الفيزياء

كتاب الطالب

المستوى الثاني عشر

PHYSICS
STUDENT BOOK

GRADE
12

الفصل الدراسي الأول - الجزء الثاني
FIRST SEMESTER

2022-2021

الطبعة الأولى

© وزارة التعليم والتعليم العالي في دولة قطر

يخضع هذا الكتاب لقانون حقوق الطباعة والنشر، ويخضع للاستثناء التشريعي المسموح به قانونًا ولأحكام التراخيص ذات الصلة.

لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب من دون الحصول على الإذن المكتوب من وزارة التعليم والتعليم العالي في دولة قطر.

تمّ إعداد الكتاب بالتّعاون مع شركة تكنولاب.

التأليف: فريق من الخبراء بقيادة الدكتور توم سو وبالتّعاون مع شركة باسكو العلميّة.

التّرجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.

الطبعة الأولى 2021-2022 م

النشيد الوطني

قَسَـمًا بِمَـنْ رَفَـعَ السَّـمَاءْ قَسَـمًا بِمَـنْ نَشَـرَ الضِّـيَاءْ
قَطَـرٌ سَتَبْـقَى حُـرَّةً تَسْمُـو بِـرُوحِ الأَوْفِـيَـاءْ
سِـيرُوا عَـلَى نَـهْـجِ الأُلَـى وَعَـلَى ضِيَـاءِ الأَنْبِـيَاءْ
قَطَـرٌ بِقَـلْـبِي سِـيرَةٌ عِـزٌّ وَأَمْجَـادُ الإِبَـاءْ
قَطَـرُ الرِّجَـالِ الأَوَّلِـين حُمَـاتُنَـا يَـوْمَ النِّـدَاءْ
وَحَمَـائِـمُ يَـوْمَ السَّـلاَمْ جَـوَارِحٌ يَـوْمَ الفِـدَاءْ

المراجعة والتّدقيق العلميّ والتّربويّ

إدارة التقييم

خبرات تربويّة وأكاديميّة من المدارس

الإشراف العلميّ والتربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

الفيزياء

المقدّمة

يعدّ كتاب الطّالب مصدرًا مثيرًا لاهتمام الطلّاب من ضمن سلسلة كتب العلوم لدولة قطر، فهو يستهدف جميع المعارف والمهارات الّتي يحتاجون إليها للنّجاح في تنمية المهارات الحياتيّة وبعض المهارات في الموادّ الأخرى.

وبما أنّنا نهدف إلى أن يكون طلّابنا مميّزين، نودّ منهم أن يتّسموا بما يأتي:

- البراعة في العمل ضمن الفرق المختلفة.
- امتلاك الفضول العلميّ عن العالم من حولهم، والقدرة على البحث عن المعلومات وتوثيق مصادرها.
- القدرة على التّفكير بشكلٍ ناقدٍ وبنّاء.
- الثّقة بقدرتهم على اتّباع طريقة الاستقصاء العلميّ، عبر جمع البيانات وتحليلها، وكتابة التّقارير، وإنتاج الرّسوم البيانيّة، واستخلاص الاستنتاجات، ومناقشة مراجعات الزّملاء.
- الوضوح في تواصلهم مع الآخرين لعرض نتائجهم وأفكارهم.
- التّمرّس في التّفكير الإبداعيّ.
- التّمسّك باحترام المبادئ الأخلاقيّة والقيم الإنسانيّة.

يتجسّد في المنهج الجديد العديد من التّوجّهات مثل:

- تطوير المنهج لجميع المستويات الدّراسيّة بطريقة متكاملة، وذلك لتشكيل مجموعة شاملة من المفاهيم العلميّة الّتي تتوافق مع أعمار الطّلاب، والّتي تسهم في إظهار تقدّمهم بوضوح.
- مواءمة محتوى المصادر الدّراسيّة لتتوافق مع الإطار العامّ للمنهج الوطنيّ القطريّ بغية ضمان حصول الطّلّاب على المعارف والمهارات العلميّة وتطوير المواقف (وهو يُعرف بالكفايات) ممّا يجعل أداء الطّلاب يصل إلى الحدّ الأقصى.
- الانطلاق من نقطة محوريّة جديدة قوامها مهارات الاستقصاء العلميّ، ما أسّس للتّنوّع في الأنشطة والمشاريع في كتاب الطّالب.
- توزّع المعرفة والأفكار العلميّة المخصّصة لكلّ عام دراسيٍّ ضمن وحدات بطريقة متسلسلة مصمّمة لتحقيق التّنوّع والتّطوّر.

- تعدّد الدّروس في كلّ وحدة، بحيث يعالج كلّ درس موضوعًا جديدًا، منطلقًا ممّا تمّ اكتسابه في الدّروس السّابقة.
- إتاحة الفرصة للطّلّاب، في كلِّ درسٍ، للتّحقّق الذّاتيّ من معارفهم ولممارسة قدرتهم على حلّ المشكلات.
- احتواء كلّ وحدة على تقويم للدّرس وتقويم الوحدة الّتي تمكِّن الطّلّاب والأهل والمدرّسين من تتبّع التّعلّم والأداء.

العلوم مجموعة من المعارف الّتي تشمل الحقائق والأشكال والنّظريّات والأفكار. ولكنَّ العالِم الجيّد يفهم أنّ «طريقة العمل» في العلوم أكثر أهمّيّة من المعرفة الّتي تحتويها.

سوف يساعد هذا الكتاب الطُّلّاب على تقدير جميع هذه الأبعاد واعتمادها ليصبحوا علماء ناجحين وليواجهوا مجموعة واسعة من التّحدّيات في حياتهم المهنيّة المستقبليّة.

مفتاح كفايات الإطار العام للمنهج التّعليمي الوطني لدولة قطر

- الاستقصاء والبحث
- التّعاون والمشاركة
- التّواصل
- التّفكير الإبداعيّ والناقد
- حلّ المشكلات
- الكفاية العددية
- الكفاية اللغويّة

الفيزياء

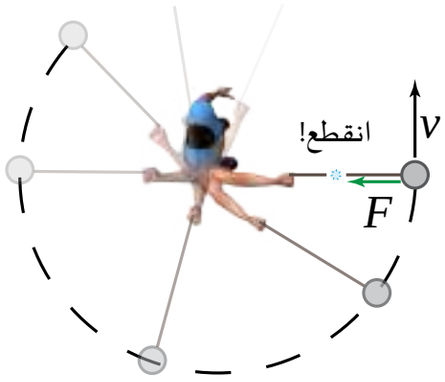
ماذا ستتعلّم من هذا الكتاب

بينما يظلّ كوكب الأرض في حركة دائمة، يمكنك أن تقرأ هذه الصفحة واقفًا أو جالسًا. هل أنت في حالة حركة أم في حالة سكون؟ الإجابة ليست بسيطة. كما قد تحسب. ذلك أن الأرض تتحرّك باستمرار في نوعَيْن من الحركة الدائرية: تكون الحركة الأولى مدارية سنوية حول الشمس بسرعة مُتَوسِّطة 29,780 m/s، أو حوالي 107,000 km/h. والحركة الثانية دورانًا يوميًّا للكوكب حول نفسه مرَّة واحدة كل 24 ساعة. عند خط العرض المار في مدينة الدوحة (25.3 درجة شمالًا)، يمنحك دوران الأرض سرعة 420 m/s، أو 1,515 km/s في الاتِّجاه من الغرب إلى الشرق.

نوعان من الحركة الدائرية للأرض

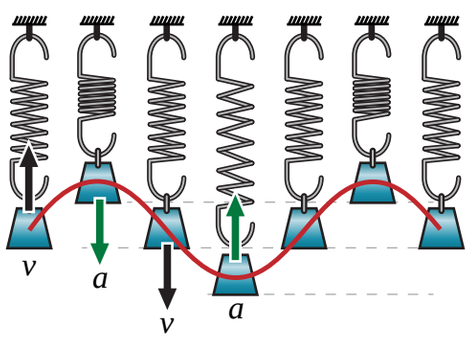
تتناول الوحدة الأولى من هذا الفصل الدراسي الحركة الدائرية، كالحركة المدارية للأرض حول الشمس ودورانها اليومي حول نفسها. تبدأ الوحدة بمناقشة مفاهيم جديدة مثل الراديان والسرعة الزاوية والقوة المركزية. ثم تناقش قانون الجذب العام لنيوتن ومفهوم جهد الجاذبية.

وتُختتم الوحدة بمُقدِّمة عن الحركة المدارية، بما في ذلك الأقمار الاصطناعية والكواكب.



هناك حاجة إلى قوة مركزية ثابتة المقدار لإبقاء الجسم في حركة دائرية

وتتحدَّث الوحدة الثانية من الفصل الأول عن الحركة التوافُقيَّة والموجات والرنين. تتواجد الحركة التوافقية في الكثير من الظواهر الطبيعة والتطبيقات التكنولوجية. سوف ندرس اهتزازيَن كلاسيكيَّين: البندول ونظام الكتلة والنابض. يتم البحث أيضًا في أفكار الرنين والتردُّد الطبيعي. فقد يؤدّي الرنين إلى سعة اهتزاز كبيرة جدًّا للحركة، حتى عندما تكون القوى التي تُسبِّب الحركة صغيرة نسبيًا.

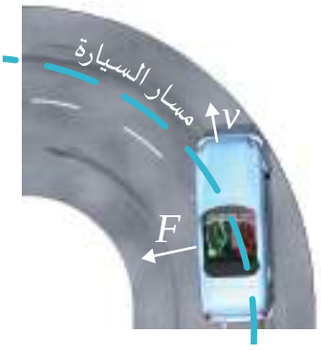


اهتزاز كتلة مُعلَّقة بنابض

بعض أقسام هذا الكتاب

الرّسوم التّوضيحيّة

مفاهيم مهمّة وبيانات وأمثلة على كل فكرة جديدة معروضة من خلال الإيضاحات المُفصَّلة والشروحات



أسئلة للمناقشة

لماذا تندفع إلى الخارج أثناء وجودك في سيّارة تسير في دوّار؟

أسئلة المناقشة تزوّد طلّاب الصفّ بفرصة مناقشة المفاهيم والمعلومات.

شريط الأفكار المهمّة

طاقة الوضع التجاذبية تنتج من الشغل المبذول ضد قوة الجاذبية.

تحديد النقاط الرّئيسة وتذكُّرها.

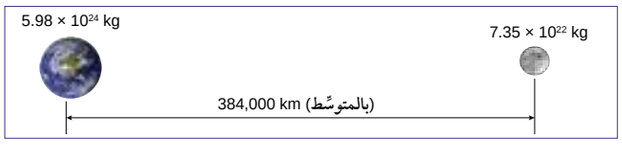
العلاقات والمعادلات

8-1	القوة المركزية	F_c	القوة المركزية (N)
	$F_c = \frac{mv_t^2}{r}$	m	الكتلة (kg)
		v_t	السرعة المماسية (m/s)

مُثلِّت علاقات الكميّات الفيزيائيّة من خلال المُتغيّرات ووحدات قياسها بشكل واضح.

الأمثلة

مثال 11



احسب طاقة الوضع التجاذبية لنظام الأرض والقمر إذا كانت كتلة الأرض 5.98×10^{24} kg، وكتلة القمر

تُظهر الأمثلة جميع خطوات الحلّ والتفسير للحصول على حسابات صحيحة.

العلم والعلماء

ضوء على العلماء

محمد الخوارزمي (780-850)

يُعدّ محمد بن موسى الخوارزمي أبا الجبر وجَدَّ علوم الحاسوب. كان عالمًا مسلمًا رياضيًّا وفلكيًّا وجغرافيًّا. وُلد في بلاد فارس وعمل في بيت الحكمة في بغداد. كان بيت الحكمة معهدًا تعليميًّا وبحثيًّا شهيرًا في ذلك الوقت. وقد أُنشِئ أثناء حكم الخليفة العبّاسي السادس.

طوّر الخوارزمي أفكارًا عن الخوارزميات والجبر، وقد تضمّن كتابه «حساب الجبر والمقابلة» حلولًا لمعادلات تربيعية عديدة.

أوجد الخوارزمي أساليب لحساب الأراضي وتقسيمها وفق الميراث. وقد قال: «الحساب أسهل وأكثر فائدة، فهو ما يحتاج إليه الناس باستمرار في حالات الميراث والتركات وتقسيمها وكذلك الدعاوى القضائية والتجارة، وفي جميع معاملاتهم، كذلك بما يتعلّق بقياس الأراضي وحفر القنوات

تمّ تطوير معارفنا العلميّة على مدى أكثر من ثلاثة آلاف عام. تُطلعُنا هذه المقالات على إلهام الإنسان وتبصُّرِه في التعامُل مع العلم والتكنولوجيا.

الصّفّ
12

الفصل الدّراسي 1

الفيزياء

الأنشطة والمراجعة والتّقويم

الأنشطة

التدرُّب العملي من خلال المُختبر والمشاريع البحثيّة وسواهما من الأنشطة التي تُرسّخ معاني الأفكار الجديدة وتطوُّر العمل المخبري.

الوحدة 2: الاهتزازات والخصائص المُنتقِلة للموجات

نشاط b3-2 الحصول على الرنين عمليًا

سؤال الاستقصاء	هل يمكننا جعل كتلة مُعلَّقة بنابض مُهتزّ تُحدث رنينًا إذا عرفنا تردُّدها الطبيعي؟
المواد المطلوبة	حامل قائم، نابض، كتلة بخطّاف، مسطرة، ساعة إيقاف عادية أو رقمية.

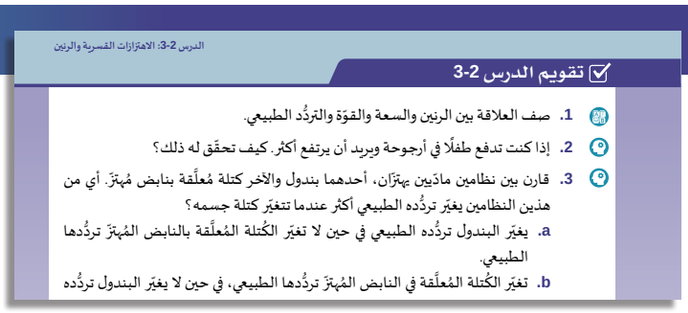
الخطوات

1. اربط الكُتلة ذات الخطاف بالنابض، ثم علّق

رافعة

تقويم الدّرس

يتميّز كل درس بعرض يحتوي على الأسئلة التي تُغطّي جميع المفاهيم والمعلومات في هذا الدرس.


الدرس 2-3: الاهتزازات القسرية والرنين

تقويم الدرس 2-3

1. صف العلاقة بين الرنين والسعة والقوّة والتردُّد الطبيعي.
2. إذا كنت تدفع طفلًا في أرجوحة ويريد أن يرتفع أكثر. كيف تحقّق له ذلك؟
3. قارن بين نظامين ماديين يهتزّان، أحدهما بندول والآخر كتلة مُعلّقة بنابض مُهتزّ. أي من هذين النظامين يغيّر تردُّده الطبيعي أكثر عندما تتغيّر كتلة جسمه؟
   a. يغيّر البندول تردُّده الطبيعي في حين لا تغيّر الكُتلة المُعلّقة بالنابض المُهتزّ تردُّدها الطبيعي.
   b. تغيّر الكُتلة المُعلّقة في النابض المُهتزّ تردُّدها الطبيعي، في حين لا يغيّر البندول تردُّده

مراجعة الوحدة

ملخّص قصير عند نهاية كل وحدة، وهو مرجع سريع للأفكار والمُصطلحات الرئيسية.

الوحدة 1

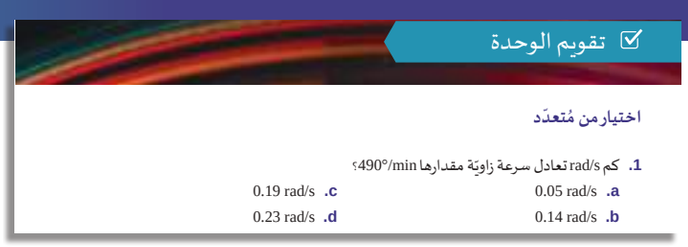
مراجعة الوحدة

الدرس 1-1: الحركة الدائرية

- الجسم الذي يسير على مسار دائري يقطع زاوية معيَّنة. تسمّى المسافة المنحنية التي يقطعها **الإزاحة الزاويّة** للجسم.
- تُقاس الإزاحة الزاويّة بوحدة **الراديان**، وهي نسبة بين طولين. الراديان الواحد هو الزاوية الناتجة من دوران جسم حول محيط دائرة، مسافةً تساوي نصف قطرها.

تقويم الوحدة

زوّدت كل وحدة بمجموعة من الأسئلة ذات الخيارات المتعددة كعينة تحضّر الطالب لاختبار نموذجي.

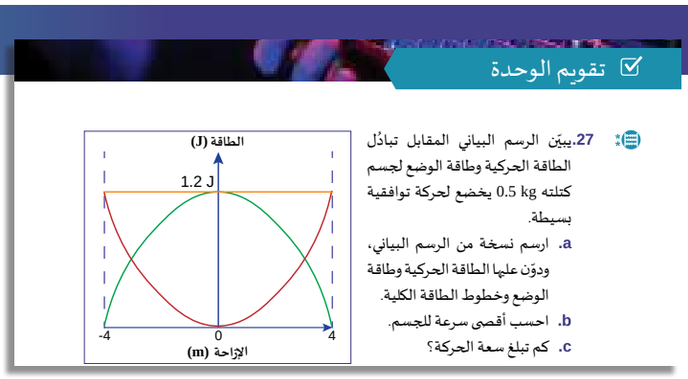

تقويم الوحدة

اختيار من مُتعدّد

1. كم rad/s تعادل سرعة زاويّة مقدارها 490°/min؟
   a. 0.05 rad/s
   b. 0.14 rad/s
   c. 0.19 rad/s
   d. 0.23 rad/s

تقويم الوحدة

أسئلة الإجابة القصيرة وأسئلة الإجابة المطوّلة بُنيتا على مُستويات ثلاثة من الصعوبة في نهاية كل وحدة.


تقويم الوحدة

27. يبيّن الرسم البياني المقابل تبادُل الطاقة الحركية وطاقة الوضع لجسم كتلته 0.5 kg يخضع لحركة توافقية بسيطة.
   a. ارسم نسخة من الرسم البياني، ودوّن عليها الطاقة الحركية وطاقة الوضع وخطوط الطاقة الكلية.
   b. احسب أقصى سرعة للجسم.
   c. كم تبلغ سعة الحركة؟

مخطّط المادّة

الوحدة 1 الجاذبية والحركة الدائرية

ما الذي يجعل جسمًا يدور حول نفسه؟ ما الذي يجعله يتحرّك في مسار دائري؟ ما مدى سرعة دورانه؟ تتطلب الإجابات عن كل هذه الأسئلة فهم الحركة الدائرية وفكرة القوَّة المركزية المُتَّصلة بها. تتسارع الأجسام التي تتَّبع مسارًا دائريًّا رُغم أنها قد تسير بسرعة ثابتة المقدار. تنقلنا هذه الوحدة من فهم الحركة الخطّية إلى الحركة الدورانية، بما في ذلك قانون نيوتن للجذب العام. تُبقي جاذبية الشمس الكواكب في مداراتها حول الشمس، تمامًا مثلما تجذب الأرض القمر وتبقيه في مداره حول الأرض. لقد سمح لنا فهم الحركة الدائرية بإطلاق آلاف الأقمار الاصطناعية في الفضاء.

الوحدة 2 الاهتزازات والخصائص المُتقدِّمة للموجات

تحدث الحركة التوافُقيّة عندما تتكرَّر الحركة مرارًا وتكرارًا في أنماط مُتطابقة تُسمّى الاهتزازات. يُعّد كلّ من اهتزاز خيط، وتمايل جسر تحت تأثير الرياح وحتى اهتزازات الذرّات في المواد الصلبة حول مواضع ثابتة، أشكالًا من الحركة التوافقية. يتم استخدام البندول والكُتلة المهتَّزة المعلقة بطرف نابض لمعرفة خصائص الاهتزازات. هناك العديد من التطبيقات العملية، مثل الاهتزازات التي تحدث في المباني والجسور بسبب الرياح العاتية. إذ يتمّ تصميم الهياكل الآمنة بحيث لا يتطابق اهتزاز المبنى مع اهتزاز الرياح. وتُمثِّل ظاهرة الرنين مفهومًا مُهمًّا في استيعاب فكرة الاهتزازات. ومعلوم أن جميع الأنظمة التي تهتز لها تردُّد طبيعي واحد أو أكثر. وتصبح أنظمة الاهتزاز، كمولِّد الميكروويف، فعّالة جدًّا في تجميع الطاقة عند تردُّدها الطبيعي. يُستخدم الرنين في العديد من التقنيات، منها الهواتف المحمولة.

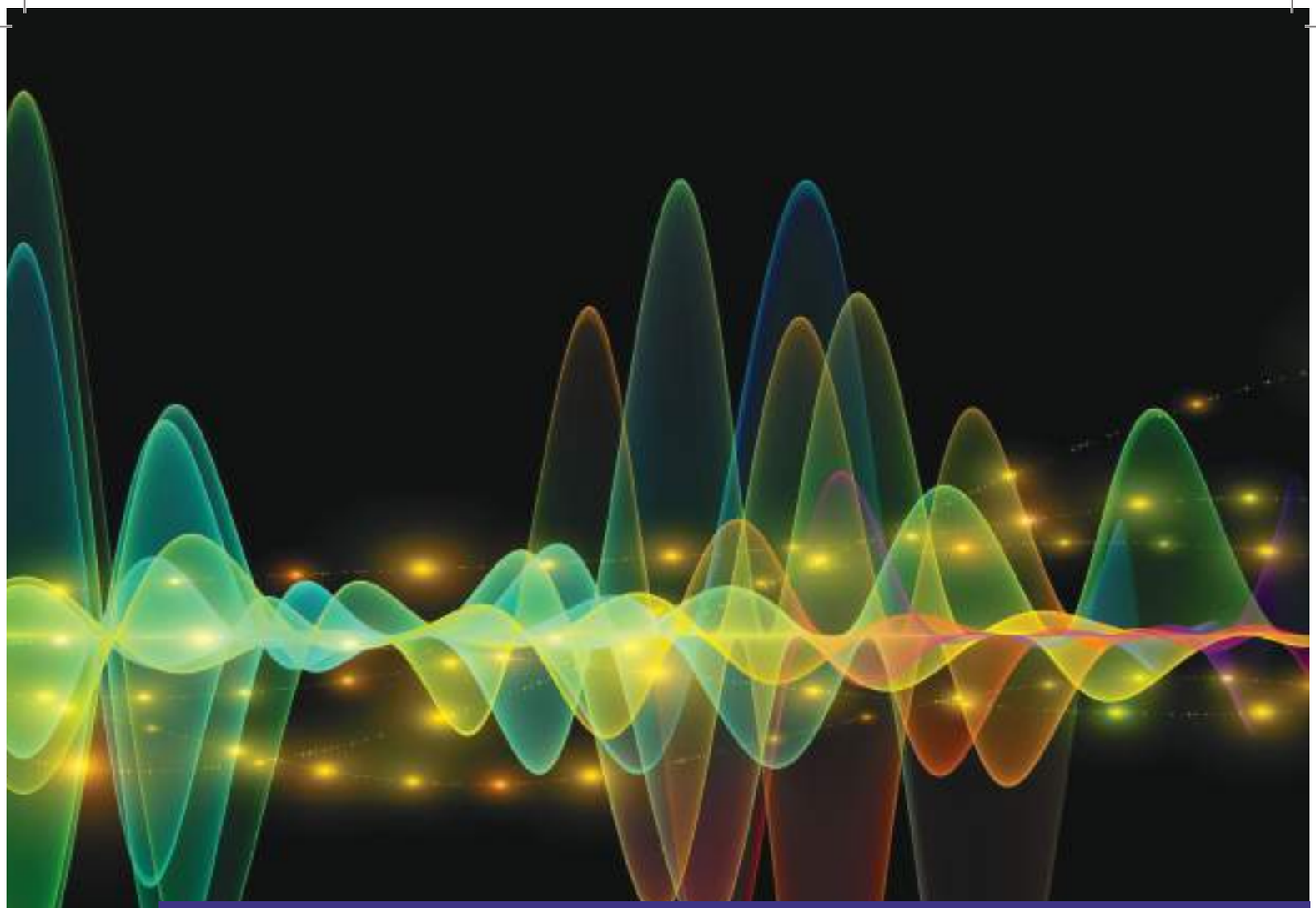
جدول المحتويات

الوحدة 2 الاهتزازات والخصائص المُتقدِّمة للموجات 58

الدرس 2-1 الحركة التوافقية البسيطة 60

الدرس 2-2 الطاقة في الحركة التوافقية البسيطة 81

الدرس 2-3 الاهتزاز القسري والرنين 92



الوحدة 2

الاهتزازات والخصائص المُتقدِّمة للموجات

Oscillations and Advanced Properties of Waves

في هذه الوحدة

P1203
P1204

الدرس 2-1: الحركة التوافقية البسيطة

الدرس 2-2: الطاقة في الحركة التوافقية البسيطة

الدرس 2-3: الاهتزاز القسري والرنين

الوحدة 2

مقدّمة الوحدة

تحدث الحركة التوافقية عندما تتكرّر الحركة كثيرًا وفق أنماط مُتطابِقة تُسمّى الاهتزازات.

نجد في حياتنا اليومية كثيرًا من الأمثلة على الحركة التوافقية كاهتزاز خيط وتأرجح جسر تحت تأثير الرياح. وحتى الذرّات في المواد الصلبة التي تهتز حول مواضع ثابتة هي أحد أشكال الحركة التوافقية.

يمكن استخدام الكتلة المهتزّة في نابض أو البندول أو الشريط المطّاطي لمحاكاة الاهتزازات المختلفة ودراسة تغيُّرات الطاقة التي تحدث أثناء الحركة التوافقية. يتعيَّن على المهندسين دراسة الاهتزازات التي يمكن أن تحدث في المباني والجسور بسبب الرياح العاتية. يتم تصميم الهياكل لضمان عدم تطابُق اهتزازات المباني مع اهتزازات هبوب الرياح.

يستخدم العلماء أيضًا مبدأ الرنين والتردُّد الطبيعي عند بناء ساعة ذرّية. فإذا استخدموا أشعة ميكروويف ترددها مساوٍ للتردُّد الطبيعي للسيزيوم -133، فإن اهتزازات ذرات السيزيوم تتحكم في اهتزاز دائرة كهربائية، تقوم بدورها بتشغيل الساعة الذرّية.

الأنشطة والتجارب

1-2	تحديد تسارُع الجاذبية g باستخدام بندول بسيط
a2-2	تصميم بندول رملي
b2-2	حفظ الطاقة في نظام كتلة-نابض مُهتزّ.
a3-2	بندول بارتون
b3-2	الحصول على الرنين عمليًا

الدرس 2-1

الحركة التوافقية البسيطة
Simple Harmonic Motion

كيف تُقدّر ساعة التوقيت مرور ثانية واحدة بالضبط من الزمن؟ إذا دقّقت، ستلاحظ أن أي ساعة توقيت تشتمل على جهاز يهتز. فتحديد الوقت هو في الأساس حساب اهتزازات نظام ما. لكل نوع من أنواع ساعات اليد والحائط وساعات الكمبيوتر جزء يحسب الاهتزازات. تحتوي ساعات الحائط القديمة على بندول يمكنك رؤيته يتأرجح ذهابًا وإيابًا بزمن دوري مقداره ثانيتان. يتحرّك عقرب الدقائق دورة كاملة واحدة كل 30 دورة من دورات البندول.

الشكل 2-1 ساعة كوارتز.

تستخدم معظم الساعات الحديثة، بما في ذلك الساعات الموجودة في أجهزة الكمبيوتر، بلّورة كوارتز. تهتزّ بلّورة الكوارتز بدقّة وانتظام شديدين بتردُّد 32.0000 kHz عند تعريضها لمجال أو فرق جهد كهربائي. يتم حساب هذه الاهتزازات وتحويلها إلى نبضة واحدة في الثانية بواسطة رقاقة صغيرة. ترسل الرقاقة الصغيرة إشارة إلى مُحرِّك يدير التروس أو المسننات على مدار الساعة. ونتيجة دوران التروس، تتحرّك عقارب الساعة. تعتبر ساعة الكوارتز أكثر دقة من الساعة الميكانيكية (ساعة البندول) حيث يصل مقدار الخطأ في ساعة الكوارتز إلى ثانية واحدة كل مئة عام تقريبًا. تستخدم خاصّيّة التردُّد الثابت والزمن الدوري الثابت لبلّورة الكوارتز للحصول على ساعة توقيت جيدة ودقيقة. يبقى الزمن الدوري ثابتًا بمرور الوقت وعند درجات حرارة مختلفة، وحتّى عندما يتغيَّر فرق الجهد قليلًا. على عكس ساعة البندول، لا تحتاج ساعات الكوارتز إلى الضبط يوميًّا.

مخرجات التّعلُّم

P1203.1 يصف أمثلة للاهتزازات الحرة، ويعرف المقصود بالمصطلحات: السعة، والتردد، والزمن الدوري، والتردد الزاوي، وفرق الطور.

P1203.2 يستخدم معادلات تمثل الإزاحة، والزمن الدوري، والسرعة، والتسارع في الحركة التوافقية البسيطة ويمثلها بيانيًّا.

المفردات

Cycle	دورة
Oscillator	جسم مُهتزّ
Simple harmonic motion	حركة توافقية بسيطة
Period	زمن دوري
Frequency	تردّد
Amplitude	سعة
Phase	طور
Angular frequency	تردُّد زاوي

الاهتزازات

ما أنواع الأنظمة التي تهتز؟

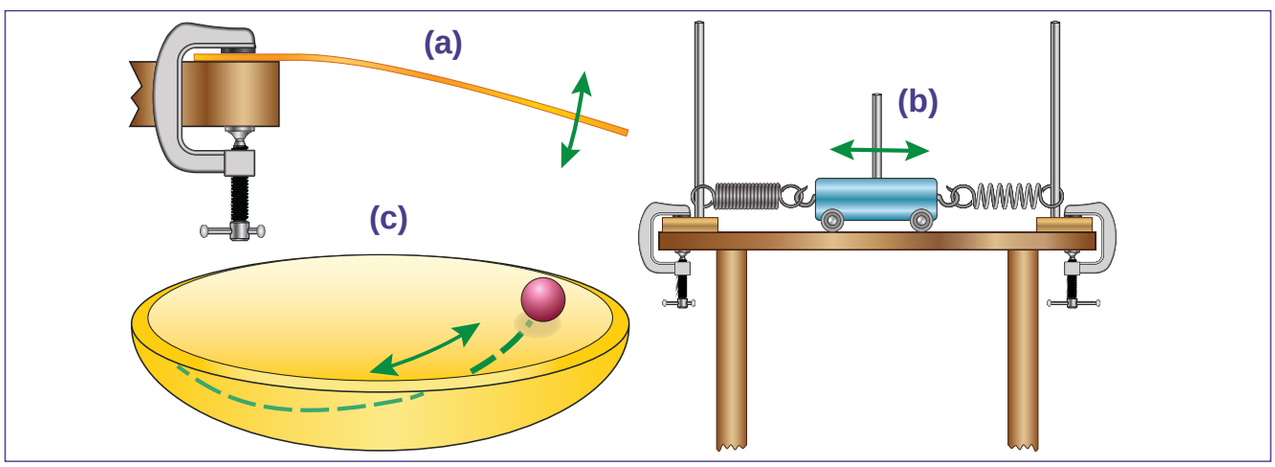
كيف يبدأ الاهتزاز؟

لديك مسطرة مُثبَّتة على طاولة (**الشكل 2-2 a**). تكون المسطرة في حالة سكون. ولكن إذا سحبتَ طرفها الحُرّ إلى أسفل وتركتَه، فسوف تهتز المسطرة إلى أعلى وأسفل. تُشبه المسطرة في حركتها جميع الأنظمة التي تهتز بحيث:

1. النظام له موضع اتّزان.
2. وجود قوّة تحرّك النظام وتدفعه بعيداً عن موضع الاتّزان.
3. وجود قوّة إرجاع تحاول دائمًا إعادة النظام إلى موضع اتزانه.

عربة فوق طاولة تتصل عند طرفَيها بنابضين (**الشكل 2-2 b**). إذا تم سحب العربة بأحد الاتّجاهين، فإن قوّة الإرجاع من النابضين تحاول إعادتها إلى الخلف. ونتيجة امتلاك العربة للزخم، فإنها تواصل الحركة إلى الجانب الآخر بعيدًا عن موضع الاتّزان. تعيد قوّة الإرجاع العربة إلى الخلف فتهتز.

مثال آخر على الاهتزاز، هو كُرة تهتز في وعاء نصف كروي. (**الشكل 2-2 c**). إذا حُرِّكت الكُرة من مركز الوعاء ثم تُرِكت، فسوف تهتزّ ذهابًا وإيابًا تحت تأثير قوّة الإرجاع من جوانب الوعاء.



الشكل 2-2 أمثلة على الاهتزازات.

استكشف

1. كيف تتغيَّر إزاحة الجسم المُهتز بالنسبة إلى موضع الاتّزان خلال حركته الاهتزازية؟
2. كيف نقيس بدقّة الزمن الدوري لجسم مُهتز؟
3. أي جسم مُهتز يسهل قياس زمنه الدوري بدقَّة؟ لماذا؟
4. هل تتسارع الأجسام المُهتزة؟
5. ما هو اتّجاه تسارُع الجسم المُهتز؟
6. متى تكون سرعة الجسم المُهتز عند قيمتها القصوى؟ ومتى تكون عند قيمتها الدنيا؟

الأنظمة المهتزة والحركة التوافقية البسيطة

النظام الذي يهتز عند تحريكه من موضع اتّزانه يُسمّى **جسمًا مُهتزًا Oscillator**. يكون للنظام المُهتزّ الخصائص التالية:

1. للنظام موضع اتّزان يكون فيه مُستقرًّا.
2. يمتلك النظام مصدرًا لقوّة إرجاع تمَيل إلى إعادة النظام دائمًا باتّجاه موضع الاتّزان.
3. يحتوي النظام على خاصّيّة القصور الذاتي التي تُساهم في استمرار اهتزازه بعيدًا عن موضع اتّزانه قبل أن تُعيده قوّة الإرجاع باتّجاه موضع الاتّزان.

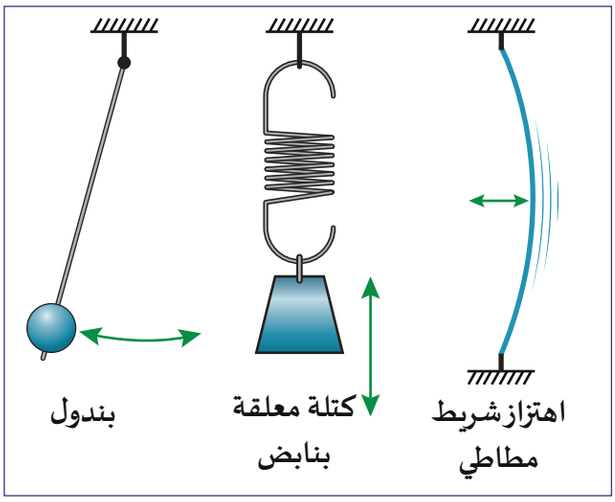
لفهم قوّة الإرجاع، فكّر في **الشكل 2-3a** الذي يبيّن كُرة في وعاء نصف كروي. إذا تم نقل هذه الكُرة إلى أحد الجوانب، فإن الوعاء يولد قوّة ارجاع تُعيد الكُرة مرّة أخرى باتّجاه موضع الاتّزان في قعر الوعاء. قارن هذه الحالة بالكُرة الموجودة على قمّة الوعاء المقلوب في **الشكل 2-3b**. تبدأ حركة الكُرة في كلتا الحالتين من موضع الاتّزان. يكون اتّزان الكُرة في **الشكل 2-3a** اتّزانًا مُستقرًا لأنها تتمتع بقوّة إرجاع. تهتز الكُرة في هذه الحالة حول موضع الاتّزان. أما اتّزان الكُرة في **الشكل 2-3b** فهو غير مستقر، وبالتالي لن تهتز، ولا يمكنها العودة إلى موضع اتزانها.

الشكل 2-3 **(a)** اتّزان مُستقرّ **(b)** اتّزان غير مُستقرّ

تهتز الأنظمة عند وجود قوة إرجاع.

الحركة التوافُقية البسيطة

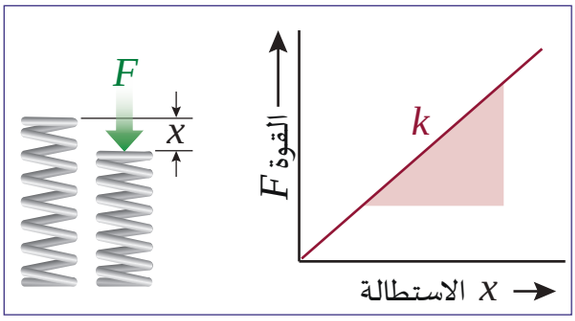
يكـون النظـام في **حركة توافقية بسيطة Simple harmonic motion** عندما يتناسب مقدار قوة الإرجاع طرديا مع الإزاحة من موضع الاتزان وتكون في الاتجاه المعاكس. هذا يعني أنّ مضاعفة إزاحة جسم ما، ستُضاعف قوة الإرجاع أيضًا. تتضمَّن بعض الأمثلة الشائعة على الأنظمة الموجودة في مختبر الفيزياء البندول وكتلة مُعلَّقة بنابض وحزام مطاطي مُهتزّ (**الشكل 2-4**). كل نظام يتحرك حركةً توافقية بسيطة يهتز بتردده الخاص به.



الشكل 2-4 أمثلة على الحركة التوافقية البسيطة.

قوى الإرجاع في النابض والبندول

ينصّ قانون هوك (**المُعادَلة 2-1**) على أن القوّة F التي يُطبّقها النابض تتناسب طرديًّا مع استطالته (أو انضغاطه) x. يوضّح الرسم البياني في **الشكل 2-5** استطالة النابض مع ازدياد قوّة الشد فيه. يُسمّى مَيل الرسم البياني بثابت النابض، k، وهو يقيس مدى «صلابة» النابض. وحدة قياس ثابت النابض تساوي حاصل قسمة وحدة قياس القوة على وحدة قياس الطول، أي N/m.



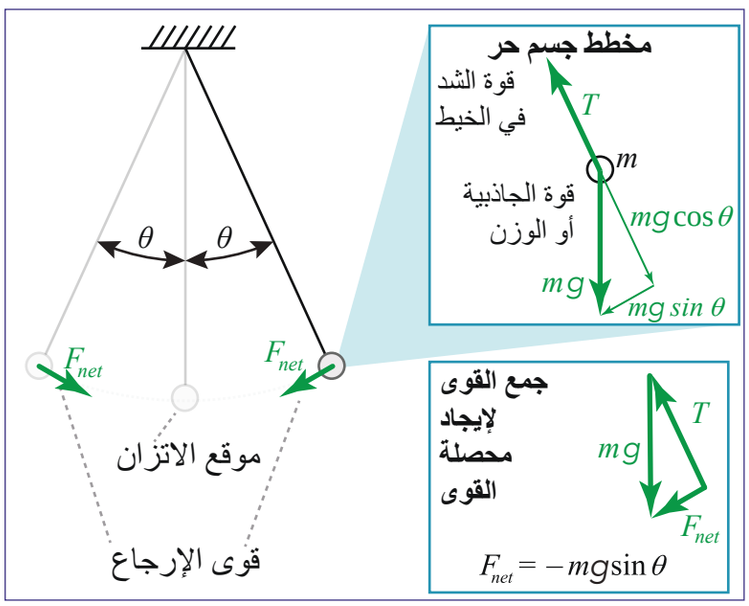
الشكل 2-5 القوّة والاستطالة لنابض.

1-2	قانون هوك وقوة الإرجاع		
	$F = -kx$	F	قوة الإرجاع (N)
		k	ثابت النابض (N/m)
		x	الاستطالة (m)

تفيدنا الإشارة السالبة في قانون هوك أن قوة الإرجاع تكون دائمًا في الاتّجاه المعاكس للإزاحة. وينطبق ذلك على جميع الأنظمة التي تهتز.

في جميع أنظمة الاهتزاز يكون اتّجاه قوى الإرجاع بعكس اتّجاه الإزاحة

يُشكّل الوزن، mg، قوّة الإرجاع في البندول؛ وهو يُؤثّر عموديًّا إلى الأسفل (**الشكل 2-6**). تؤثّر قوّة الشد، T، على امتداد طول الخيط. وعند أي زاوية θ باتّجاه اليمين، يكون اتّجاه مُحصِّلة القوى F المؤثرة في الكُتلة، باتّجاه موضع الاتّزان. عندما يمَيل الخيط بزاوية إلى اليسار، يكون اتّجاه مُحصِّلة القوى في الاتّجاه المعاكس، ونحو موضع الاتّزان أيضًا. تُعطي **المُعادَلة 2-2** قوّة الإرجاع في البندول.

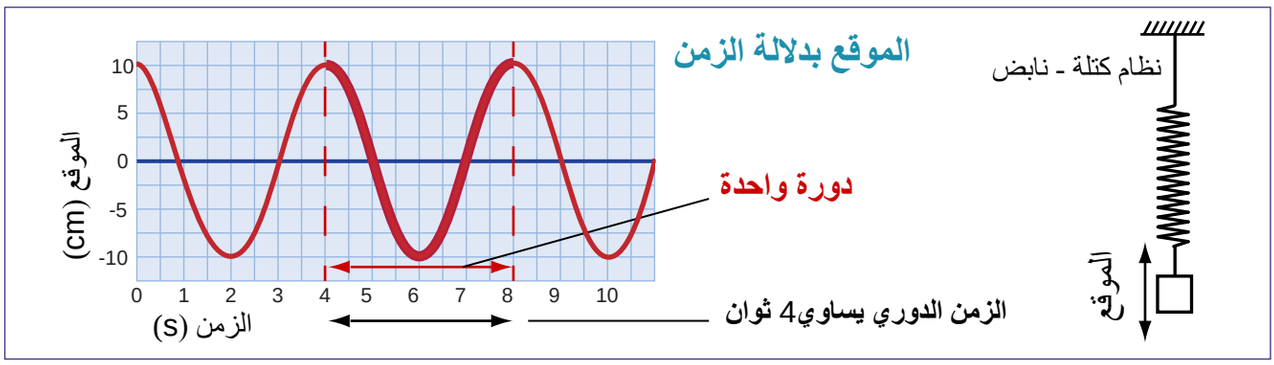


الشكل 2-6 قوى الإرجاع في البندول.

2-2	قوة الإرجاع في البندول		
	$F = -mg\sin\theta$	F	قوة الإرجاع (N)
		m	الكتلة (kg)
		g	تسارع الجاذبية (N/kg)
		θ	زاوية الإزاحة (degree)

التردُّد والزمن الدوري

تشكّل **الدورة Cycle** اهتزازة كاملة. يُسمّى الزمن اللازم لقطع دورة واحدة **بالزمن الدوري** Period T. يوضّح الرسم البياني في **الشكل 2-7** الموقع بدلالة الزمن لكتلة تتدلّى من نابض وتهتز إلى أعلى وأسفل. لاحظ أن دورة كاملة تحدث في فترة زمنية تمتد من نهاية الثانية الرابعة إلى بداية الثانية الثامنة.



الشكل 2-7 الزمن الدوري لكتلة تهتز وهي مُعلّقة بنابض.

يُمثّل **التردُّد Frequency** f للنظام المهتز عدد الدورات في كل ثانية. يتم قياس التردُّد بوحدة هيرتز Hz. علمًا أن 1 Hz يساوي دورة واحدة في الثانية. يمكننا اختبار مجموعة كبيرة من التردُّدات في البيئة المحيطة بنا. يتراوح تردُّد نبض قلب الإنسان بين 1 Hz و1.67 Hz. وقد يكون تردُّد الشريط المطاطي المُهتزّ 50 Hz.

ومعلوم أن كلًّا من التردُّد والزمن الدوري يساوي مقلوب الآخر (**المُعادَلة 2-3**). فإذا كان الزمن الدوري لنظام الكُتلة والنابض في **الشكل 2-7** يبلغ 4 s، يكون تردُّده $0.25\ \text{Hz} = \frac{1}{4}$. فالاهتزازات ذات الزمن الدوري الكبير ترددتها منخفضة. بينما تكون الاهتزازت السريعة مثل أوتار الجيتار، ذات تردُّدات أعلى.

3-2	التردد والزمن الدوري	f	التردُّد (Hz)
	$f = \frac{1}{T}$	T	الزمن الدوري (s)

مثال 1

نابض يكمل اهتزازة واحدة كل 0.33 ثانية. ماهو تردد النابض؟

المطلوب: تردُّد النابض f

المُعطى: الزمن الدوري $T = 0.33\ \text{s}$

العلاقات: $f = \frac{1}{T}$

الحل:

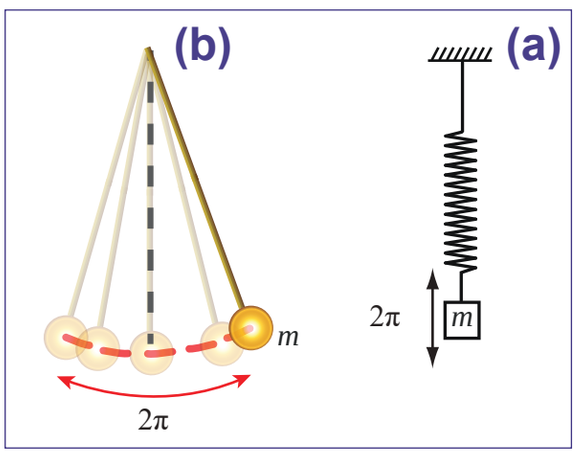
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.33\ \text{s}} = 3.0\ \text{Hz}$$

التردُّد الزاوي

التردُّد الزاوي Angular frequency ω هو التردُّد المعبر عنه بوحدات الطور 2π لكل دورة. تُعادِل الدورة الكاملة 2π راديان وبالتالي فإن التردُّد الزاوي هو حاصل ضرب 2π بالتردّد (**المُعادَلة 2-4**). فالتردُّد 1 Hz يقابله التردُّد الزاوي 2π rad/s.

4-2	التردد الزاوي		
$\omega = \frac{2\pi}{T}$ $\omega = 2\pi f$		ω	التردد الزّاوي (rad/s)
		f	التردُّد (Hz)
		T	الزمن الدوري (s)

يمكن أيضًا حساب التردُّد الزاوي من الزمن الدوري: $\omega = \frac{2\pi}{T}$. لاحظ أن π مُجرَّد رقم بلا وحدات. لذا تكون وحدة التردُّد الزاوي ω هي s^{-1}، كوحدة التردُّد العادي، f. غالبًا ما نكتب وحدة قياس التردُّد الزاوي على أنها rad/s فقط لتذكيرنا بالعامل 2π.



الشكل 2-8 مثالان على التردد الزاوي.

في **الشكل 2-8 (a)**، يكمل نظام الكُتلة والنابض دورة واحدة (2π rad) في زمن 0.65 s. وبالتالي يكون تردده 1.54 Hz وتردده الزاوي 9.67 rad/s.

بينما يُكمِل البندول في **الشكل 2-8 (b)**، دورة واحدة خلال 0.7 s فيكون تردُّده 1.43 Hz وتردده الزاوي 8.98 rad/s.

مثال 2

عندما تهتز أوتار الجيتار، تعود إلى موضع اتّزانها من أقصى إزاحة لها خلال 0.00227 s، احسب التردُّد والتردُّد الزاوي لتلك الاوتار.

المطلوب: تردُّد الأوتار f والتردُّد الزاوي ω.

المُعطى: $\frac{T}{4} = 0.00227$ s

العلاقات: $\omega = 2\pi f$ ، $f = \frac{1}{T}$

الحل: 0.00227 s هو الزمن الذي تستغرقه الأوتار للعودة إلى موضع اتّزانها من أقصى إزاحة لها. يعني ذلك أن: $T = 0.00227 \times 4 = 0.00908$s.

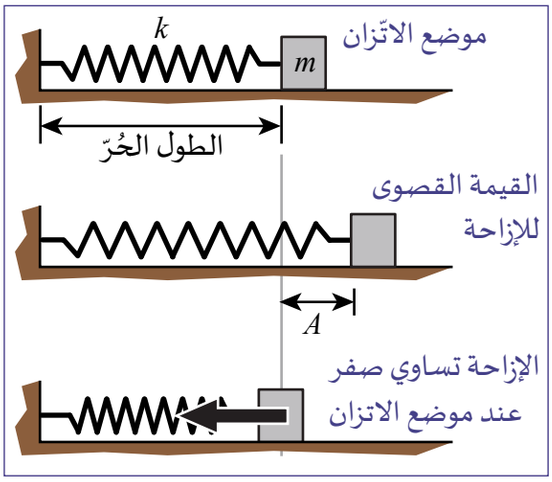
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.00908} = 110 \text{ Hz}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(110) = 691 \text{ rad/s}$$

الإزاحة والسعة

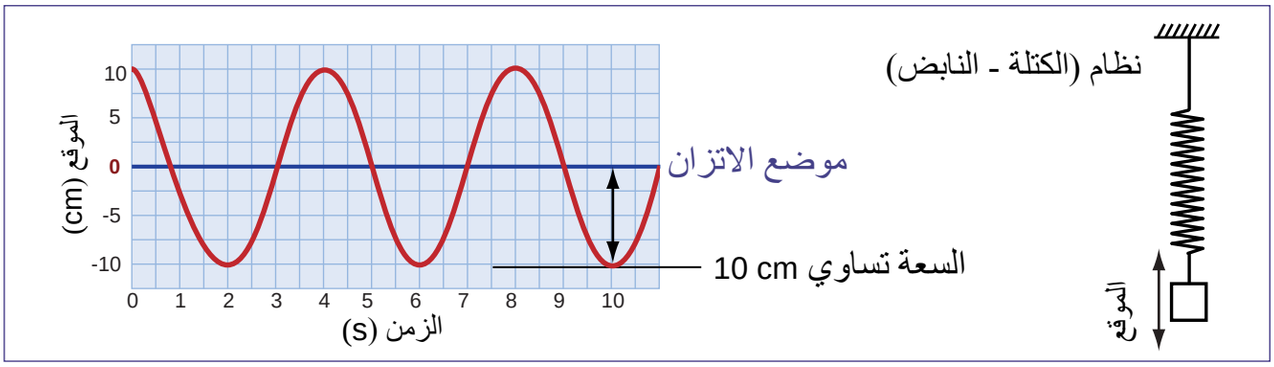
تُشكّل إزاحة النظام المهتز (الكتلة - النابض) المسافة التي تفصله عن موضع الاتّزان عند أي لحظة زمنية. الإزاحة كمّية مُتَّجهة.

تهتزّ الكُتلة في **الشكل 2-9**. وتكون إزاحتها x من موضع الاتّزان. في حين أن الإزاحة إلى يسار موضع الاتّزان هي $-x$. أما **السعة** A **Amplitude** فهي الإزاحة القصوى عن موضع اتّزان الجسم المُهتزّ. وفي النظام عديم الاحتكاك، تكون سعة الحركة التوافقية البسيطة ثابتة.



الشكل 2-9 إزاحة الكتلة عن موضع الاتّزان.

يتم قياس السعة بوحدة تتطابق مع شكل الاهتزاز. ففي حالة نظام الكُتلة والنابض تكون السعة هي المسافة المقطوعة. أما في حالة اهتزاز البندول فتكون السعة هي زاوية الانحراف. وقد تكون السعة جهدًا أو ضغطًا بالنسبة إلى أنظمة مهتزة أخرى.



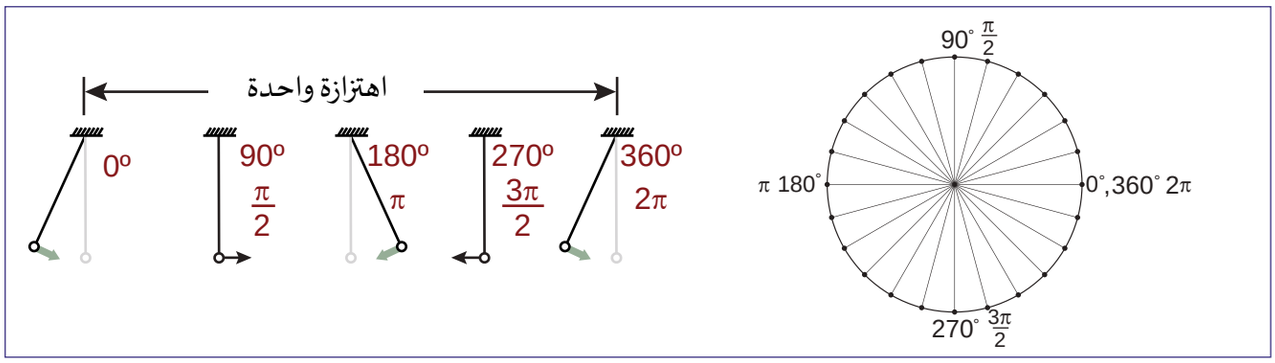
الشكل 2-10 سعة اهتزاز الكتلة المُعلَّقة بنابض.

تكمن أهمية السعة في أنها خاصّية ثابتة للاهتزاز. فالكُتلة المُعلَّقة بالنابض مثلًا تتحرَّك صعودًا ونزولًا بسعة 10 cm. بينما تعتمد الإزاحة على الزمن وتتغيَّر في كل ثانية. قد تكون الإزاحة +2 cm في لحظة ما، و -1 cm بعد ثوانٍ. يوضّح الرسم البياني في **الشكل 2-10** الكُتلة التي تتحرك على النابض بين +10 cm و -10 cm، وبالتالي فإنّ سعتها 10 cm.

ما الفرق بين السعة والإزاحة؟

الطَّور

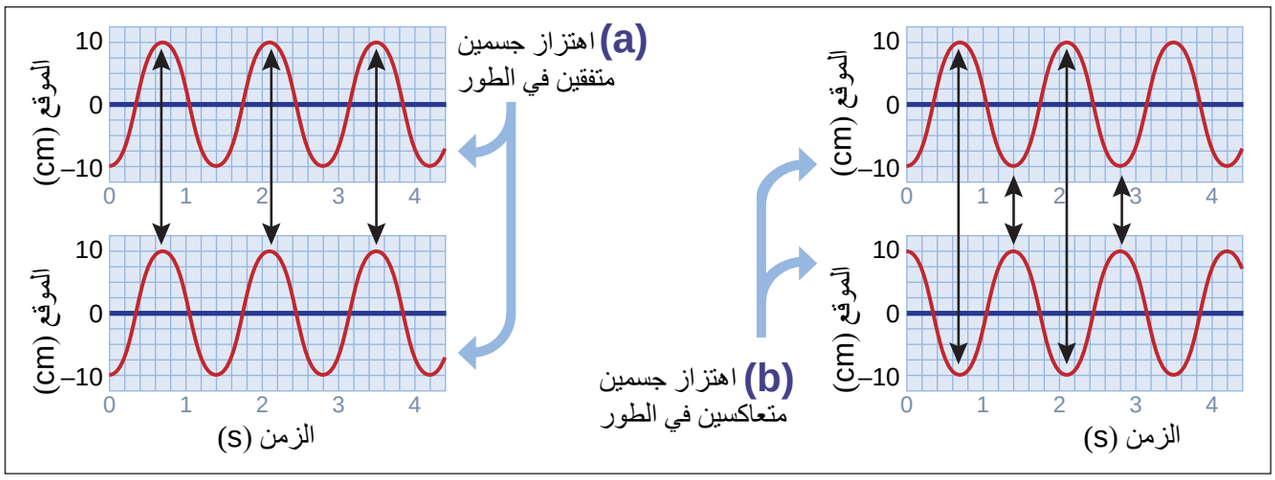
تصف كلمة **الطَّور Phase** موقع الجسم المُهتزّ في لحظة معيَّنة بالنسبة إلى دورته الكاملة. نجد أن تقسيم الدائرة الى اجزاء متساوية يمثل فكرة جيدة لوصف موقع الجسم المهتز أثناء دورته بدلالة الطور. إذا فرضنا أن اهتزازة (دورة) واحدة تساوي 360 درجة، فإن ربع الاهتزازة يساوي 90 درجة. وباستخدام وحدة rad، فإن الاهتزازة الكاملة تساوي 2π rad، وربعها $\frac{\pi}{2}$ rad . ويكون طَور البندول بعد قطعه ربع اهتزازة 90° أو $\frac{\pi}{2}$ rad (**الشكل 2-11**).



الشكل 2-11 أطوار البندول.

اهتزاز جسمين متفقين في الطور

قد يكون لجسمَين مُهتزّين الزمن الدوري نفسه ولكن يكون لهما طوران مختلفان. مثلًا إذا بدأنا بتحريك بندولين متماثلين معًا، فسوف تبدو الرسوم البيانية لموقعهما بدلالة الزمن كما في **الشكل 2-12a**. يكون البندولان في هذه الحالة متَّفقين في الطور، لأن كلًّا منهما يكون في الموقع نفسه عند اللحظة الزمنية نفسها.



الشكل 2-12 (a) اهتزاز جسمين متَّفقين في الطور. **(b)** اهتزاز جسمين متعاكسين في الطور.

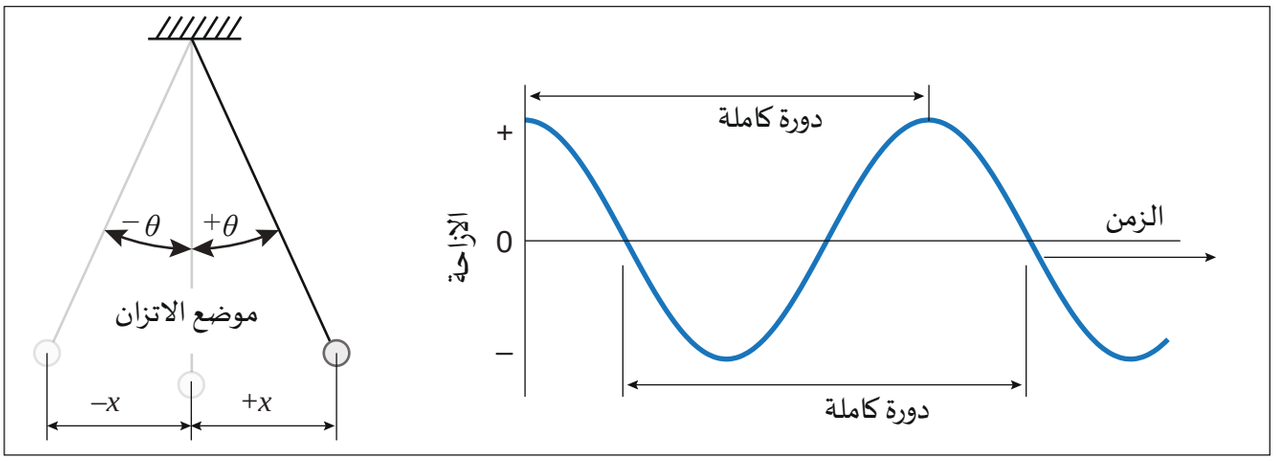
اهتزاز جسمين متعاكسين في الطور

لاحظ الرسم البياني في **الشكل 2-12b** حيث يبدأ كلا البندولين الحركة باللحظة نفسها، لكن احدهما يبدأ من اليسار، والثاني يبدأ من اليمين . عندما يكون البندول الأول في أقصى اليسار، يكون البندول الثاني في أقصى اليمين. ويكون لمنحني الموقع بدلالة الزمن، الزمن الدوري نفسه والسعة نفسها ولكنّهما يكونان متعاكسين في الطور. يكون فرق الطور بين البندولين 180 درجة أي π rad دائمًا (**الشكل 2-12b**). نَصِفُ هذين البندولين بأنهما متعاكسان في الطور بمقدار 180 درجة أو نصف دورة.

الحركة التوافقية البسيطة لبندول

إذا كنتَ قد استخدمت أرجوحة من قبل، تكون لديك تجربة مباشرة في الحركة التوافقية. تُعدّ الأرجوحة واحدًا من أمثلة البندول، وهي عبارة عن كتلة مُعلَّقة أسفل نقطة مركزية تمثّل محور الدوران، بواسطة حبل أو قضيب أو سلسلة. يمكن أن تهتز الكُتلة ذهابًا وإيابًا تحت تأثير الجاذبية.

- يكون البندول مُتَّزنًا عندما تكون الكُتلة في وضع السكون مباشرة تحت محور الدوران.
- الزمن الدوري هو الزمن الذي يستغرقه البندول لإكمال دورة كاملة ذهابًا وإيابًا.
- السعة هي أقصى إزاحة تنتقل إليها الكُتلة إلى جانبي موضع الاتّزان.



الشكل 2-13 دورة بندول.

يمكن وصف اهتزازات البندول بتحديد الزاوية θ أو المسافة x. لاحظ أن بالإمكان «حساب» دورة كاملة من أي نقطة في دورة معينة إلى النقطة المماثلة لها في الدورة التالية. تكون الدورة الكاملة مثلًا، من القمة إلى القمة، أو من الصفر إلى الصفر في الاتّجاه نفسه.

يتحرك البندول بحركة توافقية بسيطة عندما لا تتجاوز سعته الزاويّة 5°.

لا يعتمد الزمن الدوري للبندول على الكُتلة بل يعتمد على طول الخيط فقط، على اعتبار أن تسارع الجاذبية ثابت. تعطي **المُعادَلة 2-5** الزمن الدوري لبندول معروف الطول عندما لا تكون سعة الاهتزاز كبيرة.

ما المتغيّرات التي تؤثّر في الزمن الدوري للبندول؟ ماذا سيحدث لهذا الزمن إذا كان البندول موجودًا فوقَ قمة إيفرست التي ترتفع 8000 م؟ وكيف سيتغيَّر الزمن الدوري إذا أُخِذ البندول إلى القمر؟

5-2	الزمن الدوري لبندول		
$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$	T	الزمن الدوري (s)	
	L	طول الخيط (m)	1.1
	g	تسارع الجاذبية (m/s^2)	

نظام اهتزاز الكتلة -النابض

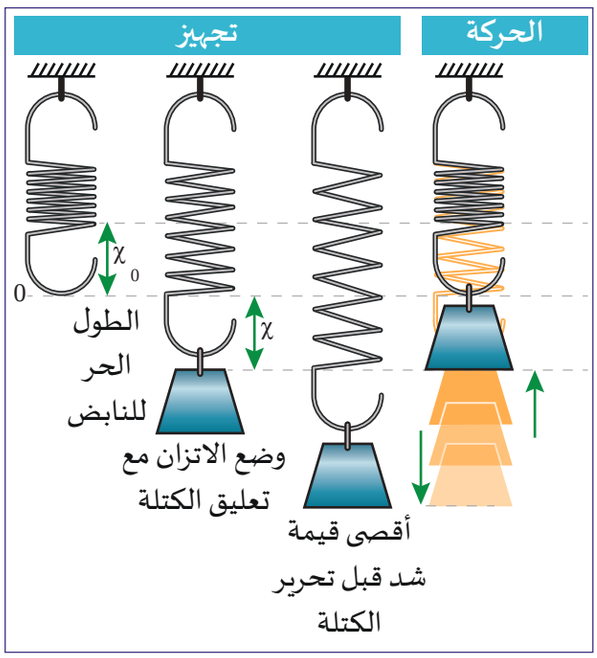
هو نظام توافُقيّ بسيط شائع، حيث تتَّصل الكُتلة بنابض يهتزّ بحُرّية. في نظام الكُتلة - النابض الرأسي، يكون موضع الاتّزان حيث تكون قوّة شد النابض مساوية لوزن الكُتلة. تعمل قوتا الجاذبية والشد في النابض معًا للحصول على قوّة إرجاع تحاول إعادة الكُتلة أو سحبها باتّجاه موضع الاتّزان. كما توجد أنظمة مادّية حقيقية كثيرة مشابهة لنظام الكُتلة - النابض، بما في ذلك الآلات الموسيقية والتراكيب الجيولوجية في الزلازل، وحتى الذرّات في المواد الصلبة.

خصائص نظام اهتزاز الكتلة -النابض

بعد ملاحظة اهتزاز الكُتلة - النابض في المختبر، نجد ما يلي:

- يزداد التردُّد عندما يصبح النابض أكثر صلابة (أي عندما يكون ثابت النابض k أكبر).
- ينخفض التردُّد بازدياد الكُتلة.
- لا يعتمد التردُّد على السعة ما دامت السعة صغيرة.

يعتمد التردُّد والزمن الدوري لنظام اهتزاز الكُتلة - النابض على الكُتلة وثابت النابض. تُظهِر **المُعادَلة 6-2** أن الزمن الدوري يتناسب مع الجذر التربيعي لنسبة الكُتلة على ثابت النابض. لاحظ أن ذلك يختلف عن الزمن الدوري للبندول الذي يكون مستقلًا عن الكُتلة.



الشكل 2-14 قوة الإرجاع لنظام اهتزاز الكتلة والنابض.

كيف يمكن تغيير الزمن الدوري لنظام الكتلة - النابض؟ ما تأثير زيادة الكتلة على اهتزاز الكتلة - النابض؟ كيف يؤثر استخدام نابض ذي ثابت نابض أصغر على حركة النظام المهتز؟

6-2	الزمن الدوري لنظام اهتزاز الكتلة - النابض		
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$		T	الزمن الدوري (s)
		m	الكتلة (kg)
		k	ثابت النابض (kg/s^2) أو (N/m)

مثال 3

كم يبلغ طول بندول إذا كان زمنه الدوري 1.3 s؟

المطلوب: طول البندول L

المُعطى: الزمن الدوري $T = 1.3\ \text{s}$

العلاقات:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

الحل: لنفترض تسارع الجاذبية $g = 9.8\ \text{m/s}^2$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2\left(\frac{L}{g}\right)$$

$$L = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{9.8(1.3)^2}{4\pi^2} = \boxed{0.42\ \text{m}}$$

مثال 4

تتدلّى كتلة مقدارها 1.5 kg من نابض رأسي ثابت النابض له 175 N/m. يُسبّب اضطرابٌ ما اهتزاز الكُتلة. كم يبلغ الزمن الدوري والتردُّد للاهتزاز؟

المطلوب: الزمن الدوري T، التردُّد f

المُعطى: الكُتلة $m = 1.5\ \text{kg}$، ثابت النابض $k = 175\ \text{N/m}$.

العلاقات:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}; \quad f = \frac{1}{T}$$

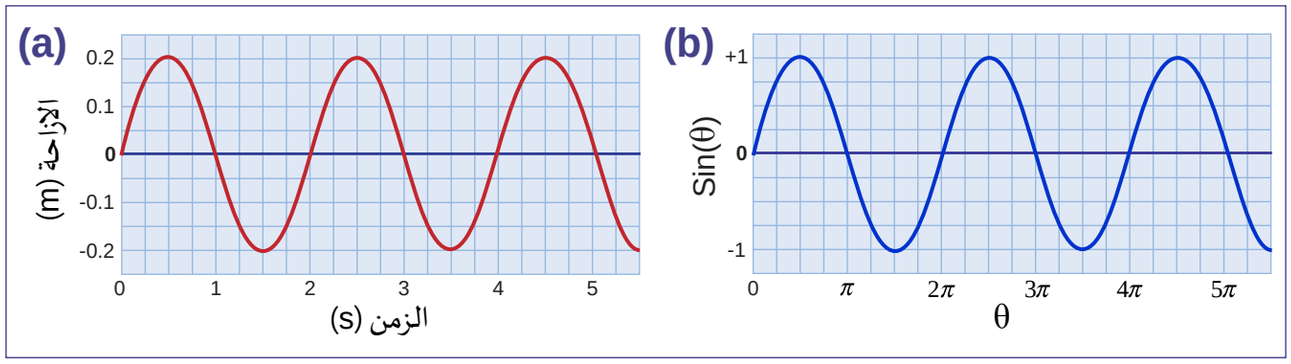
الحل:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{1.5}{175}} = \boxed{0.582\ \text{s}}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.582} = \boxed{1.72\ \text{Hz}}$$

الإزاحة في الحركة التوافقية البسيطة

نظام كتلة - نابض يتحرك حركة توافقية بسيطة. تبلغ سعة الاهتزاز m 0.2 وتستغرق الدورة s 2. يُظهِر **الشكل 2-15a** الرسم البياني للإزاحة بدلالة الزمن لهذا النظام. بما أن دورة الاهتزاز تكتمل في ثانيتين، فإن تردُّد الاهتزاز يساوي Hz 0.5.



الشكل 2-15 دالّة موقع الاهتزاز لنظام الكُتلة - النابض ودالّة جيب الزاوية.

تختلف المُعادلات التي تصف الحركة الاهتزازية اختلافًا جوهريًا عن معادلات الحركة الخطية. ذلك أنه في الحركة الاهتزازية تكون السرعة والتسارُع ليسا ثابتين كما يمكن أن يكونا في حالة الحركة الخطّية. بدلاً من ذلك تكون الثوابت في الحركة التوافقية عادةً: السعة والتردُّد والطَّور.

يوضّح **الشكل 2-15b** رسمًا بيانيًّا للدالّة الجيبية $\sin\theta$. لاحظ أن الرسم البياني لجيب الزاوية مطابق للرسم البياني لإزاحة الاهتزاز إذا:

1. افترضنا أن $\theta = 2\pi$ عندما تكون اللحظة الزمنية $t = 2$ s
2. ضربنا الدالّة الجيبية في السعة.

وبالتالي تكون مُعادَلة الإزاحة:

$$x = 0.2\sin\pi t$$

نلاحظ أن زاوية دالّة الجيب تعتمد على التردُّد الزاوي. في **الشكل 2-15**، تكون الإزاحة 0 عندما يكون $t = 0$، أي أن المُهتزّ يكون في حالة اتّزان. لدراسة الحالة عندما لا تكون الإزاحة في البداية 0، يمكننا إزاحة الموجة بإضافة ثابت الطور. باستخدام المعامل A للسعة نحصل على **المُعادَلة 2-7** وهي معادلة الإزاحة في الحركة التوافقية البسيطة.

7-2	إزاحة الحركة التوافقية البسيطة		
	$x = A\sin(\omega t)$	x	الازاحة (m)
		ω	التردّد الزاوي (rad/s)
		A	السعة (m)
		t	الزمن (s)

الاهتزازات مع اختلاف الطَّور

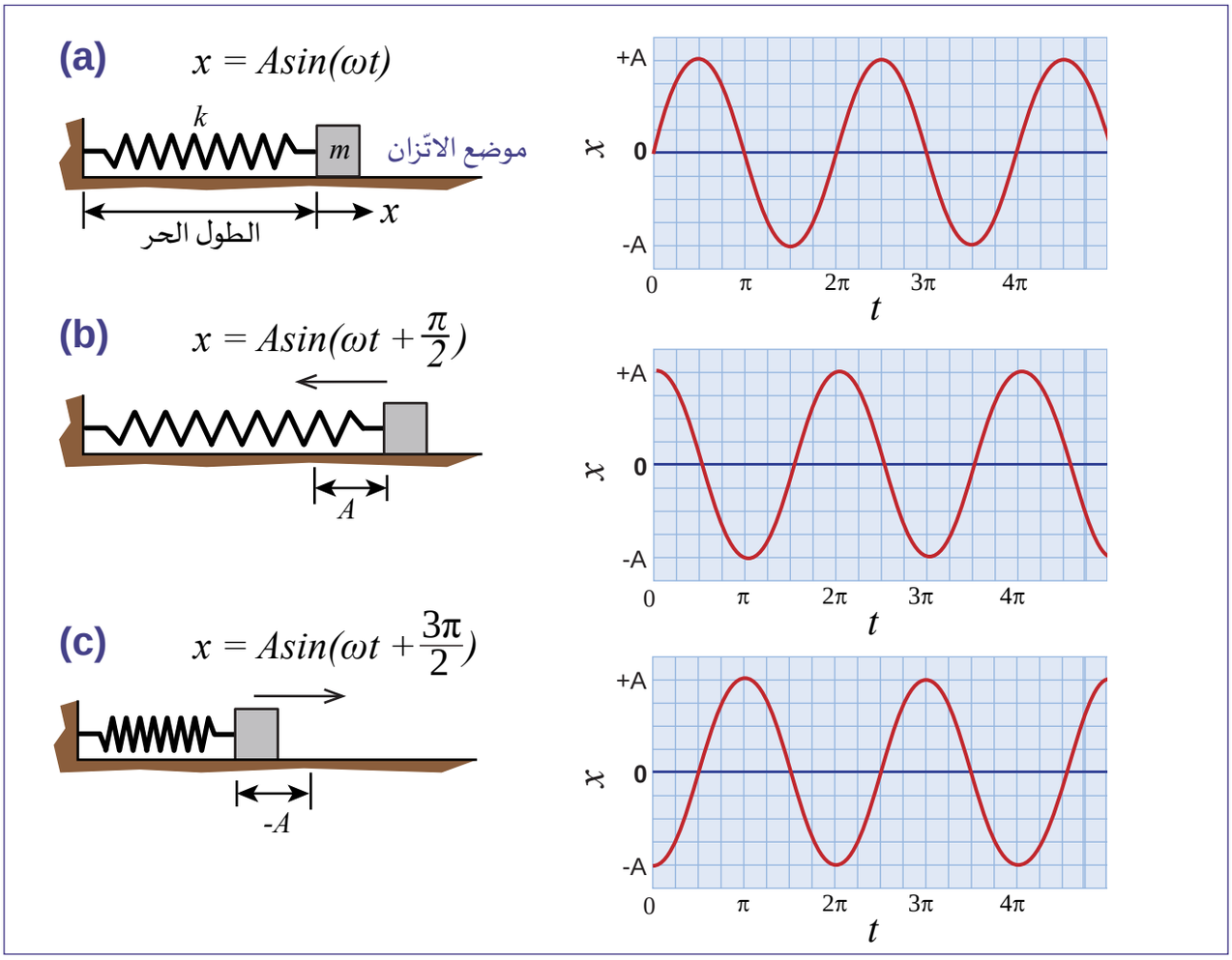
تبدأ دالّة الجيب دورتها من الصفر لأن $\sin(0) = 0$. ومع ذلك قد لا يبدأ الاهتزاز دورته عند الصفر. ولكي نطابق دورة دالّة الجيب مع حركة الاهتزاز نضيف ثابت طور ϕ. ليكن لدينا نظام الكُتلة - النابض المُهتزّ في **الشكل 2-16**.

a. يبدأ الاهتزاز عند اللحظة $t = 0$، ويكون طور البداية $\phi = 0$. وتكون مُعادَلة الإزاحة:

$x = A \sin(\omega t)$. يظهر الرسم البياني الذي يمثّل هذه الحركة في **الشكل 2-16a**.

b. يبدأ الاهتزاز ربع دورة ($\frac{\pi}{2}$ rad) قبل الاهتزاز في البند (a). ولكي نطابق دالّة الجيب مع الحركة، نحتاج إلى إضافة ثابت طور $\frac{\pi}{2}$ لمُعادَلة الإزاحة، فتصبح $x = A \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$. يَظهر الرسم البياني للحركة في **الشكل 2-16b**.

c. يبدأ المُهتزّ ثلاث أرباع دورة دورة ($\frac{3\pi}{2}$ rad) قبل الاهتزاز في (a). ولكي نطابق دالّة الجيب، نضيف ثابت طَور أكبر، $\phi = \frac{3\pi}{2}$، فتصبح مُعادَلة الإزاحة: $x = A \sin(\omega t + \frac{3\pi}{2})$. يظهر الرسم البياني في **الشكل 2-16c**.

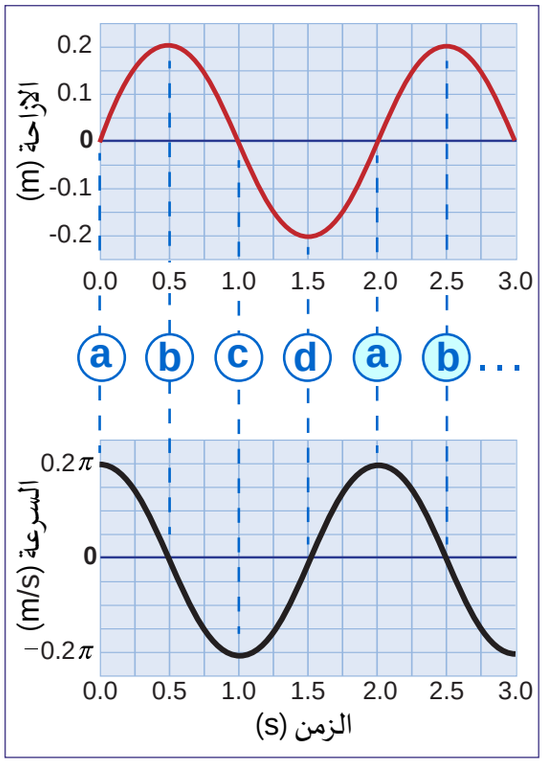


الشكل 2-16 الرسوم البيانية لإزاحة حركة اهتزازية تبدأ بزوايا طَور مختلفة.

السرعة في الحركة التوافقية البسيطة

تتغيَّر سرعة الجسم المُهتزّ باستمرار. يمكننا استنتاج شكل الرسم البياني (السرعة - الزمن) من الرسم البياني (الإزاحة - الزمن) عبر تطبيق خاصّية رياضية للدالّة الجيبية (التفاضل).

- السرعة في أي لحظة هي مَيل الرسم البياني للإزاحة بدلالة الزمن في تلك اللحظة.
- مَيل الدالّة $A\sin(k\theta)$ يساوي رياضيًّا $kA\cos(k\theta)$.



الشكل 2-17 رسمان بيانيان للإزاحة والسرعة لنظام (الكتلة - النابض) في الشكل 2-15.

يوضّح **الشكل 2-17** الرسم البياني لكل من الازاحة والسرعة لجسم مهتز.

a. عندما يكون مَيل الإزاحة d بدلالة الزمن t موجبًا، تكون السرعة ذات قيمة موجبة قصوى.

b. عندما يكون مَيل الإزاحة d بدلالة الزمن t صفرًا، تكون السرعة صفرًا.

c. عندما يكون مَيل الإزاحة d بدلالة الزمن t سالبًا، تكون السرعة ذات قيمة سالبة قصوى.

d. عندما يكون مَيل الإزاحة d بدلالة الزمن t صفرًا، تكون السرعة صفرًا.

e. تتكرَّر الدورة بالنمط نفسه.

تُعطي **المُعادَلة 2-8** السرعة v بدلالة الزمن t.

لجسم مُهتزّ إزاحة وفقًا **للمُعادَلة 2-8**. نلاحظ أربع نقاط مهمة هي الآتية:

1. تتغير السرعة بتردُّد الإزاحة نفسه.

2. تتناسب السرعة القصوى طرديًّا مع التردُّد. فإذا تضاعف التردُّد، تتضاعف السرعة القصوى.

3. تتناسب السرعة القصوى طرديًّا مع السعة أيضًا. إذا تضاعفت السعة، تتضاعف السرعة القصوى.

4. يتخلّف طَور السرعة بمقدار $\frac{\pi}{2}$ عن طَور الإزاحة.

8-2	السرعة في الحركة التوافقية البسيطة	v	السرعة (m/s)
		v_{max}	السرعة القصوى (m/s)
		ω	التردّد الزاوي (rad/s)
		A	السعة (m)
		t	الزمن (s)

$$v = \omega A\cos(\omega t)$$
$$v_{max} = \omega A$$

السرعة اللحظية بدلالة الإزاحة

يمكن حساب سرعة الجسم المُهتزّ عند أي لحظة بدلالة التردد الزاوي والسعة والزمن. يمكن أيضًا استخدام **المُعادَلة 8-2** لاشتقاق مُعادَلة السرعة بدلالة الإزاحة.

مُعادَلة السرعة بدلالة الزمن: $v = \omega A\cos(\omega t + \phi)$

تربيع طرفَي المُعادَلة : $v^2 = \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \phi)$

وفقًا لعلم المثلثات: $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$

وكذلك: $\cos^2\theta = 1 - \sin^2\theta$

يمكن لمُعادَلة السرعة أن تكتب: $v^2 = \omega^2 A^2 \left(1 - \sin^2(\omega t + \phi)\right)$

بتوزيع الضرب على القوسين نحصل على: $v^2 = \omega^2 A^2 - \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \phi)$

باستخدام مُعادَلة الإزاحة 2-7 نحصل على: $v^2 = \omega^2 A^2 - \omega^2 x^2$

يؤدي أخذ الجذر التربيعي لطرفي المُعادَلة إلى **المُعادَلة 9-2**، والتي يمكن استخدامها لحساب سرعة الجسم المُهتزّ عندما لا يكون الزمن معروفًا ولكن إزاحته معروفة. لاحظ أن هناك إشارة موجبة أو سالبة في المُعادَلة، وذلك لأن الاهتزاز يمكن أن يكون في أي من الاتجاهين عند أي موقع معين.

9-2 السرعة بدلالة الازاحة

$$v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$$

v	السرعة (m/s)
ω	التردّد الزاوي (rad/s)
A	السعة (m)
x	الازاحة (m)

مثال 5

الإزاحة لجُسَيم يتحرَّك حركة توافقية بسيطة تُعطى بالمعادلة: $x = 0.005\cos(2t)$ (m)

احسب قيمة الإزاحة للجسيم عندما تكون سرعته 6 mm/s.

المطلوب: إزاحة الجُسَيم x

المُعطى: $x = 0.005\cos(2t)$

العلاقات: $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$

الحل: باستخدام معادلة السرعة

$$v = \omega\sqrt{A^2 - x^2} \Rightarrow v^2 = \omega^2\left(A^2 - x^2\right)$$

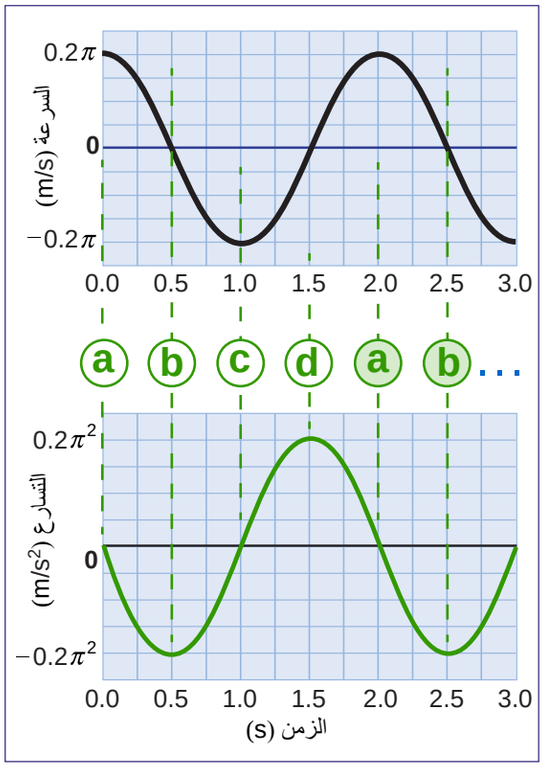
$\omega = 2$ rad / s ، $A = 0.005$ m

$$-x^2 = \frac{v^2}{\omega^2} - A^2 = \frac{0.006^2}{2^2} - 0.005^2 = -1.6\times10^{-5} \Rightarrow x = \boxed{0.004\text{ m}}$$

التسارُع في الحركة التوافقية البسيطة

إذا كانت السرعة تتغيَّر باستمرار، فيجب أن يتغيَّر التسارُع باستمرار. تمامًا كما فعلنا مع السرعة، يمكننا استنتاج شكل الرسم البياني للتسارُع من الرسم البياني للسرعة.

- التسارُع في أي لحظة هو مَيل الرسم البياني للسرعة بدلالة الزمن في تلك اللحظة.
- يساوي مَيل الدالّة $A\cos(k\theta)$ رياضيًّا $-kA\sin(k\theta)$.



الشكل 2-18 رسوم بيانية للسرعة والتسارع للجسم المُهتزّ في الشكل 2-15.

يوضّح **الشكل 2-18** الرسوم البيانية لكل من السرعة والتسارع لجسم مهتز.

a. عندما يكون مَيل السرعة بدلالة الزمن صفرًا، يكون التسارُع صفرًا.

b. عندما يكون مَيل السرعة سالبًا، يكون التسارُع سالبًا وعند قيمته القصوى.

c. عندما يكون المَيل صفرًا، يكون التسارُع صفرًا.

d. عندما يكون المَيل موجبًا، يكون التسارُع موجبًا وعند قيمته القصوى.

تُعطي **المُعادَلة 10-2** التسارُع بدلالة الزمن t، لجسم مُهتزّ تكون إزاحته وفقًا للمُعادَلة 2-7. لاحظ أربع نقاط مُهمّة هي الآتية:

1. يتغيَّر التسارُع بتردُّد يساوي تردُّد كل من الإزاحة والسرعة.

2. القيمة القصوى للتسارُع تتناسب طرديًّا مع مُربَّع التردُّد. إذا تضاعف التردُّد، تزداد القيمة القصوى للتسارُع أربعة أضعاف.

3. تتناسب القيمة القصوى للتسارُع طرديا مع السعة. إذا تضاعفت السعة، تتضاعف القيمة القصوى للتسارُع.

4. طور الرسم البياني للتسارُع يتخلف بمقدار $\frac{\pi}{2}$ بالنسبة للرسم البياني للسرعة وبمقدار π بالنسبة للرسم البياني للإزاحة.

10-2 التسارع في الحركة التوافقية البسيطة

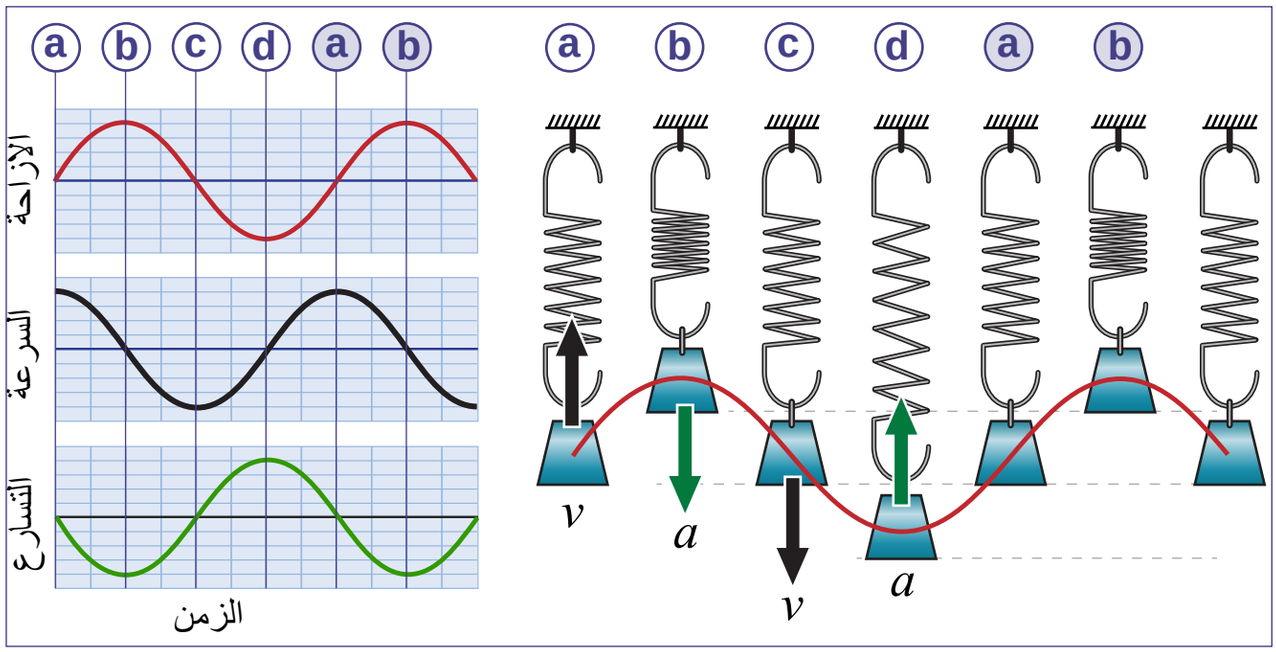
$$a = -\omega^2 A\sin(\omega t)$$
$$a_{max} = \omega^2 A$$

a	التسارع (m/s^2)
a_{max}	القيمة القصوى للتسارع (m/s^2)
ω	التردّد الزاوي (rad/s)
A	السعة (m)
t	الزمن (s)

الرسوم البيانية الموجزة للحركة التوافقية البسيطة

ينصّ القانون الثاني لنيوتن على أن التسارُع يتناسب طرديا مع مُحصّلة القوى. وتكون أقصى قيمة لقوّة الإرجاع في الحركة الاهتزازية عندما تكون الإزاحة عند قيمتها القصوى بالنسبة إلى موقع الاتّزان ولكن في الاتّجاه المعاكس. ويكون التسارُع صفرًا عندما تكون قوّة الإرجاع صفرًا. يحدث ذلك عند مرور الجسم المُهتزّ في موضع الاتّزان.

عندما تهتز الكُتلة، تصل إلى سرعتها القصوى لحظة مرورها بموضع الاتّزان. وتكون سرعتها 0 m/s عندما تصل إلى أقصى إزاحة لها. يوضّح **الشكل 2-19** الرسوم البيانية للمتغيّرات الثلاثة وعلاقتها بطَور الجسم المُهتزّ بحركة توافقية بسيطة.



الشكل 2-19 الرسوم البيانية للحركة التوافقية البسيطة.

التسارُع الأقصى لنظام الكُتلة - النابض

يتم حساب القيمة القصوى لتسارع نظام الكتلة - النابض من معادلة الزمن الدوري والتردُّد الزاوي.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$a_{max} = \frac{k}{m}A$$

التسارُع الأقصى للبندول البسيط

يمكن أيضًا حساب القيمة القصوى لتسارع البندول من معادلة الزمن الدوري والتردد الزاوي. لنفرض A السعة الأفقية للاهتزازات ذات الزاوية الصغيرة التي تقل عن 5°.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

$$a_{max} = \frac{g}{L}A$$

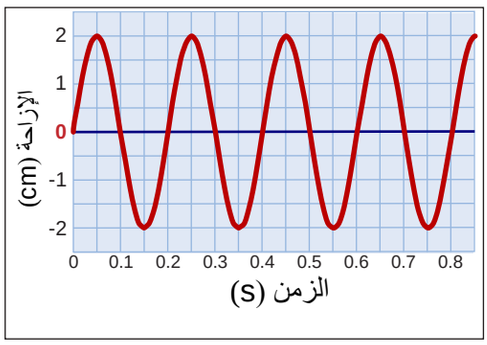
مثال 6

يُظهر الرسم البياني حركة كتلة تهتز حول نقطة اتّزان ثابتة.
استخدم الرسم البياني لتحديد ما يلي:

a. الزمن الدوري والتردد الزاوي.

b. السرعة القصوى للكتلة.

c. أقصى تسارُع للكتلة.



الشكل 2-20 إزاحة الحركة لكتلة مهتزة.

المطلوب:

a. الزمن الدوري T والتردد الزاوي ω.

b. السرعة القصوى للكُتلة v_{max}

c. أقصى تسارُع للكُتلة a_{max}

المُعطى: الرسم البياني

العلاقة:

$$v_{max} = \omega A$$

$$a_{max} = \omega^2 A$$

الحل:

a. يمكن ملاحظة الزمن الدوري للحركة من الرسم البياني. تُكمِل الكُتلة دورة واحدًة في زمن 0.2 s. لحساب ω، نستخدم العلاقة مع الزمن الدوري:

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

$$\omega = \frac{2\pi}{0.2} = 3.14 \text{ rad/ s}$$

b. السعة A تساوي 2 cm = 0.02 m.

$$v_{max} = \omega A = (31.4)(0.02) = \boxed{0.628 \text{ m/s}}$$

c. لحساب أقصى تسارُع نستخدم العلاقة:

$$a_{max} = \omega^2 A$$

$$a_{max} = (31.4)^2\ (0.02) = \boxed{19.7 \text{ m/s}^2}$$

مثال 7

يتحرك جسم حركةً توافقية بسيطة، وتُعطى إزاحته بالمُعادَلة:

$x = 0.05\sin\left(2\pi t + \frac{3\pi}{2}\right)$ حيث تقاس x بالمتر.

a. كم تبلغ سعة الحركة وتردُّدها الزّاوي وزمنها الدوري وثابت طَوْرها؟

b. أوجد مُعادلتَي السرعة والتسارُع بدلالة الزمن.

c. استخدم نتائجك لتمثيل إزاحة الحركة على الرسم البياني.

المطلوب:

a. السعة A؛ والتردُّد الزاوي ω، والزمن الدوري T، وثابت الطور ϕ.

b. معادلتا السرعة والتسارُع.

c. الرسم البياني للازاحة

المُعطى: $x = 0.05\sin\left(2\pi t + \frac{3\pi}{2}\right)$

العلاقات:

$$x = A\sin(\omega t + \phi) \qquad v_{max} = \omega A$$

$$v = \omega A\cos(\omega t + \phi) \qquad a_{max} = \omega^2 A$$

$$a = -\omega^2 A\cos(\omega t + \phi)$$

الحل:

a. يمكننا الحصول على قيم A و ω و ϕ من معادلة الإزاحة:

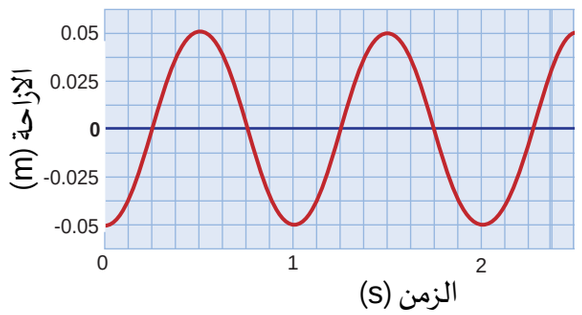
$$A = 0.05\text{ m} \qquad \omega = 2\pi \qquad \phi = \frac{3\pi}{2} \qquad T = \left(\frac{2\pi}{\omega}\right) = \left(\frac{2\pi}{2\pi}\right) = 1\text{ s}$$

b. بالتعويض عن جميع القيم نحصل على:

$$v = 2\pi(0.05\text{ m})\cos\left(2\pi t + \frac{3\pi}{2}\right) \qquad v = 0.1\pi\cos\left(2\pi t + \frac{3\pi}{2}\right)$$

$$a = -(2\pi)^2(0.05\text{ m})\sin\left(2\pi t + \frac{3\pi}{2}\right) \qquad a = -0.2\pi^2\sin\left(2\pi t + \frac{3\pi}{2}\right)$$

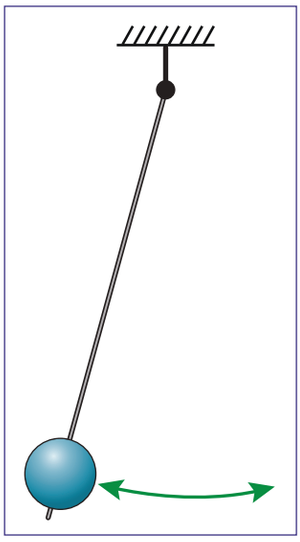
c. ثابت الطور $\frac{3\pi}{2}$ يعني أن الجسم قد أكمل ثلاثة أرباع الدورة عند $t = 0$. يكون الرسم البياني للإزاحة:



نشاط 2-1 تحديد تسارُع الجاذبية g باستخدام بندول بسيط

سؤال الاستقصاء	احسب تسارُع الجاذبية g باستخدام بندول بسيط
الموادّ المطلوبة	حامل، خيط، ساعة إيقاف، كتلة مُعلَّقة.

خطوات التجربة



الشكل 2-21 بندول بسيط.

1. صمّم بندولاً بسيطًا بندول بسيط كما هو موضَّح في **الشكل 2-21**. اجعل طول خيط البندول أقلّ من متر واحد.
2. اسحب كتلة البندول بزاوية 5° مع الاتّجاه الرأسي، ثم دعْها لكي تهتز. قس الزمن اللازم لحركة البندول لإنهاء عشر اهتزازات. اقسم هذا الزمن على عشرة لحساب الزمن الدوري لاهتزازة واحدة للبندول.
3. استخدم المُعادَلة:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

لحساب تسارُع الجاذبية

4. كرّر التجربة مرتين مع تغيير طول الخيط إلى قيم أخرى أقل من 1m.

الأسئلة

a. هل يمكننا حساب الزمن الدوري بقياس زمن اهتزازة واحدة مباشرة، بدلاً من قياس زمن 10 اهتزازات؟ لماذا لا نشجّع على استخدام هذه الطريقة؟

b. املأ جدول البيانات بالقيم المحسوبة لثلاثة أطوال مختلفة.

c. احسب التردُّد الزاوي لكل طول.

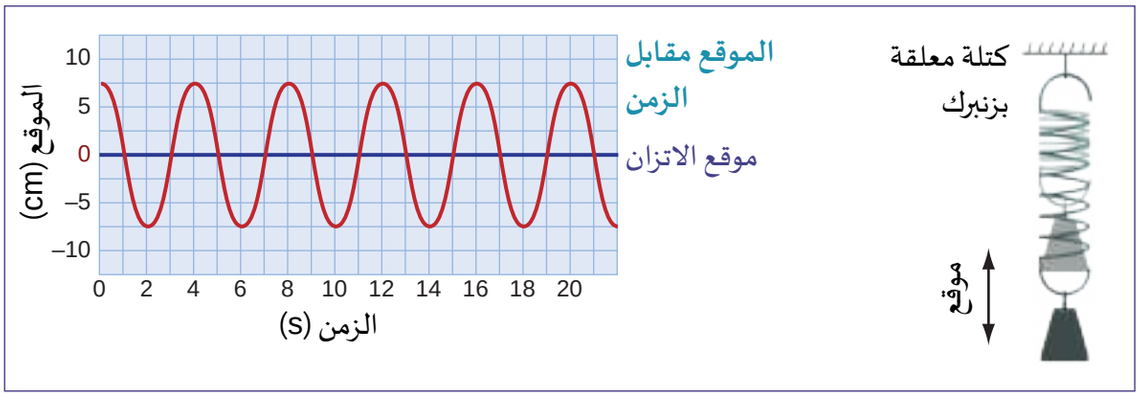
d. احسب تسارُع الكُتلة لكل طول.

بندول الساعة

1. قم ببناء بندول بسيط يكون زمنه الدوري ثانية واحدة بالضبط.
2. باستخدام النوابض والكتل المتاحة في المختبر المدرسي، صمّم نظام كتلة-نابض يكون زمنه الدوري ثانية واحدة فقط.
3. هل تتفق نتائجك مع التجربة العملية؟

تقويم الدرس 2-1

1. يبلغ الزمن الدوري لبلّورة الكوارتز في ساعة يد 0.00350 s. كم يبلغ تردُّدها بوحدة Hz؟
2. إذا كان تردُّد جسم مُهتزّ 60 Hz، فكم يبلغ عدد الدورات الكاملة التي ينجزها في ثانيتين؟
3. تهتزّ أرجوحة ذهابًا وإيابًا 21 مرة خلال 30 ثانية.
   a. كم يبلغ الزمن الدوري للحركة؟
   b. كم يبلغ تردُّد الحركة؟
   c. كم يبلغ التردُّد الزاويّ للحركة؟



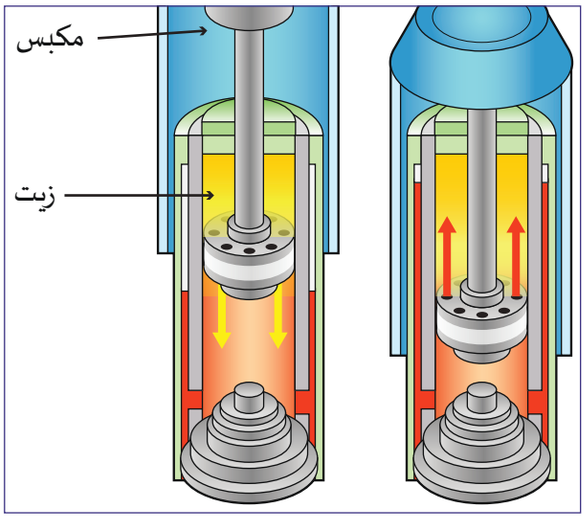
4. استخدم العلاقة البيانية أعلاه لإيجاد الآتي:
   a. ما عدد الاهتزازات التي تحدث خلال 10 s؟
   b. كم تبلغ سعة الحركة؟
   c. ما مقدار الزمن الدوري للحركة وما تردُّدها؟
   d. ما مقدار التردُّد الزاويّ للحركة وما القيمة القصوى لتسارعها؟
5. تتعرّض كتلة لحركة توافقية بسيطة سعتها 4 mm وتردُّدها 0.32 Hz. تتساوى إزاحة الكتلة مع سعتها عند $t = 0$ s.
   a. ما المعادلة التي تصف إزاحة هذه الحركة؟
   b. ما المعادلة التي تصف سرعة هذه الحركة؟
6. تتأرجح كتلة 0.45 kg من الطرف السفلي لنابض رأسي، فتنجز اهتزازة واحدة كل 0.55 s. يتم ضغط النابض مسافة 10 cm ثم تحريره عند اللحظة $t = 0$ s.
   a. اكتب المعادلة التي تصف إزاحة هذه الحركة.
   b. ما الزمن اللازم للكتلة المهتزة كي تعود إلى موضع اتّزانها لأوّل مرة؟

الدرس 2-2

الطاقة في الحركة التوافقية البسيطة

Energy in simple harmonic motion

عندما تعبر سيّارة فوق مطب صغير تسمح النوابض للعجلات بالحركة إلى أعلى وأسفل فوق المطبّ، في حين تبقى السيّارة عند المستوى الأفقي نفسه تقريبًا. يتم امتصاص طاقة الاصطدام بواسطة النوابض. وهذا يجعل السيّارة أكثر راحة مقارنة بالاهتزاز الذي يشعر به الركاب لو أن السيّارة تأثرت بأكملها خلال الاصطدام بالمطبّ. تُقلّل النوابض من القوى المؤثّرة في السيّارة إلى حدّ بعيد؛ ذلك أن كتلة العجلات فقط هي التي تتسارع أو تتباطأ بدلاً من كتلة السيّارة بأكملها.



الشكل 2-22 مقطع عرضي لممتص صدمات فيه زيت.

تؤدّي الطاقة التي تمتصّها النوابض إلى حركة توافقية نحو الأعلى والأسفل للسيّارة بأكملها. إلا أن ذلك لا يحدث لأن ممتصّ الصدمات بين جسم السيّارة والعجلات يحول تلك الطاقة بسرعة إلى حرارة. يحتوي ممتص الصدمات على مكبس داخل أنبوب فيه زيت (**الشكل 2-22**). عندما تتحرّك العجلات إلى أعلى وإلى أسفل، يدفع المكبس الزيت ذهابا وإيابا من خلال مجموعة ثقوب صغيرة، ما يؤدّي إلى قوة احتكاك كبيرة. يحوِّل هذا الاحتكاك معظم الطاقة المخزّنة في النوابض إلى طاقة حرارية داخل الزيت.

مخرجات التّعلُّم

P1203.3 يصف تحولات الطاقة في نظام حركة توافقية بسيطة بيانيًا باستخدام مبدأ حفظ الطاقة.

P1204.2 يصف ويوضح أمثلة عملية لأنواع مختلفة من الإهتزازات المتخامدة.

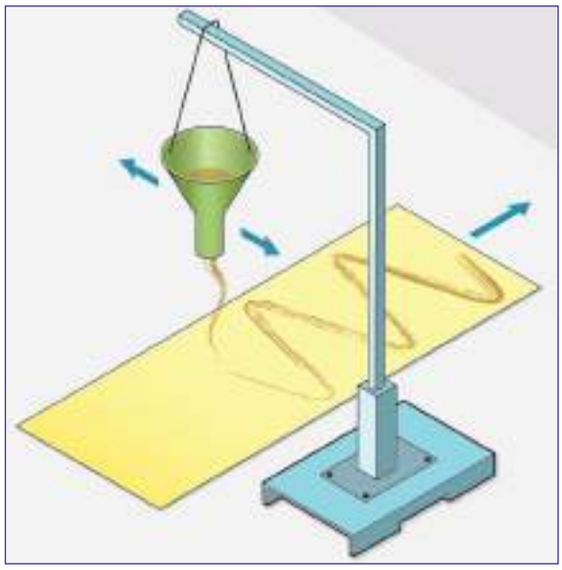
المفردات

Damping	تخامُد
Underdamped	تخامُد تحت الحدّ
Overdamped	تخامُد فوق الحدّ
Critically damped	تخامُد حرج

نشاط a2-2 تصميم بندول رملي

سؤال الاستقصاء	كيف تتغيّر طاقة البندول؟
الموادّ المطلوبة	حامل قائم، قمع ذو فتحة ضيّقة، رمل ناعم أو طحين، 4 أوراق رسم بياني متلاصقة لتشكّل ورقة كبيرة.

الخطوات



الشكل 2-23 بندول رملي.

1. علّق القمع على الحامل بواسطة الحلقة، كما هو مبيّن في **الشكل 2-23**.
2. ألصق 4 أوراق رسم بياني بعضها ببعض لتشكّل ورقة كبيرة، وثبّتها تحت القمع. حاول سحب الورق بسرعة ثابتة، قد تكون بحاجة إلى تكرار ذلك عدة مرات لتطبقّها بشكل صحيح.
3. املأ القمع بالرمل واسحبه بحيث يتأرجح. يؤدي ذلك إلى إنشاء رسم بياني على الورقة. يجب أن لا تزيد سعة الرسم البياني الناتج عن نصف عرض ورقة الرسم البياني. جرّبها مرة واحدة قبل وضع الرمل داخل القمع.
4. لاحظ أثناء تأرجح القمع النقاط التي يكون لها سرعة عظمى والنقاط التي يكون لها سرعة دنيا.

الأسئلة

a. بالنظر إلى الرسم البياني الناتج، أين تكون الطاقة الحركية عند قيمتها العظمى؟ وأين تكون عند قيمتها الصغرى؟ وضّح إجابتك.

b. لا تنشأ الطاقة من العدم، فكيف يكتسب البندول طاقة حركية؟

c. ما شكل الطاقة الأخرى التي يمتلكها البندول؟ هل يمكن حساب هذه الطاقة أو قياسها؟

d. هل يمكن حساب الطاقة الكلّية للنظام؟

e. هل ستظل الطاقة الكلّية للنظام ثابتة؟

f. كيف يمكننا زيادة سرعة البندول أثناء مروره بموضع الاتّزان؟

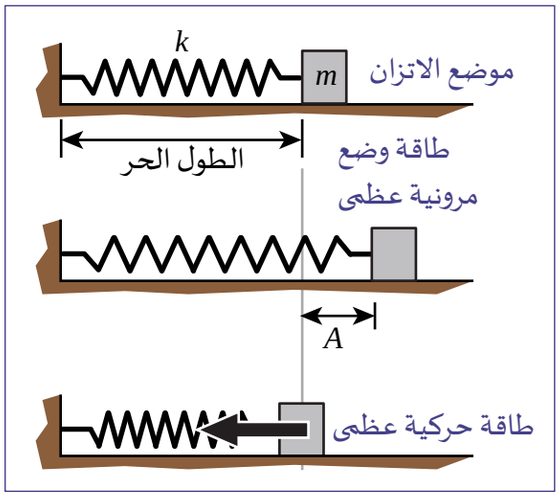
g. ماذا يحدث لسعة الرسم البياني عند النهاية؟

تبادُل الطاقة في نظام الكتلة-النابض المُهتزّ

تمثّل الحركة التوافقية البسيطة تبادُلًا للطاقة بأشكال مختلفة. لاحظ مثال نظام الكتلة-النابض كما هو مبيّن في **الشكل 2-24**.

- تتغيّر طاقة الوضع المرونية E_E للنظام أثناء اهتزاز الكتلة عندما ينضغط النابض أو يستطيل.
- تتغيّر الطاقة الحركية للنظام E_k لأن سرعة الكتلة تتغيّر أيضًا.

الطاقة الكلّية للنظام E عند أيّ لحظة هي مجموع طاقة الوضع المرونية والطاقة الحركية: $E_T = E_E + E_K$.

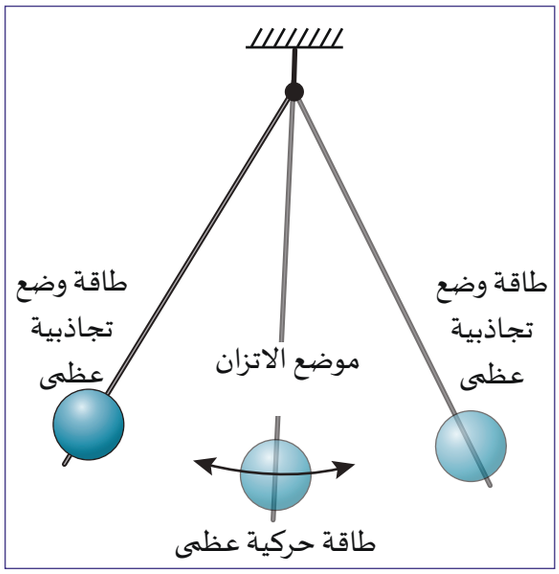


الشكل 2-24 اهتزاز كتلة حول موضع الاتّزان.

تبادُل الطاقة في بندول

يحدث تبادُل لطاقة البندول المُهتزّ بين الطاقة الحركية وطاقة الوضع التجاذبية. فعندما يكون البندول في موضع الإزاحة العظمى تكون طاقة الوضع التجاذبية عند قيمتها العظمى E_{Pmax}، والطاقة الحركية E_k صفرًا، كما هو مبيّن في **الشكل 2-25**. ويكون للبندول عند مروره في موقع الاتّزان أثناء تأرجحه طاقة حركية عظمى وطاقة وضع تجاذبية تساوي صفرًا. تكون الطاقة الكلّية للنظام حاصل جمع الطاقة الحركية وطاقة الوضع التجاذبية:

$ET = EP + EK.$



الشكل 2-25 اهتزاز بندول.

الطاقة الكلية في نظام توافقي بسيط مغلق تبقى ثابتة.

الاهتزازات في الطبيعة

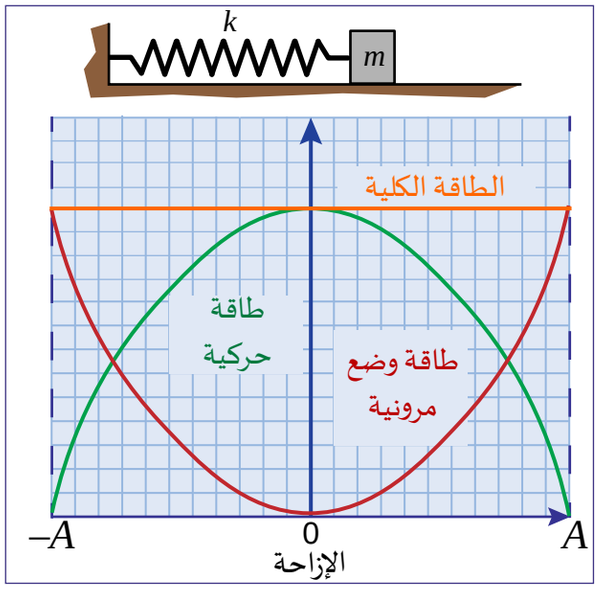
يبيّن **الشكل 2-26** غصن شجرة وأرجوحة ولوح غطس. سوف يتأرجح كل منها بمجرد إزاحته عن موضع اتّزانه. صف تغيّرات الطاقة في كل منها.

الشكل 2-26 أجسام مهتزة.

الطاقة في نظام مُهتزّ

افترض نظامًا مغلقًا مكوّنًا من كتلة ونابض عديم الاحتكاك. تكون الطاقة الكلّية للنظام محفوظة.

يبيّن **الشكل 2-27** تبادُل الطاقة الذي يحصل عندما تهتز الكتلة المُعلَّقة في النابض بين $-A$ و $+A$. يكون للنظام عند الإزاحة $+A$ طاقة وضع مرونية فقط، حيث يكون النابض قد استطال والكتلة عندئذٍ لا تتحرّك قبل أن تعكس اتّجاه حركتها. في تلك اللحظة وقبل أن ترتد الكتلة تكون طاقة الوضع المرونية تساوي الطاقة الكلّية للنظام: $E_T = (E_E)_{max}$.



الشكل 2-27 تبادُل الطاقة.

- تتحوَّل طاقة الوضع المرونية عندما تتحرَّر الكتلة إلى طاقة حركية أثناء تحرّك الكتلة.
- تتحوَّل كل طاقة الوضع المرونية إلى طاقة حركية عندما تصل الكتلة إلى موضع الاتّزان.
- تتناوب الطاقة ذهابًا وإيابًا بين طاقة وضع مرونية وطاقة حركية مع كل اهتزازة للكتلة.

11-2 الطاقة الحركية في الحركة التوافقية البسيطة

$$E_K = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t)$$

E_K	الطاقة الحركية (J)
t	الزمن (s)
m	الكتلة (kg)
ω	التردّد الزاوي (rad/s)
A	السعة (m)

الطاقة الحركية لنظام مُهتزّ

هل يمكن حساب الطاقة الحركية لنظام مُهتزّ ؟ تعتمد الطاقة الحركية على الكتلة والسرعة. تُعطى سرعة النظام المُهتزّ بالمعادلة: $v = \omega A\cos(\omega t)$، وتُعطى الطاقة الحركية للنظام بالمعادلة: $E_k = \frac{1}{2} mv^2$، وتُعطى الطاقة الحركية لنظام مُهتزّ في أي لحظة من الزمن t **بالمعادلة 11-2**.

تكون الطاقة الحركية للنظام المُهتزّ عند قيمتها العُظمى عندما تكون السرعة عند أقصى قيمة لها. وبما أن السرعة هي دالّة جيب تمام. فإن سرعة النظام المُهتزّ تكون عظمى عندما يكون جيب التمام: $\cos(\omega t) = 1$. يعني ذلك أن الطاقة الحركية العظمى تساوي:

$$(E_K)_{MAX} = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2$$

طاقة الوضع المرونية لنظام مُهتزّ

تعتمد طاقة الوضع المرونية لنظام مُهتزّ على ثابت النابض وإزاحة الكتلة عن موضع الاتّزان. تحسب طاقة الوضع المرونية لنظام مُهتزّ بالمعادلة الآتية: $E_E = \frac{1}{2} kx^2$ وثابت النابض هو: $k = m\omega^2$، وإزاحة النظام المُهتزّ هي: $x = A\sin(\omega t)$ بتعويض قيمة k و x في معادلة طاقة الوضع المرونية، نحصل على **المعادلة 12-2**، التي تعطي طاقة الوضع المرونية في أي لحظة زمنية t.

12-2 طاقة الوضع المرونية في الحركة التوافقية البسيطة

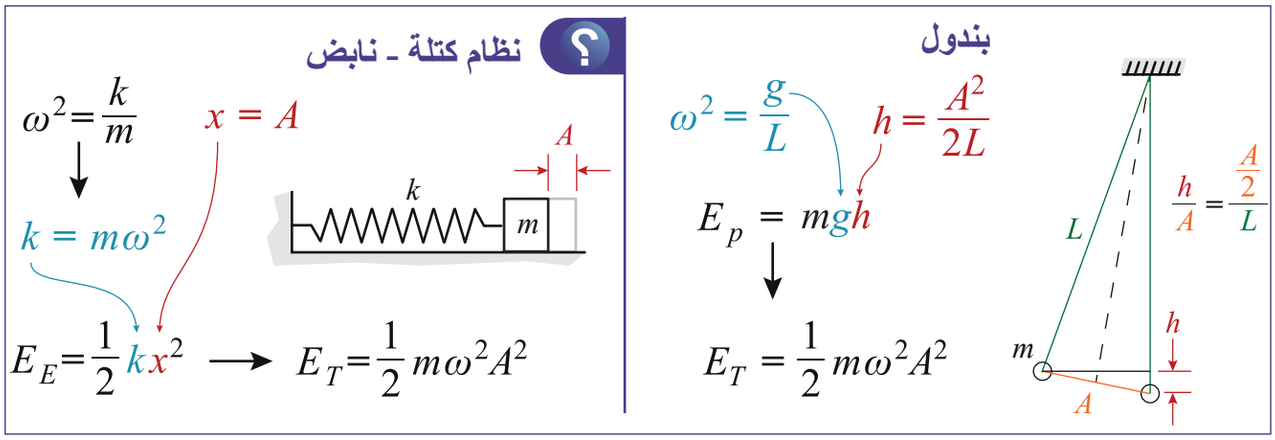
$$E_E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t)$$

E_E	طاقة الوضع المرونية (J)
t	الزمن (s)
m	الكتلة (kg)
ω	التردّد الزاوي (rad/s)
A	السعة (m)

تكون طاقة الوضع لنظام مُهتزّ عند قيمتها العظمى عندما تتساوى إزاحتها وسعتها. وبما أن الإزاحة دالّة جيبية؛ فإن إزاحة النظام المُهتزّ تساوي السعة عندما تكون $\sin(\omega t) = 1$. وهذا يعني أن طاقة الوضع المرونية العظمى تساوي: $(E_E)_{MAX} = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2$

الطاقة الكلية للنظام المهتز

لاشتقاق معادلة الطاقة الكلّية للنظام، يمكننا أن نستخدم إما طاقة الوضع العظمى أو الطاقة الحركية العظمى. يبيّن **الشكل 28-2** إشتقاق الطاقة الكلّية لكتلة مُعلَّقة في نابض، ولبندول. لاحظ أن كلًا منهما يعطي المُعادَلة نفسها للطاقة الكلّية (**المعادلة 13-2**).



الشكل 28-2 اشتقاق الطاقة الكلية لكل من البندول ونظام الكتلة-النابض.

13-2 الطاقة الكلّية في الحركة التوافقية البسيطة

$$E_T = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \quad E_T = \frac{1}{2} kA^2$$

(لِنظام الكتلة ـ النابض)

E_T	الطاقة الكلية (J)
m	الكتلة (kg)
ω	التردّد الزاوي (rad/s)
A	السعة (m)

حفظ الطاقة والحركة التوافقية البسيطة

يمكن استخدام **المعادلة 2-13** في حل الأسئلة المتعلّقة بتطبيق حفظ الطاقة. تتضمَّن هذه الأسئلة عادة:

1. استخدام الطاقة الكلّية لمعرفة مقدار أحد الأشكال الأخرى للطاقة، مثل الطاقة الحركية.
2. استخدام شكل معيَّن من الطاقة لحساب كمّية معيَّنة، مثل استخدام الطاقة الحركية لإيجاد السرعة القصوى، أو طاقة الوضع المرونية لإيجاد الإزاحة القصوى.

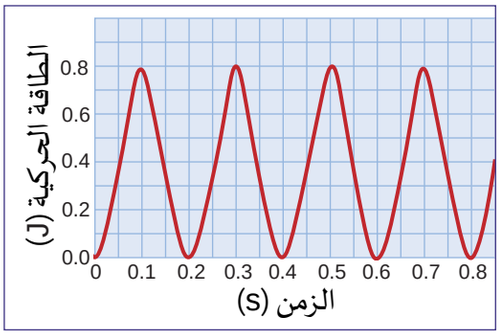
مثال 8

يبيّن الرسم البياني في **الشكل 2-29** التغيُّر في الطاقة الحركية لكتلة مُهتزّة مقدارها 0.25 kg مُعلَّقة بنابض.

a. احسب التردد الزاوي.

b. احسب السعة.

c. جد ثابت النابض.



الشكل 2-29 الطاقة الحركية.

المطلوب:

a. التردُّد الزاوي ω

b. السعة A

c. ثابت النابض k

المُعطى: رسم بياني للطاقة الحركية بدلالة الزمن، كتلة الجسم = 0.25 kg

العلاقات:

$$E_T = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} \qquad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

الحل:

a. يكون للنظام المُهتزّ خلال اهتزازة واحدة طاقة حركية عظمى مرتين، أي طاقة وضع تساوي الصفر مرتين. نلاحظ من الرسم البياني أن الزمن الدوري لاهتزازة واحدة يبلغ $T = 0.4\ \text{s}$.

$$\omega = \frac{2\pi}{0.4\ \text{s}} = \boxed{15.7\ \text{rad/s}}$$

b. تُحسب السعة باستخدام مُعادَلة الطاقة الكلّية، وهي 0.8 J من الرسم البياني.

$$E_T = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \rightarrow A = \sqrt{\frac{2E_T}{m\omega^2}} = \sqrt{\frac{2(0.8\ \text{J})}{(0.25\ \text{kg})(15.7\ \text{m/s})^2}} \boxed{= 0.16\ \text{m}}$$

c. يُحدَّد ثابت النابض من التردُّد الزاوي.

$$k = m\omega^2 = (0.25\ \text{kg})(15.7\ \text{rad/s})^2 = \boxed{61.6\ \text{N/m}}$$

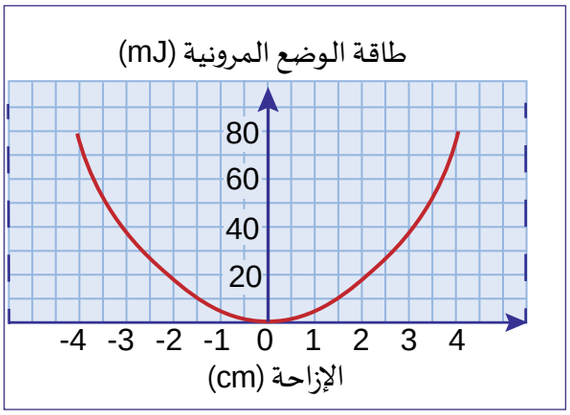
مثال 9

يبيّن الرسم البياني في **الشكل 30-2** التغيُّر في طاقة الوضع المرونية أثناء اهتزاز كتلة مقدارها 0.4 kg مُعلَّقة في نهاية نابض.

a. إذا كانت حركة الكتلة توافقية بسيطة، فما الطاقة الكلّية للنظام؟

b. احسب ثابت النابض لنظام الكتلة- النابض المُهتزّ.

c. حدِّد أقصى سرعة تُحقّقها الكتلة.



الشكل 30-2 طاقة الوضع المرونية في نظام مُهتزّ.

المطلوب:

a. الطاقة الكلّية E_T ؛

b. ثابت النابض k؛

c. القيمة القصوى للسرعة v_{max}.

المُعطى:

السعة، $A = 4\ \text{cm}$ ؛

الكُتلة، $m = 0.4\ \text{kg}$؛

العلاقات:

$$E_T = E_E\ ;\ E_E = \frac{1}{2}kx^2\ ;\ E_K = \frac{1}{2}mv^2;$$

الحل:

a. الطاقة الكلّية للنظام تساوي طاقة الوضع المرونية العظمى للنظام. وهكذا نحصل من الرسم البياني على: $E_T = 80\ \text{mJ}$

b. نستخدم لحساب ثابت النابض، طاقة الوضع المرونية عند سعة $4\ \text{cm} = 0.04\ \text{m}$.

$$E_E = \frac{1}{2}kx^2 \Rightarrow 0.08 = \frac{1}{2}k(0.04)^2$$

$$\boxed{k = 100\ \text{N/m}}$$

c. الطاقة الكلّية تساوي الطاقة الحركية القصوى.

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow 0.08 = \frac{1}{2}(0.4)v^2$$

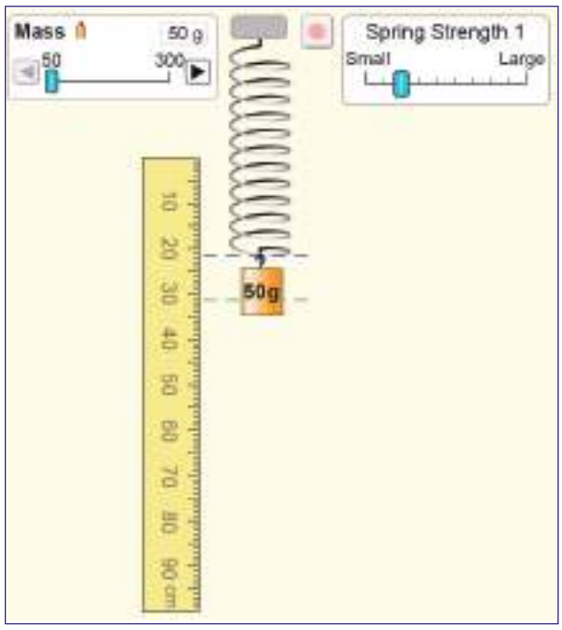
$$v^2 = 0.4 \Rightarrow \boxed{v_{max} = 0.63\ \text{m/s}}$$

نشاط b2-2 حفظ الطاقة في نظام كتلة-نابض مُهتزّ

سؤال الاستقصاء	احسب السرعة القصوى لنظام كتلة- نابض مُهتزّ باستخدام قانون حفظ الطاقة.
الموادّ المطلوبة	حاسوب والوصول إلى المحاكاة.

الخطوات

1. اختر وضع مختبر المحاكاة وهيَّئَه بجعل المسطرة تحاذي النابض.
2. تأكّد من وضوح الطول الابتدائي وموضع الاتّزان بالنسبة إليك.
3. اختر كتلة 50 g ولاحظ موضع اتّزان النابض عند النقطة السفلى لقراءة استطالة النابض. باستخدام الاستطالة وقوة وزن الكتلة، احسب ثابت النابض k.
4. دع النابض يهتز ولاحظ سعة الاهتزازة. احسب طاقة الوضع المرونية القصوى للنظام باستخدام السعة.



الشكل 2-31 تجهيز المحاكاة.

5. طاقة الوضع المرونية القصوى تساوي الطاقة الحركية القصوى للنظام. اجعل الطاقتين متساويتين لتحسب أقصى سرعة للنظام.
6. كرّر التجربة لكتلتين مختلفتين.

الأسئلة

a. متى يحقّق النظام أقصى سرعة: عندما تكون سعة الاهتزازة أقصى ما يمكن أم أقلّ ما يمكن؟ وضّح إجابتك باستخدام قانون حفظ الطاقة.

b. احسب الزمن الدوري لكل مجموعة من كتلة وثابت النابض. ثم استخدم المحاكاة وساعة إيقاف لقياس الزمن الدوري لكل كتلة وثابت نابض. هل الزمنان الدوريان متساويان؟

c. مثِّل بالرسم البياني الطاقة بدلالة الزمن لمجموعة واحدة على الأقلّ من القراءات. أضف إلى الرسم البياني خطوطًا لطاقة الوضع المرونية والطاقة الحركية والطاقة الكلّية.

الاحتكاك والتخامُد

معظم الأنظمة الحقيقية ليست أنظمة مغلقة. يعني ذلك أن الاحتكاك يؤثّر في أي تحوُّل أو تبادُل للطاقة. يحوّل الاحتكاك الطاقة الحركية إلى حرارة وأشكال أخرى من الطاقة. ومع انخفاض طاقة النظام المُهتزّ بسبب الاحتكاك تنخفض السعة. يُطلق على الانخفاض في السعة بسبب الاحتكاك اسم **التخامُد Damping**. وبمرور الزمن، يقلّل التخامُد من سرعة النظام المهتز تدريجيًّا إلى أن يتوقف النظام عن الحركة.

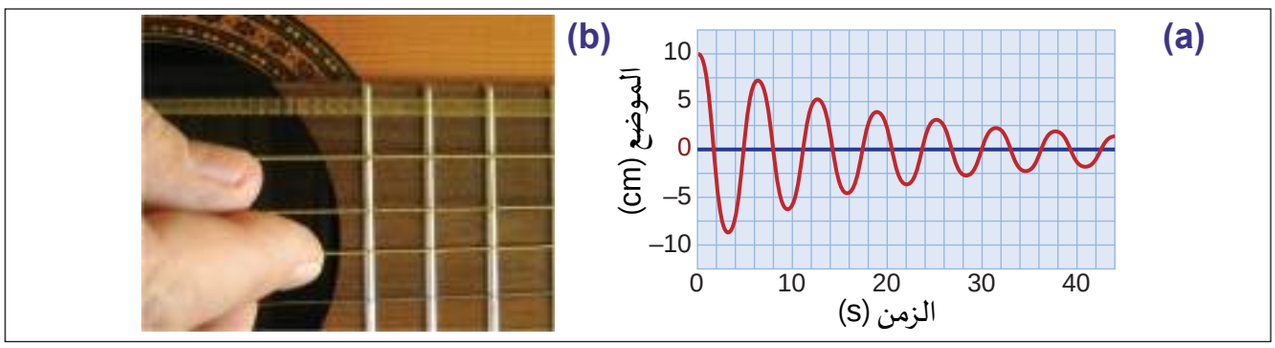
يقلل التخامد من سعة الاهتزازة.

أنظمة التخامد تحت الحد

يُظهِر الرسم البياني للموقع بدلالة الزمن في **الشكل 2-32a** تناقص السعة على امتداد عدد من الدورات، بسبب التخامُد. فالنظام الذي تقلّ فيه السعة بمرور الزمن، مع بقاء التردُّد كما هو، يُعرَف بنظام **التخامُد تحت الحدّ Underdamped**.

برغم أن التخامُد يبدو أمرًا غير مرغوب فإن هناك مواقف كثيرة تتطلَّب التخامُد. فمثلًا:

- تُصدر خيوط الجيتار وأجراسه أصواتًا لطيفَة لأن التخامُد منخفض (تحت الحد). ويمكن أن يكون هناك العديد من الاهتزازات بالتردُّدات نفسها كما في **الشكل 2-32b**.
- ألواح الغوص تكون في تخامد تحت الحدّ، وتعود إلى الاتّزان بعد العديد من الاهتزازات.



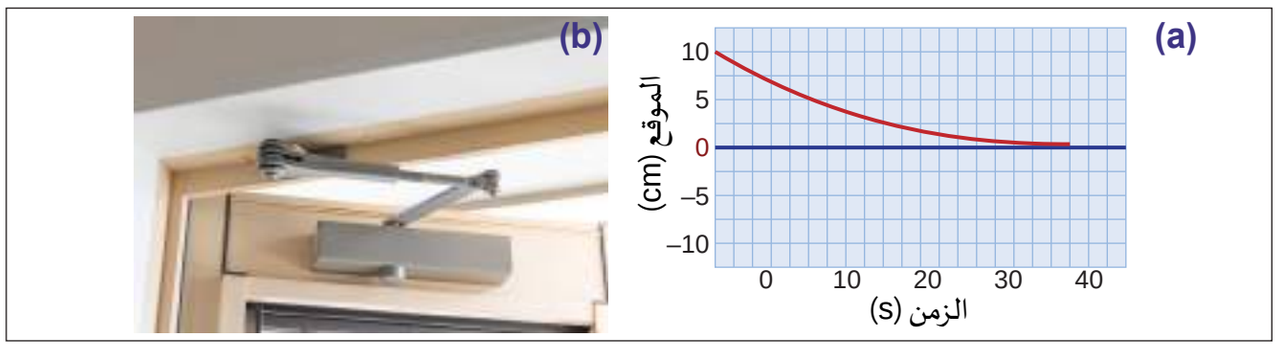
الشكل 2-32 (a) التخامُد يقلّل من السعة، **(b)** اهتزاز أوتار الجيتار.

الحصول على أنظمة مُتخامِدة

1. كيف نُنشئ نظامًا مُتخامِدًا؟ وكيف تبدو خصائصه؟
2. أَنشِىء بندولًا في حالة تخامُد تحت الحدّ.
3. أنشِىء بندولًا آخر بحيث يمكن التقليل من تخامده.
4. ما الفرق الرئيسي بين البندولَين؟

أنظمة التخامُد فوق الحَدّ

لا يُسمح للنظام في بعض الحالات بالإهتزاز ويُرغَم النظام للعودة إلى الاتزان خلال فترة زمنية طويلة جدًا. يسمى هذا النظام في هذه الحالة بنظام **تخامُد فوق الحدّ Overdamped**. يُبيّن **الشكل 2-a33** كيف يتغيَّر موقع النظام بمرور الزمن في نظام تخامُد فوق الحدّ. تُعدّ مُخمّدات حركة الأبواب مثالًا شائعًا على نظام تخامُد فوق الحدّ يُسبّب إغلاق الأبواب ببطء وهدوء **الشكل 2-b33**. قد يتخطّى النظام في حالة التخامُد فوق الحدّ أحيانًا موضع الاتّزان.



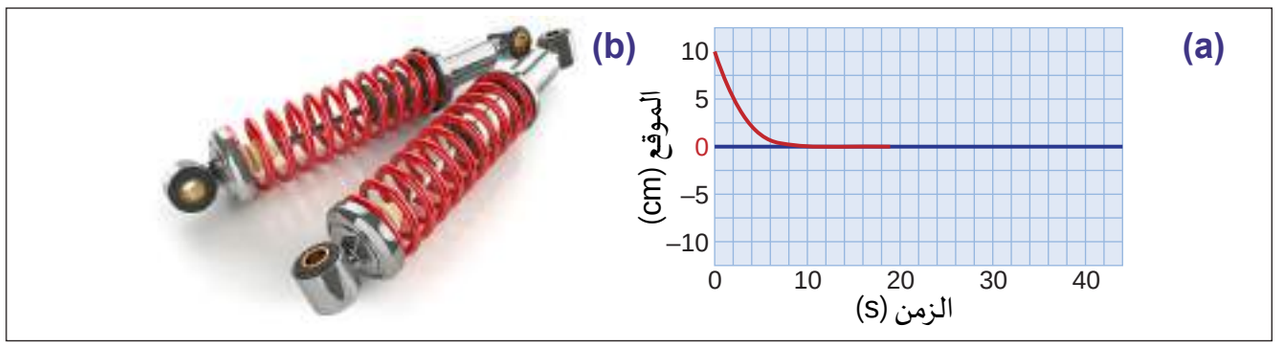
الشكل 2-33 (a) رسم بياني لنظام تخامُد فوق الحدّ، **(b)** مُخمّد باب.

أنظمة التخامُد الحرج

في التخامد الحرج يعود النظام إلى حالة الاتزان في اقصر وقت ممكن. يُظهر الرسم البياني في **الشكل 2-a34** نظام تخامُد حرج.

فيما يلي بعض الأمثلة على أنظمة التخامُد الحرج:

- يتكوَّن نظام التعليق في السيّارة من ممتصّات صدمات لضمان عودة السيّارة إلى الاتّزان بسرعة كبيرة بعد عبور حفرة أو مطبّ في الطريق (**الشكل 2-34**).
- تهتز الآلات الثقيلة في المصانع أثناء عملها، وقد يؤدّي هذا الاهتزاز إلى إتلاف الآلات. تُستخدم وسائد تخامُد أسفل الآلات لإيقاف الاهتزاز.

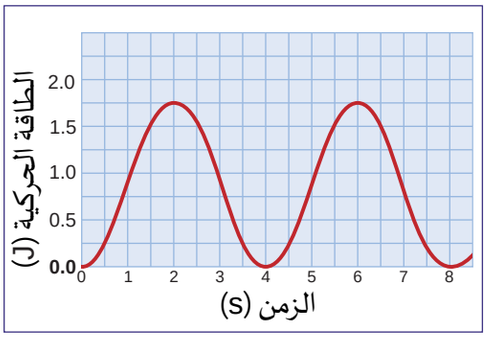


الشكل 2-34 (a) رسم بياني لنظام تخامد حرج، **(b)** ممتص صدمات.

تقويم الدرس 2-2

1. تحتوي الأنظمة التي تخضع لحركة توافقية على طاقة تتناوب بين أشكال مختلفة. ما هي أشكال الطاقة التي تتغيّر في الأنظمة أدناه؟
   a. بندول بسيط.
   b. كُتلة مُعلَّقة بنابض تنزلق على سطح أفقي عديم الاحتكاك.

2. يمثّل الرسم البياني التغيُّر في الطاقة الحركية بالنسبة إلى الزمن لكتلة في حركة توافقية بسيطة. أنشىء رسمًا بيانيًّا للتغيُّر في طاقة الوضع بدلالة الزمن للكتلة نفسها.



3. مُتسلّق جبال مُعلَّق بحبل من النايلون ثابت مرونته $1.4 \times 10^4\ N/m$، وكتلة المتسلّق بالإضافة إلى مُعدَّاته تساوي 90 kg.
   a. احسب تردد اهتزاز المتسلق.
   b. ما استطالة الحبل إذا سقط المتسلّق سقوطًا حرًّا من ارتفاع 2.00 m قبل أن يشدّ الحبل؟

4. تهتزّ كتلة 5 kg بحركة توافقية بسيطة. سعة اهتزازها 3 cm، وزمنها الدوري 1.2 s.
   a. احسب التردُّد الزاوي للكُتلة.
   b. كم تبلغ الطاقة الكلّية للنظام؟
   c. حدِّد الطاقة الحركية للكُتلة عندما تكون الإزاحة 2 cm.
   d. أنشىء رسمًا بيانيًّا لطاقة الوضع والطاقة الحركية والطاقة الكلّية، بدلالة الإزاحة.

5. يخضع نظام مُهتزّ لحركة توافقية بسيطة، حيث تكون طاقته الكلّية E.
   a. كم تبلغ الطاقة الحركية وطاقة الوضع عندما تكون الإزاحة نصف السعة؟
   b. تكون الطاقة الحركية مساوية لطاقة الوضع في موقعٍ معيَّن. ما هو ذلك الموقع؟

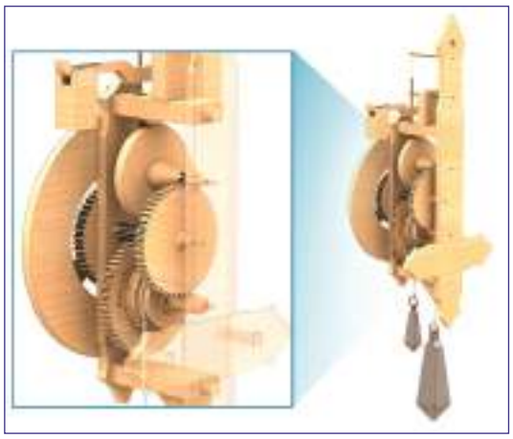
6. عندما تصطدم سيارة بحفرة في الطريق، تمتص الإطارات طاقة التصادم وتنضغط. استخدم مبدأ التخامد لمعرفة تحوّل هذه الطاقة.

الدرس 3-2

الاهتزازات القسرية والرنين

Forced Oscillations and Resonance

نظريًّا، وفي غياب أي مقاومة للهواء وأي احتكاك، يمكن للجسم المُهتزّ أن يهتزّ إلى الأبد. ومع ذلك فإن الوجود الدائم لمقاومة الهواء والاحتكاك يُسبّب تخامُد الاهتزازات وإجبارها على التوقُّف بسرعة معقولة. والسؤال الذي يطرح نفسه: كيف تعمل الساعات ذات البندول؟ ولماذا لا يتوقَّف البندول عن الاهتزاز بعد ثوان؟



الشكل 2-35 التروس داخل الساعة ذات البندول.

يتَّصل البندول في الساعة بتروس (مُسنَّنات) وهي التي تُدير عقارب الساعة. يتَّصل أيضًا بتروس أخرى مُتَّصلة بكتلة ثقيلة مُعلَّقة بها. كلّما اهتز البندول كما في (**الشكل 2-35**) تدور التروس، فتؤدّي إلى إنزال الكُتلة مسافة صغيرة إلى أسفل. عندها تحرِّر تلك الكُتلة طاقة وضع تجاذبية تنتقل إلى البندول. هذا المصدر الإضافي من الطاقة يمكن أن يُبقي الساعة ذات البندول تعمل لعدة أيام قبل أن يتم رفع الكُتلة مرة أخرى.

مخرجات التّعلُّم

P1204.1 يصف أمثلة عملية للاهتزازات القسرية والرنين، ويوضح كيف تتغير سعة الاهتزاز القسري عندما يصبح التردُّد قريبًا من التردُّد الطبيعي للنظام.

P1204.3 يصف الظروف التي يكون الرنين مرغوبًا فيه، والظروف الأخرى التي لا يكون فيها الرنين مرغوبًا فيه.

المفردات

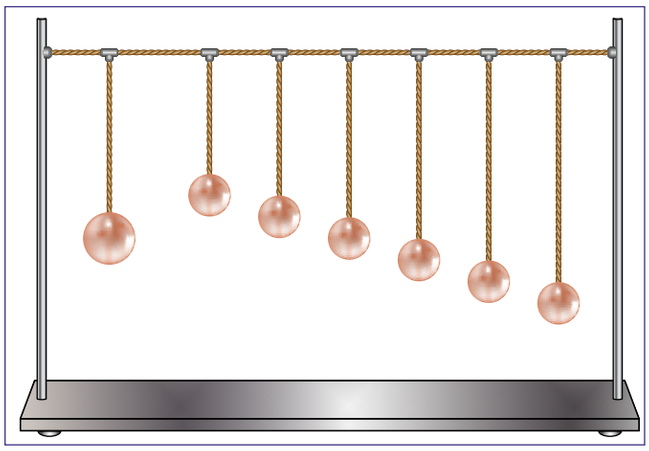
Periodic force	قوة دورية
Resonance	رنينّ

نشاط a3-2 بندول بارتون

سؤال الاستقصاء	كيف يعمل بندول بارتون؟
الموادّ المطلوبة	حامل قائم، كتل متساوية المقادير، كتلة واحدة أكبر، خيوط

خطوات بندول بارتون

1. ركّب بندول بارتون كما هو مبيّن في **الشكل 2-36**.
2. تأكّد من أن الخيط الأول رُبِطت به الكُتلة الأكبر، وأن بقية الخيوط رُبِطت بكل منها كُتلة من الكُتل المتساوية الأخرى.
3. يُعرَف البندول الأول ذو الكُتلة الأثقل باسم بندول القيادة. ويجب أن يكون هناك بندول واحد آخر في المجموعة له طول بندول القيادة.



الشكل 2-36 بندول بارتون.

4. أزح أحد البندولات ودوّن الزمن الدوريّ له. لا تزح بندول القيادة الآن. أزح البندول نفسه الآن أكثر من قبل، سوف تلاحظ أن الزمن الدوريّ يجب أن يبقى نفسه.
5. أزح بندولًا آخر ودوّن الزمن الدوريّ. لاحظ أن جميع البندولات لها أزمان دوريّة مختلفة، وبالتالي تردُّدات مختلفة.
6. أزح الآن بندول القيادة. لاحظ أنه وهو يتحرَّك تهتزّ جميع البندولات الأخرى أيضًا، ولكن هناك بندولًا واحدًا يهتزّ أكثر.

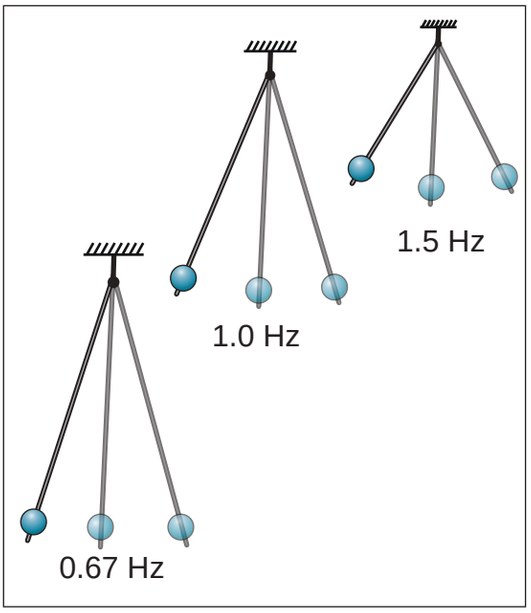
اكتشف

1. ما وجه التشابه بين بندول القيادة والبندول الأكثر اهتزازًا؟
2. هل لبندول القيادة والبندول الأكثر اهتزازًا الطَّور نفسه؟ وإذا كانا خارج الطور، فهل يمكنك ملاحظة فرق الطور بينهما؟
3. لماذا لا تهتزّ بقية البندولات بالمقدار نفسه؟
4. كيف يمكن استخدام تبدُّد الطاقة هذا في تطبيقات الحياة اليومية؟

التردُّد الطبيعي

يهتز البندول دائما بنفس الزمن الدوري والتردد ما لم تؤثر فيه قوة خارجية. ويُسمّى تردُّد الاهتزاز لأي نظام **بالتردُّد الطبيعي Natural frequency** للنظام f_0 ذلك أن أي جسم قابل للاهتزاز يكون له تردُّد طبيعي، ومن الجدير بالذكر أن معظم الأنظمة لها أكثر من تردُّد طبيعي واحد.

يعتمد التردُّد الطبيعي على التوازن بين شدّة قوى الإرجاع ومقدار القصور الذاتي في النظام. يبيّن **الشكل 2-37** أنه كلّما زاد طول خيط البندول يقلّ تردُّد البندول ويزداد زمنه الدوريّ.



الشكل 2-37 التردُّد الطبيعي للبندول.

أمثلة على استخدام التردُّد الطبيعي

للتردد الطبيعي فوائد عدة حيث أن العديد من الاختراعات صُمِّمت للعمل على تردُّد محدّد. من الأمثلة على ذلك:

- يُضبَط وتر الجيتار الذي يعزف النوتة الوسطى C ليكون تردُّده الطبيعي 262 Hz. فعملية الضبط تمثّل تعديلًا للتردُّد الطبيعي لاهتزاز الوتر.
- تعتمد الساعات وأجهزة الحواسيب وكثير من الأجهزة الأخرى على التردُّد الطبيعي الدقيق لبلّورة الكوارتز المُهتزّة. ويحتوي جهاز الحاسوب الذي يعمل بتردُّد 2.6 GHz على ساعة كوارتز داخلية تهتز عند تردُّد 2.6 مليار دورة كل ثانية.

الشكل 2-38 ضبط أوتار الجيتار يغيّر تردُّدها الطبيعي.

كيف يمكن تغيير التردُّد الطبيعي للجيتار؟

هل هناك أنظمة أخرى يمكن تعديل التردُّد الطبيعي لها؟

يمكن ضبط التردُّد الطبيعي في بعض الأنظمة على قيم مختلفة.

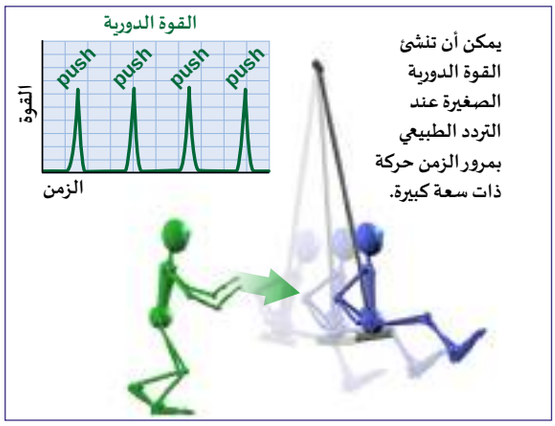
الاهتزازات القسرية

تكون العلاقة بين القوة والحركة في الحركة التوافقية البسيطة أكثر تعقيدًا ممّا هي في الحركة الخطّية. والفرق بينهما هو أن القوى يمكن أن تكون دورية. تُعرَّف **القوة الدورية Periodic force** بأنّها قوة خارجيّة تتكرّر كما في حالة الدفع المُتكرّر لأرجوحة: دفع- انتظار- دفع- انتظار- دفع- انتظار. وعند استخدام قوّة دورية لجعل نظام يهتز تُعرف الاهتزازات الناتجة بالاهتزازات القسرية.

لا تزال قوانين نيوتن تُطبّق على القوى الدورية، ولكن تردُّد القوة الدورية هو متغيّر جديد يمكن أن يُحدث فرقًا كبيرًا. فعندما يتطابق تردُّد القوة الدورية مع التردُّد الطبيعي للنظام تتمكَّن القوة ولو كانت صغيرة، من إنتاج اهتزاز كبير بشكل لافت. يُعرَف هذا التأثير باسم **الرنين Resonance**، وهو موجود في في كثير من الظواهر الطبيعية والتطبيقات التكنولوجية.

أمثلة على القوة الدورية

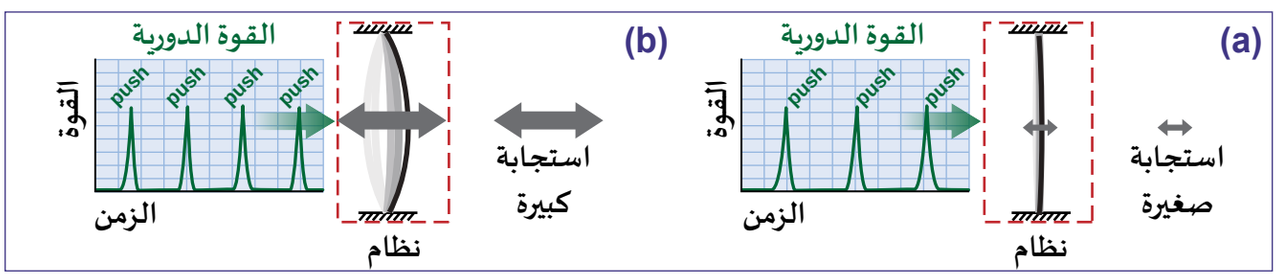
فكّر في شخص ما يدفع أرجوحة يمكن اعتبارها بندولًا له تردُّد طبيعي. فلكي تزيد سعة الاهتزاز، ادفع الأرجوحة قليلًا في كل مرة تصل فيها إلى نهاية دورتها، كما هو مبيّن في **الشكل 2-39**. تُعدّ الدفعات المُتكرّرة في لغة الفيزياء قوّة دورية لها التردُّد الطبيعي للأرجوحة. تحصل الأرجوحة من خلال الدفعات المُتكرّرة على سعة كبيرة للحركة، في حين أن أي دفعة بمفردها لن يكون لها تأثير في حد ذاتها.



الشكل 2-39 القوّة الدورية المؤثّرة في أُرجوحة.

الرنين

عندما يتطابق تردُّد القوة الدورية مع التردُّد الطبيعي للنظام، فإن كل دفعة تأتي في اللحظة المُناسِبة تزيد السعة بشكل كبير. يُعرَف هذا السلوك باسم الرنين. يحدث الرنين عندما يتطابق تردُّد القوة الدورية مع التردُّد الطبيعي للنظام. يبيّن **الشكل 2-40a** عدم وجود رنين بسبب عدم تطابق تردُّد القوة الدافعة مع التردُّد الطبيعي للنظام. ويبيّن **الشكل 2-40b** حدوث الرنين في حال تطابُق تردُّد القوة الدافعة مع التردُّد الطبيعي للنظام.

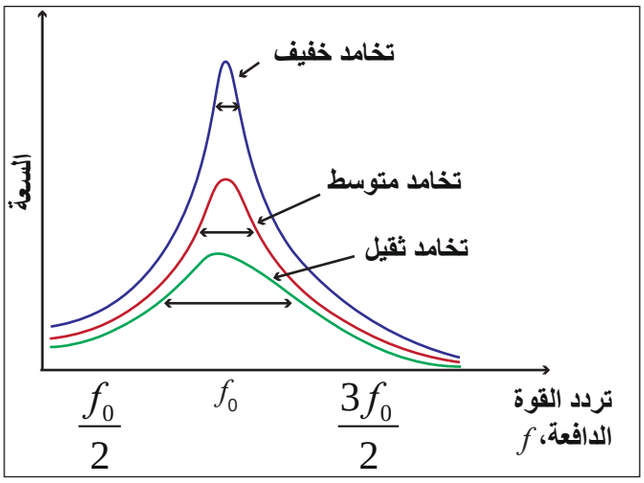


الشكل 2-40 (a) لا يوجد رنين، **(b)** تأثير الرنين.

التخامُد والرنين

افترض أن قوة دفع قد طُبّقت على نظام مُهتزّ. تعتمد سعة الاهتزازة لنظام الدفع على عاملين هما:

1. مقارنة تردُّد القوة الدافعة بالتردُّد الطبيعي للنظام، فإذا لم يتطابقا فإن سعة الاهتزازة تنخفض.
2. يؤثّر تخامُد النظام على السعة، فالأنظمة ذات التخامُد الأصغر تصل إلى سعة أعلى.



الشكل 2-41 السعة مقابل تردد الحركة التوافقية.

يُبيّن **الشكل 2-41** العلاقة بين السعة وتردُّد القوة الدافعة. ويُسمّى هذا الرسم البياني «منحنى الرنين».

كذلك يبيّن الرسم البياني في **الشكل 2-41** ما يأتي:

- تكون السعة صفرًا عند التردُّدات العالية.
- تكون سعة النظام المدفوع مساوية لسعة النظام الدافع عند التردُّدات المنخفضة جدًّا.
- تكون سعة النظام المدفوع عند قيمتها القصوى عندما تكون $f = f_0$ (تردُّد النظام الدافع يساوي التردُّد الطبيعي للنظام المدفوع).

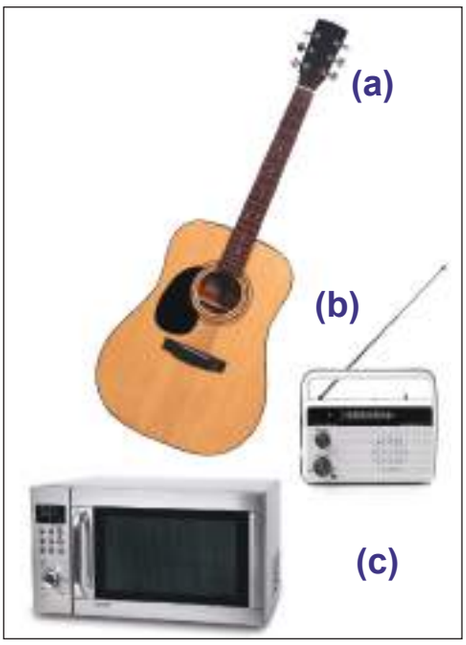
تجنُّب الرنين الميكانيكي

يهتمّ المهندسون دائمًا بتأثير الرنين عند تصميم إنشاءات، كالمباني والجسور. فالرياح القوية والزلازل قد تُسبّب اهتزازات تؤدّي إلى كوارث إذا كان تردُّدها يتطابق مع التردُّد الطبيعي للإنشاءات. يستخدم جهاز Tuned mass dumper (TMD) للحفاظ على اتزان المباني عند حصول اهتزازات ذات سعات كبيرة. إحدى التقنيات المتّبعة هي تعليق بندول ضخم في المبنى، مع اختلاف في الطور بينه وبين الاهتزاز الطبيعي للمبنى. قوة رد الفعل للبندول المهتز تقلل من سعة اهتزاز المبنى. يتكوَّن برج أسباير (شعلة الدوحة) في الدوحة من نظام مهتز مخمِّد كتلة مضبوطة بتردُّد 0.22 Hz، وتبلغ كتلة النظام المهتز حوالي 14×10^4 kg.

الشكل 2-42 برج أسباير الدوحة (شُعلة الدوحة).

أمثلة مرغوبة للرنين

- يمكن أن يُسبّب الرنين آثارًا مرغوبة وآثارًا غير مرغوبة. لندرس كيف يمكن أن يكون الرنين مفيدًا (**الشكل 2-43**).
- عندما يُنقر وتر في الجيتار؛ يحدث رنينٌ للهواء في جوف الجيتار ويتضخَّم الصوت.
- يعمل المذياع على مبدأ الرنين أيضًا. فعندما تختار محطة إذاعية، يتغيّر التردُّد الطبيعي لجهاز الاستقبال ليتناسب مع تردُّد جهاز الإرسال.
- تنقل أفران الميكروويف الموجات الميكروية بتردُّدات مختلفة لتتناسب مع تردُّد الجُزيئات داخل الطعام. لذلك يكون لدى أجهزة الميكروويف الحديثة خيارات لتسخين أنواع الطعام مثل الفشار والبطاطس واللحوم. يضمن اختيار الطعام تطابُق تردُّد الفرن مع تردُّد الطعام للتسخين المناسب.



الشكل 2-43 الرنين المرغوب **(a)** الجيتار، **(b)** المذياع، **(c)** فرن الميكروويف.

أمثلة غير مرغوبة للرنين

نصادف كثيرًا من الحالات يكون فيها الرنين ضارًّا. لذلك يحاول العلماء والمهندسون أن يؤكدوا التقليل من آثار الرنين في مثل تلك المواقف (**الشكل 2-44**).

- قد تبدأ السيّارة التي تكون إحدى عجلاتها فارغة من الهواء بالاهتزاز إذا كانت تُقاد بسرعة مُعيَّنة. يحدث ذلك خلال حركة السيارة لأن العجلة الفارغة من الهواء توفّر دفعة دورية تُنشىء تأثيرًا رنينيًّا.

الشكل 2-44 الرنين غير المرغوب فيه **(a)** عجلة فارغة من الهواء، **(b)** مكبّر صوت.

- قد يكون لمُكبّرات الصوت تردُّد رنين أيضًا، حيث تُصمّم مُكبّرات الصوت ليكون تردُّد الرنين الخاصّ بها أقل من التردُّدات الأخرى التي سترسلها. **الشكل 2-44** يُمثّل الرنين غير المرغوب فيه كما في عجلة فارغة من الهواء **(a)**، أو مُكبّر صوت **(b)**.

جسر تاكوما

اهتزّ جسر تاكوما ناروز في ولاية واشنطن سنة 1940. والتوى وسط رياح سرعتها 64.38 km/h؛ الأمر الذي أدى إلى انهياره المُثير الذي التقط بالفيديو. هل كان ذلك مثالًا حقيقيًا على الرنين القسري حيث التردُّد الاهتزازي للرياح تطابَق مع التردُّد الطبيعي للجسر؟

نشاط b3-2 الحصول على الرنين عمليًا

سؤال الاستقصاء	هل يمكننا جعل كتلة مُعلَّقة بنابض مُهتزّ تُحدث رنينًا إذا عرفنا تردُّدها الطبيعي؟
الموادّ المطلوبة	حامل قائم، نابض، كتلة بخطّاف، مسطرة، ساعة إيقاف عادية أو رقمية.

الخطوات

الشكل 2-45 اهتزاز كتلة معلقة في نابض.

1. اربط الكُتلة ذات الخطاف بالنابض، ثم علّق النابض بالرافعة وثبِّت كل ذلك بالحامل، كما هو مبيّن في **الشكل 2-45**.
2. ثبِّت مسطرة على الحامل، بحيث يكون منتصفها عند الكُتلة المُعلَّقة. اسحب الكُتلة قليلاً إلى أسفل لتبدأ اهتزازها.
3. قس زمن 10 اهتزازات. ثم اقسم على 10 للحصول على الزمن الدوري.
4. حوّل الزمن الدوريّ إلى تردُّد.
5. اضبط المؤقت الآن ليصفر عند تردُّد بين 0.1 Hz و 3 Hz.
6. أثناء استخدام إحدى يديك لتثبيت الجُزء العلوي من الحامل في مكانه، استخدم يدك الأخرى للضغط على الرافعة عند كل صافرة، كما هو مبيّن في **الشكل 2-45 b**.

الشكل 2-46 برمجية المؤقّت.

7. اطلب إلى زميلك تقدير سعة الحركة باستخدام المسطرة.
8. قس سعة الاهتزازة ودوّنها في جدول لعدد لا يقلّ عن 10 تردُّدات، يتراوح مداها بين 0.1 Hz وثلاثة أضعاف التردُّد الطبيعي. يجب أن يكون قياس أحدها عند التردُّد الطبيعي للنظام. مثِّل بالرسم البياني سعة الاهتزازة بدلالة تردُّد القوة الدورية.

تقويم الدرس 2-3

1. صف العلاقة بين الرنين والسعة والقوّة والتردُّد الطبيعي.

2. إذا كنت تدفع طفلًا في أرجوحة ويريد أن يرتفع أكثر. كيف تحقّق له ذلك؟

3. قارن بين نظامين مادّيين يهتزّان، أحدهما بندول والآخر كتلة مُعلَّقة بنابض مُهتزّ. أي من هذين النظامين يغيّر تردُّده الطبيعي أكثر عندما تتغيّر كتلة جسمه؟

   a. يغيّر البندول تردُّده الطبيعي في حين لا تغيّر الكُتلة المُعلَّقة بالنابض المُهتزّ تردُّدها الطبيعي.

   b. تغيّر الكُتلة المُعلَّقة في النابض المُهتزّ تردُّدها الطبيعي، في حين لا يغيّر البندول تردُّده الطبيعي.

   c. البندول والكُتلة المُعلَّقة بالنابض المُهتزّ كلاهما يغيّران تردُّد هما الطبيعي بالتساوي.

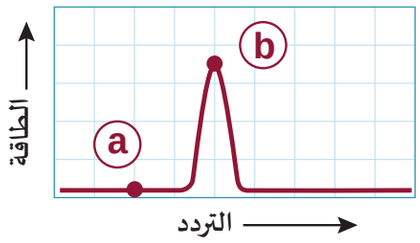
   d. كل من البندول والكُتلة المُعلَّقة بالنابض المُهتزّ لا يغيّر تردُّده الطبيعي.

4. تحاول أن تزيد التردُّد الطبيعي لكتلة مُعلَّقة بنابض. هل يجب عليك زيادة الكُتلة أم إنقاصها لتحقيق ذلك؟

5. كان لكريستيان هيجنز عام 1665 ساعتان تستخدمان بندولين موضوعتان على أرضية غرفته. لاحظ أنهما بغض النظر عن كيفية بدء تشغيلهما، ستصلان دائمًا في النهاية إلى حالة يكون فيها بندولاهما يتأرجحان إما خارج الطَّور، وإمّا أحدهما عكس الآخر. فما الذي يحدث؟

6. تعلّم الجنود الذين يعبرون جسرًا منذ قرون ألا يسيروا بخطوات منتظمة فوق الجسر بشكل متزامن. وبدلاً من ذلك فإنهم جميعًا يسيرون بخطوات غير منتظمة. لماذا؟

7. يُظهر الشكل المجاور تغيّر طاقة نظام مهتز بدلالة تردد القوة الدافعة الدورية. اشرح الفرق بين قيمتي الطاقة عند النقطتين (a) و (b) باستخدام مبدأي التردد الطبيعي والرنين.



8. يهتز بندول عند تردُّده الطبيعي والبالغ 0.7 Hz. إذا غيّرت البندول ليصبحَ زمنه الدوريّ ثلاثة أضعاف قيمته الأصلية، فكيف يتغيَّر تردُّده الطبيعي؟

ضوء على العلماء

كريستيان هيجنز: 1629-1695

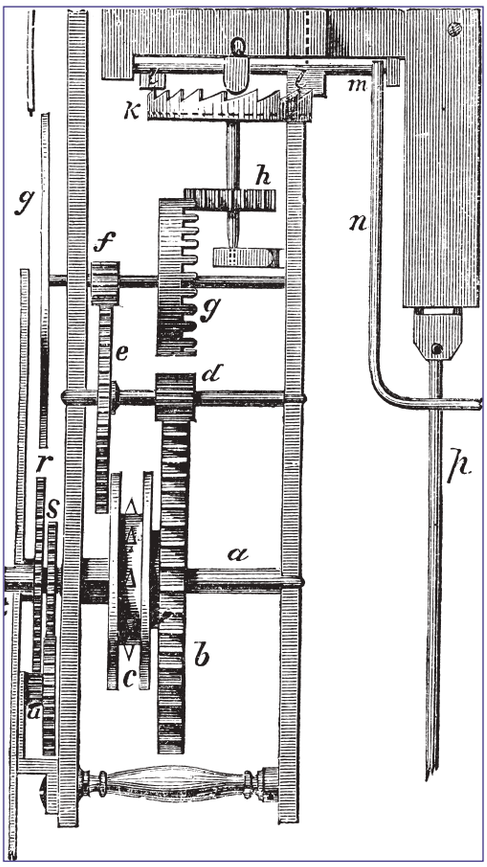
قدَّم كريستيان هيجنز الفيزيائي والفلكي والرياضي والمُخترع الهولندي مساهمات ملحوظة في تحليل البندولات (**الشكل 2-47**). ولد هيجنز في لاهاي بهولندا، وتلقّى تعليمه الابتدائي في المنزل حتى عامه السادس عشر. ينتمي هيجنز إلى أسرة ذات علاقة قوية بأصدقاء من علماء الفيزياء والرياضيات المشهورين.

الشكل 2-47 كريستيان هيجنز (1629-1695).

درس كريستيان هيجنز القانون والرياضيات في جامعة ليدن بين العامين 1645 و 1647 ثم انتقل إلى كلية أورانج من عام 1647 إلى عام 1649.

ورغم أن والده أراد منه أن يصبح دبلوماسيًّا، لكن هيجنز لم يكن لديه أي اهتمام بالسياسة. وبدلاً من ذلك طوّر اهتمامات رياضية وقرّر قضاء وقته في البحث العلمي.

درس هيجنز قوانين الجاذبية وقوانين نيوتن في الحركة مُشتقًّا المعادلة الرياضية للقوة المركزية. كذلك ألهمته أعمال جاليليو في البندولات؛ فاستخدم البندولات واشتق معادلة الزمن الدوري للبندول، واخترع أول ساعة ذات بندول. يمكن رؤية تصميمها في **الشكل 2-48**. يُعدّ تصميم ساعة هيجنز الطريقة الأكثر دقة في الحفاظ على الوقت لمدة تصل إلى 275 عامًا. لتقوم شركة تصميم الساعات المُسمّاة سالومون كوستر بصنع تلك الساعات ذات البندول لهيجنز. وأصبحت دقّة تلك الساعات معروفة في جميع أنحاء أوروبا. لم يكن هيجنز قادرًا على تأمين حقوق الملكية في كل مكان؛ فنسخت شركات أخرى تصميمه. ولا يزال مُتحف بورهافي في ليدن يعرض ساعة هيجنز ذات البندول المصنوعة عام 1657.



الشكل 2-48 رسم تخطيطي لساعة هيجنز.

الوحدة 2

مراجعة الوحدة

الدرس 2-1: الحركة التوافقية البسيطة

- نعاين الكثير من **الأجسام المهتزة** يوميًا، كأن نشاهد غصن شجرة يتحرَّك إلى أعلى وأسفل بسبب الرياح، وأرجوحة تتحرَّك إلى الأمام وإلى الخلف، ومنشارًا يتحرَّك إلى أعلى وأسفل، وغير ذلك.
- يتحرَّك النظام الذي يتأثر بقوة إرجاع تتناسب طرديًا مع الإزاحة، ولكن في الإتجاه المعاكس، **بحركة توافقية بسيطة**.
- يعتمد **الزمن الدوري** للبندول على طول الخيط والجاذبية. ويعتمد الزمن الدوري لكتلة مُعلَّقة بنابض مُهتَزّ على ثابت النابض والكتلة.
- يمكن حساب **تردَّد** جسم مهتزّ بإيجاد مقلوب زمنه الدوريّ.
- إذا كانت الطاقة في النظام محفوظة، فإن **سعة** اهتزازالنظام تكون ثابتةً.
- يمكن أن يكون لجسمين مهتزين **الطور** نفسه، إذا بدآ بالاهتزاز وأنهياه في اللحظة نفسها.
- يمكن حساب **التردُّد الزاوي** لجسم مُهتزّ بضرب تردده في المقدار 2π.

الدرس 2-2: الطاقة في الحركة التوافقية البسيطة

- نتيجة لوجود قوى احتكاك كمقاومة الهواء؛ فإن سعة اهتزاز جسم مهتزّ تقلُّ بسبب **التخامُد**.
- الأرجوحة ولوحة الغطس وأوتار الجيتار تُشكِّل كلّها أمثلة على أنظمة **تخامُد تحت الحدّ**، حيث تقل سعة الاهتزاز بمرور الزمن، ويتوقّف النظام عن الاهتزاز في النهاية.
- تُعدّ مُخمِّدات الأبواب ومساند إيقاف الأدراج أمثلة على أنظمة **التخامُد فوق الحدّ**، حيث تقلّ سرعة الأبواب والأدراج وتتوقف دون أن تهتز.
- تُعدّ ممتصّات الصدمات مثالًا على نظام **التخامُد الحرج** ، فهي تضمن عودة السيارة إلى وضعها الأصلي في أقصر زمن ممكن.

الدرس 2-3: الاهتزازات القسرية والرنين

- تأثير **القوة الدورية** في جسم مُهتزّ يساعده في الحفاظ على اهتزازه.
- يؤدّي تأثير قوة دورية في نظام بتردُّد مساوٍ لتردُّده الطبيعي إلى حدوث **رنين**. يعني ذلك أن سعة الاهتزازات الناتجة تزداد.

تقويم الوحدة

اختيار من مُتعدِّد

1. أي مما يأتي ليس مثالًا على الحركة التوافقية؟
   a. تدحرُج كُرة إلى أسفل منحدر.
   b. تأرجُح بندول.
   c. حركة المكابس في مُحرِّك سيّارة.
   d. حركة كتلة مُعلَّقة في نهاية نابض.

2. تبلغ المسافة بين النقطتين العليا والسفلى لحركة كتلة مُعلَّقة بنابض مُهتزّ 20 cm. كم تبلغ سعة حركتها؟
   a. 10 cm
   b. 20 cm
   c. 30 cm
   d. 40 cm

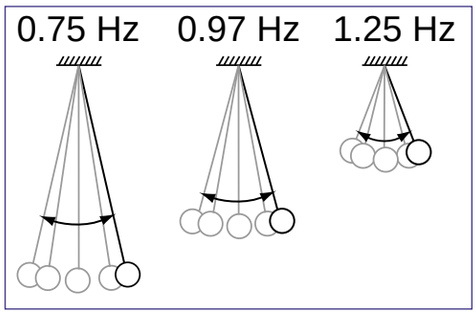
3. أي مما يأتي مثال على الرنين؟
   a. تأرجُح البندول ذهابًا وإيابًا.
   b. اهتزاز كتلة صغيرة مُعلَّقة رأسيًّا بنابض.
   c. ارتعاش ضوء مصباح الفلورسنت.
   d. عزف نوتة موسيقية بمفتاح «flat B» في بوق.

4. أي كمّية مما يلي تتناسب مع قوة الإرجاع طرديًّا في نظام يخضع لحركة توافقية بسيطة؟
   a. طاقة الوضع
   b. سعة الاهتزازة
   c. تردُّد الاهتزازة
   d. الإزاحة عن موضع الاتّزان

5. كم يبلغ الزمن الدوريّ لموجة تردُّدها 130 Hz؟
   a. 0.0077 s
   b. 0.015 s
   c. 0.077 s
   d. 130 s

6. تهتز كتلة مُعلَّقة بنابض بسعة صغيرة A. إذا تضاعفت سعة الاهتزاز، فماذا يحدث للزمن الدوريّ؟
   a. ينخفض إلى النصف.
   b. يزداد إلى الضعف.
   c. يبقى كما هو.
   d. يزيد بمُعامِل $\sqrt{2}$.

7. يبيّن الشكل المجاور تردّد ثلاثة بندولات. ما أفضل وصف للعلاقة بين طول الخيط والزمن الدوري؟



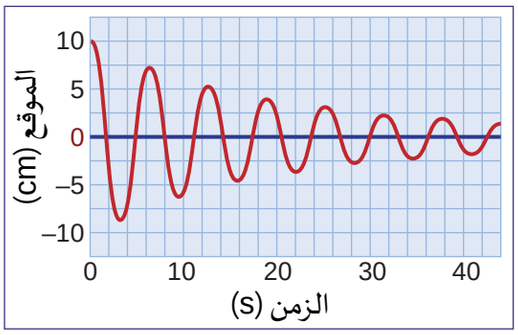
a. عندما يكون طول الخيط أطول، فإن الزمن الدوري يزداد.

b. عندما يكون طول الخيط أطول، فإن الزمن الدوري ينقص.

c. يكون طول الخيط مستقلًّا عن الزمن الدوري.

d. يكون الزمن الدوري مستقلًّا عن طول الخيط.

8. يبيّن الرسم البياني إزاحة كتلة مُهتزّة. ما هما الكمّيتان اللتان تبقيان ثابتتَيْن؟



a. الزمن الدوري والتردد

b. التردُّد والسعة

c. السعة والزمن الدوري

d. الطاقة والتردُّد

9. ما العبارة الصحيحة حول مقدار تسارع جسم يخضع لحركة توافقية بسيطة؟

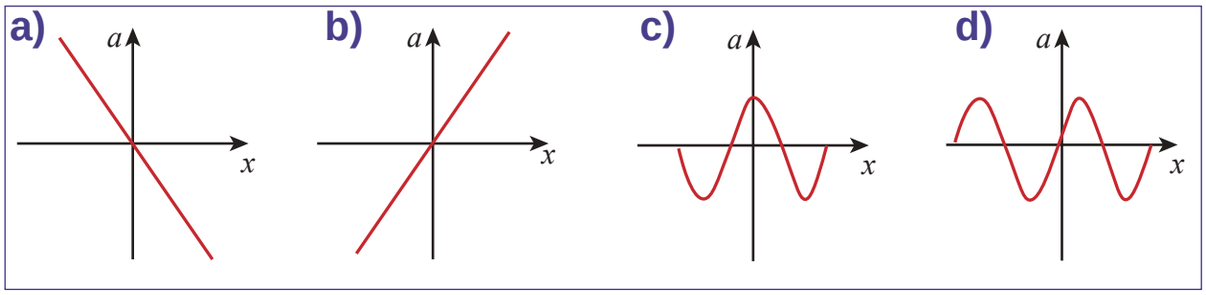
a. يكون مُنتظِمًا طوال الحركة.

b. يزداد بازدياد البعد عن موضع الاتّزان.

c. يزداد بازدياد السعة.

d. يزداد بازدياد السعة والبعد عن موضع الاتّزان.

10. أي من الرسوم البيانية أدناه يمثّل العلاقة الصحيحة بين التسارع (a) لجسم ما في حركة توافقية بسيطة وإزاحته (x)؟



11. كتلة معلَّقة بنابض مقدارها 4 kg تهتز بتردُّد 3 Hz وبإزاحة عظمى مقدارها 19 cm. ما أقصى سرعة للكتلة؟

a. 3.6 m/s

b. 6.2 m/s

c. 6.8 m/s

d. 7.2 m/s

تقويم الوحدة

الدرس 2-1: الحركة التوافقية البسيطة

12. كم يبلغ تردُّد البندول الذي يكمل 20 اهتزازة في 45 s؟ وكم يبلغ زمنه الدوري؟

13. كتلة معلَّقة رأسيًا بنابض تهتز بتردُّد 1.1 Hz. جد زمنها الدوري.

14. ما ميزة البندول التي تسمح باستخدامه في ساعة توقيت؟

15. تبث محطة إذاعة AM بتردد 1,050 kHz. كم مرة تهتزّ إشارتها في الثانية؟

16. يتحرك بندول بسيط وكتلة معلَّقة بنابض بحركة توافقية بسيطة.

a. أي من هذين النظامين يعتمد فيه الزمن الدوري للحركة التوافقية على الكتلة؟

b. أي من هذين النظامين يعتمد فيه الزمن الدوري للحركة التوافقية على السعة؟

*

17. قام عبد الله وأحمد بصُنع بندول صغير ليكون بمثابة ساعة إيقاف بدائية في تجربة الكرة والمُنحدَر. حيث قاما بتعليق كتلة فلّزية ثقيلة بخيط على حامل في المختبر. واكتشفا أن الزمن الدوري للبندول T يبلغ 0.5 s.

a. كم يبلغ طول خيط البندول؟

b. افترض أن الزميلين يريدان الآن أن يهتز البندول مرّة كل ثانية، وليس كل نصف ثانية. قال عبد الله إن الخيط يجب أن يكون أطول بنسبة 50% فقط، في حين قال أحمد بضرورة مضاعفة طول الخيط. أيهما كان قوله صحيحًا؟ أثبت صحة إجابتك باستخدام العلاقات الرياضية الخاصة بالبندول.

**

18. يخضع جسم كتلته 2 kg لحركة توافقية بسيطة. تتغيّر فيها الإزاحة بالنسبة للزمن وفق العلاقة الآتية:

$x = 6\sin 2\left(\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$ حيث تقاس x بالمتر.

a. احسب السعة والزمن الدوري وثابت الطور للحركة.

b. احسب أقصى تسارُع للحركة.

19. جد معادلة إزاحة جُسَيم يخضع لحركة توافقية بسيطة سعتها 8 cm وتردُّدها 14 Hz بافتراض أن إزاحته عند $t = 0$ كانت 8 cm وكان الجُسَيم في حالة سكون.

20. كتلة مُعلَّقة بطرف نابض رأسي، وتخضع لحركة توافقية بسيطة سعتها 2 cm. فإذا استغرقت ثلاث اهتزازات كاملة فترة 4.0 s احسب تسارع الكتلة.

a. عند موضع الاتّزان.

b. عندما تكون الإزاحة عظمى.

الدرس 2-2: الطاقة في الحركة التوافقية البسيطة

21. إذا عَلّقتَ كتلة بنابض رأسيّ وجعلتها تبدأ بالاهتزاز إلى أعلى وأسفل، ستتوقَّف في النهاية عن الاهتزاز. فسِّر ذلك.

22. تخضع كتلة 5 kg لحركة توافُقية بسيطة سعتها 4.0 cm. فإذا كان الزمن الدوري للاهتزاز 1 s. احسب:

a. الطاقة الكلّية للنظام.

b. طاقة الوضع عندما تكون الإزاحة 3 cm؟

c. الطاقة الحركية عندما تكون الإزاحة 3 cm؟

23. صف تأرجح سيّارة إذا كانت الاهتزازات في حالة:

a. تخامُد تحت الحدّ.

b. تخامُد فوق الحدّ.

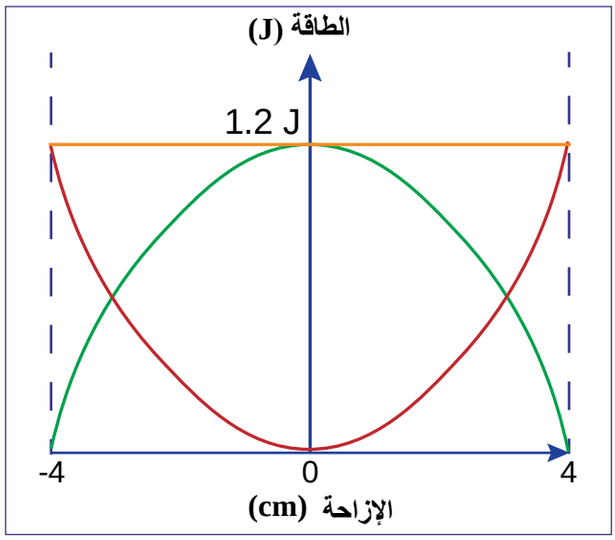
c. تخامُد حرج.

24. هل يمكن أن يكون هناك اهتزاز غير مُتخامِد كليًّا؟

25. اشرح كيف تُقلِّل مقاومة الهواء من سعة الحركة التوافقية البسيطة.

26. كيس ملاكمة كتلته 0.65 kg مُعلَّق بسقف. عندما يُلكَم الكيس يتعرَّض لحركة توافقية بسيطة. فإذا كانت الطاقة الميكانيكية الكلّية للاهتزازة 55 J، فكم تبلغ أقصى سرعة لكيس الملاكمة؟

27. يبيّن الرسم البياني المقابل تبادُل الطاقة الحركية وطاقة الوضع لجسم كتلته 0.5 kg يخضع لحركة توافقية بسيطة.



a. ارسم نسخة من الرسم البياني، ودوّن عليها الطاقة الحركية وطاقة الوضع والطاقة الكلية على المنحنى الخاص بكل منها.

b. احسب أقصى سرعة للجسم.

c. كم تبلغ سعة الحركة؟

d. احسب طاقة الوضع عندما تكون الإزاحة 1.00 cm.

e. احسب الطاقة الحركية عندما تكون الإزاحة 1.00 cm.

28. جسم كتلته 2.5 kg يهتز بحركة توافقية بسيطة. يمكن حساب إزاحة الكتلة باستخدام المعادلة الآتية: $x = 0.25 \sin(1.57t)$ (m).

a. احسب سعة الاهتزاز وتردُّده وزمنه الدوري.

b. جد الطاقة الكلّية للكتلة.

c. احسب طاقة الوضع للكتلة عندما تكون الإزاحة 15 cm.

d. احسب الطاقة الحركية للكتلة عندما تكون الإزاحة 15 cm.

29. جسم كُتلته 2 kg مُعلَّق بنابض مُهتزّ ثابته 100 N/m يخضع لحركة توافقية بسيطة. عند اللحظة $t = 1$ s تكون إزاحة الكتلة $x = 0.129$ m وسرعتها $v = 3.415$ m/s.

a. احسب سعة الاهتزاز باستخدام قانون حفظ الطاقة.

b. احسب إزاحة الجسم وسرعته عند $t = 0$ s.

تقويم الوحدة

الدرس 2-3: الاهتزازات القسرية والرنين

30. في خدعة سحرية مشهورة، يستطيع المُغني تحطيم كأس بتوجيه الغناء إليها. فسّر كيف أجرى الخدعة باستخدام التردُّد الطبيعي والرنين.

31. جسمٌ معلَّق بنابض تردُّده الطبيعي 0.9 Hz. إذا غيّرتَ كتلة الجُسم المُهتزّ، ليصبح زمنه الدوري أكبر أربع مرّاتٍ، فكيف يتغيّر تردُّده الطبيعي؟

32. يهتز بندول لمدة دقيقة، ثم تبدأ بدفعه بقوّة دوريّة تردّدها 1.7 Hz. إذا كان التردُّد الطبيعي للبندول 1 Hz، فهل ستزيد دفعتك للبندول طاقته أم تنقصها؟

33. يبلغ الزمن الدوري لشريط مطّاطي يهتزّ عند الرنين 2.5 s. إذا تغيَّر الزمن الدوري إلى 3.7 s واهتزّ الشريط المطاطي عند الرنين، فماذا يحدث للتردُّد الطبيعي؟

34. جسم كتلته 1.6 kg مُعلَّق رأسيًا بنابض ثابته k = 175 N/m، سُحِب بقوة دورية تردُّدها 1.4 Hz. هل يكون النظام في حالة رنين؟

35. يهتزّ بندول طول خيطه L = 0.22 m. يتعرّض البندول لقوة دورية خارجية زمنها الدوري T = 1.3 s. هل تؤدّي القوة المطبقة على البندول إلى رنين؟

مسألة للبحث

استخدم المصادر الأوّلية كالأوراق البحثية ومقاطع الفيديو، كي ترسم مخطّطات للتمييز بين ثلاثة تفسيرات محتملة لانهيار جسر تاكوما نارو، هي: الرنين القسري، ودوامات ستروهال، والرفرفة الهوائية المرنة.

الشكر والتقدير

جميع الرسوم الفنّية الواردة في هذا العمل صمَّمتها شركة تطوير العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات (STEM) في الولايات المتَّحدة الأميركية. وهي وحدها تملك الحق القانوني لإجازة استخدام تلك الرسوم.

يشكر المؤلفون والناشرون المصادر الآتية على السماح لهم باستخدام ملكياتهم الفكرية كما أنهم ممتنون لهم لموافقتهم على نشر الصور.

RonnieChua/Shutterstock; Shyrochenko Aleksandr/Shutterstock; chrisdorney/ Shutterstock; Bobx-73/Shutterstock; Lipskiy/Shutterstock; Naskky/Shutterstock; SoleilC/ Shutterstock; AlexandrN/Shutterstock; Martin Bergsma/Shutterstock; Toa55/Shutterstock; ShadeDesign/Shutterstock; Caterina Belova/Shutterstock; Pavol Kmeto/Shutterstock; A7880S/Shutterstock; Corund/Shutterstock; Shannon Serpette/Shutterstock; agsandrew/ Shutterstock; tankist276/Shutterstock; VectorPot/Shutterstock; Vector Tradition/ Shutterstock; J10/Shutterstock; RomanVanur/Shutterstock; Garen Takessian/Shutterstock; Aldona Griskeviciene/Shutterstock; Fouad A Saad/Shutterstock; hlphoto/Shutterstock; stockcreations/Shutterstock; MAHATHIR MOHD YASIN/Shutterstock; Konoplytska/ Shutterstock; Eric Isselee/Shutterstock; Maksim Safaniuk/Shutterstock; LuYago/ Shutterstock; Daniele Pietrobelli/Shutterstock; Tichr/Shutterstock; Vladislav Havrilov/ Shutterstock; Olga Zinovskaya/Shutterstock; Tatiana Foxy/Shutterstock; 3DSculptor/ Shutterstock; Merlin74/Shutterstock; Eduard Kim/Shutterstock; Vadim Sadovsky/ Shutterstock; Janaka Dharmasena / Shutterstock; Nasky/ Shutterstock; adike/ Shutterstock; Richard Peterson/ Shutterstock; stihii/ Shutterstock; NoPainNoGain/ Shutterstock; Teguh Mujiono/ shutterstock; Improvisor/ Shutterstock; Jose Luis Calvo/ Shutterstock; Rattiya Thongdumhyu/ Shutterstock; Peter Hermes Furian/ Shutterstock; Sebastian Kaulitzki/ Shutterstock; VectorMine/ Shutterstock; bsd/ Shutterstock; Blamb/ Shutterstock; MikeMartin / Shutterstock; Photographee.eu/ Shutterstock; Jason Boyce/ Shutterstock; Maridav Eugene Onischenko/ Shutterstock; CI Photos/ Shutterstock; Sergey Nivens, Vasyl Shulga/ Shutterstock; Sea Wave, Tanya Sid/ Shutterstock; belushi/ Shutterstock; Birger Olovson, Dionisvera/ Shutterstock; sportpoint / Shutterstock; ChrisVanLennepPhoto, Jacob Lund, sattahipbeach,/Shutterstock; Catalin Grigoriu/ Shutterstock; Designua/Shutterstock; Andres Garcia Martin/Shutterstock; Cagla Acikgoz/ Victor Moussa/photoworld; Aleksey Gusev/ Shutterstock; Designua/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; mapichai/Shutterstock; Kitnha/ Elena11 /Shutterstock; dlhca/Shutterstock; ShotStalker/Shutterstock; Sketchart/ Shutterstock; tel52/Robert Adrian Hillman/Shutterstock; rzarek/Imagine Photographer; Tomas Ragina/Shutterstock; Rainer Lesniewski/Shutterstock; Vixit/Shutterstock; Fedor Selivanov/Shutterstock; Phil Emmerson /Shutterstock; stihii/Shutterstock; Fouad A. Saad/ Shutterstock; NASA images/Shutterstock; NickJulia/Shutterstock; ch123/Shutterstock; Cozine/ Suzanne Tucker/ Ayman Haykal /Shutterstock; Robert Adrian Hillman/Shutterstock; Sigur/ SUNISA DAENGAM/Shutterstock; Jeroen Mikkers/ Manamana /Shutterstock; duckeesue /Shutterstock; Thomas C. Altman /Shutterstock; Sara Winter /Shutterstock; MaraZe /Shutterstock; Adwo/ Tomowen Shutterstock; Rosalie Kreulen /Shutterstock; Daniel Carlson /Shutterstock; Filip Fuxa/ Fulcanelli/ Shutterstock; lembi /Shutterstock; stihii /Shutterstock; GracePhotos /Shutterstock; Mega Pixel Shutterstock; Justek16 /Shutterstock; Scottish Traveller /Shutterstock; Lori Bonati /Shutterstock; anek.soowannaphoom / Shutterstock; Lost_in_the_Midwest /Shutterstock; B Calkins /Shutterstock; AlexussK /

Shutterstock; pablofdezr /Shutterstock; fischers /Shutterstock; corbac40 /Shutterstock; CROX /Shutterstock; Africa Studio /Shutterstock; Emre Terim /shutterstock; Volodymyr Goinyk /shutterstock; Johann Helgason /shutterstock; OSweetNature /shutterstock; Kathryn Snoek/ /shutterstock; Thomas C. Altman; MateusandOlivia /shutterstock; Designua / shutterstock; Rainer Lesniewski /shutterstock; Praveen Menon /shutterstock; Mark Hall / shutterstock; Konoplytska /shutterstock; Igor Alexsander /shutterstock; Zoom Team / shutterstock; Turkey Photo /shutterstock; Dexpixel /shutterstock; Dennis O&#39:Hara / shutterstock; Tetyana Dotsenko /shutterstock; Vadim Nefedoff /shutterstock; Designua / shutterstock; Sabelskaya /shutterstock; Rich Carey /shutterstock; Bill McKelvie/shutterstock; Andrey Burmakin/ kuruneko/ ZoranOrcik/shutterstock; Imagesines/shutterstock; Diagram/ shutterstock; HelloRF Zcool/ Andrey Burmakin/shutterstock; Alex Kravtsov/shutterstock; sirtravelalot/shutterstock; Suzanna Tucker/shutterstock; Graph/shutterstock; Gwoeii/ shutterstock; Graph/ Oleksii Sidorov/shutterstock; sizov/ LUKinMEDIA/shutterstock; BUY THIS/shutterstock; Stock image/shutterstock; TLaoPhotography/shutterstock; TASER/ shutterstock; Roger costa morera/shutterstock; Preto Perola/ HomeArt; topimages/NDT/ KKulikov/shutterstock; OSTILL is Franck Camhi/ Wikipedia; Ljupco Smokovski/Alexander Kirch/Stefan Schurr/ Jonah_H/shutterstock; Brocreative/ Motion Arts; Dan Thornberg/ shutterstock; faboi/TASER; Miriam Doerr/shutterstock; Martin Frommherz/shutterstock; Bjoern Wylezich/shutterstock; Inna Bigun/shutterstock; Steven_Mol/shutterstock; goffkein.pro/shutterstock; EugenePut/shutterstock; fotoliza/shutterstock; IDKFA/shutterstock; Yosanon Y/ VarnakovR/shutterstock; Rost9/shutterstock; Tyler Boyes/shutterstock; Dimarion/shutterstock; Maridav/shutterstock; Dmitry Markov152/shutterstock; Charobnica/ Shutterstock; Rvkamalov/Shutterstock; Peter Hermes Furian/Shutterstock; Konstantinks/ Shutterstock; Extender_01/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Miriam Doerr/ Shutterstock; Martin Frommherz/Shutterstock; LuYago/Shutterstock; Orange Deer studio/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.;Olga Popova/Shutterstock; Pavel Sapozhnikov/Shutterstock; VectorMine/Shutterstock; Paramonov Alexander/ Shutterstock;OSweetNature/Shutterstock; Danielz1/Shutterstock; Dafinchi/Shutterstock; Fen Deneyim/Shutterstock; Artskvortsova/Shutterstock; Nasky/Shutterstock; Adam J/ Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Denis Radovanovic/Shutterstock; Ipek Morel/ Shutterstock; Nito/Shutterstock; Geza Farkas/Shutterstock; Albert Russ/Shutterstock; Orange Deer studio/Shutterstock; Everett Collection/Shutterstock; Mega Pixel/ Shutterstock; Ihor Matsiievskyi/Shutterstock; Mahathir Mohd Yasin/Shutterstock; Liveshot/ Shutterstock; MTKang/Shutterstock; Andrey Kozyntsev/Shutterstock; Gab90/Shutterstock; Olga Hofman/Shutterstock; Breck P. Kent/Shutterstock; Beker/Shutterstock; Bob Morse/ Morse Scientific Inc.; Frees/Shutterstock; Concept W/Shutterstock; Volha_A./Shutterstock; Aliona Ursu/Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; John James/Shutterstock; Photo-World/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; LeysanI/Shutterstock; ADA Photo/Shutterstock; Elena Zolotukhina/Shutterstock; Bukhta Yurii/Shutterstock; Edward Olive/Shutterstock; Maxx-Studio/Shutterstock; Peter Sobolev/Shutterstock; LuYago/ Shutterstock; Eduardo Estellez/Shutterstock; Shishir Gautam/Shutterstock; Josep Suria/ Shutterstock; Designua/Shutterstock; Izzmain/Shutterstock; Kiran Paul/Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc.; Sansanorth/Shutterstock; Bjoern Wylezich/Shutterstock; Henri Koskinen/Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; Humdan/Shutterstock; ibreakstock/ Shutterstock; Magnetix/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; EDU WATANABE/ Shutterstock; Kristina Vor/Shutterstock; Wantanddo/Shutterstock;