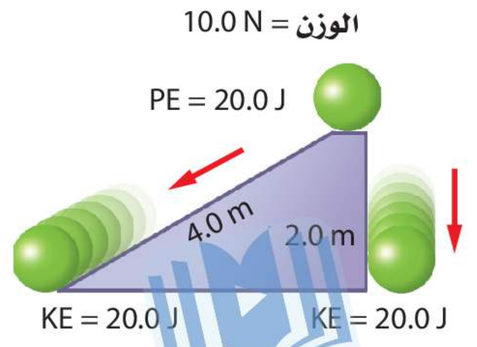
$$KE = E - PE$$

$$KE = 20.0\ \text{J} - 10.0\ \text{J} = 10.0\ \text{J}$$

وعندما تصل الكرة إلى سطح الأرض تصبح طاقة وضعها صفرًا، وطاقتها الحركية 20.0 J، وتكتب المعادلة التي تصف حفظ الطاقة الميكانيكية على النحو الآتي:

حفظ الطاقة الميكانيكية $KE_{\text{قبل}} + PE_{\text{قبل}} = KE_{\text{بعد}} + PE_{\text{بعد}}$

عندما تكون الطاقة الميكانيكية محفوظة فإن مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع في النظام قبل وقوع الحدث تساوي مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع في النظام بعد الحدث.



■ **الشكل 10–5** لا يؤثر المسار الذي يتبعه الجسم حتى يصل الأرض في مقدار الطاقة الحركية النهائية للجسم.

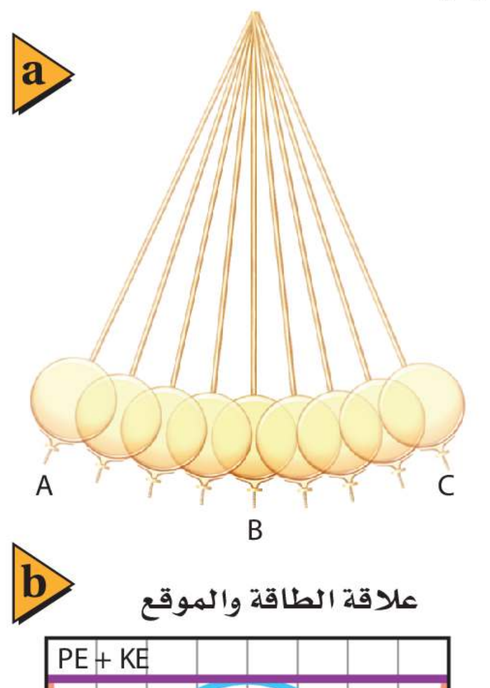
ماذا يحدث إذا تدحرجت الكرة على سطح مائل، كما في **الشكل 10–5**، بدلاً من أن تسقط رأسيًّا إلى أسفل؟ إذا كان السطح مهمل الاحتكاك فهذا يعني أن النظام لم يتأثر بأية قوى خارجية، أيْ أن النظام مغلق ومعزول؛ لذا فإن الكرة ستهبط مسافة رأسية 2.0 m، فتفقد طاقة وضع مقدارها 20.0 J، كما في الحالة السابقة، وستكتسب طاقة حركية مقدارها 20.0 J . أي أنه في غياب الاحتكاك، لا يكون للمسار الذي تسلكه الكرة أي تأثير.

عربة التزلج في حالة التزلج على المنحدرات المتعرجة، إذا كانت العربة ساكنة في أعلى منحدر فعند هذه النقطة يكون مجموع الطاقة الميكانيكية في النظام يساوي طاقة الوضع الجاذبية. افترض وجود منحدر آخر على المسار أكثر ارتفاعًا من المنحدر الأول فإن العربة لا تستطيع الصعود إليه؛ لأن الطاقة اللازمة لذلك أكبر من الطاقة الميكانيكية في النظام.

التزلج افترض أنك بدأت التزلج من السكون هابطًا منحدرًا شديد الانحدار. إن الطاقة الميكانيكية الكلية للنظام هي طاقة الوضع التي بدأت بها التزلج، وعند هبوطك المنحدر تتحول طاقة الوضع الجاذبية لديك إلى طاقة حركية، وكلما هبطت إلى أسفل تزداد سرعتك، حيث تتحول طاقة الوضع الجاذبية إلى طاقة حركية، وفي رياضة القفز عن المنحدرات الجليدية يُحدّد ارتفاع قفزة اللاعب في الهواء مقدار الطاقة التي ستتحول لاحقًا إلى طاقة حركية عندما يبدأ تزلجه.

البندول تبرهن الحركة التوافقية البسيطة للبندول على مبدأ حفظ الطاقة، حيث يتكون النظام من ثقل البندول المتذبذب والأرض **شكل 11a–5**، وعادة يختار مستوى الإسناد عند ارتفاع ثقل البندول وهو ساكن، أي عند أدنى نقطة في مسار البندول. إذا أثرت قوة خارجية في ثقل البندول فأزاحته إلى أحد الجانبين فإن القوة تبذل شغلاً يكسب النظام طاقة ميكانيكية. وفي اللحظة التي يُترك فيها البندول فإن الطاقة الكلية تتخذ شكل طاقة الوضع، وعندما يبدأ البندول أرجحته هابطًا إلى أدنى نقطة في مساره، تتحول طاقة النظام إلى طاقة حركية.

■ **الشكل 11–5** الحركة التوافقية البسيطة لرقّاص البندول (a). الطاقة الميكانيكية هي مجموع طاقتي الحركة والوضع وهي مقدار ثابت (b).



علاقة الطاقة والموقع

والشـــكل **5–11b** يوضح العلاقـــة البيانية لتغير طاقة الوضع وطاقـــة الحركة للبندول. فعندمـــا يكون البندول عند أدنى نقطة في مســـاره تكون طاقة الوضـــع له صفرًا، وتكون طاقته الحركية مساوية للطاقة الميكانيكية الكلية للنظام. لاحظ أن الطاقة الميكانيكية الكلية في النظام تبقى ثابتة على افتراض أن الاحتكاك معدوم.

فقـدان الطاقـة الميكانيكيـة نلاحظ في حياتنا اليومية أن تذبـــذب البندول يتوقف في نهاية المطاف، وأن الكرة المرتدة عن ســـطح الأرض تؤول إلى الســـكون، كما أن الارتفاع الذي تصل إليه عربة التزلـــج يقل تدريجياً، فأين تذهب الطاقة في هـــذه الأنظمة؟ يتعرض أي جســـم يتحرك في الهواء لقوة مقاومة الهـــواء، كما تتعرض عربة قطـــار الملاهي لتأثير قوة الاحتكاك بين عجلات العربة والسكة.

وعندما ترتد الكرة عن ســـطح الأرض، لا تتحول جميع طاقة الوضع المرونية المختزنة فيها إلى طاقـــة حركية بعد الارتـــداد، بل يتحول جزء من هذه الطاقـــة إلى طاقة حرارية وطاقة صوتيـــة، وفي حالتي البندول وعربة التزلج تتحول بعـــض الطاقة الميكانيكية الابتدائية في النظام إلى أشـــكال أخرى من الطاقة، إما إلى طاقة داخـــل أجزاء النظام أو خارجه، كما في مقاومة الهواء. وترفع عادة هذه الطاقة درجة حرارة الجســـم تدريجيًّا، وستعرف المزيد عن هذا النوع من الطاقة المســـمى الطاقة الحرارية في الفصل 6. وستساعدك الاستراتيجيات الآتية على حلّ المسائل المتعلقة بحفظ الطاقة.

تجربة عملية

هل الطاقة محفوظة؟

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية

استراتيجية حلّ المسائل

حفظ الطاقة

استعن بالاســـتراتيجيات الآتية عند حل المسائل المتعلقة بحفظ الطاقة:

1. حدّد النظام بدقة، وتأكد أنه مغلق (تذكر أن النظام المغلق لا يدخل إليه أو يخرج منه أي جسم).
2. عين أشكال الطاقة في النظام.
3. حدّد الوضع الابتدائي والنهائي للنظام.
4. هل النظام معزول؟

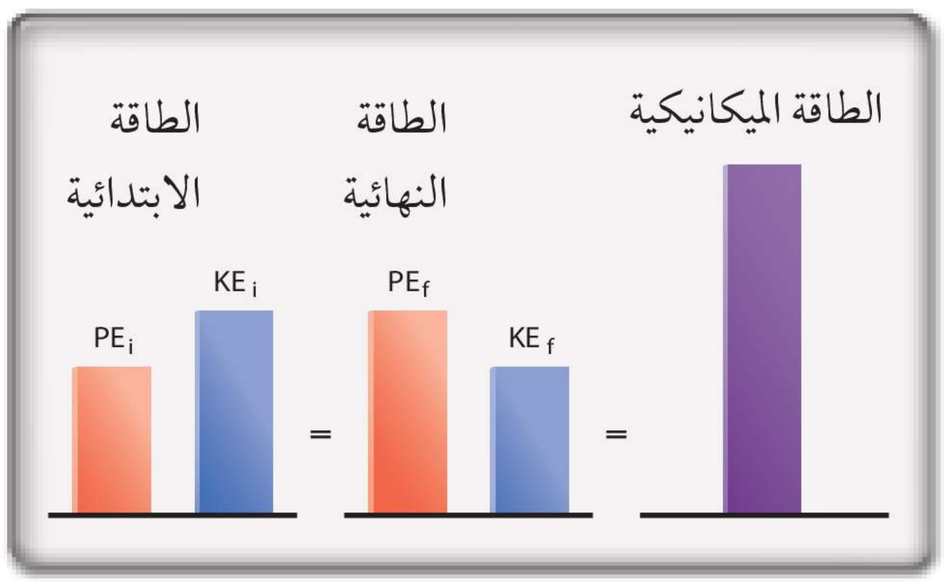
a. إذا لم تكـــن هناك قوة خارجيـــة تؤثر في النظام يكون النظام معزولًا ويكون مجموع الطاقة الكلية فيه ثابتًا.

$$E_{\text{قبل}} = E_{\text{بعد}}$$

b. إذا كان هناك قوة خارجية تؤثر في النظام فإنّ $E_{\text{قبل}} + W = E_{\text{بعد}}$

5. إذا كانت الطاقة الميكانيكية محفوظةً فحدّد مستوى إســـناد لحساب طاقة الوضع، ومثّل بيانيًّا بالأعمدة كلًّا من الطاقة الابتدائية والطاقة النهائية، كما في الشكل المرفق.

مخطط الطاقة

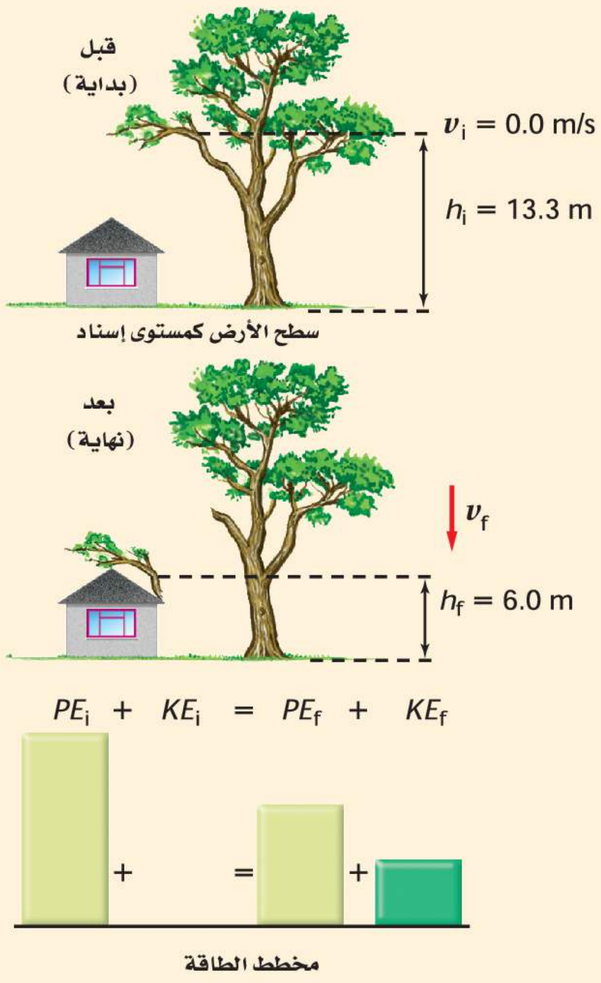


مثـــــال 2

حفظ الطاقة الميكانيكية خلال إعصار، سقط غصن شجرة كبيرة كتلته 22.0 kg ومتوسط ارتفاعه عن سطح الأرض 13.3 m على سقف كوخ يرتفع 6.0 m عن سطح الأرض. احسب مقدار:

a. الطاقة الحركية للغصن عندما يصل إلى السقف، وذلك بإهمال مقاومة الهواء.

b. سرعة الغصن عندما يصل إلى السقف.



1 تحليل المسألة ورسمها

- مثّل الوضع الابتدائي والوضع النهائي.
- اختر مستوى الإسناد.
- مثّل بيانيًّا بالأعمدة.

المعلوم

$g = 9.80\ m/s^2$ ، $m = 22.0\ kg$

$h_{غصن} = 13.3\ m$ ، $v_i = 0.0\ m/s$

$h_{سقف} = 6.0\ m$ ، $KE_i = 0.0\ J$

المجهول

$KE_f = ?$ $\quad PE_i = ?$

$v_f = ?$ $\quad PE_f = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

a. افترض أن مستوى الإسناد هو ارتفاع السقف، ثم أوجد الارتفاع الابتدائي للغصن بالنسبة للسقف.

$h = h_{غصن} - h_{سقف}$

عوض مستخدمًا $h_{غصن} = 13.3\ m$ ، $h_{سقف} = 6.0\ m$

$= 13.3\ m - 6.0\ m$

$= 7.3\ m$

أوجد طاقة الوضع الابتدائية للغصن

$PE_i = mgh$

عوض مستخدمًا $m = 22.0\ kg$ ، $g = 9.80\ m/s^2$ ، $h = 7.3\ m$

$= (22.0\ kg)(9.80\ m/s^2)(7.3\ m)$

$= 1.6 \times 10^3\ J$

حدد الطاقة الحركية الابتدائية للغصن

غصن الشجرة في البداية ساكن

$KE_i = 0.0\ J$

الطاقة الحركية للغصن عندما يصل إلى السقف تساوي طاقة الوضع الابتدائية؛ لأن الطاقة محفوظة.

وبما أن الارتفاع صفر عند مستوى الإسناد فإن $PE_f = 0.0\ J$.

$KE_f = PE_i$

$= 1.6 \times 10^3\ J$

14. باستخدام قانون حفظ الطاقة الميكانيكية، (KE + PE) الابتدائية = (KE + PE) النهائية. mv^2(1/2) + mgh_i = (1/2)mv_f^2 + mgh_f. وبما أن المتزلج بدأ من سطح الأرض وتوقف عند أقصى ارتفاع، فإن mv^2 = mgh_f(1/2). إذن، h_f = v^2 / 2g = (8.5)^2 / (2 * 9.8) = 3.7 m.

b. أوجد سرعة الغصن.

15. تكون الطاقة الكلية محفوظة في نظام يتضمن (المتزلج، والأرض، والهواء، والمسار). عند توقف المتزلج، تكون طاقته الحركية قد تحولت بشكل أساسي إلى طاقة حرارية بسبب الاحتكاك مع المسار ومقاومة الهواء.

$$KE_f = \frac{1}{2}mv_f^2$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2KE_f}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(1.6\times10^3\ \text{J})}{22.0\ \text{kg}}}$$

$$= 12\ \text{m/s}$$

عوض مستخدمًا $KE_f = 1.6 \times 10^3\ \text{J}$ ،$m = 22.0\ \text{kg}$

16. سرعة المتزلج عند قاع الوادي: v = √(2gh) = √(2 * 9.80 * 45.0) = 29.7 m/s. سرعة المتزلج عند أعلى التل الثاني: v = √(2g(h1-h2)) = √(2 * 9.80 * (45.0 - 40.0)) = 9.90 m/s. زاوية ميل التل ليس لها أي تأثير في سرعة المتزلج عند إهمال الاحتكاك.

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس السرعة بوحدة m/s، والطاقة بوحدة $\text{J} = \text{kg.m}^2/\text{s}^2$.
- **هل الإشارات منطقية؟** الطاقة الحركية (KE) ومقدار السرعة دائمًا موجب.

مسائل تدريبية

14. يقترب سائق دراجة من تل بسرعة 8.5 m/s. فإذا كانت كتلة السائق والدراجة 85.0 kg، فاختر نظام إسناد مناسب، ثم احسب طاقة الحركة الابتدائية للنظام. وإذا صعد السائق التل بالدراجة، فاحسب الارتفاع الذي ستتوقف عنده الدراجة بإهمال المقاومات.

15. افترض أن السائق في السؤال السابق استمرّ في الحركة عن طريق التدوير المستمر للبدّالات (الدوّاسات) ولم يتوقف، ففي أي نظام تعتبر الطاقة محفوظة؟ وأي أشكال الطاقة اكتسبت منها الدراجة طاقتها؟

16. بدأ متزلج بالانزلاق من السكون من قمة تل ارتفاعه 45.0 m يميل بزاوية 30° على الأفقي في اتجاه الوادي، ثم استمرّ في الحركة حتى وصل إلى التل الآخر الذي يبلغ ارتفاعه 40.0 m. حيث يقاس ارتفاع التلين بالنسبة لقاع الوادي. ما سرعة المتزلج عندما يمر بقاع الوادي، مع إهمال الاحتكاك وتأثير أعمدة التزلج؟ وما مقدار سرعة المتزلج عند أعلى التل الثاني؟ وهل لزاوية ميل التل أي تأثير في الجواب؟

17. تقرر في إحدى مسابقات الغوص أن يكون الرابح هو من يثير أكبر كمية من رذاذ الماء عندما يغوص فيه. ولا تعتمد كميـــة الرذاذ على طريقة الغواص فقط، وإنما على مقدار الطاقة الحركية للغواص أيضًا. وفي هذه المســـابقة قفز جميع الغواصين عن عارضة غوص ارتفاعها 3.00 m، فإذا كانت كتلة أحدهم 136 kg وقام بحركته بأن ألقى نفســـه عن العارضة ببســـاطة. أمّا الغواص الثاني فكانت كتلته 102 kg وقفز عن العارضة إلى أعلى، فما الارتفاع الذي يجب أن يصل إليه اللاعب الثاني حتى يثير رذاذًا مساويًا لما أثاره الغواص الأول؟

17. لكي يثير الغواصان نفس كمية الرذاذ، يجب أن تكون طاقتهما الحركية عند الاصطدام بالماء متساوية. طاقة الغواص الأول KE1 = m1*g*h1 = 136 kg * g * 3.00 m. يجب أن تكون طاقة الغواص الثاني عند أقصى ارتفاع له مساوية لطاقة الغواص الأول عند سطح الماء، أي PE2 = KE1. إذن، m2*g*h2 = m1*g*h1، وبالتالي فإن h2 = (m1*h1)/m2 = (136 * 3.00) / 102 = 4.00 m. يجب أن يصل الغواص الثاني إلى ارتفاع 4.00 m فوق سطح الماء.

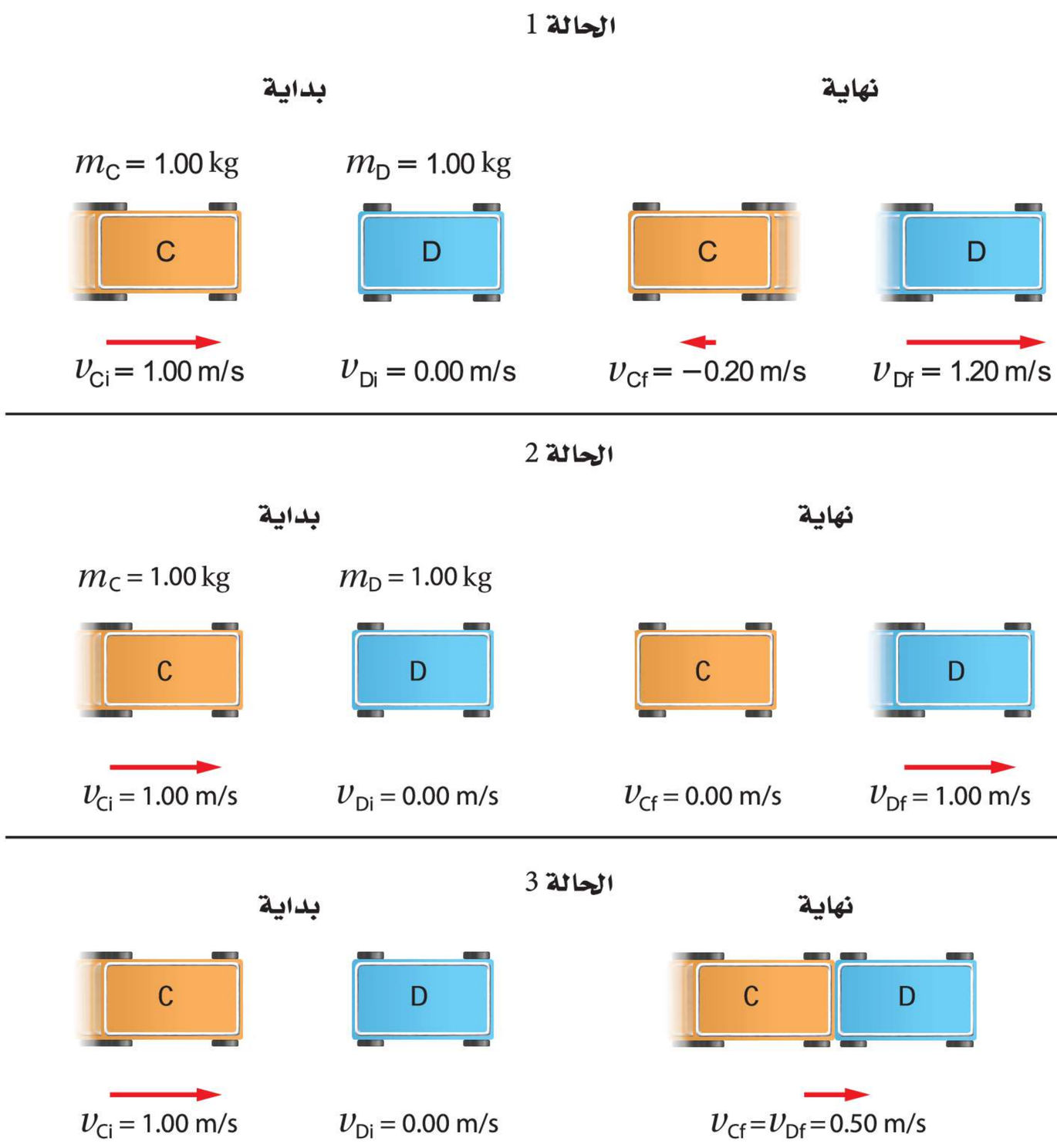
تحليل التصادمات Analyzing collisions

من الحالات الشائعة التي تُطرح في موضوعات الفيزياء التصادم بين السيارات، أو اللاعبين، أو الجسيمات المكونة للذرة، بعضها مع بعض. وعادة ما تكون تفاصيل التصادم معقدة جدًّا في أثناء التصادم. لذلك تعتمد استراتيجية التعامل مع التصادم على دراسة حركة الأجسام قبل التصادم مباشرة، وبعده مباشرة. لكن ما الكميات الفيزيائية المحفوظة لنستخدم قوانينها عند تحليل النظام؟ إذا كان النظام معزولاً فإن الزخم والطاقة محفوظان، إلا أن طاقة الوضع أو الطاقة الحرارية في النظام يمكن أن تقل، أو تبقى ثابتة، أو تزداد؛ لذا لا نستطيع أن نقرر هل الطاقة الحركية محفوظة أم لا. ويبين **الشكل 12–5** ثلاثة أنواع مختلفة من التصادمات. ففي الحالة 1 زخم النظام قبل التصادم وبعده يعبر عنه بالمعادلة:

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{i}} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{ci}} + \boldsymbol{p}_{\mathrm{Di}} = (1.00\ \mathrm{kg})(1.00\ \mathrm{m/s}) + (1.00\ \mathrm{kg})(0.00\ \mathrm{m/s})$$
$$= 1.00\ \mathrm{kg.m/s}$$

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{cf}} + \boldsymbol{p}_{\mathrm{Df}} = (1.00\ \mathrm{kg})(-0.20\ \mathrm{m/s}) + (1.00\ \mathrm{kg})(1.20\ \mathrm{m/s})$$
$$= 1.00\ \mathrm{kg.m/s}$$

لذا فإن الزخم في الحالة 1 محفوظ. انظر مجددًا **الشكل 12–5**، وبيِّن أن الزخم محفوظ في الحالتين 2 و 3.



■ **الشكل 12–5** يمكن أن يُحدث جسمان متحركان تصادمات مختلفة. الحالة 1 يتباعد الجسمان في اتجاهين متعاكسين. الحالة 2 يتوقف الجسم المتحرك ويتحرك الجسم الساكن. وفي الحالة 3 يلتحم الجسمان ويتحركان كجسم واحد.

والآن لندرس الطاقة الحركية في النظام في كل حالة من الحالات الثـــلاث: ففي الحالة 1 يعبر عن الطاقة الحركية للنظام قبل التصادم وبعده بالمعادلة الآتية:

$$KE_{Ci} + KE_{Di} = \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(1.00\ \text{m/s})^2 + \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(0.00\ \text{m/s})^2$$
$$= 0.50\ \text{J}$$

$$KE_{Cf} + KE_{Df} = \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(-0.20\ \text{m/s})^2 + \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(1.20\ \text{m/s})^2$$
$$= 0.74\ \text{J}$$

أيْ زادت الطاقــة الحركية للنظام في الحالة 1. وإذا كانــت الطاقة محفوظة في النظام فلابد أن واحدًا أو أكثر من أشــكال الطاقة قد قل، ربما انفلــت نابض مضغوط في أثناء تصادم العربتــين مما زوّد النظــام بطاقة حركية، وهــذا النوع من التصادم يُســمى **التصادم فوق المرن** superelastic أو الانفجاري explosive.

أمّا الطاقة الحركية بعد التصادم في الحالة 2 فتساوي:

$$KE_{Cf} + KE_{Df} = \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(0.00\ \text{m/s})^2 + \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(1.0\ \text{m/s})^2$$
$$= 0.50\ \text{J}$$

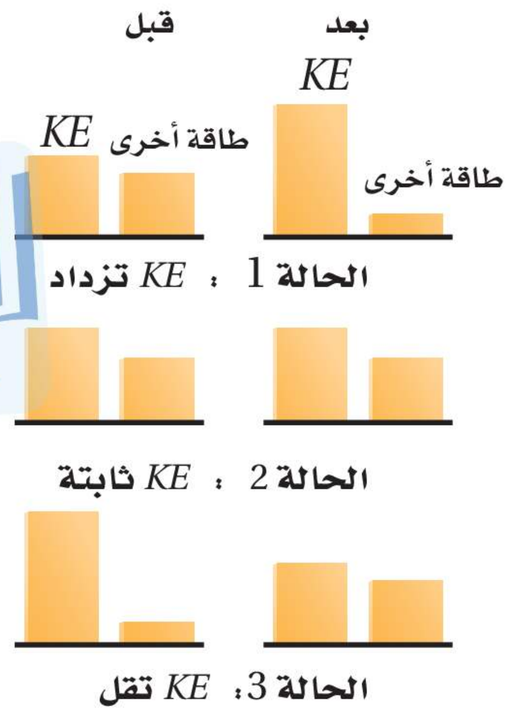
أي أن الطاقة الحركية بعد التصادم كما هي قبل التصادم، ويســمى هذا النوع من التصادم الــذي لا تتغير فيه الطاقة الحركيــة **التصادم المرن** elastic collision، وعادة ما تســمى التصادمات التي تحدث بين الأجسام المرنة الصلبة –ومنها الأجسام المصنوعة من الفولاذ والزجاج أو البلاستيك الصلب – بالتصادمات شبه المرنة.

أما الطاقة الحركية بعد التصادم في الحالة 3 فهي

$$KE_{Cf} + KE_{Df} = \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(0.50\ \text{m/s})^2 + \frac{1}{2}(1.00\ \text{kg})(0.50\ \text{m/s})^2$$
$$= 0.25\ \text{J}$$

أي أن الطاقــة الحركية قلــت لتحوّل جزء منها إلى طاقة حرارية. ويســمى هذا النوع من التصادم الذي تقــل فيه الطاقة الحركية **بالتصادم العديم المرونــة** inelastic collision، والأجسام المصنوعة من مواد ناعمة أو لزجة مثل الطين تتبع هذا النوع من التصادم.

يمكــن تمثيل أنــواع التصادم الثلاثــة باســتخدام التمثيــل البياني بالأعمــدة انظر إلى **الشكل 13–5**، كما يمكن أيضًا حساب الطاقة الحركية قبل التصادم وبعده، ويكون الفرق في الطاقة الحركية هو التغير في الأشــكال الأخرى للطاقة، إذْ تتحــول الطاقة الحركية في تصادم السيارات إلى أنواع أخرى من الطاقة، منها الطاقة الحرارية والطاقة الصوتية.



■ **الشكل 13–5** التمثيل البياني بالأعمدة لأنواع التصادمات الثلاثة.

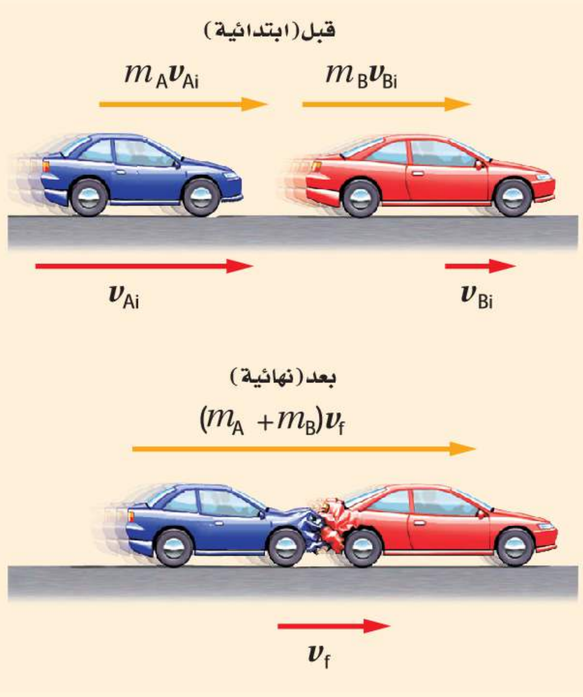
مثـــــال 3

الطاقة الحركية تتحرك سيارة صغيرة كتلتها 575 kg بسرعة 15.0 m /s، ثم اصطدمت بمؤخرة سيارة أخرى كتلتها 1575 kg تتحرك بسرعة 5.00 m /s في الاتجاه نفسه.

a. ما السرعة النهائية للسيارتين إذا التحمتا معًا وكوّنتا جسمًا واحدًا؟

b. ما مقدار الطاقة الحركية المفقودة نتيجة التصادم؟

c. ما نسبة الطاقة الحركية المفقودة إلى مقدار الطاقة الأصلية؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- مثّل الوضع الابتدائي والوضع النهائي.
- مثّل مخطط الزخم.

المعلوم

$m_A = 575\ \text{kg}$ ،$m_B = 1575\ \text{kg}$

$v_{Ai} = 15.0\ \text{m/s}$ ،$v_{Bi} = 5.00\ \text{m/s}$

$v_{Af} = v_{Bf} = v_f$

المجهول

$v_f = ?$ ،$\Delta KE = KE_f - KE_i = ?$

نسبة الطاقة الحركية المفقودة $\Delta KE/KE_i = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

a. استخدم معادلة حفظ الزخم لإيجاد السرعة النهائية.

دليل الرياضيات

فصل المتغير 215

$$p_{Ai} + p_{Bi} = p_{Af} + p_{Bf}$$

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = (m_A + m_B) v_f$$

$$v_f = \frac{(m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi})}{(m_A + m_B)}$$

$$= \frac{(575\ \text{kg})(15.0\ \text{m/s}) + (1575\ \text{kg})(5.00\ \text{m/s})}{(575\ \text{kg} + 1575\ \text{kg})}$$

عوض مستخدمًا $m_A = 575\ \text{kg}, v_{Ai} = 15.0\ \text{m/s}$

$m_B = 1575\ \text{kg}, v_{Bi} = 5.00\ \text{m/s}$

$= 7.67\ \text{m/s}$ في اتجاه الحركة نفسه قبل التصادم

b. لتحديد التغير في الطاقة الحركية للنظام نحتاج إلى KE_f و KE_i

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

عوض مستخدمًا $m = m_A + m_B$

$$= \frac{1}{2}(m_A + m_B) v_f^2$$

$$= \frac{1}{2}(575\ \text{kg} + 1575\ \text{kg})(7.67\ \text{m/s})^2$$

$$= 6.32 \times 10^4\ \text{J}$$

عوض مستخدمًا $m_A = 575\ \text{kg}, m_B = 1575\ \text{kg}, v_f = 7.67\ \text{m/s}$

$$KE_i = KE_{Ai} + KE_{Bi}$$

$$= \frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2$$

عوض مستخدمًا $KE_{Ai} = \frac{1}{2} m_A v_{Ai}^2$ ، $KE_{Bi} = \frac{1}{2} m_B v_{Bi}^2$

$$= \frac{1}{2}(575\text{kg})(15.0\text{m/s})^2 + \frac{1}{2}(1575\text{kg})(5.00\text{m/s})^2$$

عوض مستخدمًا $m_A = 575\ \text{kg}$ ، $m_B = 1575\ \text{kg}$،

$v_{Ai} = 15.0\ \text{m/s}$ و $v_{Bi} = 5.00\ \text{m/s}$

$$= 8.44 \times 10^4\ \text{J}$$

18. هذا تصادم غير مرن تمامًا، لذا فإن الزخم محفوظ. p_i = p_f. m_b*v_b_i = (m_b+m_w)*v_f. إذن v_b_i = ((m_b+m_w)*v_f)/m_b = ((0.00800 kg + 9.00 kg) * 0.100 m/s) / 0.00800 kg = 113 m/s.

أوجد التغير في الطاقة الحركية للنظام.

$$\Delta KE = KE_f - KE_i$$

$$= 6.32 \times 10^4\ \text{J} - 8.44 \times 10^4\ \text{J}$$

$$= -2.12 \times 10^4\ \text{J}$$

عوض مستخدمًا $KE_f = 6.32 \times 10^4\ \text{J}$, $KE_i = 8.44 \times 10^4\ \text{J}$

c. أوجد نسبة الطاقة الحركية المفقودة إلى الطاقة الحركية الأصلية.

$$\frac{\Delta KE}{KE_i} = \frac{-2.12 \times 10^4\ \text{J}}{8.44 \times 10^4\ \text{J}} = -0.251$$

عوض مستخدمًا $\Delta KE = -2.11 \times 10^4\ \text{J}$, $KE_i = 8.44 \times 10^4\ \text{J}$

نسبة الطاقة الحركية المفقودة إلى الطاقة الحركية الأصلية للنظام 25.1 %

3 تقويم الإجابة

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس السرعة بوحدة m /s، وتقاس الطاقة بوحدة J.
- **هل الإشارات منطقية؟** السرعة موجبة، مما يتوافق مع السرعات الابتدائية.

19. أ. النظام هو السهم والهدف.
ب. الزخم محفوظ أثناء التصادم. الطاقة الميكانيكية محفوظة أثناء التأرجح بعد التصادم.
ج. السرعة الابتدائية للسهم هي 46.3 m/s.

مسائل تدريبية

18. انطلقت رصاصة كتلتها 8.00 g أفقيًّا نحو قطعة خشبية كتلتها 9.00 kg موضوعة على سطح طاولة، واستقرت فيها، وتحركتا كجسم واحد بعد التصادم على سطح عديم الاحتكاك بسرعة 10.0 m /s. ما مقدار السرعة الابتدائية للرصاصة؟

19. هدف مغناطيسي كتلته 0.73 kg معلق بخيط، أُطلق سهم حديدي كتلته 0.0250 kg أفقيًّا في اتجاه الهدف، فاصطدم به، والتحما معًا، وتحركا كبندول ارتفع 12.0 cm فوق المستوى الابتدائي قبل أن يتوقف لحظيًّا عن الحركة.

a. مثّل الحالة (الوضع)، ثم اختر النظام.

b. حدّد الكمية الفيزيائية المحفوظة في كل جزء من أجزاء الحركة كلها، ثم فسر ذلك.

c. ما السرعة الابتدائية للسهم؟

20. يتزلج لاعب كتلته 91.0 kg على الجليد بسرعة 5.50 m /s، ويتحرك لاعب آخر له الكتلة نفسها بسرعة 8.1 m /s في الاتجاه نفسه ليضرب اللاعب الأول من الخلف، ثم ينزلقان معًا.

a. احسب المجموع الكلي للطاقة، والمجموع الكلي للزخم في النظام قبل التصادم.

b. ما مقدار سرعة اللاعبين بعد التصادم؟

c. ما مقدار الطاقة المفقودة في التصادم؟

20. أ. الزخم الابتدائي = p1 + p2 = (91.0 kg)(5.50 m/s) + (91.0 kg)(8.1 m/s) = 1.2 × 10^3 kg·m/s. الطاقة الحركية الابتدائية = KE1 + KE2 = ½(91.0 kg)(5.50 m/s)^2 + ½(91.0 kg)(8.1 m/s)^2 = 4.4 × 10^3 J.
ب. باستخدام حفظ الزخم، p_i = p_f = (m1+m2)v_f. إذن v_f = 1.2 × 10^3 kg·m/s / (182.0 kg) = 6.8 m/s.
ج. الطاقة الحركية النهائية KE_f = ½(182.0 kg)(6.8 m/s)^2 = 4.2 × 10^3 J. الطاقة المفقودة = KE_i - KE_f = 4.4 × 10^3 J - 4.2 × 10^3 J = 2 × 10^2 J.

تجربة

تحويل الطاقة

1. اختر كرات فولاذية مختلفة الحجم، ثم أوجد كتلها.
2. ثبت عربة ميكانيكية ذات نابض رأسي على أن يكون نابضها متجهًا إلى أعلى.
3. ثبت مسطرة رأسيًا بجوار النابض لقياس ارتفاع الكرة.
4. ضع إحدى الكرات على الطرف العلوي للنابض، واضغط النابض إلى أسفل حتى تتلامس الكرة مع العربة.
5. اترك الكرة بسرعة ليدفعها النابض رأسيًا إلى أعلى.

تحذير: ابتعد عن الكرة قبل قذفها.

6. كرّر الخطوات عدة مرات للكرة ذاتها، ثم احسب متوسط الارتفاع.
7. قدّر ارتفاع الكرات الفولاذية المختلفة في الحجم.

التحليل والاستنتاج

8. رتب الكرات وفق الارتفاع الذي تصل إليه. ماذا تستنتج؟

يمكنك أن ترى أن هناك اختلافًا حقيقيًّا بين الزخم والطاقة. فالزخم غالبًا ما يكون محفوظًا في التصادم أيًّا كان نوعه، أمّا الطاقة فتكون محفوظة فقط في التصادمات المرنة، والزخم هو الذي يوقف الأجسام؛ فمثلاً جسم كتلته 10.0 kg، ويتحرك بسرعة 5.00 m /s يمكنه إيقاف جسم آخر كتلته 20.0 kg يتحرك بسرعة 2.5 m /s عندما يصطدمان، على الرغم من أن الطاقة الحركية للجسم الصغير الكتلة في هذه الحالة أكبر من الطاقة الحركية للجسم الكبير الكتلة، فالطاقة الحركية للجسم الأصغر هي: $KE = \frac{1}{2}(10.0\ kg)\ (5.0\ m/s)^2 = 125\ J$، أما الطاقة الحركية للجسم الأكبر فهي $KE = \frac{1}{2}(20.0\ kg)\ (2.50\ m/s)^2 = 62.5\ J$. ويمكنك اعتمادًا على نظرية الشغل – الطاقة أن تستنتج أنه لجعل الجسم الذي كتلته 10.0 kg يتحرك بسرعة 5.00 m /s فإنه يتطلب شغلاً أكبر من الشغل اللازم لجعل الجسم الذي كتلته 20.0 kg يتحرك بسرعة 2.50 m /s. في تصادم السيارات يؤدي الزخم إلى إيقافها، أما الطاقة فإنها تسبب الضرر (التحطم) الذي يلحق بها.

ومن الممكن إيجاد تصادم دون حدوث ارتطام فعلي بين الأجسام. فإذا وُصلت عربتا مختبر بنابض مضغوط دون حركة على طاولة، يكون مجموع الزخم للعربتين صفرًا، وعند إفلات النابض تبتعد العربتان إحداهما عن الأخرى، حيث تتحول طاقة الوضع في النابض إلى طاقة حركية في العربتين. ولأن العربتين تبتعد إحداهما عن الأخرى فيكون مجموع الزخم صفرًا.

من المفيد ذكر مثالين لتصادمين بسيطين. المثال الأول لتصادم مرن بين جسمين متساويين في الكتلة، مثل تصادم كرة بلياردو متحركة بسرعة متجهة $\boldsymbol{v}$ بكرة بلياردو أخرى ساكنة، حيث تتوقف الكرة الأولى بعد التصادم، وتتحرك الكرة الأخرى بالسرعة المتجهة نفسها $\boldsymbol{v}$. ومن السهل إثبات مبدأ حفظ الزخم وحفظ الطاقة في هذا التصادم.

والمثال الثاني لتصادم يحدث بين متزلجين؛ المتزلج الأول كتلته m، ويتحرك بسرعة متجهة $\boldsymbol{v}$ في اتجاه متزلج آخر ساكن له الكتلة ذاتها، فيصطدم به ويلتصقان معًا بعد التصادم ويتحركان كجسم واحد، ونتيجة لحفظ الزخم لابد أن تكون سرعتهما معًا $\frac{1}{2}\boldsymbol{v}$. إن الطاقة الحركية النهائية للمتزلجين KE هي: $KE = \frac{1}{2}(2m)\ (\frac{1}{2}v)^2 = \frac{1}{4}\ m\ v^2$، أيْ نصف الطاقة الحركية الابتدائية، وذلك لأن التصادم عديم المرونة.

لقد درست حالات طبقت فيها قانون حفظ الطاقة، وفي بعض الأحيان قانون حفظ الزخم لتحديد حركة الأجسام المكونة للنظام. إن فهم أنظمة الأجسام باستخدام قانون نيوتن الثاني في الحركة وحده قد يكون بالغ التعقيد. ولذلك يعد فهم أشكال الطاقة في النظام، وتحولاتها من شكل لآخر أحد أكثر المفاهيم فائدة في العلوم. ويظهر مفهوم حفظ الطاقة كثيرًا في البحوث العلمية والتطبيقات الكهربائية والتجارية، حيث يستخدمه العلماء لاستقصاء موضوعات أكثر تعقيدًا من تصادم كرات البلياردو.

8. الكرة الفولاذية سترتد إلى أعلى ارتفاع، تليها الكرة المطاطية، ثم كرة الصلصال التي قد لا ترتد على الإطلاق. نستنتج أن التصادمات المرنة (الفولاذية) تحافظ على الطاقة الحركية بشكل أفضل من التصادمات غير المرنة (الصلصال)، مما يؤدي إلى ارتداد أعلى.

21. مرة واحدة. بعد الاصطدام الأول، تحتفظ الكرة بـ 2/3 من طاقتها، فترتد إلى ارتفاع h1 = (2/3) * 8.0 m = 5.3 m، وهو أعلى من 4.0 m. بعد الاصطدام الثاني، ترتد إلى ارتفاع h2 = (2/3) * 5.3 m = 3.5 m، وهو أقل من 4.0 m.

26. الطاقة المفقودة = الطاقة الابتدائية – الطاقة النهائية = (PE_i) - (KE_f) = mgh
½mv^2 = (36.0 kg)(9.8 m/s^2)(2.5 m) - ½(36.0 kg)(3.0 m/s)^2 = 882 J - 162 J = 720 J
= 7.2 × 2^10 J.

مسألة تحفيز

تحركت رصاصة كتلتها m بسرعة v_1 فاخترقت قطعة خشب ساكنة وخرجت منها بسرعة v_2، فإذا كانت كتلة القطعة الخشبية m_B، وتحركت بعد التصادم بسرعة v_B، فما مقدار:

1. السرعة النهائية لقطعة الخشب v_B؟
2. الطاقة التي فقدتها للرصاصة؟
3. الطاقة التي فقدت بسبب الاحتكاك داخل القطعة الخشبية؟

23. لا، الطاقة الميكانيكية غير محفوظة. هذا تصادم غير مرن، حيث يتحول جزء من الطاقة الحركية إلى طاقة صوتية وحرارية وشغل مبذول لتحريك القطعة.

22. ب. تكون الطاقة الحركية للطفل عند أدنى قيمة لها (صفر) عند أعلى نقطة في مسار الأرجوحة.

2–5 مراجعة

21. **النظام المغلق** هل الأرض نظام مغلق ومعزول؟ دعّم إجابتك.

22. **الطاقة** قفز طفل عن منصة القفز (منصة البهلوان)، ارسم تمثيلاً بيانيًّا بالأعمدة يبين أشكال الطاقة الموجودة في الأوضاع الآتية:
   a. الطفل عند أعلى نقطة في مساره.
   b. الطفل عند أدنى نقطة في مساره.

22: أ. تكون طاقة الوضع للطفل عند أدنى قيمة لها عند أدنى نقطة في مسار الأرجوحة.

23. **الطاقة الحركية** افترض أن كرة من اللبان (العلكة) تصادمت مع كرة مطاطية صغيرة في الهواء، ثم ارتدتا إحداهما عن الأخرى. هل تتوقع أن تبقى الطاقة الحركية محفوظة؟ وإذا كان الجواب بالنفي فماذا حدث للطاقة؟

24. **الطاقة الحركية** تكون الكرة المستخدمة في تنس الطاولة كرة خفيفة جدًّا وصلبة، وتضرب بمضرب صلب (خشبي مثلاً). أما في التنس الأرضي فتكون الكرة أكثر ليونة، وتضرب بمضرب شبكي. فلماذا صُمّمت الكرة والمضرب في كل لعبة بهذه الطريقة؟ وهل تستطيع التفكير في كيفية تصميم كرة ومضرب تستخدمان في ألعاب رياضية أخرى؟

24. كرة التنس أكثر فعالية. يحدث ارتداد لكرة التنس (تصادم مرن نسبيًا)، مما يسبب تغيرًا أكبر في زخمها، وبالتالي نقل زخم أكبر إلى الصندوق مقارنة بقطعة الصلصال التي تلتصق بالصندوق (تصادم غير مرن تمامًا).

25. **طاقة الوضع** سقطت كرة مطاطية من ارتفاع 8.0 m على أرض أسمنتية صلبة، فاصطدمت بها وارتدت عنها عدة مرات، وفي كل مرة كانت تخسر $\frac{1}{5}$ مجموع طاقتها. كم مرة ستصطدم الكرة بالأرض حتى تصل إلى ارتفاع 4 m بعد الارتداد؟

26. **الطاقة** ينزلق طفل كتلته 36.0 kg على لعبة انزلاق ارتفاعها 2.5 m كما في **الشكل 14–5**. ويتحرك عند أدنى نقطة في اللعبة بسرعة 3.0 m /s، فما مقدار الطاقة المفقودة خلال انزلاقه؟

■ **الشكل 14–5**

27. **التفكير الناقد** سقطت كرة من ارتفاع 20.0 m وعندما وصلت إلى نصف الارتفاع، أي 10 m، كان نصف طاقتها طاقة وضع، والنصف الآخر طاقة حركة. عندما تستغرق الكرة في رحلتها نصف زمن سقوطها، فهل ستكون طاقة الوضع للكرة نصف طاقتها أم أقل أم أكثر؟

27. بالنسبة للسؤال عن الكرة الساقطة: ستكون طاقة الوضع للكرة أكبر من نصف طاقتها الكلية. لأن الجسم الساقط يتسارع، فإنه يقطع مسافة أكبر في النصف الثاني من زمن سقوطه مقارنة بالنصف الأول. لذلك عند منتصف زمن السقوط، يكون قد قطع أقل من نصف المسافة الكلية، وبالتالي لا يزال يمتلك أكثر من نصف طاقة وضعه الابتدائية.

التغير في درجة حرارة الماء هو الفرق بين درجة الحرارة النهائية والابتدائية. إذا كانت كمية الماء أكبر، فإن التغير في درجة الحرارة سيكون أصغر عند انتقال نفس كمية الحرارة من اليد، لأن الطاقة تتوزع على كتلة أكبر.

تجربة استهلالية

ما الذي يحدث عند تزويد كأس ماء بطاقة حرارية عن طريق حمله؟

سؤال التجربة مـا الذي يحدث لدرجة حـرارة الماء في الكأس عندما تحملها بيديك؟

الخطوات

1. ستحتاج إلى استعمال دورق سعته 250 ml وكمية من الماء مقدارها 150 ml.
2. اسكب الماء في الدورق.
3. سـجل درجة حرارة الماء الابتدائية بوضع مقياس الحرارة في الماء، على ألا يلامس مسـتودع المقياس قاعدة الدورق أو جوانبه.
4. أبعد مقياس الحرارة، وأمسـك بـدورق الماء مدة دقيقتين بكلتا يديك، كما في الشكل.
5. دع زميلك في المختبر يسـجل درجـة حرارة الماء النهائية بوضع مقياس الحـرارة في الدورق كما في الخطوة 3.

التحليل

احسب التغير في درجة حرارة الماء. وإذا كانت كمية الماء التي في الدورق أكبر، فهل يؤثر ذلك في تغير درجة الحرارة؟

التفكير الناقد فسر سبب تغير درجة حرارة الماء؟

6–1 درجة الحرارة والطاقة الحرارية Temperature and Thermal Energy

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

تسمى دراسـة تحولات الحرارة إلى أشـكال أخرى من أشكال الطاقة بالديناميكا الحرارية. وقد بدأت هذه الدراسـات في القرن الثامن عشر عندما كان المهندسـون يصنعـون المحركات البخاريـة الأولى. حيث استخدمت هذه المحركات في تشغيل القطارات، والمصانع، ومضخات المياه في مناجم الفحم، وساهمت في شـكل كبير في الثورة الصناعية في أوروبا والولايات المتحدة. ثم طور المهندسـون مفاهيم جديدة حول كيفية ارتباط الحرارة مع الشـغل المفيد في تصميم محركات أكثر كفاءة. وعلى الرغم من أن دراسـة الديناميـكا الحرارية بدأت في القرن الثامن عشر، إلا أنـه لم يتم الربط بـين مفاهيم الديناميـكا الحرارية وحركة الـذرات والجزيئات في المواد الصلبة والسـوائل والغازات حتى عام 1900 تقريبًا.

تُستخدم اليوم مفاهيم الديناميكا الحرارية على نطاق واسع في التطبيقات المختلفة، ويستخدم المهندسون قوانين الديناميكا الحرارية في تطوير أداء الثلاجات، ومحركات المركبات، والطائرات، وآلات أخرى.

الأهداف

- **تصف** الطاقة الحرارية وتقارنها بطاقة الوضع والطاقة الحركية.
- **تميز** بين درجة الحرارة والطاقة الحرارية.
- **تتعرّف** الحرارة النوعية.
- **تحسب** الحرارة المنقولة.

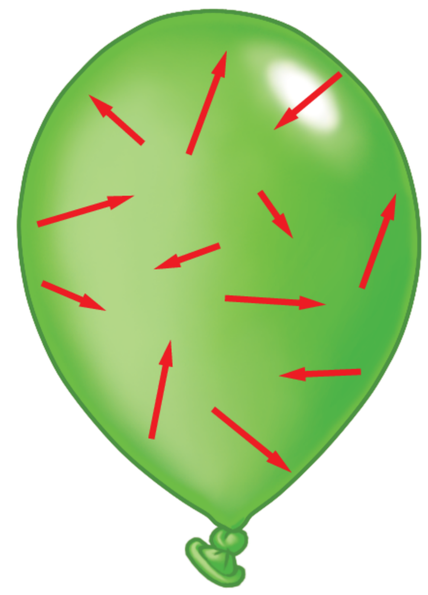
المفردات

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

تتغير درجة حرارة الماء بسبب انتقال الطاقة الحرارية (الحرارة) من اليد، وهي الجسم الأعلى في درجة الحرارة، إلى الماء، وهو الجسم الأدنى في درجة الحرارة. هذا الانتقال يزيد من متوسط الطاقة الحركية لجزيئات الماء، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته.

الطاقة الحرارية Thermal Energy

درست سابقًا كيف تتصادم الأجسام وتتبادل طاقاتها الحركية. فعلى سبيل المثال، الجزيئات الموجودة في غازٍ ما لهـا طاقات حركية خطية ودورانية. وقد يكون للجزيئات طاقة وضع خلال اهتزازها وترابطها، فتصطدم مثلاً جزيئات الغاز بعضها ببعض ومع جدران الوعاء الذي يحويها؛ إذ تنتقل الطاقة فيما بينها خلال هذه العملية. وتتحرك عدة جزيئات بحرِّية في الغاز، مؤدية إلى عدة تصادمات؛ لذا يكون من المناسـب مناقشة الطاقة الكلية للجزيئات، ومتوسط الطاقة لكل جزيء. وتسمى الطاقة الكلية للجزيئات **بالطاقة الحرارية**. ويرتبط متوسط الطاقة لكل جزيء بدرجة حرارة الغاز.



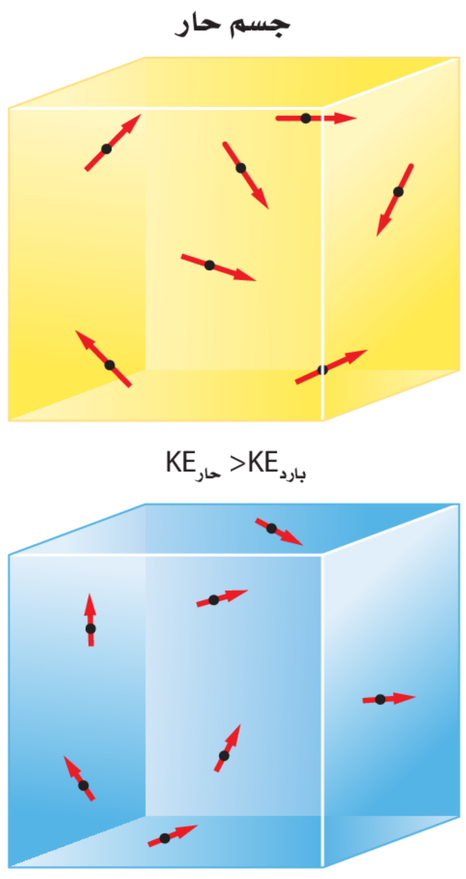
بالون هيليوم

■ **الشكل 1–6** تصطدم ذرات الهيليوم في البالون بالجدار المطاطي، وتسبب تمدد البالون.

الأجسام الساخنة ما الذي يجعل الجسم سـاخنًا؟ عندما تملأ بالونًا بغاز الهيليوم يتمدد مطاط البالون بفعل تصادم ذرات الغاز بجدار البالون بشـكل متكرر؛ إذ تصطدم كل ذرة من بلايين ذرات غاز الهيليوم التي في البالون بجداره المطاطي، ثم ترتد إلى الخلف لتصطدم بالطرف الآخر من البالون، كما هو موضح في **الشكل 1–6**، وقد تلاحظ أن البالون يصبح أكبر قليلًا إذا عرضته لأشـعة الشمس؛ لأن طاقة أشعة الشمس تجعل ذرات الغاز تتحرك أسرع؛ لذا تصطدم بالجدار بمعدل أكبر. ويؤدي كل تصادم ذري إلى إحداث قوة أكبر على جدار البالون؛ ولذا يتمدّد المطاط، ممّا يؤدي إلى تمدد البالون كليًّا.

أما إذا برّدتَ البالون فسـتلاحظ أنه ينكمش قليـلاً؛ لأن خفض درجة الحرارة يبطئ من حركـة ذرات الهيليوم. وهكذا فـإن تصادماتها لا تنقل زخمًا يكفي لجعـل البالون يتمدد بصورة كافية. وعلى الرغم من أن البالون يحتوي عدد الذرات نفسه، إلا أنه ينكمش.

المواد الصلبة لذرات المواد الصلبة طاقة حركية أيضًا، ولكنها لا تتمكن من الحركة بحرية مثل ذرات الغاز. والطريقة الوحيدة لتصور التركيب الجزيئي للمادة الصلبة، تكون برسم عدد من الذرات المرتبطة معًا بنوابض تسمح لها بالحركة في صورة ارتدادات مختلفة الشدة إلى الأمـام، وإلى الخلف. ويكون لكل ذرة بعض الطاقة الحركية، وطاقة الوضع من خلال النوابض المرتبطـة معها. فإذا وجدت مادة صلبة تحتوي العدد N من الذرات، فإن الطاقة الحرارية الكلية في المادة الصلبة تساوي متوسط طاقتي الحركة، والوضع لكل ذرة، مضروبًا في العدد N.



■ **الشكل 2–6** طاقة الحركة والوضع لجزيئات الجسم الساخن أكبر منها لجزيئات الجسم البارد.

الطاقة الحرارية ودرجة الحرارة Thermal Energy and Temperature

للجسـم السـاخن طاقة حرارية أكبر من الجسـم البارد المشـابه له، كـما هوموضح في **الشكل 2–6**، مما يعني أن الجزيئات في الجسم الساخن لها طاقة حرارية أكبر من الجزيئات في الجسم البارد. وهذا لا يعني أن جميع الجزيئات داخل الجسم لها كمية الطاقة نفسها، إنما لها مدى واسـع من قيم الطاقة، ولجزيئات الجسم الساخنة متوسط طاقة أكبر من متوسط

طاقة جزيئات الجسم البارد. ولفهم هذا افترض أنك تعرف أطوال طلاب الصف الثاني المتوسط والصف الثالث الثانوي مثلاً، وأنك تستطيع حساب متوسط الطول لطلاب الصف الثالث الثانوي. وهذا المتوسط يميل إلى أن يكون أكبر من متوسط الطول لطلاب الصف الثاني المتوسط، على الرغم من أنه يمكن أن يكون بعض طلاب الصف الثاني المتوسط أطول من بعض طلاب الصف الثالث الثانوي.

درجة الحرارة تعتمد درجة الحرارة على متوسط الطاقة الحركية للجزيئات في الجسم فقط. ولأن درجة الحرارة تعتمد على متوسط طاقة حركة الجزيئات، فإنها لا تعتمد على عدد الذرات في الجسم. ولفهم ذلك افترض وجود قالبين من الحديد، الأول: كتلته 1 kg، والثاني: كتلته 2 kg. فإذا كان للقالبين درجة الحرارة نفسها فإن متوسط الطاقة الحركية للجزيئات في أيّ منهما هي نفسها، على الرغم من أن القالب الثاني له ضعف كتلة القالب الأول. وبما أن القالب الثاني يحتوي ضعف عدد الجزيئات الموجودة في القالب الأول، فإن كمية الطاقة الحركية الكلية لجزيئات القالب الثاني تساوي ضعف كمية الطاقة الحركية الكلية لجزيئات القالب الأول. وتقسم الطاقة الحركية الكلية على عدد الجزيئات الموجودة في الجسم لحساب متوسط الطاقة الحركية؛ لذا تتناسب الطاقة الحرارية في الجسم مع عدد الجزيئات فيه، في حين أن درجة الحرارة لا تعتمد على عدد الجزيئات في الجسم.

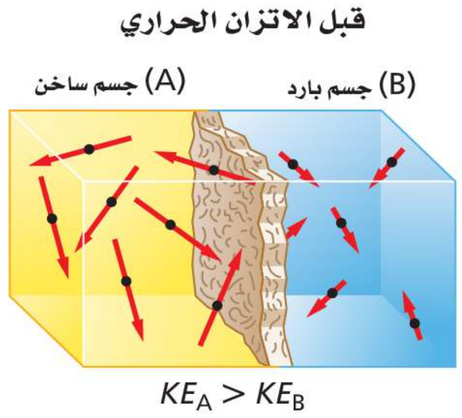
الاتزان والقياس الحراري
Equilibrium and Thermometry

كيف تقيس درجة حرارة جسمك؟ إذا اشتبهت مثلاً في أنك مصاب بالحمى، فقد تضع مقياس حرارة في فمك وتنتظر دقيقتين إلى ثلاث دقائق قبل أن تنظر إلى قراءة درجة الحرارة على المقياس. إن النظرة المجهرية لعملية قياس درجة الحرارة تتضمن التصادمات وانتقالات الطاقة بين مقياس الحرارة وجسمك. وإن كان جسمك ساخنًا مقارنة بمقياس الحرارة فذلك يعني أن الجزيئات في جسمك لها طاقة حرارية أكبر، وتتحرك بسرعة أكبر من الجزيئات التي في المقياس. وعندما يلامس أنبوب المقياس الزجاجي البارد جلدك الأدفأ من الزجاج، فإن الجزيئات المتحركة بسرعة في جلدك تصطدم بالجزيئات المتحركة ببطء في الأنبوب الزجاجي، فتنتقل الطاقة عندئذ من جلدك إلى الزجاج عن طريق عملية **التوصيل الحراري**، والتي تعني انتقال الطاقة الحركية عندما تتصادم الجزيئات. أيْ أن الطاقة الحرارية للجزيئات المكوّنة لمقياس الحرارة تزداد، وفي الوقت نفسه تتناقص الطاقة الحرارية للجزيئات في الجلد.

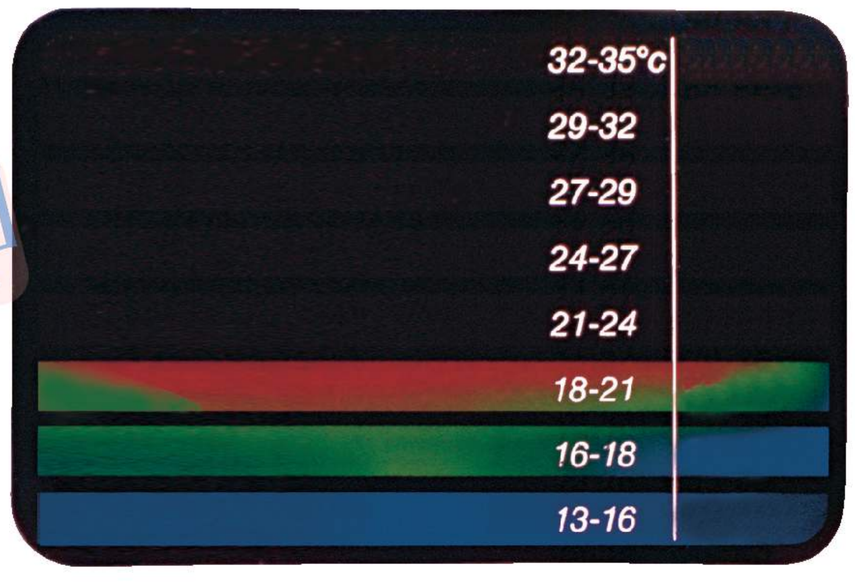
الاتزان الحراري في أثناء اكتساب جزيئات الزجاج المزيد من الطاقة فإنها تبدأ في إرجاع بعض هذه الطاقة إلى جزيئات جسمك. ويصبح معدل انتقال الطاقة من الزجاج إلى الجسم مساويًا لمعدل انتقال الطاقة من الجسم إلى الزجاج عند اللحظة التي تتساوى فيها درجتا حرارة الجسم ومقياس الحرارة. ويقال عندئذٍ: إن الجسم ومقياس الحرارة وصلا

إلى **الاتــزان الحراري**، أي أن حالة الاتزان الحراري هي الحالــة التي يصبح عندها معدلا تدفق الطاقة بين جســمين متساوي، ويكون لكلا الجسمين درجة الحرارة نفسها، كما يبين **الشكل 3–6**.

يعتمد عمل مقياس الحــرارة على خاصية معينة، مثل الحجم، والــذي يتغير بتغير درجة الحرارة. ويحتوي العديد من مقاييس الحرارة المنزلية على كحول ملون يتمدّد عندما يسخن ويرتفع داخل أنبــوب ضيق، وكلما زادت درجة حرارة الكحــول تمدد حجمه أكثر فزاد ارتفاعه في الأنبوب، مشيرًا إلى درجة حرارة أعلى. وفي مقاييس الحرارة السائلة – البلورية، كما في **الشكل 4–6**، تستخدم مجموعة من السوائل البلورية المختلفة، بحيث تترتب بلورات الجزيئات لكل نوع عند درجة حرارة محددة، مما يؤدي إلى تغير لون البلورة. ومن ثم تشير إلى درجة الحرارة من خلال اللون. أمّا المقاييس الحرارية الطبية والمقاييس المستخدمة في محركات المركبات فإنها تستخدم دوائر إلكترونية حساسة للحرارة فتقيس درجات الحرارة بسرعة.



■ **الشكل 3–6** تنتقل الطاقة الحرارية من الجسم الساخن إلى الجسم البارد. وعند حدوث الاتزان الحراري يكون انتقال الطاقة بين الجسمين متساويًا.

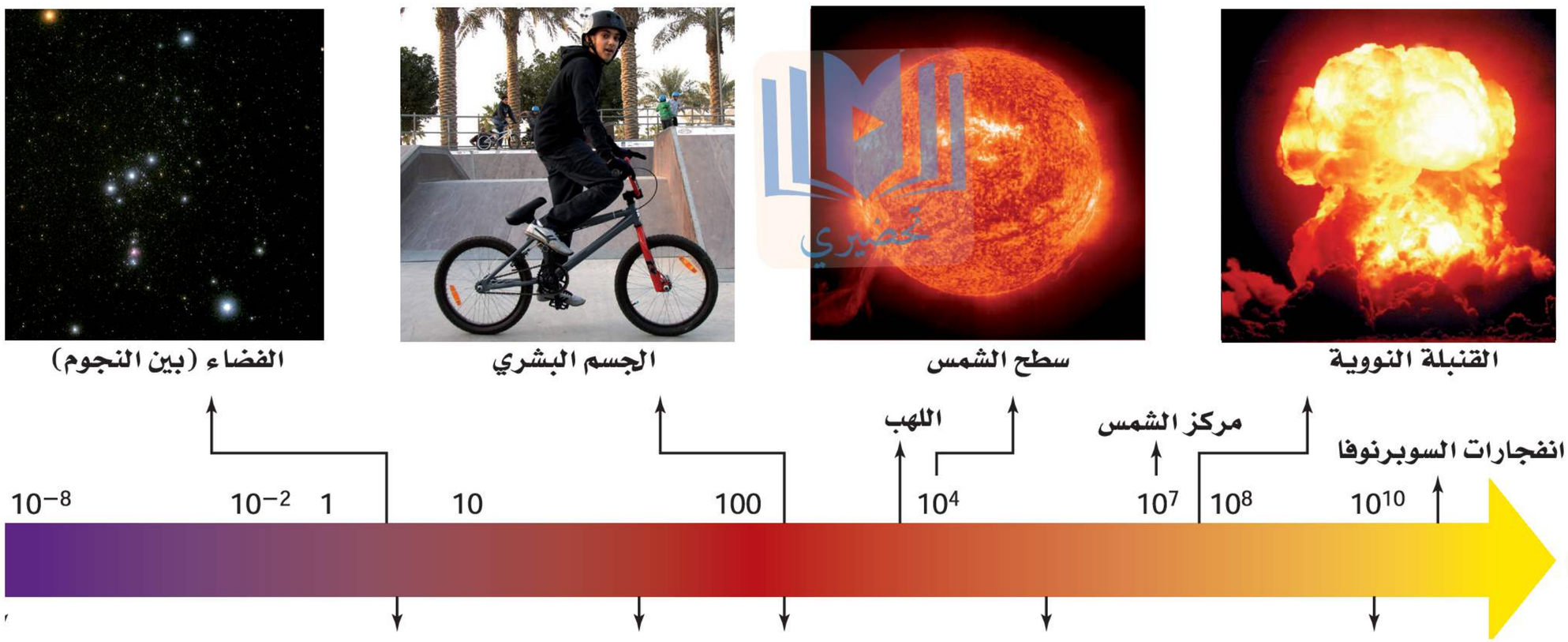


■ **الشكل 4–6** تستخدم مقاييس الحرارة التغير في الخصائص الفيزيائية لقياس درجة الحرارة، وفي مقياس الحرارة السائل – البلوري يتغير اللون بتغير درجة الحرارة.

مقياسا درجة الحرارة: السلسيوس والكلفن
Temperature Scales: Celsius and Kelvin

طور العلماء على مر الســنين مقاييس لدرجة الحرارة حتى يتمكنوا من مقارنة قياســاتهم بقياســات العلماء الآخرين. فلقد ابتكر عالم الفلك والفيزياء السويدي أندريه سلسيوس عام 1741 م مقياسًــا يعتمــد على خصائص الماء. ففي هذا المقياس – الذي يســمى الآن مقياس سلسيوس– تُعرّف نقطة تجمد الماء النقي لتكون 0 °C، ونقطة غليان الماء النقي عند مستوى سطح البحر لتكون 100 °C.

حدود درجة الحرارة يوضّح **الشــكل 5–6** المدى الواســع لدرجات الحرارة الموجود في الكون. ولا يبــدو أن هناك حدًّا أعلى لدرجات الحرارة؛ فدرجة الحرارة داخل الشــمس 1.5×10^7 °C عــلى الأقل. من جهة أخرى هناك حدّ أدنــى لدرجات الحرارة؛ تتقلص الموادّ، عمومًا، عند تبريدها، فمثلاً إذا تم تبريد غاز مثالي مثل الهيليوم في بالون فإنّه يتقلص،



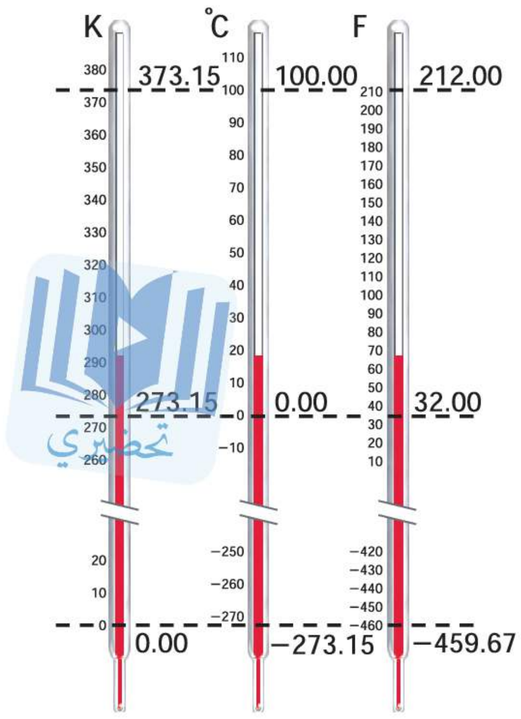
■ **الشكل 5–6** يوجد مدى واسع جدًّا من درجات الحرارة في الكون. لاحظ أن مدى القياس تم توسيعه في المناطق ذات الأهمية الخاصة.

فإذا بلغت درجة حرارته 273.15 °C– يصبح حجمه مساويًا لحجم ذرات الهيليوم فقط، وتتلاشى الفراغات بين الذرات، وتفقد ذرات الغاز طاقتها الحرارية كاملة، ويصبح من المستحيل تخفيض درجة الحرارة إلى أقل من ذلك؛ لذا لا يكون هنالك درجة حرارة أقل من 273.15 °C– والتي تعرف بالصفر المطلق.

إن مقياس سلسيوس مفيد في القياسات اليومية لدرجة الحرارة، غير أن استخدامه في المسائل العلمية والهندسية غير عملي؛ لأنه يحتوي على درجات سالبة؛ إذ أن درجات الحرارة السالبة قد توحي بأن للجزيء طاقة حركية سالبة، وهذا غير ممكن؛ لأن الطاقة الحركية دائمًا موجبة. والحل لهذه القضية يكون باستخدام تدريج قياس يبدأ من الصفر المطلق. ويسمى هذا المقياس الكلفن.

إن نقطة الصفر في مقياس كلفن تعرف بأنها الصفر المطلق. ووفقًا لمقياس كلفن فإن نقطة تجمد الماء (0 °C) هي 273 K تقريبًا، ونقطة غليان الماء هي 373 K تقريبًا. وتسمى الدرجة الواحدة على هذا المقياس كلفن، وتساوي 1 °C، لذا يكون $T_K = T_C + 273$. ويوضح **الشكل 6–6** تمثيلاً لدرجات الحرارة في المقاييس الثلاثة الشائعة الاستخدام: الفهرنهايت، والسلسيوس، والكلفن.

يتم الوصول إلى درجات الحرارة المنخفضة جدًّا من خلال جعل الغازات سائلة، فمثلًا يصبح الهيليوم سائلاً عند درجة 4.2 K، أو 269 °C–. ويمكن أيضًا الوصول إلى درجات حرارة منخفضة باستخدام خصائص معينة للمواد الصلبة، ونظائر الهيليوم، والذرات والليزر.



■ **الشكل 6–6** مقاييس درجة الحرارة الثلاثة الشائعة وهي الكلفن، والسلسيوس، والفهرنهايت.

2. a. درجة حرارة الغرفة (تقديريًا): T = 25 °C = 298 K
b. درجة حرارة نموذجية (تقديريًا): T = 20 °C = 293 K
c. يوم صيفي حار في الرياض (تقديريًا): T = 45 °C = 318 K
d. ليلة شتاء في تبوك (تقديريًا): T = 5 °C = 278 K

مسائل تدريبية

1. حوّل درجات الحرارة الآتية من مقياس كلفن إلى مقياس سلسيوس.

a. 115 K	c. 125 K	e. 425 K
b. 172 K	d. 402 K	f. 212 K

2. احسب درجات الحرارة بالكلفن والسلسيوس لكل ممّا يأتي:

a. درجة حرارة الغرفة
b. ثلاجة نموذجية
c. يوم صيفي حار في مدينة الرياض
d. إحدى ليالي الشتاء في مدينة تبوك

a. 115 - 273 = 158- °C
b. 172 - 273 = 101- °C
c. 425 - 273 = 152 °C
d. 402 - 273 = 129 °C
e. 125 - 273 = 148- °C
f. 212 - 273 = 61- °C

تحضيري

الحرارة وتدفق الطاقة الحرارية
Heat and the Flow of Thermal Energy

عندما يتلامس جسمان يتناقلان طاقة. وهذه الطاقة التي تنتقل بين الجسمين تسمى **الحرارة**. وتوصف الحرارة بأنها الطاقة التي تتدفق دائمًا من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد، ولا تنتقل الحرارة تلقائيًّا من الجسم الأبرد إلى الجسم الأسخن أبدًا. ويستخدم الرمز Q لتمثيل كمية الحرارة، والذي له نفس وحدة أشكال الطاقة الأخرى، وهي الجول، وإذا كانت Q سالبة القيمة فذلك يعني أن الحرارة تنبعث من الجسم، أما إذا كانت Qموجبة القيمة فذلك يعني أن الجسم امتص الحرارة.

التوصيل الحراري إذا وضعت نهاية قضيب معدني في لهب فإن جزيئات الغاز الحارة في اللهب ستوصل الحرارة إلى القضيب. ويصبح الطرف الآخر للقضيب دافئًا أيضًا خلال فترة زمنية قصيرة. لقد تم إيصال الحرارة؛ لأن الجزيئات في القضيب كانت تتلامس معًا مباشرة.

الحمل الحراري يحدث انتقال للطاقة الحرارية حتى لو لم تكن الجزيئات في الجسم يلامس بعضها بعضًا مباشرة. فهل شاهدت مرة دورق ماء عند لحظة الغليان؟ يسخن الماء الموجود في القاع بفعل التوصيل ويصعد إلى أعلى، في حين ينزل الماء الأبرد من أعلى نحو قاع الدورق. وتتدفق الحرارة بين الماء الساخن الصاعد والماء البارد النازل. وتُسمى حركة المائع في المادة السائلة أو الغازية التي تحدث بسبب اختلاف درجة الحرارة **الحمل الحراري**. ويحدث الاضطراب الجوي بسبب الحمل الحراري للغازات الموجودة في الغلاف الجوي. وتعتبر العواصف الرعدية مثالاً على هذه الظاهرة. وتنتج التغيرات في أنماط الطقس أيضًا بسبب ظاهرة الحمل الحراري للتيارات المائية في المحيطات.

تطبيق الفيزياء

التدفئة بالبخار

في نظام التدفئة بالبخار لمبنى ما، يُحوَّل الماء إلى بخار في مرجل موجود في منطقة الصيانة أو أسفل البناء. ثم يتدفق البخار داخل أنابيب معزولة ليصل إلى كل غرفة في المبنى. ويتكثف البخار داخل مشعاع حراري على شكل ماء، ثم يتدفق عائدًا عبر الأنابيب إلى المرجل ليعاد تبخيره. يحمل البخار الساخن الحرارة من داخل المرجل، ثم تتحرر تلك الطاقة عندما يتكثف البخار داخل مشعاع الحرارة. ومن سلبيات نظام التدفئة بالبخار أنه يتطلب مراجل وأنابيب ذات تكلفة مرتفعة لتستطيع نقل البخار المضغوط.

الحمل الحراري فعال في التبريد لأنه يتضمن حركة الموائع. المائع الساخن القريب من الجسم يرتفع أو يتحرك بعيدًا، ويحل محله مائع أبرد، مما يخلق دورة مستمرة تسحب الحرارة من الجسم بكفاءة.

الإشعاع الحراري هو الطريقة الثالثة للانتقال الحراري. وهو لا يشبه الطريقتين السابقتين؛ إذ لا يعتمد على وجود مادة. تعمل الشمس على تسخين الأرض من بُعد 150 مليون كيلومتر عن طريق **الإشعاع الحراري**، والذي يمثل انتقال الطاقة عن طريق الموجات الكهرومغناطيسية. حيث تعمل الموجات على نقل الطاقة من الشمس الحارة خلال الفراغ الفضائي إلى الأرض الأكثر برودة.

الربط مع الأرصاد الجوية

تنقل الشمس طاقتها عبر فراغ الفضاء على شكل موجات كهرومغناطيسية، وهي عملية تعرف بالإشعاع الحراري. عندما تصل هذه الموجات إلى الأرض، يمتصها سطح الأرض والغلاف الجوي، فتتحول طاقتها إلى طاقة حرارية، مما يؤدي إلى تسخين كوكبنا.

الحرارة النوعية Specific Heat

تختلف الأجسام في اكتسابها للحرارة، فبعضها يكتسب الحرارة أسهل من غيرها. ففي يوم صيفي مشمس تعمل الشمس على تسخين ماء البحر و الرمل عند الشاطئ. وعلى الرغم من تعرضهما للطاقة الحرارية من المصدر نفسه (الشمس) وخلال الفترة الزمنية نفسها، إلا أن الرمل يصبح أكثر سخونة من ماء البحر. وعندما تنتقل الحرارة إلى داخل جسم ما؛ فإن كلا من طاقته الحرارية ودرجة حرارته تزداد. ويعتمد مقدار الزيادة في درجة الحرارة على كتلة الجسم، ونوع مادته.

الجدول 1–6

الحرارة النوعية للموادّ الشائعة

المادة	الحرارة النوعية (J/ kg. K)	المادة	الحرارة النوعية (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		

إن **الحرارة النوعية** للمادة هي كمية الطاقة التي يجب أن تكتسبها المادة لترتفع درجة حرارة وحدة الكتل من هذه المادة درجة سلسيوس واحدة. ويرمز للحرارة النوعية بالرمز C وتقاس بوحدات J /kg.K في نظام الوحدات العالمي، ويبين **الجدول 1–6** قيم الحرارة النوعية لبعض المواد المعروفة، فعلى سبيل المثال، يجب نقل طاقة مقدارها 897 J إلى كتلة مقدارها 1 kg من الألومنيوم لرفع درجة حرارتها 1 K؛ لذا تكون الحرارة النوعية للألمنيوم 897 J /kg.K.

نعم، الوحدات صحيحة. كمية الحرارة (Q) هي شكل من أشكال الطاقة، ووحدة قياس الطاقة في النظام الدولي للوحدات (SI) هي الجول (J).

إن مقدار الحرارة التي يكتسبها جسم ما أو يفقدها عند تغير درجة حرارته يعتمد على كتلته، وعلى التغير في درجة حرارته ، وعلى الحرارة النوعية لمادة الجسم. وتستطيع باستخدام المعادلة الآتية حساب كمية الحرارة Q، اللازم نقلها لتغيير درجة حرارة الجسم.

كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة $Q = mC\Delta T = mC\,(T_f - T_i)$

كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة تساوي كتلة الجسم مضروبة في حرارته النوعية وفي الفرق بين درجتي حرارته النهائية والابتدائية.

نعم، الإشارات مهمة جدًا. الإشارة الموجبة لـ Q تعني أن الجسم اكتسب حرارة (أي أن درجة حرارته ارتفعت). أما الإشارة السالبة فتعني أن الجسم فقد حرارة (أي أن درجة حرارته انخفضت).

للماء السائل حرارة نوعية مرتفعة مقارنة بالمواد الأخرى في الجدول **1–6**. ولذا فعندما ترتفع درجة حرارة 10.0 kg من الماء بمقدار 5.0 K فإن الطاقة الممتصة هي:

$$Q = (10.0\,\text{kg})\,(4180\,\text{J/kg.K})\,(5.0\,\text{K}) = 2.1 \times 10^5\,\text{J}$$

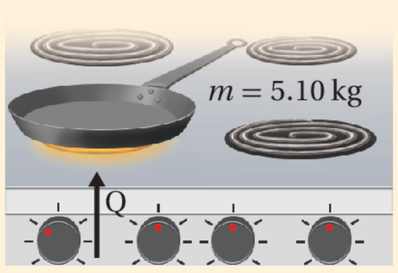
تذكّر أن التدريج الواحد في مقياس كلفن يعادل تدريجًا واحدًا بمقياس سلسيوس، ولهذا السبب تستطيع حساب ΔT بوحدة الكلفن أو السلسيوس.

مثـــال 1

انتقال الحرارة إذا تم تسخين مقلاة من الحديد الصلب كتلتها 5.10 kg على موقد؛ فارتفعت درجة حرارتها من 295 K إلى 450 K، فما مقدار كمية الحرارة التي يكتسبها الحديد؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم تدفق الحرارة نحو المقلاة من قمة الموقد.



المعلوم

$C = 450\,\text{J/kg.K}$ $\quad m = 5.10\,\text{kg}$

$T_f = 450\,\text{K}$ $\quad T_i = 295\,\text{K}$

المجهول

$Q = ?$

دليل الرياضيات

ترتيب العمليات213

2 إيجاد الكمية المجهولة

عوّض مستخدمًا

$$Q = m\,C\,(T_f - T_i)$$

$m = 5.10\,\text{kg}$، $C = 450\,\text{J/kg.K}$، $T_f = 450\,\text{K}$، $T_i = 295\,\text{K}$

$$= (5.10\,\text{kg})(450\ \text{J/kg.K})(450\,\text{K} - 295\,\text{K})$$

$$= 3.6 \times 10^5\,\text{J}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس كمية الحرارة بوحدة J.
- **هل الإشارات مهمة هنا؟** زادت درجة الحرارة؛ لذا تكون Q موجبة.

Q = mcΔT = (2.3 kg)(4180 .3
= J/kg·°C)(80.0 °C - 20.0 °C)
J 5^10 × 5.8

مسائل تدريبية

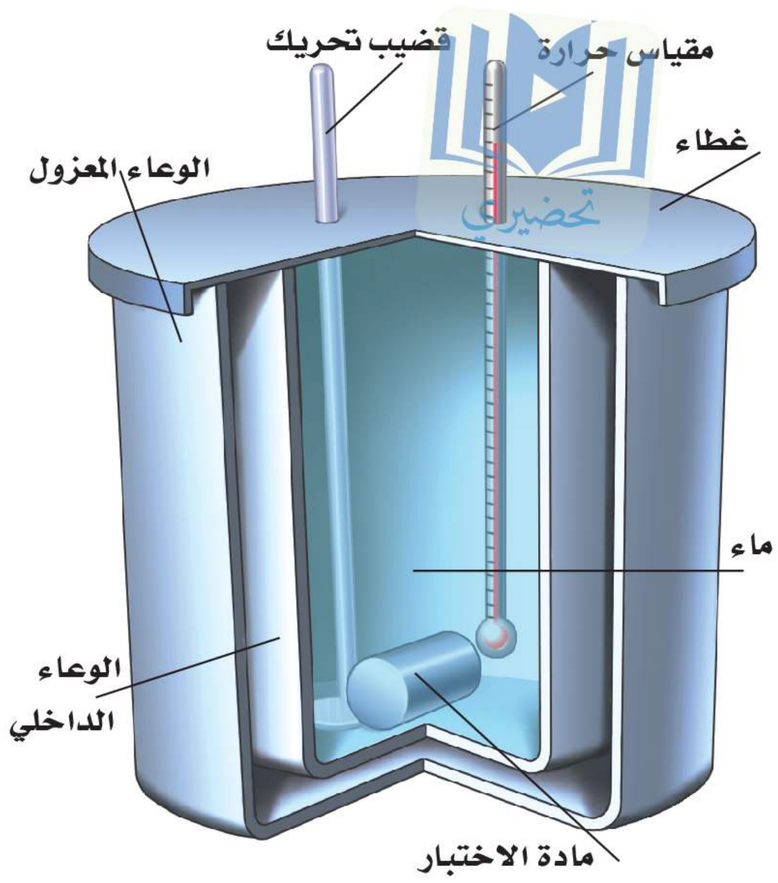
3. عندما تفتح صنبور الماء الساخن لغسل الأواني فإن أنابيب المياه تسخن. فما مقدار كمية الحرارة التي يمتصها أنبوب ماء نحاسي كتلته 2.3 kg عندما ترتفع درجة حرارته من 20.0 °C إلى 80.0 °C؟
4. يحتوي نظام التبريد لسيارة على 20.0 L من الماء. علمًا بأن كتلة لتر واحد من الماء تساوي 1kg.
   a. إذا اشتغل المحرك حتى حصل على 836.0 kJ من الحرارة، فما مقدار التغير في درجة حرارة الماء؟
   b. إذا كان الفصل شتاءً، ونظام التبريد في السيارة مملوءًا بالميثانول ذي الكثافة 0.80 g /cm³ فما مقدار الزيادة في درجة حرارة الميثانول إذا امتص 836.0 kJ من الحرارة؟
   c. أيهما يُعد مبرِّدًا أفضل، الماء أم الميثانول؟ فسِّر إجابتك.
5. تبيع شركات الكهرباء الطاقة الكهربائية بوحدة kWh، حيث إن 1 kWh = 3.6 × 10⁶ J. افترض أن ثمن كل 1 kWh يساوي 0.15 ريال. فما تكلفة تسخين 75 kg من الماء من درجة حرارة 15 °C إلى 43 °C؟

Q = mcΔT = (75 kg)(4180 .5
J/kg·°C)(43°C - 15°C) = 8.8 × 10^6 J
× kWh = (8.8 × 10^6 J) / (الطاقة بـ 3.6)
J/kWh) = 2.44 kWh 6^10
kWh/ريال kWh × 0.15 2.44 = التكلفة
= 0.37 ريال.

المسعر: Calorimeter

قياس الحرارة النوعية Measuring Specific Heat

إن المسعر البسيط كما في **الشكل 7–6**، أداة تستخدم لقياس التغير في الطاقة الحرارية. ويكون المسعر معزولاً تمامًا، بحيث يكون انتقال الطاقة إلى المحيط الخارجي أقل ما يمكن. وتوضع كتلة مقيسة من مادة مسخنة عند درجة حرارة عالية داخل المسعر الذي يحتوي أيضًا على كتلة معروفة من الماء البارد وتكون درجة حرارة الماء معروفة أيضًا. فتنتقل الحرارة المفقودة من المادة إلى الماء البارد، ثم يحسب التغير في الطاقة الحرارية للمادة من خلال الزيادة الحاصلة في درجة حرارة الماء. وهناك أنواع أخرى من المسعرات تستعمل لقياس التفاعلات الكيميائية ومحتوى الأطعمة من الطاقة.



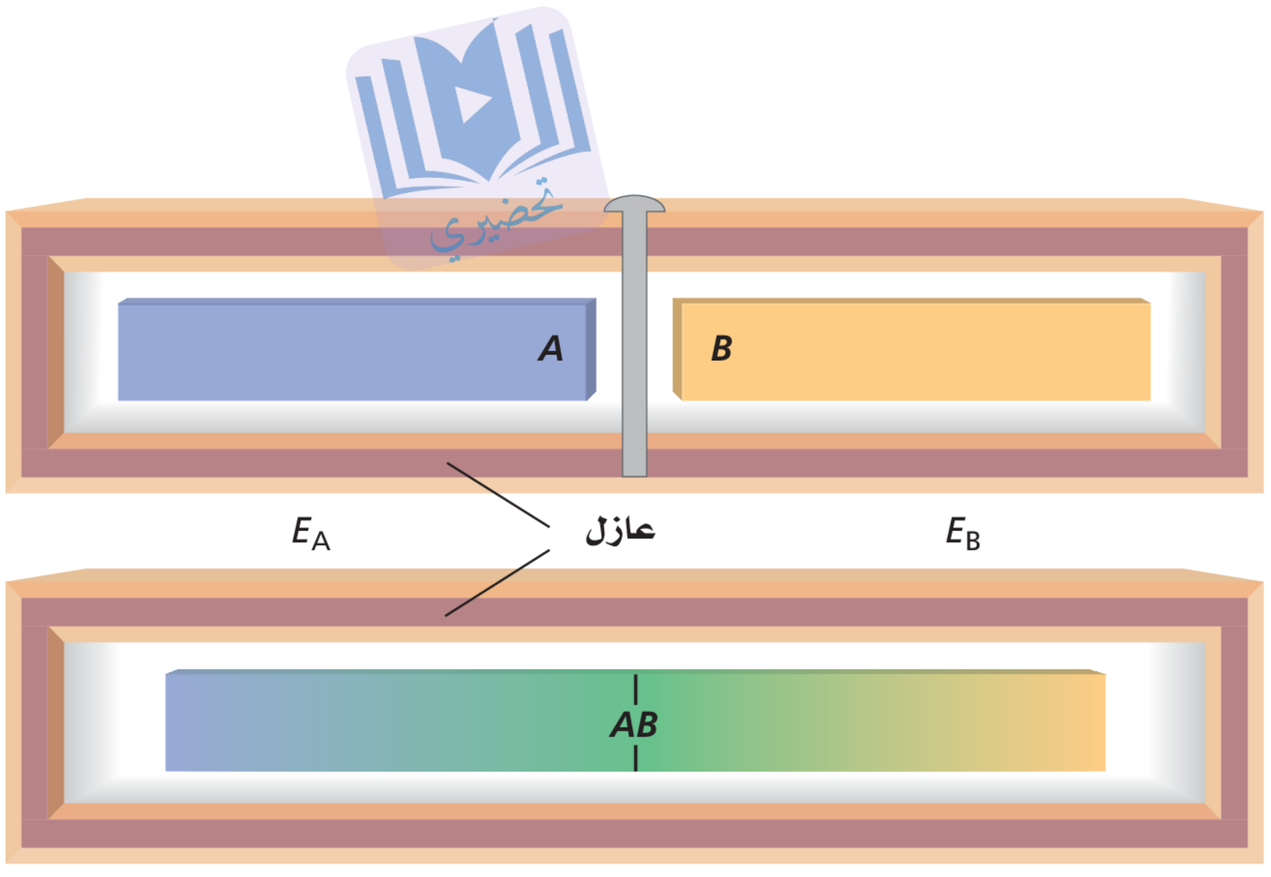
■ **الشكل 7–6** يمثل المسعر النظام المغلق والمعزول، ويستخدم لقياس انتقال الطاقة الحرارية.

يعتمد عمل المسعر على مبدأ حفظ الطاقة في النظام المغلق والمعزول، بحيث لا تدخل الطاقة هذا النظام أو تغادره. ونتيجة لذلك، إذا ازدادت طاقة جزء معين من النظام فإن طاقة جزء آخر يجب أن تنقص بالمقدار نفسه. افترض أن النظام مكون من قالبين من المعدن A و B، كما في **الشكل 8a–6**. فتكون الطاقة الكلية للنظام ثابتة، كما في المعادلة الآتية:

حفظ الطاقة $E_A + E_B =$ ثابت

الطاقة الحرارية في النظام المغلق والمعزول للجسم A مضافًا إليها الطاقة الحرارية للجسم B تساوي مقدارًا ثابتًا.

a. ΔT = Q / mc = (836.0 × 10^3 J) / (1 kg)(4180 J/kg·°C) = 200 °C
b. بافتراض أن كتلة الإيثانول 1 1) / (836.0 × 10^3 J) = ΔT = Q / mc، kg
kg)(2450 J/kg·°C) = 341 °C
c. الماء يُعد مبردًا أفضل لأن حرارته النوعية أعلى بكثير من الإيثانول، مما يسمح له بامتصاص كمية أكبر من الحرارة لكل وحدة كتلة مقابل نفس الارتفاع في درجة الحرارة.



■ **الشكل 8–6** نظام مكون من نموذجين لقالبين عند درجات حرارة مختلفة، وهما مفصولان في الحالة الابتدائية (a). وعندما يتلامس القالبان فإن الحرارة تتدفق من القالب الساخن إلى القالب الأبرد (b). وتبقى الطاقة الكلية ثابتة.

افترض في البداية أن القالبين منفصلان، ومن الممكن جعلهما يتلامسان. فإذا تغيرت الطاقة الحرارية للقالب A بمقدار ΔE_A فإنّ التغير في الطاقة الحرارية للقالب B يساوي ΔE_B، كما يُمكن وصف التغير من خلال المعادلة $\Delta E_A + \Delta E_B = 0$؛ لذا يكون $\Delta E_A = -\Delta E_B$، أي أن تغير الطاقة لأحد القالبين موجب، في حين يكون تغير الطاقة للقالب الآخر سالبًا. ويكون هنالك ازدياد في درجة حرارة القالب ذي التغير الموجب في طاقته الحرارية، ونقصان في درجة حرارة القالب ذي التغير السالب في طاقته الحرارية.

افترض أن درجتي الحرارة الابتدائية للقالبين مختلفتان. عندما يتلامس القالبان، تتدفق الحرارة من القالب الأسخن إلى القالب الأبرد، كما في **الشكل 8b–6**. ويستمر تدفق الحرارة حتى يصبح القالبان في حالة اتزان حراري، وذلك عندما يكون للقالبين درجة الحرارة نفسها.

يكون التغير في الطاقة الحرارية لأحد مكونات النظام المغلق والمعزول مساويًا لكمية الحرارة المنقولة، وذلك ناجم عن عدم بذل أي شغل؛ لذا يعبر عن تغير الطاقة لكل قالب بالمعادلة الآتية:

$$\Delta E = Q = mC\Delta T$$

ولأن الزيادة في الطاقة الحرارية للقالب A تساوي النقصان في الطاقة الحرارية للقالب B فإن العلاقة الآتية صحيحة:

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

إن التغير في درجة الحرارة هو الفرق بين درجتي الحرارة الابتدائية والنهائية؛ أيْ أن

$$\Delta T = T_f - T_i$$

فإذا زادت درجة حرارة القالب فـإن $T_f > T_i$، وتكون ΔT موجبة. وإذا نقصت درجة حـرارة القالب فـإن $T_f < T_i$ ، وتكون ΔT سـالبة، ودرجتا الحـرارة النهائية للقالبين متساويتين. وتمثل المعادلة الآتية انتقال الطاقة.

$$m_A C_A (T_f - T_A) + m_B C_B (T_f - T_B) = 0$$

حل المعادلة بالنسبة لِـ T_f وذلك بفك الأقواس:

$$m_A C_A T_f - m_A C_A T_A + m_B C_B T_f - m_B C_B T_B = 0$$

$$T_f (m_A C_A + m_B C_B) = m_A C_A T_A + m_B C_B T_B$$

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

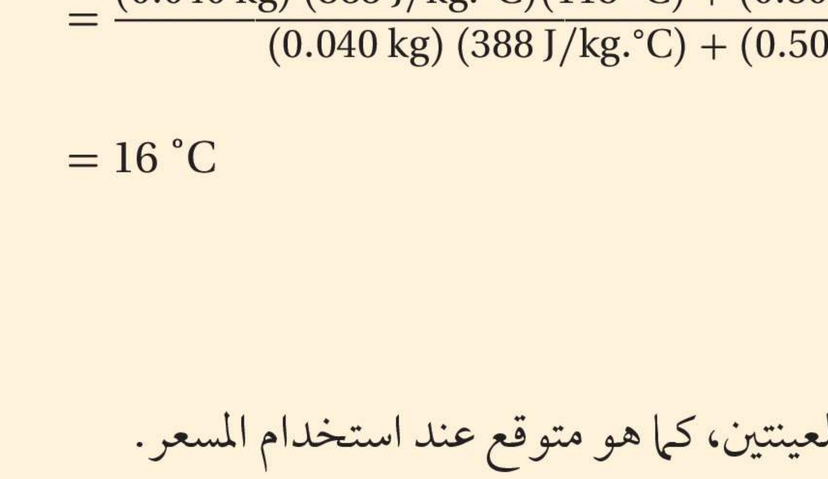
نعم، الوحدات صحيحة. على الرغم من أن وحدات السعة الحرارية النوعية تستخدم الكلفن، إلا أن التغير في درجة الحرارة (ΔT) هو نفسه على مقياسي سليسيوس وكلفن، لذا يمكن استخدام درجات الحرارة بالسليسيوس مباشرة في الحسابات.

مثـــال 2

انتقال الحرارة في المسعر يحتوي مسعر على ماء كتلته 0.50 kg عند درجة حرارة 15 °C، فإذا وضع قالب من الخارصين كتلته 0.040 kg ودرجة حرارته 115 °C في الماء. فما درجة الحرارة النهائية للنظام؟

1 تحليل المسألة ورسمها

- سمِّ عينة الخارصين A، وعينة الماء B.
- ارسم انتقال الحرارة من الخارصين الساخن إلى الماء البارد



المعلوم	المجهول
$m_A = 0.040$ kg $C_A = 388$ J/kg .°C $T_A = 115$ °C $m_B = 0.50$ kg $C_B = 4180$ J/kg.°C $T_B = 15.0$ °C	$T_f = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

حدّد درجة الحرارة النهائية باستخدام المعادلة الآتية:

دليل الرياضيات

إجراء العمليات الحسابية باستعمال الأرقام المعنوية 205—204

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

عوّض مستخدمًا $m_A = 0.040$ kg
$C_A = 388$ J/kg.°C، $T_A = 115$°C
$C_B = 4180$ J/kg.°C
$m_B = 0.50$ kg، $T_B = 15.0$ °C

$$= \frac{(0.040 \text{ kg})(388 \text{ J/kg.°C})(115 \text{ °C}) + (0.50 \text{ kg})(4180 \text{ J/kg.°C})(15.0 \text{ °C})}{(0.040 \text{ kg})(388 \text{ J/kg.°C}) + (0.50 \text{ kg})(4180 \text{ J/kg. °C})}$$

$$= 16 \text{ °C}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** قيست درجة الحرارة بوحدة سلسيوس.
- **هل الجواب منطقي؟** تقع الإجابة بين درجتي الحرارة الابتدائية للعينتين، كما هو متوقع عند استخدام المسعر.

نعم، الجواب منطقي. درجة الحرارة النهائية للنظام (16°C) تقع بين درجة حرارة الجسم البارد (الماء عند 15°C) ودرجة حرارة الجسم الساخن (الخارصين عند 115°C)، وهذا هو المتوقع عند حدوث الاتزان الحراري.

6. بما أن كتلتي الماء متساويتان، فإن درجة الحرارة النهائية تكون المتوسط الحسابي لدرجتي الحرارة الابتدائيتين: T_f = (80.0 °C + 10.0 °C) / 2 = 45.0 °C.

مسائل تدريبية

6. خلطت عينة ماء كتلتها 2.00×10^2 g ودرجة حرارتها 80.0 °C مع عينة ماء أخرى كتلتها 2.00×10^2 g ودرجة حرارتها 10.0°C. مفترضًا عدم فقدان حرارة إلى المحيط الخارجي، ما درجة الحرارة النهائية للخليط؟
7. خلطت عينة ميثانول كتلتها 4.00×10^2 g ودرجة حرارتها 16.0 °C مع عينة ماء كتلتها 4.00×10^2 g ودرجة حرارتها 85.0 °C. مفترضًا عدم فقدان حرارة إلى المحيط الخارجي، ما درجة الحرارة النهائية للخليط؟
8. وضعت ثلاثة أوزان فلزية لصيد السمك في ماء كتلته 1.00×10^2 g ودرجة حرارته 35.0 °C. فإذا كانت كتلة كل قطعة فلزية 1.00×10^2 g ودرجة حرارتها 100.0 °C، وكانت درجة حرارة الخليط النهائية 45.0 °C، فما الحرارة النوعية للفلز في الأوزان؟
9. وضع قالب فلزي في ماء كتلته 1.00×10^2 g ودرجة حرارته 10.0 °C، فإذا كانت كتلة القالب 1.00×10^2 g ودرجة حرارته 100.0 °C، وكانت درجة الحرارة النهائية للخليط 25.0 °C. فما الحرارة النوعية لمادة القالب؟

7. بما أن كتلتي عينتي الميثانول متساويتان، فإن درجة الحرارة النهائية تكون المتوسط الحسابي لدرجتي الحرارة الابتدائيتين: T_f = (16.0 °C + 85.0 °C) / 2 = 50.5 °C.

■ **الشكل 9–6** تنظم السحلية درجة حرارة جسمها من خلال الاختباء أسفل صخرة، عندما يكون الجو حارًا (a). والتعرض لأشعة الشمس عندما يكون الجو باردًا (b).

الربط مع الأحياء

تقسم الحيوانات إلى مجموعتين اعتمادًا على درجات حرارة أجسامها. معظمها من متغيِّرة درجة الحرارة، وهي التي تتغير درجات حرارة أجسامها تبعًا للبيئة المحيطة. وبقية الحيوانات الثابتة درجة الحرارة ، وهي التي تتحكم في درجات حرارة أجسامها داخليًّا. أيْ أن الحيوانات الثابتة درجة الحرارة تبقى درجات حرارة أجسامها مستقرة بغض النظر عن درجة حرارة المحيط. أما الحيوانات المتغيِّرة درجة الحرارة فترتفع درجة حرارة أجسامها عندما تكون درجة حرارة المحيط مرتفعة. وتنظم الحيوانات المتغيِّرة درجة الحرارة – ومنها السحلية في **الشكل 9–6** –حرارة جسمها من خلال تنظيم تدفق الحرارة عن طريق الاختباء تحت صخرة أو في شق، مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة جسمها. ويتصف البشر بثبات درجة حرارة أجسامهم؛ فدرجة حرارة جسم الإنسان تقريبًا 37 °C.

ولينظم الحيوان الثابت درجة الحرارة درجة حرارة جسمه، فإنه يزيد أو يقلل من مستوى عمليات الأيض؛ لذا قد تلجأ بعض هذه الحيوانات إلى البيات الشتوي لتخفيض درجة حرارة أجسامها لتصل إلى درجة حرارة تجمد الماء.

8. بتطبيق مبدأ حفظ الطاقة: m_PbC_Pb(T_f - T_Pb) + m_w C_w(T_f - T_w) = 0
(130 J/kg·°C)(kg 0.100)(T_f - 35.0°C) + (0.200 kg)(4180 J/kg·°C)(T_f - 10.0°C) = 0
836(T_f - 10.0) = 0 + (T_f - 35.0)13
T_f = 8815 => T_f = 10.4 °C 849

9. بتطبيق مبدأ حفظ الطاقة: m_mC_m(T_f - T_m) + m_w C_w(T_f - T_w) = 0
= C_m(45.0°C - 100.0°C) + (0.100 kg)(4180 J/kg·°C)(45.0°C - 25.0°C)(kg 0.100)
0
C_m(-55.0) + 83600 = 0 => C_m = 83600 / 55.0 = 1.5 × 10^3 J/kg·°C

1–6 مراجعة

10. **درجات الحرارة** حوّل درجات الحرارة الآتية لأنظمة القياس المشار إليها:

a. 5 °C إلى كلفن.
b. 34 K إلى سلسيوس.
c. 212 °C إلى كلفن.
d. 316 K إلى سلسيوس.

11. **التحويلات** حوّل درجات الحرارة الآتية إلى كلفن.

a. 28 °C
b. 154 °C
c. 568 °C
d. −55 °C
e. −184 °C

12. **الطاقة الحرارية** هل يمكن أن تكون الطاقة الحرارية لكمية من الماء الساخن مساوية للطاقة الحرارية لكمية أخرى من الماء البارد؟ فسّر إجابتك.

13. **انتقال الحرارة** لماذا تبقى البطاطا المشويّة ساخنة مدة أطول من أيّ طعام آخر في الطبق نفسه؟

14. **الحرارة** يكون بلاط أرضية الحمام في الشتاء باردًا عند لمسه بالقدم على الرغم أن باقي غرفة الحمام دافئة، فهل تكون الأرضية أبرد من سائر غرفة الحمام؟

15. **الحرارة النوعية** إذا تناولت ملعقة بلاستيكية من فنجان شاي حار ووضعتها في فمك، فلن تحرق لسانك، على الرغم من أنك قد تحرق لسانك بسهولة لو وضعت الشاي الحار في فمك مباشرة. فلماذا؟

16. **الحرارة** يستعمل كبار الطباخين في أغلب الأحيان مقالي طبخ مصنوعة من الألومنيوم السميك، فلماذا يعد الألومنيوم السميك أفضل من الرقيق للطبخ؟

17. **الحرارة والطعام** لماذا يتطلب شوي حبة البطاطس كاملة مدة أطول من قليها على شكل شرائح صغيرة؟

18. **التفكير الناقد** قد ينتج بعض الضباب فوق سطح الماء عندما يسخن، قبل بدء الغليان مباشرة. فما الذي يحدث؟ وأين يكون الجزء الأبرد من الماء في القدر؟

10. a. 5 °C + 273 = 278 K
b. 34 K - 273 = -239 C°
c. 212 °C + 273 = 485 K
d. 316 K - 273 = 43 C°

11. a. 28 °C + 273 = 301 K
b. 154 °C + 273 = 427 K
c. 568 °C + 273 = 841 K
d. -55 °C + 273 = 218 K
e. -184 °C + 273 = 89 K

12. نعم، يمكن ذلك. تعتمد الطاقة الحرارية على الكتلة ودرجة الحرارة معًا. لذلك، يمكن لكمية كبيرة من الماء عند درجة حرارة منخفضة أن تحتوي على نفس الطاقة الحرارية لكمية أصغر من الماء عند درجة حرارة أعلى.

13. المواد المختلفة لها سعات حرارية نوعية مختلفة. الأطعمة ذات السعة الحرارية النوعية العالية (مثل تلك التي تحتوي على نسبة عالية من الماء) تخزن المزيد من الطاقة الحرارية لكل وحدة كتلة، وبالتالي تستغرق وقتًا أطول لتبرد.

14. لا، درجة حرارة البلاط هي نفسها درجة حرارة الغرفة. لكن البلاط موصل جيد للحرارة، فيسحب الحرارة بسرعة من قدمك عند ملامسته، مما يعطي إحساسًا بالبرودة. الهواء عازل للحرارة، لذلك لا يسحب الحرارة بنفس المعدل.

15. لأن كتلة الملعقة البلاستيكية وسعتها الحرارية النوعية منخفضتان، فهي لا تنقل كمية كبيرة من الطاقة الحرارية. أما الشاي السائل نفسه، فله كتلة أكبر وسعة حرارية نوعية عالية (مثل الماء)، لذا فإنه ينقل كمية كبيرة من الحرارة قادرة على حرق اللسان.

16. الألمنيوم السميك له كتلة أكبر وبالتالي سعة حرارية أكبر. هذا يسمح له بتخزين وتوزيع الحرارة بشكل متساوٍ على سطحه، مما يمنع تكوّن "بقع ساخنة". كما أنه يحافظ على درجة حرارته بشكل أفضل عند إضافة الطعام البارد، مما يحسن من جودة الطهي.

17. تقطيع البطاطس إلى شرائح يزيد من مساحة السطح المعرضة للحرارة بشكل كبير، مما يسمح للحرارة باختراقها وطهيها بسرعة أكبر. بالإضافة إلى ذلك، فإن القلي في الزيت الساخن ينقل الحرارة بكفاءة أعلى من الخبز في الهواء الساخن.

18. ما يحدث هو أن الماء الساخن عند السطح يتبخر. وعندما يرتفع بخار الماء غير المرئي ويختلط بالهواء الأبرد فوقه، فإنه يتكثف مرة أخرى إلى قطرات ماء سائلة صغيرة جدًا، والتي نراها على شكل ضباب. الجزء الأبرد من الماء يكون عند السطح بسبب التبريد الناتج عن التبخر.

رابط الدرس الرقمي

www.ien.edu.sa

6–2 تغيرات حالة المادة وقوانين الديناميكا الحرارية
Changes of State & the Laws of Thermodynamics

الأهداف

- **تُعرف** الحرارة الكامنة للانصهار.
- **تُعرف** الحرارة الكامنة للتبخر.
- **تُعرف** القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية.
- **تميّز** بين الحرارة والشغل.
- **تعرّف** الإنتروبي.

المفردات

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

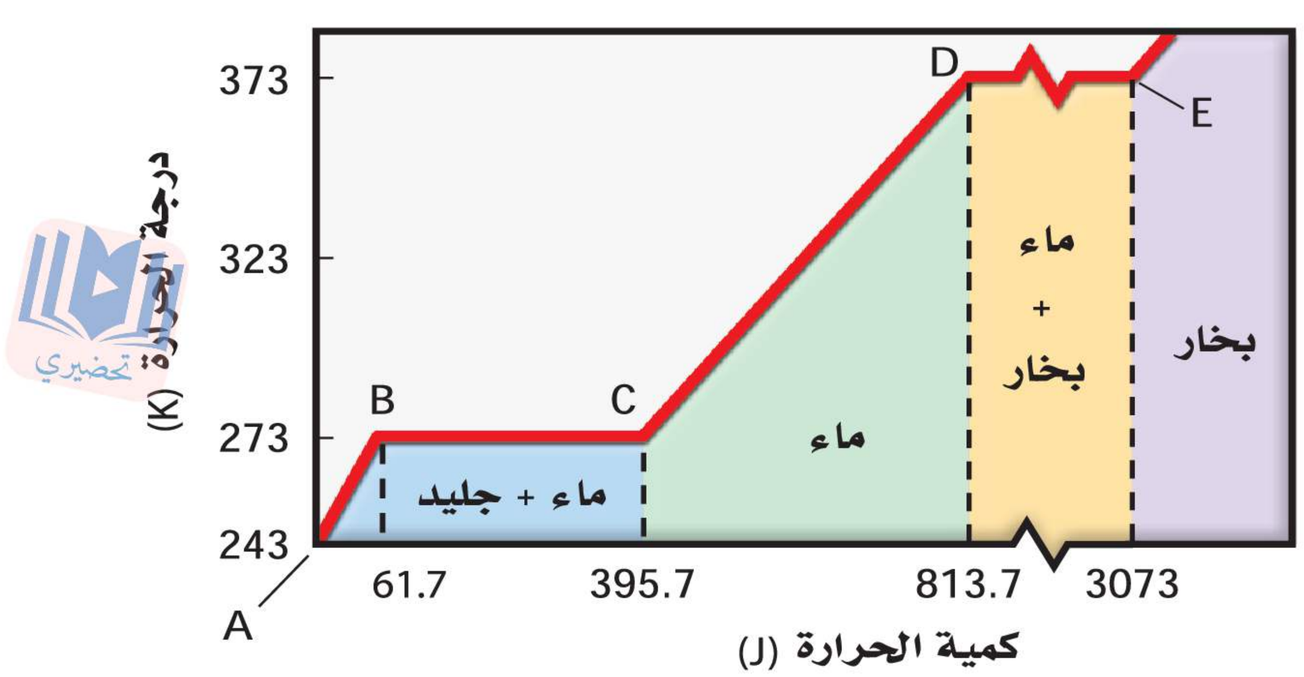
فاز ثلاثة علماء بريطانيين بجائزة نوبل في الفيزياء لعام 2016 تقديرا لأبحاثهم حول المادة التي أتاحت إحراز تقدم في الفهم النظري للأسرار الغامضة للمادة، وفتحت آفاقا جديدة في تطوير مواد مبتكرة.

استخدم صانعو المحرك البخاري في القرن الثامن عشر الحرارة لتحويل الماء الساخن إلى بخار، حيث يدفع البخار المكبس، لتشغيل المحرك، ثم يبرد البخار، ويتكثف فيصبح سائلاً مرة أخرى. إن إمداد الماء السائل بكمية من الطاقة الحرارية لا يُغير درجة حرارته فقط، بل يُغيّر بُنيته التركيبية أيضًا –ولكن دون تغيير البُنية الجُزيئية–. وستتعلم أن تغير حالة المادة يعني تغير الشكل، والطريقة التي تخزّن بها الذراتُ الطاقةَ الحرارية.

تغير حالة المادة Changes of State

إن الحالات الثلاث الأكثر شيوعًا للمادة هي: الصلبة، والسائلة، والغازية. حيث تتغير حالة المادة الصلبة إلى السائلة عند رفع درجة حرارتها، وتصبح غازًا عند درجات حرارة أعلى. فكيف يمكن تفسير هذه التغيرات؟ افترض أنّ مادة ما في الحالة الصلبة اكتسبت كمية من الطاقة الحرارية؛ فما التغير الذي سيطرأ عليها؟ تزداد حركة جزيئاتها، كما تزداد درجة حرارتها.

يبين **الشكل 10–6** تمثيلًا بيانيًّا لتغيرات حالة المادة عند تزويد 1 g من الماء بطاقة حرارية بدءًا من درجة حرارة 243 K (جليد) حتى تصل درجة الحرارة إلى ما يزيد على 373 K (بخار). لقد سُخّن الجليد بين النقطتين A و B حتى أصبحت درجة حرارته 273 K، وعند نقطة معينة فإن الطاقة الحرارية المكتسبة تجعل جزيئات الماء تتحرك بسرعة كافية، للتغلب على القوى التي تعمل على تثبيت الجزيئات. وتبقى الجزيئات يلامس بعضها بعضًا، ولكنها تملك حرية حركة أكثر، وبازدياد الطاقة الحرارية المكتسبة تصبح الجزيئات أخيرًا حرة على نحوٍ كافٍ لتنزلق مبتعدًا بعضها عن بعض.



الشكل 10–6 تمثيل بياني للعلاقة بين درجة الحرارة وكمية h المكتسبة عندما يتحول 1g من الجليد إلى بخار. لاحظ أنّ المحور الأفقي منفصل بين النقطتين D و E، إشارة إلى تغير مقياس الرسم بين النقطتين.

درجة الانصهار تتغير المادة عند هذه الدرجة من الحالة الصلبة، إلى الحالة السائلة، وتسمى درجة الحرارة التي يحدث عندها هذا التغير درجة انصهار المادة. في أثناء انصهار المادة، تعمل الطاقة الحرارية المكتسبة كلها على التغلب على القوى التي تربط الجزيئات بعضها ببعض في الحالة الصلبة، ولكنها لا تؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية للجزيئات. وهذا يمكن مشاهدته بين النقطتين B وC في **الشكل 10–6**، حيث تؤدي الطاقة الحرارية المكتسبة إلى انصهار الجليد عند درجة الحرارة الثابتة 273 K. ولأن الطاقة الحركية للجزيئات لا تزداد بين النقطتين B و C فإن درجة الحرارة لا تزداد بينهما أيضًا، بل تبقى ثابتة.

درجة الغليان عندما تنصهر المادة الصلبة تمامًا تتلاشى القوى التي تثبت الجزيئات في الحالة الصلبة، ويؤدي اكتساب المادة للمزيد من الطاقة الحرارية إلى زيادة طاقة حركة الجزيئات، وارتفاع درجة حرارة السائل. وتحدث هذه العملية على المخطط بين النقطتين C و D، ومع زيادة درجة الحرارة أكثر من ذلك، يكون لبعض الجزيئات في السائل طاقة كافية لتتحرر من الجزيئات الأخرى. وعند درجة حرارة محددة– تعرف بدرجة الغليان– تؤدي أيّ زيادة في الطاقة الحرارية إلى تغير حالة المادة إلى حالة أخرى. وكل الطاقة الحرارية المكتسبة تغير حالة المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية.

تبقى درجة الحرارة ثابتة عندما يغلي السائل كما هو الحال تمامًا في حالة الانصهار. ويمثل هذا الانتقالَ بين النقطتين D و E في **الشكل 10–6**. وبعدما تتحول المادة كليًّا إلى غاز، فإنّ أيّ زيادة في الطاقة الحرارية مجددًا، تزيد من حركة الجزيئات، وترفع درجة الحرارة أعلى من النقطة E، فيسخن بخار الماء عند درجات حرارة أعلى من 373 K.

الحرارة الكامنة للانصهار H_f تسمى كمية الطاقة الحرارية اللازمة لانصهار 1 kg من مادة ما **بالحرارة الكامنة للانصهار** لهذه المادة. فعلى سبيل المثال، الحرارة الكامنة لانصهار الجليد هي 3.34×10^5 J /kg . فإذا اكتسب 1 kg من الجليد عند درجة حرارة الانصهار 273 K، ما مقداره 3.34×10^5 J من الطاقة الحرارية فسيتحول الجليد إلى 1 kg من الماء عند درجة الحرارة نفسها؛ حيث تسبب الطاقة الحرارية المكتسبة تغيرًا في الحالة وليس تغيرًا في درجة الحرارة. وتصرف هذه الطاقة في إبعاد الجزيئات بعضها عن بعض دون زيادة في سرعتها. ويمثل الخط الأفقي بين النقطتين B و C في **الشكل 10–6** الحرارة الكامنة للانصهار.

الحرارة الكامنة للتبخر H_v يغلي الماء عند درجة حرارة 373K عند الضغط الجوي العادي. وتسمى كمية الطاقة الحرارية اللازمة لتبخير 1kg من السائل **بالحرارة الكامنة للتبخر**. فالحرارة الكامنة لتبخر الماء مثلاً تساوي 2.26×10^6J /kg. ويمثل الخط بين النقطتين D و E في **الشكل 10–6** الحرارة الكامنة للتبخر. ولكل مادة حرارة كامنة للتبخر خاصة بها. ويوجد بين النقطتين A وB ميل واضح للخط مع ارتفاع درجة الحرارة.

6. نعم، ستصل العينتان إلى درجة الحرارة النهائية نفسها. لأن كلتا العينتين ستتبادلان الحرارة مع الوسط المحيط حتى تصلان إلى حالة اتزان حراري معه، وتصبح درجة حرارتهما مساوية لدرجة حرارة الغرفة. الكأس الذي يحتوي على الجليد سيستغرق وقتاً أطول للوصول إلى هذه الدرجة بسبب الحاجة إلى طاقة إضافية لصهر الجليد.

تجربة

الانصهار

1. ضع إشارة A وإشارة B على كأسين مصنوعتين من مادة جيدة العزل (مثل كؤوس الاستعمال لمرة واحدة المصنعة من الفلين الصناعي).
2. اسكب في كل كأس 75 ml من الماء عند درجة حرارة الغرفة، وامسح أي ماء منسكب.
3. ضع مكعب جليد في الكأس A، وماءً عند درجة التجمد في الكأس B حتى يتساوى مستوى الماء في الكأسين.
4. قس درجة حرارة الماء في كل كأس، وكرّر القياس بعد كل دقيقة حتى ينصهر الثلج.
5. سجل درجات الحرارة في جدول البيانات، ومثلها بيانيًّا.

التحليل والاستنتاج

6. هل تصل العينتان إلى درجة الحرارة النهائية نفسها؟ ولماذا؟

الجدول 2–6

الحرارة الكامنة للانصهار والتبخر لبعض المواد الشائعة

المادة	الحرارة الكامنة للانصهار H_f (J/kg)	الحرارة الكامنة للتبخر H_V (J/kg)
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)	3.34×10^5	2.26×10^6

ويمثل هذا الميل مقلوب الحـــرارة النوعية للجليد. في حين يمثل الميل بين النقطتين C و D مقلوب الحرارة النوعية للماء، كما يمثل الميل بعد النقطة E مقلوب الحرارة النوعية للبخار. لاحظ أن ميل الخط في حالة الماء أقل من ميله في حالتي الجليد والبخار. وهذا عائد إلى أن للماء حرارة نوعية أكبر مما للجليد والبخار. ويعبر عن كمية الحرارة Q اللازمة لصهر كتلة m من المادة الصلبة بالمعادلة الآتية:

كمية الحرارة اللازمة لصهر الكتلة الصلبة $Q = m H_f$

كمية الحرارة اللازمة لصهر كتلة ما تســاوي مقدار تلــك الكتلة، مضروبة في الحرارة الكامنة لانصهار مادتها.

كما يعبر عن كمية الحرارة Q اللازمة لتبخير كتلة m من السائل بالمعادلة الآتية:

كمية الحرارة اللازمة لتبخير السائل $Q = m H_V$

كمية الحرارة اللازمة لتبخير سائل ما تساوي كتلة السائل، مضروبة في الحرارة الكامنة لتبخير مادته.

تجربة عملية

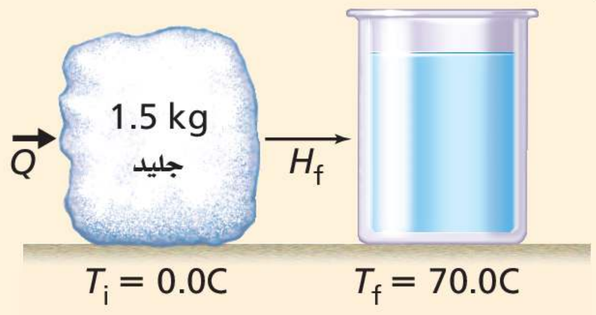
ما مقدار الطاقة اللازمة لصهر الجليد؟

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية

وعندما يتجمد الســائل، فإنه يفقد كمية من حرارته تســاوي $Q = -m H_f$ وهي الطاقة التي يفقدها ليتحول إلى الحالة الصلبة. وتشــير الإشارة الســالبة إلى أنّ الحرارة تنتقل من المادة إلى المحيط الخارجي. وبالطريقة نفسها، عندما يتكثف بخار إلى سائل، فإنّه يفقد كمية مــن الحرارة $Q = -m H_V$. ويبين **الجدول 2–6** بعض قيم الحرارة الكامنة للانصهار H_f، والحرارة الكامنة للتبخر H_V لبعض المواد.

مثـــــال 3

الحرارة افترض أنّك تخيم في الجبال، وتحتاج إلى صهر 1.50 kg من الجليد عند درجة الحرارة 0.0 °C وتسخينه إلى درجة حرارة 70.0 °C لصنع شراب ساخن، فما مقدار كمية الحرارة التي يتطلبها ذلك؟



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم العلاقة بين الحرارة والماء في كلّ من حالتيه الصلبة والسائلة.
- ارسم انتقال الحرارة مع ازدياد درجة حرارة الماء.

المعلوم	المجهول
$m = 1.50\ kg$	$Q_{\text{صهر الجليد}} = ?$
$H_f = 3.34 \times 10^5\ J/kg$	$Q_{\text{تسخين الماء}} = ?$
$T_f = 70.0\ °C,\ T_i = 0.0\ °C$	$Q_{\text{الكلية}} = ?$
$C = 4180\ J/kg\ .°C$	

نعم، الإشارة الموجبة لكمية الحرارة (Q) تدل على أن النظام (الجليد والماء في هذه الحالة) قد امتص طاقة حرارية من الوسط المحيط.

2 إيجاد الكمية المجهولة

احسب كمية الحرارة اللازمة لصهر الجليد.

عوّض مستخدمًا $m = 1.50\ kg$ ، $H_f = 3.34 \times 10^5\ J/kg$

$$Q_{\text{صهر الجليد}} = mH_f$$
$$= (1.50\ kg)\ (3.34 \times 10^5\ J/kg)$$
$$= 5.01 \times 10^5\ J$$
$$= 5.01 \times 10^2\ kJ$$

احسب تغير درجة الحرارة.

عوّض مستخدمًا $T_f = 70.0\ °C$ ، $T_i = 0.0\ °C$

$$\Delta T = T_f - T_i$$
$$= 70.0\ °C - 0.0\ °C$$
$$= 70.0\ °C$$

احسب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء.

عوّض مستخدمًا $m = 1.50\ kg$، $\Delta T = 70.0\ °C$، $C = 4180\ J/kg.°C$

$$Q_{\text{تسخين الماء}} = mC\Delta T$$
$$= (1.50\ kg)(4180\ J/kg.°C)(70.0°C)$$
$$= 4.39 \times 10^5\ J\ = 4.39 \times 10^2\ kJ$$

احسب كمية الحرارة الكلية اللازمة.

عوّض مستخدمًا $Q_{\text{صهر الجليد}} = 4.39 \times 10^2\ kJ$، $Q_{\text{تسخين الماء}} = 5.01 \times 10^2\ kJ$

$$Q_{\text{الكلية}} = Q_{\text{صهر الجليد}} + Q_{\text{تسخين الماء}}$$
$$= 5.01 \times 10^2\ kJ + 4.39 \times 10^2\ kJ$$
$$= 9.40 \times 10^2\ kJ$$

نعم، الوحدات صحيحة. الطاقة وكمية الحرارة تقاسان بوحدة الجول (J) أو مضاعفاتها كالكيلوجول (kJ)، وهي الوحدات المستخدمة في الحل.

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** وحدات الطاقة هي الجول.
- **هل تدل الإشارة على شيء؟** Q موجبة عندما تكون الحرارة ممتصة.
- **هل الجواب منطقي؟** إنّ كمية الحرارة اللازمة لصهر الجليد أكبر من كمية الحرارة اللازمة لزيادة درجة حرارة الماء إلى 70.0 °C؛ إذ يتطلب التغلب على القوى التي تبقي الجزيئات في الحالة الصلبة طاقة أكبر من تلك التى نحتاج إليها لرفع درجة حرارة الماء.

نعم، الجواب منطقي. تطلّب صهر الجليد طاقة (5.01 kJ 5^10 x) أكبر من الطاقة اللازمة لتسخين الماء الناتج إلى 70.0 °C (4.39 x 10^5 kJ). وهذا يتفق مع المفهوم الفيزيائي بأن تغيرات الحالة تتطلب كميات كبيرة من الطاقة للتغلب على القوى بين الجزيئات.

19. لتحويل الجليد إلى ماء عند نفس درجة الحرارة (0.0°C)، نستخدم الحرارة الكامنة للانصهار.
m = 1.00 x 10^2 g = 0.100 kg
Hf = 3.34 x 10^5 J/kg (للماء)
Q = m * Hf = (0.100 kg) * (3.34 x 10^5 J/kg) = 3.34 x 10^4 J

مسائل تدريبية

19. ما مقدار كميــة الحرارة اللازمة لتحويل كتلة من الجليد مقدارهــا 1.00×10^2 g ودرجة حرارتها −20.0 °C إلى ماءٍ درجة حرارته 0.0 °C؟

20. إذا ســخنت عينة ماء كتلتها 2.00×10^2 g ودرجة حرارتها 60.0 °C فأصبحــت بخارًا درجة حرارته 140.0 °C، فما مقدار كمية الحرارة الممتصة؟

21. احســب كمية الحرارة اللازمة لتحويل 3.00×10^2 g من جليد درجة حرارته −30.0 °C إلى بخار ماء درجة حرارته 130.0 °C؟

20. نحسب الحرارة على ثلاث مراحل:
1. تسخين الماء من 60.0°C إلى 100.0°C: Q1 = mcΔT = (0.200 kg)(4180 J/kg·°C)(40.0°C) = 33440 J
2. تبخير الماء عند 100.0°C: Q2 = mHv = (0.200 kg)(2.26 x 10^6 J/kg) = 452000 J
3. تسخين البخار من 100.0°C إلى 140.0°C: Q3 = mcΔT = (0.200 kg)(2020 J/kg·°C)(40.0°C) = 16160 J
الحرارة الكلية الممتصة: Q_total = Q1 + Q2 + Q3 = 33440 + 452000 + 16160 = 501600 J = 5.02 x 10^5 J

21. نحسب الحرارة على خمس مراحل:
1. تسخين الجليد من -30.0°C إلى 0.0°C: Q1 = (0.300)(2060)(30.0) = 18540 J
2. صهر الجليد عند 0.0°C: Q2 = (0.300)(3.34 x 10^5) = 100200 J
3. تسخين الماء من 0.0°C إلى 100.0°C: Q3 = (0.300)(4180)(100.0) = 125400 J
4. تبخير الماء عند 100.0°C: Q4 = (0.300)(2.26 x 10^6) = 678000 J
5. تسخين البخار من 100.0°C إلى 130.0°C: Q5 = (0.300)(2020)(30.0) = 18180 J
الحرارة الكلية: Q_total = Q1+Q2+Q3+Q4+Q5 = 940320 J = 9.40 x 10^5 J

القانون الأول في الديناميكا الحرارية
The First Law of Thermodynamics

لقد اعتبرت دراســة الحرارة ودرجة الحرارة علمًا مســتقلاً قبل فهــم الارتباط بين الطاقة الحرارية وحركة الذرات. وكان القانــون الأول بمثابة صيغة حول ماهية الطاقة الحرارية وكيفية انتقالها. وكما تعرف، فإنك تســتطيع تســخين مســمار بوضعه فوق لهب أو طرقه بمطرقة. أي أنك تســتطيع زيادة الطاقة الحرارية للمسمار إما بإضافة حرارة أو ببذل شغل عليه. ومن الجدير بالذكر أن المسمار يبذل شغلاً على المطرقة، لذا فإن الشغل المبذول بفعل المســمار على المطرقة يساوي سالب الشغل الذي تبذله المطرقة على المسمار. وينص **القانون الأول في الديناميكا الحرارية** على أن التغير في الطاقة الحرارية ΔU لجســم ما يساوي كمية الحرارة Q المضافة إلى الجســم مطروحًا منها الشــغل W الذي يبذله الجســم. لاحظ أنّ الكميات كلّها Q، ΔU، W مقيسة بوحدات الطاقة وهي الجول.

القانون الأول في الديناميكا الحرارية $\Delta U = Q - W$

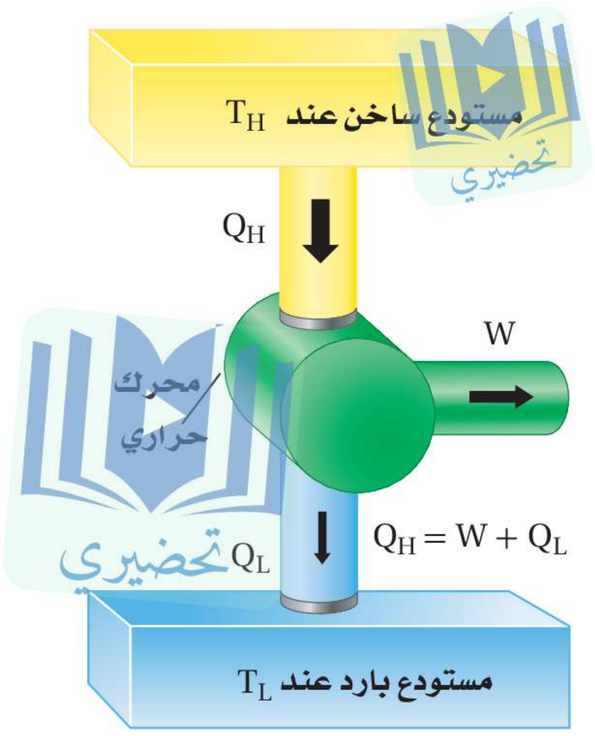
التغــير في الطاقة الحرارية لجســم ما يســاوي مقدار كمية الحرارة المضافة إلى الجســم مطروحًا منه الشغل الذي يبذله الجسم.

تتضمن الديناميكا الحرارية دراســة التغيرات في الخصائص الحراريــة للمادة أيضًا. ويُعد القانــون الأول في الديناميكا الحرارية عادة صياغة أخرى لقانــون حفظ الطاقة، والذي ينص على أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث، وإنما تتغير من شكل إلى آخر.

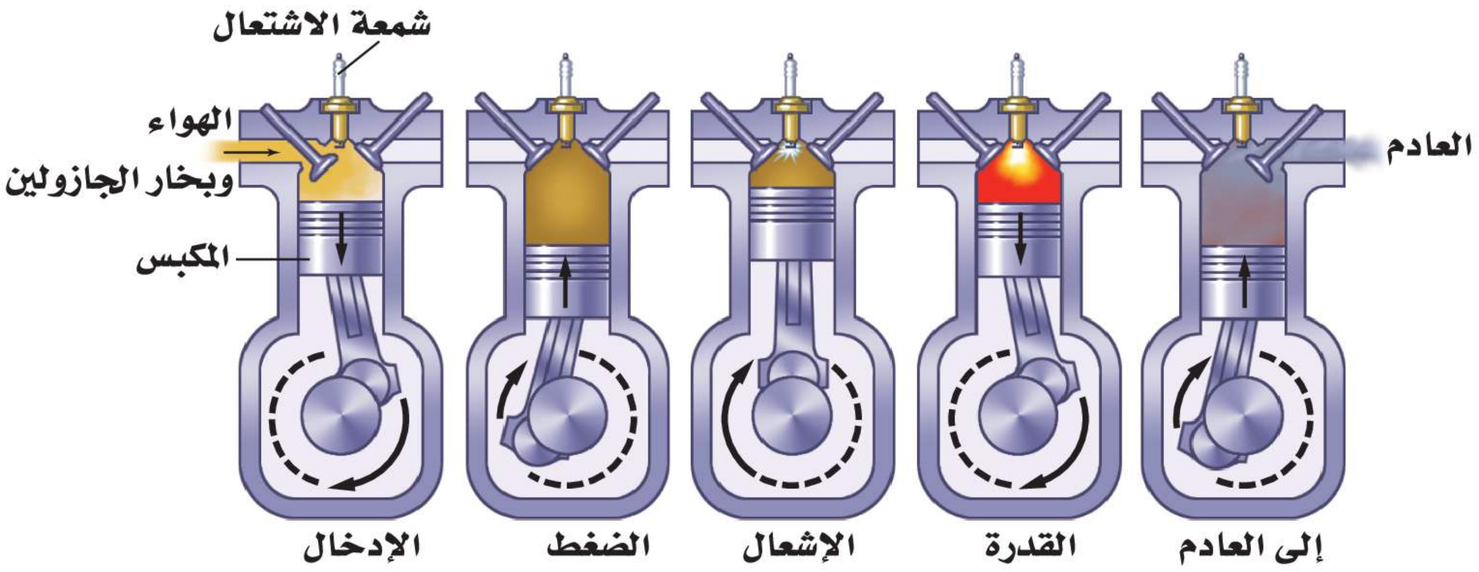
ومن الأمثلة الأخرى على تغير كمية الطاقة الحرارية في نظام ما، المضخة اليدوية المستخدمة في نفخ إطار الدراجة الهوائية؛ فعندما يقوم شــخص بضغط المضخة فإن الهواء وأسطوانة المضخة يصبحان دافئين؛ حيــث تتحول الطاقة الميكانيكيــة في المكبس المتحرك إلى طاقة حرارية للغاز. وبالمثل، فإن أشــكالًا أخرى من الطاقة يمكن أن تتحول إلى طاقة حرارية، ومنهــا الضوء والصوت والطاقة الكهربائية. فعلى ســبيل المثال، تحــول المحمصة الطاقة الكهربائية إلى حرارة عندما تحمص الخبز، وتدفئ الشــمس الأرض عن طريق الضوء من بُعد أكثر من 150 مليون كيلومتر.

المحـركات الحرارية إنّ الدفء الذي تشـعر به عندما تفـرك يديك إحداهما بالأخرى هو نتيجة تحوّل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية، ويحدث التحول من الطاقة الميكانيكية إلى الطاقة الحرارية بسـهولة ويسر. أما العملية العكسية، وهي تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية، فتكون أكثـر صعوبة. ويعد **المحرك الحراري** أداة ذات قدرة على تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية بصورة مستمرة.

يتطلـب المحرك الحـراري مصـدرًا ذا درجة حـرارة مرتفعة لامتصاص الحـرارة منه؛ ومسـتقبِلاً ذا درجة حرارة منخفضة يمتص الحرارة ويسمى المصرف. كما يحتاج أيضًا إلى طريقة لتحويل الطاقة الحرارية إلى شـغل. يوضح **الشـكل 11–6** رسمًا تخطيطيًّا لمحرك حراري، وهو محرك احتراق داخلي، حيث يشـتعل فيه بخـار الجازولين المخلوط بالهواء لإنتاج شـعلة ذات درجة حـرارة مرتفعة. وتتدفق الحـرارة (Q_H)، من اللهب إلى الهواء الموجود في الأسـطوانة، ثم يتمدد الهواء ويدفع المكبـس، محولاً بذلك الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية. وللحصول على طاقة ميكانيكية مسـتمرة، فإن المحرك يجب أن يعود إلى وضعـه الابتدائي، حيث يطرد الهواء الحار ويحل محله هواء جديد، ويعود المكبس إلى أعلى الأسطوانة كما يبين **الشكل 12–6**.



■ **الشـكل 11–6 محرك حراري يحول الحرارة عند درجة الحرارة المرتفعة إلى طاقة ميكانيكية وإلى حرارة ضائعة عند درجة حرارة منخفضة.**



■ **الشـكل 12–6 تعمل الحرارة الناتجة بفعل احتراق الجازولين على تمدد الغازات الناتجة وبذل قوة وشغل على المكبس.**

وتتكرر هذه الدورة عدة مرات كل دقيقة. وتتحول الطاقة الحرارية من احتراق الجازولين إلى طاقة ميكانيكية، ولذا تتحرك السيارة.

لا تتحول جميع الطاقة الحرارية الناتجة عن الاشتعال في محرك السيارة إلى طاقة ميكانيكية، فعندما يشـتغل المحرك تصبح الغازات الناتجة في العادم وأجزاء المحرك سـاخنة، وينقل العادم الحرارة إلى الهواء الخارجي الملامس لـه، فترتفع درجة حرارة الهواء الخارجي، كما تنتقـل الحرارة من المحرك إلى المـبرد، فيمر الهواء الخارجي خلال المـبرد، مما يرفع درجة حرارته أيضا.

وتسـمى الطاقة المنتقلة إلى خارج محـرك المركبة بالحرارة الضائعـة (Q_L)، وهي الحرارة غـير المتحولة إلى شـغل. فعندمـا يعمل المحـرك بصورة دائمـة فإن الطاقـة الداخلية

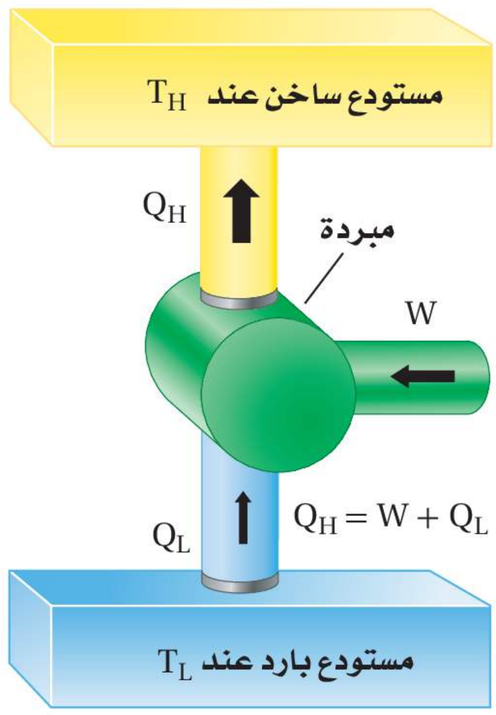
للمحـــرك لا تتغير، أو $\Delta U = 0 = Q - W$. ومحصلـــة كمية الحرارة التي تدخل المحرك هي $Q = Q_H - Q_L$؛ لذا يكون الشغل الذي يبذله المحرك هو $W = Q_H - Q_L$. وتولد جميع المحـــركات الحرارية حرارة ضائعة (مفقودة)، ولذا لا يوجـــد محرك يحول الطاقة كلها إلى شغل أو حركة نافعة.

الكفاءة يتحدث المهندســـون وبائعو الســـيارات عن كفاءة اســـتهلاك الوقود في محركات المركبات، حيث يشـــيرون إلى كمية الحرارة الداخلة، Q_H، التي تتحول إلى شغل نافع W. ويعبر عن الكفاءة الفعلية للمحرك بالنســـبة W/Q_H. ومن الممكن أن تساوي الكفاءة مئة في المئة إذا تحولت الحرارة الداخلة كلها إلى شغل بفعل المحرك. ولكن بسبب وجود حرارة مفقودة دائمًا، لا تصل كفاءة أغلب المحركات – حتى إن كانت ذات كفاءة عالية – إلى مئة في المئة.

تعمل بعض المحركات بالطاقة الشمسية فتُجمّع الحرارة في المجمعات الشمسية عند درجة حرارة عالية، ثم تستخدم لتشغيل المحركات، حيث تنتقل الطاقة الشمسية في صورة موجات كهرومغناطيســـية تعمل على زيادة الطاقة الداخلية للمجمعات الشمســـية، ثم تنتقل هذه الطاقة في صورة حرارة إلى المحرك. الذي يعمل على تحويلها إلى شغل نافع وحرارة مفقودة.

المبردات (الثلاجات) تتدفق الحرارة تلقائيًّا من الجســـم الســـاخن إلى الجسم البارد. وعلى الرغم من ذلك، فإنه يمكن انتزاع الطاقة الحرارية من الجســـم الأبرد وإضافتها إلى الجسم الأســـخن ببذل شغل معين. ويعد المبرِّد مثالًا على الآلة التي تحقّق هذا الانتقال باستخدام شـــغل ميكانيكي؛ حيث تعمل الطاقة الكهربائية على تشـــغيل محرك، فيبذل المحرك شغلاً على الغاز فيضغطه.

يعـــبر الغاز الذي ينقل الحرارة من داخل المـــبرد (الثلاجة) عن طريق الضاغط إلى ملفات التكثيـــف الموجودة خارج المبرد (خلف الثلاجة)، حيث يبرد متحولاً إلى ســـائل، وتنتقل الطاقة الحرارية المفقودة بسبب إسالة الغاز إلى الهواء الموجود في الغرفة، ثم يعود السائل إلى داخل الثلاجة، فيتبخر بعد أن يمتص الطاقة الحرارية مما يحيط به (أي من داخل الثلاجة)، ثـــم ينتقل بعد ذلك إلى الضاغط، وتتكـــرر هذه العملية، ويكون التغـــير الكلي في الطاقة الحرارية للغاز يســـاوي صفرًا؛ لذا واستنادًا إلى القانون الأول في الديناميكا الحرارية، فإن مجموع الطاقة المأخوذة من محتويات المبردة والشـــغل المبذول بفعل المحرك يساوي الحرارة المنبعثة، كما يبين **الشكل 13–6**.



الشكل 13–6 يمتص المبرد الحرارة Q_L من المستودع البارد ويبعث الحرارة Q_H إلى المستودع الساخن، ببذل شغل W على المبرد.

المضخات الحرارية إنّ المضخة الحرارية عبارة عن مبرد يعمل في اتجاهين، فتنتزع المضخة في الصيف الحرارة من المنزل، ولذا يبرد المنزل. أمّا في الشـــتاء فتنتزع الحرارة من الهواء البارد الذي في الخـــارج وتنقلها إلى داخل المنزل لتدفئته. وفي كلتـــا الحالتين، يتطلب ذلك طاقة ميكانيكية لنقل الحرارة من الجسم الأبرد إلى الجسم الأدفأ.

تحضيري

22. وفقًا للقانون الأول للديناميكا الحرارية، $\Delta U = Q - W$. بما أن درجة الحرارة ثابتة، فإن التغير في الطاقة الداخلية للغاز المثالي $\Delta U = 0$. لذلك، $W = Q$. بما أن البالون امتص 75 جول من الحرارة ($Q = 75\ J$)، فإن الشغل الذي بذله يساوي 75 J.

مسائل تدريبية

22. يمتص بالون غاز 75 J من الحرارة. فإذا تمدّد هذا البالون وبقي عند درجة الحرارة نفسها، فما مقدار الشغل الذي بذله البالون في أثناء تمدده؟
23. يثقب مثقب كهربائي فجوة صغيرة في قالب من الألومنيوم كتلته 0.40 kg فيسخن الألومنيوم بمقدار 5.0 °C، ما مقدار الشغل الذي بذله المثقب؟
24. كم مرة يتعين عليك إسقاط كيس من الرصاص كتلته 0.50 kg من ارتفاع 1.5 m؛ لتسخين الرصاص بمقدار 1.0 °C؟
25. عندما تحرّك كوبًا من الشاي، تبذل شغلاً مقداره 0.05 J في كل مرة تحرك فيها الملعقة بصورة دائرية. كم مرة يجب أن تحرك الملعقة لترفع درجة حرارة كوب الشاي الذي كتلته 0.15 kg بمقدار 2.0 °C؟ (بإهمال زجاج الكوب)
26. كيف يمكن استخدام القانون الأول في الديناميكا الحرارية لشرح كيفية تخفيض درجة حرارة جسم ما؟

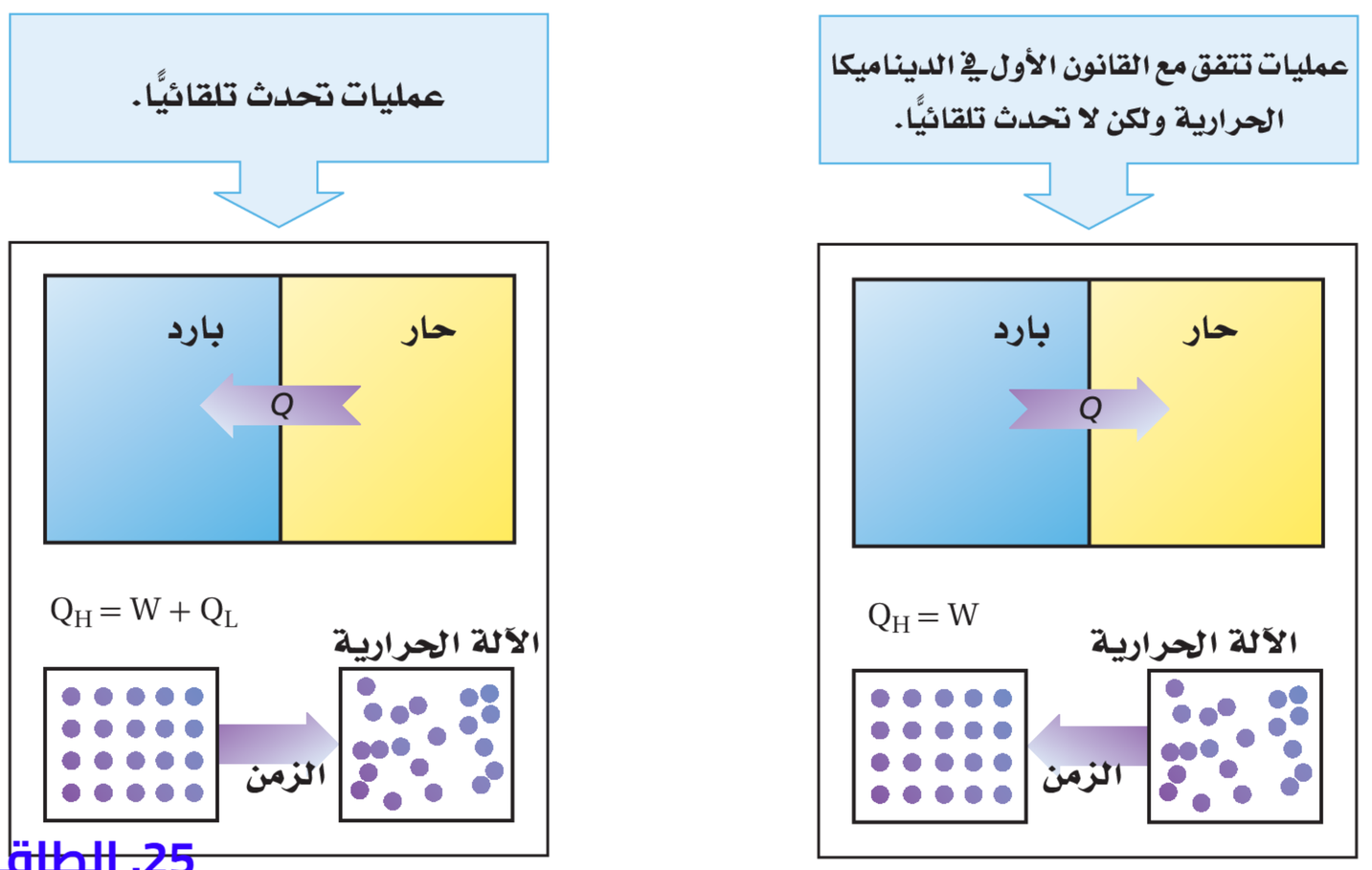
23. الشغل الذي بذله المثقب تحول إلى طاقة حرارية سخنت الألومنيوم. $W = Q = mc\Delta T$ $c_{Al} = 897\ J/kg\cdot°C$ (من الجداول القياسية) $W = (0.40\ kg)(897\ J/kg\cdot°C)(5.0\ °C) = 1794\ J \approx 1.8 \times 10^3\ J$

26. حسب القانون الأول للديناميكا الحرارية ($\Delta U = Q - W$)، فإن الطاقة الداخلية للجسم (التي ترتبط بدرجة حرارته) تنخفض (ΔU سالبة) عن طريق أحد أمرين أو كليهما:
1. أن يفقد الجسم حرارة إلى محيطه (تكون Q سالبة).
2. أن يبذل الجسم شغلًا على محيطه (تكون W موجبة)، مثلما يحدث عند تمدد غاز بسرعة.

القانون الثاني في الديناميكا الحرارية
The Second Law of Thermodynamics

هناك العديد من العمليات التي تتفق مع القانون الأول في الديناميكا الحرارية، ولكن بعضها لم تشاهد وهي تحدث تلقائيًّا. فعلى سبيل المثال، لا يحظر القانون الأول في الديناميكا الحرارية تدفق الحرارة من الجسم البارد إلى الجسم الساخن، ومع ذلك لم يحدث أن أصبحت الأجسام الساخنة أكثر سخونة عند وضعها ملامسة لأجسام باردة، وبالمثل، لم تصبح الأجسام الباردة أكثر برودة عند ملامستها لأجسام ساخنة، انظر الشكل 14–6.

الإنتروبي إذا حوّلت الآلات الحرارية الطاقة الحرارية بشكل كامل إلى طاقة ميكانيكية دون أيّ حرارة ضائعة (مفقودة) فإنّ القانون الأول في الديناميكا الحرارية يكون قد تحقق.



■ **الشكل 14–6** العديد من العمليات التي تحقق القانون الأول في الديناميكا الحرارية لا تحدث تلقائيًا. في حين تحقق العمليات التلقائية كلا القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية.

24. الطاقة اللازمة لتسخين الرصاص: $Q = mc\Delta T = (0.50\ kg)(130\ J/kg\cdot°C)(1.0\ °C) = 65\ J$.
طاقة الوضع عند كل إسقاط: $PE = mgh = (0.50\ kg)(9.8\ m/s^2)(1.5\ m) = 7.35\ J$.
عدد المرات (n) = الطاقة الكلية المطلوبة / الطاقة لكل مرة = $Q / PE = 65\ J / 7.35\ J \approx 8.84$.
يجب إسقاط الكيس 9 مرات لتسخينه بمقدار 1.0 °C على الأقل.

25. الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة الشاي (ماء): $Q = mc\Delta T = (0.15\ kg)(4180\ J/kg\cdot°C)(2.0\ °C) = 1254\ J$.
الشغل المبذول في كل مرة = 0.05 J.
عدد المرات = الطاقة الكلية / الشغل لكل مرة = 1254 J / 0.05 J = 25080 مرة.

إلا أنّ الحرارة الضائعة تتولد دائمًا، ولا تشاهد جزيئات الغاز الموزعة عشوائيًّا ترتب نفسها تلقائيًّا في أنماط معينة. وقد درس المهندس الفرنسي سادي كارنو قدرة الآلات على تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية في القرن التاسع عشر، حيث قدم إثباتًا منطقيًّا على أن الآلات كلها – حتى المثالية منها – ستولد بعض الحرارة الضائعة (المفقودة). وتوصف نتيجة كارنو على نحو أفضل بدلالة كمية تُسمّى **الإنتروبي**، وهي عبارة عن قياس لعدم الانتظام (الفوضى) في النظام.

عندما تسقط كرة بيسبول بفعل الجاذبية الأرضية، يكون لها طاقة وضع، وطاقة حركية تؤديان إلى إنجاز شغل. إلا أنه عندما تسقط الكرة خلال الهواء تصطدم بالعديد من جزيئات الهواء التي تمتص بعضًا من طاقة الكرة. وهذا يؤدي إلى تحرُّك جزيئات الهواء في اتجاهات، وسرعات عشوائية، حيث تؤدي الطاقة المكتسبة من الكرة إلى زيادة الفوضى بين الجزيئات. فكلما كان مدى سرعة الجزيئات أكبر كان عدم الانتظام (الفوضى) أكبر، والذي يزيد بدوره الإنتروبي. ومن المستبعد جدًّا أن تعود الجزيئات التي اضطربت، وتشتتت في جميع الاتجاهات إلى وضعها السابق معًا، مانحةً بذلك طاقاتها للكرة ومسببة ارتفاعها عن سطح الأرض.

إنّ الإنتروبي محتوى داخل الجسم، مثله في ذلك مثل الطاقة الحرارية، وعند إضافة حرارة إلى الجسم، فإنَّ الإنتروبي يزداد، وإذا انتزعت حرارة من الجسم فإنّ الإنتروبي ينقص، أما إذا بذل الجسم شغلاً دون أن تتغير درجة الحرارة فإنّ الإنتروبي لا يتغير ما دام الاحتكاك مهملاً. ويعبر عن التغير في الإنتروبي ΔS بالمعادلة الآتية (حيث تكون وحدة الإنتروبي هي J/K وتكون درجات الحرارة مقيسة بالكلفن):

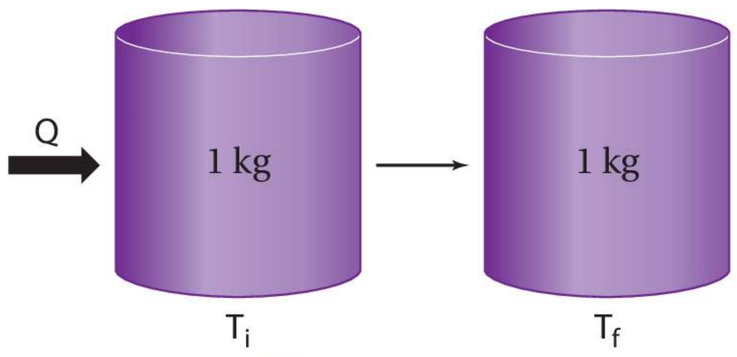
التغير في الإنتروبي $\Delta S = \frac{Q}{T}$

التغير في الإنتروبي لجسم ما يساوي مقدار كمية الحرارة المضافة إلى الجسم مقسومة على درجة حرارة الجسم بالكلفن.

عند المقارنة بين التغيرات في الأنتروبي ($\Delta S = Q/T$):
- الحالة (3) صهر الجليد، لها أكبر تغير في الأنتروبي. وذلك لأن عملية تغير الحالة (الانصهار) تتطلب كمية كبيرة من الحرارة (الحرارة الكامنة للانصهار) مما يؤدي إلى زيادة هائلة في الفوضى عند تحول الجزيئات من تركيب بلوري منظم إلى حالة سائلة عشوائية.
- بمقارنة الحالتين (1) و (2)، يكون التغير في الأنتروبي أكبر في الحالة (1). فإضافة نفس كمية الحرارة عند درجة حرارة أقل (273 K) يسبب زيادة نسبية في الفوضى أكبر من إضافتها عند درجة حرارة أعلى (353 K).
- بمقارنة الحالتين (1) و (4)، يكون التغير في الأنتروبي للماء أكبر بكثير من الرصاص. هذا لأن الحرارة النوعية للماء عالية جداً، لذا يتطلب رفع درجة حرارته درجة واحدة كمية حرارة (Q) أكبر بكثير من الرصاص، مما يؤدي إلى تغير أكبر في الأنتروبي.

مسألة تحفيز

للإنتروبي بعض الخصائص المدهشة. قارن بين الحالات الآتية، ووضح أوجه الاختلاف، بين هذه التغيرات للإنتروبي، معللاً ذلك.



1. تسخين 1 kg من الماء من 273 K إلى 274 K.
2. تسخين 1 kg من الماء من 353 K إلى 354 K.
3. صهر 1 kg من الجليد بشكل كامل عند 273 K.
4. تسخين 1 kg من الرصاص من 273 K إلى 274 K.

ينص **القانون الثاني في الديناميكا الحرارية** على أن العمليات الطبيعية تجري في اتجاه المحافظة على الإنتروبي الكلي للكون أو زيادته. أيْ أن الأشـياء كلّها ستصبح أكثر عشوائية، وأقل انتظامًـا ما لم يُتّخذ إجراء معـين يحافظ على انتظامها وترتيبهـا. ويمكن التفكير في زيادة الإنتروبي، وفي القانون الثاني في الديناميكا الحرارية على أنّهما عبارات تصف احتمال وقوع الأحداث. ويبين **الشـكل 15–6** زيادة الإنتروبي؛ حيث كانـت جزيئات صبغة الطعام منفصلة عـن الماء في بداية الأمر، ثم أصبحت مختلطة بجزيئـات الماء بعد فترة زمنية. من جهة أخرى، يوضح **الشـكل 16–6** مثالاً على قانون الديناميكا الحرارية الثاني، الذي قد يكون مألوفًا للعديد من الطلاب.

■ **الشكل 15–6** يُعد الاختلاط التلقائي لصبغة الطعام بالماء مثالاً على القانون الثاني في الديناميكا الحرارية.

■ **الشكل 16–6** يصل الإنتروبي تلقائيًا إلى قيمة كبيرة إذا لم يُبذَل شغل على النظام.

يتوقع من خلال القانون الثاني في الديناميكا الحرارية أن الحرارة تنتقل تلقائيًّا من الجسـم الساخن إلى الجسـم البارد فقط. افترض وجود قضيب حديدي ساخن وكأس ماء بارد، فسيكون متوسط سرعة حركة جزيئات الحديد كبيرًا جدًّا، في حين أن متوسط سرعة حركة جزيئـات الماء أقل منه في الحديد. وعند وضع القضيب في الماء والوصول إلى حالة الاتزان الحراري، فإن متوسـط الطاقة الحركية للجزيئات في الحديد والماء تصبح متماثلة. وفي هذه الحالـة فإن عددًا كبيرًا من الجزيئات، أصبحت حركتها العشـوائية أكبر مما كانت عليه في البداية، وهذه الحالـة النهائية تكون أقل ترتيبًا من الحالـة الابتدائية. ولا تبقى الجزيئات السريعة مقتصرة على الحديد فحسـب، كما لم تعد الجزيئات الأبطأ مقتصرة على الماء فقط؛ إذ إن السرعات جميعهـا موزعة بانتظام. ويكون الإنتروبي للحالة النهائية أكبر منه للحالة الابتدائية.

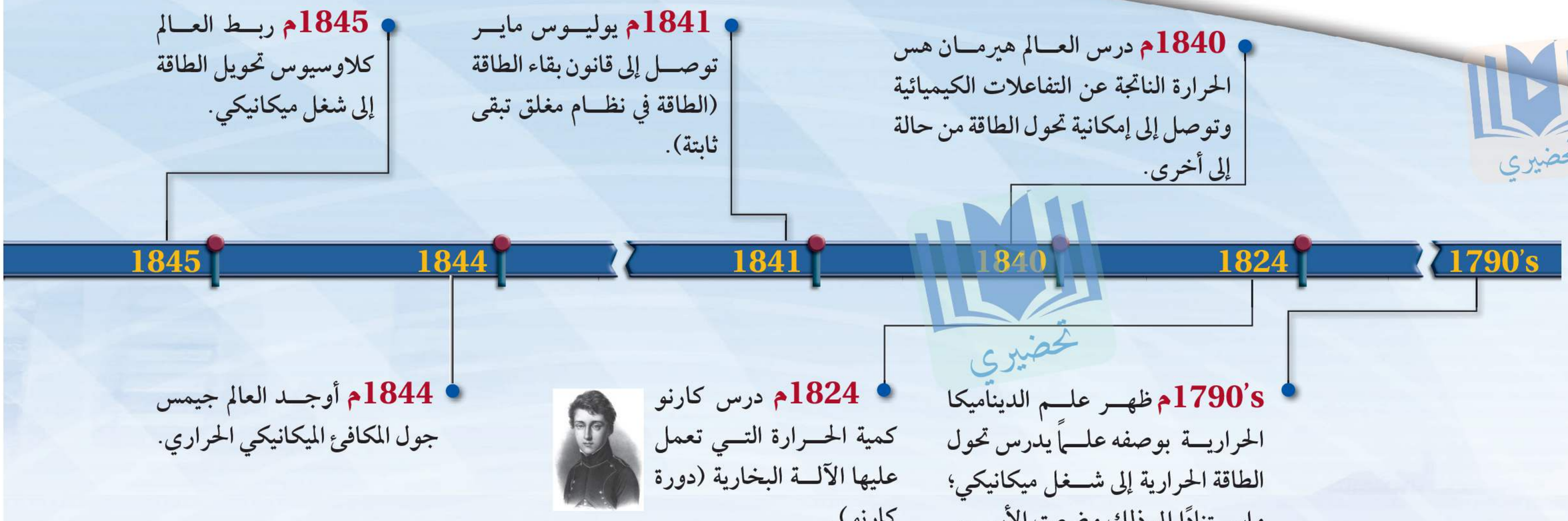
مخالفـات للقانـون الثاني إننا نعتبر العديد من الأحداث اليوميـة التي تحدث تلقائيًّا، أو طبيعيًّا، في اتجاه واحد من الأمور البديهية؛ وسـوف نندهش إذا وقعت الأحداث نفسـها بشـكل معكوس تلقائيًّا. فمثلاً، لن تندهش عندما تُسخنِّ ملعقة معدنية من أحد طرفيها، فتصبح سـاخنة بأكملها بانتظام. ولكن تخيل ردة فعلك، إذا كانت لديك ملعقة مسـتقرة على طاولة، وفجأة أصبح أحد طرفيها سـاخنًا ومحمرًا، والطرف الآخر متجمدًا وباردًا!

وإذا غُصْت في بركة سباحة فسوف تتوقع بديهيًّا أنك ستدفع جزيئات الماء بعيدًا عند دخولك إلى الماء، ولكنك ستندهش إذا عملت الجزيئات كلها على قذفك تلقائيًّا إلى منصة الغطس. لن يخالف أي من هذه العمليات الافتراضية المعكوسة القانون الأول في الديناميكا الحرارية. وتعد ببساطة أمثلة على الأحداث التي لا تحدث ولا حصر لها؛ لأن عملياتها تخالف القانون الثاني في الديناميكا الحرارية.

يقدم القانون الثاني في الديناميكا الحرارية وزيادة الإنتروبي معنى جديدًا لما يسمّى أزمة الطاقة. وتشير أزمة الطاقة إلى المشاكل الناجمة عن الاستخدام المستمرّ للمصادر المحدودة من الوقود الأحفوري، مثل الغاز الطبيعي، والنفط. فأنت عندما تستخدم مصدرًا مثل الغاز الطبيعي لتدفئة منزلك، فإنك لا تستهلك الطاقة التي في الغاز، وإنما تحول الطاقة الكيميائية الكامنة في جزيئات الغاز إلى طاقة حرارية في اللهب، ثم تنتقل الطاقة الحرارية التي في اللهب إلى طاقة حرارية في الهواء داخل المنزل، ولا تفنى الطاقة حتى لو تسرب هذا الهواء الدافئ إلى الخارج؛ فالطاقة لم تستهلك. أما الإنتروبي فقد ازداد.

إنّ التركيب الكيميائي للغاز الطبيعي منظم جدًّا، وكما تعلمت، عندما تصبح مادة أكثر سخونة، فإن متوسط الطاقة الحركية للجزيئات داخل المادة يزداد، أمّا الحركة العشوائية للهواء الدافئ فتصبح غير منتظمة. ورغم أنه من الممكن رياضيًّا للترتيب الكيميائي الأصلي أن يُعاد تشكيله، إلا أن احتمال حدوث ذلك بالتأكيد معدومة. ولهذا السبب، يُستخدم الإنتروبي غالبًا بوصفه مقياسًا لعدم توافر طاقة مفيدة. فالطاقة التي في الهواء الدافئ في المنزل غير متوافرة لتنجز شغلاً ميكانيكيًّا أو لتنقل الحرارة إلى أجسام أخرى، كما هو الحال بالنسبة لجزيئات الغاز الأصلية. وإن نقص الطاقة القابلة للاستخدام هو فعليًّا فائض في الإنتروبي. وأخيرًا يمكن القول بأن علم الديناميكا الحرارية ظهر بوصفه علمًا يدرس تحول الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي في أواخر القرن الثامن عشر وكان أساسًا لعمل الآلات الحرارية. ويبين **الشكل 17–6** إسهامات بعض العلماء فيه.

الشكل 17–6 خط زمني يبين إسهامات بعض العلماء في تطور علم الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها.



27. عند تكثف بخار الماء (مثل العرق أو بخار في الغرفة) ليتحول إلى سائل، فإنه يطلق كمية من الطاقة الحرارية في الوسط المحيط. هذه الطاقة تساوي الحرارة الكامنة للتبخر التي امتصها عند تحوله إلى بخار. هذا الإطلاق للطاقة الحرارية يؤدي إلى تدفئة السطح الذي يتكثف عليه والهواء المحيط به.

33. عملية حرق الغاز الطبيعي هي تفاعل كيميائي يحول جزيئات الوقود (مثل الميثان) والأكسجين، وهي جزيئات كبيرة ومنظمة نسبيًا، إلى عدد أكبر من الجزيئات الأصغر (ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء). هذه الزيادة في عدد الجسيمات تزيد من الفوضى. بالإضافة إلى ذلك، تنتشر الطاقة الحرارية الناتجة بشكل عشوائي في الغرفة، فتزيد من الحركة العشوائية لجزيئات الهواء، مما يزيد الأنتروبي (الفوضى) الكلي للنظام.

2–6 مراجعة

تحضيري

27. الحرارة الكامنة للتبخر يرسل النظام القديم للتدفئة بخارًا داخل الأنابيب في كل غرفة من المنزل، ويتكثف هذا البخار في داخل المبرد ليصبح ماءً. حلّل هذه العملية، واشرح كيف تعمل على تدفئة الغرفة؟

28. نحسب الحرارة على ثلاث مراحل:
1. تسخين الماء من 80.0°C إلى 100.0°C:
Q1 = mcΔT =
(0.0500)(4180)(20.0)
= 4180 J
2. تبخير الماء عند 100.0°C: Q2 = mHv =
(0.0500)(2.26×10^6)
113000 J =
3. تسخين البخار من 100.0°C إلى 110.0°C:
Q3 = mcΔT =
(0.0500)(2020)(10.0)
= 1010 J
الحرارة الكلية:
Q_total = 4180 + 1010 + 113000 =
118190 J ≈ 1.18 × 10^5 J

28. الحرارة الكامنة للتبخر ما مقدار كمية الحرارة اللازمة لتحويل 50.0 g من الماء عند درجة حرارة 80.0 °C إلى بخار عند درجة حرارة 110.0 °C؟

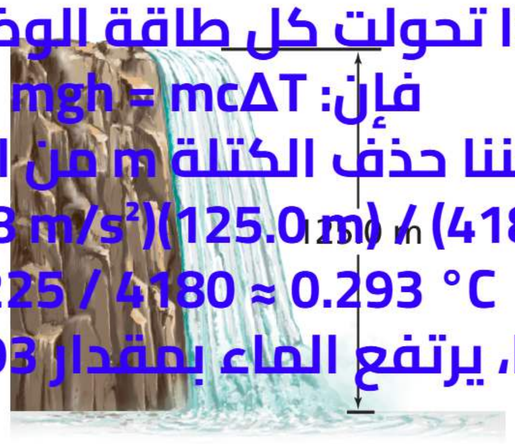
29. الحرارة الكامنة للتبخر ما مقدار الطاقة اللازمة لتسخين 1.0 kg من الزئبق عند درجة حرارة 10.0 °C إلى درجة الغليان وتبخره كاملاً؟ علماً بأن الحرارة النوعية للزئبق هي 140 J /Kg.0C، والحرارة الكامنة لتبخره هي 3.06×10^5 J / kg، ودرجة غليان الزئبق هي 357 °C.

30. الطاقة الميكانيكية والطاقة الحرارية قاس جيمس جول الفرق في درجة حرارة الماء عند قمة شلال ماء وعند قاعه بدقة. فلماذا توقع وجود فرق؟

31. الطاقة الميكانيكية والطاقة الحرارية يستخدم رجل مطرقة كتلتها 320 kg تتحرك بسرعة 5.0 m /s لتحطيم قالب رصاص كتلته 3.0 kg موضوع على صخرة كتلتها 450 kg. وعندما قاس درجة حرارة القالب وجد أنها زادت 5.0 °C. فسّر ذلك.

32. الطاقة الميكانيكية والطاقة الحرارية تتدفق مياه شلال يرتفع 125.0 m كما في الشكل 18–6. احسب الفرق في درجة حرارة الماء بين قمة الشلال وقاعه إذا تحولت كل طاقة وضع الماء إلى طاقة حرارية.

32. إذا تحولت كل طاقة الوضع إلى طاقة حرارية، فإن: PE = Q → mgh = mcΔT.
يمكننا حذف الكتلة m من الطرفين: gh = cΔT.
ΔT = gh / c = (9.8 m/s²)(125.0 m) / (4180 J/kg·°C) = 1225 / 4180 ≈ 0.293 °C
إذًا، يرتفع الماء بمقدار 0.293 درجة مئوية.



■ الشكل 18–6

33. الإنتروبي لماذا ينتج عن تدفئة المنزل عن طريق الغاز الطبيعي زيادة في كمية الفوضى أو العشوائية؟

34. التفكير الناقد إذا كان لديك أربع مجموعات من بطاقات فهرسة، لكل مجموعة لون محدّد. تحتوي كل مجموعة 20 ورقة مرقمة. فإذا خلطت بطاقات هذه المجموعات معًا عدة مرات فهل يحتمل أن تعود البطاقات إلى ترتيبها الأصلي؟ وضح ذلك. وما القانون الفيزيائي الذي ينطبق عليه هذا المثال؟

31. الطاقة الحركية للمطرقة قبل الاصطدام تحولت عند التصادم إلى أشكال أخرى من الطاقة، منها الشغل المبذول لتشويه القالب، والطاقة الصوتية، والطاقة الحرارية. الجزء الأكبر من هذه الطاقة تحول إلى طاقة حرارية، مما أدى إلى رفع درجة حرارة قالب الرصاص. هذا يوضح تحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية.

34. لا، من غير المحتمل إحصائياً أن تعود البطاقات إلى ترتيبها الأصلي. هناك ترتيب واحد فقط صحيح، بينما يوجد عدد هائل من الترتيبات العشوائية الممكنة. الخلط العشوائي سيؤدي بالنظام إلى إحدى الحالات الأكثر احتمالاً، وهي الحالات الفوضوية. هذا المثال يوضح القانون الثاني للديناميكا الحرارية، الذي ينص على أن الأنتروبي (مقياس الفوضى) في نظام معزول يميل إلى الزيادة أو البقاء ثابتاً، ولا يتناقص تلقائياً.

1850م استنتج بولتزمان إمكانية حدوث التغير العكوس في نظام مغلق.

1878–1875م أثبت ويلارد غيبس ما توصل إليه هلمولنز من حيث الربط بين الطاقة الكهربائية للبطارية و الطاقة الكيميائية والحرارية الناتجة عن التفاعلات فيها.

1862م توصل مارسين برتلوت إلى إمكانية الحصول على قوة دافعة من الحرارة الناتجة عن التفاعلات الكيميائية.

1945م اقترح سيلسيوس أن تكون درجة الصفر هي درجة تجمد الماء ودرجة 100 هي درجة غليانه.

1999م قدم العالم إليوت ليب منظومة الثيرموديناميكا لتفسير الإنتروبي.

1999 | 1945 | 1878–1875 | 1862 | 1850

29. نحسب الطاقة على مرحلتين:
1. تسخين الزئبق من 10.0°C إلى 357°C: Q1 = mcΔT = (1.0 kg)(140 J/kg·°C)(357°C - 10.0°C) = 48580 J
2. تبخير الزئبق عند 357°C: Q2 = mHv = (1.0 kg)(3.06×10^5 J/kg) = 306000 J
الطاقة الكلية: Q_total = Q1 + Q2 = 48580 J + 306000 J = 354580 J ≈ 3.5×10^5 J

30. نعم، يتوقع وجود فرق. عند سقوط الماء، تتحول طاقة وضعه الجاذبية إلى طاقة حركية. وعند اصطدام الماء بقاع الشلال، تتحول هذه الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية بسبب الاحتكاك واللزوجة، مما يؤدي إلى ارتفاع طفيف في درجة حرارة الماء عند القاع مقارنة بالقمة.