الفيزياء

البكالوريا المصرية

الجـزء الأول

الصف
11

SPRIX

الفيزياء

البكالوريا المصرية

الصـــف الثـــاني

The International Baccalaureate™

has reviewed the pedagogical and assessment approaches underpinning this textbook.

© 2026 Ministry of Education and Technical Education

All rights reserved.

Copyrights and accountability for the content of this textbook remain with the Ministry of Education and Technical Education.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system,

or transmitted in any form or by any means - electronic, mechanical, photocopying, recording,

or otherwise - without the prior written permission of the copyright holders.

Ministry of Education and Technical Education

New Administrative Capital

Cairo, Egypt

مقدمة

تجسيدًا الرؤية نظام البكالوريا المصرية والتزامها بإعداد متعلمين قادرين على مواكبة متطلبات القرن الحادي والعشرين، يأتي تطوير كتاب الفيزياء للصف الثاني الثانوي ليقدم للطلاب تجربةً تعليمية رصينة، ممتعة، ومحفزة فكريًا. وقد صُمم هذا المنهج لترسيخ الفهم المفاهيمي العميق، وبناء الثقافة العلمية، مع تمكين المتعلمين من تطبيق المعارف والمهارات الفيزيائية في سياقات الحياة الواقعية.

تقوم فلسفة هذا الكتاب على التعلم القائم على الاستقصاء؛ حيث يبني الطلاب فهمهم ذاتيًا عبر الملاحظة، والتساؤل، والبحث، والتفكير المستند إلى الأدلة. وينطلق التعلم من ظواهر حيوية، ومواقف حقيقية، وخبرات استكشافية تستثير الفضول، وتدفع المتعلمين إلى البحث عن تفسيرات علمية للعمليات والأنشطة الفيزيائية في محيطهم. وعبر هذا النهج، يُوجَّه الطلاب لاستكشاف الأنماط، وصياغة التفسيرات، وبناء الاستيعاب العلمي قبل الخوض في المفاهيم والمبادئ والقوانين والنماذج الرسمية.

يعكس تنظيم كل درس تسلسلًا متناغمًا ينطلق من الاستكشاف وصولًا إلى بناء المفهوم وتطبيقه؛ متبعًا في ذلك استراتيجية (**التهيئة – الشرح – حلل – حاول – تمرين**)؛ حيث يُقدَّم للطلاب أولًا سياقات وظواهر ونماذج مختارة بعناية، لربط التعلم الجديد بالمعارف السابقة والخبرات اليومية. وتُشكّل هذه المقدمات الجاذبة حافزًا للاستقصاء، يُحفّز المتعلمين على تحليل الملاحظات، وتفسير الأدلة، وتحديد الأنماط، وصياغة تفسيرات أولية. وتأسيسًا على هذه المرحلة الاستكشافية، يتفاعل الطلاب مع المفاهيم، والمبادئ، والقوانين، والنماذج الفيزيائية الجوهرية التي تفسر تلك الظواهر وتمنحهم إطارًا منظمًا لفهم العالم الطبيعي. وقد نُظّم المحتوى هادفًا إلى ترسيخ **الفهم المفاهيمي العميق عوضًا عن الحفظ التلقيني**، مما يُمكّن المتعلمين من إدراك العلاقات بين المفاهيم، وإقامة روابط وثيقة بين الأفكار، وتطبيق معارفهم بثقة في سياقات جديدة ومبتكرة. وعبر محطتي (جرِّب) و(تمرين)، تُتاح للطلاب فرص حيوية لممارسة ما اكتسبوه وتطبيقه، وصولًا إلى بناء استيعابٍ رصين ومترابط ومتكامل لعلم الكيمياء.

ويتيح هذا الكتاب **مساراتٍ رحبة للتجريب، وحل المشكلات، والاستقصاء المستقل**؛ حيث يُحفَّز الطلاب على اختبار الأفكار، وجمع البيانات وتحليلها، وتقييم الأدلة، والتوصل إلى استنتاجات مدعومة بالأدلة. وعبر هذه الخبرات العملية، يكتسب المتعلمون ثقةً راسخة في توظيف التفكير العلمي، ليتحولوا إلى مشاركين فاعلين في بناء المعرفة، تجاوزًا لنمط التلقّي السلبي للمعلومات.

يتكامل التقييم في عملية التعلم بوصفه أداة للتعلم والتحسين المستمر معًا. وتتيح الدروس محطات متنوعة للتقييم التكويني والختامي، تُمكن الطلاب من رصد تقدمهم، وتحديد مجالات نموهم المعرفي، وإظهار عمق فهمهم. وقد صُممت مهام التقييم بعناية لتُحاكي نمط الأسئلة الاختبارية، مع التركيز على تحفيز مهارات التفكير العليا، والتحليل، وتطبيق المعارف في سياقات جديدة وغير مألوفة.

أُولي اهتمام خاص لإبراز طبيعة العلم بوصفها ركيزةً أساسية للثقافة العلمية؛ حيث تُتاح للطلاب فرص لفهم كيفية توليد المعرفة العلمية، والتحقق من صحتها وتنقيحها، ونقلها داخل الأوساط العلمية. كما يشجع المنهج على تقدير إسهامات العلماء والمبتكرين الذين شكَّلت اكتشافاتهم فهمنا للعالم الفيزيائي وأسهمت في تقدم الإنسانية.

يطوِّر الكتاب بصورة منهجية مهارات عمليات العلم، بدءًا من الملاحظة والقياس والتصنيف مرورًا بالاستدلال، والتنبؤ، والتجريب، وصولًا إلى تفسير البيانات والنمذجة والتواصل العلمي. وتتكامل هذه المهارات ضمن خبرات التعلم؛ لضمان ألّا يقتصر دور الطلاب على استيعاب المعرفة العلمية فحسب، بل يمتد إلى بناء الكفاءات اللازمة للتفكير والممارسة بأسلوب علمي.

وتناغمًا مع تطلعات التعليم المعاصر، يُرسِّخ المنهج أبعاد الوعي العالمي والانفتاح الدولي؛ عبر ربط مفاهيم الفيزياء بالممارسات العلمية العالمية، والابتكارات التقنية، فضلًا عن التحديات البيئية وأهداف التنمية المستدامة. كما يحفز الطلاب على استيعاب الطبيعة المترابطة للمعرفة العلمية، وإدراك الدور المحوري للفيزياء في معالجة القضايا المؤثرة في المجتمعات على المستويات المحلية، والوطنية، والعالمية.

علاوة على ذلك، يستهدف المنهج تنمية التفكير الناقد والإبداعي؛ عبر إشراك الطلاب في تحليل الأدلة، وتقييم التفسيرات البديلة، وابتكار حلول ريادية، وتطبيق المعرفة العلمية في مواجهة تحديات واقعية. كما يُحفَّز المتعلمون على مقاربة المشكلات بمنظور العلماء والفيزيائيين والمهندسين؛ مستندين إلى التفكير المنظومي وهندسة التصميم لاستقصاء الأسئلة وتطوير حلول عملية.

الدمج المتعمد بين مفاهيم الفيزياء وحياة الطلاب وخبراتهم إحدى السمات الجوهرية لهذا الكتاب؛ حيث تُطرح الأفكار العلمية عبر الفصول ضمن سياقات دلالية حيوية، مدعومةً بتطبيقات معاصرة مستمدة من الصناعة، والصحة، والتقنية، والطاقة، والاستدامة، والحياة اليومية. وتعمل هذه الروابط على ترسيخ أهمية الفيزياء في وجدان المتعلمين، بما يُمكِّنهم من تقدير دورها المحوري في فهم العالم من حولهم والارتقاء به.

ومن الأبعاد الجوهرية أيضًا التزام المنهج بتعزيز التعلم التأملي؛ إذ يُحفَّز الطلاب على الانخراط في التقييم الذاتي والتفكير ما وراء المعرفي، مما يُمكِّنهم من رصد مستويات فهمهم، وتقييم استراتيجياتهم الدراسية، وتحمّل مسئولية أكبر تجاه نموهم الأكاديمي. ومن خلال التأمل في محتوى تعلمهم وآلياته، يكتسب الطلاب عادات التعلم المستمر مدى الحياة، ليكونوا قادرين على التكيف مع مختلف التحديات والفرص المستجدة.

في نهاية المطاف، يهدف هذا الكتاب إلى بناء جيلٍ من المتعلمين المثقفين علميًّا، والمسئولين، والمبدعين؛ مزودين بالمعارف، والمهارات، والقيم، والاتجاهات الكفيلة بتحقيق نجاحهم في عالمٍ سريع التغير. ونأمل أن تُلهم هذه الرحلة التعليمية الطلاب لاستكشاف الفيزياء بشغف، والتفكير بمنهجية، والعمل بمسئولية؛ بما يضمن إسهامهم الفاعل في رقيّ المجتمع، ورسم مستقبلٍ مستدامٍ للإنسانية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

يتّبع كل درس نفس التسلسل: الملاحظة، التوقّع (التنبؤ)، القِياس، التسمية.

١ **سؤال الدرس**
الفكرة الكبيرة المطلوب الإجابة عنها

٢ **ستتعلم أن**
أهداف واضحة لهذا الدرس

٣ **الظاهرة — توقّع (تنبأ) أولًا**
شاهدها، ثم اكتب توقعك

٤ **استكشف**
جرِّبها ولاحظ الأنماط

٥ **مثال محلول (لماذا؟)**
طريقة الحل الموضحة مع التعليل

٦ **جرِّب بنفسك**
طبِّق الفكرة بنفسك

٧ **تحقّق من فهمك**
اختبار ذاتي سريع

٨ **تطبيق سريع**
طبِّق الفكرة في سياق جديد

٩ **سؤال ربط**
اربط الأفكار عبر الدرس

١٠ **صندوق المعادلات**
مفتاح المعادلات في لمحة

١١ **طبيعة العلم**
تعرَّف كيف تتطور الأفكار العلمية

١٢ **بأسلوب الامتحان**
طبِّق ما تعلمته في سياق امتحاني

ما الذي يميز هذا الكتاب؟

- إنه لا يكتفي بسرد حقائق الفيزياء — بل يدرِّبك كفيزيائي.
- توقَّع قبل الشرح، ثم اختبر أفكارك في ضوء الأدلة.
- فهم لماذا تعمل كل طريقة، اكتشف المفاهيم الخاطئة، واربط الأفكار عبر الدرس.

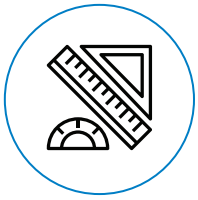
كيف يسير التعلّم هنا؟

١. الملاحظة

يحدث أمر واقعي
ويكسر ما كنت تتوقعه.

٢. التوقّع (التنبؤ)

سجّل توقعك
قبل أن تُكمل القراءة.



٣. القياس

نفّذ ذلك بيديك
واجمع البيانات.

٤. التسمِية

تعلَّم المصطلح (المفهوم)
العلمي بعد بناء الفكرة،
لا بأن تحفظه أولًا.

ابدأ بالظاهرة

دع الأدلة تبني التفسير (الشرح).

الأدوات

١ التقنيات التجريبية
٢ التكنولوجيا
٣ الرياضيات

الاستقصاء

١ الاستكشاف والتصميم
٢ جمع البيانات ومعالجتها
٣ الاستنتاج والتقييم

المحتوى

الفصل الأول - الميكانيكا

١-١ متجهات السرعة والسرعة النسبية ٢
١-٢ حركة المقذوفات الأفقية ٨
١-٣ حركة المقذوفات بزاوية ١٤
١-٤ عزم القوة ٢١
١-٥ اتزان القوى ٢٧
١-٦ القدرة والكفاءة ٣٣
١-٧ كمية التحرك والدفع ٤٠
١-٨ حفظ كمية الحركة ٤٦
١-٩ كمية التحرك والطاقة الميكانيكية ٥٣
١-١٠ الحركة الدائرية المنتظمة والقوة المركزية ٥٩
١-١١ الحركة الدائرية: الأفقية والرأسية ٦٥
١-١٢ قوانين كبلر والجاذبية الكونية ٧٢

الفصل الثانى - الحركة الاهتزازية والموجات

٢-١ الحركة التوافقية البسيطة ٨٠
٢-٢ البندول الزنبركي ٨٦
٢-٣ البندول البسيط ٩٣
٢-٤ الموجات الجيبية ٩٩
٢-٥ تداخل الموجات والموجات الموقوفة ١٠٧
٢-٦ انكسار الموجات ١١٤
٢-٧ تداخل موجات الصوت ١٢١
٢-٨ تأثير دوبلر ١٢٨
٢-٩ انكسار الضوء والانعكاس الكلي الداخلي ١٣٥
٢-١٠ العدسات والصور ١٤٢
٢-١١ تجربة الشق المزدوج ليونج ١٥١

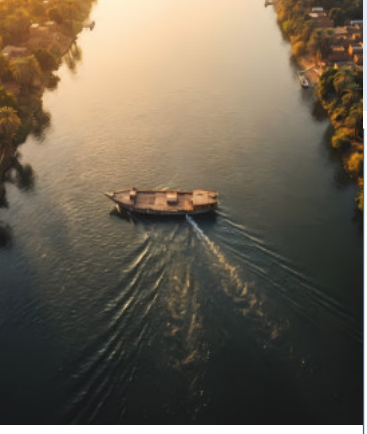
الفصل الأول

الميكانيكا

(القوى والحركة)

أسئلة إرشادية؟

- كيف يمكن وصف أي حركة والتنبؤ بها؟
- بماذا تخبرنا القوى وكمية التحرك عن كيفية تغيّر الحركة؟
- لماذا تظل الطاقة الكلية لنظام معزول محفوظة (ثابتة)؟



الدرس ١-١ — متجهات السرعة والسرعة النسبية

؟ سؤال الدرس:

لماذا ترسو عّبارة موجَّهة مباشرة عبر النيل عند نقطة فى اتجاه مصب النيل بمسافة؟

لماذا يترك المطر المتساقط خطوطًا مائلة على نافذة حافلة متحركة؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

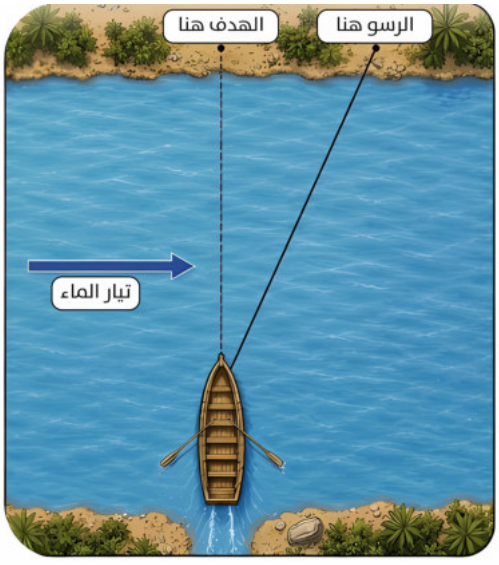
١. **تشرح** كيف تتراكب سرعتان لعمل سرعة محصلة واحدة.

٢. **تحسب** المركبتين المتعامدتين لسرعة ما وتعيد تركيبهما.

٣. **تحدّد** سرعة جسم كما يراها مراقب متحرك

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

شكل (1.1.1)



شكل (2.1.1)

توجِّه عبّارة النيل مقدمتها مباشرة نحو نقطة الرسو على الضفة المقابلة. لا يتغيّر أداء المحرك (الموتور) أبدًا، ولا تنحرف المقدمة أبدا — ومع ذلك ترسو العبّارة عند نقطة أسفل مصب النهر بمسافة عن الهدف الذي توجّهت إليه. وفي صباح نفس اليوم، وأنت في الأتوبيس، يسقط المطر رأسيًّا تمامًا، لكن الخطوط التي يتركها على نافذتك تكون مائلة رغم ذلك.

مُلاحظتان كل يوم، ومبدأ واحد كامن وراءهما.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) مع عدم تغيير (ثبات) اعدادات محرك العبّارة أبدًا. إذا أصبح تيار النهر أسرع، فهل سيستغرق العبور زمنًا أطول أم نفس الزمن أم زمنًا أقصر؟

(ب) من داخل الأتوبيس (الحافلة) المتحرك، هل الخطوط المائلة للمطر قادمة من أمام الأتوبيس أم من خلفه؟

حقيقة أساسية:

المثلثات القائمة:

$c^2 = a^2 + b^2$

تمثل متجهات السرعة المتعامدة بيانيا مثلث قائم الزاوية

استكشف — ارسم عملية العبور

ما ستفعله: تقيس أطوالًا وتحدد نمطًا.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات): • ورقة مقاس A4 • مسطرة • قلم • قلم رصاص

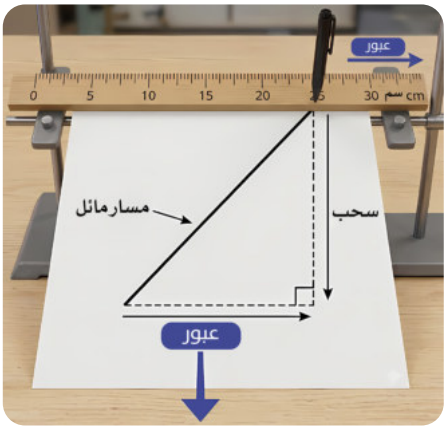
شكل (3.1.1)

ملاحظة القياس:
تحرّكوا ببطء، واستخدموا إشارة مشتركة واحدة، وثّقوا النمط العام أكثر من مرة بالتجربة (المحاولة) الواحدة.

الخطوات:

١ يُمسك الزميل (أ) الورقة مسطّحة تحت المسطرة. عند الإشارة المتفق عليها، يسحب (أ) الورقة في خط مستقيم نحو صدره – بزاوية قائمة على المسطرة – بسرعة بطيئة ومنتظمة.

٢ في التوقيت نفسه، يحرِّك الزميل (ب) القلم على طول المسطرة بسرعة بطيئة ومنتظمة، ويقوم بالرسم طوال الوقت.



شكل (4.1.1)

٣ توقفا معًا. قيسا المسافة التي تحركها القلم على طول المسطرة (مسافة **العبور**) والمسافة التي سُحبت بها الورقة (مسافة **السحب**). ثم قيسا طول المسار المائل المتروك على الورقة.

٤ كرّرا التجربة مرتين أخريين: مرة بسحب الورقة أسرع، ومرة بتحريك القلم أسرع.

المحاولة	العبور(a) (cm)	السحب (b) (cm)	المسار المائل المقاس (c) (cm)	$\sqrt{(\text{العبور})^2 + (\text{السحب})^2}$ (cm)
١				
٢ (سحب الورقة أسرع)				
٣ (تحريك القلم أسرع)				

حلّل ما جمعته:

(أ) قارن بين العمودين الأخيرين، محاولة بمحاولة. ما النمط الذي توضحه الأرقام ؟

(ب) يتحرك القلم على طول المسطرة فقط، بينما تُسحب الورقة في خط مستقيم لأسفل. كيف تتراكب هاتان الحركتين لتنتجا المسار المائل؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تحرّك قلم الحبر على طول المسطرة فقط، ومع ذلك جاء مساره على الورقة مائلًا. و دائمًا ما يتطابق طول المسار المائل المقاس مع القيمة $\sqrt{(\text{السحب})^2 + (\text{العبور})^2}$ لا مجرد المجموع البسيط (المجموع الجبرى) لمسافتَي العبور والسحب.

ولعلك توقعت أن تتراكب الحركتان بالجمع المباشر لمسافتَي العبور والسحب، لكن تُظهر نتائجك الخاصة بالتجربة خلاف ذلك. والنموذج التالي يفسّر هذه الملاحظات.

السرعة كمية متجهة:

تصف كلمة السرعة (velocity) مقدار سرعة الجسم والاتجاه الذى يتحرك فيه معًا – فهي كمية متجهة تُمثَّل بسهم.

وأحيانًا يكون لجسم واحد مركبتا سرعة: كقارب يدفعه محركه بينما يحمله تيار النهر في الوقت نفسه. عندئذٍ يتراكب السهمان من الرأس إلى الذيل ليكوِّنا سرعة **محصلة واحدة** $\vec{V}$:

$$\vec{V} = \vec{V_1} + \vec{V_2}$$

وهذا هو جمع المتجهات (الجمع الاتجاهي)، وهي عملية هندسية لا حسابية. يجب جمع متجهات السرعة هندسيًّا لإيجاد المحصلة؛ ولا يصح الجمع الجبري البسيط للمقادير إلا عندما تكون المتجهات على استقامة واحدة.

تحليل السرعة إلى المركبتين:

يمكن تحليل أي سرعة إلى مركبتين متعامدتين على أحد المحورين $V_x = V \cos\theta$

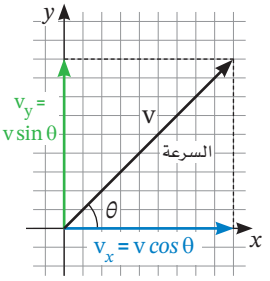
بينما على المحور الآخر $V_y = V \sin\theta$

مركبة العبور وحدها تحدد زمن العبور، بينما تحدد المركبة الطولية مقدار الانجراف مع مجرى النهر.

تعامل مع كل محور على حدة، ثم أعد التركيب باستخدام $V = \sqrt{(V_x)^2 + (V_y)^2}$

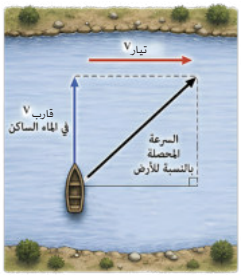
نموذج المثلث القائم (مثلث المتجهات)

طريقة الرأس إلى الذيل



السرعة هي كمية متجهة

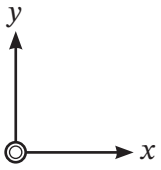
منظر علوي للنهر

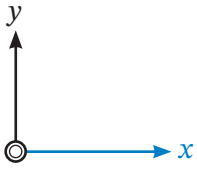


شكل (5.1.1)

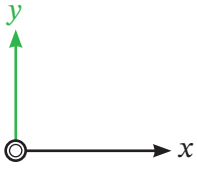
مصطلح:

السرعة المحصلة: متجه السرعة الواحد الذي له المسار نفسه لمتجهي سرعة مُركَّبين معًا.





المركبة الأفقية (x)



المركبة الرأسية (y)

نقطة

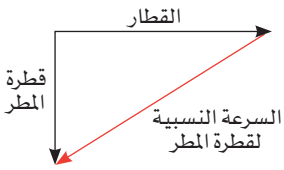
- لتكن V_1 [م/ث] سرعة قارب في مياه ساكنة، وV_2 [م/ث] سرعة التيار؛ وتكون سرعة القارب بالنسبة للضفة هي $V = V_1 + V_2$، حيث يتم دمج المتجهات هندسياً وليس مجرد جمع مقاديرها. تُسمى السرعة V "**السرعة المحصلة**" لـ V_1 وV_2، وتُعرف عملية إيجادها بـ "**جمع السرعات**". وفي المقابل، يمكن تحليل V إلى V_1 وV_2، وتُسمى هذه العملية "**تحليل السرعة إلى مركبات**".
- يتم تحليل V إلى مركبتين متعامدتين في اتجاهي **المحورين** x وy. إذا كانت V هي المقدار، وθ هي الزاوية بين V ومحور x، فإن: $Vx = V \cos\theta$، و$Vy = V \sin\theta$، و$V = \sqrt{(V_x^2 + V_y^2)}$. وتُعطى إشارة موجبة أو سالبة لمقدار كل مركبة للدلالة على اتجاهها على طول محور الإحداثيات.
- لتكن V_A سرعة الجسم A، وV_B سرعة الجسم B. وتكون سرعة B كما يراها A – أي السرعة النسبية لـ B بالنسبة لـ A – هي $V_{AB} = V_B - V_A$ (أي سرعة الجسم المرصود مطروحاً منها سرعة المراقب).

صندوق المعادلات:

مركبتا السرعة	$v_x = v\cos\theta$ $v_y = v\sin\theta$	مقدار السرعة المحصلة	$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$

ماذا يرى المراقب المتحرك؟

الآن اعتبر أن مراقبًا على متن جسم متحرك. فكما تُرى الأمور من القطار A، تختلف السرعة المقاسة بمقدار سرعة المراقب. والسرعة النسبية لـ B بالنسبة إلى A هي سرعة B مطروحًا منها سرعة A، $\vec{v}_{AB} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$ أي سرعة الجسم المُراقَب مطروحًا منها سرعة المراقِب. ويُرسم كلا السهمين من نقطة أصل مشتركة. فالمطر في إطار الأرض يسقط رأسيًّا تمامًا، لكن بطرح السرعة الخاصة بالقطار المتحرك من سرعة سقوط المطر، يميل سهم الفرق إلى الخلف.



شكل (7.1.1)

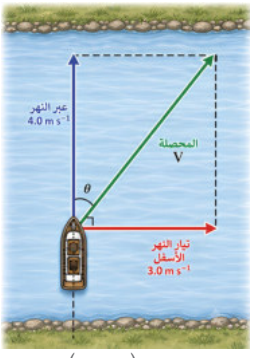
صندوق المعادلات:

السرعة النسبية لـ B بالنسبة إلى A	$\vec{v}_{AB} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$

مثال محلول:

الموقف:	قارب سرعته في الماء الساكن $4.0\ m\,s^{-1}$، بحيث يتحرك في نهر مستقيم سرعة تياره $3.0\ m\,s^{-1}$. حيث تتجه مقدمة القارب بشكل عمودي على ضفة النهر. أوجد سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** سرعة القارب = $4.0\ m\,s^{-1}$ وسرعة تيار النهر = $3.0\ m\,s^{-1}$ (عمودية عليها). **المطلوب:** سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر.
التمثيل:	ارسم مثلث متجهات قائم الزاوية، ضلعاه القائمان سرعة القارب $(4.0\ m\,s^{-1})$ وسرعة تيار النهر $(3.0\ m\,s^{-1})$ ويمثّل وتره سرعة القارب المحصلة.
الاستراتيجية:	حلِّل السرعة إلى اتجاهين متعامدين على المحورين x وy، واحسب مجموع أو فرق كل مركبة باستخدام $v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)2}$
الحل الموضح:	على طول ضفة النهر: $v_x = 3.0\ m\,s^{-1}$ عبر النهر: $v_y = 4.0\ m\,s^{-1}$ $v = \sqrt{3.0^2 + 4.0^2} = \sqrt{25} = 5\ m\,s^{-1}$ إذن، سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر هي $5.0\ m\,s^{-1}$
منطقية الحل:	الناتج $5.0\ m\,s^{-1}$ أكبر من المركبة المفردة الأكبر $(4.0\ m\,s^{-1})$، لكنه أصغر من المجموع الجبري البسيط $(7.0\ m\,s^{-1})$، وهذا متوقَّع لأن مركبتَي السرعة متعامدتان. كما تشكِّل الأرقام 3 – 4 – 5 المثلث القائم الزاوية المعروف.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تكون السرعة المحصلة $(5.0\ m\,s^{-1})$ وليست $(7.0\ m\,s^{-1})$؟

شكل (6.1.1)



شكل (8.1.1)

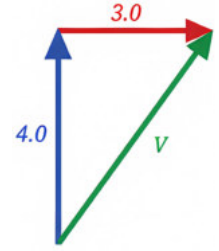
تطبيق سريع:

تتحرك طائرة بسرعة ثابتة مقدارها $60\ m\,s^{-1}$ بزاوية 30° على الأفقي. أوجد الارتفاع الذي تكتسبه خلال 5.0 s

نظرية فيثاغورث:

عندما يكون متجهان عموديين فإن:

$$v = \sqrt{(v_1)^2 + (v_2)^2}$$



حقيقة أساسية:

مثلث 3–4–5:

الضلعان القائمان 4 (عبور) و3 (طول) يُعطيان وترًا مقداره 5.

حاول بنفسك: يبدو المطر المتساقط رأسيًّا لراكب في قطار مترو يعبر جزءًا مكشوفًا بسرعة $5.0\ m\ s^{-1}$ وكأنه يسقط بزاوية 30° عن الرأسي. احسب سرعة قطرات المطر.

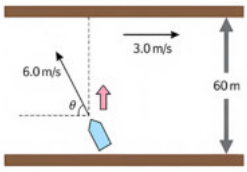
حاول:

(أ) قارب سرعته في الماء الساكن $6.0\ m\ s^{-1}$، بحيث يتحرك في نهر مستقيم سرعة تياره $3.0\ m\ s^{-1}$، حيث تتجه مقدمة القارب بشكل عمودي على ضفة النهر:

(i) أوجد الزاوية θ التي تصنعها المقدمة مع ضفة النهر.

(ii) إذا كان عرض النهر $60\ m$، أوجد الزمن اللازم للعبور.

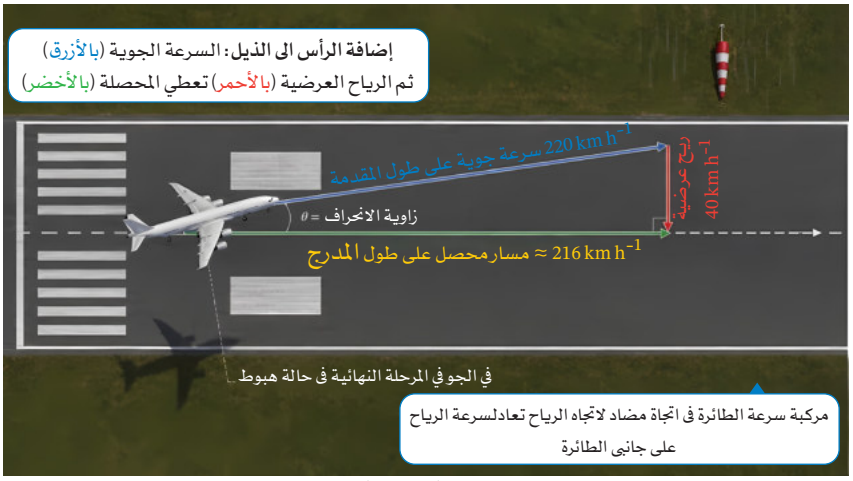
(ب) يركب شخص دراجة متجهًا غربًا بسرعة $5.0\ m\ s^{-1}$، فشعر برياح شمالية سرعتها $5.0\ m\ s^{-1}$. حدد اتجاه الرياح وسرعتها بالنسبة إلى الأرض.



شكل (9.1.1)

في سياق جديد — الهبوط عبر الرياح

في ظهيرة يوم عاصف بمطار برج العرب، تهبّ الرياح عبر المدرج بينما يستعد الطيار للهبوط. لو كانت الطائرة موجهة بشكل مستقيم في اتجاه المدرج، لدفعتها الرياح الجانبية بعيدًا عن خط الوسط – وهي المشكلة التي واجهتها العبارة في سياق آخر. لذا، يوجه الطيار الطائرة قليلاً في اتجاه الرياح. وتعطي سرعة الطائرة في الهواء، من مقدمة الطائرة إلى مؤخرتها، مضافًا إليها سرعة الرياح، نتيجةً موجهةً مباشرةً على طول المدرج. وبسرعة اقتراب تبلغ $220\ km\ h^{-1}$ ورياح جانبية تبلغ $40\ km\ h^{-1}$، تكون (زاوية الانحراف) حوالى 10°.



شكل (10.1.1)

دورك الآن: فسِّر لماذا يجب أن يوجّه الطيار مقدمة الطائرة بعيدًا عن اتجاه المدرج رغم أن الطائرة يجب أن تسير بالضبط على طول المدرج.

طبيعة العلم: الملاحظات — السفينة التي أخفت حركتها

في عام ١٦٣٢، تخيّل جاليليو مقصورة أسفل سطح سفينة تُبحر بهدوء: ماء يتساقط، وأسماك في وعاء، وفراشات تحوم. فلا توجد أي ملاحظة داخل المقصورة تكشف ما إذا كانت السفينة ساكنة أم تتحرك بسرعة منتظمة. فما يقيسه المراقب يعتمد على حركة المراقب نفسه — هو نفس الدرس المستفاد من المطر المتساقط على نافذة الأتوبيس (الحافلة). ولا تكون السرعة ذات معنى إلا عندما يتم تحديد الإطار المرجعي

دورك الآن: اقترح كيف يمكن لمراقبَين دقيقين أن يسجّلا سرعتين مختلفتين لنفس قطرة المطر دون أن يكون أيّ منهما مخطئًا.

نصيحة امتحانية:
السرعة كمية متجهة، تشمل المقدار والاتجاه. لا تكتفِ بكتابة رقم فقط حين يُطلب منك تحديد الاتجاه.

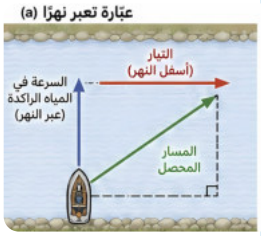
كتيّب البيانات:
التحليل، والجمع، وإعادة التركيب

سؤال الدرس، وإجابته:

لماذا ترسو عبّارة موجَّهة مباشرة عبر النيل عند نقطة في اتجاه مصبها بمسافة؟

لماذا يترك المطر المتساقط خطوطًا مائلة على نافذة حافلة متحركة؟

سرعة العبّارة بالنسبة إلى الأرض هي المحصلة لكلا من سرعتها في الماء الساكن وسرعة تيار النهر، من مقدمة العبارة إلى مؤخرتها. لذا يميل مسارها باتجاه مجرى النهر رغم أن مقدمتها لا تنحرف أبدًا. أما المطر كما يراه راكب الأتوبيس (الحافلة)، فهو سرعة المطر بالنسبة إلى الأرض مطروحًا منها سرعة الأتوبيس – ولذلك فإن المطر الذي يكون عموديًا (رأسيًا) في الإطار المرجعي للأرض يبدو مائلًا للمراقب من داخل الحافلة.

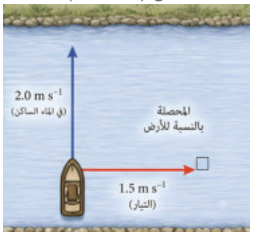


شكل (11.1.1)

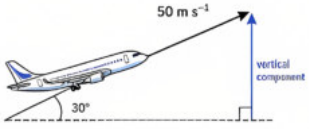
شكل (12.1.1)

تمرين:

(أ) يتحرك قارب سرعته $2.0\ m\,s^{-1}$ في الماء الساكن في نهر مستقيم سرعة تياره $1.5\ m\,s^{-1}$، ومقدمته متجهة بشكل عمودي على ضفة النهر. أوجد سرعة القارب بالنسبة إلى ضفة النهر.



(ب) تصعد طائرة بسرعة ثابتة مقدارها $50\ m\,s^{-1}$ بزاوية 30° الأفقي. أوجد الارتفاع الذي تكتسبه الطائرة خلال 10 s.



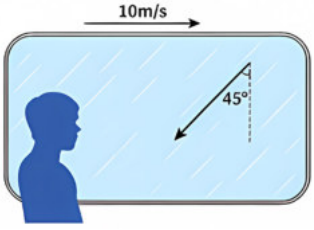
شكل (13.1.1)

(جـ) بالنسبة لمراقب ينظر من نافذة القطار A، الذي يتحرك على مسار أفقي بسرعة $10\ m\,s^{-1}$ يبدو المطر المتساقط رأسيًا وكأنه يسقط بزاوية 45° الرأسي.

(i) أوجد سرعة قطرات المطر.

(ii) بالنسبة لمراقب ينظر من نافذة القطار B الذي يمر بجانب القطار A، يبدو المطر ساقطًا بزاوية 60° الرأسي.

أوجد سرعة القطار B.



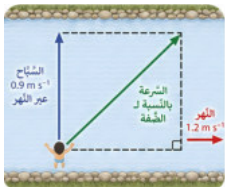
شكل (14.1.1)

(د) تتحرك السيارة A شرقًا بسرعة $20\ m\,s^{-1}$، وتتحرك السيارة B شمالًا بسرعة $20\ m\,s^{-1}$.

أوجد اتجاه ومقدار السرعة النسبية للسيارة B بالنسبة إلى السيارة A.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يجري نهر بسرعة $1.2\ m\,s^{-1}$ موازية لضفتيه. بينما يتّجه سبّاح سرعته في الماء الساكن $0.9\ m\,s^{-1}$ مباشرة عبر النهر. أوجد مقدار سرعة السبّاح بالنسبة إلى الضفة.



شكل (15.1.1)

١-٢ — حركة المقذوفات الأفقية

؟ سؤال الدرس:

عندما تُقذف عملة معدنية أفقيًّا من حافة طاولة بينما تسقط عملة أخرى رأسيا بجانبها في نفس اللحظة ، أيهما تصل الأرض أولًا — وما الذي يحدد النتيجة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** لماذا تحدث الحركتان الأفقية والرأسية للمقذوف بشكل مستقل.

٢. **تحسب** زمن الطيران ومدى مقذوف أُطلق أفقيًّا.

٣. **تحدد** سرعة المقذوف في أي لحظة بإعادة تركيب مركباته.

حقيقة أساسية

$v = v_o + at$

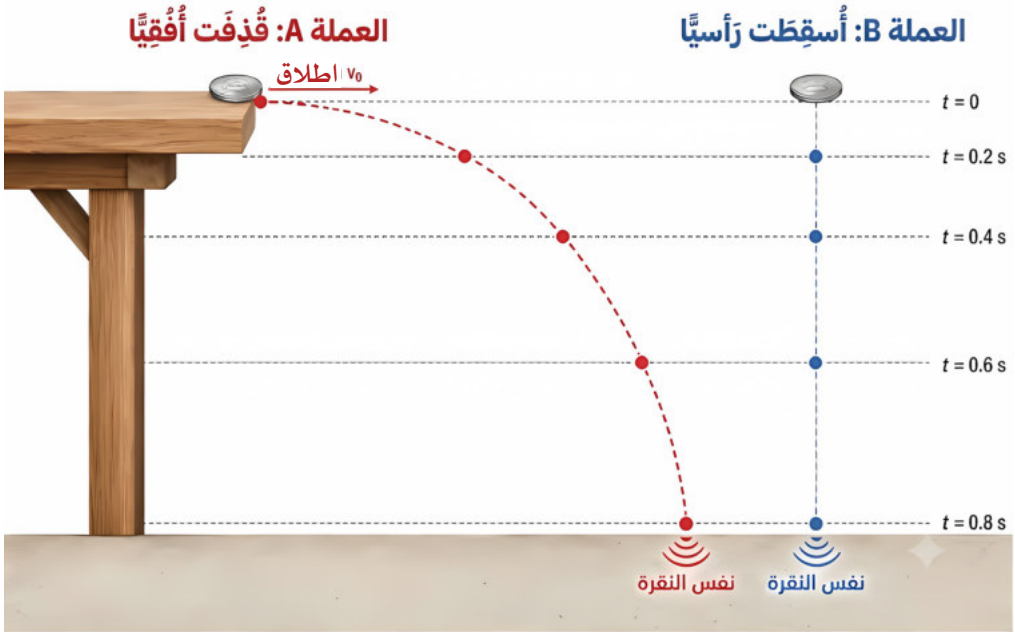
$d = v_o t + \frac{1}{2}at^2$

السقوط الحر:

$v_o = 0$

$a = g = 9.8\,m\,s^{-2}$

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.2.1)

ضع عملتين معدنيتين عند حافة طاولة تمامًا. ادفع إحدى العملتين أفقيًا لتخرج من فوق الطاولة، وفي اللحظة نفسها، دع العملة الأخرى لتسقط بشكل رأسي من فوق الحافة مباشرة. تهبط العملة المقذوفة على مسافة بعيدة، بينما تهبط الأخرى أسفل الحافة تقريبًا.

توقَّع قبل أن تكمل — اكتب توقعك:

(أ) أي العملتين تصل إلى الأرض أولًا – تلك (التي يتم قذفها أفقيًا)، أم التي تركت تسقط رأسيًّا، أم لا تصل أي واحدة منهما؟

(ب) إذا قُذفت العملة الأولى بقوة ضعف السابقة، هل تبقى في الهواء لزمن أطول، أم أقصر، أم نفس الزمن؟

استكشف — قارن حركة عملتين

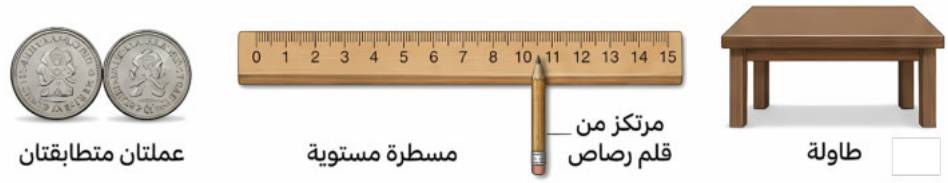
ما ستفعله: تُطلق أجسامًا المألوفة فى حياتنا اليومية، وتقيس زمن حركتها، وتبحث عن نمط.

الزمن: 10 دقائق

ما تحتاجه (الأدوات):

- عملتان متماثلتان
- مسطرة مسطحة
- قلم رصاص
- طاولة

الخطوات:



شكل (2.2.1)

١ ضع مسطرة بلاستيكية مسطحة على طاولة، بحيث يبرز أحد طرفيها خارج الحافة. أمسك المسطرة بإحكام بالقرب من مركزها. ضع عملة على الطاولة بجانب المسطرة وعملة ثانية على الطرف البارز.

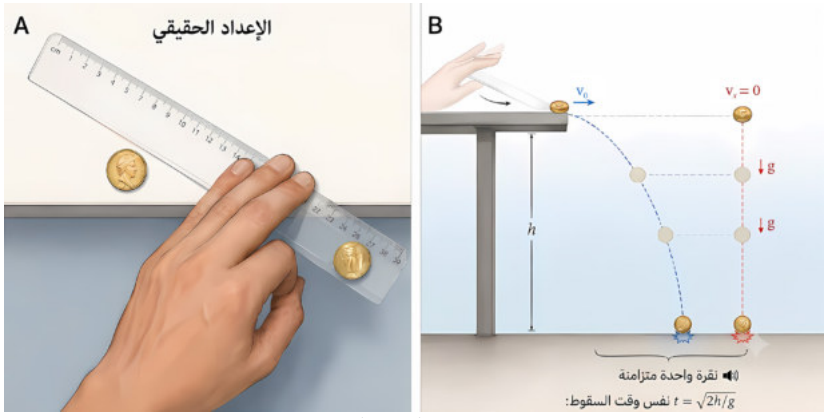
٢ انقر الطرف البارز بشكل حاد. تُطلق المسطرة العملة الأولى أفقيًّا بينما تنسحب من أسفل العملة الثانية، فتسمح لها بالسقوط رأسيًّا. تبدأ العملتان حركتهما في نفس اللحظة تقريبًا.

٣ استمع: هل تسمع ارتطامًا واحدًا بالأرض أم اثنين؟ سجّل ما تسمعه.

٤ كرر التجربة خمس مرات، من نقرة خفيفة إلى أقوى نقرة ممكنة. سجّل كل محاولة.

حقيقة أساسية

تُسمع نقرتان متقاربتان أقل من نحو 20 مللي ثانية وكأنهما صوت واحد. كرر التجربة في غرفة هادئة.



شكل (3.2.1)

المحاولة	قوة النقر (خفيفة ← قوية)	ارتطام واحد أم اثنان؟
١		
٢		
٣		
٤		
٥		

حلّل ما جمعته:

(أ) هل انقسم صوت الارتطام إلى نقرتين مع زيادة قوة النقر؟ ما النمط الذي يُظهره العمود؟

(ب) تقطع العملة المقذوفة مسارًا منحنيًا أطول بكثير، لكن الارتطامين يبقيان متزامنين. لماذا لا يؤدي المسار الأطول إلى زيادة الزمن اللازم للوصول إلى الأرض؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

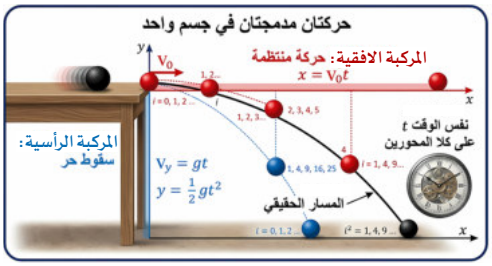
من الملاحظة إلى النموذج

في **نشاط الاستكشاف**، ارتطمت العملتان بالأرض في نفس الوقت تقريبًا، حتى عندما أُعطيت العملة المقذوفة أفقيًا سرعات ابتدائية مختلفة.

وأدت زيادة سرعتها الأفقية إلى زيادة المسافة الأفقية المقطوعة لكنها لم تغيّر زمن سقوطها.

ولعلك توقعت أن العملة الأسرع ستهبط لاحقًا، لكن الملاحظات لم تؤيد هذا التوقع.

والنموذج التالي يفسر هذه الأدلة.



شكل (4.2.1)

حركتان تتجمعان في جسم واحد

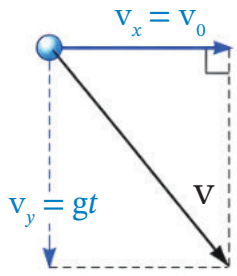
الجسم المقذوف أفقيًا يأخذ مسار قطع مكافئًا وله حركتان مستقلتان. أفقيًا، لا يدفعه أو يجذبه شيء على طول الحركة (بإهمال مقاومة الهواء)، فيحافظ الجسم على **سرعة ثابتة**:

$$x = v_0 t$$

ورأسيًا، تجذبه الجاذبية تمامًا كما تجذب أي جسم يسقط، فيكون الجسم في **سقوط حر**:

$$v = gt \ , \ y = \frac{1}{2} gt^2$$

وتكون الحركتان الأفقية والرأسية (مركبتا الحركة) **مستقلتين** — ولا تشتركان إلا في نفس الزمن t. فالجاذبية تؤثر فقط في الحركة الرأسية، بينما تحدد السرعة الأفقية الابتدائية وحدها المسافة الأفقية المقطوعة.



speed: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

شكل (5.2.1)

القطع المكافئ، وما الذي يحدد الزمن

ينتج عن تراكب مركبتي الحركة مسار على شكل قطع مكافئ. ومع ذلك، يمكن تحليل كل جزء من الحركة على حدة.

تخضع الحركة الرأسية للعلاقة $y = \frac{1}{2} gt^2$

حيث y هي المركبة الرأسية لإزاحة الجسم، ولذلك يُعطى زمن الطيران t بالعلاقة: $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$

وتخضع الحركة الأفقية للعلاقة $x = v_0 t$

حيث x هي المركبة الأفقية لإزاحة الجسم. تُحسب سرعة الجسم المقذوف أفقياً من خلال تراكب مركبتي السرعة الأفقية والرأسية.

نقطة

تُعرف حركة الجسم المقذوف أفقياً باسم «حركة المقذوف الأفقي». وتُحلَّل هذه الحركة إلى مركبتين: أفقية ورأسية، وتُعامل بوصفها حركتين خطيتين مستقلتين تشتركان فقط في الزمن نفسه (t).

المركبتان هما:

المركبة الأفقية: يحافظ الجسم على سرعة ثابتة مقدارها v_0 [م/ث]، لذا فإن المركبة الأفقية للإزاحة x [م] تُعطى بالعلاقة: $x = v_0 t$.

المركبة الرأسية: يخضع الجسم لحالة سقوط حر. فإذا رمزنا لتسارع الجاذبية الأرضية بالرمز g [م/ث^2]، تكون المركبة الرأسية للسرعة $v = gt$، وتكون المركبة الرأسية للإزاحة y [م] هي: $y = \frac{1}{2} gt^2$.

مصطلح

المقذوف: جسم في حالة طيران تخضع حركته بعد إطلاقه لتأثير قوة الجاذبية وحدها (بإهمال مقاومة الهواء).

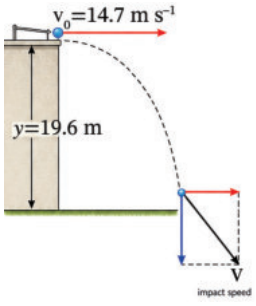
صندوق المعادلات:

الحركة الأفقية (حركة منتظمة)	عندما تكون $a = 0$ فإن	$d = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ $x = v_0 t$
الحركة الرأسية (سقوط حر من السكون)	عندما تكون $u = 0$ فإن	$d = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ $y = \frac{1}{2} gt^2$ ، $v = g t$

الارتفاع يحدد الزمن

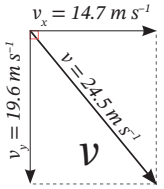
يعتمد الزمن من العلاقة $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$ على الارتفاع الرأسي (y) وعجلة الجاذبية (g) فقط . ولا تعتمد على السرعة الأفقية الابتدائية لأنها لا تؤثر في زمن الطيران. بينما زيادة سرعة الإطلاق (السرعة الأفقية الابتدائية) يؤدى إلى زيادة المسافة الأفقية المقطوعة، لكنها لا تغيّر الزمن اللازم لوصول المقذوف إلى الأرض.

فمثلًا، مضاعفة سرعة الإطلاق الأفقية تضاعف المدى الأفقي بينما يبقى زمن الطيران دون تغيير.



شكل (6.2.1)

مثال محلول:

الموقف:	قُذف جسم أفقيًّا بسرعة 14.7 m/s من ارتفاع 19.6 m فوق الأرض. بافتراض أن عجلة الجاذبية الأرضية تساوي 9.8 m/s^2، أوجد ما يلي: (أ) الزمن اللازم بالثانية ليصل الجسم إلى الأرض. (ب) المدى الأفقي للجسم بالمتر. (جـ) سرعة الجسم قُبيل ارتطامه بالأرض بـ m/s.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ ، $y = 19.6\ m$ ، $v_0 = 14.7\ m\ s^{-1}$ **المطلوب:** t ، x ، v
التمثيل:	**تُقسَّم الحركة إلى جزأين:** - **أفقيًّا:** يتحرك الجسم بسرعة ثابتة $v_0 = 14.7\ m\ s^{-1}$ - **رأسيًّا:** يسقط سقوطًا حرًّا مسافة $y = 19.6$ m تحت تأثير الجاذبية. والمسار قطع مكافئ.
الاستراتيجية:	**أولًا:** استخدم الحركة الرأسية لإيجاد الزمن: $y = \frac{1}{2} g t^2$ **ثانيًا:** استخدم الحركة الأفقية لإيجاد المدى: $x = v_0 t$ **ثالثًا:** أوجد السرعة الرأسية قبل الارتطام باستخدام $v = g\ t$
الحل الموضح:	(أ) بما أن الجسم في سقوط حر رأسيًّا، لتكن t زمن السقوط من مسافة 19.6 m: $y = \frac{1}{2} g t^2$ ، $19.6 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times t^2$ $19.6 = 4.9\ t^2$ ، $t^2 = 4$ $\because t > 0$ ، $\therefore t = 2\ s$ (ب) السرعة الأفقية ثابتة: $x = v_o\ t = 14.7 \times 2.0 = 29.4\ m$ $x \approx 29\ m$ (جـ) عند t = 2.0 s: المركبة الأفقية للسرعة $v_x = v_o = 14.7\ m\ s^{-1}$ والمركبة الرأسية للسرعة $v_y = gt = 9.8 \times 2.0 = 19.6\ m\ s^{-1}$ سرعة الجسم قُبيل الارتطام: $v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$ $v = \sqrt{(14.7)^2 + (19.6)^2} = 24.5\ m.s^{-1}$ $\approx 25\ m$  شكل (7.2.1)
منطقية الحل:	يسقط الجسم مدة 2.0 s، ويقطع مسافة 29.4 m أفقيًّا، وتكون سرعته النهائية أكبر من سرعته الابتدائية لأن الجاذبية تزيد فقط المركبة الرأسية للسرعة.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر النتائج التي حصلت عليها بكلماتك الخاصة.

تطبيق سريع

ينزلق هاتف من حافة نافذة على ارتفاع 4.9 m فوق الرصيف. أوجد زمن سقوطه.

حاول بنفسك:

قُذف جسم أفقيًّا بسرعة 3.0 m/s من ارتفاع معيّن، فيصل إلى الأرض خلال 3.0 s
احسب الارتفاع الابتدائي والمدى الأفقي للجسم.

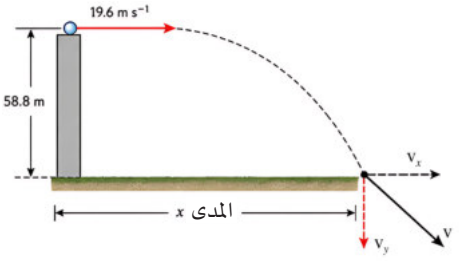
حاول:

(أ) قُذف جسم أفقيًّا بسرعة 19.6 m/s من ارتفاع 58.8 m فوق الأرض.

(i) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) ليصل الجسم إلى الأرض.

(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.

(iii) أوجد سرعة الجسم بـ $m\,s^{-1}$ قبل ارتطامه بالأرض.

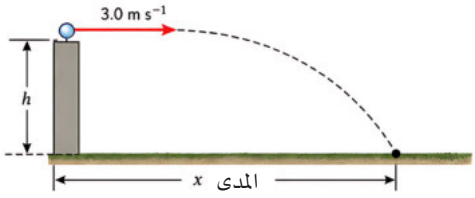


شكل (8.2.1)

(ب) يُقذف جسم أفقيًّا بسرعة $3.0\,m\,s^{-1}$ من ارتفاع معيّن، فيصل إلى الأرض خلال 3.0 s

(i) أوجد الارتفاع الابتدائي للجسم بالمتر.

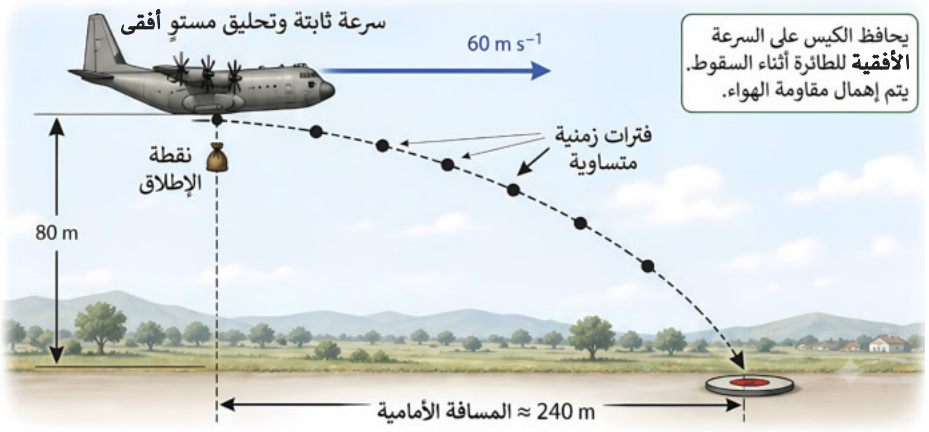
(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.



شكل (9.2.1)

في سياق جديد — الإسقاط قبل الهدف

تحلق طائرة إغاثة أفقيًّا بسرعة $60\,m\,s^{-1}$ على ارتفاع 80 m فوق قرية غمرتها الفيضانات (قرية منكوبة)، تُسقط أكياس الحبوب المعبأة في أكياس مزدوجة التغليف إسقاطًا حرًّا فوق حقل محدَّد بعلامة. لا يستطيع الطيار الإسقاط فوق العلامة بالضبط. يغادر كل كيس الطائرة بسرعتها الأفقية، ويحافظ على هذه السرعة أفقيًّا (بغض النظر عن مقاومة الهواء)، بينما يسقط رأسيًّا تحت تأثير الجاذبية في الوقت نفسه. ويستغرق السقوط $t = \sqrt{\frac{2 \times 80}{9.8}} \approx 4.0$ s، يتحرك خلالها الكيس أفقيًّا تقريبًا مسافة قدرها $60 \times 4.0 \approx 240$ m. لذا يجب أن يحدث الإسقاط قبل نحو 240 m من وصول الطائرة إلى الهدف.



شكل (10.2.1)

إذا حافظت الطائرة على سرعتها الأفقية الثابتة، يهبط الكيس تقريبًا مباشرة أسفل الطائرة — رغم أنه بعيد جدًّا عن نقطة إسقاطه. فسِّر كيف تكون العبارتان صحيحتين في آن واحد.

حقيقة أساسية

الارتفاع يحدد زمن الطيران. والسرعة الأفقية تحدد المدى. تراكب مركبتَي السرعة لإيجاد سرعة الهبوط (السرعة المحصلة).

سؤال للربط

هل يمكن حل مسائل حركة المقذوفات باستخدام الطاقة بدلاً من معادلات الحركة؟

طبيعة العلم: التجارب — إبطاء أثر الجاذبية لتسهيل قياس زمن الحركة

كان السقوط الحر أسرع من أن يتمكن جاليليو من قياس زمنه مباشرة، لذا قام بإبطاء الحركة عن طريق دحرجة كرات على أخاديد ناعمة قليلة الميل (مستوى مائل أملس عديم الاحتكاك)، وقاس زمنها بساعة مائية. وفي كتابه «علمان جديدان» (١٦٣٨)، أثبت أنه بإهمال مقاومة الهواء، فإن الجسم المقذوف يجمع بين الحركة الأفقية المنتظمة والحركة الرأسية تحت تأثير الجاذبية، لتكوّنا معًا مسارًا على شكل قطع مكافئ. وتجربة العملتين التي أجريتها تتبع نفس الفكرة.

دورك الآن: فسِّر لماذا تُعَدّ دراسة الحركة أسفل منحدر أملس عديم الاحتكاك مكافئة فيزيائيًّا لدراسة السقوط الحر الرأسي المباشر.

سؤال الدرس، وإجابته:

شكل (11.2.1)

عندما تُقذف عملة معدنية أفقيًا من فوق طاولة بينما تسقط عملة أخرى بجانبها في نفس اللحظة ، أيهما تصل الأرض أولًا — وما الذي يحدد النتيجة؟

لا تصل أي منهما أولًا، فهما تصلان في نفس اللحظة. فعند إهمال مقاومة الهواء، تحدد الجاذبية الحركة الرأسية بشكل مستقل عن الحركة الأفقية. وزيادة السرعة الأفقية تزيد المسافة الأفقية المقطوعة لكنها لا تغيّر زمن الطيران من نفس الارتفاع.

تمرين:

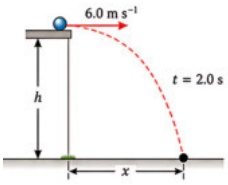
(أ) يُقذف جسم أفقيًا بسرعة $9.8\ m\ s^{-1}$ من ارتفاع $14.7\ m$ فوق الأرض.

(i) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) ليصل الجسم إلى الأرض.

(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.

(iii) أوجد سرعة الجسم بـ $m\ s^{-1}$ قُبيل ارتطامه بالأرض.

(ب) يُقذف جسم أفقيًا بسرعة $6.0\ m\ s^{-1}$ من ارتفاع معيّن، فيصل إلى الأرض خلال $2.0\ s$

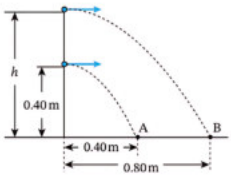


شكل (12.2.1)

(i) أوجد الارتفاع الابتدائي للجسم بالمتر.

(ii) أوجد المدى الأفقي للجسم بالمتر.

(ج) يُقذف جسم أفقيًا من ارتفاع $0.40\ m$ ويهبط عند النقطة A، الواقعة على مسافة أفقية $0.40\ m$



شكل (13.2.1)

(i) أوجد الزمن بالثانية من لحظة القذف حتى وصول الجسم إلى الأرض.

(ii) أوجد السرعة الابتدائية للجسم بـ $m\ s^{-1}$.

(iii) أوجد الارتفاع الابتدائي اللازم بالمتر ليسقط الجسم عند النقطة B، الواقعة على مسافة أفقية $0.80\ m$ ، بافتراض السرعة الابتدائية نفسها.

نصيحة امتحانية

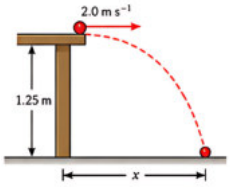
استخدم الزمن غير المقرَّب في الأجزاء القادمة؛ فالتقريب المبكر قد يقلل من دقة الإجابات اللاحقة.

سؤال بأسلوب الامتحان:

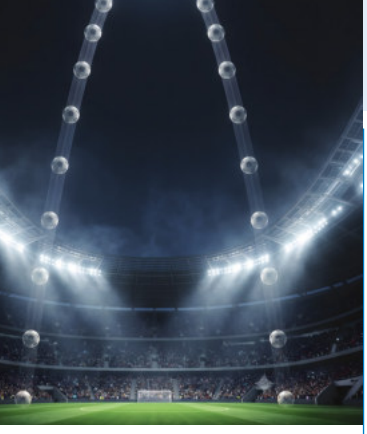
تتدحرج كرة من فوق منضدة أفقية ارتفاعها $1.25\ m$ بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$

(أ) احسب الزمن الذي تستغرقه الكرة لتصل إلى الأرض.

(ب) أوجد المسافة الأفقية من المنضدة التي تهبط عندها الكرة.



شكل (14.2.1)



الدرس ١-٣ — حركة المقذوفات بزاوية

؟ سؤال الدرس:
عند أعلى نقطة في مسار كرة مقذوفة بزاوية، هل تصل الكرة إلى حالة سكون لحظي؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** كيف يمكن تحليل مقذوف أُطلق بزاوية إلى مركبتي حركة مستقلتين.

٢. **تحسب** زمن الطيران وأقصى ارتفاع ومدى مقذوف أُطلق بزاوية.

٣. **تصف** حركة المقذوف عند أعلى نقطة، بما في ذلك مركبتا سرعته الأفقية والرأسية.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

شكل (1.3.1)

شاهد إعادة بالحركة البطيئة لركلة حرة. تغادر الكرة قدم اللاعب، وترتفع، ويبدو أنها تتوقف للحظة عند أعلى نقطة في مسارها قبل أن تهبط نحو المرمى. يصف المعلقون هذا أحيانًا بـ «زمن التحليق». شاهد الإعادة مرة أخرى وركّز على أعلى نقطة: هل تكون الكرة في حالة سكون فعلي في تلك اللحظة؟

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) عند أعلى نقطة، هل تكون سرعة الكرة صفرًا، أم أقل ما يمكن لكنها ليست صفرًا، أم بلا تغيير؟

(ب) تستغرق الكرة 1.8 s للوصول إلى أعلى نقطة — فهل ستستغرق العودة إلى ارتفاع الإطلاق وقتًا أطول، أم أقصر، أم نفس الوقت؟

حقيقة أساسية:
مركبتا الحركة الأفقية والرأسية مستقلتان.

استكشف — التوقف عند أعلى نقطة

ما ستفعله: تستخدم فيديو الحركة البطيئة بهاتفك لتتبع مقذوف أُطلق بزاوية، وتبحث عن أنماط في حركته.

الزمن: 12 دقيقة

شكل (2.3.1)

ما تحتاجه:

- هاتف بخاصية تصوير الحركة البطيئة
- كرة من ورق مجعّد
- باب له حافة رأسية واضحة
- مسطرة

الخطوات:

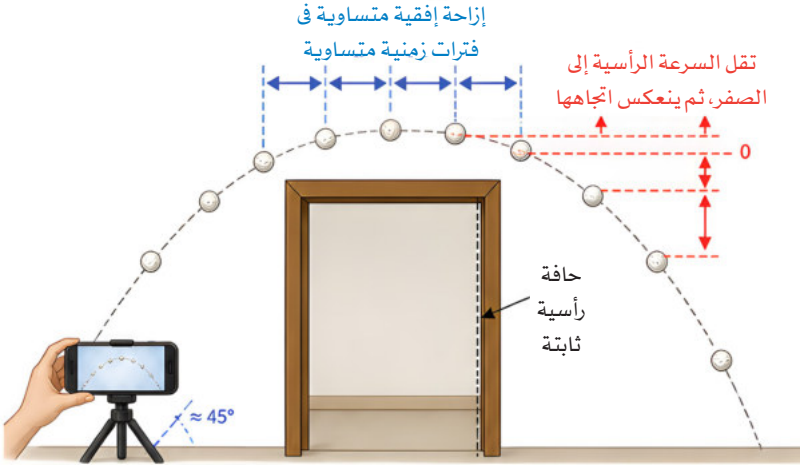
١ اقذف كرة الورق بزاوية 45° تقريبًا بحيث تتبع مسارًا منحنيًا عبر باب مفتوح؛ ويصورها أحد الشريكين بالحركة البطيئة مقابل حافة الباب.

٢ تصفح إطارات الفيديو بالقرب من أعلى نقطة في المسار، إطارًا تلو الآخر. راقب مركبتَي الحركة كلٌّ على حدة مقابل حافة الباب الثابتة.

٣ حدِّد مركز الكرة في كل إطار. وباستخدام المقياس، قِس المسافتين الأفقية والرأسية بين المواضع المتتالية.

٤ كرر التجربة بزاوية إطلاق تميل أكثر على المستوى الأفقي، وسجّل ملاحظاتك.

ملاحظة القياس:
تعني أعداد الإطارات المتساوية فترات زمنية متساوية. قارن الإزاحة الأفقية خلال نفس العدد من الأطارات.



شكل (3.3.1)

زاوية الإطلاق	التباعد الأفقي	التباعد الرأسي
45° تقريبًا		
تميل أكثر على المستوى الأفقي		

حلّل ما جمعته:

(أ) بالنسبة لكل زاوية إطلاق، هل ظلت الإزاحة الأفقية لكل إطار ثابتة تقريبًا في أثناء مرور الكرة بأعلى نقطة؟

(ب) كيف تغيّرت الحركة الرأسية أثناء مرور الكرة بأعلى نقطة؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

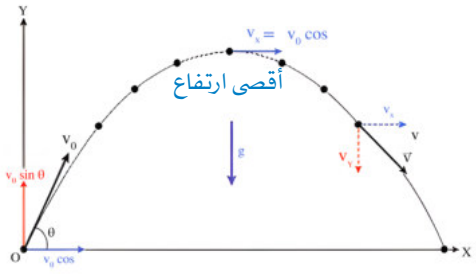
من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، وفي أثناء فحصك الفيديو إطارًا إطارًا، استمرت الكرة في التحرك أفقيًّا عبر أعلى نقطة بخطوات متساوية تقريبًا. في المقابل، تتناقص الإزاحة الرأسية بين الإطارات المتتالية مع ارتفاع الكرة، وتقترب من الصفر عند أعلى نقطة، ثم تعكس اتجاهها وتزداد مع هبوط الكرة. ولعلك توقعت أن تتوقف الكرة تمامًا عند أعلى نقطة، لكن دليل الفيديو يُظهر خلاف ذلك. والنموذج التالي يفسر ملاحظاتك.

تحليل حركة المقذوفات إلى مكوناتها:

حلِّل سرعة الإطلاق V_0 إلى مركبتين: المركبة الأفقية $V_x = V_0 \cos\theta$، وبإهمال مقاومة الهواء تبقى ثابتة. أما المركبة الرأسية، فتسلك الكرة فيها تمامًا سلوك جسم يُقذف إلى أعلى — تبدأ بمقدار $V_y = V_0 \sin\theta$ وتجذبها الجاذبية إلى الأسفل، فتصبح $V_y = V_0 \sin\theta - gt$ و $y = V_0 \sin\theta . t - \frac{1}{2}gt^2$، وتكون الحركتان المكوِّنتان مستقلتين، في نموذج انعدام مقاومة الهواء وثبات الجاذبية فقط، ولا تشتركان إلا في الزمن نفسه t.

وعند أعلى نقطة، تصبح المركبة الرأسية للسرعة وحدها صفرًا. أما المركبة الأفقية فتبقى ثابتة، لذا لا تصل الكرة أبدًا إلى حالة سكون فعلي.



شكل (4.3.1)

زمن الطيران:
الزمن الكلي من الإطلاق إلى الهبوط؛ عند نفس المستوى الافقى يساوي ضعف الزمن اللازم للوصول إلى أعلى نقطة من لحظة الاطلاق.

نقطة

تُعرف حركة الجسم المقذوف بزاوية بالنسبة للأفق باسم "حركة المقذوفات". يتبع الجسم مساراً قطعياً مكافئاً، وتُحلَّل الحركة في المستوى الرأسي إلى مركبتين: أفقية ورأسية، حيث تُعامل كل منهما كحركة خطية مستقلة.

المركبتان هما:

المركبة الأفقية: عند إهمال مقاومة الهواء، يتحرك الجسم بسرعة ثابتة تساوي المركبة الأفقية للسرعة الابتدائية V_0 [م/ث]؛ أي: $Vx = V_0 \cos\theta$ و $x = V_0 \cos\theta \times t$.

الاتجاه الرأسي: يتحرك الجسم حركة مماثلة لحركة القذف الرأسي للأعلى، بتسارع ثابت مقداره (–g) وسرعة رأسية ابتدائية مقدارها $V_0 \sin\theta$؛ وتكون المعادلات: $V_y = V_0 \sin\theta - gt$ و $y = V_0 \sin\theta \times t - \frac{1}{2}gt^2$.

في حالة الانطلاق والهبوط عند الارتفاع نفسه، ومع إهمال مقاومة الهواء، تكون الحركة متماثلة حول الخط الرأسي المار بأعلى نقطة في المسار. فإذا كان الزمن المستغرق للوصول إلى أقصى ارتفاع هو 1.2 ثانية، فإن الزمن الكلي للحركة (زمن التحليق) يكون 2.4 ثانية؛ وإذا كانت المسافة الأفقية المقطوعة حتى الوصول إلى أقصى ارتفاع تساوي 3.0 أمتار، فإن المدى الأفقي الكلي يساوي 6.0 أمتار.

تطبيق سريع:
تُركل كرة بسرعة $14\ m\ s^{-1}$ بزاوية $30°$ الأفقي. أوجد مركبتَي سرعتها الابتدائية.

صندوق المعادلات:

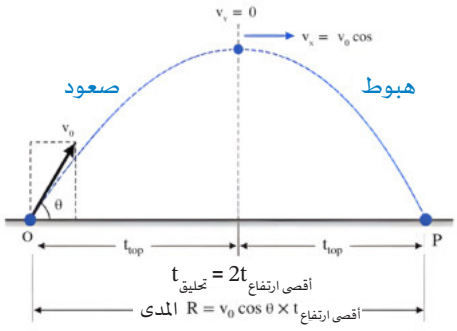
الحركة الأفقية:	$a = 0 \rightarrow x = v_0 \cos\theta . t$
الحركة الرأسية:	$v_y = v_0 \sin\theta - gt$ $v_y = v_0 \sin\theta - gt, y = v_0 \sin\theta . t - \frac{1}{2}gt^2$

التماثل حول أعلى نقطة:

تكون الحركة متماثلة حول أعلى نقطة فقط عندما يكون الإطلاق والهبوط عند الارتفاع نفسه، وبدون مقاومة الهواء. ونتيجة لذلك، يتساوى الزمن اللازم للصعود إلى أقصى ارتفاع مع الزمن اللازم للهبوط إلى مستوى الإطلاق: $t_{\text{تحليق}} = 2t_{\text{أقصى ارتفاع}}$.

وبما أنه لا يوجد تسارع أفقي (بإهمال مقاومة الهواء)، تبقى السرعة الأفقية ثابتة طوال الحركة. لذا يُعطى المدى الأفقي بالعلاقة: $R = v_0 \cos\theta \times t_{\text{تحليق}}$.

فمثلاً، إذا وصل مقذوف إلى أعلى نقطة بعد 1.2 s، فسيعود إلى ارتفاعه الابتدائي بعد 2.4 s. وإذا كانت الإزاحة الأفقية عند أعلى نقطة 3.0 m، فإن المدى الأفقي الكلي يساوي 6.0 m، لأن الحركة الأفقية منتظمة.



شكل (5.3.1)

كُتيّب البيانات:

معادلات الحركة. أولًا، حلِّل حركة المقذوف إلى مركبتين أفقية ورأسية. بإهمال مقاومة الهواء، $u = v_0 \sin\theta$ و $a = -g$.

مثال محلول:

الموقف:	تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة ابتدائية $19.6\ m\ s^{-1}$ بزاوية $30°$ أفقي. وتحدث الحركة تحت تأثير عجلة جاذبية ثابتة $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ بدون مقاومة هواء.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $v_0 = 19.6\ m\ s^{-1}$, $\theta = 30°$, $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ $\sin 30° = \frac{1}{2}$, $\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$ **المطلوب:** (أ) الزمن اللازم للوصول إلى أقصى ارتفاع. (ب) المدى الأفقي.
التمثيل:	حلِّل السرعة إلى مركبتين: $v_{0x} = v_0 \cos\theta$, $v_{0y} = v_0 \sin\theta$ عند أقصى ارتفاع: $v_y = 0$. وحركة المقذوفات متماثلة (زمن الصعود = زمن الهبوط).

الاستراتيجية:	حلِّل السرعة الابتدائية إلى اتجاهين أفقي ورأسي، واستخدم معادلات الحركة بسرعة منتظمة للاتجاه الأفقي، ومعادلات الحركة بعجلة منتظمة إلى أعلى للاتجاه الرأسي.
الحل الموضح:	(أ) عند أقصى ارتفاع: $v_y = 0$ $v_y = v_0 \sin\theta - gt$ $0 = 9.8 - 9.8t$ $9.8t = 9.8$ $t = 1.0\,s$ الزمن الكلي للطيران: $2t = 2.0\,s$. (ب) المدى الأفقي: $R = v_0 \cos\theta \bullet t_{\text{تحليق}}$ $R = 19.6 \bullet \cos 30° \bullet 2.0$ $= 33.948 \approx 34\,m$
منطقية الحل:	الزمن 1.0 s يتفق مع $v_0 y/g$. والمدى $\approx$ 34 m معقول لمقذوف سرعته $19.6\,m\,s^{-1}$ بزاوية 30°. والحركة متماثلة (زمن الصعود = زمن الهبوط).
فسِّرها بنفسك:	لماذا يتيح تحليل الحركة إلى مركبتين أفقية ورأسية تحديد زمن الطيران والمدى كلٌّ على حدة، رغم أن المقذوف يتبع مسارًا منحنيًا؟

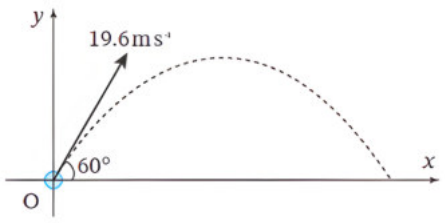
حاول بنفسك: تُركل الكرة نفسها بزاوية أكثر انحدارًا — $19.6\,m\,s^{-1}$ بزاوية 60° عن الأفقي.

احسب زمن الوصول إلى أقصى ارتفاع، وأقصى ارتفاع.

حاول:

تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة $19.6\,m\,s^{-1}$ بزاوية 60° عن الأفقي.

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، بافتراض أن عجلة الجاذبية الأرضية $9.8\,m\,s^{-2}$ وأن $\sqrt{3} \approx 1.73$.



شكل (6.3.1)

(أ) أوجد المركبة الأفقية للسرعة الابتدائية بـ $m\,s^{-1}$.

(ب) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لتصل الكرة إلى أقصى ارتفاع.

(جـ) أوجد أقصى ارتفاع تصل إليه الكرة بالمتر.

(د) أوجد المدى الأفقي بالمتر.

في سياق جديد — الألعاب النارية التي تظل كروية

شكل (7.3.1)

تنفجر قذيفة ألعاب نارية عاليًا فوق المدينة، فتقذف كريات متوهجة تُسمى «شظايا» في جميع الاتجاهات. وتتحرك كل شظية بعد ذلك كمقذوف مستقل، وتخضع لعجلة الجاذبية نفسها (g). وبإهمال مقاومة الهواء، تتبع كل شظية مسارًا قطعًا مكافئًا بالنسبة إلى الأرض. ولأن قوة الجاذبية تكسب كل نجمة العجلة نفسها، فإنها لا تغيّر حركتها بالنسبة لبعضها بعضًا. وإذا قُذفت شظايا بسرعات متساوية تقريبًا في جميع الاتجاهات، فإنها تُشكّل نمطًا كرويًّا تقريبًا يتوسع. ويتبع مركز هذا النمط مسارًا قذفيًا، بينما يكبر حجم النمط لكنه يبقى كرويًا تقريبًا.

فسِّر: لماذا يبقى نمط شظايا المتوسع كرويًّا تقريبًا، رغم أن كل شظية تتبع مسارًا قطعًا مكافئًا.

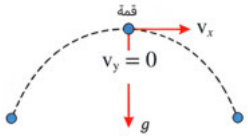
طبيعة العلم: النماذج — واضع النموذج حدَّد حدوده

في كتابه «علمان جديدان» (١٦٣٨)، أثبت جاليليو أن المقذوف يتبع، في غياب مقاومة الهواء، مسارًا على شكل قطع مكافئ. وهذا هو النموذج المستخدم طوال هذا الدرس. لكنه أشار في العمل نفسه إلى أن مقاومة الهواء تجعل المسار الفعلي ينحرف عن القطع المكافئ، خصوصًا عند السرعات العالية. ولكل نموذج فيزيائي نطاق صلاحية، وقد حدَّد جاليليو نفسه حدود نموذج المقذوف الذي طوّره.

دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة من مباراة كرة قدم حقيقية لا يستطيع نموذج القطع المكافئ (بإهمال مقاومة الهواء) تفسيرها.

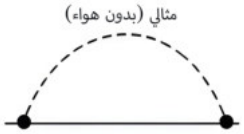
عند أعلى نقطة في مسار كرة تتحرك حركة قذفية بزاوية، هل تكون الكرة في حالة سكون لحظي؟ لا تصل أبدًا إلى سكون فعلي – تصبح المركبة الرأسية للسرعة صفرًا للحظة، بينما تبقى المركبة الأفقية ثابتة (بإهمال مقاومة الهواء). وتبقى العجلة متجهة إلى الأسفل طوال الحركة. ويبدو أن الكرة تتوقف فقط لأن حركتها الرأسية تتباطأ حتى الصفر قبل أن تعكس اتجاهها؛ أما حركتها الأفقية فلا تتوقف أبدًا.

سؤال للربط:
كيف يؤثر مجال الجاذبية في حركة جسم؟



السرعة الرأسية فقط هي الصفر عند القمة؛ تبقى السرعة الأفقية وتبقى التسارع لأسفل.

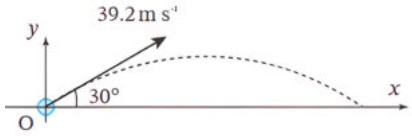
شكل (8.3.1)



شكل (9.3.1)

تمرين:

(أ) تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة $39.2\ m\ s^{-1}$ بزاوية $30°$ أفقي.



شكل (10.3.1)

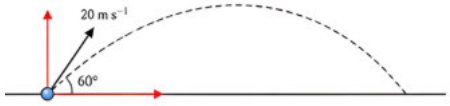
(i) أوجد المركبة الرأسية للسرعة الابتدائية بـ $m\ s^{-1}$.

(ii) أوجد المركبة الأفقية للسرعة بعد $1.5\ s$ بـ $m\ s^{-1}$.

(iii) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لتصل الكرة إلى أقصى ارتفاع.

(iv) أوجد المدى الأفقي بالمتر.

(ب) تُقذف كرة صغيرة من سطح الأرض بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ بزاوية $60°$ أفقي.

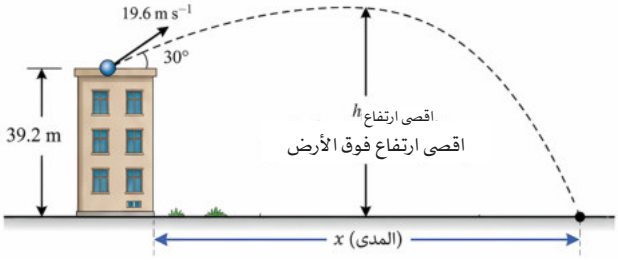


شكل (11.3.1)

(i) أوجد المركبة الأفقية للسرعة الابتدائية بـ $m\ s^{-1}$.

(ii) أوجد المركبة الرأسية للسرعة بعد $0.50\ s$ بـ $m\ s^{-1}$.

(جـ) تُقذف كرة صغيرة من أعلى مبنى ارتفاعه $39.2\ m$ فوق الأرض بسرعة $19.6\ m\ s^{-1}$ بزاوية $30°$ على الأفقي.



شكل (12.3.1)

(i) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لتصل الكرة إلى أقصى ارتفاع.

(ii) أوجد أقصى ارتفاع تصل إليه الكرة فوق الأرض بالمتر.

(iii) أوجد الزمن اللازم (بالثانية) لترتطم الكرة بالأرض.

(iv) أوجد المدى الأفقي بالمتر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يُقذف حجر من مستوى الأرض بسرعة $12\ m\ s^{-1}$ بزاوية $30°$ أفقي.

(أ) اذكر المركبة الأفقية لسرعته عند أعلى نقطة.

(ب) احسب الزمن اللازم لعودة الحجر إلى الأرض.

الدرس ١ـ٤ — عزم القوة

؟ سؤال الدرس:

ادفع بابًا بالقوة نفسها في موضعين مختلفين — لماذا يدور بسهولة عند المقبض لكنه بالكاد يتحرك بالقرب من المفصلة؟

ستتعلم أن

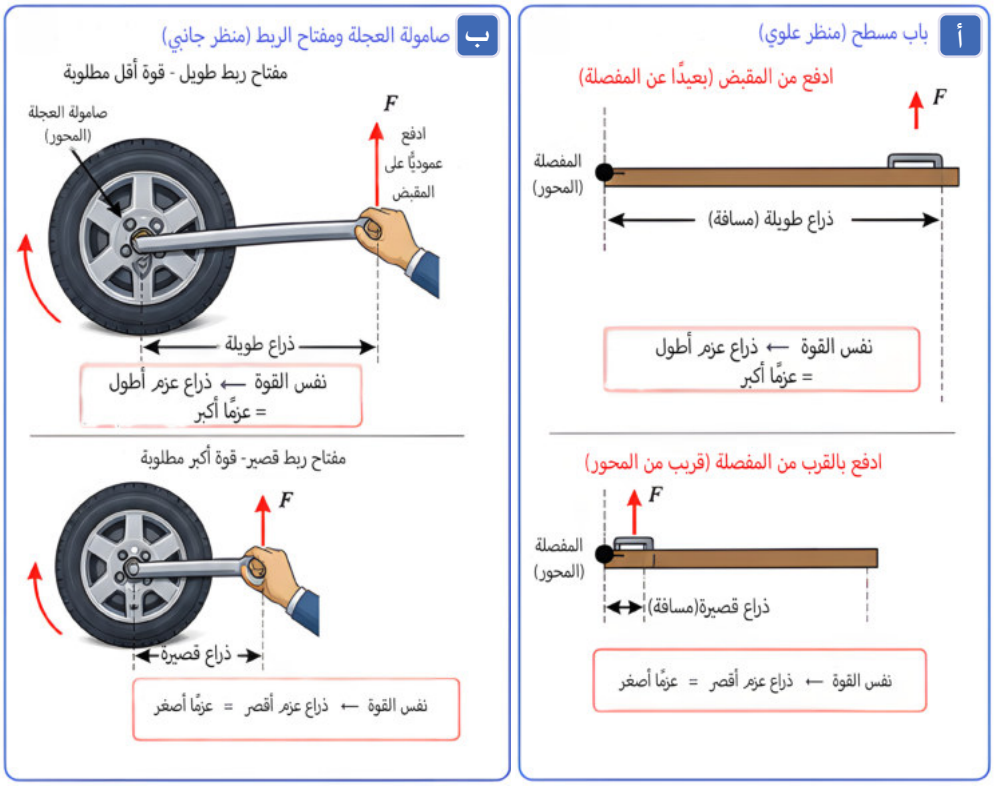
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** عزم القوة بوصفه حاصل ضرب القوة في بُعدها العمودي عن نقطة الدوران.

٢. **تحدد** ذراع العزم العمودي لقوة تؤثر بزاوية.

٣. **تحدد** إشارة العزم (موجبة أو سالبة) بحسب اتجاه دورانه.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر



شكل (1.4.1)

يُفتح الباب بسهولة عند دفعه من المقبض، لكن فتحه يصبح أصعب كثيرًا عند دفعه بالقرب من المفصلة. وبالمثل، يفك مفتاح أطول صامولة عجلة محكمة الشد بسهولة أكبر من مفتاح أقصر. وفي كلتا الحالتين، القوة نفسها — والذي يتغيّر هو البُعد عن نقطة الارتكاز.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل يحدد مقدار القوة وحده تأثيرها الدوراني (العزم)؟

(ب) هل يجعل دفع الباب بالقرب من المفصلة فتحه أسهل لأن القوة أقرب إلى نقطة الارتكاز؟

حقيقة أساسية:

القوة دفع أو جذب له مقدار واتجاه. يركز هذا الدرس على تأثير الدوران (العزم) الذي تحدثه القوة حول نقطة معينة.

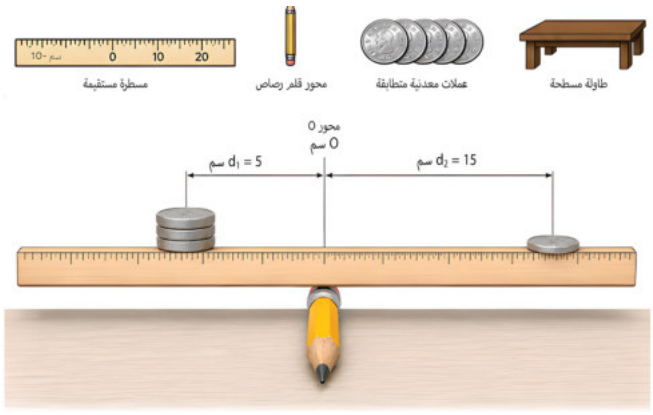
استكشف — دراسة أثر المسافة على الاتزان

ما ستفعله: تضع عملات متطابقة على مسافات مقاسة على جانبَي نقطة ارتكاز، وتسجل الترتيبات التي تُوازن المسطرة.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- مسطرة مستقيمة.
- قلم رصاص ليكون نقطة ارتكاز أسفل منتصف المسطرة.
- مجموعة صغيرة من العملات المتماثلة.
- طاولة (منضدة) مستوية.



شكل (2.4.1)

الخطوات:

١ ضع المسطرة على قلم الرصاص حتى تتوازن أفقيًّا، مع وجود القلم أسفل علامة المنتصف.

٢ ضع عملة واحدة بالقرب من الطرف الأيمن ولاحظ ميل المسطرة نحو الأسفل في ذلك الجانب.

٣ أضف الآن عملات على الجانب الأيسر، بالقرب من القلم، حتى تتوازن المسطرة مجددًا.

٤ عُدّ عدد العملات اللازمة بالقرب من نقطة الارتكاز (n) لتتزن مع العملة الوحيدة البعيدة، وقِس كلا البُعدين.

٥ قرِّب العملة الوحيدة من القلم وكرر عملية الأتزان.

d_1	عدد العملات على الجانب الأيسر	d_2

حلّل ما جمعته:

(أ) عندما وُضعت العملة الوحيدة بعيدًا عن نقطة الارتكاز، هل احتاجت إلى عملات قريبة أكثر أم أقل لتوازنها؟

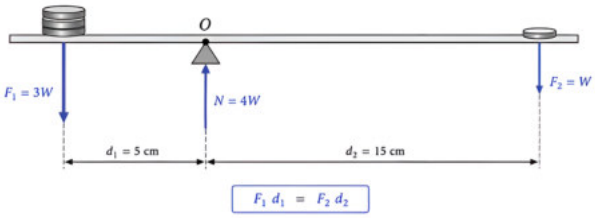
(ب) اضرب عدد العملات على كل جانب في بُعدها عن نقطة الارتكاز. كيف يقارن الناتجان عند الاتزان؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:
اقرأ كل مسافة لأقرب تدريج على المقياس. كرر عملية الأتزان مرتين، فقد يختلف عدد العملات بمقدار واحدة بالقرب من نقطة الاتزان.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، وازنت عدة عملات قريبة من نقطة الارتكاز عملة واحدة بعيدة عنها. وعند الاتزان، تساوى حاصل ضرب القوة في بُعدها على الجانبين، لا القوة وحدها. ولعلك توقعت أن مجموعة العملات الأثقل ستُميل المسطرة إلى الأسفل، لكن الدليل يشير إلى النموذج التالي.



شكل (3.4.1)

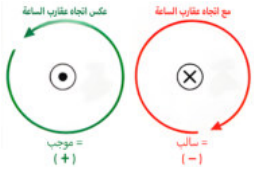
عزم القوة:

لا تكتفي القوة بدفع الجسم – بل يمكنها تدويره حول نقطة. ويعتمد مقدار تأثيرها الدوراني على عاملين معًا: مقدار القوة، والبعد العمودي بين خط عملها ونقطة الارتكاز. ويُسمى هذا التأثير الدوراني عزم القوة حول النقطة. قِس القوة بالنيوتن والبُعد العمودي بالمتر؛ يكون العزم عندئذٍ بوحدة نيوتن.متر (N·m). ولنفس القوة إذا تضاعف البُعد، يتضاعف عزم القوة. وعزم القوة حول نقطة هو حاصل ضرب القوة في البُعد العمودي عن تلك النقطة.

عزم القوة:
التأثير الدوراني للقوة حول نقطة؛ ووحدته نيوتن.متر (N.m).

اتجاه الدوران — إشارة العزم:

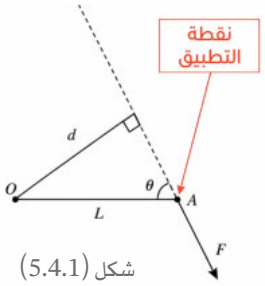
يمكن أن تُحدث القوة عزمًا حول نقطة معيّنة في أحد اتجاهين: عكس اتجاه عقارب الساعة أو معه. ونميّز بين هذين الاتجاهين باستخدام اصطلاح إشارة، بحيث يُعَدّ الدوران عكس عقارب الساعة موجبًا والدوران مع عقارب الساعة سالبًا. لذا يحمل كل عزم مقدارًا وإشارة معًا. فالعزم عكس اتجاه عقارب الساعة **موجب**؛ والعزم مع اتجاه عقارب الساعة **سالب**.



شكل (4.4.1)

عندما تكون القوة مائلة — ذراع العزم:

عندما تكون القوة مائلة، يُحدَّد ذراع العزم بالبُعد العمودي من النقطة O إلى خط عمل القوة. وبالنسبة لقوة F كما في الشكل، وبما أن $d = L \sin\theta$، فإن عزم القوة حول النقطة O يُعطى بالعلاقة $M = FL \sin\theta$.



شكل (5.4.1)

نقطة

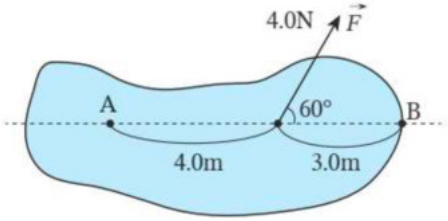
- يُطلق اسم "الجسم الجاسئ" (أو الجسم الصلب) على الجسم الممتد المثالي الذي لا يتشوه عند تسليط قوة عليه. ويتحدد التأثير الدوراني لقوة ما حول نقطة (O) من خلال حاصل ضرب مقدار القوة في المسافة العمودية من النقطة (O) إلى خط عمل القوة؛ ويُعرف هذا المقدار بـ "عزم القوة" حول النقطة (O)، وتُقاس وحدته بالنيوتن–متر (N.m). أما المسافة العمودية من النقطة (O) إلى خط عمل القوة فتُسمى "ذراع العزم".
- إذا رمزنا لعزم القوة بالرمز M [N·m]، ولمقدار القوة بالرمز F [N]، ولطول ذراع العزم بالرمز d [m]، فإن العلاقة تُكتب بالصيغة: $M = Fd$. وفي حالة القوة F التي تؤثر بزاوية معينة، وبما أن $d = L \sin\theta$، فإن العزم حول النقطة (O) يُحسب بالمعادلة: $M = FL \sin\theta$.
- يمكن للقوة أن تُدوِّر الجسم حول نقطة ما إما عكس اتجاه عقارب الساعة أو في اتجاه عقارب الساعة، ويتم التمييز بين هاتين الحالتين بتحديد إشارة موجبة أو سالبة للعزم. وعليه، فإن عزم القوة حول نقطة تقع على خط عملها يساوي صفراً (0 N.m)؛ لأن المسافة العمودية إلى خط عمل القوة في هذه الحالة تساوي صفراً (0 m).

نصيحة امتحانية:
قبل حساب العزم حول النقطة O، ارسم البُعد العمودي من النقطة O إلى خط عمل القوة.

صندوق المعادلات:

عزم القوة:	$M = Fd$
عزم قوة مائلة:	$M = FL\sin\theta$

مثال محلول:



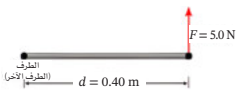
شكل (6.4.1) : يوضح القوة F عند النقطتين A وB

الموقف:	تؤثر قوة مقدارها 4.0 N كما في الشكل. أوجد عزم القوة حول النقطتين A و B. اعتبر عكس اتجاه عقارب الساعة موجبًا، واستخدم $\sqrt{3} \approx 1.7$.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $F = 4.0$ N، الزاوية = 60°، البُعد إلى A = 4.0 m، البُعد إلى B = 3.0 m. **المطلوب:** إيجاد العزم حول A و B.
التمثيل:	العزم = القوة × البُعد العمودي ← $M = F\,d$ حيث $d = L\sin\theta$.
الاستراتيجية:	قِس البُعد من نقطة الدوران إلى نقطة تأثير القوة. أوجد البُعد العمودي. طبِّق $M = FL\sin\theta$. حدِّد الإشارة (+ عكس عقارب الساعة، − مع عقارب الساعة).
الحل الموضح:	(أ) حول النقطة A $M = FL\sin\theta$ $= 4.0 \times 4.0 \times \sin 60°$ $= 13.6 \approx 14$ N m الدوران عكس اتجاه عقارب الساعة ← M = +14 N.m. (ب) حول النقطة B $M = -FL\sin\theta$ $= -4.0 \times 3.0 \times \sin 60°$ $= -10.2 \approx -10$ N m
منطقية الحل:	القوة نفسها تؤثر في الحالتين، لكن النقطة A لها بُعد عمودي أكبر عن خط عمل القوة من النقطة B، لذا يكون مقدار العزم عند A أكبر.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر لماذا يكون مقدار العزم حول النقطة A أكبر من مقداره حول النقطة B، رغم تأثير القوة نفسها.

جرِّب بنفسك: تؤثر القوة نفسها 4.0 N على الجسم نفسه. خذ نقطة C على الخط، على بُعد 2.0 m من نقطة التأثير. تكون القوة مائلة بزاوية 60°، وتُدوِّر الجسم مع اتجاه عقارب الساعة حول C. أوجد عزم القوة حول C بوحدة N.m.

تطبيق سريع:

تؤثر قوة مقدارها 5.0 N عموديًا عند طرف قضيب طوله 0.40 m. احسب العزم حول الطرف الآخر باستخدام $M = Fd$.



شكل (7.4.1)

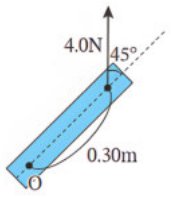
حاول:

لكل شكل، أوجد عزم القوة حول النقطة O. اعتبر اتجاه عكس عقارب الساعة موجبًا.

(أ) تقع O عند الطرف الأيسر لقضيب أفقي. يمتد ذراع أفقي طوله 0.20 m من O. تؤثر قوة مقدارها 3.0 N عموديًا عند الطرف الأيمن. (القوة عمودية على الذراع – وطول الذراع هو البُعد العمودي.)

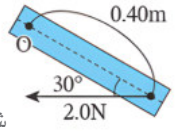
شكل (8.4.1)

(ب) لقضيب مائل نقطة O عند طرفه السفلي. ويميل القضيب بزاوية ما عن الأفقي. تؤثر قوة مقدارها 4.0 N عند الطرف العلوي، على بُعد 0.30 m من O بمحاذاة القضيب. وتؤثر القوة بزاوية 45° على القضيب. أوجد عزم القوة حول النقطة O.



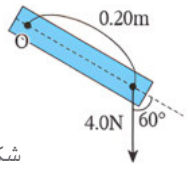
شكل (9.4.1)

(جـ) لقضيب مائل النقطة O عند طرفه العلوي. وتؤثر قوة مقدارها 2.0 N نحو اليسار عند الطرف السفلي، على بُعد 0.40 m من O. وتؤثر القوة بزاوية 30° على القضيب، متجهة نحو اليسار.



شكل (10.4.1)

(د) تقع النقطة O عند الطرف العلوي الأيسر لقضيب. تؤثر قوة مقدارها 4.0 N على بُعد 0.20 m من O، كما في الشكل، وتُدوِّر القضيب مع اتجاه عقارب الساعة.

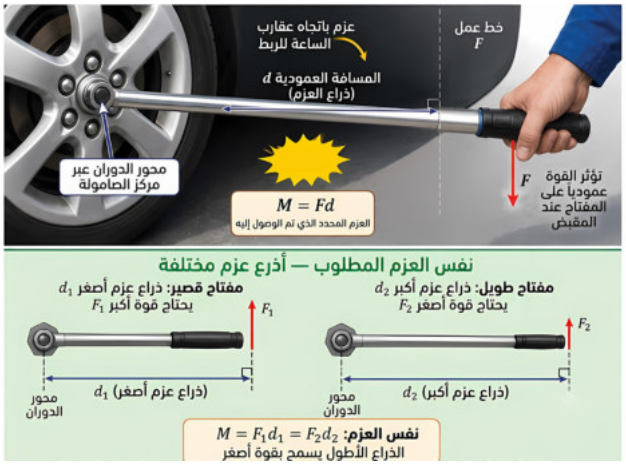


شكل (11.4.1)

ملاحظة عملية:
في (ب) و(جـ) و(د) تكون القوة مائلة، لذا أوجد أولاً ذراع العزم العمودي $d = L \sin\theta$، ثم اضربه في القوة، ثم حدِّد إشارة الدوران.

في سياق ورشة عمل — استخدام مفتاح عزم

في ورشة سيارات أو طائرات، يجب إحكام ربط صامولة العجلة لحدوث تأثير الدوراني الصحيح. فإذا كانت الصامولة غير محكمة الربط، فقد تنفك؛ وإذا كانت محكمة جدًا، فقد يتلف المسمار. لذا يستخدم الفنيون مفتاح عزم: أداة تُصدر صوتًا مسموعًا عند بلوغ عزم القوة المطلوب. وأثناء سحب الفني، يعتمد الأثر الدوراني على القوة والذراع العمودي. ويتيح المفتاح الأطول ذراعًا أكبر، فتنتج قوة أصغر نفس العزم. وتُطلَق الصوت عند بلوغ العزم المحدَّد مسبقًا – الذي يُسمى غالبًا عزم الدوران (torque) في السياقات الهندسية – لا عند بلوغ القوة وحدها.

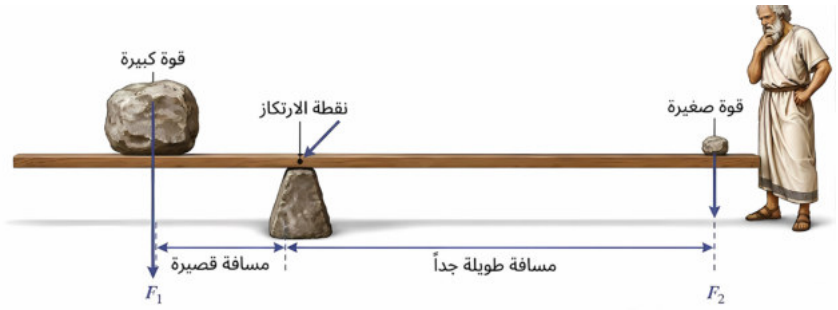


شكل (12.4.1)

حقيقة أساسية:
وحدة العزم هي N.m. ورغم أن لها لأبعاد الأساسية نفسها التي للجول، فإنها لا تُستخدم بالطريقة نفسها: يُستخدم N.m للعزم لقياس تأثير لدوران، بينما يُستخدم J للطاقة لقياس طاقة منقولة أو مخزَّنة.

دورك الآن: فسِّر لماذا يبلغ مفتاح العزم الأطول العزم المحدَّد نفسه بقوة أصغر، مستخدمًا العلاقة: القوة × الذراع العمودية.

طبيعة العلم: أرشميدس والرافعة — قانون الميكانيكا المبكر



قوة × ذراعها = قوة × ذراعها

قوة كبيرة × ذراع قصير = قوة صغيرة × ذراع طويل

شكل (13.4.1)

قبل أكثر من ألفي عام، صاغ أرشميدس قانون الرافعة. فوزن صغير بعيد عن نقطة الارتكاز يمكن أن يوازن وزنًا كبيرًا قريبًا منها، عندما يتساوى حاصل ضرب الوزن في البُعد على الجانبين. ويُروى أنه قال: «أعطوني موضعًا أقف عليه وسأحرك الأرض». وكانت هذه واحدة من أقدم القواعد الكمية الدقيقة المعروفة للتأثير الدوراني للقوة. وهي حاصل الضرب نفسه – القوة × الذراع العمودي – الذي استخدمته طوال هذا الدرس. (المصدر: أرشميدس، في اتزان المستويات، نحو ٢٥٠ ق.م.)

دورك الآن: اقترح أداة يومية واحدة تستخدم مبدأ أرشميدس للرافعة لإنتاج عزم كبير من قوة صغيرة تؤثر بعيدًا عن نقطة الارتكاز.

سؤال الدرس، وإجابته:

ادفع بابًا بالقوة نفسها في موضعين مختلفين – لماذا يدور بسهولة عند المقبض لكنه بالكاد يتحرك بالقرب من المفصلة؟ لأن العزم يعتمد على كل من القوة وبُعدها العمودي عن المفصلة، لا على القوة وحدها. فعند المقبض تكون الذراع طويلة، لذا يكون العزم كبيرًا؛ وبالقرب من المفصلة تكون الذراع صغيرة، لذا يكون العزم صغيرًا. وحدِّد إشارة لهذا العزم – موجب عكس عقارب الساعة، وسالب معها – ويكون العزم موصوفًا بالكامل وفق هذا الاصطلاح المستوي للإشارة. وعزم القوة هو حاصل ضرب القوة في البُعد العمودي من النقطة إلى خط تأثير القوة: أثر بقوة بعيدًا عن نقطة الارتكاز، وستُنتج القوة نفسها عزمًا أكبر بكثير.

شكل (14.4.1)

حقيقة أساسية:

القوة التي يمر خط تأثيرها عند نقطة الارتكاز لها ذراع عمودية تساوي صفرًا، لذا تُنتج عزمًا صفريًّا – فالبعد العمودي، لا القوة وحدها، هو ما يحدد العزم.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تؤثر قوة مقدارها 6,0 N عند طرف رافعة طولها 0,50 m، بزاوية 30° على الرافعة. أوجد عزم القوة حول الطرف الآخر من الرافعة، مع تحديد إشارته للدوران عكس اتجاه عقارب الساعة.

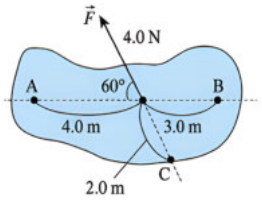
تمرين:

(أ) كما في الشكل على اليسار، عندما تؤثر قوة F مقدارها 4.0 N،

أوجد عزم القوة حول كل نقطة من النقاط التالية.

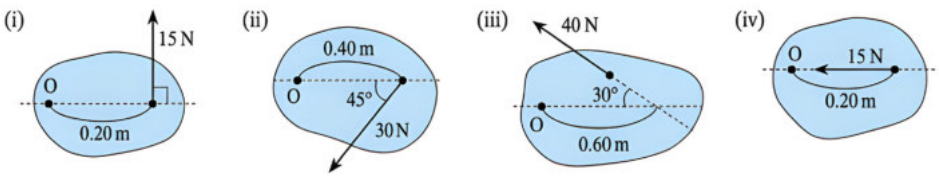
اعتبر اتجاه عكس عقارب الساعة موجبًا.

(i) النقطة A (ii) النقطة B (iii) النقطة C



شكل (15.4.1)

(ب) لكل شكل من الأشكال التالية، أوجد عزم القوة حول النقطة O. اعتبر اتجاه عكس عقارب الساعة موجبًا.



الدرس ١–٥ — اتزان القوى

؟ سؤال الدرس:
يبقى كتاب في حالة سكون على طاولة، وتُعلَّق لافتة متجر بواسطة كابلين – ما الصحيح بشأن القوة المحصلة المؤثرة في كل جسم؟

ستتعلم أن

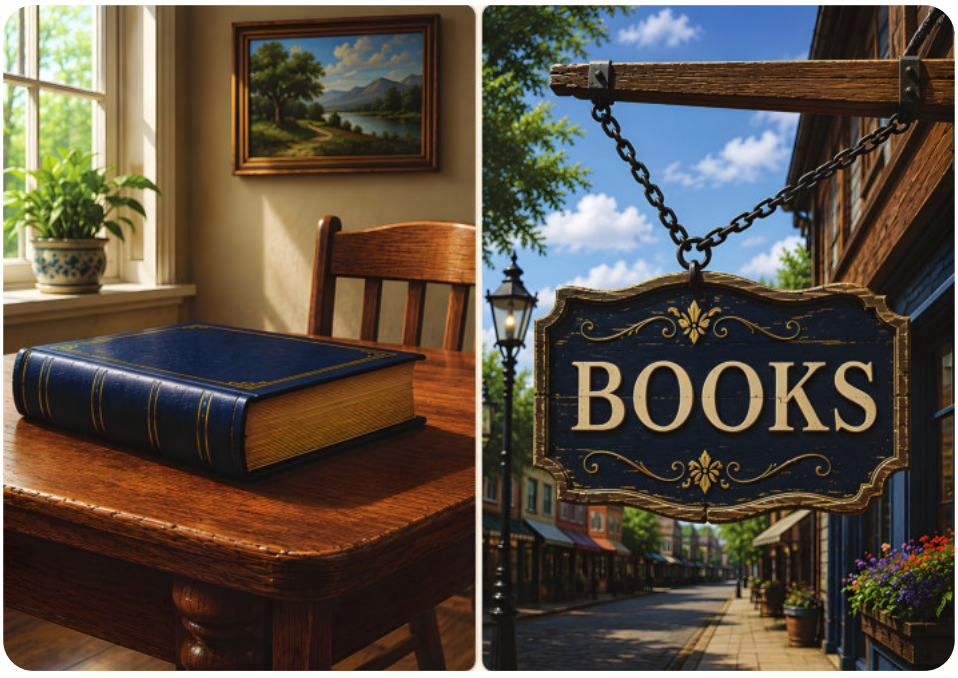
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تذكر** شرط الاتزان لجسم ساكن أو يتحرك بسرعة ثابتة.

٢. **ترسم** مخطط الجسم الحر، بعزل الجسم وتوضيح جميع القوى الخارجية المؤثرة عليه، وتحديد مصدر كل قوة.

٣. **تحدد** قوة مجهولة بتحليل القوى إلى مركبات على طول محورين متعامدين وتطبيق شرط الاتزان على كل محور.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.5.1)

يستقر كتاب ثقيل في حالة سكون على طاولة. يؤثر وزنه إلى أسفل بسبب الجاذبية، ومع ذلك يبقى الكتاب ساكنًا بفعل الطاولة. وبالقرب منه، تتدلى لافتة متجر ثقيلة دون حراك من سلسلتين مائلتين بزاويتين مختلفتين: إحداهما شديدة الانحدار، والأخرى أقرب إلى الأفقي.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) ما القوة، إن وُجدت، التي تؤثر بها الطاولة على الكتاب؟

(ب) تتعلق اللافتة بسلسلتين بزاويتين مختلفتين. أي السلسلتين بها (قوة الشد) الأكبر: الأبعد أم الأقرب إلى المستوى الأفقي؟

استكشف — زيادة الزاوية، وقياس الاستطالة

ما ستفعله: تقيس استطالة شريطين مطاطيين متطابقين مع تغيير زاويتهما مع الرأسي، مع إبقاء الحمل ثابتًا.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- زجاجة ماء مملوءة معلومة الوزن.
- شريطان مطاطيان متطابقان.
- مسطرة.
- منقلة.
- قضيب أفقي أو خطافان يمكن تحريكهما بعيدًا عن بعضهما.

الخطوات:

١ علِّق الزجاجة باستخدام شريطين مطاطيين متطابقين. اضبط الخطافين بحيث يصنع كل شريط زاوية صغيرة مع الرأسي.

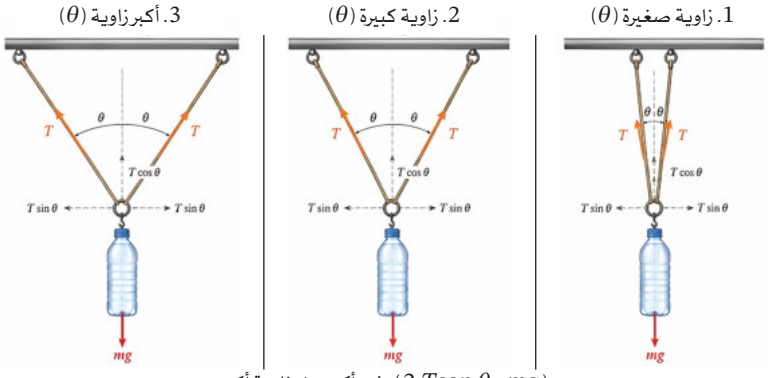
٢ قِس استطالة كل شريط مطاطي، وسجِّل الزاوية التي يصنعها كل شريط مع الرأسي.

٣ أبقِ الزجاجة نفسها، وحرِّك نقطتَي التثبيت العلويتين بعيدًا عن بعضهما بحيث يصنع الشريطان زاوية أكبر مع الرأسي.

٤ قِس استطالة كل شريط مطاطي مرة أخرى.

٥ كرر العملية لعدة زوايا أكبر، دون تجاوز حد المرونة للمطاط.

ملاحظة القياس:
قِس استطالة كل شريط مرتين واحسب المتوسط. استخدم الشريطين نفسيهما طوال التجربة، وقارن متوسط الاستطالة بين الزوايا المختلفة بدلًا من مقارنته بقيمة ثابتة.



(2 $T\cos\theta = mg$) شد أكبر ← زاوية أكبر

شكل (2.5.1)

المحاولة	هل تغيِّر وزن الزجاجة؟	استطالة الشريط الأيمن (cm)	استطالة الشريط الأيسر (cm)	زاوية كل شريط عن الرأسي θ (°)	متوسط الاستطالة (cm)
١					
٢					
٣					

حلِّل ما جمعته:

(أ) مع زيادة الزاوية عن المستوى الرأسي، ماذا حدث لاستطالة كل شريط، وبالتالي للشد فيه؟

(ب) بقي وزن الزجاجة ثابتًا، فلماذا زاد الشد في كل شريط؟ ماذا حدث للمركبتين الأفقيتين لقوتَي الشد مع ابتعاد الشريطين عن بعضهما؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في تجربة الاستكشاف بقي وزن الزجاجة ثابتًا، لكن زيادة الزاوية التي يصنعها كل شريط مطاطي مع الرأسي زادت متوسط استطالة الشريطين، مما يدل على زيادة الشد في كل شريط.

ولعلك توقعت أن يبقى الشد ثابتًا لأن الوزن لم يتغيَّر. لكن الملاحظات تُظهر أن الشد اللازم لدعم الزجاجة لا يعتمد على وزنها فقط، بل أيضًا على الزاوية التي يصنعها كل شريط مع الرأسي. وتؤيد الأدلة النموذج التالي.

اعزل الجسم — ارسم مخطط الجسم الحر:

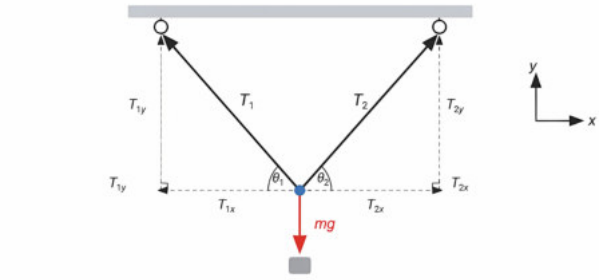
القوة: دفع أو جذب يؤثر به جسم في آخر. ولتحليل جسم، اعزله أولًا عن محيطه. وأظهر فقط القوى الخارجية المؤثرة فيه، لا القوى التي يؤثر بها الجسم في أجسام أخرى. ومثِّل كل قوة بسهم يبيّن اتجاهها، وسمِّها بحسب مصدرها. وحيثما أمكن، ارسم كل قوة عند نقطة تأثيرها. ويُمثَّل وزن الجسم بقوة واحدة تؤثر إلى أسفل عبر مركز ثقله.

يعزل مخطط الجسم الحر جسمًا واحدًا ويُظهر جميع القوى الخارجية المؤثرة فيه، **مع تحديد مصدر كل قوة.**

القوة	الرمز	المصدر والاتجاه
القوة العمودية	F_N	سطح ملامسة؛ تؤثر عموديًّا على السطح. لجسم في اتزان رأسي على سطح أفقي بدون قوى رأسية أخرى، $F_N = mg$.
الشد	T	حبل أو كبل مشدود؛ يؤثر على طول الحبل، متجهًا بعيدًا عن الجسم.
القوة المرنة	$F_e = -kx$	نابض مشدود أو مضغوط؛ يؤثر عكس الإزاحة عن وضع الاتزان. ضمن حد التناسب.
الوزن	$F_g = mg$	مجال الجاذبية للأرض (أو كوكب)؛ يؤثر رأسيًّا إلى أسفل عبر مركز الثقل.

طبّق شرط الاتزان:

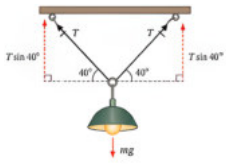
يكون الجسم في اتزان انتقالي عندما يبقى ساكنًا أو يتحرك بسرعة ثابتة؛ ويحدث هذا عندما تكون القوة المحصلة المؤثرة فيه صفرًا: $\Sigma F = 0$. ويمكن تحليل قوة تؤثر بزاوية إلى مركبتين على طول محورين متعامدين. ثم يُطبَّق شرط الاتزان بشكل مستقل على كل محور: $\Sigma F_x = 0$ و $\Sigma F_y = 0$. وبالنسبة للزجاجة المعلَّقة، تتساوى المركبتان الأفقيتان لقوتَي الشد في المقدار وتتعاكسان في الاتجاه، فتُلغي إحداهما الأخرى. وتؤثر المركبتان الرأسيتان إلى أعلى وتتزنان (تتساويان) معًا وزن الزجاجة. لذا تكون القوة المحصلة على الزجاجة صفرًا، وتبقى في حالة اتزان.



شكل (4.5.1)

تطبيق سريع:

يتدلى مصباح كتلته 5.0 kg من كابلين يصنع كل منهما زاوية $40°$ مع الأفقي. بافتراض $g = 9.8\ m\,s^{-2}$، احسب المركبة الرأسية التي يجب أن يوفرها كل كبل.



شكل (3.5.1)

نقطة

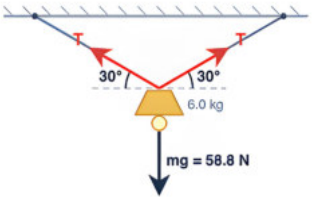
إذا ظل الجسم الجاسئ ساكناً أو تحرك بسرعة ثابتة تحت تأثير عدة قوى، يُقال إنه في حالة اتزان. ولتحليل هذه الحالة، يجب أولاً عزل الجسم عن محيطه ورسم "مخطط الجسم الحر" الذي يوضح فقط القوى الخارجية المؤثرة عليه؛ حيث يُمثَّل وزن الجسم بقوة واحدة تتجه نحو الأسفل وتؤثر عند مركز ثقله.

$F_1 + F_2 + F_3 + \ldots = 0$. وتُصاغ معادلات الاتزان عن طريق تحليل القوى إلى مركباتها على طول محورين متعامدين، لتصبح: $\Sigma Fx = 0$ و $\Sigma Fy = 0$.

صندوق المعادلات:

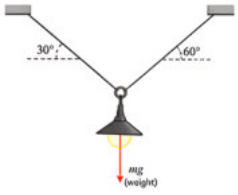
شرط الاتزان الانتقالي:	$\Sigma F = 0$
مركبتا القوة على طول محورين متعامدين:	$\Sigma F_x = 0 \, , \Sigma F_y = 0$

مثال محلول:

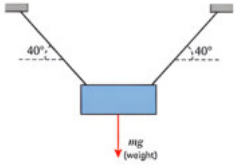
الموقف:	يتدلى مصباح كتلته 6.0 kg في حالة اتزان بواسطة كابلين متطابقين، يصنع كل منهما زاوية 30° مع الأفقي. احسب الشد في كل كابلين.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $m = 6.0\ kg \, , g = 9.8\ m\,s^{-2} \, , \theta = 30°$. **المطلوب:** الشد T في كل كبل.
التمثيل:	 شكل (5.5.1)
الاستراتيجية:	طبِّق شرط الاتزان: $\Sigma F_y = 0$ ، $\Sigma F_x = 0$. استخدم التوازن الرأسي: مجموع المركبتين الرأسيتين للشد يساوي الوزن.
الحل الموضح:	$2T \sin 30° = W$ $T = W/(2 \times \sin 30°)$ $= 58.8/(2 \times 0.5)$ $= 58.8\ N \approx 59\ N$
منطقية الحل:	يساوي الشد في كل كبل وزن المصباح؛ لأنه عند زاوية 30 درجة لا يعمل سوى نصف كل قوة شد عموديًا لدعم المصباح. ، وهذا معقول لأن كل كابلين مائل، ولا يدعم إلا جزءًا من الوزن.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يكون الشد في كل كبل أكبر من نصف وزن المصباح، رغم أن الكابلين يدعمان الحمل بالتساوي؟

جرِّب بنفسك: يتدلى المصباح نفسه الذي كتلته 6.0 kg بواسطة كابلين متطابقين، يصنع كل منهما زاوية 50° مع الأفقي. أوجد الشد في كل كابلين (بالنيوتن)، وقارنه بالقيمة التي حصلت عليها في المثال السابق.

نصيحة امتحانية:
بالنسبة لجسم في اتزان مدعوم بكابلين، حلِّل كلتا قوتَي الشد. تُلغي إحدى مركبتيهما الأفقيتين، وتتجمع مركبتاهما الرأسيتان لتوازنا الوزن.



شكل (6.5.1)



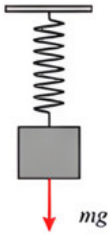
شكل (7.5.1)

حاول:

(أ) يتدلى مصباح شارع فوق ساحة عامة من كابلين يصنعان زاويتين 30° و60° مع الأفقي. كتلة المصباح 20 kg. أوجد الشد في كل كابلين بالنيوتن، واذكر أي الكابلين يحمل الشد الأكبر.

(ب) تتدلى لافتة كتلتها 5.0 kg فوق شارع من كابلين يصنع كل منهما زاوية 40° مع الأفقي. أوجد الشد في كل كابلين بالنيوتن.

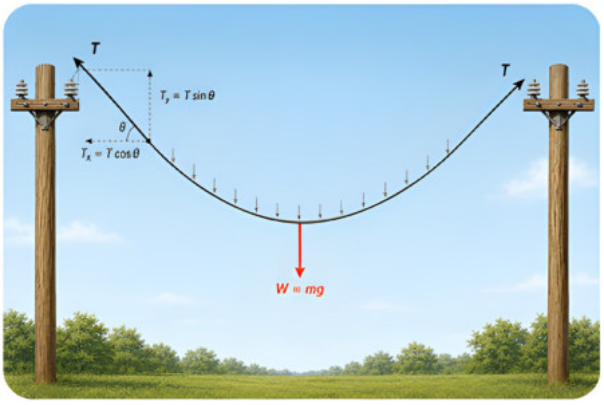
(جـ) تتدلى قطعة معدنية في حالة سكون من نابض زنبرك مقدار الثابت له $200\ N\,m^{-1}$، فيستطيل 0.15 m. أوجد وزن القطعة بالنيوتن.



في سياق جديد — خطوط الكهرباء بين الأعمدة

أثناء السفر على طريق ريفي، قد تلاحظ أن خطوط الكهرباء تتدلى بين الأعمدة بدلًا من أن تكوِّن خطًا أفقيًا مستقيمًا. وينطبق مبدأ الاتزان نفسه على حمل مدعوم (مثبت) بكابلين. ويتوزع الجزء الممتد من السلك بين العمودين بشكل مستمر على طول السلك. وعند نقطتَي التثبيت، المركبتان الرأسيتان لقوتي الشد معًا تعادل (تساوي) الوزن الكلي للكابلين، بينما تتساوى المركبتان الأفقيتان في المقدار وتتعاكسان في الاتجاه. ومع تناقص التدلي، يصبح السلك أقرب إلى الأفقي عند نقطتي الدعم (التثبيت). وعندئذٍ تصبح المركبة الرأسية جزءًا أصغر من قوة الشد، لذا يلزم شد أكبر بكثير لدعم الوزن نفسه. وفي الحالة المثالية لسلك أفقي تمامًا يدعم وزنًا غير صفري، يميل الشد المطلوب إلى ما لا نهاية. لذا تُركَّب خطوط الكهرباء بمقدار محسوب من التدلي (الانحناء في السلك).

سؤال للربط:
كيف تُطبَّق مفاهيم الاتزان والحفظ لفهم المادة والحركة من أصغر ذرة إلى الكون بأسره؟

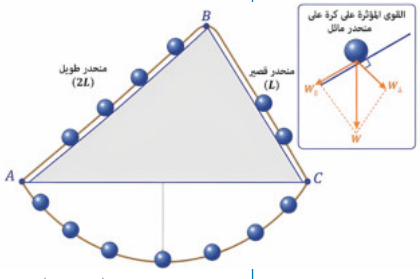


شكل (8.5.1)

دورك الآن: باستخدام المركبات الرأسية، فسِّر لماذا يؤدي تقليل التدلي في خط كهرباء إلى زيادة الشد فيه.

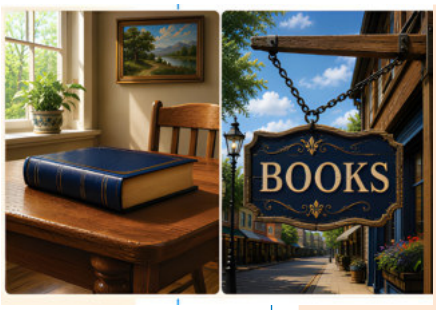
طبيعة العلم: النماذج — قانون اتزان مبكر قبل نيوتن

قبل أن يصوغ نيوتن قوانين الحركة، درس سيمون ستيفن (١٥٨٦) الاتزان على المستويات المائلة باستخدام تجربة فكرية عُرفت بـ «إكليل الكرات». فقد تخيَّل سلسلة مغلقة من كرات متساوية عن بعضهما موضوعة حول مستويين مائلين. وإذا أحدث أحد الجانبين أثرًا دورانيًّا أكبر من الآخر، لتحركت السلسلة باستمرار مع عودتها إلى الترتيب نفسه، منتجة حركة دائمة. واستنتج ستيفن أن الأثرين على المنحدرين يجب أن يتزنا. وساعدت هذه الفكرة على إرساء قانون الاتزان على المستوى المائل، ومبادئ تحليل القوى إلى مركبات.



شكل (9.5.1)

دورك الآن: لماذا استطاع ستيفن أن يثق بهذا الاستنتاج حتى بدون معادلات الحركة الحديثة؟



سؤال الدرس، وإجابته:

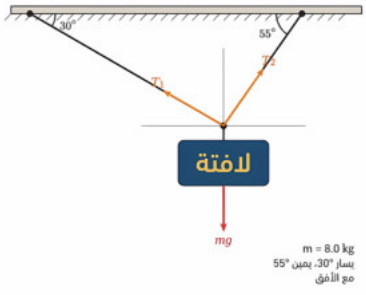
يبقى كتاب في حالة سكون على طاولة، وتُعلَّق لافتة متجر بسلسلتين – ما الصحيح بشأن القوة المحصلة المؤثرة في كل جسم؟ في كلتا الحالتين، يكون الجسمان في اتزان انتقالي، لذا يكون المجموع الجبرى الاتجاهى لجميع القوى المؤثرة في كل جسم صفرًا: $\Sigma F = 0$. فبالنسبة للكتاب، توازن قوة رد الفعل العمودية إلى أعلى وزنه. أما بالنسبة للافتة، فتُلغي إحدى المركبتين الأفقيتين لقوتَي الشد الأخرى، بينما توازن مركبتاهما الرأسيتان معًا وزن اللافتة. ولأن السلسلتين تصنعان زاويتين مختلفتين مع الأفقي، يكون الشدّان غير متساويين عمومًا، وتحمل السلسلة الأكثر انحدارًا الشد الأكبر.

تمرين:

احسب النتيجة إلى أقرب رقمين عشريين؛ خذ $g = 9.8\ m\ s^{-2}$.

(أ) تتدلى لافتة متجر كتلتها 8.0 kg في حالة اتزان من كابلين خفيفين متصلين بعارضة أفقية. يصنع الكابلين الأيسر زاوية 30° مع الأفقي، ويصنع الكابلين الأيمن زاوية 55° مع الأفقي.

أوجد الشد في كل كابلين بالنيوتن، واذكر أي الكابلين يتأثر الشد الأكبر.

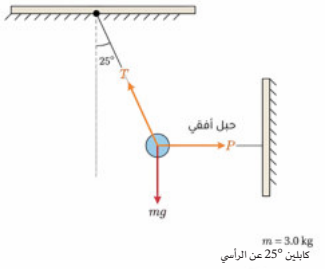


كبلان بزوايا مختلفة – تحليل T_1 و T_2.

شكل (10.5.1)

(ب) يُثبَّت مصباح كتلته 3.0 kg في حالة اتزان بكابلين خفيف مثبَّت في السقف وحبل أفقي خفيف. يصنع الكابلين زاوية 25° مع الرأسي.

أوجد (i) الشد T في الكابلين، (ii) الشد P في الحبل الأفقي، كليهما بالنيوتن.



ثلاث قوى تؤثر على المصباح — توازن المركبات على طول المحورين x و y.

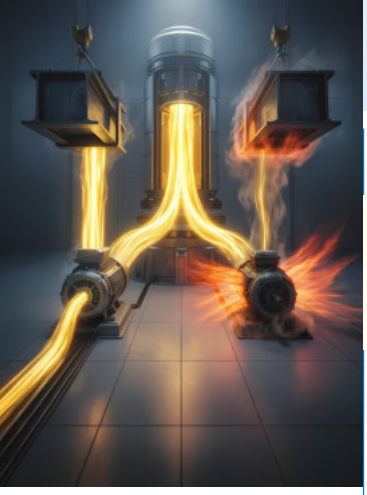
شكل (11.5.1)

(جـ) تتدلى قطعة كتلتها 1.5 kg في حالة اتزان من نابضين خفيفين متطابقين. يصنع كل نابض زاوية 40° مع الرأسي وثابته $60\ N\ m^{-1}$.

أوجد (i) القوة في كل نابض بالنيوتن، (ii) استطالة كل نابض بالمتر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يتدلى مصباح كتلته 6.0 kg في حالة سكون من كابلين يصنعان زاويتين متساويتين مقدارهما 40° مع الأفقي. ارسم مخطط الجسم الحر للمصباح، ثم أوجد الشد في كل كابلين.



الدرس ١-٦ — القدرة والكفاءة

؟ سؤال الدرس:
يرفع مصعدان نفس الحمولة إلى الارتفاع الرأسي نفسه، لكن أحدهما ينهي الرفع في نصف الزمن. هل يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟ وأيهما له القدرة الأكبر؟

ستتعلم أن

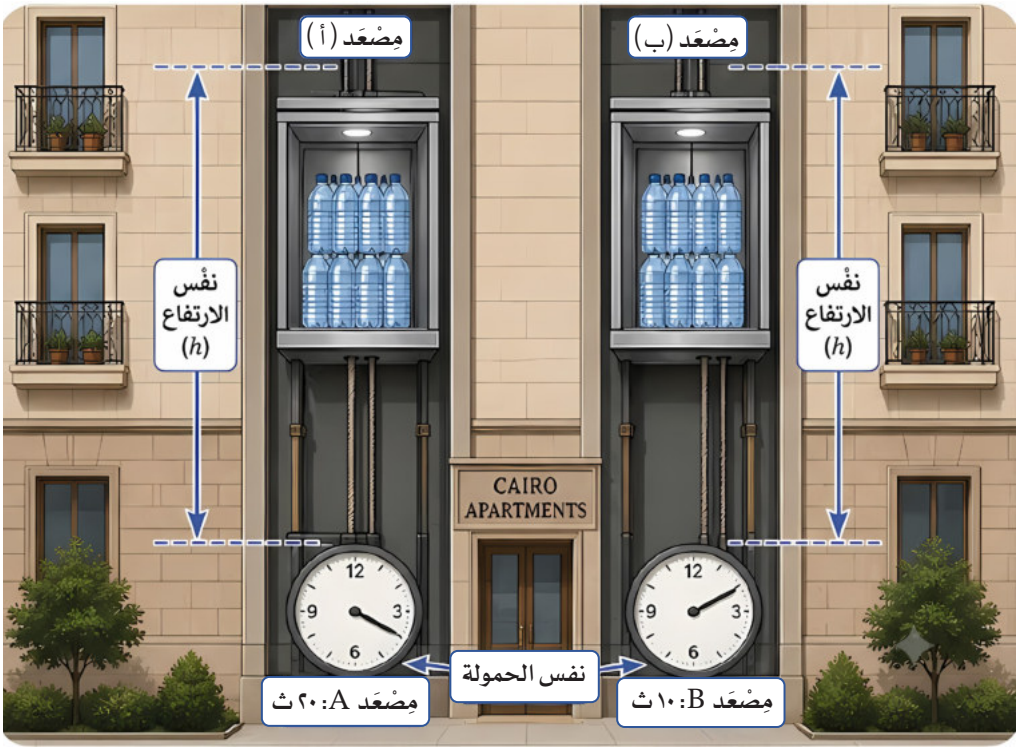
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** قدرة آلة بدلالة الشغل المبذول والزمن المستغرق، أو من القوة والسرعة الثابتة.

٢. **تحدد** كفاءة جهاز بدلالة طاقة الخرج المفيدة وإجمالي طاقة الدخل، معبرًا عنها كنسبة مئوية.

٣. **تفسر** انتقال الطاقة في مخطط سانكي وتحدد أين تتبدد الطاقة المهدرة (المفقودة).

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر



شكل (1.6.1)

يرتفع مصعدان جنبًا إلى جنب في مبنى واحد. يحمل كل منهما الحمل نفسه إلى الطابق نفسه – أي الارتفاع نفسه. يستغرق المصعد (أ) زمن 20 s؛ ويقوم المصعد (ب) بذلك في 10 s، أي في نصف الزمن. يقول بعض الناس أحيانًا إن المصعد الأسرع «يبذل شغلًا أكبر». وقبل أن تكمل، اكتب توقعك: هل يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟ وأيهما له القدرة الأكبر؟

توقّع قبل أن تستمر :

(أ) هل بذل المصعد الأسرع شغلًا مفيدًا أكبر على الحمل، أم بذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟

(ب) يدّعي بائع أن: «المحرك الأكثر قدرة يستهلك طاقة كهربائية أقل». هل يمكن أن يكون هذا صحيحًا؟

حقيقة أساسية:
الشغل: $W = Fd\cos\theta$، لا تبذل القوة شغلًا إلا عندما تُحدث إزاحة في اتجاه القوة أو مركبتها على طول الإزاحة.

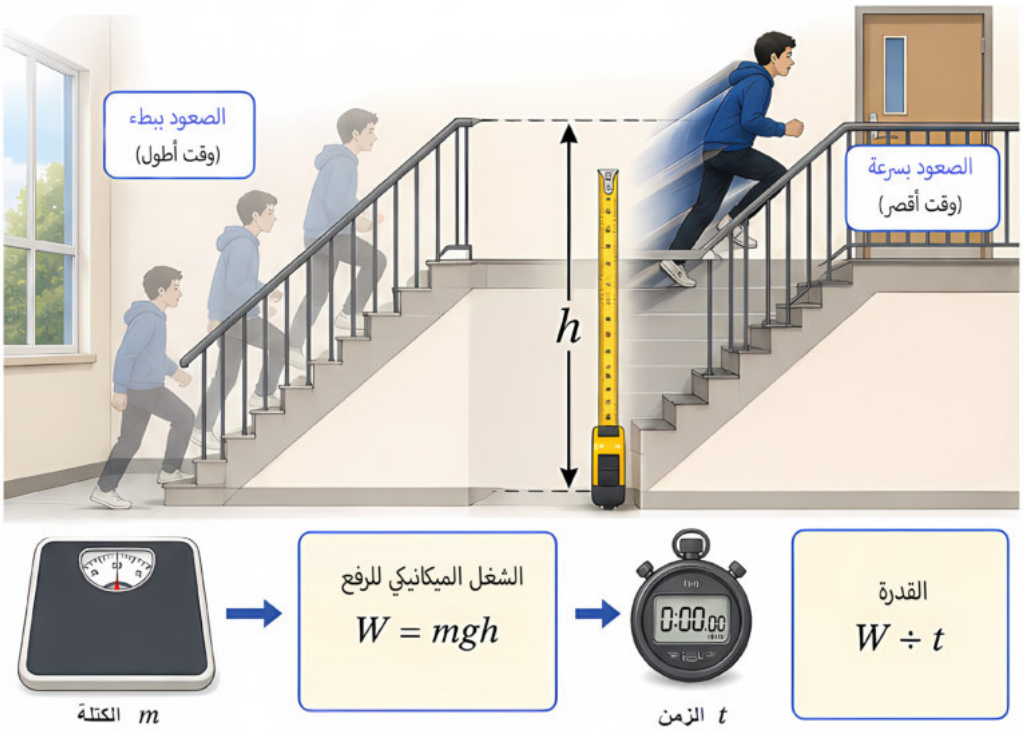
استكشف — اصعد درج المدرسة

ما ستفعله: تستخدم ميزانًا وساعة توقيت لقياس القدرة الناتجة أثناء صعود الدرج.

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- ميزان رقمي
- ساعة توقيت أو مؤقت هاتف
- شريط قياس



شكل (2.6.1)

ملاحظة القياس:
قِس زمن كل صعود مرتين وخذ القيمة المتوسطة. يمكن أن يُدخل زمن رد فعل الإنسان عند بدء ساعة التوقيت وإيقافها عدم يقين مقداره بضعة أعشار من الثانية. ولهذا عدم اليقين أثر مئوي أكبر على الصعود الأسرع لأن زمنه المقاس أقصر.

الخطوات:

١ قِس كتلتك (m) على الميزان وسجِّلها بالكيلوجرام.

٢ قِس الارتفاع الرأسي h لدرجة سلم واحدة، بالمتر — قِس الارتفاع الرأسي، لا طول الدرج.

٣ احسب الشغل المبذول في رفع نفسك: $W = mgh$، بافتراض $g = 9.8\ m\ s^{-2}$.

٤ اصعد الدرج ببطء بينما يقيس زميلك الزمن. سجِّل النتيجة.

٥ كرر الصعود بأسرع ما يمكن بأمان، وسجِّل الزمن الأقصر.

الصعود	الزمن	الشغل المبذول = mgh	الشغل ÷ الزمن
ببطء			
بسرعة			

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل تغيَّر الشغل الذي بذلته بين الصعودين، أم بقي ثابتًا؟ فسِّر إجابتك.

(ب) في أي صعود كانت قيمة (W/t) أكبر؟ وماذا تمثِّل هذه الكمية؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، بذلت مقدار الشغل نفسه في كلا الصعودين — إذ كانت كتلتك والارتفاع الرأسي ثابتين، فتظل ($W = mgh$) دون تغيير. ومع ذلك، فإن عملية الصعود الأسرع أنجزت هذا العمل في وقت أقل، وبالتالي أسفرت عن قيمة أكبر لـ(W/t). وتسمى هذه الكمية «القدرة المتوسطة».

القدرة — مدى سرعة أداء الشغل:

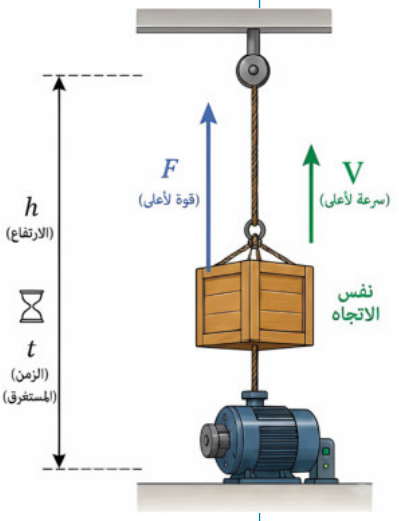
يمكن لآلتين أن تؤديا مقدار الشغل نفسه أو تنقلا مقدار الطاقة نفسه، لكن في زمنين مختلفين. وتقيس القدرة هذا الفرق: فهي معدل أداء الشغل أو نقل الطاقة. والقدرة المتوسطة خلال فترة زمنية هي: $P = \Delta W/\Delta t$ ، حيث ΔW هو الشغل المبذول خلال تلك الفترة.

ووحدة القدرة هي الوات: $1\,W = 1\,J\,s^{-1}$

ويُعبَّر عن القيم الأكبر للقدرة عادةً بالكيلووات والميجاوات:

$1\,kW = 10^3\,W$ ، $1\,MW = 10^6\,W$

ويمكن أيضًا ربط القدرة بالقوة F والسرعة. فإذا أثرت قوة في اتجاه الحركة: $P = Fv$



شكل (3.6.1)

نقطة

- يُحسب الشغل (W) الذي تبذله قوة ثابتة (F) [بوحدة نيوتن] لتحريك جسم مسافة إزاحة (s) [بوحدة متر] وبزاوية (θ) بالنسبة لاتجاه القوة، بالمعادلة: $W = Fs\cos\theta$. يمكن لآلتين إنجاز نفس القدر من الشغل ولكن في فترات زمنية مختلفة؛ ويُطلق على معدل إنجاز الشغل اسم "القدرة المتوسطة" (P)، وتُحسب – عند إنجاز شغل مقداره ΔW [بوحدة جول] خلال زمن Δt [بوحدة ثانية] – بالمعادلة: $P = \Delta W/\Delta t$، وتُقاس بوحدة الوات (W).
- عندما تؤثر قوة (F) على جسم يتحرك بسرعة (v) [بوحدة متر/ثانية]، يمكن التعبير عن القدرة دون الحاجة لقياس الزمن بالمعادلة: $P = Fv\cos\theta$.
- تُعرف النسبة المئوية للطاقة الداخلة التي تخرج من الجهاز كطاقة مفيدة (مخرجات مفيدة) باسم "الكفاءة". وهي كمية بلا أبعاد، يُعبّر عنها بقيمة عشرية تتراوح بين 0 و1 أو كنسبة مئوية.

لا يوجد جهاز حقيقي كفاءته 100%؛ إذ يُفقد دائمًا جزء من الطاقة الداخلة وينتقل إلى الوسط المحيط كطاقة مهدرة.

يوضح "مخطط سانكي" (Sankey diagram) هذا الأمر بصرياً؛ حيث يتفرع سهم الطاقة الداخلة إلى مسارين: أحدهما يمثل الطاقة المفيدة الخارجة والآخر يمثل الطاقة المهدرة، وتتناسب مساحة كل سهم مع مقدار الطاقة التي يحملها.

صندوق المعادلات:

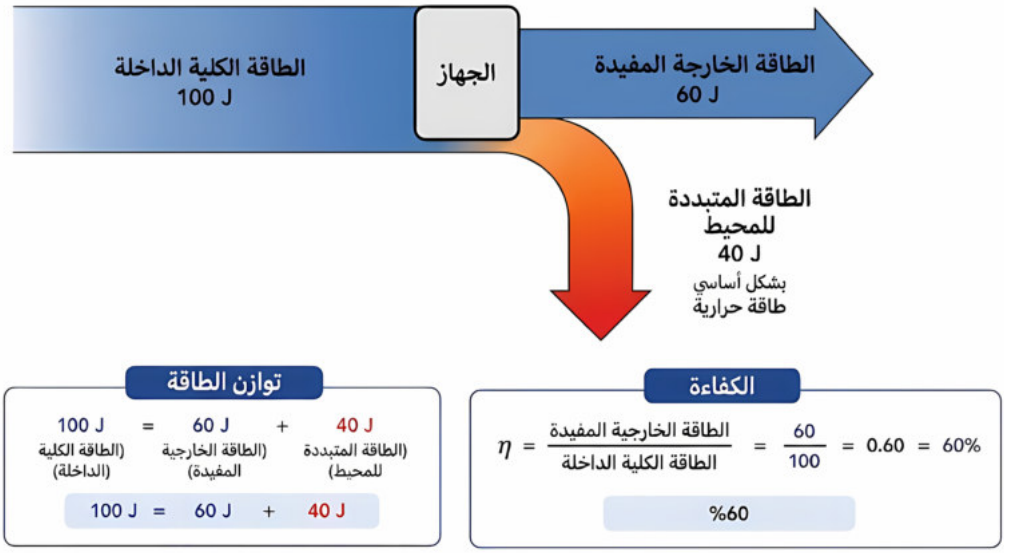
الشغل:	$W = F\,d\cos\theta$
القدرة، من الشغل والزمن:	$P = \Delta W/\Delta t$
القدرة، من القوة والسرعة:	$P = Fv\cos\theta$

تطبيق سريع:

يحمل مصعد مكتبي حمولته إلى أعلى بسرعة ثابتة $2.5\,m\,s^{-1}$ ويؤثر المحرك إلى أعلى بقوة 7840N

الكفاءة كمية بلا أبعاد، يُعبَّر عنها بصورة عشرية (بين 0 و1) أو كنسبة مئوية. ولا يوجد جهاز حقيقي كفاءته 100% لأن بعض طاقة الدخل تُفقَد دائمًا إلى المحيط.

يمثِّل مخطط سانكي انتقالات الطاقة بصريًّا: ينقسم سهم دخل واحد إلى مسارَي خرج مفيد وطاقة مهدرة، بحيث يتناسب عرض كل سهم مع الطاقة التي يمثِّلها. وتُفسَّر مخططات سانكي بمقارنة العروض النسبية للأسهم بدلًا من حفظ القيم.

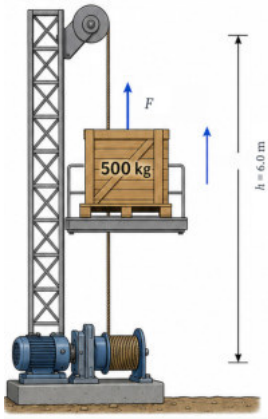


شكل (4.6.1)

صندوق المعادلات:

الكفاءة:	η = طاقة الخرج المفيدة ÷ إجمالي طاقة الدخل

مثال محلول:



شكل (5.6.1)

الموقف:	ترفع رافعة في موقع بناء منصة نقالة كتلتها 5.0×10^2 kg رأسيًّا إلى أعلى بارتفاع 6.0 m بسرعة ثابتة خلال 12 s. أهمل مقاومة الهواء. أوجد: (أ) الشغل الذي بذلته الرافعة بالجول. (ب) القدرة المتوسطة التي تنتجها الرافعة. (جـ) تحقق باستخدام P = Fv.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $m = 500\ kg$ ، $h = 6.0\ m$ ، $t = 12\ s$ ، $g = 9.8\ m\ s^{-2}$. **المطلوب:** (أ) الشغل W، (ب) القدرة P، (جـ) التحقق باستخدام P = Fv.
التمثيل:	مصعد (أسانسير) رأسي بسرعة ثابتة F = mg.
الاستراتيجية:	1) Use W = mgh 2) Use P = W/t 3) Find speed v = h/t and check using P = mgv

حقيقة أساسية:

مصعد رأسي بسرعة ثابتة:

P = Fv = mgv = mgh/t

استخدم P = Fv عندما تُعطى السرعة، أو

P = mgh/t

عندما يُعطى الارتفاع والزمن.

الحل الموضح:	(أ) $W = 500 \times 9.8 \times 6.0 = 2.94 \times 10^4\ J$ (ب) $P = (2.94 \times 10^4) / 12 = 2.45 \times 10^3\ W = 2.45\ kW$ (جـ) $v = 6.0 / 12 = 0.5\ m\ s^{-1}$ $P = mgv = 500 \times 9.8 \times 0.5 = 2450\ W = 2.45\ kW$
منطقية الحل:	تُعطي الطريقتان القيمة الموجبة نفسها للقدرة، مما يؤكد صحة الحساب.
فسِّرها بنفسك:	إذا رفعت الرافعة الحمل نفسه لكن في نصف الزمن، كيف يؤثر ذلك في القدرة؟ ولماذا؟

جرِّب بنفسك: ترتفع مقصورة مصعد كتلتها 400 kg رأسيًّا بارتفاع 9.0 m بسرعة ثابتة خلال 15 s. خذ $g = 9.8\ m\ s^{-2}$. **احسب** القدرة الناتجة عن محركها بالكيلووات، ثم **تحقق** من إجابتك باستخدام $P = Fv$.

الكفاءة — ما نسبة طاقة الدخل المنقولة بصورة مفيدة؟

لا ينقل أي جهاز كل الطاقة الداخلة إلى طاقة خرج مفيدة؛ إذ تفقد دائمًا بعض الطاقة، عادةً في صورة طاقة حرارية. وتقيس الكفاءة جزء الطاقة الداخلة التي تحولت إلى طاقة الخرج المفيدة:

η = طاقة الخرج المفيدة ÷ إجمالي طاقة الدخل.

حاول:

اذكر كل كفاءة كنسبة مئوية.

حقيقة أساسية:

قراءة مخطط سانكي:

يساوي إجمالي الدخل مجموع الخرج المفيد وجميع الخرج المهدر. لذا يمكن حساب خرج مفقود بطرح مجموع الخرج المعروف من إجمالي الدخل.

(أ) تسحب مضخة كهربائية في مزرعة بدلتا النيل قدرة كهربائية مقدارها 2000 W، وتُنتج قدرة خرج مفيدة مقدارها 1500 W لرفع مياه الري. أوجد كفاءة المضخة.

شكل (6.6.1)

(ب) تستقبل سخانة مياه كهربائية صغيرة 2400 W، وتُنتج قدرة حرارية مفيدة مقدارها 2040 W للماء. أوجد كفاءتها.

شكل (7.6.1)

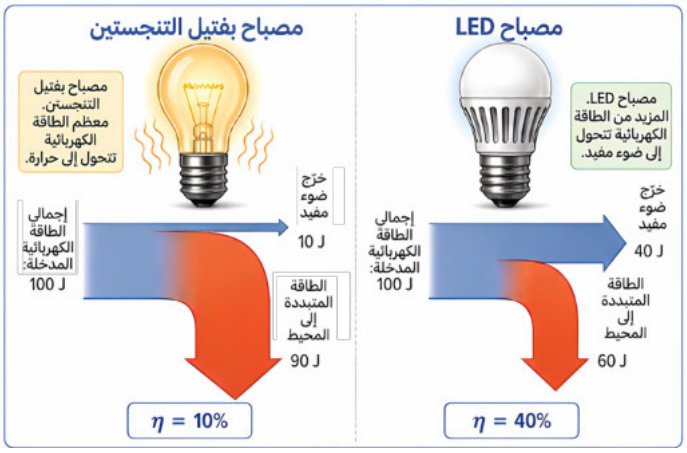
(جـ) يُزوَّد مصباح بطاقة كهربائية مقدارها 100 J. ويُصدر 25 J من الضوء، ويتبدد الباقي كحرارة. أوجد الطاقة المهدرة (المفقودة) كحرارة وكفاءة المصباح.

شكل (8.6.1)

(د) ارسم مخطط سانكي بسيطًا للمصباح في (جـ): ارسم سهم دخل واحدًا يمثِّل 100 J، ينقسم إلى خرج ضوئي مفيد وخرج حراري مفقود. اجعل عروض الأسهم متناسبة مع الطاقات التي تمثِّلها.

في سياق جديد — اختيار مصباح كفء

يمكن أن يؤدي استبدال مصباح فتيلي تقليدي بمصباح LED إلى تقليل الطاقة الكهربائية اللازمة لإضاءة غرفة. فمقابل كل 100 J من الطاقة الكهربائية المزوَّدة، قد ينقل المصباح الفتيلي نحو 10 J فقط كضوء مفيد. ويتبدد الباقي البالغ 90 J إلى المحيط، غالبًا كطاقة حرارية. أما مصباح LED فقد ينقل نحو 40 J من دخل الـ 100 J نفسه كضوء مفيد، بينما يتبدد نحو 60 J إلى المحيط. لذا يكون مصباح LED أكفأ لأن نسبة أكبر من طاقة دخله تُنقَل كضوء مفيد. ويوضح مخطط سانكي هذا الفرق: فسهم الضوء المفيد لمصباح LED أعرض، وسهم الطاقة المهدرة أضيق، مقارنة بالمصباح الفتيلي، رغم أن كليهما يستقبل الدخل نفسه البالغ 100 J.

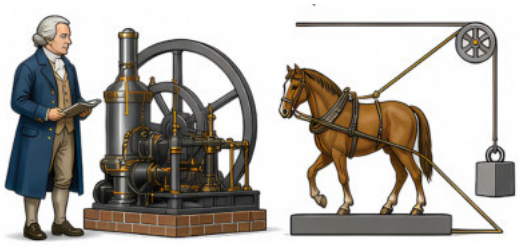


شكل (9.6.1)

نصيحة امتحانية:
اذكر الكفاءة كنسبة مئوية فقط عندما يطلب السؤال ذلك. يمكن كتابة الكفاءة كعدد عشري أو نسبة مئوية.

دورك الآن: فسِّر، من مخطَطي سانكي، لماذا يكلِّف تشغيل مصباح LED أقل من مصباح فتيل التنجستين بينما يُنتجان مقدار الضوء المفيد نفسه.

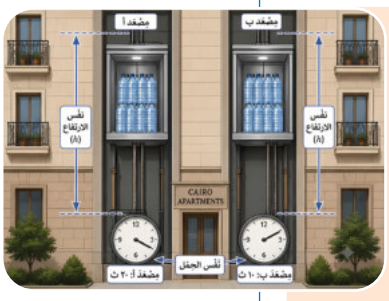
طبيعة العلم: أرشميدس والرافعة — قانون الميكانيكا المبكر



شكل (10.6.1)

عندما سوَّق جيمس وات محركاته البخارية المحسَّنة في أواخر القرن الثامن عشر، احتاج الزبائن إلى طريقة مألوفة لمقارنة قدرتها بقدرة الخيول العاملة. استخدم واط تقديرًا لقدرة حصان عامل كأساس للمقارنة. وعرَّف الحصان الواحد بأنه معدل أداء شغل مقداره 33000 قدم – رطل في الدقيقة. وسمح ذلك بالتعبير عن قدرة المحرك بمصطلحات يمكن للزبائن فهمها ومقارنتها. ويُظهر هذا المثال كيف يمكن استخدام القياسات وتعريف متفق عليه لإرساء وحدة عملية للتعبير عن كمية فيزيائية.

دورك الآن: اقترح ميزة واحدة للتعبير عن قدرة المحرك بوحدة الحصان بدلًا من استحداث وحدة جديدة تمامًا.



شكل (11.6.1)

سؤال الدرس، وإجابته:

يرفع مصعدان الحمل نفسه إلى الارتفاع الرأسي نفسه، لكن أحدهما ينهي الرفع في نصف الزمن. هل يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه؟ وأيهما له القدرة الأكبر؟

يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه لأن الحمل نفسه يُرفع إلى نفس الارتفاع الرأسي ($W = mgh$).

أما المصعد الذي ينهي الحركة في زمن أقل فله القدرة الأكبر ($P = W/t$).

وإذا اختلفت طاقتا دخلهما، فإن المصعد الأكفأ هو الذي يحوِّل جزءًا كبيرًا من الطاقة الداخلة إلى طاقة مفيدة ويبدد طاقة أقل إلى المحيط. لذا سيُظهر مخطط سانكي سهم خرج مفيد أعرض وسهم طاقة مهدرة أضيق للمصعد الأكفأ.

تمرين:

(١) يرفع مصعد بضائع حملًا كتلته 1.5×10^3 kg رأسيًا بارتفاع 18 m بسرعة ثابتة، مستغرقًا 30 s.

(أ) احسب الشغل الذي بذله المصعد على الحمل.

(ب) أوجد القدرة الناتجة عن المصعد بالكيلووات.

(جـ) بيِّن أن السرعة الثابتة للحمل تساوي $0.60\ m\ s^{-1}$.

(د) باستخدام $P = Fv$، تحقق من إجابتك في (ب)، وفسِّر بإيجاز لماذا يجب أن تُعطي الطريقتان النتيجة نفسها.

(٢) يرفع كل من المصعدين A وB حملًا كتلته 600 kg إلى الارتفاع الرأسي نفسه 9.0 m بسرعة ثابتة. ينهي المصعد A الرفع في 24 s؛ وينهي المصعد B الرفع نفسه في 12 s.

(أ) فسِّر لماذا يبذل المصعدان الشغل المفيد نفسه على الحمل، واذكر قيمته.

(ب) احسب القدرة الناتجة عن المصعد A وعن المصعد B بالكيلووات.

(جـ) اذكر النسبة $P^A : P^B$ وبيِّن كيف ترتبط بنسبة الأزمنة المستغرقة.

(٣) يُزوَّد ونش كهربائي بطاقة كهربائية مقدارها 5.0×10^4 J. ويبذل 3.5×10^4 J من الشغل المفيد في رفع حمل؛ وتتبدد بقية الطاقة.

(أ) احسب الطاقة المتبددة (المفقودة) بواسطة الونش.

(ب) أوجد كفاءة الونش، معبَّرًا عنها كنسبة مئوية.

(جـ) ارسم مخطط سانكي لانتقال الطاقة هذا، بحيث يتناسب عرض كل سهم مع الطاقة التي يمثِّلها.

(د) اذكر الصورة الرئيسية للطاقة التي تتحول إليها الطاقة المتبددة.

(٤) ترفع رافعة كهربائية حملًا كتلته 250 kg بارتفاع رأسي 6.0 m بسرعة ثابتة خلال 8.0 s. وأثناء ذلك، تُزوَّد الرافعة بطاقة كهربائية بمعدل ثابت مقداره 2.5 kW.

(أ) احسب القدرة المفيدة الناتجة عن الرافعة بالكيلووات.

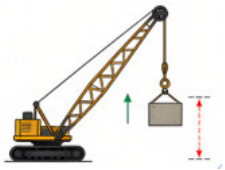
(ب) أوجد كفاءة الرافعة، معبَّرًا عنها كنسبة مئوية.

سؤال بأسلوب الامتحان:

ترفع رافعة صغيرة حملًا كتلته 600 kg رأسيًا بارتفاع 8.0 m بسرعة ثابتة خلال 16 s.

خذ $g = 9.8\ m\ s^{-2}$.

احسب الشغل الذي بذلته الرافعة على الحمل، والقدرة الميكانيكية الناتجة عن الرافعة بالكيلووات.



شكل (12.6.1)

الدرس ١-٧ — كمية التحرك والدفع

؟ سؤال الدرس:
لماذا يقل احتمال تحطم هاتف عند سقوطه على سرير مقارنة بسقوطه على أرضية من البلاط، حتى لو سقط من الارتفاع نفسه؟

ستتعلم أن

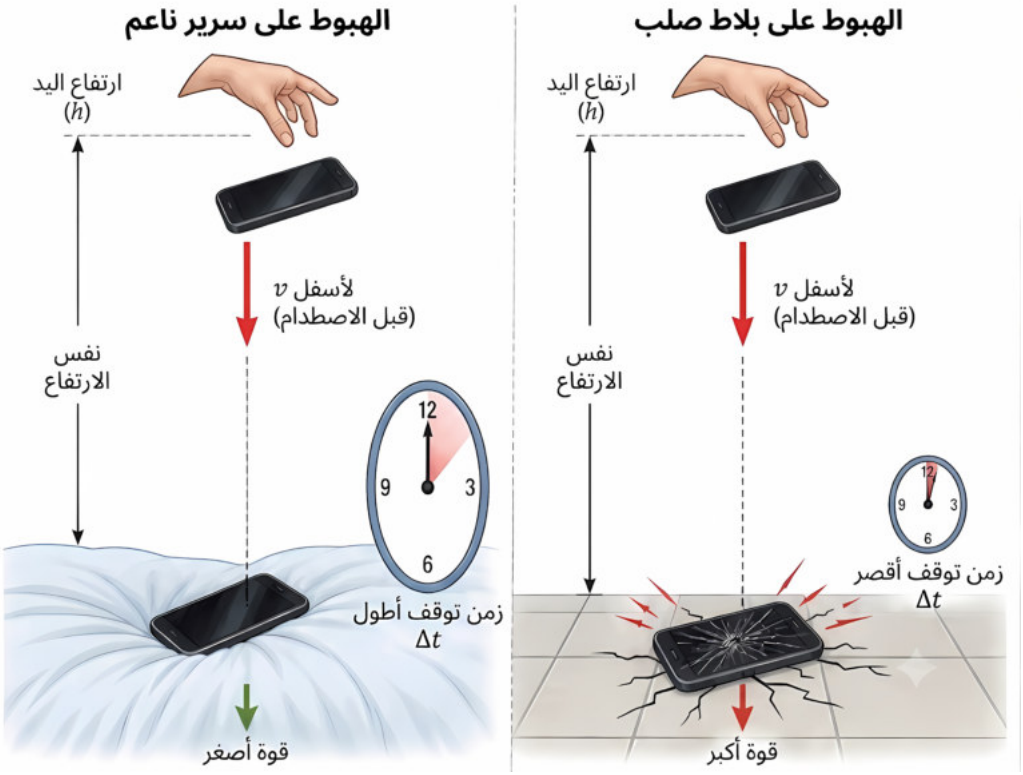
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تصف** كمية التحرك بوصفها حاصل ضرب الكتلة في السرعة، $p = mv$.

٢. **تحدد** دفع قوة وتربطه بالتغيُّر في كمية التحرك، $J = F\Delta t = \Delta p$.

٣. **تفسر** لماذا يؤدى زيادة الزمن الذي يستغرقه تغيُّر كمية التحرك إلى نقصان القوة المحصلة المتوسطة.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (2.7.1)

يسقط هاتف من الارتفاع نفسه على سطحين مختلفين. فيهبط على سرير، ويرتد قليلًا، ويبقى سليمًا. ثم يهبط على أرضية من البلاط من الارتفاع نفسه، فتتهشم الشاشة. وفي كلتا الحالتين، يصل الهاتف إلى السطح بالكتلة والسرعة نفسيهما، لذا يكون التغيُّر في كمية التحرك نفسه. ويكمن الفرق في التفاعل أثناء الارتطام، لا في السقوط نفسه.

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) ماذا يغيِّر السرير: التغيّر في كمية التحرك، أم زمن التوقف، أم كلاهما؟

(ب) هل تتعرض كرة ترتد عن جدار لقوة أكبر أم أصغر أم نفس القوة التي تتعرض لها كرة تلتصق بالجدار، لنفس السرعة الابتدائية وزمن التفاعل؟

حقيقة أساسية:
كمية التحرك والدفع كميتان متجهتان، وتُستخدم علاقتان أساسيتان في هذا الدرس: $(p = mv)$ و$(J = F\Delta t)$.

استكشف — اختبار نظرية الدفع وكمية التحرك

ما ستفعله: تقيس الدفع المؤثر أثناء التصادم والتغيُّر في كمية التحرك الذي يُحدثه، ثم تستقصي العلاقة بينهما.

الزمن: 40 دقيقة.

ما تحتاجه:

- عربة ديناميكية ومسار أفقي.
- مستشعر قوة مثبَّت في أحد طرفَي المسار، مزوَّد بمصدٍّ نابضي.
- مستشعر حركة (أو عربة ذات مُرمِّز حركة) لقياس سرعة العربة.
- مسجِّل بيانات أو حاسوب ببرنامج رسم بياني.
- ميزان.

الخطوات:

١ قِس الكتلة الكلية m للعربة. ثبِّت مستشعر القوة ومصدَّه النابضي عند أحد طرفَي مسار أفقي، مع مستشعر الحركة عند الطرف الآخر.

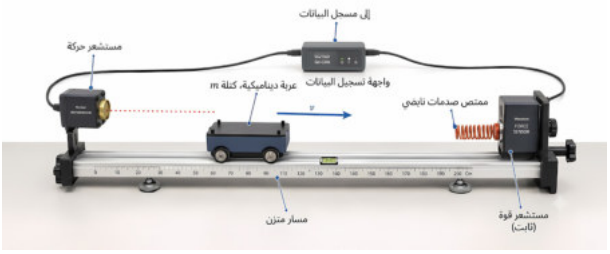
٢ صفِّر مستشعر القوة دون أي قوة عليه. اضبط البرنامج لرسم القوة والسرعة مقابل محور الزمن نفسه.

٣ ادفع العربة بحيث تتحرك بسرعة شبه ثابتة قبل أن تصطدم بالمصدِّ وترتد؛ وأبعد يدك أثناء التصادم.

٤ من مخطط السرعة–الزمن، اقرأ السرعة في الأجزاء ذات السرعة الثابتة قُبيل التصادم (v_i) وبعده مباشرة (v_f). وباعتبار الاتجاه الابتدائي موجبًا، تصبح vf سالبة، إذن $\Delta p = m(v_f - v_i)$.

٥ من مخطط القوة–الزمن، حدِّد الدفع J بوصفه المساحة أسفل النبضة، وسجِّل القوة القصوى وزمن التماس Δt.

٦ كرر التجربة مرتين إضافيتين: أولًا بالمصدِّ نفسه بسرعة اصطدام أعلى، ثم بمصدٍّ أكثر مرونة بسرعة اصطدام شبه مساوية لتلك في المحاولة 1.



شكل (2.7.1)

المحاولة	$v_i\ (ms^{-1})$	$v_f\ (ms^{-1})$	$\Delta t\ (s)$	$\Delta p = m(v_f - v_i)\ (N\,s)$	الدفع J (Ns)
١. كتل متماثلة					
٢. أثقل – أخف					
٣. (مصدٌّ أملس ناعم)					

حلِّل ما جمعته:

(أ) لكل محاولة، قارن الدفع J (المساحة أسفل مخطط القوة–الزمن) بالتغيُّر في كمية التحرك $\Delta p = m(v_f - v_i)$. هل يتساويان في المقدار ضمن عدم اليقين (الخطأ) التجريبي؟ يختبر هذا نظرية الدفع وكمية التحرك.

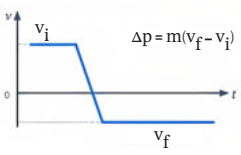
(ب) يزيد المصدُّ الأكثر ليونة زمن التلامس (زمن التأثير). بالنسبة لتغيُّر مماثل في كمية التحرك، فسِّر كيف يؤثر ذلك في القوة أثناء التصادم.

اكتب، في سطرين، لماذا يجب أن تساوي المساحة أسفل مخطط القوة – الزمن لديك القيمة $\Delta p = m(v_f - v_i)$، قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:

اقرأ v_i وv_f من الأجزاء المستوية (ثابتة السرعة) في مخطط السرعة–الزمن، قُبيل التصادم وبعده مباشرة — لا أثناءه أبدًا. أوجد الدفع من المساحة أسفل نبضة القوة فقط، وأعد تصفير مستشعر القوة قبل كل محاولة.

العلاقة البيانية (سرعة – زمن)



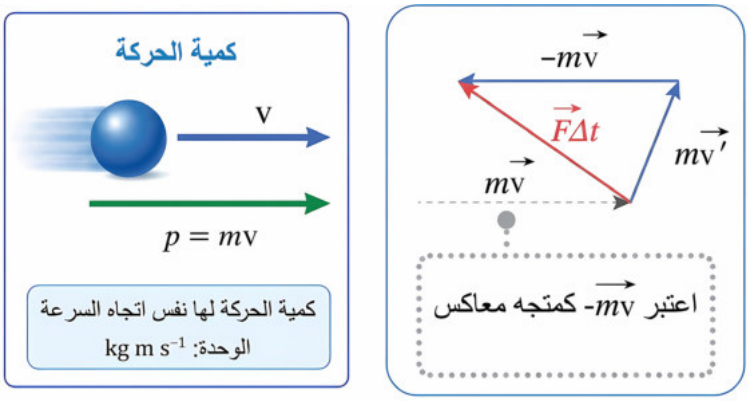
شكل (3.7.1)

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، عند مقارنة المحاولتين 1 و3، كانت للعربة الكتلة نفسها وسرعة اصطدام متقاربة تقريبًا. ومع ذلك، أثَّر المصدُّ الأكثر ليونة بقوة متوسطة أصغر عبر زمن أطول، بينما أثَّر المصدُّ الأكثر صلابة بقوة متوسطة أكبر عبر زمن أقصر. ولعلك توقعت أن المصدَّ الأكثر ليونة يقلل التغيُّر في كمية تحرك العربة. لكن هذا غير صحيح؛ فللسرعة الابتدائية نفسها وسرعة الارتداد نفسها، يكون التغيُّر في كمية التحرك نفسه؛ والذي يختلف هو زمن التفاعل، وبالتالي متوسط القوة. وفيما يلي النموذج الذي تشير إليه أدلتك.

كمية التحرك والدفع

لجسم كتلته m يتحرك بسرعة v كمية تحرك مقدارها $p = mv$. وكمية التحرك كمية متجهة في اتجاه السرعة نفسه، ويُقاس بوحدة $kg\ m\ s^{-1}$. وينتج التغيُّر في كمية التحرك عن قوة محصلة تؤثر خلال فترة زمنية. ولقوة محصلة ثابتة، $J = F\Delta t$، $J = \Delta p$. لذا فإن قانون نيوتن الثاني بصيغة كمية التحرك هو $\frac{\Delta p}{\Delta t}$. لذا فإن زيادة زمن التأثير لنفس التغيُّر في كمية التحرك، يؤدي إلى نقصان القوة المحصلة المتوسطة، بينما نقصان زمن التأثير يؤدي إلى زيادة القوة المحصلة المتوسطة.



شكل (4.7.1)

نقطة

- يُطلق على حاصل ضرب كتلة الجسم m [كجم] وسرعته v [م/ث] اسم "كمية التحرك" (أو كمية الحركة)، وهو يمثل مقدار الحركة. ووحدته هي كجم·م/ث، ويُعبَّر عنه بالصيغة: $p = mv$.
- أما حاصل الضرب $F\Delta t$ [نيوتن.ثانية] فيُطلق عليه اسم "الدفع"، وهو يمثل التغير في كمية التحرك. ووحدته هي نيوتن·ثانية. فإذا كان كمية التحرك قبل التغير هو mv [كجم·م/ث] وكمية التحرك بعده هو mv'، فإن العلاقة تُكتب بالصيغة: $J = mv' - mv = F\Delta t$، وبذلك تكون صيغة قانون نيوتن الثاني بدلالة الزخم هي: $F = \Delta p$.
- يؤدي طول زمن التفاعل إلى تقليل متوسط القوة عند ثبات مقدار التغير في كمية التحرك؛ حيث يُحسب متوسط القوة بقسمة الدفع على الزمن.

تطبيق سريع:

حاصل ضرب قوة محصلة ثابتة في الفترة الزمنية التي تؤثر خلالها.

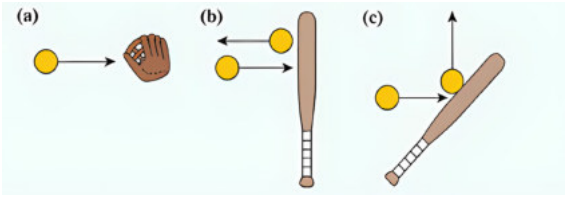
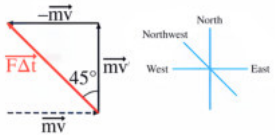
$J = f\Delta t$؛ وهو متجه في اتجاه القوة المحصلة، ويُقاس بوحدة N·s.

شكل (5.7.1)

صندوق المعادلات:

كمية التحرك:	$P = mv$
الدفع:	$J = F\Delta t = \Delta p$
قانون نيوتن الثاني (بصيغة كمية التحرك):	$J = \frac{\Delta p}{\Delta t}$

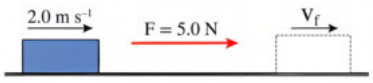
مثال محلول:

الموقف:	تتحرك كرة كتلتها $6.0\times10^{-2}\ kg$ نحو الشرق بسرعة $20\ m\ s^{-1}$. لكل حالة من الحالات التالية، أوجد اتجاه ومقدار الدفع المؤثر على الكرة. (أ) عندما تُلتقَط الكرة. (ب) عندما تُضرَب لترتد غربًا بالسرعة نفسها. (جـ) عندما تُضرَب لترتد شمالًا بالسرعة نفسها. 
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $v = 20\ m\ s^{-1}$ ، $m = 6.0\times10^{-2}\ kg$ (شرقًا). **المطلوب:** الدفع
التمثيل:	ارسم متجه كمية التحرك الابتدائية، $p_i = mv_i$، في اتجاه الحركة الابتدائية للكرة. ولكل حالة، حدد متجه كمية التحرك النهائية، $p_f = mv_f$. ويساوي الدفع التغيّر المتجه في كمية التحرك: $J = \Delta p = p_f - p_i = m(v_f - v_i)$
الاستراتيجية:	طبِّق نظرية الدفع وكمية التحرك: $F\Delta t = mv' - mv$ قيِّم كل حالة على حدة باستخدام السرعة النهائية.
الحل الموضح:	(أ) اعتبر الاتجاه الشرقي موجبًا. عندما تُلتقَط الكرة، تصبح سرعتها صفرًا. $F\Delta t = (6.0\times10^{-2})\times0-(6.0\times10^{-2})\times20$ $= -1.2\ N\ s$ غربًا (ب) $F\Delta t = (6.0\times10^{-2})\times(-20)-(6.0\times10^{-2})\times20$ $= -2.4\ N\ s$ غربًا (جـ) إذا اعتبرناها متجهًا، فستكون قيمة $F\Delta t$ كما هو موضح في الشكل الموجود على اليسار. **المقدار** $F\Delta t = 2\times6.0\times10^{-2}\times20$ $= 1.70 = 1.7\ N\ s$ $= -2.4\ N\ s$ اتجاه الشمال الغربي  شكل (6.7.1)
منطقية الحل:	يحدث أكبر دفع عندما ينعكس الاتجاه (الحالة b). ويُعطي التوقف دفعًا أصغر (الحالة a). ويُعطي تغيير اتجاه الحركة إلى الشمال دفعًا متوسطًا قطريًا نحو الشمال الغربي (الحالة c).
فسِّرها بنفسك:	لماذا يكون الدفع في الحالة (ب) ضعف الدفع في الحالة (a)، رغم أن السرعة نفسها في كلتا الحالتين؟

جرِّب بنفسك: تؤثر قوة ثابتة مقدارها 5.0 N على جسم لمدة 2.0 s في اتجاه حركته.
أوجد مقدار الدفع المؤثر على الجسم بوحدة N·s.

حقيقة أساسية:
إذا توقف جسم يتحرك بسرعة (v) عن الحركة، فإن مقدار التغيّر في كمية تحركه هو (mv). وإذا ارتد بالسرعة نفسها في الاتجاه المعاكس، فإن مقدار التغيّر في كمية تحركه هو (mv_2). فعكس اتجاه كمية التحرك، بدلاً من تقليله إلى الصفر، يؤدي إلى مضاعفة الدفع.

حاول:



شكل (7.7.1)

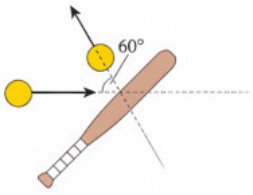
(أ) تؤثر قوة مقدارها 5.0 N على جسم كتلته 4.0 kg يتحرك بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$ لمدة 2.0 s في اتجاه حركته.

(i) أوجد مقدار الدفع المؤثر على الجسم بوحدة N•s.

(ii) أوجد الزيادة في كمية تحرك الجسم بوحدة $kg\ m\ s^{-1}$.

(iii) أوجد سرعته النهائية بوحدة $m\ s^{-1}$.

(ب) تتحرك كرة كتلتها 0.15 kg أفقيًا بسرعة $30\ m\ s^{-1}$، وتُضرَب بمضرب لترتد بالسرعة نفسها بزاوية ارتفاع 60° عن الأفقي.



شكل (8.7.1)

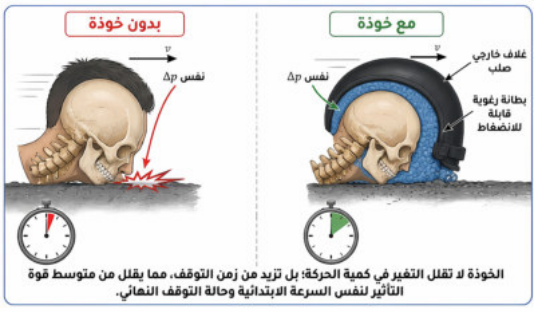
(i) أوجد مقدار الدفع المؤثر على الكرة.

(ii) إذا كان زمن التماس بين الكرة والمضرب 2.0×10^{-2} s، فأوجد مقدار متوسط القوة المؤثرة على الكرة بالنيوتن.

حقيقة أساسية:

في الجزء (ب)، تعكس الكرة اتجاهها، لذا ارسم متجهات كمية التحرك أولاً. والدفع هو التغيُّر المتجه في كمية التحرك، لا الفرق بين السرعتين.

في سياق جديد — كيف تقلل الخوذة قوة الارتطام



شكل (9.7.1)

عندما يسقط راكب دراجة نارية ويرتطم رأسه بالطريق، لا يمكن تجنب التغيّر في كمية التحرك لأن الرأس يجب أن يتباطأ حتى يتوقف. ومع ذلك، تزيد الخوذة الزمن الذي يستغرقه هذا التغيّر في كمية التحرك.

تنضغط رغوة الخوذة الماصة للطاقة أثناء الارتطام، فتزيد زمن توقف الرأس ومسافة توقفه. وللتغيّر نفسه في كمية التحرك:

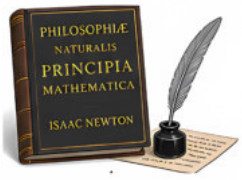
$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

وزيادة زمن التوقف تقلل متوسط قوة الارتطام، وبالتالي تقلل العجلة المتوسطة التي يتعرض لها الرأس.

لا تقلل الخوذة التغيُّر في كمية التحرك؛ بل تزيد زمن التوقف (زمن التأثير)، مما يقلل متوسط قوة الارتطام لنفس السرعة الابتدائية وحالة السكون النهائية.

دورك الآن: فسِّر لماذا توفر بطانة خوذة أكثر سمكًا وليونة حماية أفضل للجمجمة، رغم أن مقدار التغيُّر في كمية تحرك الرأس يبقى دون تغيير.

طبيعة العلم: القوانين — قانون نيوتن الثاني [بصيغة كمية التحرك]



لم يصغ نيوتن (١٦٨٧) قانونه الثاني بصورة F = ma؛ بل نص على أن معدل تغيُّر كمية الحركة يتناسب مع القوة المؤثرة ويحدث في اتجاهها. وتقابل «كمية الحركة» كمية التحرك. وبالصيغة الحديثة: $F_{\text{المحصلة}} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$. وعلى فترة زمنية: $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$. وللكتلة الثابتة: $F_{\text{المحصلة}} = ma$. ويصف القانون العلمي علاقة ثابتة تسمح بالتنبؤ بالحركة، دون تفسير الأصل الفيزيائي للقوى. ويربط قانون نيوتن الثاني القوة بمعدل تغيُّر كمية التحرك.

دورك الآن: اقترح سببًا لاعتبار صيغة كمية التحرك $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ الصيغة العامة.

سؤال الدرس، وإجابته:

لماذا يقل احتمال تحطم هاتف عند سقوطه على سرير مقارنة بسقوطه على أرضية من البلاط، حتى لو سقط من الارتفاع نفسه؟

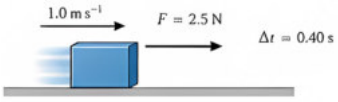
إذا ارتطم الهاتف بالسرير أو البلاط بالسرعة نفسها وتوقف دون ارتداد، يكون التغيّر في كمية التحرك نفسه في كلتا الحالتين. والفرق هو زمن التوقف. فالسرير يزيد زمن التوقف بتشوهه، مما يقلل متوسط القوة. أما أرضية البلاط فتوقف الهاتف في زمن أقصر بكثير، مما يُنتج متوسط قوة أكبر بكثير ويزيد احتمال حدوث ضرر.

شكل (10.7.1)

تمرين:

أوجد ما يلي:

(أ) أثّرت قوة مقدارها 2.5 N على جسم كتلته 2.0 kg يتحرك بسرعة $1.0\ m\ s^{-1}$ لمدة 0.40 s في اتجاه حركته.



شكل (11.7.1)

(i) أوجد مقدار الدفع المؤثر على الجسم بوحدة N•s.

(ii) أوجد الزيادة في كمية تحرك الجسم بوحدة $kg\ m\ s^{-1}$.

(iii) أوجد سرعته النهائية بوحدة $m\ s^{-1}$.

(ب) تُلتقَط كرة كتلتها 0.14 kg تتحرك بسرعة $40\ m\ s^{-1}$ بقفاز.

(i) أوجد مقدار الدفع الذي تتلقاه الكرة بوحدة N•s.

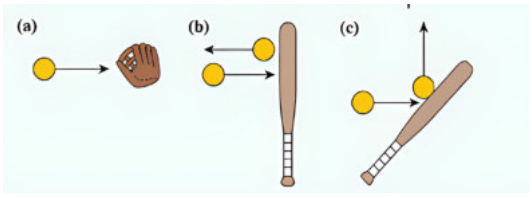
(ii) إذا كان زمن التماس بين الكرة والقفاز حتى تتوقف الكرة 2.0×10^{-2} s، **فأوجد** مقدار متوسط القوة التي تؤثر بها الكرة على القفاز بالنيوتن.

(جـ) تتحرك كرة كتلتها 3.0×10^{-2} kg نحو الشرق بسرعة $10\ m\ s^{-1}$. لكل حالة من الحالات التالية، أوجد مقدار واتجاه الدفع المؤثر على الكرة في الحالات الآتية.

(i) عندما تُلتقَط الكرة.

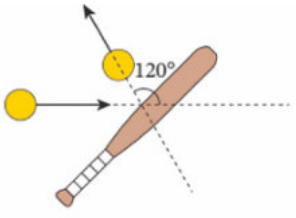
(ii) عندما تُضرَب لترتد غربًا بالسرعة نفسها.

(iii) عندما تُضرَب لترتد شمالًا بالسرعة نفسها.



شكل (12.7.1)

(د) تتحرك كرة كتلتها 0.40 kg أفقيًا بسرعة $10\ m\ s^{-1}$، وتُضرَب لترتد بالسرعة نفسها في اتجاه يصنع زاوية 120° مع اتجاهها الابتدائي. أوجد مقدار الدفع الذي تتلقاه الكرة، والزاوية بين اتجاه الدفع واتجاهها الابتدائي.

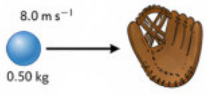


شكل (13.7.1)

سؤال بأسلوب الامتحان:

تتوقف كرة كتلتها 0.50 kg تتحرك بسرعة $8.0\ m\ s^{-1}$ عن الحركة بواسطة قفاز خلال 0.040 s.

أوجد الدفع المؤثر على الكرة.



شكل (14.7.1)

الدرس ١-٨ — حفظ كمية الحركة

؟ سؤال الدرس:
عندما تنزل من قارب صغير ساكن بجوار الرصيف، لماذا يتحرك القارب إلى الخلف؟
وما الذي يحدد سرعته؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** لماذا تبقى كمية التحرك الكلية لنظام معزول ثابتةً.
٢. **تطبق قانون** حفظ كمية التحرك لحساب سرعات مجهولة قبل التصادم وبعده.
٣. **تحدد** النظام، وتختار محورًا، وتذكر الاتجاه الموجب عند تطبيق حفظ كمية التحرك.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

حقيقة أساسية:
كمية تحرك جسم هي $p = mv$. الدفع المؤثر بالقوة المحصلة خلال فترة زمنية. التغيُّر في كمية التحرك.

شكل (1.8.1)

تنهي رحلة على قارب صغير وتخطو إلى الأمام نحو رصيف حجري. ومع تحرك قدمك إلى الأمام، ينزلق القارب إلى الخلف، فتزداد الفجوة بين القارب والرصيف. وإذا خطوت برفق، يبتعد ببطء، بينما تعطيه دفع أقوى سرعة خلفية أكبر. لا أحد آخر يدفع القارب – ومع ذلك يتحرك إلى الخلف. لاحظ القارب في المرة القادمة التي ينزل فيها أحدهم إلى اليابسة.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) أثناء الدفع، هل تتغير قيمة كمية التحرك لديك ولدى القارب بشكل متساوٍ أم مختلف؟

(ب) يتلقى قارب فارغ وقارب محمَّل بصناديق نفس الدفع. أي القاربين يرتد بسرعة أكبر؟

استكشف — الارتداد عند تدافع طالبين

ما ستفعله: تقيس المسافة التي يتحركها طالبان على كرسيَّين بعجلات بعد أن يتدافعا، وتستقصي كيف تعتمد مسافة كل منهما على كتلته.

الزمن: 20 دقيقة.

ما تحتاجه:

- كرسيان معمليان بعجلات يتحركان بحرية.
- أرضية أفقية ملساء بشريط بداية محدَّد.
- طباشير أو شريط لاصق لتحديد موضع توقف كل كرسي.
- طالب أثقل وآخر أخف لمحاولة الكتلتين غير المتساويتين.

الخطوات:

١ يجلس طالبان متقابلان على الكرسيَّين، مع تلامس راحتَي أيديهما، وكلاهما ساكن على شريط البداية.

٢ عند العد، يدفع الطالبان بقوة مرة واحدة براحتَي أيديهما، ثم يُبقيان يديهما ثابتتين بينما يتدحرج الكرسيان بعيدًا عن بعضهما. حدِّد موضع توقف كل كرسي.

٣ كرر التجربة بطالب أثقل يقابل طالبًا أخف، من شريط البداية نفسه.

٤ قِس استطالة كل شريط مطاطي مرة أخرى.

٥ كرر مرة أخرى، لكن هذه المرة يدفع طالب واحد فقط بينما يُبقي الآخر ذراعيه صلبتين. حدِّد نقاط التوقف مرة أخرى.

شكل (2.8.1)

الزوج	أي طالب تحرك مسافة أبعد؟
كتلتان متقاربتان	
أثقل مقابل أخف	
دفع من جانب واحد	

حلِّل ما جمعته:

(أ) عندما تختلف كتلتا الطالبين، أيهما يتحرك مسافة أبعد؟ كيف تعتمد المسافة التي يتحركها كل منهما على كتلته؟

(ب) عندما دفع طالب واحد فقط، هل تحرك ذلك الكرسي وحده، أم تحرك الكرسيان؟ ماذا يخبرك هذا عن القوى أثناء التفاعل؟

اكتب، في سطرين، لماذا يتحرك كلا الكرسيَّين حتى عندما يدفع طالب واحد فقط — قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:
يختلف احتكاك الأرضية من موضع إلى آخر، لذا أبقِ كل محاولة على الشريط المحدَّد نفسه، وقارن مسافات التوقف ضمن الزوج نفسه فقط، لا بين أجزاء مختلفة من الغرفة.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تحرك الكرسي الأخف دائمًا بعيدًا بسرعة أكبر، والملاحَظ أن الكرسيَّين تحركا بعيدًا عن بعضهما حتى عندما دفع طالب واحد فقط. وقد يتوقع المرء أن يتحرك الكرسي المدفوع وحده، أو أن يتحرك ذلك الكرسي مسافة أبعد مع دفعة أقوى؛ لكن الملاحظات تُظهر خلاف ذلك. لا يعمل الكرسيان بشكل مستقل؛ بل يتفاعلان كزوج. فكلما دفع أحد الكرسيين الآخر، يدفعه الآخر بقوة مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه، تؤثر للزمن نفسه تمامًا. لذا يتلقى كل كرسي دفعًا مساويًا في المقدار ومعاكسًا في الاتجاه، فيخضع كل منهما لتغيّر متساوٍ ومتعاكس في كمية التحرك؛ ولأن الكرسي الأخف كتلته أصغر، فإنه يتحرك بعيدًا بسرعة أكبر.

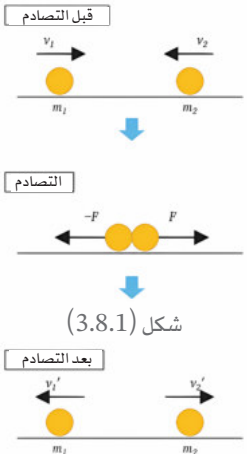
ويفسر النموذج التالي هذه الملاحظات.

النموذج: حفظ كمية التحرك:

تُسمى مجموعة الأجسام قيد الدراسة نظامًا. وتُسمى القوى التي تؤثر بها الأجسام على بعضها داخل النظام قوى داخلية، وتُسمى القوى التي تؤثر بها عوامل خارج النظام قوى خارجية.

تظل كمية التحرك الكلية للنظام كما هو قبل التصادم وبعده. ويُسمى هذا المبدأ قانون حفظ كمية التحرك.

عندما يصطدم الجسم A بكتلة m^1 وسرعة v^1 بالجسم B بكتلة m^2 وسرعة v^2، وتصبح سرعتاهما v_1' و v_2' على التوالي:



شكل (3.8.1)

شكل (4.8.1)

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

مجموع كمية التحرك قبل التصادم = مجموع كمية التحرك بعد التصادم

وينطبق قانون حفظ كمية التحرك عندما يكون الدفع المؤثر على النظام يساوي صفرًا، أي أن القوة الخارجية المحصلة عليه صفر.

نظام معزول:

مجموعة من الأجسام تُعتبَر معًا نظامًا واحدًا. يكون النظام معزولًا خلال فترة زمنية إذا كان صافي الدفع الخارجي صفرًا. لذا تبقى كمية تحركه الكلية ثابتةً.

تطبيق سريع:

يصطدم جسم كتلته 5 kg، ساكن ابتدائيًا، إلى جسمين: يتحرك جسم كتلته 3 kg شرقًا بسرعة $4\ m\ s^{-1}$، بينما يتحرك جسم كتلته 2 kg غربًا بسرعة $6\ m\ s^{-1}$. بيِّن أن كمية التحرك محفوظ.

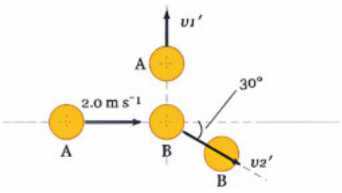
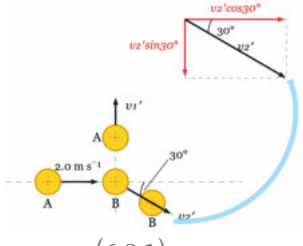
نقطة

- تُسمى مجموعة الأجسام محل الدراسة "نظاماً". وتُعرف القوى التي تؤثر بها الأجسام على بعضها البعض داخل النظام بـ "القوى الداخلية"، بينما تُعرف القوى التي تؤثر بها أجسام من خارج النظام بـ "القوى الخارجية".
  لا يتغير كمية التحرك الكلية للنظام المعزول أثناء التصادم.
- فعندما يصطدم الجسم (A) -الذي كتلته m_1 وسرعته v_1- بالجسم (B) - الذي كتلته m_2 وسرعته v2- وتصبح سرعتُهما v_1' و v_2' على التوالي، فإن المعادلة تكون:
  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$.
  وتتحقق هذه العلاقة في حال عدم وجود دفع ناتج عن قوى خارجية.
- كما تتحقق أيضاً إذا وُجدت قوى خارجية -مثل الجاذبية- ولكن يمكن إهمال تأثيرها. وفي حالة الحركة في مستوى، يتم تحليل المتجهات إلى مركبات في اتجاهي المحورين x و y.

صندوق المعادلات:

حفظ كمية التحرك على طول محور (جسمان):	$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$
كمية تحرك جسم:	$p = mv$

مثال محلول:

الموقف:	(أ) يتحرك الجسم A كتلته 1.2 kg في الاتجاه الموجب بسرعة $3.0\ m\,s^{-1}$، ويتحرك الجسم B كتلته 2.8 kg في الاتجاه السالب بسرعة $2.0\ m\,s^{-1}$ على خط مستقيم، فيتصادمان ويلتصقان معًا. أوجد السرعة بعد التصاقهما بـ $m\,s^{-1}$. (ب) على سطح أفقي أملس، يصطدم الجسم A كتلته 0.20 kg متحركًا بسرعة $2.0\ m\,s^{-1}$ بالجسم B كتلته 0.80 kg الساكن. أوجد السرعتين النهائيتين للجسمين A وB بعد التصادم. 
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات** (أ): $m_A = 1.2\ kg,\ v_A = +3.0\ m/s,\ m_B = 2.8\ kg,\ v_B = -2.0\ m/s$. **المطلوب:** السرعة النهائية v'. **المعطيات** (ب): $m_A = 0.20\ kg,\ v_A = 2.0\ m/s,\ m_B = 0.80\ kg,\ v_B = 0$. **المطلوب:** السرعتان النهائيتان لـ A و B.
التمثيل:	(أ) حركة في بعد واحد باتجاه موجب محدد. (ب) حركة في بعدين (تحلل إلى مركبتين متعامدتين) كمية التحرك تظل ثابتة بشكل مستقل في الاتجاهين (محوري السينات والصادات)
الاستراتيجية:	طبِّق حفظ كمية التحرك في (أ)، يتحرك الجسمان معًا بعد التصادم. وفي (ب)، حلِّل الحركة واستخدم حفظ كمية التحرك في الاتجاهين المتعامدين.
الحل الموضح:	(a) $1.2\times(3.0)+2.8\times(-2.0)=(1.2+2.8)v'$ $3.6-5.6=4.0v' \rightarrow v'=-0.50\ m/s$ شكل (5.8.1) (b) (i) x: $0.20\times2.0+0.80\times0=0.20\times0+0.80\times v'_2\cos30°$ (ii) y: $0.20\times0+0.80\times0=0.20\times v'_1-0.80\times v'_2\sin30°$ (iii) $v'_2 =: \frac{1}{\sqrt{3}}=\frac{\sqrt{3}}{3}=00.577...\approx0.58\ m/s$ $v'_1=\frac{2.0}{\sqrt{3}}=\frac{2.0\sqrt{3}}{3}=1.15...\approx1.2\ m/s$ **A:** 1.2 m/s. **B:** 0.58 m/s  شكل (6.8.1)

حقيقة أساسية:
اختر الاتجاه الموجب قبل تطبيق حفظ كمية التحرك.
وتشير السرعة السالبة إلى حركة معاكسة للاتجاه الموجب المختار.

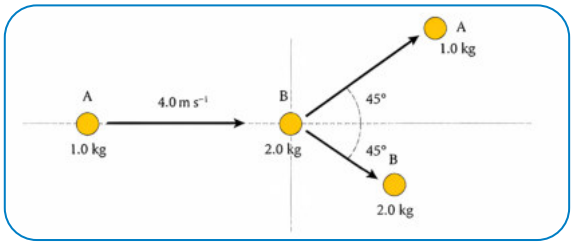
منطقية الحل:	(أ) السرعة النهائية سالبة، بما يتفق مع كمية التحرك الكلية الأكبر في الاتجاه السالب. (ب) كلتا السرعتين النهائيتين أقل من السرعة الابتدائية، بما يتفق مع تقاسم كمية التحرك بين الجسمين.
فسِّرها بنفسك:	في الجزء (a)، لماذا يمكنك جمع كميتي التحرك كعددين لهما إشارة على خط واحد بدلاً من تحليلهما إلى محورين؟

حاول:

(أ) يتحرك الجسم A كتلته 2.0 kg في الاتجاه الموجب بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$، ويتحرك الجسم B كتلته 3.0 kg في الاتجاه السالب بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$ على خط مستقيم، فيتصادمان. إذا كانت سرعة الجسم B بعد التصادم $2.0\ m\ s^{-1}$ في الاتجاه الموجب، **فأوجد** سرعة الجسم A بعد التصادم بـ $m\ s^{-1}$.

(ب) يصطدم جسم كتلته 8.0 kg، ساكن، إلى جسم A كتلته 3.0 kg وجسم B كتلته 5.0 kg. إذا تحرك الجسم A بعد التصادم يسارًا بسرعة $10\ m\ s^{-1}$، **فأوجد** سرعة الجسم B واتجاهه بعد التصادم.

(جـ) على سطح أفقي أملس، يصطدم الجسم A كتلته 1.0 kg متحركًا بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$ بالجسم B كتلته 2.0 kg الساكن. وبعد التصادم، ينحرف A بزاوية 45° فوق الأفقي وينحرف B بزاوية 45° أسفل الأفقي. أوجد السرعة النهائية للجسمين A وB بعد التصادم.



شكل (7.8.1)

في سياق جديد — دفع الصواريخ

يعمل الصاروخ بطرد غازات العادم إلى الخلف بسرعة عالية. وتكتسب الغازات كمية تحرك خلفية، بينما يكتسب الصاروخ كمية تحرك أمامية مساوية له. بالنسبة لنظام الصاروخ والعادم، إذا كان الدفع الخارجي مهملًا، تُحفَظ كمية التحرك الكلية: $\Delta p_{\text{العادم}} = -\Delta p_{\text{الصاروخ}}$.

أثناء الإطلاق، تؤثر الجاذبية إلى أسفل، لذا يتسارع الصاروخ إلى أعلى فقط عندما يكون دفعه أكبر من وزنه (بإهمال مقاومة الهواء).

شكل (8.8.1)

فسِّر لماذا يمكن للصاروخ أن يتسارع في فراغ الفضاء رغم عدم وجود وسط خارجي يدفع ضده.

طبيعة العلم – الأدلة – اختبار الفرضية في ضوء قوانين الحفظ

في عام ١٩٣٠، بدت قياسات اضمحلال جسيمات بيتا (β) وكأنها تُظهر أن بعض الطاقة وكمية التحرك مفقودان من النواتج المرصودة. وبدلًا من التخلي فورًا عن قوانين الحفظ المُختبَرة جيدًا، اقترح فولفجانج باولي (Wolfgang Pauli) أن جسيمًا متعادلًا غير مُكتشَف يحمل الطاقة وكمية التحرك المفقودين.

وعُرف هذا الجسيم لاحقًا باسم النيوترينو (neutrino). وقدَّم اقتراح باولي تنبؤًا قابلًا للاختبار: فإذا كان الجسيم موجودًا، فقد تكتشف التجارب في النهاية دليلاً على تفاعلاته.

وفي عام ١٩٥٦، أعلن فريدريك راينز وكلايد كاوان (Frederick Reines – Clyde Cowan) عن الاكتشاف التجريبي للنيوترينو.

وتُظهر هذه الواقعة أن القوانين الراسخة لا تُقبَل دون تمحيص. فالعلماء يتمسكون بها ما دامت الأدلة تدعمها بقوة، لكنهم أيضًا يطورون ويختبرون تفسيرات بديلة عندما تبدو الملاحظات الجديدة غير متسقة مع تلك القوانين.

دورك الآن: لماذا كان اقتراح فرضية قابلة للاختبار عن جسيم أكثر فائدة علميًّا من مجرد إعلان فشل قوانين الحفظ؟

نصيحة امتحانية:
اذكر الاتجاه الموجب واكتب $\Sigma p_{\text{قبل}} = \Sigma p_{\text{بعد}}$ للمحور قبل أي حساب.

سؤال الدرس، وإجابته:

عندما تنزل من قارب صغير واقف على رصيف، لماذا يتحرك القارب إلى الخلف؟ وما الذي يحدد سرعته؟ اعتبر الشخص والقارب نظامًا واحدًا. كمية التحرك الكلية ابتدائيًا تساوي صفر. وأثناء الدفع القصير، يكون الدفع الخارجي الأفقي مهملًا، لذا تُحفَظ كمية التحرك:

$$p_{\text{الشخص}} + p_{\text{القارب}} = 0$$

يكتسب الشخص والقارب كميتين تحرك متساويتين ومتعاكستين. وبما أن $p = mv$، يتحرك القارب الأخف أسرع من القارب الأثقل لنفس كمية التحرك.

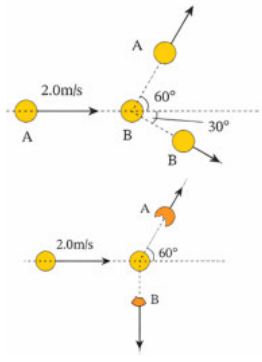
شكل (9.8.1)

سؤال بأسلوب الامتحان:
تصطدم عربة كتلتها 1.5 kg تتحرك بسرعة $2.0\ m\,s^{-1}$ اصطدامًا أماميًّا بعربة ساكنة كتلتها 0.50 kg على مسار أملس، وتتحرك العربتان معًا. أوجد السرعة النهائية للعربتين الملتصقتين بـ $m\,s^{-1}$.

تمرين:

(أ) يتحرك الجسم A كتلته 2.0 kg في الاتجاه الموجب بسرعة $3.0\ m\,s^{-1}$ على خط مستقيم، فيصطدم بالجسم B كتلته 1.0 kg الساكن، ويلتصقان معًا. **أوجد** السرعة بعد التصاقهما بـ $m\,s^{-1}$.

(ب) تصطدم العربة A كتلتها 2.0 kg متحركة بسرعة $4.5\ m\,s^{-1}$ على خط مستقيم بالعربة B كتلتها 5.0 kg المتحركة بسرعة $0.40\ m\,s^{-1}$ في نفس الاتجاه. إذا تحركت العربة B بعد التصادم بسرعة $2.6\ m\,s^{-1}$ في اتجاهها الأصلي، **فأوجد** سرعة العربة A واتجاهها بعد التصادم.



شكل (10.8.1)

(جـ) يصطدم جسم كتلته 7.0 kg، ساكن، إلى جسم A كتلته 4.0 kg وجسم B كتلته 3.0 kg. إذا تحرك الجسم A بعد التصادم يسارًا بسرعة $9.0\ m\ s^{-1}$، فأوجد سرعة الجسم B واتجاهه بعد التصادم.

(د) يصطدم جسم كتلته m، ساكن، إلى جسم A وجسم B. إذا تحرك الجسم A الذي كتلته $(\frac{3}{2})$ m في الاتجاه الموجب بسرعة v، **فأوجد** سرعة الجسم B واتجاهه بعد التصادم.

(هـ) على سطح أفقي أملس، يصطدم الجسم A كتلته 0.20 kg متحركًا بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$ بالجسم B كتلته 0.60 kg الساكن. وبعد التصادم، ينحرف A بزاوية 60° فوق الأفقي وينحرف B بزاوية 30° أسفله، **أوجد** السرعة النهائية للجسمين A وB بعد التصادم.

(و) على سطح أفقي أملس، يصطدم جسم كتلته 5.0 kg يتحرك بسرعة $2.0\ m\ s^{-1}$ إلى جسم A كتلته 4.0 kg وجسم B كتلته 1.0 kg. وبعد التصادم، ينحرف A بزاوية 60° فوق الأفقي ويتحرك B مباشرة إلى أسفل، **أوجد** سرعة الجسمين A وB بعد الانقسام.

الدرس ١-٩ — كمية التحرك والطاقة الميكانيكية

؟ سؤال الدرس:

تتصادم عربتان وتلتصقان معًا وتتحركان بسرعة أبطأ. إذا كانت كمية تحركهما الكلية محفوظة، فلماذا تنخفض طاقتهما الحركية الكلية، وإلى أي صور من الطاقة تنتقل؟

ستتعلم أن

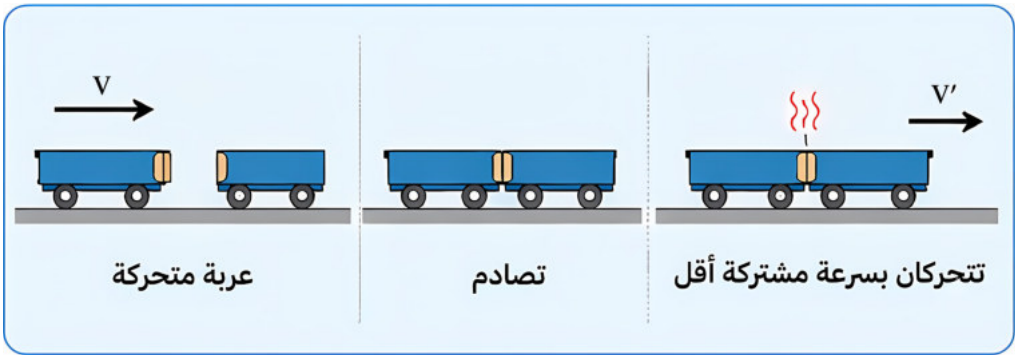
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تذكر** متى يتم حفظ كمية التحرك الكلية، وتميز بين التصادمات المرنة وغير المرنة.

٢. **تحسب** النقصان في طاقة الحركة الكلية أثناء تصادم غير مرن.

٣. **تفسر** كيف تنتقل طاقة الحركة إلى صور أخرى أثناء تصادم غير مرن.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر



شكل (1.9.1)

تصطدم عربة معملية متحركة بعربة ثانية ساكنة ابتدائيًا. وتتسبب وسادات لاصقة عند طرفيهما في التصاق العربتين وتحركهما بسرعة مشتركة بعد التصادم. وتكون سرعتهما المشتركة أقل من السرعة الابتدائية للعربة المتحركة. وقد يُسمع صوت قصير أثناء التصادم، وقد تتعرض العربتان والوسادتان لتشوه طفيف. وتشير هذه الملاحظات إلى أن بعض طاقة الحركة تنتقل إلى صور أخرى من الطاقة. قارن الحركة قبل التصادم وبعده.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) بعد التصاق العربتين، هل يكون كمية التحرك الكلية أقل أم تظل كما هي أم أكبر مما كانت عليه من قبل؟

(ب) ماذا يحدث للطاقة الحركية الكلية — هل تصبح أقل، أم تبقى كما هي، أم تصبح أكبر؟

حقيقة أساسية:

لنظام معزول:

$$\Sigma \vec{p}_{\text{قبل}} = \Sigma \vec{p}_{\text{بعد}}$$

ولكل جسم:

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

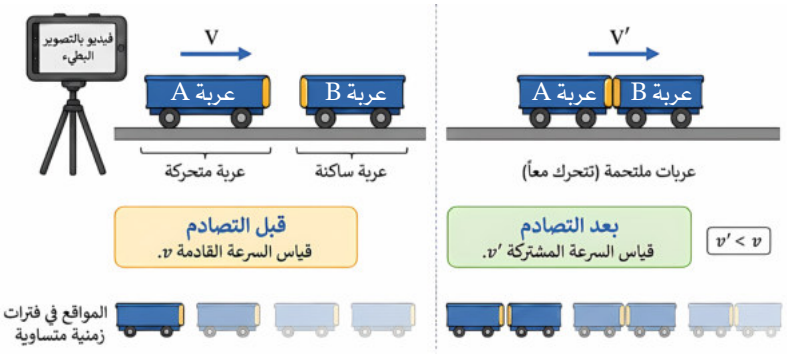
استكشف — كمية التحرك والطاقة الحركة في تصادم غير مرن

ما ستفعله: تسجل فيديو بالحركة البطيئة لعربتين تتصادمان، ثم تقارن حركتهما قبل التصادم وبعده.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- هاتف بخاصية تصوير الحركة البطيئة.
- عربتان معمليتان بوسادة لاصقة (خطاف وحلقة).
- شريط قياس يوضع بجانب المسار للمقياس.



شكل (2.9.1)

الخطوات:

١ قِس وسجّل كتلة كل عربة. ضع العربة B ساكنة على مسار أفقي قليل الاحتكاك.

٢ أطلق العربة A بحيث تصطدم بالعربة B. ويجب أن تتسبب الوسادات اللاصقة عند الطرفين المتقابلين في التصاق العربتين. سجّل التصادم كاملًا بالحركة البطيئة.

٣ ضع شريط قياس موازيًا للمسار وقريبًا من مسار العربتين. استخدم معدل إطارات الفيديو والمسافة المقطوعة عبر عدة إطارات لتحديد: سرعة العربة A قُبيل التصادم مباشرة؛ والسرعة المشتركة للعربتين الملتصقتين بعد التصادم مباشرة.

٤ لاحظ ما إذا كان صوت أو اهتزاز أو تشوه مرئي يحدث أثناء التصادم.

٥ أضف كتلة بإحكام إلى العربة B وكرر الإجراء. حافظ على السرعة الابتدائية للعربة A متقاربة قدر الإمكان.

المحاولة	كتلة العربة A (kg) / كتلة العربة B (kg)		السرعة قبل التصادم v(m/s)	السرعة المشتركة بعد التصادم v′(m/s) / هل لوحظ صوت أو تشوه؟	
عربة هدف أخف					
عربة هدف أثقل					

حلّل ما جمعته:

(أ) لكل محاولة، احسب كمية التحرك الكلية والطاقة الحركة الكلية قبل التصادم وبعده. هل القيم متساوية تقريبًا؟

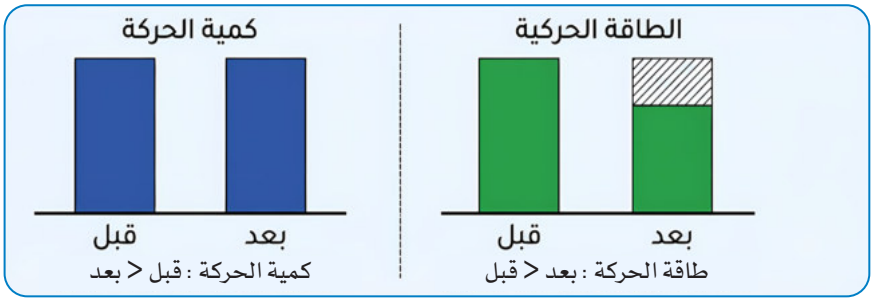
(ب) فسِّر كيف تمدنا ملاحظات الصوت أو الاهتزاز أو التشوه دليلًا على أن بعض الطاقة الحركة انتقلت إلى صور أخرى من الطاقة.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:
بمعدل إطارات ثابت، تمثِّل الأعداد المتساوية من فترات الإطارات فترات زمنية متساوية. قِس كلتا السرعتين عبر العدد نفسه من فترات الإطارات، قُبيل التصادم وبعده مباشرة.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تحركت العربتان معًا بسرعة مشتركة أقل من السرعة الابتدائية للعربة المتحركة. كما سُمع صوت قصير عند التصاق العربتين. ويُظهر استخدام الكتل والسرعات المقاسة نتيجة أدق: كانت كمية التحرك الكلية قبل التصادم وبعده متساوية تقريبًا، بينما كانت طاقة الحركة الكلية بعد التصادم أصغر. لم تُفقَد الطاقة الحركة. بل انتقل بعضها إلى صور أخرى من الطاقة، منها الطاقة الداخلية المرتبطة بالتشوه والاهتزاز، والصوت. ويفسر النموذج التالي كيف يمكن أن تُحفَظ كمية التحرك حتى عندما تنخفض طاقة الحركة.



شكل (3.9.1)

حقيقة أساسية:
في التصادم غير المرن، لا تُحفَظ طاقة الحركة. أما في التصادم المرن، فتُحفَظ الطاقة الحركة (على النقيض)

نقطة

- يُطلق على مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع للنظام اسم "الطاقة الميكانيكية". عندما يتحرك جسم كتلته m [كجم] بسرعة v [م/ث]، فإن طاقته الحركية Ek [جول] تُحسب بالعلاقة: $Ek = \frac{1}{2}mv^2$.
- عند تصادم الأجسام، تكون سرعتها النسبية بعد التصادم أقل من أو مساوية لسرعتها النسبية قبله؛ لذا، ففي حالات التصادم العادية (غير الانفجارية)، يحقق "معامل الارتداد" e — وهو النسبة بين السرعة النسبية بعد التصادم والسرعة النسبية قبله — الشرط: $0 \le e \le 1$. عندما تكون $e = 1$، يُسمى التصادم "تصادماً مرناً تماماً"؛ وعندما تكون $0 \le e < 1$، يُسمى "تصادماً غير مرن"؛ أما التصادم غير المرن الذي تكون فيه $e = 0$ فيُسمى "تصادماً غير مرن تماماً"، حيث تلتحم الأجسام لتصبح جسماً واحداً بعد التصادم.
- في التصادم المرن ($e=1$)، تُحفظ الطاقة الميكانيكية. أما في التصادم غير المرن ($0 \le e < 1$)، فتنقص الطاقة الميكانيكية؛ إذ يتحول جزء منها إلى طاقة داخلية مرتبطة بالتشوه والاهتزاز، وإلى طاقة صوتية.

تطبيق سريع:
تتحرك عربة واحدة كتلتها 2.0 kg بسرعة 4.0 m/s. احسب طاقتها الحركية بالجول.

صندوق المعادلات:

طاقة الحركة لجسم:	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$
بقاء كمية التحرك (نظام معزول):	$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A + m_B v'_B$
طاقة الحركة المفقودة:	$\Sigma E_{k,\text{قبل}} - \Sigma E_{k,\text{بعد}}$

الحالة غير المرنة تمامًا:

في التصادم، نقصت طاقة الحركة الكلية للعربتين. وتُعرَّف الطاقة الميكانيكية لنظام بأنها مجموع طاقتي الحركة و الوضع للنظام، وبما أن العربتين تحركتا على مسار أفقي، بقيت طاقة وضعهما الجاذبية ثابتة. لذا يقابل النقص في طاقة الحركة الكلية نقصًا في الطاقة الميكانيكية للنظام. ولا تُحفَظ الطاقة الميكانيكية في هذا التصادم غير المرن. إذ ينتقل بعض الطاقة الميكانيكية إلى طاقة داخلية، وتشوه، واهتزاز، وصوت. وعندما تتصادم الأجسام، تكون سرعتها النسبية بعد التصادم أقل من أو تساوي سرعتها النسبية قبل التصادم، لذا يحقق معامل الارتداد e، بالنسبة للتصادمات العادية (غير المرنة)، الشرط $0 \le e \le 1$.

عندما $e = 1$، يُسمى التصادم **تصادمًا مرنًا تمامًا**.

وعندما $0 \le e < 1$، يُسمى **تصادمًا غير مرن**.

ومن بين التصادمات غير المرنة، يُسمى التصادم الذي فيه $e = 0$ تحديدًا تصادمًا غير مرن تمامًا (إذ يصبحان جسمًا واحدًا بعد التصادم).

- في التصادم المرن $(e = 1)$، تُحفَظ الطاقة الميكانيكية.
- في التصادم غير المرن $(0 \le e < 1)$، تنخفض الطاقة الميكانيكية.

عند تصادم جسمين، تُعرف النسبة بين مقدار السرعة النسبية بعد التصادم ومقدارها قبل التصادم باسم "معامل الارتداد". ويعتمد معامل الارتداد هذا على مواد الجسمين المتصادمين. فإذا كانت سرعتا الجسمين قبل التصادم هما v_1 وv_2، وسرعتاهما بعد التصادم هما v_1' وv_2'، وكان معامل الارتداد هو e، فإن العلاقة تكون: $v_1' - v_2' = -e(v_1 - v_2)$.

مثال محلول:

الموقف:	تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 1.0 kg يمينًا بسرعة 4.0 m/s وتصطدم أماميًا بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها 1.5 kg. ومعامل الارتداد 0.25. أوجد ما يلي: (أ) السرعتين النهائيتين للكرتين بعد التصادم بـ m/s. (ب) الطاقة الميكانيكية المفقودة في التصادم بالجول. (بافتراض أن اتجاه اليمين موجب)
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $m_A = 1.0\,kg\,,\ v_A = +4.0\,m/s\,,\ m_B = 1.5\,kg\,,\ v_B = 0\,m/s\,,\ e = 0.25.$ **المطلوب:** (أ) السرعتان النهائيتان v'_A وv'_B (ب) الطاقة الميكانيكية المفقودة أثناء التصادم.
التمثيل:	لتكن سرعتا الكرتين الصغيرتين A وB بعد التصادم v'_A وv'_B.
الاستراتيجية:	استخدم حفظ كمية التحرك مع معادلة معامل الارتداد لتحديد السرعتين النهائيتين. ثم احسب طاقة الحركة الكلية قبل التصادم وبعده وأوجد الفرق.
الحل الموضح:	**(أ) من قانون حفظ كمية التحرك:** $1.0 \times 4.0 + 1.5 \times 0 = 1.0 \times v'_A + 1.5 \times v'_B$ $v'_A + 1.5\,v'_B = 4.0$ ..... (1) ومن معادلة معامل الارتداد: $v'_A - v'_B = -0.25(4.0 - 0)$ $v'_B - v'_A = 1.0$ ..... (2) وبحل (1) و(2): $v'_A = 1.0\,m/s, v'_B = 2.0\,m/s$ (ب) مجموع طاقة الحركة قبل التصادم $= \frac{1}{2} \times 1.0 \times 4.0^2 + \frac{1}{2} \times 1.5 \times 0^2 = 8.0\,J$ ومجموع طاقة الحركة بعد التصادم $= \frac{1}{2} \times 1.0 \times 1.0^2 + \frac{1}{2} \times 1.5 \times 2.0^2 = 3.5\,J$ الفرق: $\Delta E_K = EK_{\text{قبل}} - EK_{\text{بعد}} = 8.0\,J - 3.5\,J = 4.5\,J$

منطقية الحل:	بما أن $(e = 0.25 < 1)$، فإن التصادم غير مرن، لذا لا تُحفَظ الطاقة الميكانيكية. وتنخفض طاقة الحركة الكلية بمقدار $4.5\,J$.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر لماذا تُحفَظ كمية التحرك أثناء التصادم رغم أن الطاقة الميكانيكية لا تُحفَظ.

جرِّب بنفسك: تتحرك كرة صغيرة A كتلتها $2.0\,kg$ يمينًا بسرعة $4.0\,m\,s^{-1}$ وتصطدم اصطدامًا أماميًّا بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها $3.0\,kg$. وبعد التصادم، تلتصق الكرتان وتتحركان كجسم واحد. **أوجد** السرعة النهائية، ثم **احسب** الطاقة الحركة المفقودة بالجول.

حقيقة أساسية:
في الجزء (a)، تُعطى السرعتان بعد التصادم، لذا يمكن استخدام حفظ كمية التحرك للتحقق. وفي الجزء (ب)، يتحرك الجسمان معًا وتكون سرعتهما المشتركة مجهولة. استخدم حفظ كمية التحرك لحساب هذه السرعة أولًا.

حاول:

(أ) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها $2.0\,kg$ يمينًا بسرعة $4.0\,m\,s^{-1}$ وتصطدم أماميًّا على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها $1.0\,kg$ تتحرك يسارًا بسرعة $6.0\,m\,s^{-1}$. وبعد التصادم، تتحرك A بسرعة $1.0\,m\,s^{-1}$ يمينًا وتتحرك B بسرعة $4.0\,m\,s^{-1}$ يمينًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا. (علما بأن معامل الارتداد بين الكرتين 0.5)

شكل (4.9.1)

(i) استنتج أن كمية التحرك محفوظة في التصادم.

(ii) أوجد الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(ب) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها $2.0\,kg$ يمينًا بسرعة $4.0\,m\,s^{-1}$ وتصطدم أماميًّا على خط مستقيم بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها $3.0\,kg$، وتلتصقان معًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

شكل (5.9.1)

(i) أوجد السرعة النهائية للكرتين بـ $m\,s^{-1}$.

(ii) أوجد الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

في سياق جديد — منطقة التشوه

يكون تصادم المركبات غير مرن إلى حد كبير. فأثناء الارتطام، تتشوه منطقة التصادم (أي أن حدث تغير فيزيائي في الهيكل المعدني للسيارة نتيجة التصادم)، فترتد المركبة أقل وتنخفض طاقتها الحركية. ويتحول الانخفاض في الطاقة الحركة بصورة رئيسية إلى طاقة داخلية عبر التشوه الدائم والاهتزازات الداخلية والتسخين، بينما ينتقل جزء أصغر إلى المحيط كصوت. كما يزيد التشوه الزمن الذي تتغير خلاله كمية تحرك المركبة، مما يقلل متوسط القوة المؤثرة على السائق والركاب.

شكل (6.9.1)

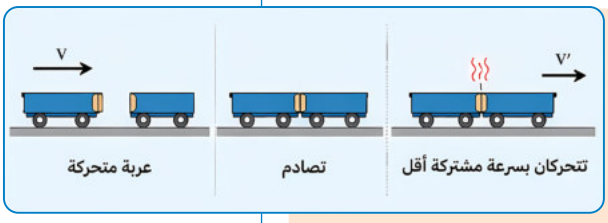
دورك الآن: فسِّر لماذا توفر السيارة المصممة بحيث عند وقوع حادث حماية أفضل لركابها مقارنة بالسيارة المصممة لتبقى صلبة؟

طبيعة العلم: الأدلة — إلى أين تذهب الطاقة الحركة "المفقودة"

في عام ١٨٥٠، نشر جيمس جول تجربته بالعجلة المجدافية في مجلة «فيلوسوفيكال ترانزاكشنز». فقد أدارت أثقال ساقطة مجدافًا يحرِّك ماءً، وأنتج الشغل الميكانيكي ارتفاعًا قابلًا للقياس في درجة حرارة الماء. وكان هذا دليلًا على أن الشغل لم يُفقَد بل تحول إلى طاقة داخلية (حرارية). وتتغيّر الطاقة الحركة «المفقودة» في تصادم غير مرن بالطريقة نفسها، فتصبح طاقة داخلية، يمكن قياسها كارتفاع في درجة الحرارة. وباختصار، يجب أن يُدعَم أي ادعاء علمي بدليل قابل للقياس.

دورك الآن: اقترح لماذا يُعَدّ ارتفاع درجة الحرارة المقاس دليلًا أقوى من مجرد القول بأن الطاقة قد فُقدت.

سؤال الدرس، وإجابته:



تصطدم عربتان وتلتصقان معًا وتتحركان بسرعة أبطأ.

إذا كانت كمية تحركهما الكلية محفوظة، فلماذا تقل طاقة حركتهما الحركية الكلية، وإلى أي صور من الطاقة تنتقل؟

تُحفَظ كمية التحرك الكلية أثناء التصادم. لكن النقصان في الطاقة الحركة الكلية للجسمين المتصادمين يتحول بصورة رئيسية إلى طاقة داخلية عبر التشوه والاهتزازات الداخلية والتسخين، بينما تحمل موجات الصوت جزءًا أصغر منه.

تمرين:

(أ) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 2.0 kg يمينًا بسرعة $8.0\ m\,s^{-1}$ وتصطدم على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها 1.0 kg تتحرك أمامها بسرعة $2.0\ m\,s^{-1}$. وبعد التصادم، تتحرك A بسرعة $5.0\ m\,s^{-1}$ وتتحرك B بسرعة $8.0\ m\,s^{-1}$، كلتاهما يمينًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) استنتج أن كمية التحرك محفوظة في التصادم.

(ii) أوجد طاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(ب) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 0.10 kg يمينًا بسرعة $3.0\ m\,s^{-1}$ وتصطدم أماميًّا على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها 0.20 kg تتحرك يسارًا بسرعة $2.0\ m\,s^{-1}$. وبعد التصادم، تتحرك A بسرعة $1.0\ m\,s^{-1}$ يسارًا وتكون B ساكنة. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) استنتج أن كمية التحرك محفوظة في التصادم.

(ii) أوجد طاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(جـ) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 1.0 kg يمينًا بسرعة $4.0\ m\,s^{-1}$ وتصطدم اصطدامًا أماميًّا على خط مستقيم بكرة صغيرة ساكنة B كتلتها 1.5 kg، وتلتصقان معًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) أوجد سرعة الكرتين الملتصقتين بـ $m\,s^{-1}$.

(ii) أوجد الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

(د) تتحرك كرة صغيرة A كتلتها 0.20 kg يمينًا بسرعة $10\ m\,s^{-1}$ وتصطدم أماميًّا على خط مستقيم بكرة صغيرة B كتلتها 0.30 kg تتحرك يسارًا بسرعة $5.0\ m\,s^{-1}$، وتلتصقان معًا. اعتبر اتجاه اليمين موجبًا.

(i) أوجد سرعة الكرتين الملتصقتين بـ $m\,s^{-1}$.

(ii) أوجد طاقة الحركة المفقودة بعد التصادم بالجول.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تصطدم عربة A كتلتها 1.0 kg تتحرك بسرعة $4.0\ m\,s^{-1}$ بعربة ساكنة B كتلتها 1.5 kg، وتلتصق العربتان معًا.

(أ) أوجد السرعة النهائية للعربتين الملتصقتين.

(ب) احسب الطاقة الحركة المفقودة بعد التصادم.

الدرس ١-١٠ — الحركة الدائرية المنتظمة والقوة المركزية

؟ سؤال الدرس:

تدور كرة في دائرة المعلقة بنهاية خيط. إذا قُطِع الخيط، في أي اتجاه ستتحرك الكرة؟

ستتعلم أن

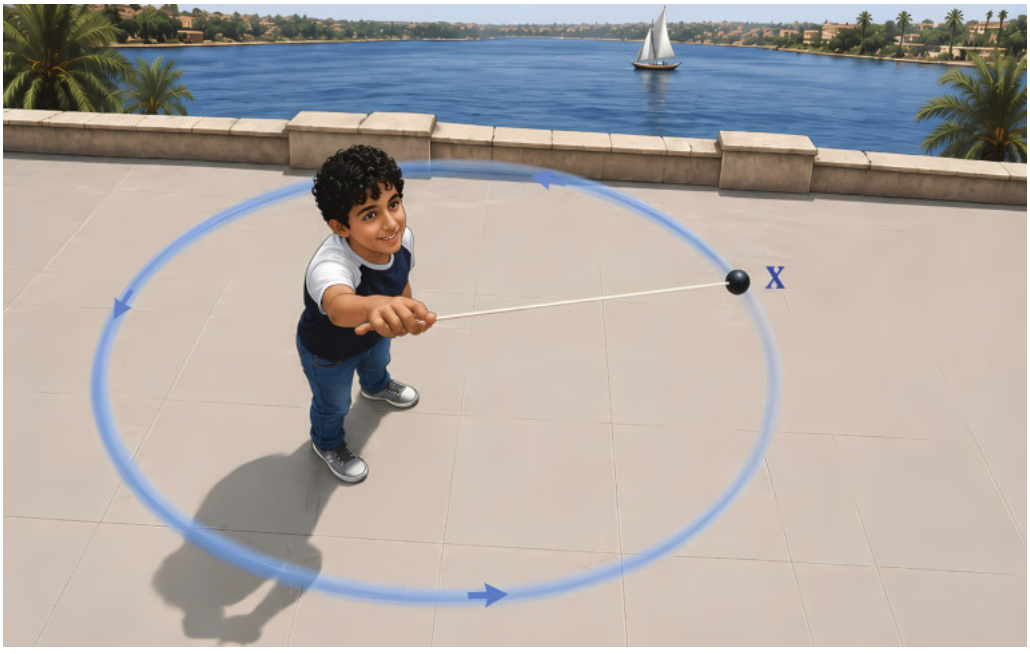
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** الزمن الدوري (T)، والتردد (*f*)، والسرعة الزاوية (ω)، والسرعة الخطية (v) لجسم في حركة دائرية منتظمة.

٢. **تحدد** العجلة المركزية (a_c) للجسم وتحدد القوة التي توفرها.

٣. **تفسر** لماذا لا تؤثر قوة تعمل فى إتجاه الخارج (طاردة مركزية) على جسم يتحرك في دائرة.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



أدر كرة بواسطة خيط في دائرة أفقية فوق رأسك. يبقى الخيط مشدودًا، وتشعر يدك بجذب إلى الداخل ثابت طالما بقيت الكرة تتحرك في الدائرة. والآن افترض أن الخيط قُطع في اللحظة التي تكون فيها الكرة عند النقطة X. فمع انعدام أي قوة من الخيط، تصبح الكرة حرة. توقَّع المسار الذي تتبعه الكرة بعد النقطة X.

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) عندما يُقطع الخيط عند النقطة X، هل تتحرك الكرة:

(i) في خط مستقيم إلى الخارج على طول خط الخيط، (ii) على طول المماس للدائرة، أم (iii) تتبع مسارًا منحنيًا تدريجيًّا؟

(ب) بينما تتحرك الكرة حول الدائرة بسرعة ثابتة، هل تؤثر عليها أي قوة تعمل الى الخارج؟ فسِّر إجابتك.

حقيقة أساسية:

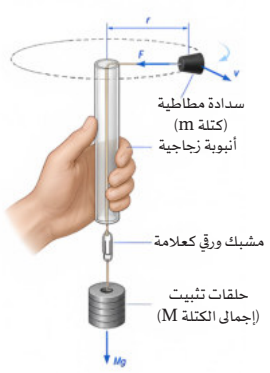
تتغيّر السرعة المتجهة عند تغيّر اتجاهها، لا عند تغيّر مقدارها فقط. لذا فإن جسمًا يتحرك في دائرة بسرعة ثابتة لا يزال يتسارع.

المعادلات:

$v = 2\pi r / T = \omega r$

$a_c = v^2 / r = \omega^2 r$

استكشف — اختبار معادلة القوة المركزية



ما ستفعله: تقيس سرعة جسم يتحرك في دائرة تحت تأثير قوة جاذبة مركزية معلومة، ثم تختبر المعادلة $F = mv^2/r$.

الزمن: 15 دقيقة.

ما تحتاجه:

- سدادة مطاطية مربوطة بإحكام بخيط قوي طوله نحو 0.5 m
- نظارات واقية، يرتديها كل من في المكان
- مساحة واسعة وخالية
- طباشير أو شريط أرضي لرسم شبكة: دائرة، ومركزها، ونقاط الساعة 12 و3 و6 و9

ملاحظة سلامة:
أدر برفق في مساحة خالية، بعيدًا عن الآخرين والنوافذ والمصابيح. استخدم سدادة مطاطية — ولا تستخدم أبدًا جسمًا صلبًا. ارتدِ نظارات واقية.

الخطوات:

١ ارتدِ النظارات الواقية وتحقق من أن المساحة حولك خالية تمامًا. إذا لم تكن شبكة الأرضية مرسومة بالفعل، ارسم بالطباشير دائرة مع مركزها ونقاط الساعة 12 و3 و6 و9.

٢ لُفَّ الطرف الحر من الخيط حول إصبع واحد ثم قم بتدوير السدادة برفق في حركة دائرية أفقية فوق الشبكة. اشعر كيف يشد الخيط إصبعك، ولاحظ اتجاه الشد.

٣ مع إبقاء الدائرة ثابتة وبطيئة، اختر نقطة إطلاق على الشبكة. في اللحظة التي تمر فيها السدادة بتلك النقطة، افتح إصبعك لتحرير الخيط.

٤ راقب الاتجاه الذي تتحرك فيه السدادة أولًا: مباشرة إلى الخارج على طول الخط من المركز، أم على طول المماس. سجّل نقطة الإطلاق واتجاه الطيران.

٥ أوقف السدادة، ثم كرر التجربة لخمس نقاط إطلاق مختلفة حول الدائرة، مع إبقاء السرعة متقاربة في كل مرة.

٦ قارن محاولاتك الخمس وقرر ما إذا كان اتجاه الطيران يتبع نمطًا ثابتًا.

نقطة الإطلاق على الشبكة	اتجاه الطيران (إلى الخارج من المركز / على طول المماس)

سجل أيضًا: أثناء دوران السدادة، في أي اتجاه يشد الخيط إصبعك؟

حلّل ما جمعته:

(أ) عبر إطلاقاتك الخمس، ما النمط — هل تتحرك السدادة إلى الخارج من المركز، أم على طول المماس؟

(ب) بينما كانت تدور، بماذا شعر إصبعك — دفعًا إلى الخارج أم جذبًا إلى الداخل — وأي جسم جذب الآخر؟

اكتب، في سطرين، لماذا يجب أن تتحرك السدادة أسرع عند إضافة حلقات معدنية أكثر عند نصف القطر نفسه — قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، يسحب (يشد) الخيط السدادة بثبات إلى الداخل، نحو مركز الدائرة – ولم يسحبها أبدًا إلى الخارج – وعندما تم تحرير السدادة، تلاشى الشد، وتحركت السدادة في خط مستقيم مماس للدائرة عند نقطة التحرير. ربما كنت تتوقع أن تتحرك السدادة إلى الخارج على طول نصف القطر؛ لكن ملاحظاتك تُظهر عكس ذلك. وإليك النموذج الذي تدعمه أدلتك.

الحركة الدائرية

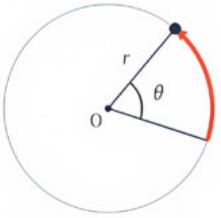
عندما يتحرك جسم في دائرة بسرعة ثابتة، تُسمى الحركة بالحركة الدائرية المنتظمة.

السرعة الزاوية ω هي الإزاحة الزاوية لكل وحدة زمن، بوحدة راديان في الثانية ($rad\ s^{-1}$). فإذا دار الجسم بزاوية θ (بالراديان) خلال زمن t (بالثانية): $\omega = \frac{\theta}{t}$.

والزمن الدوري T هو لعمل اللازم لزمن دورة واحدة، والتردد f هو عدد الدورات في الثانية (بوحدة Hz)

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

وبالنسبة لدائرة نصف قطرها r، يكون طول القوس المقطوع عندما يدور الجسم بزاوية θ هو $l = r\theta$، لذا تكون السرعة الخطية:

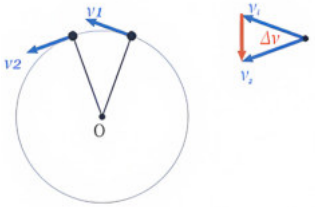


$$v = \frac{l}{t} = \frac{r\theta}{t} = r\omega$$

ورغم أن السرعة ثابتة، فإن السرعة المتجهة تتغيّر باستمرار في اتجاهها، لذا فإن الجسم يكتسب عجلة مركزية. وفي فترة قصيرة Δt، يحافظ متجه السرعة على مقداره v لكنه يدور بالزاوية الصغيرة نفسها $\Delta\theta = \omega\Delta t$.

ويكون التغيّر الناتج في السرعة المتجهة مقداره $\Delta v = v\Delta\theta$، ويتجه نحو مركز الدائرة. وبالقسمة على t، نحصل على Δ العجلة المتجهة نحو المركز – أي العجلة المركزية:

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



وتبعًا لقانون نيوتن الثاني، تتطلب هذه العجلة قوة محصلة في الاتجاه نفسه – أي القوة المركزية:

حقيقة أساسية:

القوة المركزية هي القوة المحصلة المؤثرة على الجسم، وتتجه دائمًا نحو مركز الدائرة. وهي ليست قوة خارجية إضافية — فلا توجد «قوة طاردة مركزية» على الجسم نفسه.

أزِل القوة المتجهة نحو الداخل، سيستمر الجسم في التحرك في خط مستقيم في اتجاه المماس.

نقطة

- عندما يتحرك جسم في مسار دائري بسرعة ثابتة، تُسمى هذه الحركة "حركة دائرية منتظمة". وتُعرف الزاوية التي يقطعها الجسم أثناء الدوران في وحدة الزمن بـ "السرعة الزاوية": فإذا دار الجسم بزاوية θ (بالراديان) خلال زمن t (بالثانية)، فإن $\omega = \frac{\theta}{t}$، وتُقاس بوحدة الراديان لكل ثانية (rad/s).
- الزمن الدوري والتردد: يُسمى الزمن T (بالثانية) اللازم لإتمام دورة واحدة بـ "الزمن الدوري": $T = 2\pi/\omega$. أما عدد الدورات في وحدة الزمن فيُعرف بـ "التردد" f (بالهرتز): $f = 1/T$. وفي مسار دائري نصف قطره r (بالمتر)، تكون المسافة المقطوعة $l = r\theta$، وبالتالي تكون السرعة $v = r\omega$.
- يتغير اتجاه الحركة حتى وإن ظل مقدار السرعة ثابتًا، مما يعني أن الجسم يكتسب تسارعًا $a = r\omega^2 = v^2/r$، ويكون هذا التسارع موجهاً دائماً نحو مركز الدائرة. وتُسمى القوة المحصلة المسببة لهذا التسارع بـ "القوة الجاذبة المركزية"، وتُكتب معادلة الحركة باتجاه المركز على الصورة: $F = mv^2/r$.

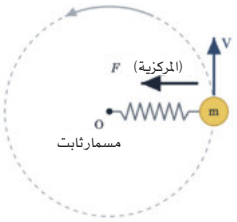
وهذه المعادلة هي في الواقع صيغة للمعادلة $F = ma$ ولكنها مطبقة في اتجاه المركز.

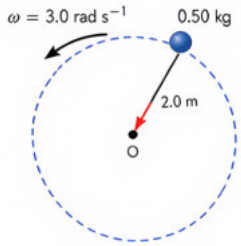
صندوق المعادلات:

السرعة الزاوية ω :	$\omega = \frac{v}{t}$
العجلة المركزية :	$a_c = r\omega^2 = \frac{v^2}{r}$
القوة المركزية :	$F_c = m r \omega^2 = \frac{m v^2}{r}$

مثال محلول:

حقيقة أساسية:
تتحرك كرة حركة دائرية أفقية نصف قطرها 0.20m بزمن دوري مقداره 0.50s. احسب سرعتها الخطية.

الموقف:	تُربَط كرة كتلتها 0.50 kg بنابض (زنبرك) وتتحرك حركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس. ويكون النابض مشدودًا عن طوله الطبيعي، وتوفر قوته المرنة القوة المركزية اللازمة للحركة الدائرية.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $k = 20\ N\ m^{-1}$ ، $L = 0.25\ m$ ، $L_0 = 0.15\ m$ ، $m = 0.50\ kg$. **المطلوب:** (أ) قوة المرونة (ب) السرعة (جـ) العجلة المركزية.
التمثيل:	أظهر القوى المؤثرة على الكرة، ثم أوجد القوة الناتجة الموجهة نحو المركز — وهذه القوة الناتجة هي القوة الجاذبة المركزية. 
الاستراتيجية:	١. أوجد مقدار قوة المرونة من $F = kx$. حيث x هو معامل الاستطالة ٢. استخدم $F = \frac{mv^2}{r}$ لإيجاد v. ٣. استخدم $a_c = \frac{v^2}{r}$ لإيجاد العجلة المركزية a_c.
الحل الموضح:	(أ) $x = L - L_0 = 0.25 - 0.15 = 0.10\ m$ $F = kx = 20 \times 0.10 = 2.0\ N$ $F = 2.0\ N$ (ب) $\frac{mv^2}{r} = F \Rightarrow \frac{0.50\ v^2}{0.25} = 2.0$ $v^2 = 1.0 \Rightarrow v = 1.0\ m\ s^{-1}$ $v = 1.0\ m\ s^{-1}$ (جـ) $a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{1.0}{0.25} = 4.0\ m\ s^{-2}$ $a_c = 4.0\ m\ s^{-2}$
منطقية الحل:	الاستطالة 0.10 m، لذا $F = kx = 2.0\ N$ — قوة صغيرة، بما يتفق مع ثابت النابض المنخفض. وتقابل $v = 1.0\ m\ s^{-2}$ دورًا $T = 2\pi r / v \approx 1.6\ s$، وهو معقول لهذا نصف القطر.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تكون القوة المرنة التي يؤثر بها النابض القوة الوحيدة التي تسهم في القوة المحصلة نحو المركز في هذا الموقف؟



جرِّب بنفسك: يخضع جسم لحركة دائرية منتظمة، يُتم فيها 20 زمنًا دوريًّا خلال 5.0 s على محيط دائرة نصف قطرها 0.20 m.

أوجد ما يلي:

(أ) الزمن الدوري (ب) التردد الدوراني (جـ) السرعة الزاوية (د) السرعة الخطية.

حاول:

(أ) يخضع جسم لحركة دائرية منتظمة، يُتم فيها 10 دورات خلال 2.0 s على دائرة نصف قطرها 0.40 m. أوجد الزمن الدوري بالثانية.

(ب) بالنسبة للحركة نفسها، أوجد سرعتها الزاوية بوحدة $rad\ s^{-1}$ وسرعتها الخطية بوحدة $m\ s^{-1}$.

(جـ) تخضع كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg مربوطة بخيط طوله 2.0 m لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس بسرعة زاوية $3.0\ rad\ s^{-1}$. أوجد عجلتها المركزية.

(د) تُربَط كرة صغيرة كتلتها 8.0×10^{-2} kg بأحد طرفَي نابض طوله الابتدائي 0.13 m وثابتة $60\ N\ m^{-1}$، وتُجعَل تخضع لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس حول الطرف الآخر للنابض، مما يؤدي إلى طول نابض 0.15 m. أوجد ما يلي لأقرب رقمين معنويين:

(i) أوجد مقدار القوة المرنة (قوة الاستعادة) للنابض بالنيوتن.

(ii) أوجد سرعة الكرة الصغيرة بـ $m\ s^{-1}$.

(iii) أوجد السرعة الزاوية للكرة الصغيرة بـ $rad\ s^{-1}$.

سؤال للربط:

لماذا لا تبذل القوة المحصلة نحو الداخل أي شغل على جسم يتحرك بسرعة ثابتة في دائرة؟

في سياق جديد — دورة لعصر الغسالة

أثناء دورة العصر، تتحرك الملابس المبللة مع الأسطوانة الدوارة في مسار دائري. وتوفر قوة رد الفعل العمودي التي يؤثر بها العمودية السطح الداخلي للأسطوانة معظم القوة الناتجة المتجهة إلى الداخل اللازمة لهذه الحركة. عند فتحة في الأسطوانة، لا يوجد جدار صلب لممارسة قوة التلامس الداخلية المطلوبة على الماء. ولذلك يستمر الماء في حركته بسرعته المماسية اللحظية. ونظرًا لأن الأسطوانة تنحرف عن هذا المسار المستقيم، يمر الماء عبر الفتحة ويتم تجميعه في الحوض الخارجي. ويخرج الماء من الأسطوانة لأنه لم يعد مقيدًا باتباع مساره الدائري

دورك الآن: لماذا يمر الماء عبر الثقوب في الأسطوانة الدوّارة بينما تبقى الملابس مضغوطة على الجدار الداخلي؟

طبيعة العلم: النظريات — علاقة قبل إطار أشمل

في عام ١٦٥٩، اشتق كريستيان هويغنس علاقة للحركة الدائرية المنتظمة. وبالتدوين الحديث، تكافئ نتيجته في المقدار $F_c = mv^2/r$. وقد توصَّل هويغنس إلى هذه العلاقة هندسيًّا، قبل أن توفر قوانين نيوتن إطارًا أشمل يربط القوة المحصلة بالعجلة. وأظهرت نظرية نيوتن للجاذبية

الكونية لاحقًا أن الجاذبية توفر القوة الداخلية التي تُبقي الكواكب في مداراتها. ويوضح هذا كيف يمكن إرساء علاقة رياضية مفيدة قبل أن تصبح جزءًا من إطار نظري أشمل.

دورك الآن: اذكر كمية واحدة يمكن لعلاقة هويغنس حسابها، وسؤالًا واحدًا لا يمكنها الإجابة عنه.

سؤال الدرس، وإجابته:

تدور كرة في دائرة بواسطة خيط. إذا قُطع الخيط، في أي اتجاه تتحرك الكرة؟

تتحرك على طول المماس للدائرة عند نقطة التحرير – أي الاتجاه الذي كانت تتحرك فيه بالفعل – لا إلى الخارج بعيدًا عن المركز.

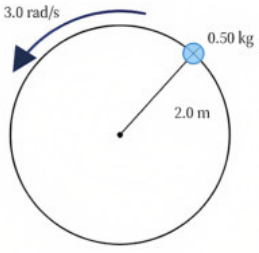
فبينما كانت تتحرك في الدائرة، أبقاها الجذب إلى الداخل لشد الخيط، أي القوة المركزية، على مسارها الدائري. ولا توجد قوة إلى الخارج (طاردة مركزية)، فالجذب إلى الخارج الذي تشعر به في يدك هو جذب الخيط ليدك. وعندما يُقطع الخيط، تختفي هذه القوة المتجهة الى الداخل، فلا تعود توجد قوة تُغيّر اتجاهها، وتستمر في خط مستقيم على طول المماس.

حقيقة أساسية:

قبل حل مسألة حركة دائرية، حدِّد أولًا القوة المؤثرة نحو مركز الدائرة.

تمرين:

(أ) رُبطت كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg بأحد طرفَي خيط طوله 2.0 m، وجُعلت تخضع لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس حول الطرف الآخر للخيط، وأصبحت سرعتها الزاوية $3.0\ rad\ s^{-1}$.

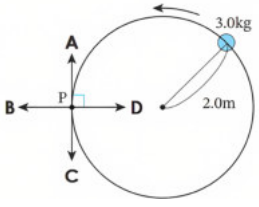


(i) أوجد سرعة الكرة الصغيرة بـ $m\ s^{-1}$.

(ii) أوجد عجلة الكرة الصغيرة بـ $m\ s^{-2}$.

(iii) أوجد مقدار القوة اللازمة لاستمرار الحركة الدائرية بالنيوتن.

(ب) كما في الشكل على اليسار، يتحرك جسم كتلته 3.0 kg في دائرة نصف قطرها 2.0 m بسرعة ثابتة، ليصنع دورة كاملة واحدًا خلال 4.0 s. افترض أن $\pi = 3.14$.



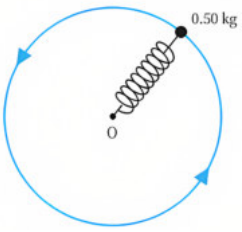
(i) أوجد السرعة الزاوية للجسم في الحركة الدائرية بـ $rad\ s^{-1}$.

(ii) أوجد سرعة الجسم في الحركة الدائرية بـ $m\ s^{-1}$.

(iii) أوجد مقدار العجلة بـ $m\ s^{-2}$. وأيضًا، عند النقطة P في الشكل، أي اتجاه من A إلى D هو اتجاه العجلة؟ أجب برمز.

(iv) أوجد مقدار القوة المركزية اللازمة لهذه الحركة الدائرية بالنيوتن.

(جـ) تُربَط كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg بأحد طرفَي نابض طوله الأصلي (الطبيعي) 0.10 m وثابته $30\ N\ m^{-1}$، وتُجعَل تخضع لحركة دائرية منتظمة على سطح أفقي أملس حول الطرف الآخر للنابض. إذا كانت السرعة الزاوية الناتجة $6.0\ rad\ s^{-1}$، أوجد استطالة النابض بالمتر.



الدرس ١-١١ — الحركة الدائرية: الأفقية والرأسية

؟ سؤال الدرس:
لماذا يمكن أن يبقى الماء داخل دلو عند أعلى نقطة في دائرة رأسية؟

ستتعلم أن

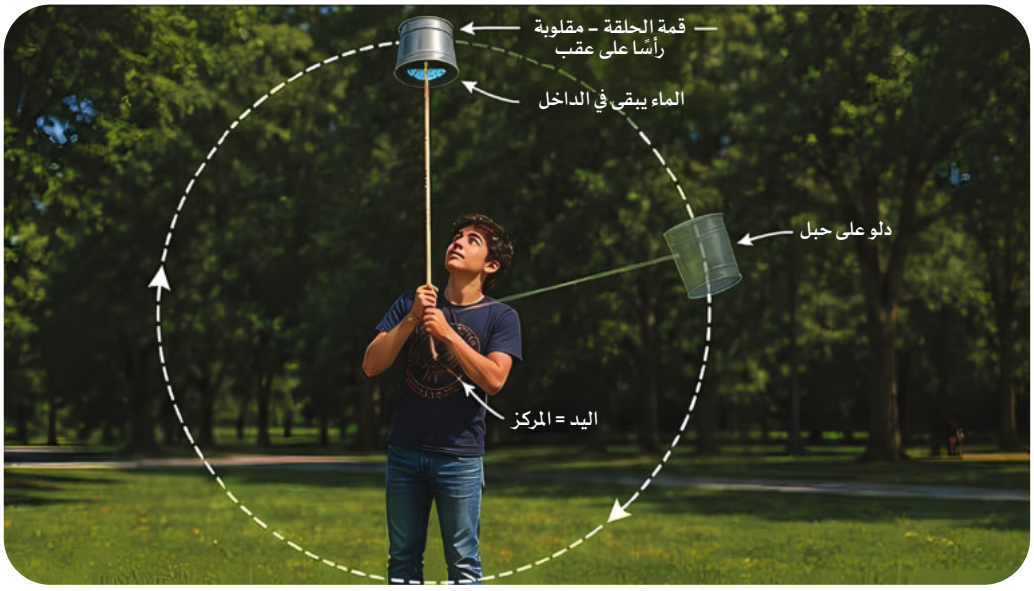
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحدد** القوى في الحركة الدائرية الأفقية والرأسية.

٢. **تحلل** الحركة الدائرية الأفقية والرأسية.

٣. **تحدد** قوة الشد وأقل سرعة لازمة في الحركة الدائرية الرأسية.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



اربط دلوًا صغيرًا يحتوي على ماء بحبل وحرِّكه بسرعة في دائرة رأسية فوق رأسك. عند أعلى نقطة في الدائرة، يكون الدلو مقلوبًا، ومع ذلك يبقى الماء داخله ولا ينسكب. والآن قلِّل سرعة الدلو تدريجيًّا. عند سرعة معيّنة، يبدأ الماء بالانسكاب بالقرب من أعلى نقطة في المسار الدائري. قبل أن تكمل القراءة، تخيَّل الدلو عند أعلى نقطة في حركته وحدد ما الذي يُبقي الماء داخله.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) عند أعلى نقطة، ما الذي يُبقي الماء داخل الدلو: قوة الشد في الحبل، أم دفع الدلو، أم الجاذبية، أم لا شيء على الإطلاق؟

(ب) هل توجد أقل قيمة للسرعة عند أعلى نقطة يتسرب الماء دونها؟ وإذا كان الأمر كذلك، ما الذي يحدد أقل قيمة للسرعة؟

استكشف — تحريك دلو ماء في دائرة رأسية

ما ستفعله: ستتعرف على السرعة اللازمة لتحريك دلو من الماء في دائرة رأسية للحفاظ على الماء بداخله، والمكان الذي يخرج منه الماء من الدلو لأول مرة عندما تكون السرعة بطيئة للغاية.

الزمن: 30 دقيقة.

ما تحتاجه:

- دلو صغير بمقبض، أو كوب بلاستيكي مربوط بإحكام بخيط قوي.
- ماء بكمية كافية لملء جزء من الدلو.
- هاتف أو كاميرا بخاصية الحركة البطيئة.
- مساحة خارجية واسعة وخالية.

ملاحظة سلامة:

نفِّذ النشاط في مساحة خارجية واسعة وخالية، بعيدًا عن الآخرين والنوافذ. استخدم كمية صغيرة فقط من الماء، وتحقق من إحكام المقبض أو الخيط قبل كل محاولة.

الخطوات:

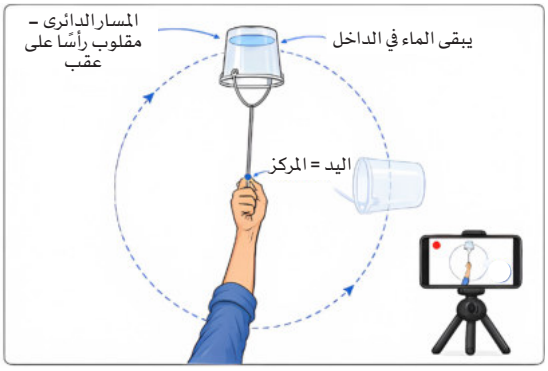
١ املأ جزءًا من الدلو بالماء. أمسك المقبض وحرِّك الدلو في دائرة رأسية بسرعة ثابتة بجانبك، بسرعة كافية لبقاء الماء طوال الدورة الكاملة.

٢ اطلب من زميل تصوير الحركة الدائرية بالحركة البطيئة، مع ظهور الدورة كاملة.

٣ قلِّل السرعة تدريجيًّا، في كل زمن دوري، حتى يبدأ الماء في الانسكاب الدلو أولًا.

٤ من مقطع الحركة البطيئة، حدِّد أين على الدائرة ينسكب الماء أولًا — عند الأسفل، أم عند الجانب، أم بالقرب من الأعلى؟

٥ قارن سرعة الدلو عند الأعلى عندما يبدأ الماء بالانسكاب بسرعته هناك في المحاولة الأسرع التي تُبقي الماء بالداخل.



سرعة المحاولة	هل انسكب الماء؟ (نعم/لا)	أين ينسكب الماء من الدلو أولًا؟
سريعة		
متوسطة		
بطيئة		

حلِّل ما جمعته:

(أ) عند الانسكاب الأول، في أي مكان على الدائرة يبدأ الماء في الخروج من الدلو — في القاع، أم على الجانب، أم بالقرب من القمة؟

(ب) اشرح لماذا يجب تحريك الدلو بسرعة كافية حتى يظل الماء محجوزا في الجزء العلوي. ما الذي يوفر القوة التي تحافظ على حركة الماء في دائرة في ذلك الموضع، وماذا يحدث عندما تكون سرعة الدوران بطيئة جدًّا؟

اكتب، في سطرين، ما الذي يجب أن يكون صحيحًا بشأن السرعة عند الأعلى ليبقى الماء بالداخل — قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

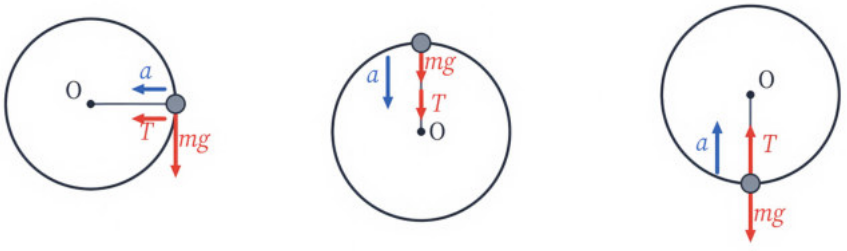
في نشاط الاستكشاف، بقي الماء داخل الدلو طوال حركته في دائرة رأسية عندما كانت سرعة الدلو عالية بما يكفي. ومع تقليل السرعة تدريجيًّا، بدأ الماء بالانسكاب الدلو أولًا بالقرب من أعلى نقطة في المسار الدائرى. وقد يبدو للوهلة الأولى أن قوة صاعدة لازمة لإبقاء الماء في الدلو عند الأعلى. لكن فيديو الحركة البطيئة يُظهر خلاف ذلك، فالقوة المحصلة المطلوبة تتجه نحو مركز المسار الدائري، وهو عند الأعلى إلى أسفل رأسيًّا. وتؤيد أدلة التجربة نموذج الحركة الدائرية الرأسية، الذي تتغيّر فيه السرعة حول الدائرة.

نصيحة امتحانية:

تأكد من فهمك للأشكال التوضيحية والطريقة المستخدمة لحساب الشد في الخيط عندما يتحرك جسم في دائرة رأسية.

الحركة الدائرية الرأسية:

اعتبر جسمًا كتلته m، مربوطًا بخيط طوله r، يتحرك في حركة دائرية رأسية. تتغيّر سرعته الآن حول الدائرة – تكون أكبر ما يمكن عند قاع المسار، وأقل ما يمكن عند الأعلى. ويُظهر الشكل الجسم في ثلاثة مواضع وكيفية إيجاد الشد عند كل منها، حيث v هي سرعته عند ذلك الموضع. ويكون الشد أقل ما يمكن عند الأعلى وأكبر ما يمكن عند الأسفل.



$$T = \frac{mv^2}{r} \qquad T + mg = \frac{mv^2}{r} \qquad T - mg = \frac{mv^2}{r}$$

$$\therefore T = \frac{mv^2}{r} - mg \qquad \therefore T = \frac{mv^2}{r} + mg$$

أقل قيمة للسرعة عند القمة:

في الجزء العلوي من الدائرة، يعمل كل من قوة الشد (T) والوزن (mg) في اتجاه المركز، لذا:

$$\frac{mv^2}{r} = T + mg$$

الخيط يقوم بالسحب (الشد) فقط، لذا لا يمكن أن تكون قوة الشدّ سالبة؛ وعند حالة الاتزان (الحالة الحرجة) يصبح الشدّ صفرًا تمامًا. $T = 0$

$$\frac{mv^2}{r} = mg$$

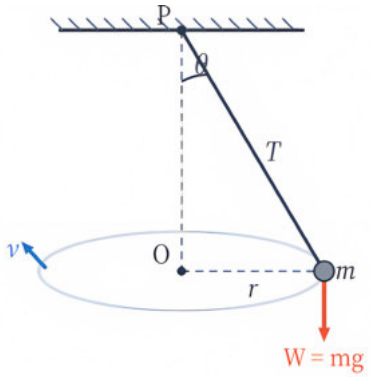
وتتعين أقل سرعة من العلاقة:

$$v_{min} = \sqrt{gr}$$

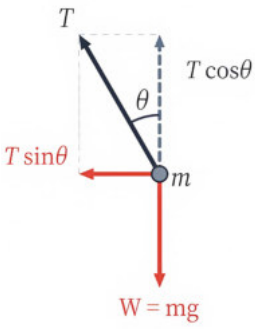
هذه هي أقل قيمة للسرعة اللازمة لكي يحافظ الجسم على حركته الدائرية دون أن يرتخي الخيط عند أعلى نقطة في الدائرة.

البندول المخروطي:

اعتبر جسمًا كتلته m مربوطًا بخيط PQ طوله l. وتكون l مثبَّتة عند دعامة، ويتحرك الجسم في دائرة أفقية نصف قطرها r. وعندما يتحرك الجسم بسرعة ثابتة، يصنع الخيط زاوية ثابتة θ مع الرأسي.



يوضح الشكل القوى المؤثرة على الجسم: وزنه W = mg وقوة الشد T، التي تُحلَّل إلى مركبة أفقية T sin θ ومركبة رأسية T cos θ. وبما أن الجسم يتحرك في مسار دائري، فلا بد أن تؤثر عليه قوة جاذبة مركزية باتجاه مركز الدائرة O. وتنشأ القوة بواسطة المركبة الأفقية لقوة الشد، T sin θ. باستخدام المعادلة $F = ma_c$



$$(1) \quad T\sin\theta = \frac{mv^2}{r}$$

$$(2) \quad T\cos\theta = mg$$

بالتعويض من (1) و(2):

$$\frac{T\sin\theta}{T\cos\theta} = \frac{\frac{mv^2}{r}}{mg}$$

$$\tan\theta = \frac{v^2}{rg}$$

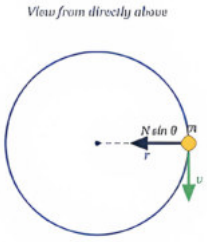
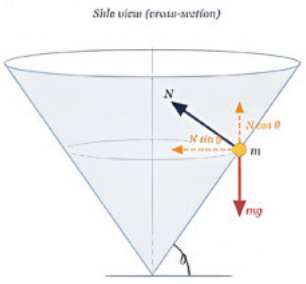
نقطة

- بالنسبة لكرة تتحرك على السطح الداخلي الأملس لوعاء مخروطي، تتجه محصلة القوة العمودية والوزن نحو مركز المسار الدائري؛ وفي حالة مسار دائري نصف قطره r يميل سطحه المائل بزاوية θ على الأفقي (مما يجعل القوة العمودية تميل بالزاوية نفسها θ على الرأسي)، تكون العلاقة: $v^2 = gr\tan\theta$.
- لا تُعد الحركة في مسار دائري رأسي حركة دائرية منتظمة؛ إذ تكون السرعة في أقصى قيمتها عند أسفل المسار وفي أدنى قيمتها عند أعلاه، وتتغير قوة الشد تبعاً لذلك. لذا، ينبغي صياغة معادلة الحركة في اتجاه المركز عند كل لحظة.
- يتمكن الجسم بالكاد من تجاوز أعلى نقطة في المسار عندما تنخفض قوة الشد لتصبح صفرًا (T = 0)، وحينها يوفر الوزن وحده القوة الجاذبة المركزية؛ مما يؤدي إلى العلاقة: $v^2_{min} = gr$.

صندوق المعادلات:

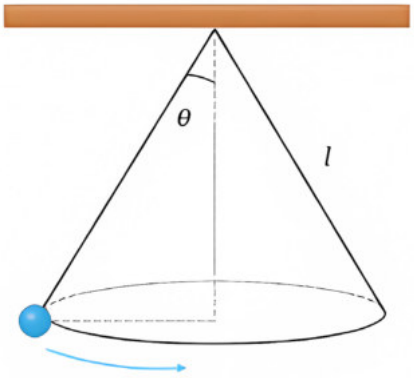
أقل قيمة لقوة الشد T (عند القمة)	$T = \frac{mv^2}{r} - mg$
أقصى قيمة لقوة الشد T (عند الأسفل)	$T = \frac{mv^2}{r} + mg$
أقل قيمة للسرعة (عند القمة)	$v_{min} = \sqrt{gr}$

مثال محلول:

الموقف:	تتحرك كرة صغيرة كتلتها m حركة دائرية منتظمة على السطح الداخلي الأملس لوعاء مخروطي. وتتحرك حركة دائرية أفقية في دائرة نصف قطرها r بسرعة v، ويصنع الخط المائل للمخروط زاوية θ مع الأفقي. أوجد سرعة الحركة وزمنها الدوري.
المعطيات والمطلوب:	المعطيات: الكتلة m، نصف القطر r، الزاوية θ، عجلة السقوط الحر g، سطح أملس. **المطلوب:** (أ) السرعة v (ب) الزمن الدوري T.
التمثيل:	  تؤثر قوتان فقط على الكرة: وزنها mg (رأسيًا إلى أسفل) وقوة رد الفعل العمودي N. حلِّل N إلى مركبة رأسية N cos θ ومركبة أفقية N sin θ؛ وتتجه المركبة الأفقية نحو المركز ووتنشأ القوة المركزية المركزية.
الاستراتيجية:	حلِّل القوى إلى اتجاهين أفقي ورأسي، وضع معادلة اتزان للاتجاه الرأسي، ومعادلة الحركة الدائرية المنتظمة للاتجاه الأفقي.
الحل الموضح:	(أ) الاتزان الرأسي: $N\cos\theta - mg = 0 \Rightarrow N = \frac{mg}{\cos\theta}$ الاتجاه القطري (قانون نيوتن الثاني) $\frac{mv^2}{r} = N\sin\theta$ بالتعويض عن قيمة N $\frac{mv^2}{r} = \frac{mg}{\cos\theta}\sin\theta = mg\tan\theta$ $\Rightarrow v^2 = gr\tan\theta$ $v = \sqrt{gr\tan\theta}$ (ب) الزمن الدوري $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{gr\tan\theta}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{r}{g\tan\theta}}$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{r}{g\tan\theta}}$
منطقية الحل:	السرعة مستقلة عن الكتلة، وهذا معقول لأن الوزن وقوة رد الفعل العمودي كلاهما يتناسب مع m فتُلغى. وتتفق الأبعاد مقدار v مع $\sqrt{gr\tan\theta}$ وهي وحدة سرعة (متر / ثانية) =(متر/ثانية x 2 متر)، وتكون وحدة الزمن الدوري هي الثانية (s). تؤدي زيادة نصف القطر r إلى زيادة كل من السرعة v والزمن الدوري T، وهو أمر متوقع عند الحركة في مسار دائري أكبر.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تبقى الكرة عند الارتفاع نفسه رغم أن قوة رد الفعل العمودي تؤثر بزاوية؟

جرِّب بنفسك: على طريق أملس يلتقي فيها منحدر بنصف دائرة رأسية نصف قطرها r عند أدنى نقطة A، تُترَك كرة صغيرة كتلتها m من السكون عند النقطة P على المنحدر، على ارتفاع h فوق A، وتتحرك حول المسار حتى أعلى نقطة B. أوجد سرعة الكرة v وهي تمر بأعلى نقطة B، بدلالة g و h و r.

حاول:



يُثبَّت أحد طرفَي خيط طوله l [m] في السقف، وتخضع كرة صغيرة كتلتها m [kg] مربوطة بالطرف الآخر لحركة دائرية منتظمة في مستوًى أفقي. لتكن الزاوية بين الخيط والاتجاه الرأسي θ، وعجلة الجاذبية الأرضية g [m s^{-2}]، ونسبة محيط الدائرة إلى قطرها π.

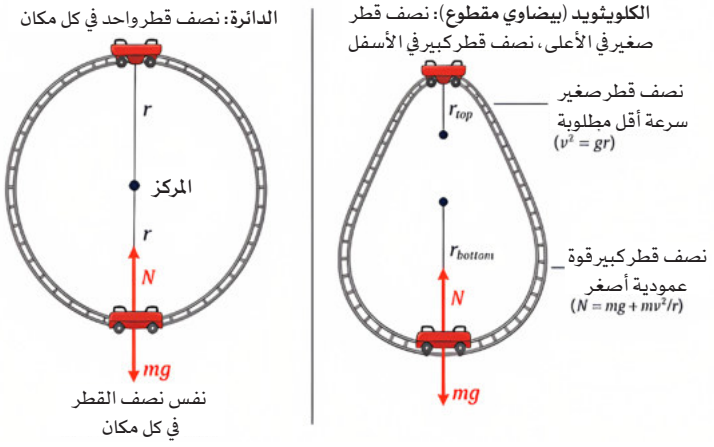
(i) أوجد مقدار الشد في الخيط بالنيوتن.

(ii) أوجد الزمن الدوري للحركة الدائرية بالثانية.

في سياق جديد — حلقة القطار الدوار [قطار الملاهي]

تُعد حلقة القطار الملاهي مثالًا على الحركة في المستوى الرأسي، مثل الماء في الدلو. لكن سرعة العربة تُحدد وفقًا لقانون حفظ الطاقة، لا وفقًا لما يحدده الراكب. تتميز الحلقة الدائرية بنصف قطر واحد في جميع أجزائها. عند قمة المسار الدائري، تحتاج العربة إلى أقل سرعة وتتعين من: $v^2 = gr$. وعند القاع، تتحرك بسرعة أكبر بكثير، لذا فإن المسار يدفع الركاب بقوة عمودية $N = mg + mv^2/r$ تبلغ حوالي ستة أضعاف وزنهم. أما الحلقات الحقيقية فتكون منحنيات إهليلجية بدلًا من ذلك. فنصف القطر الصغير عند الأعلى يقلل السرعة اللازمة هناك، ونصف القطر الكبير عند قاع المسار يقلل القوة – وهو ما لا يمكن لنصف قطر ثابت واحد تحقيقه.

شكلان للحلقة، مبدأ فيزيائي واحد



فسِّر لماذا تُنتج عربة تحافظ بالكاد على التلامس مع المسار عند أعلى حلقة دائرية قوة رد فعل عمودي كبيرة على الركاب عند الأسفل.

طبيعة العلم: النماذج — القطار الدوار [قطار الملاهي]

تحسَّنت القطارات الدوارة المبكرة في كوني آيلاند سريعًا بعد تصاميم غير آمنة. ففي عام ١٨٩٥، قدَّمت «فليب-فلاب رايلواي» حلقة دائرية صغيرة كانت مثيرة لكنها غير مريحة وخطيرة. وفي

عـام ١٩٠١، اسـتخدمت «لوب-ذا-لـوب» حلقـة بيضاويـة أكثرانسـيابية لتقليـل القـوى علـى الـركاب. ولاحقًـا، أضافـت «دروب-ذا-ديـب» سـرعات أعلـى وقدَّمـت حواجـز أمـان للـركاب مـن أجـل السلامـة.

دورك الآن: أي افتراض من افتراضات نموذج الحلقة الدائرية يُزال في حلقة متغيرة نصف القطر؟

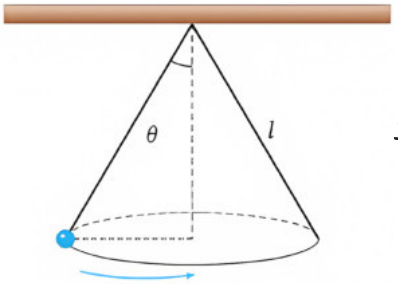
سؤال الدرس، وإجابته:

لمـاذا يمكـن أن يبقـى المـاء داخـل دلـو عنـد أعلـى نقطـة في دائـرة رأسـية؟ عنـد أعلـى الدائـرة، يقـع مركـز المسـار الدائـري أسـفل المـاء، لـذا يجـب أن تتجـه العجلـة المركزيـة — وبالتـالي القـوة الشـعاعية المحصلـة علـى المـاء — رأسـيًا إلى أسـفل، نحـو المركـز. ويؤثـر وزن المـاء إلى أسـفل، ويؤثـر الدلـو أيضًـا بقـوة رد فعـل عمـودي إلى أسـفل طالمـا اسـتمر التمـاس. وعنـد السـرعة الدنيـا اللازمـة للحفـاظ علـى التمـاس، يكـون المـاء علـى وشـك فقـدان التمـاس مـع الدلـو، لـذا تكـون قـوة رد الفعـل العمـودي صفـرًا. ويوفـر وزن المـاء وحـده عندئـذٍ القـوة الشـعاعية المحصلـة اللازمـة، ممـا يُعطـي $v_{min} = \sqrt{gr}$. فـإذا كانـت $v \geq v_{min}$، يتبـع المـاء المسـار الدائـري ويبقـى داخـل الدلـو؛ وإذا كانـت $v < v_{min}$، يفقـد التمـاس ويسـقط.

حقيقة أساسية:

في الحركة الدائرية الرأسية، تتغيّر سرعة الجسم باستمرار وهو يتحرك حول الدائرة.

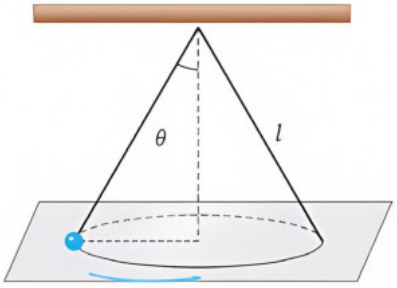
تمرين:



(أ) يُثبَّت أحد طرفَي خيط طوله l [m] في السقف، وتخضع كرة صغيرة كتلتها m [kg] مربوطة بالطرف الآخر لحركة دائرية منتظمة في مستوًى أفقي. لتكن الزاوية بين الخيط والاتجاه الرأسي θ، وعجلة الجاذبية الأرضية g [m s^{-2}]، ونسبة محيط الدائرة إلى قطرها π.

(i) أوجد مقدار القوة المركزية بالنيوتن.

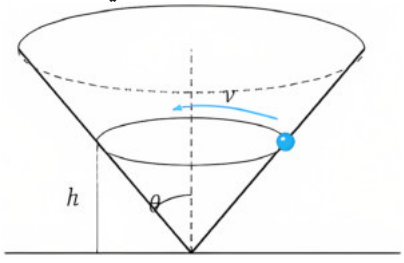
(ii) أوجد سرعة الكرة الصغيرة v بدلالة l وg وθ.



(ب) يُثبَّت أحد طرفَي خيط طوله l [m] في السقف، وتخضع كرة صغيرة كتلتها m [kg] مربوطة بالطرف الآخر لحركة دائرية منتظمة على مستوًى أفقي أملس بينما تتلقى قوة رد فعل عمودي من السطح. لتكن الزاوية بين الخيط والاتجاه الرأسي θ، والسرعة الزاوية ω [rad s^{-1}]، ومقدار عجلة الجاذبية الأرضية g [m s^{-2}].

(i) أوجد مقدار الشد في الخيط بالنيوتن.

(ii) أوجد مقدار قوة رد الفعل العمودي التي تتلقاها الكرة الصغيرة من المستوى الأفقي بالنيوتن.



(جـ) تخضع كرة صغيرة كتلتها m لحركة دائرية منتظمة على ارتفاع h داخل وعاء مخروطي بسطح داخلي أملس. لتكن الزاوية بين محور المخروط والخط المولِّد θ، ومقدار عجلة الجاذبية الأرضية g، ونسبة محيط الدائرة إلى قطرها π.

(i) أوجد مقدار قوة رد الفعل العمودي N التي تتلقاها الكرة الصغيرة من السطح المخروطي بدلالة m وθ وg.

(ii) أوجد سرعة الكرة الصغيرة v بدلالة h وg.

(iii) أوجد دور الحركة الدائرية T بدلالة h وθ وg.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تُربَط كرة صغيرة كتلتها 0.50 kg بخيط وتتحرك في دائرة رأسية نصف قطرها 0.80 m. وعند أدنى نقطة في الدائرة، تكون سرعتها 4.0 m s^{-1}. أوجد الشد في الخيط عند أدنى نقطة.

الدرس ١-١٢ — قوانين كبلر والجاذبية الكونية

؟ سؤال الدرس:

لماذا يبدو أحد الأقمار الصناعية ثابتًا فوق الأرض، وما الذي يحدد الزمن الذي يستغرقه القمر الصناعي لإتمام مداره؟

ستتعلم أن

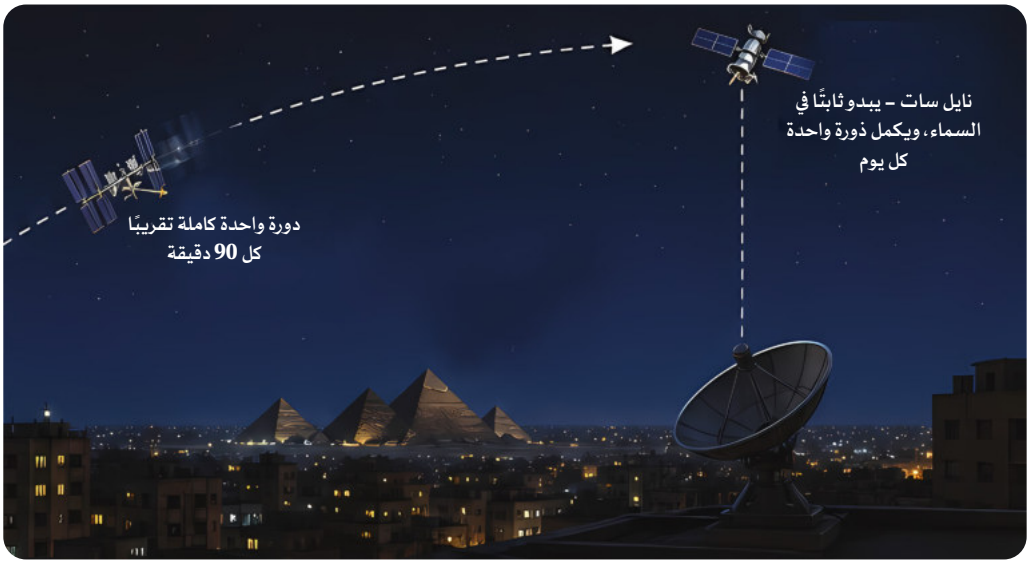
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تصف** وتطبق قوانين كبلر لحركة الكواكب.

٢. **تفسر** كيف يعتمد الزمن الدوري المداري على نصف قطر المدار للكواكب والأقمار الصناعية.

٣. **تحدد** قوة الجاذبية وشدة مجال الجاذبية.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



تأمَّل السماء ليلًا: تبدو بعض الأقمار الصناعية ثابتة بالنسبة إلى سطح الأرض، بينما يتحرك بعضها الآخر بسرعة عبر السماء. وتتبع الكواكب أيضًا مدارات منتظمة حول الشمس، وقد دُرست حركتها لقرون. وهذه الحركات ليست عشوائية. فالجاذبية تُسارع كل جسم باستمرار نحو الجسم الذي يدور حوله، بينما تدفعه سرعته المماسية إلى الأمام. ونتيجة لذلك، يبقى الجسم في سقوط حر مستمر، متبعًا مسارًا داريًّا منحنيًا بدلًا من السقوط مباشرة نحو الجسم المركزي.

توقَّع قبل أن تستمر:

(أ) ما الذي يحدد ما إذا كان القمر الصناعي يبدو ثابتًا بالنسبة إلى سطح الأرض أم يتحرك بسرعة عبر السماء؟

(ب) افترض أن السرعة اللحظية لقمر صناعي لم تتغيّر عندما تغيّرت قوة الجاذبية. كيف ستؤثر قوة جاذبية أقوى أو أضعف في مداره؟

حقيقة أساسية:

للحفاظ على جسم يتحرك في دائرة، يجب أن تتجه قوة محصلة إلى الداخل نحو المركز.

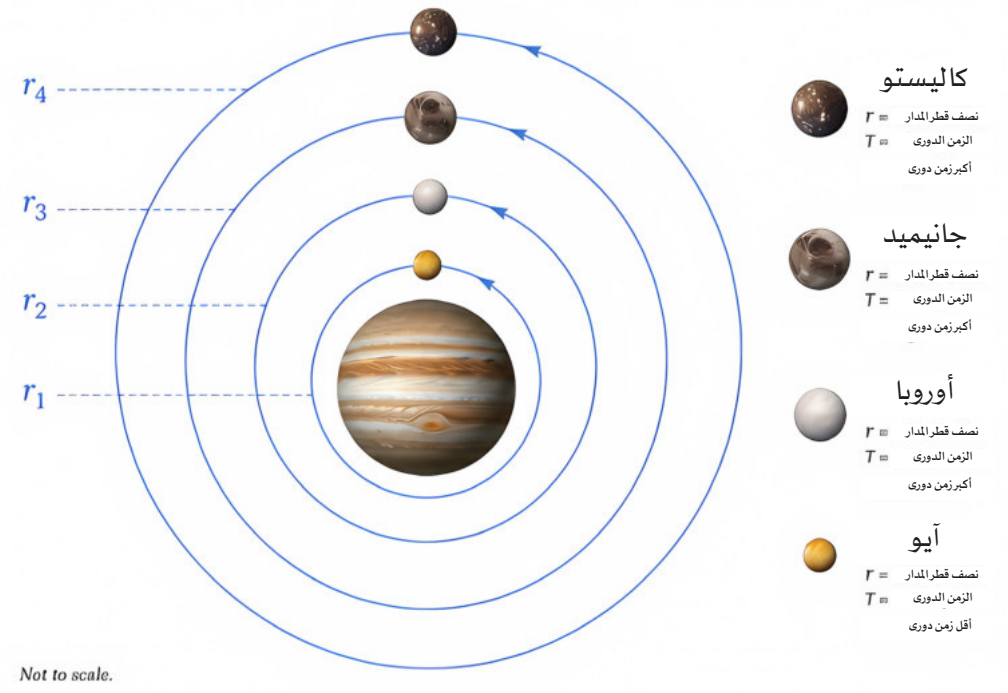
استكشف — استقصاء الحركة المدارية

ما ستفعله: تحلل أنصاف الأقطار المدارية والأزمنة الدورية لأكبر أربعة أقمار للمشتري لتحديد نمط رياضي

الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- الجدول المُعطى لنصف القطر الزمن الدوري (r) والدور المداري (T)
- آلة حاسبة



الخطوات:

١ استخدم قيم نصف القطر المداري r والزمن الدوري المداري T المُعطاة لكل قمر.

٢ لكل قمر، احسب T^2 وr^3 والنسبة $\frac{T^2}{r^3}$.

٣ سجّل قيمة $\frac{T^2}{r^3}$ المحسوبة في العمود الأخير من الجدول.

٤ قارن قيم $\frac{T^2}{r^3}$ للأقمار الأربعة جميعها.

القمر	نصف القطر المداري r ($\times 10^8$ m)	الزمن الدوري T (يوم)	$\frac{T^2}{r^3}$ (m^3 / ^{2}يوم)
آيو (Io)	4.22	1.77	
أوروبا (Europa)	6.71	3.55	
جانيميد (Ganymede)	10.7	7.15	
كاليستو (Callisto)	18.8	16.7	

حلّل ما جمعته:

(أ) هل تبقى النسبة ثابتة تقريبًا للأقمار الأربعة، أم تتفاوت بشكل ملحوظ؟

(ب) أي خاصية للكوكب المركزي تحدد هذه القيمة الثابتة، وأي القوانين الفيزيائية تفسرها؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، حسبت $\frac{T^2}{r^3}$ لأكبر أربعة أقمار للمشتري. تختلف آيو وأوروبا وجانيميد وكاليستو في الحجم والسرعة والمسافة، ومع ذلك كانت القيم الأربع متطابقة تقريبًا. وتشير قيمة واحدة مشتركة بين أقمار مختلفة كهذه إلى كتلة مركزية مشتركة وقوة جاذبية تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة.

قانون نيوتن للجاذبية الكونية

تجذب كل جسيمة كل جسيمة أخرى على طول الخط الواصل بينهما؛ ويُسمى هذا الجذب القوة الجاذبية. ولكتلتين m_1 وm_2 تفصل بينهما مسافة r، تتناسب القوة طرديًّا مع حاصل ضرب الكتلتين وعكسيًّا مع مربع المسافة:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

حيث $G = 6.67 \times 10^{-11}\ Nm^2\,kg^{-2}$ هو ثابت الجاذبية الكوني، وهو نفسه لجميع الأجسام.

بناء النموذج

يدور قمر كتلته m حول المشتري (كتلته M) في دائرة نصف قطرها r بسرعة v. وتوفر قوة الجاذبية بينهما، GMm/r^2، القوة الجاذبة المركزية التي تُبقي القمر في مداره الدائري:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

تُلغى كتلة القمر، فتبقى سرعته المدارية:

$$v^2 = \frac{GM}{r} \qquad (1)$$

وفي زمن دوري واحد، يقطع القمر محيطًا واحدًا، لذا

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

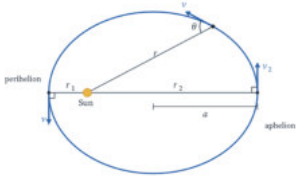
وبالتعويض في (1) وإعادة الترتيب، نحصل على العلاقة ...(2).

تفسير النتيجة

المعادلة (2) هي النمط الذي قمت بقياسه. ولا يحتوي الطرف الأيمن منها على أي خاصية خاصة بالقمر — بل يحتوي فقط على G والكتلة المركزية M. ولهذا السبب تشترك الأقمار الأربعة في قيمة واحدة، فهي جميعها تدور حول كوكب المشتري، وبالتالي فإن الثابت يحدده كتلة هذا الكوكب.

قوانين كبلر

العلاقة $T^2 \propto r^3$ هي ثالث قوانين كبلر الثلاثة، واستُخلصت من بيانات حركة الكواكب قبل أن يفسرها نيوتن بزمن طويل.



القانون الأول. يتحرك كل كوكب في مسار بيضاوي (قطع ناقص) تقع الشمس عند إحدى بؤرتيه. وأطول قطر هو المحور الأكبر؛ ونصفه هو نصف المحور الأكبر a. وبالنسبة لمدار الأرض، يساوي a وحدة فلكية واحدة ($1\ AU = 1.50 \times 10^{11}\ m$).

القانون الثاني. يقطع متجه نصف القطر الممتد من الشمس إلى كوكب ما مساحات متساوية في أوقات متساوية، وبالتالي تظل السرعة المساحية ثابتة. فإن الزاوية θ بين متجه نصف القطر r ومتجه السرعة v، $\frac{1}{2} r v \sin\theta = \frac{1}{2} r_1 v_1 = \frac{1}{2} r_2 v_2 = constant$

عند أقرب نقطة (r_1)، وعند أبعد نقطة (r_2)، تكون السرعة عمودية على متجه نصف القطر، لذا فإن: $\sin\theta = 1$ ، $r_1v_1 = r_2v_2$ ويتحرك الكوكب بسرعة أكبر كلما اقترب من الشمس.

حقيقة أساسية:

تشترك جميع الأجسام التي تدور حول الجسم المركزي نفسه في قيمة $\frac{T^2}{r^3}$ نفسها. وتعتمد هذه القيمة فقط على كتلة الجسم المركزي.

القانون الثالث. مربع الزمن الدوري مقسومًا على مكعب نصف المحور الأكبر يساوي ثابتًا واحدًا لكل جسم يدور حول مركز معين: $\frac{T^2}{a^3} = k$

هذه هي المعادلة التي تم اشتقاقها أعلاه، حيث $k = 4\pi^2 / GM$؛ وبالنسبة للمدار الدائري، فإن نصف المحور الأكبر يساوي نصف القطر r. ونظرًا لأن k هو ثابت مشترك، فإن أي جسيمين يدوران حول نفس المركز يخضعان لـ

$$T_1^2 / a_1^3 = T_2^2 / a_2^3$$

نقطة

- قوانين كبلر
- القانون الأول: تتحرك الكواكب في مدارات بيضاوية (شكل قطع ناقص) تقع فيها الشمس عند إحدى البؤرتين. ويُطلق على طول نصف المحور الأكبر لمدار الأرض اسم "الوحدة الفلكية".
- القانون الثاني: تكون المساحة التي يمسحها متجه نصف القطر (الواصل بين الشمس والكوكب) في وحدة الزمن (أي السرعة المساحية) مقداراً ثابتاً؛ فإذا كان r هو متجه نصف القطر، وv هي السرعة، وθ هي الزاوية بينهما، فإن المقدار يساوي $\frac{1}{2} rv \sin\theta$. وعند أقرب نقطة للشمس تكون القيمة $\frac{1}{2} r_1 v_1$، وعند أبعد نقطة عن الشمس تكون $\frac{1}{2} r_2 v_2$، وبالتالي: $\frac{1}{2} r_2 v_2 = \frac{1}{2} r_1 v_1 = \frac{1}{2} rv \sin\theta$ (مع العلم أن $\sin 90° = 1$).
- القانون الثالث: النسبة بين مربع الزمن الدوري للكوكب (T) ومكعب نصف المحور الأكبر (a) لمداره البيضاوي (قطع ناقص) هي نسبة ثابتة لجميع الكواكب: $T^2/a^3 = k$ (حيث k ثابت).

قوة التجاذب بين أي جسمين هي قوة الجاذبية، وبالنسبة لكتلتين m1 وm2 تفصل بينهما مسافة r، تُحسب القوة بالعلاقة: $F = G m_1 m_2 / r^2$، حيث G هو ثابت الجاذبية العام [$N \cdot m^2 / kg^2$].

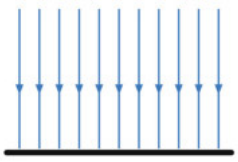
صندوق المعادلات:

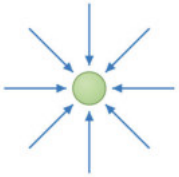
الجاذبية الكونية:	$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$
السرعة المدارية:	$v^2 = \frac{GM}{r}$
قانون كبلر الثالث:	$\frac{T^2}{a^3} = k = \frac{4\pi^2}{GM}$
السرعة المساحية (القانون الثاني):	$\frac{1}{2} r_1 v_1 = \frac{1}{2} r_2 v_2$

مجالات الجاذبية

مجال القوة هو منطقة يتعرض فيها جسم لقوة غير تلامسية. ويمكن تمثيل مجال الجاذبية بمتجهات، تُظهر اتجاه المجال وقوته النسبية عند كل نقطة — وهو الاتجاه نفسه للقوة التي ستؤثر على كتلة توضع هناك. ويمكن تمثيله أيضًا بخطوط المجال، يُظهر اتجاهها اتجاه المجال، وكلما تقاربت، كان المجال أقوى في تلك المنطقة. ومجال الجاذبية هو مجال قوة يتعرض فيه أي جسم له كتلة لقوة.

حقيقة أساسية:
تتجه خطوط مجال الجاذبية دائمًا نحو الكتلة التي تُنتج المجال، لأن الجاذبية جذب فقط دائمًا. وحيثما تتقارب الخطوط أكثر، يكون المجال أقوى.


مجال منتظم


مجال شعاعي

شدة مجال الجاذبية

شدة مجال الجاذبية g عند نقطة هي قوة الجاذبية لوحدة الكتلة، تؤثر على كتلة اختبار توضع هناك: $g = \frac{F}{m}$. وهي كمية متجهة، تتجه على طول المجال، وتُقاس بوحدة نيوتن لكل كيلوجرام ($N\,kg^{-1}$، وتكافئ $m\,s^{-2}$). وبالنسبة لكتلة كروية M، يكون المجال شعاعيًّا، ويُعطى مقداره على بُعد r من المركز بـ: $g = \frac{GM}{r^2}$. لذا فهو يخضع لقانون التربيع العكسي: فإذا تضاعفت المسافة عن مركز الكتلة، تقل g إلى ربع قيمتها.

وتُبيّن الأسهم على خطوط المجال اتجاه المجال، وهو اتجاه القوة المؤثرة على كتلة. وفي المجال المنتظم، تكون شدة المجال نفسها عند كل نقطة، لذا تكون خطوط المجال متوازية ومتساوية التباعد. وفي المجال الشعاعي، تعتمد شدة المجال على الموضع: فمع زيادة r، تتباعد خطوط المجال ويتناقص g. ومجال الجاذبية للأرض شعاعي؛ لكن في منطقة صغيرة قريبة من السطح، يكون شبه منتظم تقريبًا، ولهذا يمكن معاملة $g \approx 9.81\,N\,kg^{-1}$ كثابت هناك.

مثال محلول:

الموقف:	ثلاث مسائل مستقلة عن الجاذبية والحركة المدارية. (أ) يتحرك مذنَّب في مدار أهليليجي (قطع ناقص)، وتكون مسافته من الشمس عند أبعد نقطة 5.0 أضعاف مسافته عند أقرب نقطة. (ب) لمدار كويكب حول الشمس نصف محور أكبر مقداره 4.0 وحدة فلكية (AU). (جـ) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 60 kg، على بُعد 3.0 m
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** **المطلوب:** (أ) نسبة سرعة المذنَّب عند أبعد نقطة إلى سرعته عند أقرب نقطة. (ب) الدور المداري T للكويكب. (جـ) مقدار القوة الجاذبية F بين الجسمين.
التمثيل:	
الاستراتيجية:	(أ) طبِّق قانون كبلر الثاني. (ب) طبِّق قانون كبلر الثالث، $T^2 \propto a^3$. (جـ) طبِّق قانون نيوتن للجاذبية الكونية، $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$
الحل الموضح:	(أ) لتكن مسافة أقرب نقطة هي r ومسافة $5.0\,r$ عند أبعد نقطة. يُعطي قانون كبلر الثاني: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{5.0} = 0.20$ (ب) بقانون كبلر الثالث: $T^2/(4.0)^3 = (1.0)^2/(1.0)^3 \leftarrow T^2 = 64 \leftarrow T = 0.8$ سنة. (جـ) $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ $F = \frac{(6.67 \times 10^{-11})(60)(60)}{(30)^2} = 2.67 \times 10^{-8} \approx 2.7 \times 10^{-8}\,N$ $F \approx 2.7 \times 10^{-8}\,N$

سؤال للربط:

لماذا لا تبذل القوة المحصلة الداخلية أي شغل على جسم يتحرك بسرعة ثابتة في دائرة؟

منطقية الحل:	يتحرك المذنَّب أسرع عند أقرب نقطة وأبطأ عند أبعد نقطة، كما يقتضي قانون كبلر الثاني. ويقابل المدار الأكبر زمنًا دوريًّا أطول، فالزمن الدوري لكويكب (مذنب) 8.0 سنة يتجاوز الزمن الدوري للأرض 1.0 سنة. قوة الجاذبية بين جسمين كتلتاهما عادية (جسمان بشريان على سبيل المثال) صغيرة للغاية.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر، باستخدام قانون كبلر الثاني، لماذا يتحرك المذنَّب أسرع ما يمكن عند أقرب نقطة وأبطأ ما يمكن عند الأوج.

حاول بنفسك: احسب كتلة الشمس، مع العلم أن دور مدار الأرض حول الشمس هو $3.156 \times 10^7\ \text{s}$ ونصف المحور الأكبر لمدار الأرض هو $1.496 \times 10^{11}\ \text{m}$.

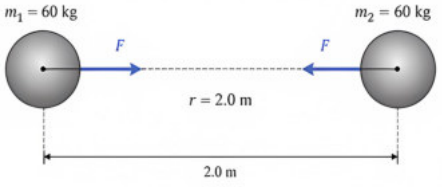
سؤال للربط:
كيف تُحدَّد كتلة كوكب من حركة قمر يدور حوله؟

حاول:

(أ) عندما تكون مسافة مذنَّب من الشمس عند أبعد نقطة 2.5 وحدة فلكية، ومسافته من الشمس عند أقرب نقطة 1.5 وحدة فلكية، أوجد نسبة سرعته عند أبعد نقطة إلى سرعته عند أقرب نقطة.

(ب) نصف المحور الأكبر لمدار كويكب معيّن هو 16 وحدة فلكية. أوجد الدور المداري لهذا الكويكب.

(ج) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 60 kg، على بُعد 2.0 m. أوجد مقدار قوة الجاذبية المؤثرة بين هذين الجسمين. ليكن ثابت الجاذبية $6.7 \times 10^{-11}\ \text{N m}^2\ \text{kg}^{-2}$.



في سياق جديد — المدار الثابت

يكون القمر الصناعي للاتصالات أكثر فائدة عندما يبقى فوق النقطة نفسها على خط الاستواء. ولتحقيق ذلك، يجب أن يدور حول الأرض في الزمن نفسه الذي تستغرقه الأرض لتدور دورة واحدة كاملة حول محورها، $T = 8.62 \cdot 10^4\ \text{s}$ (نحو يوم واحد). وتُبقي جاذبية الأرض قمرًا صناعيًّا في مداره الدائري: $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$، لذا $v^2 = \frac{GM}{r}$. وبالتعويض $v = \frac{2\pi r}{T}$ نعود إلى $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$.

المدار الجغرافي الثابت (في المستوى الأستوائي)

$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}$

وبإعادة الترتيب: $r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} \approx 4.2 \cdot 10^7\ \text{m}$، أي نحو $3.6 \cdot 10^7\ \text{m}$ فوق السطح. وعند نصف القطر هذا، $v = \frac{2\pi r}{T} \approx 3.1 \cdot 10^3\ \text{m s}^{-1}$

ولا يسمح إلا نصف القطر هذا وحده للقمر الصناعي بالدوران بالمعدل نفسه للأرض، فيبقى فوق النقطة نفسها. والقانون نفسه الذي يحكم الأزمنة الدورية لأقمار المشتري يحدد أيضًا مدار كل قمر صناعي تلفزيوني.

دورك الآن: فسِّر لماذا يحتاج صاروخ يُطلَق شرقًا بالقرب من خط الاستواء إلى سرعة إضافية أقل للوصول إلى مدار شرقي، مقارنة بصاروخ يُطلَق غربًا من موقع على خط عرض مرتفع.

طبيعة العلم: الأنماط والاتجاهات — القوانين التي انتظرت سبعين عامًا

لم يشتق كبلر قوانينه من نظرية للقوة. بل استنتجها من أنماط في ملاحظات تيخو براهي الدقيقة بالعين المجردة لحركة الكواكب. ونُشر القانونان الأول والثاني في كتاب «علم الفلك الجديد» عام ١٦٠٩، والقانون الثالث في كتاب «توافقيات العالم» عام ١٦١٩. ولنحو سبعين عامًا، ظلت هذه القوانين أوصافًا تجريبية موثوقة دون تفسير ديناميكي مقبول عمومًا. وفي كتابه «المبادئ» (١٦٨٧)، أوضح نيوتن كيف يمكن تفسيرها باستخدام قوانين الحركة والجاذبية الكونية. فقانون كبلر الثاني ينتج عن الاتجاه المركزي للقوة الجاذبية، بينما يعتمد القانونان الأول والثالث على تغيّرها العكسي التربيعي مع المسافة.

دورك الآن: اذكر تنبؤًا واحدًا سمح قانون كبلر الثالث لعلماء الفلك بتقديمه عن حركة كوكب مكتشَف حديثًا، قبل أن يقدم نيوتن تفسيرًا جاذبيًا لهذه العلاقة.

سؤال الدرس، وإجابته:

لماذا يبدو أحد الأقمار الصناعية ثابتًا فوق الأرض، وما الذي يحدد الزمن اللازم لإتمام مداره؟ توفر قوة جاذبية الأرض القوة المركزية التي تُبقي القمر الصناعي في مداره. ويعتمد الدور المداري على نصف المحور الأكبر وكتلة الأرض. وبموجب قانون كبلر الثالث:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

ويتحرك القمر الصناعي الثابت بالنسبة للأرض في مدار دائري فوق خط استواء الأرض، في الاتجاه نفسه لدوران الأرض، وله دور مداري يساوي دور دوران الأرض. ونتيجة لذلك، يبقى فوق الموقع نفسه ويبدو ثابتًا في السماء. أما القمر الصناعي في مدار أخفض، مثل محطة الفضاء الدولية، فيسير في مدار أصغر، وبالتالي يُتم كل مدار في زمن أقصر.

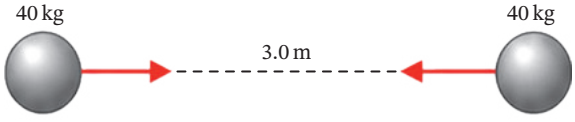
تمرين:

أوجد ما يلي:

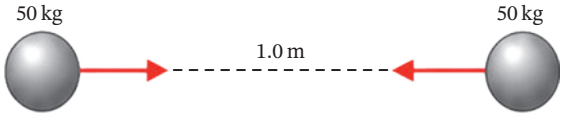
(أ) عندما تكون مسافة مذنَّب من الشمس عند أبعد نقطة 4.0 أضعاف مسافته من الشمس عند أقرب نقطة، أوجد نسبة سرعته عند أبعد نقطة إلى سرعته عند أقرب نقطة.

(ب) نصف المحور الأكبر لمدار كويكب معيّن هو 9.0 وحدة فلكية. باستخدام حقيقة أن نصف المحور الأكبر لمدار الأرض هو 1.0 وحدة فلكية ودورها المداري 1.0 سنة، أوجد الزمن الدوري لهذا الكويكب.

(جـ) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 40 kg، على بُعد 3.0 m. أوجد مقدار قوة الجاذبية المؤثرة بين هذين الجسمين. ليكن ثابت الجاذبية $6.7 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2\,kg^{-2}}$.



(د) يوضع جسمان، كتلة كل منهما 50 kg، على بُعد 1.0 m. أوجد مقدار قوة الجاذبية المؤثرة بين هذين الجسمين. ليكن ثابت الجاذبية $6.7 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2\,kg^{-2}}$.



الفصل الثاني

الحركة الاهتزازية والموجات

أسئلة إرشادية؟

- ما الذي يجعل حركةً تتكرر، وما الذي يحدد معدلها؟
- كيف تنقل الموجة طاقة دون أن تنقل مادة؟
- كيف تفسر مفاهيم الموجة نفسها كلا من الصوت والضوء؟

الدرس ٢-١ — الحركة التوافقية البسيطة

؟ سؤال الدرس:
تهتز المسطرة عندما يتم إزاحة طرفها الحر وتركه على حافة المكتب. ما الذي يحدد تردد هذا الاهتزاز؟

ستتعلم أن

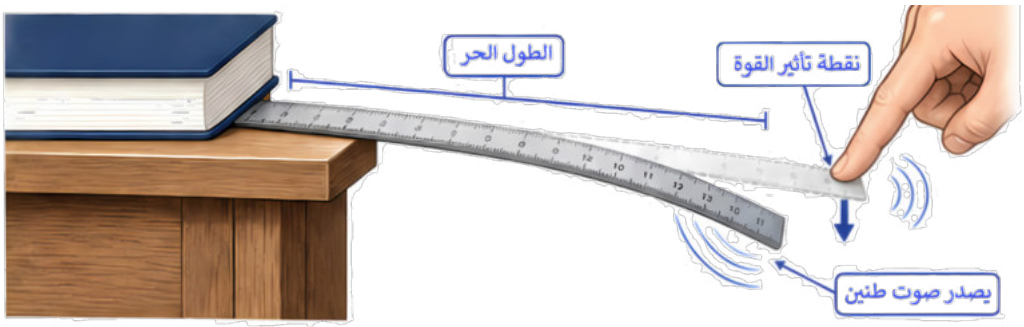
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تحدد الحركة التوافقية البسيطة من الشرط المحدد – قوة الاستعادة تتناسب طرديًّا مع الإزاحة وتتجه نحو موضع الاتزان.

٢. تحدد الزمن الدوري للحركة التوافقية البسيطة، باستخدام:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{و} \quad T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



الشكل (1.1.2): مسطرة مُثبَّتة أسفل مجموعة من الكتب تُصدر صوتًا رنانًا عند تحرير طرفها الحر.

- ثبِّت مسطرة فولاذية مسطحة أسفل كتاب بحيث يمتد معظمها خارج حافة المكتب.
- اضغط الطرف الحر إلى أسفل واتركه: ستهتز إلى أعلى وأسفل وتُصدر نغمة ثابتة.
- حرِّك المسطرة بحيث يبرز جزء أقل منها، اضغطها مرة أخرى، فترتفع درجة النغمة.
- مع أن المسطرة من المادة نفسها طوال الوقت — فقط الطول الحر هو الذي تغيَّر.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) أثناء الاهتزاز، هل يتحرك طرف المسطرة بأقصى سرعة عندما يمر بموضع الاتزان أم عند نقطتَي (أقصى إزاحة يمينًا أويسارًا)؟

(ب) عند نقطة (أقصى إزاحة يمينًا أويسارًا)، يكون الطرف ساكنًا للحظة. هل تكون قوة الاستعادة تساوي صفرًا عند هذه النقطة؟ فسِّر إجابتك.

حقيقة أساسية:
قوة الاستعادة هي قوة تؤثر نحو موضع الاتزان. وتوجد في كثير من الأنظمة، وللإزاحات الصغيرة، قوة الاستعادة تتناسب طرديا مع الإزاحة: $F = -kx$ حيث k هو ثابت القوة. (والاشارة السالبة تشير الى ان القوة تأثر في عكس اتجاه الازاحة.)

استكشف — اجعل المسطرة تهتز وقِس الزمن الدوري

ما ستفعله: اجعل مسطرة مثبَّتة تهتز، واستخدم فيديو الحركة البطيئة لقياس الزمن الدوري.

ولاحظ كيف يؤثر الطول الحر من المسطرة في الزمن الدوري.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- مسطرة صلبة أو نصل منشار حديد.
- ممحاة (أستيكة) كبيرة مثبَّتة بشريط على طرفها.
- كتاب ثقيل أو مشبك.
- هاتف بخاصية تصوير الحركة البطيئة.
- مكتب بحافة قائمة.

الشكل (2.1.2): يتيح التسجيل بالحركة البطيئة قياس الزمن الدوري بدقة أكبر

الخطوات:

١ ثبِّت الممحاة بشريط على الطرف الحر للمسطرة. ثبِّت المسطرة أسفل كتاب ثقيل بحيث يمتد نحو 20 cm خارج حافة المكتب.

٢ أزح الطرف الحر قليلًا إلى أسفل واتركه. سجِّل الحركة باستخدام فيديو الحركة البطيئة.

٣ استخدم مؤقت الفيديو لقياس الزمن اللازم لعشر اهتزازات كاملة تُعرَّف الاهتزازة الكاملة بأنها حركة الجسم من أحد الطرفين إلى الطرف الآخر ثم عودته إلى نفس الطرف الذي بدأ منه.

٤ قصِّر الطول الحر إلى نحو 12 cm مع إبقاء الممحاة نفسها مثبَّتة، ثم كرر القياس.

٥ قارن الزمن المستغرق لعشر اهتزازات كاملة في الحالتين.

الشكل (3.1.2): قياس زمن عشر اهتزازات كاملة لمسطرة ذات طول حر قدره 20 cm

الطول الحر للمسطرة (cm)	الزمن لعشر اهتزازات كاملة (s)	موضع السرعة القصوى (المنتصف / نقطتا أقصى إزاحة)

حلِّل ما جمعته:

(أ) في فيديو الحركة البطيئة، أين كان طرف المسطرة يتحرك بأقصى سرعة: عند وضع الاتزان أم عند نقطتَي الانعطاف؟ ما سرعته في اللحظة التي غيَّر فيها اتجاهه؟

(ب) أي طول حر كان له الزمن الدوري الأقصر؟ ماذا يقترح هذا عن العلاقة بين الصلابة والكتلة والزمن الدوري؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة القياس:
قِس زمن عشر اهتزازات، لا اهتزازة واحدة. فالاهتزازة الواحدة سريعة جدًّا على العين، وقياس عشر اهتزازات معًا يقلل عدم اليقين النسبي. «وللسبب نفسه، تحتوي جداول البيانات التجريبية عادةً على عدة قياس.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، بلغ الطرف الحر سرعته القصوى وهو يمر بموضع الاتزان، وكان ساكنًا للحظة عند كل نقطة أقصى إزاحة. ولعلك توقعت العكس؛ لكن الملاحظة تشير إلى نتيجة مختلفة. كما أنهى الطول الأقصر عشر اهتزازات في زمن أقل. وفيما يلي النموذج الذي تؤيده أدلتك.

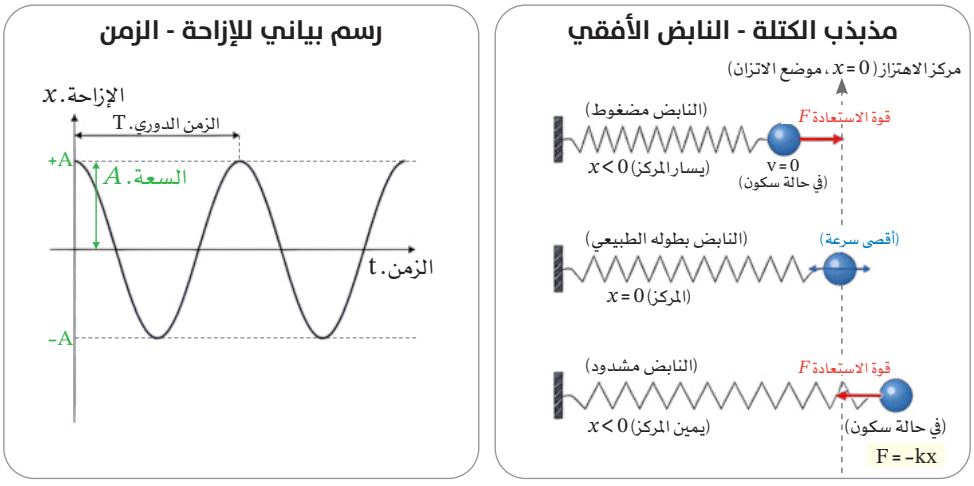
القوةُ التي تؤثر دائمًا نحو موضع الاتزان:

يؤدي جسم حركة توافقية بسيطة عندما تتناسب عجلته (a) طرديًا مع إزاحته (x) عن موضع الاتزان وتتجه نحو موضع الاتزان: $a = -\omega^2 x$. وبصورة مكافئة، إذا كانت قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع الإزاحة وتتجه نحو موضع الاتزان، فإن: $F = -kx$. حيث x هي الإزاحة من موضع الاتزان و k هو ثابت القوة. ووضع الاتزان هو مركز الاهتزاز. والسعة A هي أقصى إزاحة عن موضع الاتزان. والزمن الدوري T هو الزمن اللازم لعمل اهتزازة كاملة واحدة.

التردد الزاوي (السرعة الزاوية):

معدل حركة النقطة المرجعية حول دائرتها، $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ويُقاس بوحدة $rad\ s^{-1}$ ويشير إلى مدى سرعة تكرار الاهتزاز.

الحركة التوافقية البسيطة



الشكل (4.1.2): الإزاحة مقابل الزمن، وقوة الاستعادة عند كل موضع.

التردد الزاوي (السرعة الزاوية) (ω):

يصف التردد الزاوي (ω) مدى سرعة تكرار الاهتزاز. ويرتبط بالزمن الدوري بالعلاقة: $T = \frac{2\pi}{\omega}$. ووحدة قياس التردد الزاوي في النظام الدولي هي $rad\ s^{-1}$، وتُكتب غالبًا s^{-1}؛ لأن الراديان بلا أبعاد.

نقطة

- الحركة التوافقية البسيطة (Simple Harmonic Motion – SHM):
  هي اهتزازة تكون فيها العجلة تتناسب طرديًا مع الإزاحة عن موضع الاتزان، ومتجهًا دائمًا نحو موضع الاتزان.
- السعة (Amplitude, A): هي أقصى إزاحة للجسم عن موضع الاتزان.
- الزمن الدوري (Period, T): هو الزمن اللازم لإتمام اهتزازة كاملة، ووحدته الثانية (s).
- التردد الزاوي (Angular Frequency, ω): هو معدل تغيّر الزاوية التي يقطعها الجسم في الحركة الدائرية المرجعية، ويُعطى بالعلاقة $\omega = \frac{2\pi}{T}$
- العجلة ($a = -\omega^2 x$)

صندوق المعادلات:

العجلة:	$a = -\omega^2 x$
الزمن الدوري بمعلومية التردد الزاوي:	$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$

من الشرط المحدد إلى الزمن الدوري:

يُعطيك الشرط المحدد $a = -\omega^2 x$ الزمن الدوري أيضًا.

طبِّق قانون نيوتن الثاني على كتلة m مع قوة استعادة $F = -kx$ (حيث k هي القوة لوحدة الإزاحة).

$ma = -kx$ تُعطي:

$$-m\omega^2 x = -kx$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

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

صندوق المعادلات:

الزمن الدوري لنابض (الزنبرك) الكتلة المهتز:	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

وعبر كل اهتزازة كاملة، تتبادل الحركة الطاقة أيضًا: فتُخزَّن بالكامل كطاقة وضع مرنة عند نقطتَي أقصى إزاحة، وتكون بالكامل طاقة حركية عند المركز (موضع الاتزان). ونتناول هذا التبادل كيفيًّا هنا — وستأتي الكميات لاحقًا.

كُتيِّب البيانات:

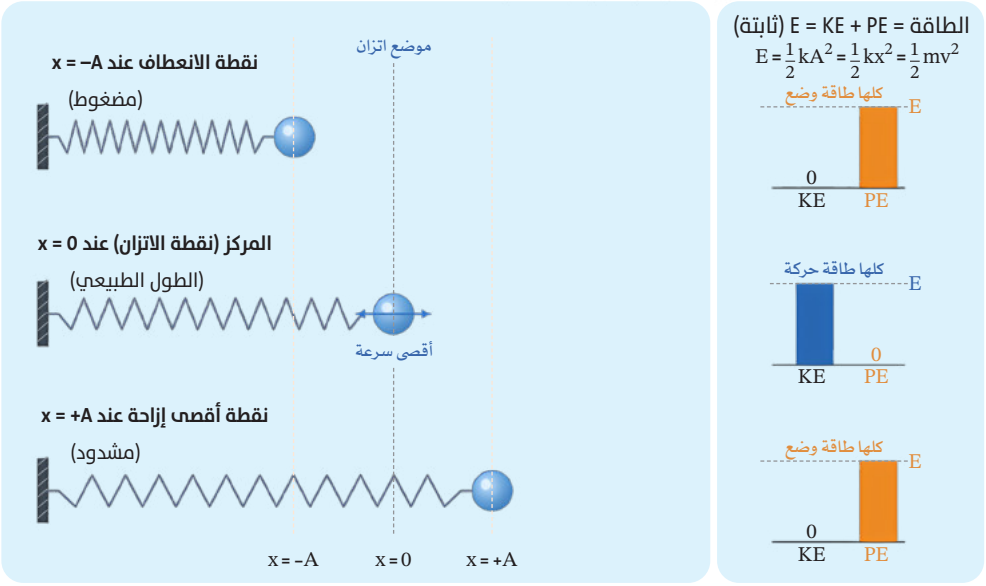
$a = -\omega^2 x$

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

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

جميعها معطيات؛ اقرأ k من $F = -kx$ المُعطاة.

الحركة التوافقية البسيطة _ تبادل الطاقة عند x = 0 ، A- + A+



الشكل (5.1.2): تتحول الطاقة بين الطاقة الحركية وطاقة الوضع، بينما يظل مجموعهما ثابتًا.

تطبيق سريع:

يهتز جسم كتلته 0.30 kg تحت تأثير قوة استعادة $F = -30x$، حيث x الإزاحة بالمتر. أوجد الزمن الدوري. (علمًا بأن: $\pi = 3.14$).

اختبر ذلك:

على رسم واحد للإزاحة – الزمن، حدِّد: أين تكون السرعة صفرًا وأين تكون العجلة صفرًا؟ وبيِّن أنهما لا يتطابقان أبدًا.

قراءة الزمن الدوري مباشرة من الحركة:

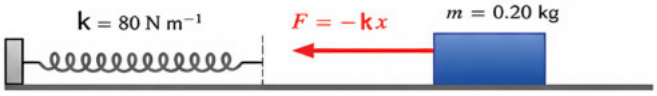
توجد طريقتان لتحديد الزمن الدوري. الأولى استخدمتها بالفعل: حدِّد قوة الاستعادة بالصيغة $F = -kx$، ثم $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$، $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

أما الطريقة الثانية فهي أكثر مباشرة. فأحيانًا تُعطي الحركة في صورة معادلة مكتوبة مسبقًا على أنها إزاحة تهتز مثل موجة جيبية حول موضع الاتزان — أي أن الموضع يساوي السعة مضروبة في جيب (التردد الزاوي مضروبًا في الزمن). ورمزيًّا، لجسم يمر بالمركز عند $t = 0$ بأقصى سرعة:

$$x = A \sin \omega t$$

فسِّر المعادلة. معامل دالة الجيب A هو السعة أو أقصى إزاحة عن موضع الاتزان. ومعامل t داخل دالة الجيب هو التردد الزاوي ω. وبمجرد أن تحدد ω، يُستنتج الزمن الدوري مباشرة من $T = \frac{2\pi}{\omega}$ — دون الحاجة إلى الكتلة أو قوة الاستعادة؛ لأن المعادلة تحتويهما بالفعل $\omega^2 = k/m$..

مثال محلول:

الموقف:	تنزلق قطعة صغيرة كتلتها 0.20 kg على مسار أفقي أملس. تشدها قوة استعادة نحو وضع الاتزان، $F = -kx$، حيث $k = 80\ N\ m^{-1}$ و x الإزاحة بالمتر. علما بان $\pi = 3.14$. أوجد الزمن الدوري للاهتزازة.  الشكل (6.1.2): كتلة مقدارها 0.20 kg معلّقة بنابض ثابت صلابته 80 N/m.
المعطيات والمطلوب:	$k = 80\ N\ m^{-1}$، $m = 0.20\ kg$. $\pi = 3.14 \Leftarrow T = ?$
التمثيل:	تتناسب قوة الاستعادة طرديا مع الإزاحة واتجاها نحو موضع الاتزان، لذا فإن الحركة توافقية بسيطة.
الاستراتيجية:	اكتب قوة الاستعادة عند الإزاحة x بصورة $F = -kx$؛ فإذا انطبقت، تكون الحركة توافقية بسيطة، $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ و $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ أو عندما تُعطى لك معادلة الإزاحة مباشرةً، اقرأ القيمة ω منها مباشرةً، ثم احسب $T = \frac{2\pi}{\omega}$
الحل الموضح:	**١) حدِّد ثابت القوة:** $k = 80\ N\ m^{-1}$. **٢) أوجد التردد الزاوي:** $\omega = \sqrt{\frac{80}{0.20}} = \sqrt{400} = 20\ rad\ s^{-1}$ **٣) احسب الزمن الدوري:** $T = \frac{2\pi}{20} = \frac{2\times3.14}{20} \Rightarrow T = 0.31\ s$
منطقية الحل:	تحمل الزمن الدوري وحدة الزمن (s)، كما يجب؛ و $\omega = 20\ rad\ s^{-1}$ اهتزاز سريع، و $T = 0.31\ s$ يعني نحو ثلاث دورات في الثانية.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تُعطي قوة استعادة أكثر صلابة (k أكبر)، مع بقاء الكتلة دون تغيير، زمنًا دوريًّا أقصر؟

جرِّب بنفسك: تتعرض قطعة كتلتها 0.80 kg على مسار أملس لقوة استعادة $F = -kx$ حيث $(\pi = 3.14)$ $k = 20\ Nm^{-1}$. أوجد الزمن الدوري للاهتزازة.

حاول:

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، علمًا بأن $\pi = 3.14$.

(أ) إذا علمت أن الإزاحة $x\,(m)$ لحركة توافقية بسيطة عند زمن $t\,(s)$ تعطَى بالعلاقة $x = 0.50\,sin\,(8.0\,\pi t)$. أوجد سعتها $A\,(m)$ والزمن الدوري $T\,(s)$.

(ب) يخضع جسم كتلته 0.50 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة $F\,(N)$ تعطَى بالعلاقة $F = -2.0\,x$، حيث $x\,(m)$ الإزاحة. أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة بالثانية.

كُتيِّب البيانات:

كل عنصر هو تعويض مباشر واحد — إما إزاحة مكتوبة كدالة جيب أو قوة استعادة

$F = -kx$

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

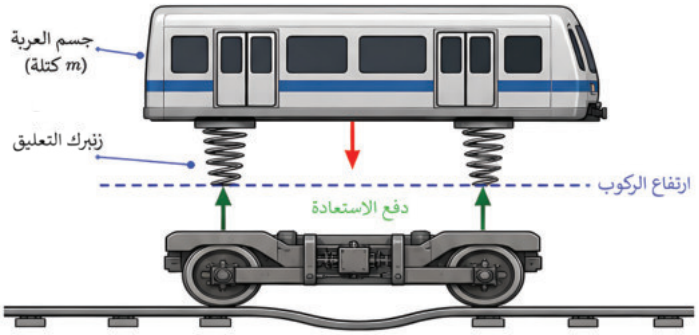
$T = \frac{2\pi}{\omega}$

قرر أي صيغة يُعطيك إياها السؤال قبل أن تعوِّض بالأرقام.

في سياق جديد — نظام التعليق أسفل عربة مترو

تُدعَم كل عربة مترو بنوابض (زنبرك) تعليق، وعندما يتحرك جسم العربة إلى أسفل بالنسبة إلى مجموعة العجلات، تضغط النوابض. وتؤثر النوابض بقوة استعادة إلى أعلى نحو موضع الاتزان. وللإزاحات الرأسية الصغيرة، يمكن تقريب هذه الحركة بحركة توافقية بسيطة. ويعتمد الزمن الدوري على كتلة العربة وصلابة نوابض التعليق:

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



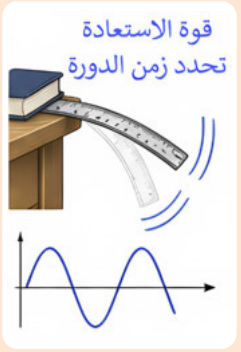
الشكل (7-1-2): يعمل نابض نظام التعليق على إعادة جسم السيارة إلى ارتفاعها الطبيعي أثناء السير

دورك الآن: لعربة محمَّلة بالكامل ستكون الكتلة m أكبر من عربة فارغة. باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ توقَّع ما إذا كانت تهتز بزمن دوري أطول أم أقصر، وفسِّر لماذا يُعطي نابض أكثر صلابة (k أكبر) الأثر المعاكس.

طبيعة العلم: العلم مسعى مشترك — القانون الذي أخفاه هوك في عبارة معكوسة الحروف

في عام ١٦٧٦، صاغ روبرت هوك قانونه على هيئة لغز حروفي لاتيني. وكشف عنه لاحقًا بعبارة: «ut tensio, sic vis»، أي: «كلما زادت الاستطالة، زادت القوة». وفي الصيغة الحديثة، تُعبَّر عن هذه الفكرة بالصيغة: $F = -kx$ بالنسبة لقوة الاستعادة التي تعمل في الاتجاه المعاكس للإزاحة.

سؤال الدرس، وإجابته:



تهتز المسطرة عندما تتم إزاحة طرفها الحر وتركه على حافة المكتب. ما الذي يحدد تردد هذا الاهتزاز؟

للإزاحات الصغيرة، تؤثر المسطرة بقوة استعادة تتناسب طرديًّا تقريبًا مع الإزاحة وتتجه نحو موضع الاتزان. وينتج عن ذلك حركة توافقية بسيطة تُوصَف بـ: $a = -\omega^2 x$. ويعتمد تردد الاهتزاز على الصلابة الفعلية للمسطرة والكتلة المتحركة الفعلية. ويجعل تقصير الطول الحر المسطرة أكثر صلابة فعليًّا، فيزداد التردد الزاوي وينخفض الزمن الدوري $T = \frac{2\pi}{\omega}$. ونتيجة لذلك، ترتفع درجة النغمة الصوتية (تردد النغمة).

تمرين:

(أ) إزاحة $x\,(m)$ لحركة توافقية بسيطة عند زمن $t\,(s)$ هي $x = 0.20\sin(4.0\,\pi t)$.
أوجد سعتها $A\,(m)$ والزمن الدوري $T\,(s)$.

(ب) يخضع جسم كتلته 0.50 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة $F\,(N)$ مُعطاة بالعلاقة $F = -50\,x$، حيث $x\,(m)$ الإزاحة. أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة بالثانية.

(جـ) يخضع جسم كتلته 7.5 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة $F\,(N)$ مُعطاة بالعلاقة $F = -30\,x$، حيث $x\,(m)$ الإزاحة. أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة بالثانية.

سؤال للربط:
كيف يمكن تطبيق فهم الحركة التوافقية البسيطة على نموذج الموجة؟
يُبنى نموذج الموجة على هذا: إذ تؤدي كل جسيمة في الوسط هذا الاهتزاز.

نصائح امتحانية:
اكتب سطر التعويض في كل إجابة — يمنح الممتحنون درجات على الطريقة، لا على الإجابة النهائية فقط.

سؤال بأسلوب الامتحان:
يخضع جسم كتلته 0.20 kg لحركة توافقية بسيطة تحت تأثير قوة استعادة $F = -kx$. وتُقاس عجلته بـ $a = -\omega^2 x$ حيث $\omega = 5.0\ rad\ s^{-1}$. اذكر قيمة k، ثم أوجد الزمن الدوري لهذه الحركة. (علما بأن $\pi = 3.14$).

الدرس ٢-٢ — البندول الزنبركي

؟ سؤال الدرس:

إذا تم ربط نفس الكتلة بنابض (زنبرك) رأسي (عمودى) بدلًا من نابض (زنبرك) أفقي، فهل تؤثر الجاذبية على الزمن الدورى للحركة الاهتزازية؟

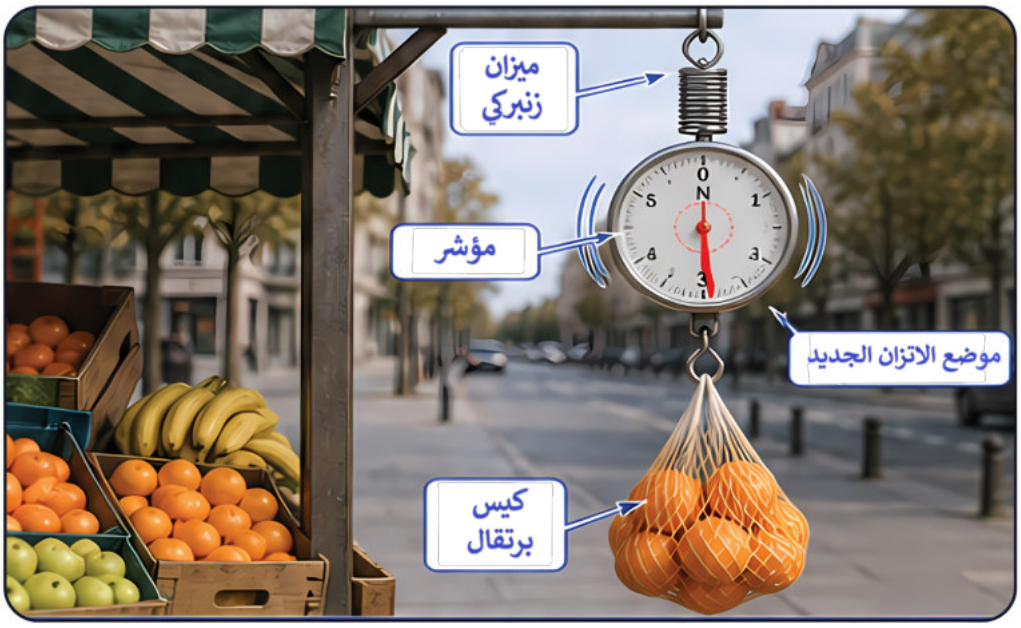
ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحدد** الزمن الدوري لنابض (زنبرك) كتلة مهتز من العلاقة $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

٢. **تثبت** أن الزنبرك المعلق عموديًا يحافظ على نفس الزمن الدوري الذى يحافظ عليه الزنبرك المعلق أفقيًا — وباختيار موضع الاتزان كأصل إحداثي، نحصل على قوة الاستعادة $F=-kx$.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.2.2)

في كشك فاكهة، يُعلِّق البائع كيس برتقال على ميزان زنبركي (نابضي) معلَّق. يهبط المؤشر، ويتجاوز نقطة الاتزان، ثم يهتز إلى أعلى وأسفل حول قراءة جديدة قبل أن يستقر عندها. ولن يهتز الكيس نفسه على منضدة مستوية على الإطلاق — ومع ذلك وهو معلق، يهتز عدة مرات قبل أن يستقر.

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) عند ربط نفس الكتلة فى نفس الزنبرك الرأسي على سطح أفقي أملس. هل يهتز المتذبذب الرأسي بزمن دوري أبطأ أم أسرع أم ثابت لا يتغير؟

(ب) إذا سحبت الكيس إلى أسفل أكثر قبل تركه — سعة أكبر — فهل ستستغرق اهتزازة كاملة واحدة وقتًا أطول؟

حقيقة أساسية:

بالنسبة لمتذبذب كتلة-نابض، الزمن الدوري هو:

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

حيث m الكتلة و k ثابت الزنبرك (النابض).

يمكن تحديد ثابت النابض k من خلال قوة الاستعادة، F = -kx ثم استخدامه لتحديد الزمن الدوري

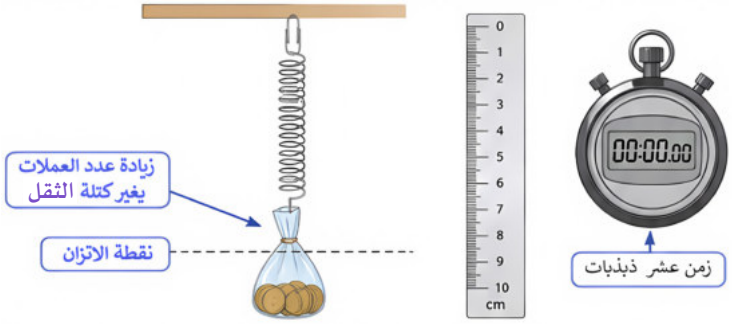
استكشف — ضع حملًا في الزنبرك [النابض] وقس الزمن الدوري

ما ستفعله: تضيف كتلًا مختلفة إلى نابض أو شريط مطاطي، وتقيس الاستطالة، وتحسب الزمن الدوري للاهتزاز.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- نابض مرن أو شريط مطاطي.
- كيس صغير أو كوب ورقي مملوء جزئيًا بعملات معدنية.
- مشبك ورق لتعليق الكتلة.
- مسطرة.
- ساعة توقيت
- دعامة ثابتة لتعليق النابض.



شكل (2.2.2) : تؤدي إضافة العملات المعدنية إلى تغيير الحمل، ويتم قياس زمن عشر اهتزازات كاملة.

ملاحظة القياس:

قِس زمن عشر اهتزازات ثم اقسمه على عشرة، لا تقس زمن اهتزازة واحدة أبدًا: فالاهتزازة الواحدة سريعة جدًّا لتحديد زمنها بدقة. تقليل نسبة عدم اليقين في التوقيت

الخطوات:

١ علِّق النابض من دعامة ثابتة وثبِّت الكيس الفارغ.

٢ أضف بعض العملات حتى يستطيل النابض بمقدار قابل للقياس. اترك النظام ليستقر. هذا الموضع هو وضع الاتزان.

٣ اسحب الكيس إلى أسفل مسافة صغيرة واتركه برفق.

٤ قِس الزمن اللازم لعشر اهتزازات كاملة تُعرَّف الاهتزازة الكاملة بأنها حركة الجسم من أحد الطرفين إلى الطرف الآخر ثم عودته إلى نفس الطرف الذي بدأ منه..

٥ أضف مزيدًا من العملات، واترك النظام ليبلغ وضع اتزانه الجديد، وكرر القياس.

٦ عُد إلى الثقل الأول. كرر القياس باستخدام إزاحة ابتدائية صغيرة ثم إزاحة ابتدائية أكبر، مع إبقاء الكتلة دون تغيير.

الكتلة (عدد العملات) (kg)	الإزاحة الابتدائية (cm)	الزمن لعشر اهتزازات كاملة (s)

حلِّل ما جمعته:

(أ) مع زيادة عدد العملات، هل زاد زمن عشر اهتزازات أم قلَّ؟ ما الذي يشير إليه هذا الاقتراح عن تأثير الكتلة على الزمن الدوري؟

(ب) بالنسبة لنفس الكتلة، هل أدت زيادة الإزاحة الابتدائية إلى تغيير بشكل ملحوظ في الزمن المستغرق لإجراء عشر اهتزازات؟ ما الذي يشير إليه ذلك الاقتراح عن اعتماد الزمن الدوري على السعة للاهتزازات الصغيرة؟

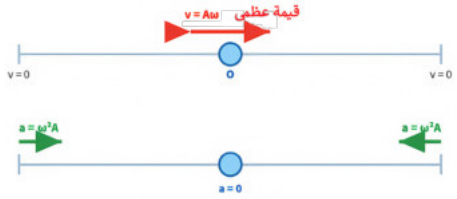
اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، تُركت نتيجة واحدة جانبًا: فسحب الكيس إلى أسفل أكثر لم يغيِّر التوقيت إلا قليلًا تقريبًا. لكن بقاء الزمن الدوري دون تغيير لا يعني أن الحركة لم تتغير— فقد اجتاز السحب الأكبر المنتصف بسرعة أكبر بشكل ملحوظ وارتد بقوة أكبر. ولتسجيل الزمن الدوري بالكامل — مدى سرعتها، ومدى قوتها، والزمن الذي تستغرقه كل مرحلة — نضيف ثلاث كميات إلى النموذج الذي لديك بالفعل.

السرعة : أقصاها عند المركز (موضع الاتزان):

لقد صادفت هذا النمط من قبل: فمع المسطرة المهتزة في الدرس 1-2، اندفع الطرف عبر المنتصف ووقف ساكنًا للحظة عند كل طرف. تتغيّر السرعة المتجهة كـ $v = A\omega \cos \omega t$، لذا تكون السرعة أكبر ما يمكن عند المركز O، حيث $v_{max} = A\omega$، وتقل إلى الصفر عند كل طرف. ولهذا يجعل السحب أكبر — سعة A أكبر — الحركة أسرع، التأرجح أكبر، وبالتالي نفس الزمن الدوري. وبما أن $a = -\omega^2 x$، تكون العجلة صفرًا عند المركز، وأكبر ما يمكن عند الطرفين: $a_{max} = \omega^2 A$. لذا فإن السحب الأكبر ليس فقط أسرع عبر المنتصف، بل أيضًا ارتداد أقوى عند نقطتَي أقصى إزاحة (الطرفين).



شكل (3.2.2) : تؤدي إضافة العملات المعدنية إلى تغيير الحمل، ويتم قياس زمن عشر اهتزازات كاملة.

تكون السرعة أكبر ما يمكن (max) عند المركز؛ وتكون العجلة أكبر ما يمكن (max) عند الطرفين. تؤدي السعة الأكبر إلى زيادة كل من السرعة والعجلة، ولكنها لا تؤدي إلى زيادة الزمن الدوري.

نقطة

- قوة الاستعادة والحركة التوافقية البسيطة:
  تكون قوة الاستعادة التي تعيد الجسم نحو موضع الاتزان في عكس اتجاه الإزاحة X لذلك تكتب: $F = -kx$ $(k>0)$، وباستخدام قانون نيوتن الثاني، تكون معادلة الحركة: $ma = -kx$
- إذا كانت معادلة الحركة $ma = -kx$، فإن الحركة تكون حركة توافقية بسيطة (SHM) السرعة والعجلة أثناء الاهتزاز. السرعة: $v = A\omega \cos \omega t$
- تكون السرعة أكبر ما يمكن عند موضع الاتزان:
  $v_{max} = A\omega$ وتساوي صفرًا عند النهايتين
  العجلة: $a = -\omega^2 x$ يكون التسارع صفرًا عند موضع الاتزان وتكون أكبر ما يمكن عند النهايتين
  $amax = \omega^2 A$
  الزمن الدوري: لا يعتمد على السعة. وبالتعويض عن: $a = -\omega^2 x$ نحصل على $ma = -kx$ في معادلة الحركة $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$.
  عند تعليق وزن في نابض، يهتز الوزن حول موضع الاتزان، وليس حول الطول الطبيعي للنابض

صندوق المعادلات:

السرعة والعجلة في الحركة التوافقية البسيطة:	$v_{max} = A\omega$ ،	$a_{max} = \omega^2 A$

حقيقة أساسية:

لا تؤثر سعة الاهتزاز في الزمن الدوري، لكنها تحدد الباقي:

$v_{max} = A\omega$

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

وتستغرق كل مرحلة من الطرف إلى المركز $\frac{T}{4}$.

كُتيِّب البيانات:

الصيغتان القياسيتان:

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

$a = \omega^2 x$

عند المركز:

$a = 0$ ، $v = v_{max}$؛

وعند الطرف:

$v = 0$ ، $a = a_{max}$.

حقيقة أساسية:

يحتاج الزمن الدوري فقط إلى m وk — اقرأ k من النابض، أو من اتزان السكون

$$x_o = \frac{mg}{k}$$

ثم

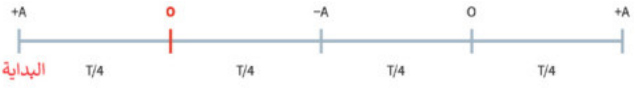
$T = \frac{2\pi}{\omega}$ ، $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

قوة السحب الأولية هي السعة؛ وهي التي تحدد السرعة القصوى (v_{max}) والارتفاع القصوى (a_{max})، ولا تحدد أبدًا T

زمن الارجوحة:

تستغرق الدورة الكاملة زمنًا دوريًّا T. وبحكم تناظر الأرجوحة، تستغرق كل مرحلة بين أحد الطرفين والوسط ربع الزمن الدوري. لذا، فإن الكيس الذي يُطلق من أحد الطرفين يصل أولًا إلى نقطة السكون O بعد

الزمن المستغرق من أحد الطرفين إلى الوسط (المركز / موضع الاتزان)	$t = \frac{1}{4}T = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m}{k}}$



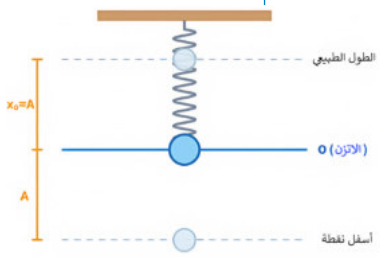
شكل (4.2.2) : تستغرق دورة كاملة أربع فترات رُبعية

الزنبرك (النابض) المعلّق يحدد سعته الخاصة

أخبرنا النموذج بدراسة النابض المعلّق بالنسبة لنقطة سكونه، على بُعد $x_o = \frac{mg}{k}$ أسفل الطول الطبيعي.

هذه الحقيقة وحدها تحدد السعة في التجربة المعتادة. ارفع الكيس حتى يعود الزنبرك إلى طوله الطبيعي، ثم أطلقه من حالة السكون: سيبدأ عند نقطة تقع بالضبط على ارتفاع x_o فوق النقطة O، وبالتالي فإن السعة تساوي $A = x_o$.

وتكون سرعته القصوى عند O عندئذٍ $v = A\omega = g\sqrt{\frac{m}{k}}$ وتقع النقطة الأدنى A أسفل O — أي عند استطالة قدرها $x_o + A = 2x_o$

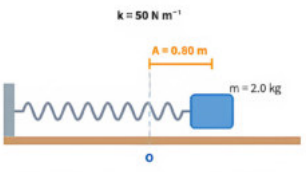
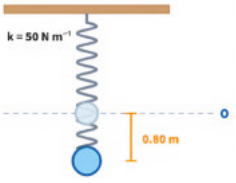


شكل (5.2.2) :
عند رفعه إلى الطول الطبيعي ثم تركه، تكون السعة مساوية لـ x_0 ويستمر التأرجح إلى $2x_0$ أسفل الطول الطبيعي

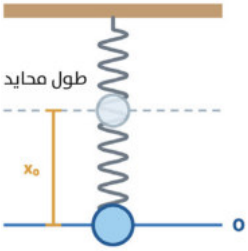
تطبيق سريع:

تُسحَب كتلة مقدارها 0.10 kg معلقة على نابض ثابته $k = 40\ N\ m^{-1}$ مسافة 0.050 m من نقطة سكونها وتُترَك ($\pi = 3.14$). أوجد سرعتها القصوى والزمن الذي تستغرقه لبلوغ نقطة الإتزان للمرة الاولى..

مثال محلول:

الموقف:	يحمل نابض مهمل الكتلة ثابته $k = 50\ N\ m^{-1}$ كتلة $m = 2.0\ kg$. يستقر أولًا على سطح أفقي أملس؛ ثم يُعلَّق النابض نفسه بالكتلة نفسها رأسيًا. وفي كل مرة، تُسحَب الكتلة 0.80 m من نقطة سكونها وتُترَك برفق. خذ $\pi = 3.14$ و $g = 9.8\ m\ s^{-2}$.  
المعطيات والمطلوب:	$m = 2.0\ kg$ ، $k = 50\ N\ m^{-1}$ ، $A = 0.80\ m$ ، $\pi = 3.14$ ، $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ (أ) أفقيًّا — الزمن الدوري، والسرعة عند O، وأقصى عجلة. (ب) النابض نفسه يكون معلَّقًا رأسيًّا — الاستطالة x_o عند O، والزمن الدوري، والزمن المستغرق للوصول إلى O أولًا.
الاستراتيجية:	ابنِ كل شيء من محور واحد، و $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ثم $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ و $T = \frac{2\pi}{\omega}$ والسرعة عند O هي $v_{max} = A\omega$ ، وأقصى عجلة هي $a_{max} = \omega^2 A$. وبالنسبة للنابض الرأسي، أوجد $x_o = \frac{mg}{k}$.

الحل الموضح:	(أ) **أفقيًّا:** 1. $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{50}{2.0}} = \sqrt{25} = 5.0 \text{ rad } s^{-1}$ 2. $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\times3.14}{5.0} = 1.256 \Rightarrow T = 1.3 \text{ s}$ 3. $v_{max} = A\omega = 0.80 \times 5.0 = 4.0 \text{ m } s^{-1}$ 4. $a_{max} = \omega^2 A = 5.0^2 \times 0.80 = 20 \text{ m } s^{-2}$ (ب) **رأسيًّا:** 5. $kx_0 = mg \Rightarrow x_0 = \frac{mg}{k} = \frac{2.0\times9.8}{50} = 0.39 \text{ m}$ 6. والقوة تحافظ على الصيغة $F = mg - k(x + x_0) = -kx$، لذا: $T = 1.3 \text{ s}$ ، $v_{max} = 4.0 \text{ m s}^{-1}$ ، $a_{max} = 20 \text{ m s}^{-2}$ 7. الزمن لبلوغ O أولًا: $t = \frac{T}{4} = \frac{1.256}{4} = 0.314 \text{ s} \approx 0.31 \text{ s}$
منطقية الحل:	يشترك الإعدادان في m وk وA نفسها، لذا يشتركان في الزمن الدوري نفسه وأقصى سرعة وأقصى عجلة؛ وخفضت الجاذبية المركز فقط بمقدار $x_0 = 0.39 \text{ m}$.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يُغيِّر تعليق النابض موضع سكون الكتلة (بمقدار x_0) لكنه يترك الزمن الدوري وأقصى سرعة وأقصى عجلة دون تغيير؟



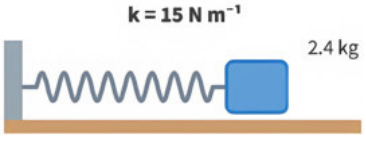
جرِّب بنفسك: تتدلى كتلة $m = 0.20 \text{ kg}$ من نابض ثابته $k = 80 \text{ N m}^{-1}$ وتهتز حول وضع اتزانها ($\pi = 3.14$). **أوجد** الزمن الدوري للاهتزاز.

سؤال للربط:
كيف تبني الحركة التوافقية البسيطة لجسيم نموذج الموجة؟

حاول:

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، بأخذ $\pi = 3.14$ و $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$.

(أ) يُثبَّت أحد طرفَي نابض خفيف ثابته $k = 15 \text{ N/m}$ في جدار على سطح أفقي أملس، وتُربَط قطعة كتلتها 2.4 kg بالطرف الآخر. تُسحَب القطعة قليلًا عن طولها الطبيعي وتُترَك برفق. أوجد الزمن الدوري بالثانية.



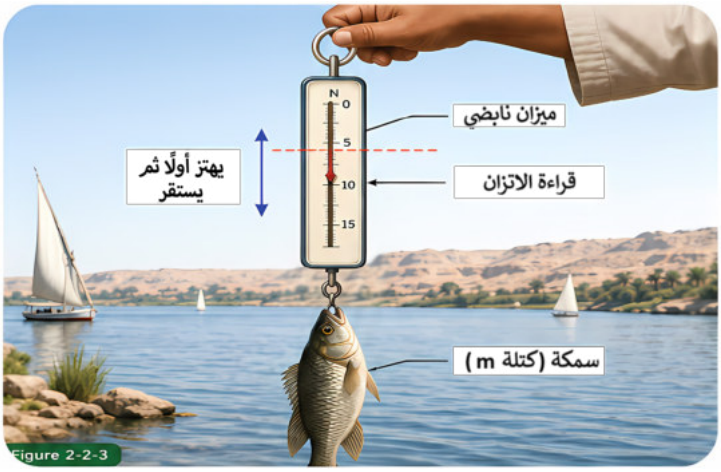
(ب) يُثبَّت الطرف العلوي لنابض مهمل الكتلة في السقف، وتُربَط كتلة m بالطرف السفلي؛ وتتزن عند نقطة O حيث يستطيل النابض بمقدار x_0 عن طوله الطبيعي. ثم تُرفَع الكتلة حتى يبلغ النابض طوله الطبيعي وتُترَك برفق، فتخضع لحركة توافقية بسيطة.

(i) أوجد ثابت النابض k (بدلالة m وg و x_0).

(ii) أوجد السرعة v عندما تمر الكتلة بـ O.

في سياق جديد — ميزان نابضي [زنبركي] لصياد عند بحيرة ناصر

يُثبِّت صياد عند بحيرة ناصر سمكة في ميزان زنبركي يُحمَل باليد. يتحرك المؤشر إلى أسفل ويهتز حول وضع الاتزان قبل أن يستقر. وتشد السمكة الزنبرك حتى توازن قوة الزنبرك الصاعدة وزنها. ويمكن نمذجة كل اهتزازة صغيرة حول وضع الاتزان بوصفها حركة توافقية بسيطة. والزمن الدوري هي $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ وتحدد الجاذبية قراءة الاتزان، بينما يعتمد الزمن الدوري على m و k.



السمكة الاكبر وزنًا لها كتلة أكبر m . باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ توقَّع ما إذا كانت السمكة تهتز بزمن دوري أطول أم أقصر. واشرح لماذا يؤدي النابض (الزنبرك) الأكثر صلابة، الذي له قيمة k أكبر، إلى تغيير معاكس في قيمة الزمن الدوري

طبيعة العلم — العلم مسعى مشترك — الساعة التي حافظت على دقة التوقيت في البحر

تعتمد ساعة التي بها بندول على الجاذبية؛ لأن الزمن الدوري للبندول البسيط تعتمد على g. وعلى سفينة تتمايل، يمكن أن تؤثر التغيرات في المجال الجاذبي الفعلي في حركة ساعة البندول. واستخدمت أجهزة توقيت بحرية طوَّرها جون هاريسون مذبذبات يتحكم فيها نابض بدلًا من البندولات، مما جعلها أكثر ملاءمة للاستخدام في البحر.

دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يجعل جهاز توقيت يتحكم فيه نابض الخيار الأفضل لسفينة تتمايل.

اربط سببك بنتيجة هذا الدرس.

حدد ثابت الزنبرك k من المعادلة $x_o = \frac{mg}{k}$ ، ثم **حدد** الزمن الدوري للاهتزاز

نصيحة امتحانية:

السحب الابتدائي هو السعة — يحدد v_{max} وa_{max}، لكن ليس الدور أبدًا.

اعرض كل سطر تعويض.

سؤال الدرس، وإجابته:

ربط الكتلة نفسها بنابض رأسي بدلًا من نابض أفقي لا يُغيِّر الزمن الدوري، شريطة أن يكون ثابت النابض نفسه والاهتزازات صغيرة. وفي الحالة الرأسية، تُزيح الجاذبية وضع الاتزان إلى أسفل. وعند الاتزان، $kx_o = mg$.

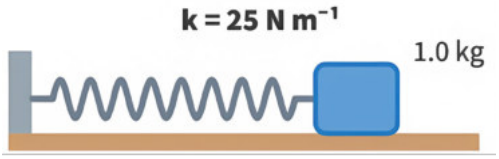
وعندما تُقاس الإزاحة من موضع الاتزان هذا، تكون القوة المحصلة $F = -kx$.

لذا، $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ و $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ولذلك، يكون للنظامين الرأسي والأفقي الزمن الدوري نفسه لقيم m و k نفسيهما. ولا يعتمد الزمن الدوري على g.

اختر وضع الاتزان أصلًا لإحداثياتك، وسيكون للنابض المعلَّق نفس الزمن الدوري للنابض الأفقي: الكتلة نفسها، وثابت النابض نفسه، والزمن الدوري نفسه.

تمرين:

أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين، بأخذ $\pi = 3.14$ و $g = 9.8\ m\,s^{-2}$.



(أ) يُثبَّت نابض خفيف ثابته $K = 25\ N\,M^{-1}$ في جدار على سطح أفقي أملس، مع قطعة كتلتها 1.0 kg على الطرف الآخر. تُسحَب قليلًا عن طولها الطبيعي وتُترَك برفق. أوجد الزمن الدوري بالثانية.

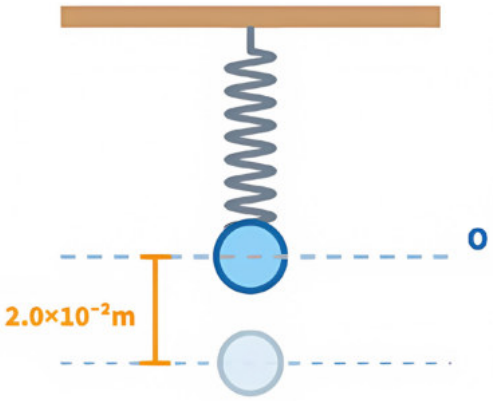
(ب) قطعة كتلتها 0.80 kg على الطرف الآخر. تُسحَب القطعة إلى نقطة على بُعد 0.20 m من نقطة اتزانها O وتُترَك برفق.

(i) أوجد الزمن الدوري بالثانية.

(ii) أوجد السرعة عندما تمر بـ O بوحدة $m\,s^{-1}$.

(iii) أوجد أقصى مقدار للعجلة بوحدة $m\,s^{-2}$.

(جـ) يُثبَّت الطرف العلوي لنابض خفيف ثابته $k = 9.8\ N\,m^{-1}$، وتتدلى كتلة $2.0 \times 10^{-2}\ m$ من الطرف السفلي. تُسحَب الكتلة إلى أسفل $2.0 \times 10^{-2}\ m$ عن الاتزان وتُترَك. أوجد السعة، والزمن الدوري، والسرعة القصوى.



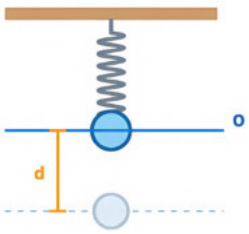
(د) يُثبَّت الطرف العلوي لنابض مهمل الكتلة ثابته k، وتتدلى كتلة m من الطرف السفلي. تُترَك الكتلة من السكون عند الموضع الذي يكون فيه النابض بطوله الطبيعي، فتخضع لحركة توافقية بسيطة.

(i) أوجد السعة، والزمن الدوري، والسرعة القصوى.

(ii) أوجد استطالة النابض عند أدنى نقطة.

(iii) أوجد الزمن المستغرق من الإطلاق حتى أول مرور بمركز الاهتزاز.

(هـ) يُثبَّت نابض مهمل الكتلة في السقف وتتدلى منه كتلة m، متزنة عند O، حيث يستطيل النابض بمقدار x_o. تُسحَب إلى أسفل مسافة d عن O وتُترَك برفق، فتهتز رأسيًّا. أوجد السرعة عندما تمر بـ O (بدلالة d و g و x_o).



سؤال بأسلوب الامتحان:

تتدلى كتلة مقدارها 0.20 kg من نابض خفيف، فتستطيله بمقدار $x_o = 0.049\ m$ عند السكون.

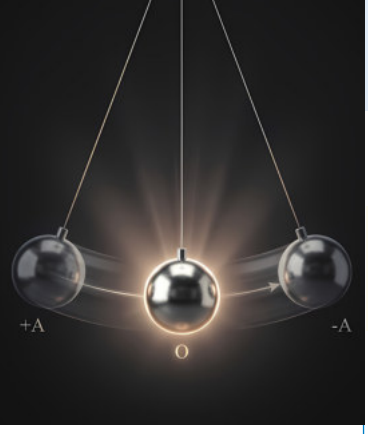
خذ $\pi = 3.14$، $g = 9.8\ m\,s^{-2}$

- أوجد ثابت النابض
- الزمن الدوري للاهتزازات الرأسية الصغيرة.

نصيحة امتحانية:

السحب الابتدائي: هو السعة - يحدد V_{max} و a_{max}، لكن ليس الدور أبدًا.

اعرض كل سطر تعويض.



الدرس ٢-٣ — البندول البسيط

؟ سؤال الدرس:
هل تؤثر كتلة الثقل أو مقدار الإزاحة الابتدائية الصغيرة في الزمن الدوري للبندول البسيط؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحدد** الزمن الدوري لبندول بسيط باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ للإزاحات الزاوية الصغيرة.

٢. **تفسر:** لماذا يعتمد الزمن الدوري للبندول البسيط على L و g، لكن ليس على كتلة الثقل؟

٣. **تفسر:** لماذا يكون الزمن الدوري مستقل تقريبًا عن السعة للاهتزازات الصغيرة؟

حقيقة أساسية:
تكون الحركة توافقية بسيطة عندما تتناسب قوة الاستعادة طرديًا مع الإزاحة عن موضع الاتزان وتتجه عكسها: $F = -kx$.
ولنظام كتلته m حيث k هو ثابت القوة الفعالة.،
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

في حديقة، تتدلى أرجوحتان جنبًا إلى جنب من العارضة نفسها، بحبال لها الطول نفسه. يجلس طفل صغير على إحداهما، وأخوه الأكبر والأثقل على الأخرى. يُطلَقان – اهتزازة تلو الأخرى – يبقيان معًا، جنبًا إلى جنب. وفي الحديقة، توجد أرجوحة أخرى بحبل أطول ولها الزمن الدوري أطول: فهي تستغرق وقتًا أطول لإتمام اهتزازة واحدة.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) الأخ الأثقل. هل ستستغرق أرجوحته وقتًا أطول، أم أقصر، أم نفس الوقت لكل اهتزازة مقارنة بأرجوحة الطفل الأخف، على حبلين متساويين؟

(ب) ادفع إحدى الأرجوحتين بقوة أكبر بحيث تصنع قوسًا أوسع. هل تستغرق الاهتزازة الواحدة الآن وقتًا أطول أم أقصر أم نفس الوقت؟

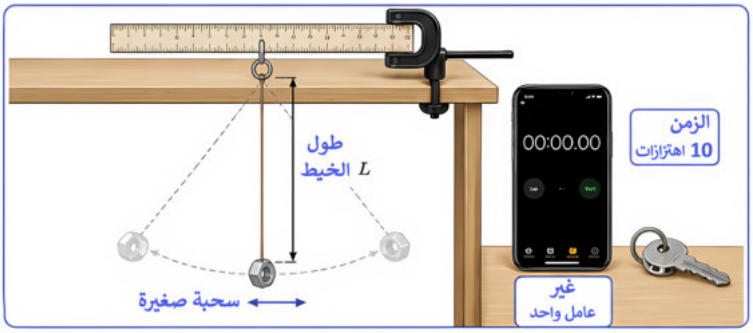
استكشف — قِس الزمن الدوري مع تغيير متغيّر واحد

ما ستفعله: تُغيِّر متغيّرًا واحدًا في كل مرة: طول البندول، أو كتلة الثقل، أو الإزاحة الابتدائية، وتقيس الزمن الدوري الحركة الاهتزازية.

الزمن: 20 دقيقة.

ما تحتاجه:

- خيط طوله 1–2 m.
- ثقل ثانٍ بكتلة مختلفة.
- ساعة توقيت أو مؤقت هاتف.
- جسم صغير كثيف ليكون ثقل البندول.
- دعامة ثابتة.
- مسطرة مسطحة طولها متر.



الشكل (2.3.2): يُقاس طول الخيط، ويُقاس الزمن اللازم لحدوث عشر ذبذبات كاملة.

ملاحظة القياس:
قِس الزمن لعشر اهتزازات كاملة، ثم احسب الزمن الدوري باستخدام $T = t/10$. ويقلل قياس وقت عدة اهتزازات عدم اليقين النسبي. ناتج عن زمن الاستجابة عند بدء تشغيل ساعة الإيقاف وإيقافها.

الخطوات:

١. اربط الثقل بالخيط وعلِّقه من دعامة ثابتة. قِس الطول (L) من نقطة التعليق إلى مركز الثقل.
٢. أزح الثقل بزاوية صغيرة واتركه دون دفع.
٣. قِس الزمن اللازم لعشر اهتزازات كاملة.
٤. الاهتزازة الكاملة هي الحركة من أحد الموضعين (أقصى إزاحة) والعودة إلى نفس الموضع.
٥. اقسم الزمن المقاس على 10 للحصول على الزمن الدوري (T).
٦. كرر القياس بعد تغيير الطول فقط.
٧. كرر القياس بعد تغيير كتلة الثقل فقط.
٨. كرر القياس بعد تغيير الإزاحة الابتدائية فقط، مع إبقاء الإزاحة الزاوية ضمن تقريب الزاوية الصغيرة (أقل من نحو 10° عادةً).

المتغيِّر الذي تغيَّر	الطول L (m)	الزمن لعشر اهتزازات t (s)	الزمن الدوري T (t/10) (s)
البندول الاصلي			
أربعة أمثال الطول الاصلي			
ثقل أثقل			
إزاحة صغيرة أكبر (لا تزال الزاوية أقل من 10°)			

حلِّل ما جمعته:

(أ) عندما جُعل الطول أربعة أمثال، كيف تغير الزمن الدوري؟ قارن نتيجتك بالتوقع: $T \propto \sqrt{L}$

(ب) هل أثر تغيير كتلة الثقل بشكل ملحوظ في الزمن الدوري؟

(جـ) هل أثرت زيادة الإزاحة الابتدائية بشكل ملحوظ في الزمن الدوري عندما بقيت الزاوية صغيرة؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

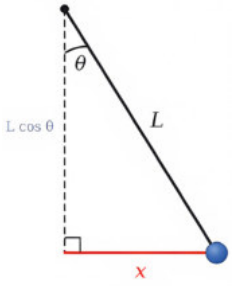
من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، عند زيادة طول الخيط الى 4 أمثال يزداد الزمن الدوري الى الضعف. بينما تركت الكتلة الأثقل والسعة الأكبر الزمن الدوري دون تغيير. ولعلك توقعت أن الكتلة الأثقل ستتأخر أو أن الدفعة الأوسع ستزيد الزمن الدوري — لكن الوقت المقاس يخالف ذلك. وفيما يلي النموذج الذي تشير إليه أدلتك.

تحليل الوزن إلى مركبات:

بالنسبة لثقل بندول كتلته m مربوط بخيط خفيف طوله L، يؤثر الوزن mg رأسيًا إلى أسفل، ويؤثر الشد في الخيط على طول الخيط، وتوفر مركبة الوزن على طول القوس قوة الاستعادة: $F = -mg \sin\theta$، حيث θ الإزاحة الزاوية عن الرأسي. وتُبيِّن الإشارة السالبة أن القوة تؤثر نحو وضع الاتزان.

والذي يعمل كقوة استعادة هي فقط مركبة القوة على طول القوس، $mg \sin\theta$ — ودائمًا تتجه عائدةً نحو O.



الشكل (3.3.2): الإزاحة الأفقية للثقل (الكرة) تساوي $\sin\theta = x/L$

تقريب الزاوية الصغيرة:

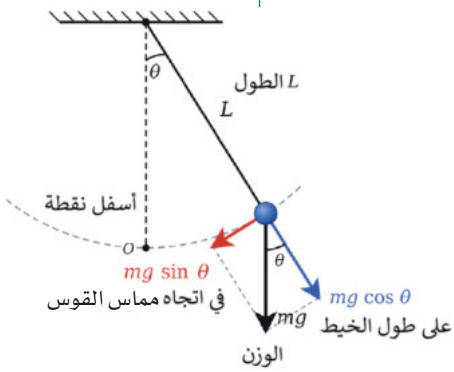
عندما يُزاح ثقل بندول بزاوية θ، تؤثر المركبة المماسية لوزنه بوصفها قوة الاستعادة:

$$F = -mg \sin\theta.$$

وللإزاحات الزاوية الصغيرة، بقياس θ بالراديان، $\sin\theta \approx \theta$. وتُعطَى إزاحة الثقل x على طول القوس الدائري بـ $x = L\theta$، لذا $\theta = x/L$.

لذا، $F \approx -mg\theta = -kx = mgx/L$.

لذا، وللاهتزازات الصغيرة، تتناسب قوة الاستعادة طرديًا مع الإزاحة عن وضع الاتزان وتؤثر في الاتجاه المعاكس. ويخضع البندول بالتالي لحركة توافقية بسيطة تقريبًا، بثابت قوة فعلي $k = \frac{mg}{L}$.



الشكل (4.3.2): المركبة من القوة الموازية للقوس هي التي تعمل على إعادة الثقل إلى موضع الاتزان.

من قوة الاستعادة إلى الزمن الدوري إلغاء الكتلة في حالة التذبذبات الصغيرة، تكون قوة الاستعادة هي $F = \frac{mgx}{L}$، وبمقارنة ذلك بالصيغة القياسية $F = -kx$ نحصل على $K = \frac{mg}{L}$: وبالتعويض في الصيغة العامة للزمن الدوري $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. وبالتالي $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\left(\frac{mg}{L}\right)}} = \sqrt{\frac{L}{g}}$، فإن كتلة الثقل تُلغى، لذا فإن الزمن الدوري لا يعتمد على كتلة الثقل ويعتمد فقط على L و g، شريطة أن ينطبق تقريب الزاوية الصغيرة (في حالة الزوايا الصغيرة فقط).

البندول البسيط:

يتكون البندول البسيط من ثقل صغير معلَّق من نقطة ثابتة بخيط خفيف غير قابل للاستطالة. وللإزاحات الزاوية الصغيرة، يمكن تقريب حركته بحركة توافقية بسيطة.

ملاحظة القياس:

شدة مجال الجاذبية بالقرب من سطح الأرض تساوي تقريبًا $g = 9.8\ m\ s^{-2}$. وبالنسبة للبندولات في الموقع نفسه، تكون g ثابتة، لذا يعتمد الزمن الدوري فقط على الطول L.

نقطة

بلنسبة إلى ثقل كتلته mكيلو جرام ومعلق بخيط طوله L مترفإن القوة المؤثرة في الاتجاه المماسي لمسار الحركة هي مركبة وزن الثقل في إتجاه الحركة، وتساوى :−mg sinθ
وبما أن اتجاه هذه القوة عكس اتجاه الإزاحة X على القوس من موضع الاتزان فإن: F= −mgsinθ−
عندما تكون زاوية التأرجح θ صغيرة بما يكفي، يمكن اعتبار:− sinθ ≈ θ2−
وتكون الإزاحة على طول القوس :− X=Lθ
بالتعويض في العلاقة السابقة :−F=−(mg/L)X

وهذا يعني أن قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع الإزاحة وتكون في الاتجاه المعاكس لها؛ لذلك يمكن اعتبار البندول البسيط ذي زاوية التأرجح الصغيرة حركة توافقية بسيطة SHM بصورة تقريبية

الزمن الدوري للبندول البسيط هو $T = 2\pi\sqrt{(L/g)}$ ويعتمد الزمن الدوري على طول الخيط L وعلى عجلة الجاذبية g، لكنه لا يعتمد على كتلة الثقل ولا على السعة، بشرط أن تكون زاوية التأرجح صغيرة

ملحوظة: تختفى الكتلة m عند اختصارها من البسط والمقام أثناء اشتقاق العلاقة.

صندوق المعادلات:

دور البندول البسيط:	$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

في $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{(\frac{mg}{L})}}$، تظهر الكتلة m في كل من البسط والمقام فتُلغَى، فيبقى $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. لذا، تعتمد الزمن الدوري على الطول L وشدة المجال g، لكن ليس على كتلة الثقل. ولم تدخل السعة أيضًا: فالزاوية الصغيرة بقيت القوة متناسبة مع x. ولاهتزازة صغيرة السعة فإن الزمن الدوري لا يعتمد على الكتلة والسعة — وهو **التماثل الزمني** في التوقيتات الذي أظهرته استكشافاتك.

اختبر ذلك: في خيطين متساويَين، علِّق صامولة ثقيلة على أحدهما وصامولة خفيفة على الآخر؛ أطلقهما معًا من الزاوية الصغيرة نفسها وبيِّن أنهما يبقيان متزامنين لعشر اهتزازات.

تحديد قوة الاستعادة للبندول البسيط:

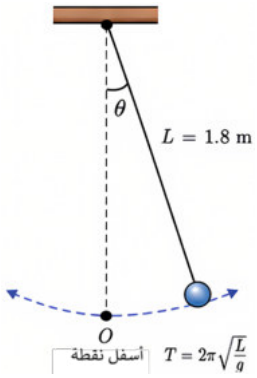
بالنسبة لنابض، تُكتَب قوة الاستعادة مباشرة بصورة $F = -kx$. أما بالنسبة لبندول بسيط، فتُستنتَج قوة الاستعادة الفعلية من المركبة المماسية لوزن الثقل. وللإزاحات الزاوية الصغيرة، $F = -mg\sin\theta$. لذا، $F = -\frac{mg}{L}x$، إذن $F = -$ $k = \frac{mg}{L}$. وبالتعويض في $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ نحصل على $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$.

مثال محلول:

الموقف:	لبندول بسيط خيط طوله $L = 1.8\,m$. خذ $\pi = 3.14$ وشدة مجال الجاذبية $g = 9.8\,m\,s^{-2}$. أوجد الزمن الدوري اهتزازه، لأقرب رقمين معنويين.
المعطيات والمطلوب:	$L = 1.8\,m$، $g = 9.8\,m\,s^{-2}$، $\pi = 3.14$ T = ؟ ⇐ (الكتلة غير معطاة — وغير مطلوبة)
التمثيل:	في حالة الاهتزاز بزاوية صغيرة ⇒ حركة توافقية بسيطة بثابت قوة فعّالة $k = mg/L$، ومن ثم فإن الزمن الدوري هو $(T = 2\pi\sqrt{(L/g)})$. العوامل المؤثرة هي L و g فقط
الاستراتيجية:	حدِّد قوة الاستعادة عند الإزاحة x: من الهندسة $F = -(mg/L)x$، لذا $k = mg/L$؛ ثم $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ وبالنسبة للبندول، عوِّض بـ L و g مباشرة.
الحل الموضح:	(1) $k = mg/L$، لذا $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. (2) $L/g = 1.8/9.8 = 9/49$. (3) $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{9}{49}} = 2\pi\times\frac{3}{7} = \frac{2\times3.14\times3}{7}$ ⇐ $T = 2.7\,s$ ⇐ $T \approx 2.7\,s$.
منطقية الحل:	تحمل الإجابة وحدة الزمن (s)، كما يجب للزمن الدوري؛ $\sqrt{\frac{9}{49}} = \frac{3}{7}$ هو فحص تأكيد، ونحو 2.7 s الزمن الدوري معقولة لأرجوحة طولها نحو 1.8 m.
فسِّرها بنفسك:	لم تُعطَ كتلة الثقل أبدًا. لماذا لا تزال الزمن الدوري محدَّدةً بالكامل؟

كُتيِّب البيانات:

بالنسبة للبندول، استخدم $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ L / g مباشرة؛ تحتاج فقط إلى L و g — والكتلة غير مطلوبة ولا تظهر تأثيرها (مهملة).



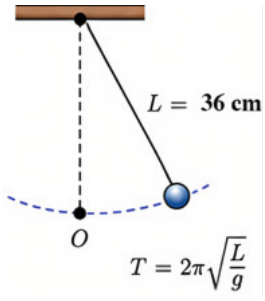
الشكل (5.3.2):
بندول طوله 1.8 m

حاول بنفسك: لبندول بسيط خيط طوله ($L = 1.8\ m$ ، $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ ، $\pi = 3.14$).

أوجد طول الخيط الذي يجعل زمنه الدوري نصف قيمته الحالية. (دلل بالاسباب في اجابتك).

حاول:

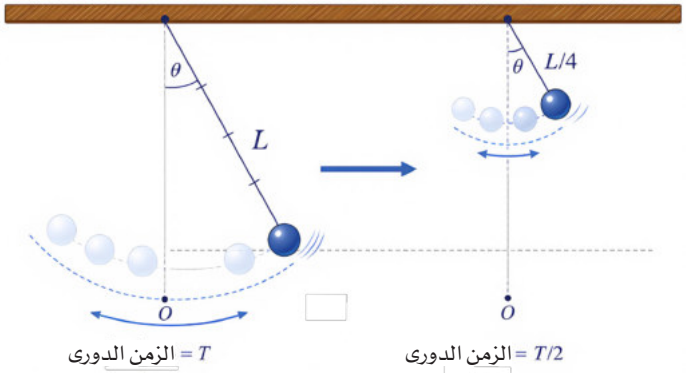
(أ) أوجد الزمن الدوري، بالثانية، لبندول بسيط طول خيطه 36 سم.



الشكل (6.3.2): بندول طول الخيط 36

(ب) لبندول بسيط خيط طوله L والزمن الدوري T. أوجد طول الخيط الذي يجعل الزمن الدوري نصف قيمتها الحالية.

سؤال للربط:
كيف يمكن استخدام الزمن الدوري لبندول بسيط لتحديد شدة المجال الجاذبية g؟



الشكل (6.3.2): نقص الطول الى الربع يقلل الزمن الدوري الى النصف.

في سياق جديد — بندول فوكو في مكتبة الإسكندرية

يتدلى بندول فوكو طويل في مركز علوم القبة السماوية بمكتبة الإسكندرية. ونظرًا لطوله الكبير، يكون الزمن الدوري أطول من الزمن الدوري لأرجوحة حديقة عادية. وللاهتزازات الصغيرة، الزمن الدوري هو $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. ويُستخدَم بندول فوكو أيضًا لإظهار دوران الأرض بالنسبة إلى مستوى الاهتزاز، تدور الأرض والمبنى من تحته. ويبدو لنا الأمر وكأن البندول يغير اتجاهه ببطء، إلا أن حركة الدوران هذه لا تؤثر على سرعة اهتزاز البندول.

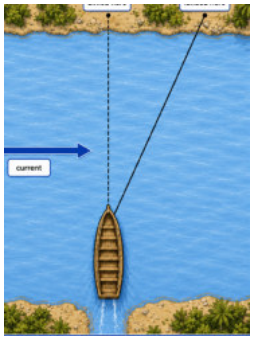
طول حبل بندول الإسكندرية نحو 15 m. باستخدام $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$، أوجد الزمن الدوري وقارنه بالزمن الدوري 2.7 s لأرجوحة الحديقة البالغ طولها 1.8 m.

طبيعة العلم: الأدلة والأنماط — الساعة التي كشفت تباين g على الأرض

في عام ١٦٧٢، لاحظ جان ريشيه أن ساعة بندول كانت تستخدم لقياس التوقيت في باريس أصبحت بطيئة في كايين، بالقرب من خط الاستواء. وبما أن $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$، فإن الزمن الدوري أطول تشير إلى قيمة أصغر لـ g. وقدَّم هذا دليلًا على أن g تتباين قليلًا بحسب الموقع على الأرض — إذ تكون أصغر بالقرب من خط الاستواء.

سؤال الدرس، وإجابته:

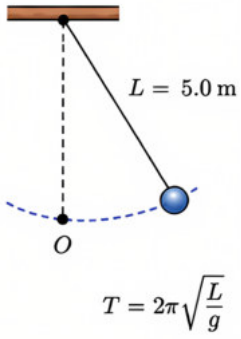
للاهتزازات الصغيرة، لا تؤثر كتلة الثقل ولا التغيّرات الطفيفة في السعة على الزمن الدوري البندول البسيط. توفر المركبة المماسية للوزن قوة الاستعادة $F = -mg\sin\theta$. وللزوايا الصغيرة $\sin\theta \approx x/L$، لذا $F = -(mg/L)x$. وهذه صورة الحركة التوافقية البسيطة بصلابة فعلية $k = mg/L$. وبالتعويض في $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ نحصل على $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. لذا، تعتمد الزمن الدوري على L وg فقط، ولكن ليس على كتلة الثقل. كما تكون الزمن الدوري مستقلةً تقريبًا عن السعة للإزاحات الزاوية الصغيرة.



الشكل (7.3.2):
قارب مُثبَّت بحبل يتأرجح مثل البندول بفعل تيار الماء

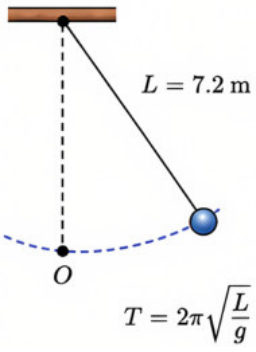
تمرين:

(أ) أوجد الزمن الدوري، بالثانية، لبندول بسيط طول خيطه 5.0 m.



الشكل (8.3.2):
بندول طوله 5 m

(ب) أوجد الزمن الدوري، بالثانية، لبندول بسيط طول خيطه 7.2 m.



الشكل (9.3.2):
بندول طوله 7.2 m

(جـ) أوجد العامل الذي يتغيَّر به الزمن الدوري لبندول بسيط، في كل حالة مما يلي
(يمكن ترك الإجابات بصورة جذرية):

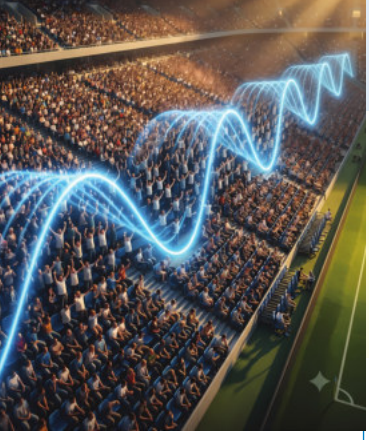
(i) تُجعَل السعة نصف مقدارها.

(ii) يُضاعَف طول الخيط.

(iii) تُصبح كتلة الثقل أربعة أمثالها.

سؤال بأسلوب الامتحان:

لبندول بسيط خيط طوله 2.0 m، خذ $\pi = 3.14$ و$g = 9.8\ \text{m s}^{-2}$.
أوجد الزمن الدوري للاهتزازة الصغيرة، واذكر ماذا يحدث لذلك الزمن الدوري إذا استُبدل الثقل بآخر ضعف كتلته.



الدرس ٢-٤ — الموجات الجيبية

؟ سؤال الدرس:

في موجة الملعب، ينتقل الاضطراب حول الملعب، بينما يبقى كل متفرج بالقرب من مقعده. ماذا تنقل الموجة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تصف الموجة بوصفها اضطرابًا منتقلًا ينقل طاقة دون انتقال فعلي للمادة.

٢. تحدد السعة والطول الموجي λ من مخطط الإزاحة-الموضع (y-x)، والزمن الدوري T من مخطط الإزاحة-الزمن (y-t).

٣. تحسب سرعة الموجة باستخدام $v = f\lambda$.

٤. تقارن بين الموجات المستعرضة والطولية، وبين الموجات الميكانيكية والكهرومغناطيسية.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

شكل (1.4.2) : تعبر الموجة المدرجات بينما يظل كل مشجع في مقعده

في مباراة مزدحمة، يصنع الجمهور «موجة»: يقف قسم من المشجعين ويرفعون أذرعهم، ثم يجلسون، بينما يقف القسم التالي. وينتقل الاضطراب حول الملعب بأكمله في ثوانٍ قليلة — ومع ذلك يبقى كل مشجع في مقعده. ينتقل الاضطراب بوضوح حول الملعب بأكمله، لكن الناس لا يتحركون معه.

توقّع قبل أن تستمر :

(أ) في موجة الملعب، هل ينتقل المتفرجون حول الملعب مع الموجة، أم يبقون بالقرب من مواضعهم؟

(ب) إذا تحرك المتفرجون عبر إزاحة رأسية أكبر، هل يزيد هذا بالضرورة سرعة الموجة؟ فسِّر إجابتك.

حقيقة أساسية:

في الموجات الميكانيكية، يهتز كل جسيم من الوسط حول موضع اتزانه. وينتقل الاضطراب عبر الوسط، لكن جسيمات الوسط لا تنتقل مع الموجة.

استكشف — ارسل نبضة على طول حبل مشدود وراقب حركة العلامة

ما ستفعله: تُرسِل نبضة على طول حبل مشدود وتلاحظ حركة علامة ملوَّنة مثبَّتة على الحبل.

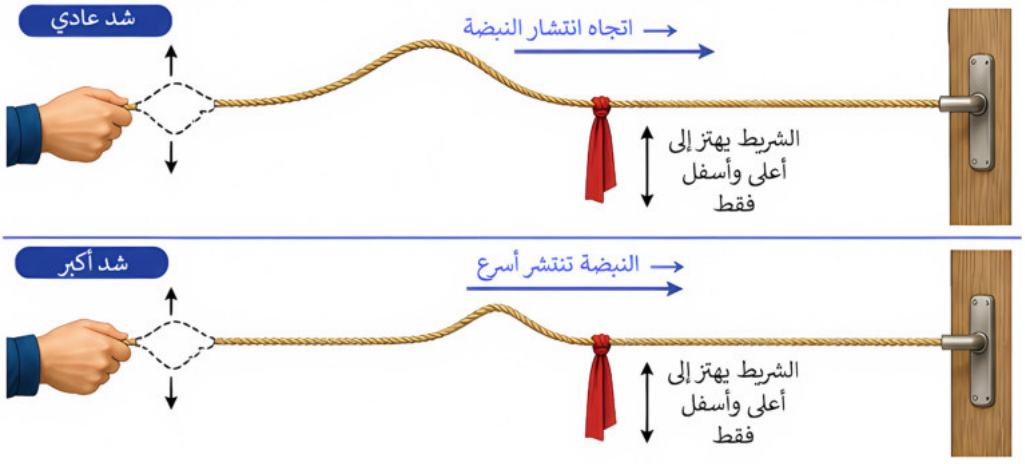
الزمن: 12 دقيقة

ما تحتاجه:

- حبل (حبل غسيل) طوله 3–4 m
- علامة قماشية ملوَّنة
- دعامة ثابتة أو شخص آخر يمسك أحد الطرفين

ملاحظة القياس:

أرسل عدة نبضات وراقب الشريط نفسه في كل مرة: قد لا تكفي ملاحظة واحدة لاستنتاجات موثوقة.



شكل (2.4.2) : زيادة الشد تجعل النبضة تنتقل بسرعة أكبر على طول الحبل نفسه.

الخطوات:

١ افرد الحبل واربط العلامة الملوَّنة بالقرب من المنتصف.

٢ أمسك أحد طرفَي الحبل بينما يكون الطرف الآخر ثابتًا أو يمسكه شخص آخر.

٣ حرِّك يدك بحدة إلى أعلى وأسفل مرة واحدة لإرسال نبضة واحدة على طول الحبل.

٤ لاحظ ما إذا كانت العلامة تنتقل على طول الحبل أم تهتز حول موضع اتزانها، بينما تمر النبضة.

٥ زد الشد في الحبل وكرر النبضة. قارن سرعة النبضة في الحالتين.

التغيير الذي أُجري	حركة العلامة	السرعة النسبية للنبضة
شد عادي		
شد أكبر		

حلِّل ما جمعته:

(أ) عندما مرت النبضة بالعلامة، هل تحركت العلامة على طول الحبل أم اهتزت حول موضع اتزانها؟

(ب) كيف أثرت زيادة شد الحبل في سرعة النبضة؟ ماذا يقترح هذا عن اعتماد سرعة الموجة على خصائص الوسط؟

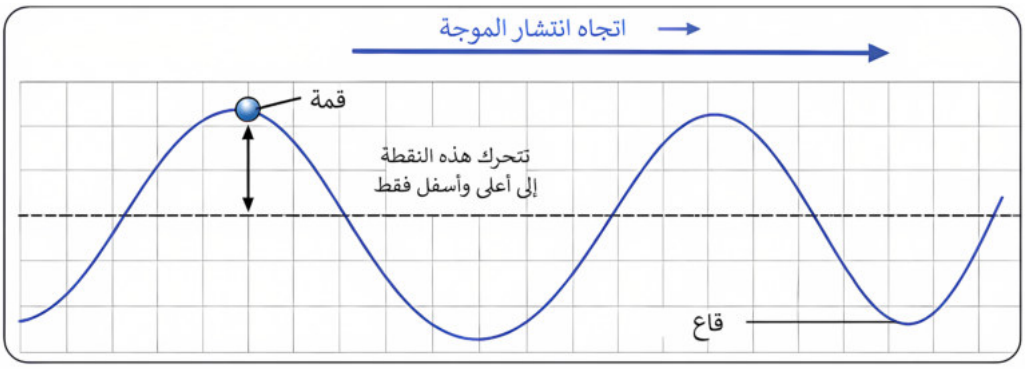
اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، رأيت النبضة تنتقل على طول الحبل بينما اهتز الشريط القماشي حول موضع اتزانه. ولعلك توقعت أن القماش سيتحرك معها — لكن هذا لم يحدث. كما غيَّر شد الحبل السرعة، رغم أن النبضة التي أعطيتها كانت نفسها. وفيما يلي النموذج الذي تشير إليه أدلتك.

اضطراب ينتقل عبر وسط:

الموجة اضطراب منتقل ينقل الطاقة من مكان إلى آخر دون انتقال فعلي للمادة. وفي الموجة الميكانيكية، ينتقل الاضطراب عبر وسط مادي مثل حبل أو ماء أو هواء. ويهتز كل جزء صغير من الوسط حول موضع اتزانه، بينما تمر الموجة.



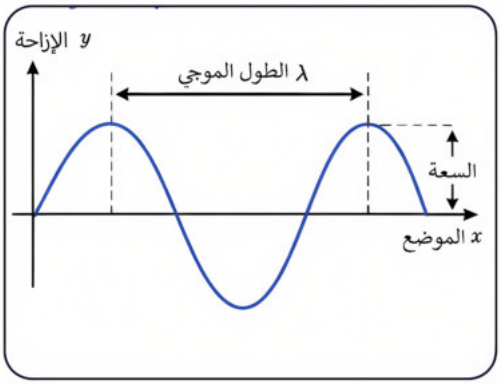
شكل (3.4.2) : تتحرك كل نقطة لأعلى ولأسفل بينما تنتقل الموجة على طول الحبل.

في الحبل، تنتقل النبضة على طول الحبل، بينما يتحرك كل جزء صغير من الحبل إلى أعلى وأسفل حول موضع اتزانه. لذا، ينتقل نمط الموجة والطاقة على طول الحبل، لكن مادة الحبل لا تنتقل مع الموجة. وإذا اهتز مصدر موجة بصورة جيبية، يمكن أن تُشكِّل إزاحة الوسط موجة جيبية متكررة. وتُسمى أعلى نقاط الموجة قممًا، وتُسمى أدنى نقاطها قيعانًا. والطول الموجي (λ) هو المسافة بين نقطتين متتاليتين متطابقتَين في الطور، كالمسافة من قمة إلى القمة التالية أو من قاع إلى القاع التالي. ويُقاس بوحدة المتر (m).

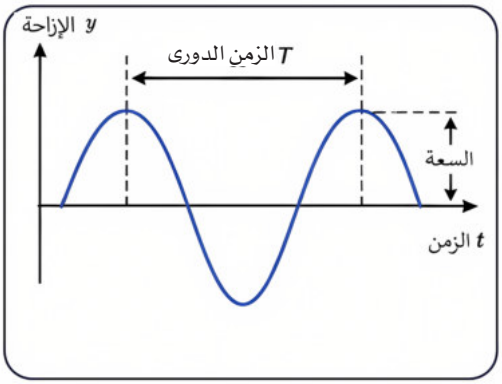
الطول الموجي:
المسافة بين نقطتين متتاليتين متطابقتَين في الطور، مثلًا من قمة إلى القمة التالية أو من قاع إلى القاع التالي، على منحنى y-x.

قراءة منحنيات الإزاحة-الموضع والإزاحة-الزمن:

يُظهر منحنى **الإزاحة - الموضع** ($y-x$) إزاحة (y) نقاط الوسط عند مواضع مختلفة (x) في لحظة واحدة. ومن هذا المنحنى، يمكن تحديد الطول الموجي (λ) والسعة (A). ولا يُظهر الزمن الدوري مباشرة. ويُظهر منحنى **الإزاحة-الزمن** ($y-t$) إزاحة (y) نقطة ثابتة واحدة في الوسط مع تغيُّر الزمن (t). ومن هذا المنحنى، يمكن تحديد الزمن الدوري (T) والسعة (A). ولا يُظهر الطول الموجي مباشرة.



شكل (4.4.2) : رسم الإزاحة مقابل الزمن يحدد الزمن الدوري



شكل (5.4.2) : رسم الإزاحة مقابل الموضع يحدد الطول الموجي

علاقة سرعة الموجة:

يُنتج مصدر f موجة في الثانية. وخلال ثانية واحدة، ينتقل الاضطراب مسافة $f\lambda$، لذا فإن سرعة الموجة $v = f\lambda$، وبما أن التردد يساوي مقلوب الزمن الدوري، فإن السرعة تساوي أيضًا الطول الموجي مقسومًا على الزمن الدوري.

نقطة

الموجة: الظاهرة التي تنتشر فيها الاهتزازات الناتجة عند نقطة معينة خلال الوسط المحيط تُسمّى موجة.

مصدر الموجة: النقطة التي تبدأ عندها الاهتزازات تُسمّى مصدر الموجة (Wave source)

الطول الموجي λ: طول موجة كاملة واحدة يُسمّى الطول الموجي ويرمز له بـ λ ووحدته m

التردد f: عدد الاهتزازات التي تحدث في الثانية يُسمّى التردد f، ويرمز له بـ f ووحدته الهرتز Hz

العلاقة بين السرعة والطول الموجي والزمن الدوري إذا كان:

انتشار الموجة = v ، بوحدة الثانية، T = الزمن الدوري = s

$v = f\lambda = \lambda/T$ و $f = 1/T$

أي أن: سرعة الموجة = التردد × الطول الموجي

الموجة الجيبية: الموجه التى يتبع فيها الازاحة منحنى جيبى sine curve تسمى موجة جيبيه. (Sine wave)

الفرق بين y–X وy–t graphs

انتبه إلى المحور الأفقي:

(1) منحنى y–X:– يمثل شكل الموجة عند لحظة زمنية معينة، أي يمكن اعتباره مثل صورة فوتوغرافية للموجة كاملة.

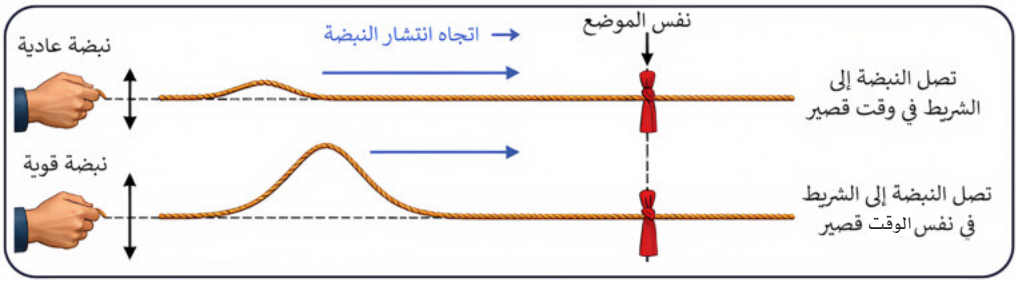
(2) منحنى y–t :–يمثل حركة نقطة واحدة من الوسط مع مرور الزمن، أي يمكن اعتباره مثل فيديو لحركة هذه النقطة.

صندوق المعادلات:

معادلات الموجة:	$v = f\lambda = \frac{\lambda}{T}$
التردد والزمن الدوري:	$f = \frac{1}{T}$

اختبر ذلك:

أرسل نبضة عادية، ثم نبضة قوية، على الحبل نفسه وراقب الشريط القماشي: بيِّن أن كل نبضة تصله في الزمن القصير نفسه — وتختلف السعة فقط.



شكل (6.4.2) : لا تؤثر سعة النبضة في سرعة انتشاره

نصيحة امتحانية:

اذكر أي منحنى تقرأ منه كل كمية: λ والسعة من منحنى y–x (المكاني)، والزمن الدورى من مخطط y–t. والخلط بينهما هو الخطأ الأكثر شيوعًا.

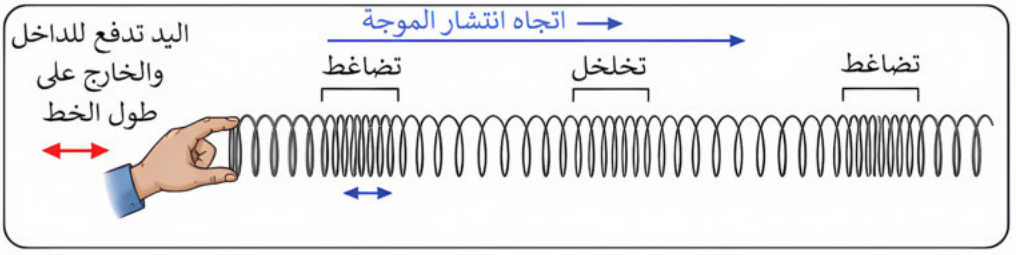
حقيقة أساسية:

بالنسبة لموجات على الحبل نفسه تحت قوة الشد نفسه، تزيد زيادة السعة الطاقة التي تحملها الموجة، لكنها لا تُغيِّر سرعة الموجة. وتعتمد السرعة على خصائص الوسط، كالشد والكتلة لكل وحدة طول لخيط مشدود.

أنواع الموجات: المستعرضة، والطولية، والميكانيكية، والكهرومغناطيسية

في الموجة المستعرضة الميكانيكية، تهتز جسيمات الوسط عموديًّا على اتجاه انتقال الموجة. والموجة على حبل مثال على ذلك.

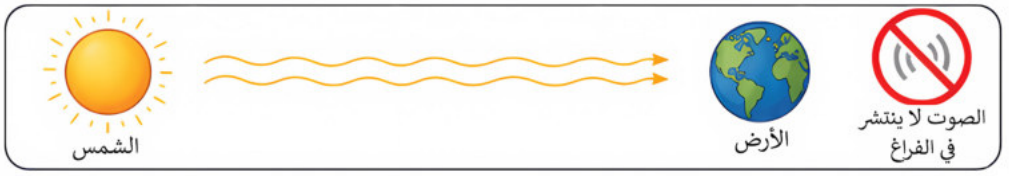
وفي الموجة الطولية، تهتز جسيمات الوسط بصورة موازية لاتجاه انتقال الموجة. والصوت في الهواء مثال على ذلك؛ ويتكون من مناطق تضاغط وتخلخل.



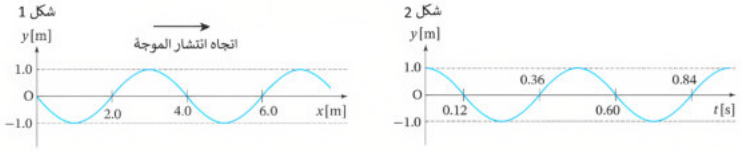
شكل (7.4.2) : لا تؤثر سعة النبضة في سرعة انتشاره.

الموجات الكهرومغناطيسية

الصوت موجة طولية ميكانيكية، لهذا يحتاج إلى وسط مادي ولا يمكنه الانتقال عبر الفراغ. أما الضوء فهو موجة كهرومغناطيسية، ويمكنه الانتقال عبر الفراغ بسرعة $c = 3\times10^8\ m/s$.



مثال محلول:

الموقف:	تنتقل موجة جيبية في اتجاه x الموجب. يُظهر منحنى الإزاحة–الموضع (y–x) شكل الموجة عند الزمن $t = 0\ s$. ويُظهر منحنى الإزاحة–الزمن (y–t) حركة النقطة عند $x = 3.0\ m$. أوجد السعة، والطول الموجي، والزمن الدوري.  شكل (9.4.2) : الموجة نفسها ممثَّلة بالنسبة إلى الموضع وبالنسبة إلى الزمن
المعطيات والمطلوب:	منحنى $y–x$: ارتفاع القمة ودورة كاملة على طول x. منحنى $y–t$: الزمن الدوري دورة كاملة على طول t. **المطلوب:** السعة، والطول الموجي، والزمن الدوري.
التمثيل	يُعطي المنحنيان كميات مختلفة: خذ الطول الموجي والسعة من منحنى $(y–x)$، والزمن الدوري من تتبع الزمن على $(y–t)$.
الاستراتيجية:	من $y–x$ اقرأ الطول الموجي والسعة؛ ومن أثر $y–t$ لنقطة واحدة اقرأ الزمن الدوري؛ وإذا طلبت السرعة، ادمجهما باستخدام $v = f\lambda$.

حقيقة أساسية:

بالنسبة للموجات التي تنتشر في الحبل نفسه وتحت مقدار الشد ذاته، فإن زيادة سعة الموجة تؤدي إلى زيادة الطاقة التي تحملها، ولكنها لا تغير سرعة الموجة؛ إذ تعتمد السرعة على خصائص الوسط، مثل قوة الشد والكتلة لكل وحدة طول في حالة الوتر المشدود.

سؤال الربط:

كيف تساعد الحركة التوافقية البسيطة في وصف الموجة الجيبية؟

في الموجة الجيبية، تتذبذب كل نقطة من نقاط الوسط حول موضع اتزانها، بينما ينتشر الاضطراب عبر الوسط.

الحل الموضح:	١) السعة من الارتفاع (يمكن قراءتها من أي من الرسمين البيانيين — حيث تصل القمة إلى نفس الارتفاع): تقع القمة عند $y = 1.0\ m$، لذا فإن السعة تساوي $1.0\ m$. ٢) الطول الموجي من الرسم البياني y–x مسافة كاملة من القمة إلى القمة التالية على المحور x تمتد دورة واحدة من 0 إلى $4.0\ m$، لذا فإن الطول الموجي هو $4.0\ m$. ٣) الزمن الدوري من الرسم البياني y–t دورة كاملة واحدة على طول t): تمتد دورة واحدة من $0.12\ s$ إلى $0.60\ s$، لذا فإن الزمن الدوري $0.60 - 0.12 = 0.48\ s$.
منطقية الحل:	تُقرأ السعة والطول الموجي من منحنى $(y$–$x)$، لذا وحدتاهما المتر. وتُقرأ الزمن الدوري من منحنى $(y$–$t)$، وبالتالي فإن وحدتها هي الثانية. وهذا يتسق مع تعريفات هذه الكميات.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يمكن تحديد الزمن الدوري من منحنى $(y$–$t)$ لكن ليس من منحنى $(y$–$x)$؟

حاول بنفسك: تنتشر موجة جيبية في الاتجاه $x+$؛ ويُظهر منحنى y–x الخاص بها دورة كاملة واحدة من $x = 0$ إلى $x = 2.0\ m$ بارتفاع قمة يبلغ $1.5\ m$، ويُظهر منحنى y–t الخاص بها (بالنسبة للنقطة عند $x = 2.0\ m$) دورة كاملة واحدة خلال $0.4\ s$ أوجد السعة والطول الموجي والزمن الدوري.

نصيحة امتحانية:
اكتب خطوة التعويض — اكتب $v = f\lambda$ بالأرقام قبل النتيجة.
ولرسم شكل موجة متحركة، أزح الموجة بمقدار $d = v \times \Delta t$ في اتجاه الانتقال.

حاول:

(أ) لحركة توافقية بسيطة الزمن الدوري مقدارة $2.0\ s$. أوجد ترددها بالهرتز.

(ب) لموجة جيبية طول موجي $2.0\ m$ وتردد $3.0\ Hz$. أوجد السرعة التي تنتقل بها بوحدة $m\ s^{-1}$.

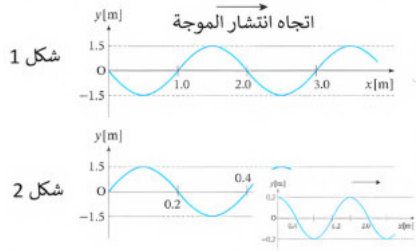
(جـ) بالنسبة للموجة الجيبية التي لها $(y$–$x)$ عند $t = 0\ s$؛ $(y$–$t)$ للنقطة عند $x = 2.0\ m$، **أوجد:**

(i) السعة بالمتر،

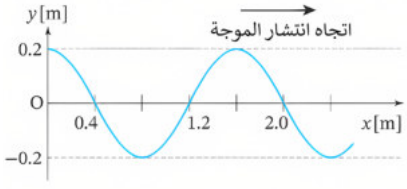
(ii) الطول الموجي بالمتر،

(iii) الزمن الدوري بالثانية.

(د) لموجة جيبية تتحرك في اتجاه $x+$ بسرعة $4.0\ m\ s^{-1}$ شكل الموجة الموضح في المخطط عند $t = 0\ s$. ارسمها عند $t = 0.50\ s$.



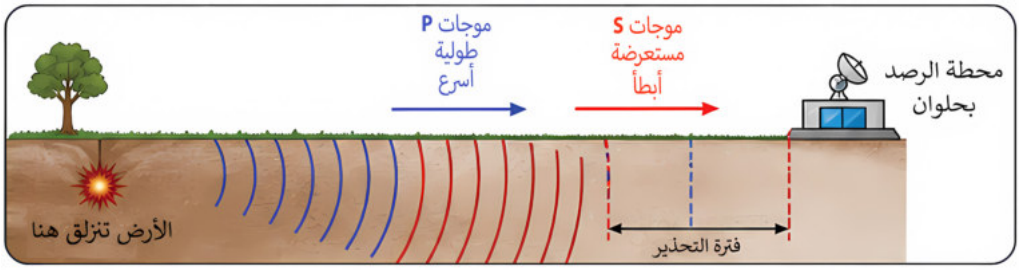
شكل (10.4.2): رسمان بيانيان للموجة نفسها، خاصّان بالمثال المحلول.



شكل (11.4.2): موجة سعتها $0.2\ m$

في سياق جديد — موجتا الزلزال

عندما يحدث زلزال، يُنتج أنواعًا مختلفة من الموجات الزلزالية. الموجات الأولية، أو **موجات P**، وهي طولية وتنتقل بصورة أسرع عمومًا. والموجات الثانوية، أو **موجات S**، وهي مستعرضة وتنتقل بصورة أبطأ. وتغادر كلتا الموجتين المصدر في الوقت نفسه تقريبًا، لكن موجة P تصل إلى محطة الرصد أولًا.



شكل (12.4.2) : تصل الموجة الأولية (P) الأسرع أولًا، مما يترك فترة زمنية للتحذير قبل وصول الموجة الأبطأ

دورك الآن: تغادر موجتا P و S المصدر في الوقت نفسه تقريبًا، لكن موجة P تنتقل أسرع.
فسِّر: لماذا تزداد الفجوة الزمنية بين وصولهما لمحطة أبعد عن المصدر؟

نصيحة امتحانية:
اكتب العلاقة $f = 1/T$ و $v = f\lambda$، ثم وضّح خطوة التعويض؛ إذ تُمنح الدرجات على صحة خطوات الحل.

طبيعة العلم — النماذج والأدلة — هرتز يكتشف الموجات التي تنبأ بها ماكسويل

تنبأت نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية بأن الضوء موجة كهرومغناطيسية وأن الموجات الكهرومغناطيسية يمكن توليدها كهربائيًا. وفي عام ١٨٨٧، ولّد هاينريش هرتز موجات كهرومغناطيسية واكتشفها في المعمل باستخدام مرسل شراري وحلقة استقبال. وقدَّم هذا دليلًا تجريبيًا على تنبؤ ماكسويل.

دورك الآن: لماذا كان دليل هرتز التجريبي ضروريًا لتأكيد تنبؤ ماكسويل؟

سؤال الدرس، وإجابته:

في موجة الملعب، ينتقل الاضطراب وطاقته حول الملعب، لكن المتفرجين لا ينتقلون مع الموجة. يتحرك كل متفرج إلى أعلى وأسفل حول موضعه، ثم يعود إلى وضع اتزانه.

وبالمثل، في الموجة الميكانيكية، تهتز جسيمات الوسط حول أوضاع اتزانها، بينما تنقل الموجة الطاقة عبر الوسط.

تمرين:

(أ) لحركة توافقية بسيطة الزمن الدوري مقداره 0.10 s. أوجد ترددها بالهرتز.

(ب) لحركة توافقية بسيطة الزمن الدوري مقداره 4.0 s. أوجد ترددها بالهرتز.

(جـ) لموجة جيبية الزمن الدوري مقدارها 0.20 s وطول موجي 3.0 m. أوجد سرعتها بـ $m\,s^{-1}$.

(د) لموجة جيبية طول موجي 1.5 m وتردد 4.0 Hz. أوجد سرعتها بـ $m\,s^{-1}$.

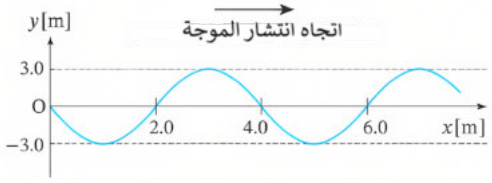
(هـ) بالنسبة للموجة الجيبية في المنحنيين (y–x عند $t = 0$ s؛ y–t للنقطة عند $x = 2.0$ m)، **أوجد**:

(i) السعة بالمتر.

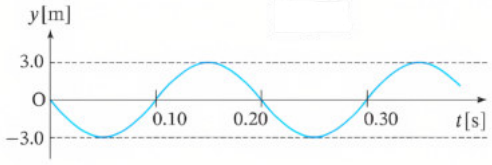
(ii) الطول الموجي بالمتر.

(iii) الزمن الدوري بالثانية.

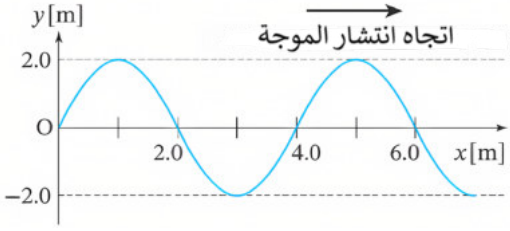
شكل 1



شكل 2



(و) لموجة جيبية تتحرك في اتجاه $x+$ بسرعة $1.0\,m\,s^{-1}$ شكل الموجة الموضح عند $t = 0$ s. **ارسمها** عند $t = 1.0$ s.



سؤال بأسلوب الامتحان:

منحنى y–x لموجة جيبية على وتر يُظهر طولاً موجيًا 0.60 m ومنحنى y–t يُظهر الزمن الدوري 0.20 s. أوجد التردد، ثم أوجد سرعة الموجة بـ $m\,s^{-1}$.

الدرس ٢–٥ — تداخل الموجات والموجات الموقوفة

؟ سؤال الدرس:

عندما يُصدر مكبِّرا صوت موجات صوتية مترابطة بالتردد نفسه، قد يكون الصوت عاليًا عند بعض المواضع وهادئًا عند أخرى. في ظل أي شروط تعزز الموجات بعضها بعضًا أو تُلغِي بعضها بعضًا؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تطبق مبدأ التراكب؛ لتحديد الإزاحة المحصلة عندما تتراكب موجتان.

٢. تستخدم فرق المسار للتنبؤ بالتداخل البنَّاء والهدَّام لمصادر مترابطة.

٣. تصف كيف يمكن لموجتين لهما نفس التردد والسعة وتتحركان في اتجاهين متعاكسين أن تُكوِّنا موجة موقوفة.

حقيقة أساسية:

عندما تتراكب موجتان عند نقطة، تكون الإزاحة المحصلة المجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين المنفردتين:

$$y = y_1 + y_2$$

وهذا هو مبدأ التراكب. بعد التراكب، تستمر الموجات في الانتشار كما كان الحال من قبل، بشرط أن يتصرف الوسط بشكل خطي.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

شكل (1.5.2): يُنتج مكبِّران صوتيّان مناطقَ مرتفعة ومنخفضة الشدة الصوتية عبر القاعة

قبيل حفل مدرسي، تُصدر نغمة اختبار ثابتة عبر مكبِّرَي صوت على المسرح. وبينما تسير على طول الواجهة، تكون النغمة عالية، ثم تكاد تختفي، ثم تعلو مرة أخرى — نمط متكرر. والمفاجئ أن هذا الموضع الهادئ أقرب إلى مكبِّرَي الصوت من الموضع العالي الذي يليه مباشرة. ويبقى مكبِّرا الصوت يعملان طوال الوقت.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل تكون النقطة الأبعد عن مكبِّرَي الصوت أهدأ دائمًا؟ فسِّر لماذا قد لا يكون هذا صحيحًا عندما تتداخل موجتان.

(ب) إذا استُخدم مكبِّرا صوت متطابقان بدلاً من واحد، فهل يجب أن تكون كل نقطة في القاعة أعلى صوتًا؟ فسِّر إجابتك.

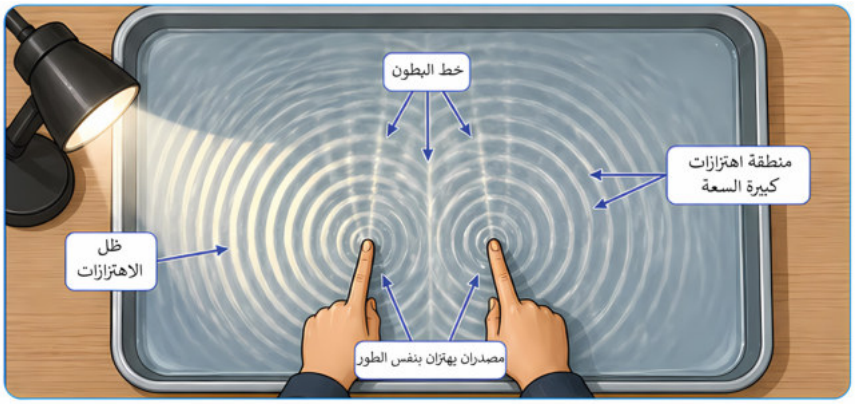
استكشف — لاحظ تداخل موجات الماء

ما ستفعله: تُنشئ مجموعتين من تموجات الماء وتلاحظ نمط تداخلهما.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- صينية واسعة ضحلة.
- ماء بعمق نحو 1 سم.
- إصبعان أو طرفا قلمَي رصاص مثبَّتان على بُعد بضعة سنتيمترات.
- مصباح ساطع أو مصباح هاتف يدوي.



الخطوات:

١ املأ الصينية بالماء واترك السطح ليصبح ساكنًا.

٢ اغمس طرفَي القلمين أو الإصبعين في الماء، وانقر سطح الماء بهما معًا بمعدل ثابت.

٣ لاحظ نمط التموجات والظلال على قاع الصينية.

٤ حدِّد الخطوط التي يبقى فيها الماء ساكنًا تقريبًا والمناطق المجاورة التي يهتز فيها الماء بقوة.

٥ زد تردد النقر ولاحظ كيف يتغيَّر التباعد بين الخطوط الساكنة المتجاورة.

معدل النقر	عدد الخطوط الساكنة المُلاحَظة	التباعد بين الخطوط الساكنة المتجاورة
بطيء وثابت		
أسرع وثابت		

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل الخطوط الساكنة متباعدة بانتظام تقريبًا؟ ماذا يحدث لتباعدها عند زيادة تردد النقر؟

(ب) ينقر كلا المصدرين بالطور نفسه. لماذا تبقى بعض النقاط بين المصدرين ساكنة تقريبًا؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

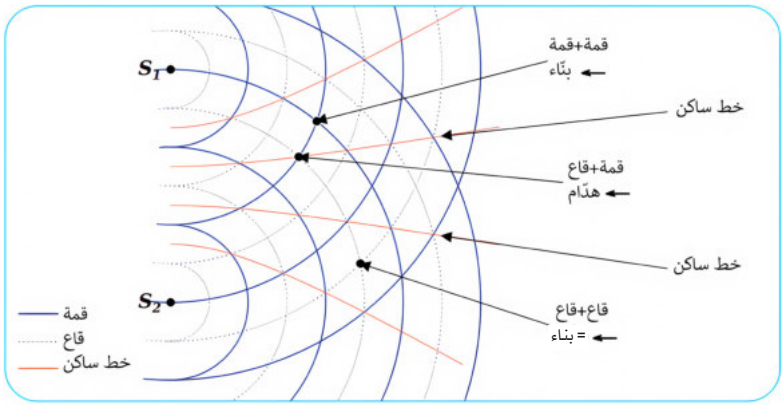
الملاحظ من خلال النموذج:

في نشاط الاستكشاف (Explore)، تكوّنت خطوط كانت المياه عندها شبه ساكنة، وتُسمّى الخطوط العقدية (Nodal lines)، ضمن نمط التداخل الناتج عن مصدرين متوافقين في الطور. وقد لوحظ أن المسافة بين هذه الخطوط تقل كلما زاد التردد.

قد تتوقع أن وجود مصدرين للموجات سيؤدي إلى سعة أكبر في كل مكان، وهذا ما قد يتوقعه معظم الناس. لكن المصدرين استمرا في الاهتزاز بالمعدل نفسه، ولذلك فإن النمط المشاهد ينتج من تراكب الموجتين عند المناطق التي تتداخلان فيها.

موجتان عند نقطة واحدة — تجمع الإزاحتان:

عندما تلتقي موجتان عند نقطة في وسط خطي، فإن الإزاحة المحصلة تساوي المجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين: $y = y_1 + y_2$. وإذا وصلت قمتان معًا، تكون الإزاحة المحصلة أكبر؛ وهذا تداخل بنّاء. وإذا وصل قاع وقمة مساوية له معًا، تكون الإزاحة المحصلة صفرًا؛ وهذا تداخل هدّام.



فرق المسار يحدد — معبَّرًا عنه بأنصاف أطوال موجية:

بالنسبة لمصدرين مترابطين S_1 وS_2، فرق المسار عند نقطة P هو: $\Delta d = |S_1P - S_2P|$ حيث S_1P وS_2P هما المسافتان من المصدرين إلى النقطة P.

بالنسبة لمصدرين مترابطين يهتزان بالطور نفسه، يحدث التداخل البنّاء عندما $\Delta d = n\lambda$، حيث n = 0، 1، 2، 3، .... ويحدث التداخل الهدّام عندما $\Delta d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$، حيث n = 0، 1، 2، 3، .... وإذا اهتز المصدران المترابطين بطورين متعاكسين، تنعكس الشروط: فروق المسار التي أنتجت تداخلاً بنّاءً للمصدرين متطابقَي الطور تُنتج تداخلاً هدّامًا، والعكس صحيح.

نقطة

- الكمية التي تمثل حالة اهتزاز الوسط، أي إزاحته وسرعته، تُسمّى الطور (Phase). ويقال إن نقطتين تكونان متفقتين في الطور (In phase) إذا كانت إزاحتاهما متساويتين ومتطابقتين في الاتجاه عند كل لحظة؛ بينما تكونان متعاكستين في الطور (In antiphase) إذا كانت إزاحتاهما متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه.
- تُعرف الظاهرة التي تتراكب فيها الموجات الصادرة عن مصادر مترابطة وتُحدث تأثيرات متفاوتة من مكان لآخر باسم "تداخل الموجات". فعندما تلتقي قمة بموجة مع قمة أخرى، أو قاع بموجة مع قاع آخر، تقوى الموجات؛ ويُسمى هذا "التداخل البنّاء"، ويكون فيه فرق المسار مساوياً لـ nλ. أما عندما تلتقي قمة بموجة مع قاع موجة أخرى، فإن الموجات تتلاشى (أو تلغي بعضها البعض)؛ ويُسمى هذا "التداخل الهدّام"، ويكون فيه فرق المسار مساوياً لـ (n + ½)λ.
- عندما يكون المصدران متوافقين في الطور ولهما التردد والسعة نفسيهما، فإن الموجات تنتشر في اتجاهين متعاكسين وتتداخل، وينشأ نمط موجة واقفة (Standing wave). النقاط التي لا تتحرك مطلقًا تُسمّى العُقَد (Nodes)، بينما النقاط التي تهتز بأكبر سعة تُسمّى البُطون.

صندوق المعادلات:

التداخل البنّاء (للمصادر المترابطة ومتطابقة الطور):	فرق المسار = $n\lambda$
التداخل الهدّام:	فرق المسار = $\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$

حقيقة أساسية:

فرق المسار عند نقطة (P) هو الفرق بين المسافتين من المصدرين إلى تلك النقطة: $\Delta d = |S_1P - S_2P|$ ويحدد ما إذا كانت الموجتان تصلان بالطور نفسه أم بطورين متعاكسين.

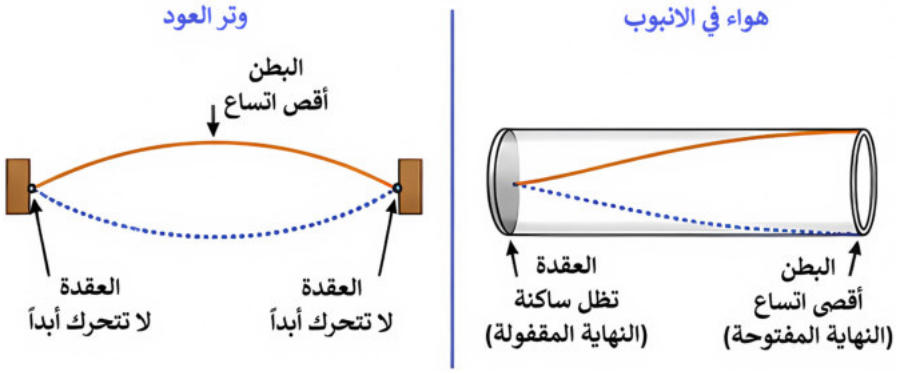
كُتيّب البيانات:

$n\lambda$ و$\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$ في فصل الموجات، حيث n عدد صحيح (...، 2، 1، 0). استخدم فرق المسار وعدد أنصاف الأطوال الموجية التي يحتويها لتحديد نوع التداخل

الموجات الموقوفة الناتجة عن موجات تتحرك في اتجاهين متعاكسين

تتكوَّن الموجة الموقوفة عندما تتحرك موجتان مترابطتان لهما نفس التردد والسعة في اتجاهين متعاكسين وتتداخلان. ولا ينتقل النمط الناتج على طول الوسط. بل تبقى نقاط ثابتة تُسمى عقدًا عند إزاحة صفرية، بينما تهتز نقاط تُسمى بطونًا بأقصى سعة.

- العقدة نقطة على الموجة الموقوفة تبقى ساكنة.
- البطن نقطة على الموجة الموقوفة تكون فيها السعة أقصى ما يمكن.

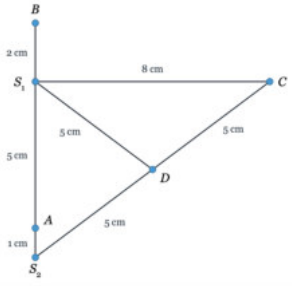


شكل (4.5.2) : العُقَد والبُطون على وتر وفي أنبوب

الرنين والموجات الموقوفة: يحدث الرنين عندما يُحرَّك نظام عند تردد من ترددات الطبيعية أو بالقرب منه، مما يُسبِّب اهتزازًا كبيرًا في السعة. وفي وتر مثبَّت من طرفيه، لا تُنتج أنماط موجات موقوفة ثابتة سوى ترددات معيّنة.

مثال محلول:

تداخل مصدرين على سطح ماء



شكل (5.5.2) : فروق المسار من المصدرين إلى أربع نقاط.

الموقف:	ينتج مصدران لموجات ماء متطابقان في الطور، S_1 و S_2، نمط تداخل. النقاط A وB وC وD موضحة مع مسافاتها بالسنتيمتر من المصدرين، وعند أي نقطة P، يُحدَّد نوع التداخل بفرق المسار: $\Delta d = \lvert S_1P - S_2P \rvert$.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** سعة كل موجة = 0.30 cm، الطول الموجي λ = 4.0 cm، إذن $\lambda/2$ = 2.0 cm. **المطلوب:** تحديد نقاط التداخل البنَّاء بين A وB وC وD؛ عدد نقاط التداخل البنَّاء بين S_1 و S_2؛ السعتان عند C وD؛ والسعة عند D عندما يُصدر المصدران موجتين بطورين متعاكسين.
التمثيل:	استخدم فرق المسار $\Delta d = \lvert S_1P - S_2P \rvert$. بالنسبة للمصادر المتوافقة في الطور، تؤدي المضاعفات الزوجية لـ $\lambda/2$ إلى تداخل بناء، بينما تؤدي المضاعفات الفردية لـ $\lambda/2$ إلى تداخل هدام.
الاستراتيجية:	بما أن $\lambda/2$ = 2.0 cm، قارن كل فرق مسار بمضاعفات 2.0 cm: 0، 4، 8، ... cm بنَّاءة؛ و2، 6، 10، ... cm هدَّامة.

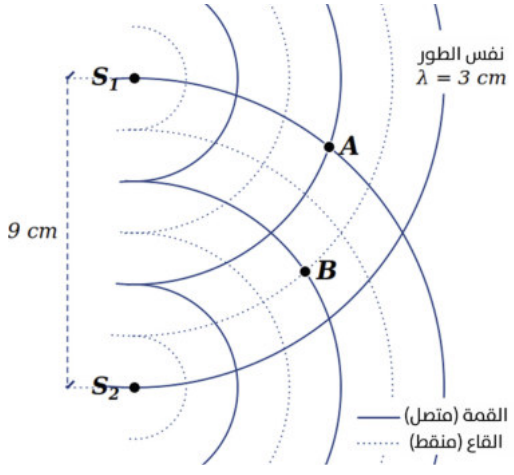
تطبيق سريع:

يرسل مصدران مترابطان متطابقا الطور موجات طولها الموجي 4.0 cm؛ ويختلف المساران من المصدرين إلى نقطة بمقدار 6.0 cm. اذكر عدد أنصاف الأطوال الموجية، وما إذا كانت النقطة تخضع لتداخل بنّاء أم هدّام.

الحل الموضح:	(أ) A: $\Delta d = 4\text{ cm} = 2\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ⇐ بنّاء. B: $\Delta d = 6\text{ cm} = 3\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ⇐ هدّام. C: $\Delta d = 2\text{ cm} = 1\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ⇐ هدّام. D: $\Delta d = 0 = 0\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ⇐ بنّاء. إذن، نقطتا التداخل البنّاء هما A وD. (ب) يحدث التداخل البنّاء عندما $\Delta d = 0$ أو 4 cm، مما يُعطي ثلاث نقاط: $(S_1P, S_2P) = (3\text{ cm}, 3\text{ cm}), (1\text{ cm}, 5\text{ cm}), (5\text{ cm}, 1\text{ cm})$. (جـ) عند C، هدّام: السعة = 0 cm. وعند D، بنّاء: السعة = $0.30 \times 2 = 0.60$ cm (د) لو أصدر المصدران بطورين متعاكسين، يصبح D هدّامًا: السعة = 0 cm.
منطقية الحل:	تتبع النتائج قاعدة المصادر المتطابقة الطور: المسارات المتساوية أو فروق أنصاف الأطوال الموجية الزوجية تُعطي تداخلًا بنّاءً؛ والفردية تُعطي تداخلًا هدّامًا
فسِّرها بنفسك:	أوجد فرق المسار من S_1 وS_2، ثم قارنه بـ $\frac{\lambda}{2}$. إذا كان عدد أنصاف الأطوال الموجية زوجيًّا، يكون التداخل بنّاءً؛ وإذا كان فرديًّا، يكون هدّامًا.

حاول بنفسك: المصدران نفساهما، بطول موجي 6.0 cm وسعة 0.50 cm. عند النقطة P تكون المسافتان $S_1P = 28\text{ cm}$ و$S_2P = 37\text{ cm}$. **أوجد** فرق المسار، وعدد أنصاف أطواله الموجية، والسعة عند P — أولًا بافتراض تطابق طورَي المصدرين، ثم بافتراض تعاكسهما.

حاول:



شكل (6.5.2):
مصدران يبعد أحدهما عن الآخر 9 cm ويصدران موجات طولها الموجي 3 cm.

(أ) كما في الشكل، يهتز مصدران S_1 وS_2، على بُعد 9 cm من بعضهما، بالطور نفسه ويُصدران موجات طولها الموجي 3 cm.

(i) حدِّد ما إذا كانت النقطتان A و B نقطتَي تداخل بنّاء أم هدّام.

(ii) حدِّد عدد الخطوط الساكنة (خطوط التداخل الهدّام) الواقعة بين S_1 وS_2.

نصيحة امتحانية:
اعرض سطرًا فرق المسار في كل إجابة: اكتب $|S_1P - S_2P|$ وعدده من أنصاف الأطوال الموجية قبل ذكر النتيجة.

(ب) تُصدَر موجتان طولهما الموجي 5.0 cm وسعتهما 1.0 cm من نقطتين S_1 و S_2. وعند النقطة P تكون المسافتان $S_1P = 30$ cm و $S_2P = 37.5$ cm.

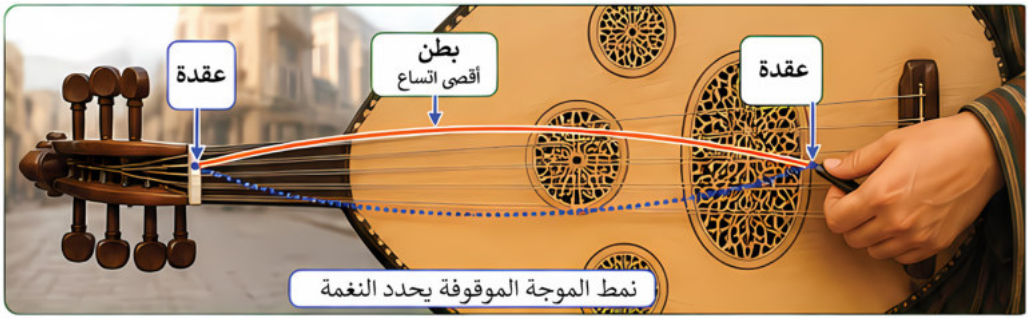
(i) أوجد السعة عند P عندما يهتز S_1 و S_2 بالطور نفسه.

(ii) أوجد السعة عند P عندما يهتزان بطورين متعاكسين.

سياق جديد — وتر العود المهتز

عندما يُنقَر وتر عود، تنتقل موجات على طول الوتر وتنعكس عند الطرفين الثابتين. ويمكن أن يُشكِّل تراكب الموجتين الساقطة والمنعكسة موجة موقوفة. وبما أن طرفَي الوتر ثابتان، يجب أن يكونا عقدتين. وفي النمط الأساسي، تكون نقطة منتصف الوتر بطنًا. وبزيادة الشد في الوتر تزيد سرعة الموجة عليه. ولنفسه الطول المهتز، فإن ذلك يزيد الترددات الطبيعية، فترتفع درجة النغمة.

سؤال للربط:
كيف ترتبط شروط الحدود لنظام بالموجات الموقوفة التي يمكنه دعمها؟



طرفا الوتر المنقور ثابتان ولا يمكنهما التحرك. **فسِّر:** لماذا يجب أن يكون هذان الطرفان الثابتان عقدتين للموجة الموقوفة؟

طبيعة العلم: الأنماط والاتجاهات — مبدأ واحد يحكم الماء والصوت والضوء

تنطبق قواعد التداخل نفسها على موجات الماء والصوت والضوء. وأظهرت تجربة الشق المزدوج لتوماس يونغ أهدابًا مضيئة ومظلمة ناتجة عن التداخل البنَّاء والهدَّام للضوء. وقدَّم هذا دليلًا قويًّا على أن للضوء خصائص موجية.

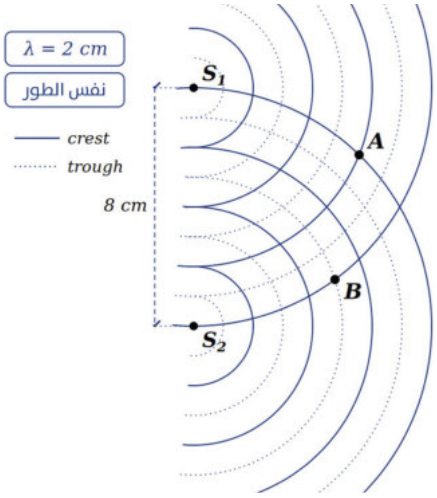
اقترح لماذا يظهر نمط التداخل نفسه (بنَّاء وهدَّام) في الماء والصوت والضوء.

سؤال للربط:
في الفقرة (ب)، $\frac{\lambda}{2} = 2.0$ cm.
عبِّر عن كل فرق مسار كمضاعف لـ $\frac{\lambda}{2}$، ثم حدِّد ما إذا كان التداخل بنَّاءً أم هدَّامًا.

سؤال الدرس، وإجابته:

عندما تلتقي موجتان مترابطتان من مصدرين يهتزان بالطور نفسه، تتجمع إزاحتاهما جبريًّا. وعند النقاط التي يكون فيها فرق المسار عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية، $\Delta d = n\lambda$، تصل الموجتان بالطور نفسه وتعزز إحداهما الأخرى. وعند النقاط التي يكون فيها فرق المسار عددًا فرديًّا من أنصاف الأطوال الموجية، $\Delta d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$، تصل الموجتان بطورين متعاكسين وتُلغي إحداهما الأخرى. ويفسر هذا لماذا يمكن أن يكون صوت مكبِّرَي صوت عاليًا عند بعض المواضع وهادئًا عند الأخرى.

تمرين:



(أ) كما في الشكل، يهتز مصدران S_1 وS_2، على بُعد 8 cm بينهما، بالطور نفسه ويُصدران موجات طولها الموجي 2 cm.

(i) حدِّد ما إذا كانت النقطتان A و B نقطتَي تداخل بنَّاء أم هدَّام.

(ii) حدِّد عدد الخطوط الساكنة الواقعة بين S_1 وS_2.

(ب) تُصدر نقطتان S_1 وS_2 على سطح ماء موجات بالطور نفسه، بسعة 0.30 cm وطول موجي 4.0 cm. وعند النقاط A وB وC، فروق المسار: $|\Delta C| = 6$ cm، $|\Delta B| = 0$ cm، $|\Delta A| = 4$ cm. أوجد السعة عند A وB وC، بالسنتيمتر.

(جـ) تَصدُر موجتان طولهما الموجي 6.0 cm وسعتهما 0.40 cm من S_1 وS_2. وعند النقطة P تكون المسافتان $S_1P = 20$ cm و$S_2P = 35$ cm. أوجد السعة عند P عندما يهتز المصدران بالطور نفسه، ثم بطورين متعاكسين.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يُصدر مصدران مترابطان موجات ماء متطابقة بالطور نفسه. وعند النقطة M يبقى السطح ساكنًا تقريبًا.

بيِّن بإيجاز: لماذا تبقى M ساكنة تقريبًا؟

الدرس ٢-٦ — انكسار الموجات

؟ سؤال الدرس:
عندما تدخل موجة وسطًا تختلف فيه سرعتها، لماذا يتغيَّر اتجاهها عند الحد الفاصل؟

ستتعلم أن:

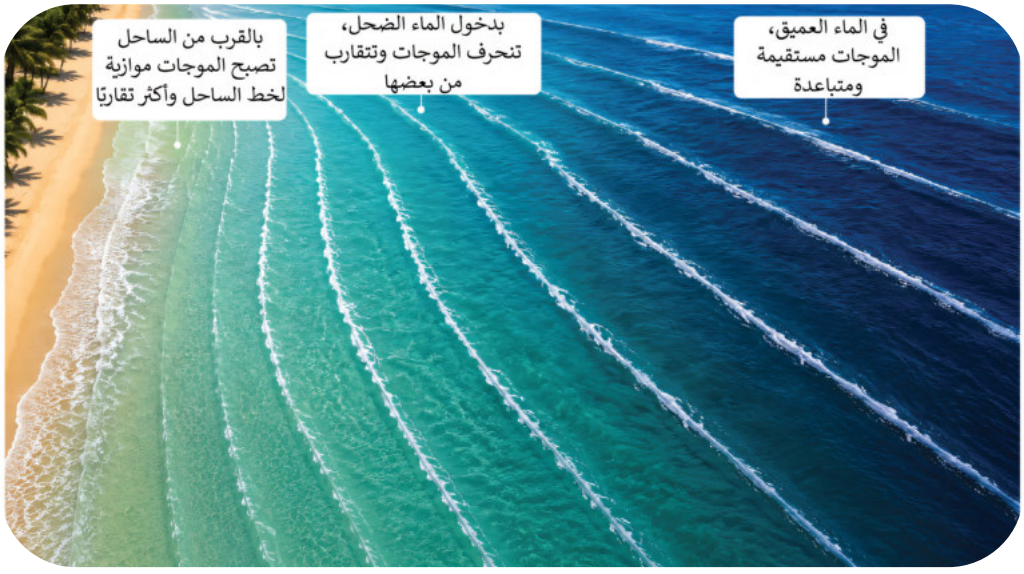
بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تحدد سرعة موجة أو طولها الموجي أو الزاوية عند حد فاصل باستخدام قانون سنِل $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

٢. تفسر أن الانكسار يحدث؛ لأن سرعة الموجة تتغيَّر عند الحد الفاصل، بينما يبقى التردد ثابتًا.

٣. تستخدم $v = f\lambda$ لتفسير لماذا يتغيَّر الطول الموجي عندما تتغيَّر سرعة الموجة.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.6.2) : تنحني الموجات وتقل المسافة بينها عند انتقالها إلى مياه أقل عمقًا.

قف على شاطئ الساحل الشمالي وراقب البحر. بعيدًا في الأفق، تقترب قمم الأمواج بزاوية مائلة، منحرفة عبر الماء، ولكن بحلول وصولها إلى الرمال، تكون قمم الأمواج نفسها قد انكسرت وتصل شبه موازية للشاطئ — في كل مرة، مهما كانت الزاوية التي بدأت بها في الماء العميق بعيدًا عن الساحل.

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) لماذا تصل أمواج البحر عادةً إلى الشاطئ بقمم شبه موازية للخط الساحلي؟ هل يبقى اتجاهها دون تغيير، أم يتغيَّر عندما يصبح الماء أقل عمقًا؟

(ب) تنتقل أمواج الماء بصورة أبطأ في الماء الضحل. كيف يؤثر هذا التغيُّر في السرعة في اتجاه صدر الموجة وهي تقترب من الشاطئ؟

حقيقة أساسية:
لموجة، $v = f\lambda$، حيث v سرعة الموجة، وf التردد، وλ الطول الموجي. وصدر الموجة خط يصل نقاطًا متطابقة الطور. والشعاع خط يُرسَم عموديًّا على السطح الموجي.

استكشف — لاحظ انكسار موجات ماء مستوية

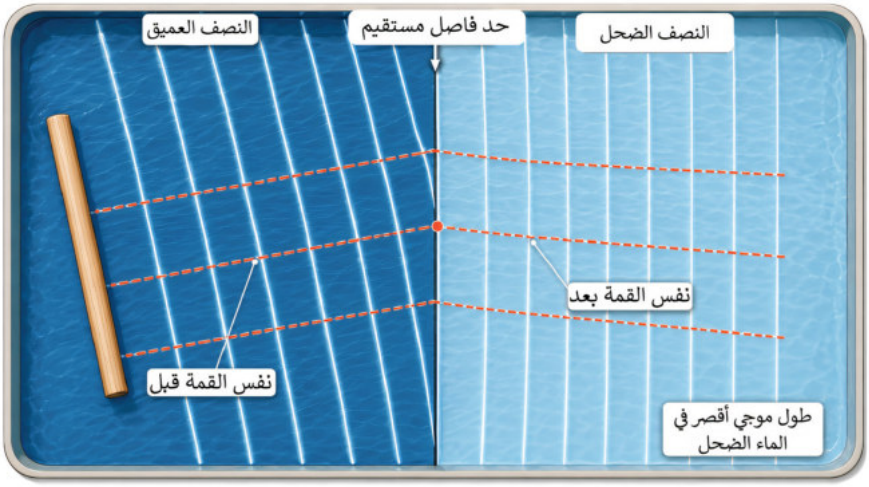
ما ستفعله: تلاحظ كيف تُغيِّر موجات ماء مستقيمة اتجاهها وهي تمر بين مناطق ذات أعماق مختلفة.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- صينية واسعة ضحلة.
- ماء بعمق نحو 1 سم.
- طبق أو بلاطة مسطحة لإنشاء منطقة أقل عمقًا.
- مسطرة لتوليد أسطح موجية مستقيمة.
- مصباح هاتف يدوي أو مصباح.

ملاحظة القياس:
يكون الانحناء صغيرًا وتتحرك القمم بسرعة، لذا قدِّر الزاوية من رسمك، لا بالملاحظة المباشرة في الوقت الفعلي.



شكل (2.6.2) : يقصر الطول الموجي في الجزء الضحل من الحوض.

الخطوات:

١ ضع الطبق في الصينية بحيث تكون إحدى المنطقتين أعمق والأخرى أقل عمقًا، مع حد فاصل مستقيم بينهما.

٢ أضِئ الماء من الجانب بحيث يظهر مقدمة الأمواج بوضوح.

٣ استخدم المسطرة لتوليد أمواج ذات صدر(مقدمة) مستقيمة في المنطقة الأعمق، موجَّهة نحو الحد الفاصل بزاوية.

٤ ارسم مقدمة الموجة قُبيل وصولها إلى الحد الفاصل وآخر بعد دخولها المنطقة الأقل عمقًا مباشرة.

٥ كرر باستخدام زاوية سقوط أصغر، وقارن التغيّر في الاتجاه.

مقدمة الموجة الساقطة	زاوية السقوط	زاوية الأنكسار	اتجاه الانكسار
زاوية أكثر انحدارًا			
زاوية أصغر			

حلّل ما جمعته:

(أ) عندما دخلت الأمواج المنطقة الأقل عمقًا، هل أصبح صدر(مقدمة) الأمواج أقرب إلى التوازي مع الحد الفاصل؟

(ب) وبينما دخلت الموجة المنطقة الأقل عمقًا، أي الكميات تغيَّرت: السرعة، أم الطول الموجي، أم التردد؟ وأي كمية بقيت ثابتة؟

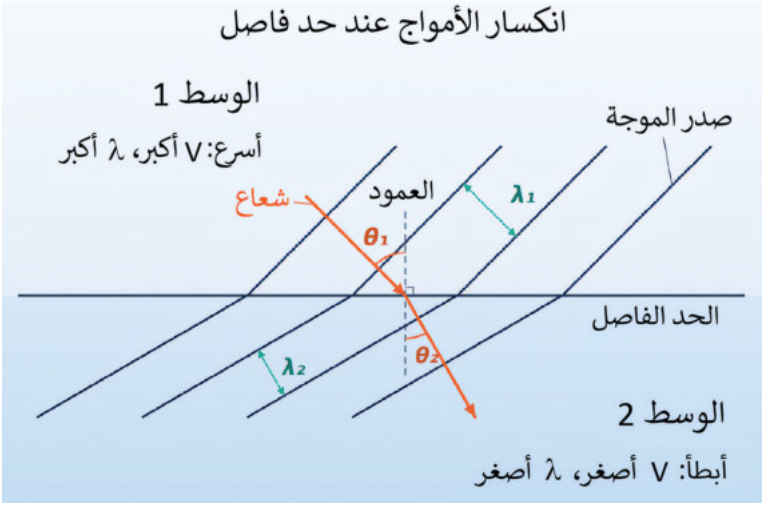
اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، دارت قمة تدخل إلى المنطقة الضحلة الأبطأ سرعة حتى أصبحت أقرب إلى التوازي مع الحد الفاصل، بينما بقي معدل وصول القمم ثابتًا. وقد يُتوقَّع أن تستمر قمم الأمواج في اتجاهها الأصلي أو أن تنحرف بفعل الرياح، لكن الملاحظات تُظهر أن الانكسار يحدث بسبب تغيُّر سرعة الطور بسبب اختلاف درجة العمق. وتشير هذه الأدلة إلى النموذج التالي.

صدر (مقدمة) الامواج والأشعة:

مقدمة الموجة هو خط أو سطح يصل نقاط موجة متطابقة الطور. وبالنسبة لموجات الماء، يمكن تمثيل صدر الموجة بخط قمة. ويُرسَم الشعاع عموديًّا على صدر الموجة ويُبيِّن اتجاه انتشار الموجة. وعند حد فاصل، تُقاس زاوية السقوط وزاوية الانكسار من العمود المقام، وهو خط عمودي على الحد الفاصل.



شكل (3.6.2) : يتغير اتجاه الموجة والمسافة بين الموجات عن الحد الفاصل

لماذا يُسبب تغيّر سرعة الموجة انكسارًا:

عندما يصل صدر الموجة إلى حد فاصل بزاوية، يدخل أحد جانبَي صدر الموجة الوسط الجديد قبل الجانب الآخر. وإذا اختلفت سرعة الموجة في الوسط الجديد، يُغيِّر ذلك الجانب سرعته قبل الآخر، مما يجعل صدر الموجة يدور. هذا التغيّر في اتجاه الانتشار يسمى بالانكسار.

إذا دخلت الموجة وسطًا أبطأ، ينكسر الشعاع نحو العمود المقام. وإذا دخلت وسطًا أسرع، ينكسر الشعاع بعيدًا عن العمود المقام. ويحدد المصدر تردد الموجة، ويبقى ثابتًا وهي تعبر الحد الفاصل. وبما أن $v = f\lambda$، فإن انخفاض سرعة الموجة (v) عند تردد ثابت (f) يجعل الطول الموجي (λ) ينخفض.

علاقة الانكسار:

بالنسبة لموجات تعبر حدًّا فاصلًا، $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$

وبالنسبة للضوء، يُكتَب قانون سنِل غالبًا بصورة: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

حيث n معامل الانكسار.

الانكسار:

انحراف اتجاه انتشار الموجة عند عبورها حدًّا فاصلًا بين وسطين، ناتجًا عن تغيّر سرعتها من وسط إلى آخر.

نصيحة امتحانية:

إذا رمز $_1n_2$ إلى معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1، فإن:

$$_1n_2 = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

يضع زاوية السقوط في البسط؛ وتقول صيغة أخرى إن: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$، وهو يعبر عن الأمر نفسه، إذ أن $_1n_2 = \frac{n_2}{n_1}$.

نقطة

عندما تنتشر موجة خلال الفراغ أو الوسط، فإن المكان الهندسي لجميع النقاط التي تهتز في الطور نفسه يُسمّى جبهة الموجة (Wavefront).

تتحرك جبهة الموجة مع الزمن في اتجاه عمودي عليها. ويُسمّى السهم المرسوم عموديًا على جبهة الموجة وفي اتجاه انتشار الموجة شعاعًا (Ray).

الزاوية theta 1 بين العمود المقام (Normal) والشعاع الساقط تُسمّى زاوية السقوط (Angle of incidence).

الزاوية theta 2 بين العمود المقام والشعاع المنكسر تُسمّى زاوية الانكسار (Angle of refraction).

عندما تنتقل موجة من الوسط 1 حيث ان سرعتها v_1 وطولها الموجى λ_1 الى الوسط 2 حيث سرعتها v_2 وطولها الموجى λ_2 ، فإن التردد لا يتغير، ولذلك:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = {}_1n_2$$

حيث إن ${}_1n_2$ هو معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة إلى الوسط 1.

ويمكن كتابة العلاقة في صورة قانون سنل للانكسار (Snell's law):

$$n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2$$

صندوق المعادلات:

انكسار الموجات:	$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
بالنسبة للموجات:	$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$

تطبيق سريع:

تعبر موجة حدًّا فاصلًا بزاويتين $\theta_1 = 45°$ و $\theta_2 = 30°$ (خذ $\sqrt{2} = 1.4$). أوجد نسبة السرعتين.

مثال محلول:

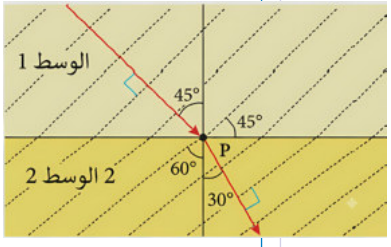
الموقف:

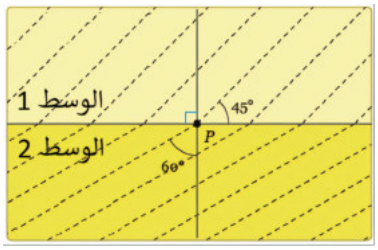
الخطوط المتقطعة في الشكل هي صدر الموجات، بينما تمر موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. الطول الموجي للموجة الساقطة في الوسط 1 هو **1.4 cm** والتردد **50 Hz**. ويصنع الشعاع زاوية **45°** مع العمود المقام في الوسط 1 و **30°** في الوسط 2. خذ $\sqrt{2} = 1.4$. أوجد

(أ) معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(ب) سرعتَي الموجة في الوسطين.

(جـ) الطول الموجي في الوسط 2.





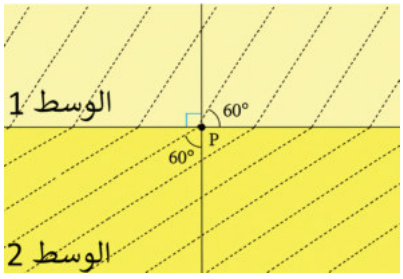
شكل (4.6.2) : زاوية سقوط مقدمة الموجة 45° في الوسط 1 وزاوية الانكسار 60° في الوسط 2 .

المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** $\lambda_1 = 1.4\ \text{cm} \cdot f = 50\ \text{Hz} \cdot \theta_1 = 45^\circ \cdot \theta_2 = 30^\circ \cdot \sqrt{2} = 1.4$ **المطلوب:** $_1n_2 = ? \cdot v_1 = ? \cdot v_2 = ? \cdot \lambda_2 = ?$
التمثيل:	في الوسط 2، تكون جبهات الموجة متقاربة أكثر، وتكون أقرب إلى الحد الفاصل (أي بزاوية أصغر)، لذلك ينحني الشعاع نحو العمود المقام $\theta_1 < \theta_2$ الوسط 2 هو الوسط الأبطأ. ويظل التردد ثابتًا عند عبور الحد الفاصل، بينما تتغير فقط السرعة v والطول الموجي
الاستراتيجية:	ارسم العمود المقام، اقرأ θ_1 و θ_2، ثم استخدم النسبة الثابتة الواحدة $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ واستنتج كل مجهول.
الحل الموضح:	$n_{12} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2 = \sqrt{2} = 1.4$ $v_1 = f\lambda_1 = 50 \times 1.4 = 70\ \text{cm s}^{-1}$ $v_2 = \frac{v_1}{\sqrt{2}} = \frac{70}{\sqrt{2}} \approx 50\ \text{cm s}^{-1}$ $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{2}} = \frac{1.4}{\sqrt{2}} \approx 1.0\ \text{cm}$ $_1n_2 = 1.4 \quad v_1 = 70\ \text{cm s}^{-1} \quad v_2 = 50\ \text{cm s}^{-1}$ $\lambda_2 = 1.0\ \text{cm}$
منطقية الحل:	ينكسر الشعاع مقتربًا الشعاع نحو العمود المقام في الوسط 2، لذا فإن الوسط 2 أبطأ. لذا $v_2 < v_1$ و $\lambda_2 < \lambda_1$، بينما يبقى التردد دون تغيير.
فسِّرها بنفسك:	استُخدم التردد مرة واحدة فقط — لإيجاد v_1. لماذا لم يُحتَج إليه مرة أخرى لإيجاد v_2؟

حاول بنفسك: تعبر موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2، بحيث يصنع الشعاع زاوية 45° مع العمود المقام في الوسط 1 و60° في الوسط 2؛ والسرعة في الوسط 1 هي $60\ \text{cm s}^{-1}$ والتردد 5.0 Hz (خذ $\sqrt{2} = 1.4$ ، $\sqrt{3} = 1.7$). أوجد المعامل النسبي n_{12} وسرعة الموجة في الوسط 2، واذكر أي الوسطين أسرع.

حاول:

الخطوط المتقطعة في الشكل هي صدر الموجات، بينما تمر موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. ويصنع الشعاع زاوية 60° مع العمود المقام في الوسط 1 و30° في الوسط 2. وسرعة الموجة الساقطة في الوسط 1 هي $30\ \text{cm s}^{-1}$ والتردد 4.0 Hz. خذ $\sqrt{3} = 1.7$. أوجد ما يلي لأقرب رقمين معنويين.



سؤال للربط:
كيف يرتبط نموذجا الموجة والشعاع للانكسار؟

(أ) ارسم، على الشكل، الشعاع المُبيِّن للاتجاه الذي تنتشر به الموجة في الوسط 1 والوسط 2.

(ب) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(جـ) أوجد الطولين الموجيين للموجتين في الوسط 1 والوسط 2، بالسنتيمتر.

(د) أوجد سرعة الموجة في الوسط 2، بـ $cm\,s^{-1}$.

في سياق جديد — سراب فوق طريق صحراوي:

على طريق صحراوي حار، يكون الهواء فوق سطح الطريق مباشرة أسخن وأقل كثافة من الهواء فوقه. وينتقل الضوء بصورة أسرع في هذا الهواء الساخن. وبينما يمر الضوء عبر طبقات من الهواء يتغيَّر معامل انكسارها تدريجيًّا، ينكسر مساره تدريجيًّا. ويمكن أن يصل ضوء من السماء إلى عين المُراقِب من اتجاه قريب من سطح الطريق، لذا قد يبدو الطريق وكأنه يعكس السماء مثل الماء.

شكل (7.6.2): ينحني الضوء إلى أعلى بسبب الهواء الساخن بالقرب من سطح الطريق، مما يؤدي إلى ظهور السراب.

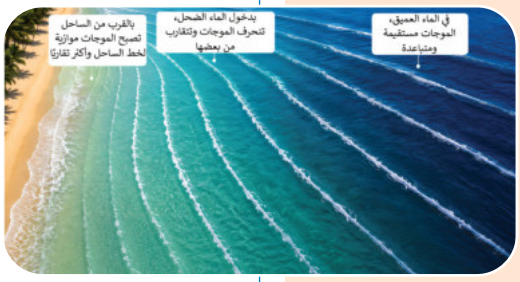
دورك الآن: تُغيِّر كل طبقة رقيقة من الهواء بالقرب من الطريق سرعة الضوء قليلًا. فسِّر لماذا ينكسر شعاع الضوء بالقرب من الطريق. اذكر ما إذا كان الشعاع ينحني نحو العمود المقام أم بعيدًا عنه وهو يدخل طبقة أسرع.

طبيعة العلم — العلم مسعى مشترك — قانون واحد، واسمان، وبلدان:

غالبًا ما يُسمى قانون الانكسار قانون سنِل، نسبة إلى ويليبرورد سنِليوس، الذي اشتقه نحو عام ١٦٢١. ونشر رينيه ديكارت لاحقًا العلاقة نفسها عام ١٦٣٧ في كتابه «الديوبتريك». ويسمح نشر النتائج العلمية لعلماء آخرين باختبارها واستخدامها وتطويرها.

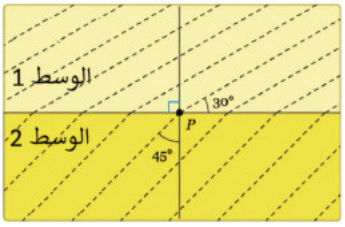
دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يجعل اكتشافًا مكتوبًا لكنه ظل غير منشور، كاكتشاف سنِليوس، يُسهم في العلم بصورة أقل من اكتشاف منشور، كاكتشاف ديكارت.

سؤال الدرس، وإجابته:



عندما تعبر موجة إلى وسط تنتقل فيه بسرعة مختلفة، لماذا يتغير اتجاهها عند الحد الفاصل؟ لأن أحد طرفي جبهة (صدر) الموجة التي تلتقي بالحد الفاصل بزاوية مائلة يغير سرعته قبل الطرف الآخر، مما يؤدي إلى انحراف خط القمة. ويحدد المصدر التردد ولا يمكن أن يتغيَّر، لذا وبموجب $v = f\lambda$، تقابل سرعة أصغر طولًا موجيًّا أصغر. وترتبط الزاويتان عندئذٍ بالسرعتين بالعلاقة $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ — النسبة الثابتة $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. وينكسر الشعاع نحو العمود المقام عندما تدخل الموجة وسطًا أبطأ، وبعيدًا عن العمود المقام عندما تدخل وسطًا أسرع. ويبقى التردد ثابتًا وهي تعبر الحد الفاصل، لذا يتغيَّر طولها الموجي بما يتناسب مع سرعتها.

تمرين:



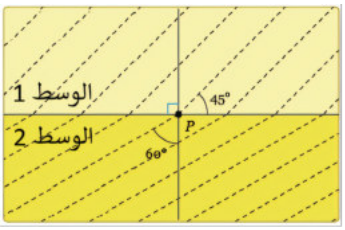
(أ) الخطوط المتقطعة في الشكل على الشمال تمثِّل صدر الموجات عندما تنتقل موجات ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. سرعة الموجة الساقطة في الوسط 1 هي 35 cm/s، والتردد 50 Hz.

(i) ارسم، في الشكل، اتجاه الموجة المارة بالنقطة P في الوسطين 1 و2.

(ii) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(iii) أوجد سرعة الموجة في الوسط 2، بـ cm/s.

(iv) أوجد الطول الموجي للموجة في الوسط 2، بالسنتيمتر.

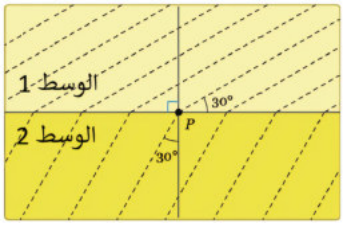


(ب) سرعة الموجة الساقطة في الوسط 1 هي 2.0 m/s، والتردد 5.0 Hz.

(i) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(ii) أوجد سرعة الموجة في الوسط 2، بـ m/s.

(iii) أوجد الطولين الموجيين في الوسطين 1 و2، بالمتر.



(جـ) الطول الموجي للموجة الساقطة في الوسط 1 هو 2.0 cm، والتردد 5.0 Hz.

(i) ارسم، في الشكل، اتجاه الموجة المارة بالنقطة P في الوسطين 1 و2.

(ii) أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1.

(iii) أوجد سرعتَي الموجة في الوسطين 1 و2، بـ cm/s.

(iv) أوجد الطول الموجي للموجة في الوسط 2، بالسنتيمتر.

نصيحة امتحانية:

اعرض علاقة نسبة الجيب — $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ — والتعويض الذي يليها في كل إجابة؛ يمنح الممتحنون درجات على طريقة الحل.

سؤال بأسلوب الامتحان:

تمر موجة ماء من الوسط 1 إلى الوسط 2. ويصنع الشعاع زاوية 60° مع العمود المقام في الوسط 1 و45° في الوسط 2 (خذ $\sqrt{2} = 1.4$، $\sqrt{3} = 1.7$). أوجد معامل انكسار الوسط 2 بالنسبة للوسط 1، واذكر ما إذا كانت الموجة تتسارع أم تتباطأ عند العبور.

الدرس ٢-٧ — تداخل موجات الصوت

؟ سؤال الدرس:

عندما يُصدر مكبّرا صوت النغمة المستقرة نفسها، لماذا يكون الصوت عاليًا عند بعض المواضع وشبه صامت عند أخرى؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تفسر** كيف يُنتج مصدرا صوت مترابطان مواضع تداخل بنّاء وهدّام.

٢. **تتنبأ** بما إذا كان التداخل بنّاءً أم هدّامًا عند نقطة من فرق مسارها.

٣. **تحدد** الطول الموجي وتردد الصوت باستخدام قياسات التداخل.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر:

شكل (1.7.2) : المشي بالقرب من مصدرَي صوت يُظهر نقاطًا يكون عندها الصوت مرتفعًا وأخرى يكون عندها شبه صامت.

قبل إذاعة طابور الصباح، يختبر الحارس مكبِّرَي صوت الفناء بنغمة ثابتة واحدة. وبينما تعبر الفناء، تمشي عبر منطقة تكاد تصبح فيها النغمة غير مسموعة، وبعد خطوتين تعود إلى أقصى شدتها. وصديقك، الذي يعبر في مكان آخر، قد لا يكتشف مثل هذا التباين. ويبقى مكبِّرا الصوت يعملان طوال الوقت.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) تمشي ببطء عبر الفناء بينما تُعزَف النغمة. ماذا ستسمع: الصوت نفسه في كل مكان، أم انخفاضًا تدريجيًّا في الشدة مع المسافة، أم نمطًا متكررًا من العلو والهدوء؟

(ب) يدّعي صديق أنه مع تشغيل مكبِّرَي الصوت، يجب أن تكون كل نقطة في الفناء أعلى صوتًا مما لو كان مكبِّرٌ واحدٌ يعمل. هل توافقه؟

حقيقة أساسية:

للنغمة النقية تردد واحد (f). وفي الهواء، يرتبط طولها الموجي بسرعة الصوت بالعلاقة: $v = f\lambda$. عندما تتداخل موجتان صوتيتان، فإن الإزاحة الناتجة لجزيئات الهواء هي المجموع الجبري للإزاحات الفردية. هذا هو مبدأ التراكب.

حدِّد مواضع التداخل البنَّاء والهدَّام للصوت:

ما ستفعله: تستخدم مصدرَي صوت مترابطين لتحديد مواضع التداخل البنَّاء والهدَّام.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- هاتف بتطبيق مولِّد نغمات.
- سماعات أذن سلكية.
- شريط لاصق.
- مسطرة مترأو شريط قياس.
- علامات ورقية.
- مساحة هادئة مفتوحة.

سلامة الصوت: أبقِ مستوى الصوت منخفضًا بما يكفي ليكون مريحًا وآمنًا.

الخطوات:

١ ثبِّت سماعتَي الأذن بشريط على حافة طاولة، متجهتين نحو المُراقِب ومتباعدتين نحو 0.50 m.

٢ اضبط تطبيق مولِّد النغمات على نغمة ثابتة مقدارها 1700 Hz بمستوى صوت آمن ومنخفض.

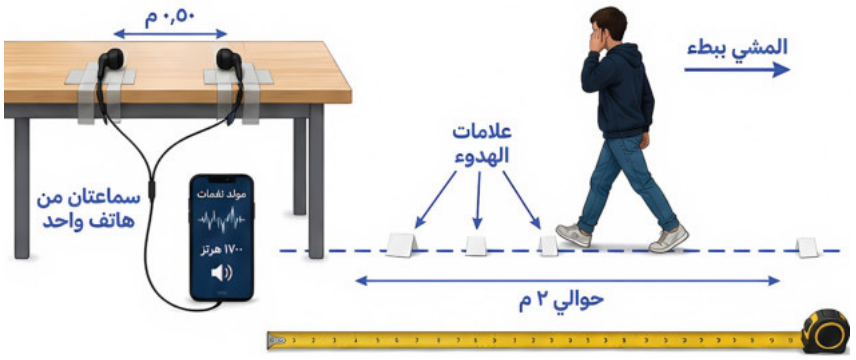
٣ امشِ ببطء على طول خط على بُعد نحو 2 m من الطاولة، موازيًا للخط الواصل بين سماعتَي الأذن.

٤ أبقِ أذنًا واحدة متجهة نحو السماعتين وغطِّ الأذن الأخرى.

٥ ضع علامة ورقية عند كل موضع تكون فيه شدة الصوت عند أدنى مستوى أو قريبة منه.

٦ كرر المشي واحتفظ فقط بالمواضع القابلة للتكرار.

٧ كرر باستخدام 3400 Hz وقارن التباعد بين المواضع الهادئة المتجاورة.



المحاولة	التردد (Hz)	عدد المواضع الهادئة	التباعد بين المواضع الهادئة المتجاورة (m)
1	1700		
2	1700		
3	1700		
4	3400		

حلِّل ما جمعته:

(أ) بالقرب من منتصف المسار، هل المواضع الهادئة متباعدة بانتظام تقريبًا؟ ماذا يحدث لهذا التباعد عند مضاعفة التردد؟

(ب) تُرسَل الإشارة نفسها إلى كلتا السماعتين. لماذا يجب أن تكون المواضع الهادئة ناتجة عن تداخل في الهواء بين المصدرين والأذن؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

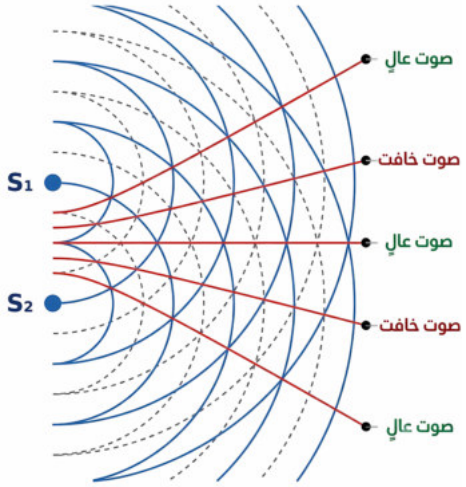
من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، وجدت أن المواضع الهادئة بالقرب من المنتصف متباعدة بانتظام تقريبًا. وعند مضاعفة التردد قلَّل ذلك التباعد بين المواضع الهادئة المتجاورة. وخلال كل محاولة، بقيت إشارة الصوت مستقرة مع تغيُّر موضع الاستماع، لذا نتج التباين في شدة الصوت عن تراكب موجتَي الصوت في الهواء. ويفسر النموذج التالي هذا النمط.

تراكب موجتي صوت:

الصوت موجة طولية. وعندما تتراكب موجتا صوت عند نقطة، تكوِّن الإزاحة المحصلة لجسيمات الهواء المجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين. وإذا وصلت الموجتان بالطور نفسه، يحدث تداخل بنَّاء، وللسعتين المتقاربتين، يكون الصوت أعلى. وإذا وصلتا بطورين متعاكسين بسعتين متساويتين، يحدث تداخل هدَّام ويقل الصوت كثيرًا.

حقيقة أساسية:
تعمل السماعتان بوصفهما مصدرين مترابطين؛ لأنهما تستقبلان الإشارة نفسها. ولهما التردد نفسه وعلاقة طور ثابتة.



قاعدة فرق المسار وكيفية قياسها:

عند نقطة (P)، فرق المسار هو: $\Delta d = |S_1P - S_2P|$، حيث (S_1P) و (S_2P) هما المسافتان من مصدرَي الصوت إلى النقطة.

بالنسبة لمصدرين مترابطين يهتزان بالطور نفسه: يحدث التداخل البنَّاء عندما $\Delta d = n\lambda$.

ويحدث التداخل الهدَّام عندما $\Delta d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$، حيث ..... ،3 ،2 ،1 ،0 = n

نقطة

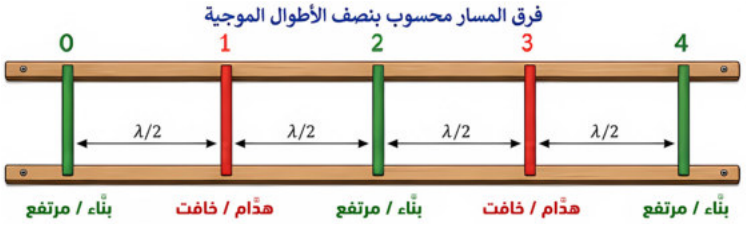
- بما أن الموجات الصوتية هي أيضًا موجات، فإنها تُظهر الظواهر نفسها التي تظهرها الموجات الأخرى. والموجة الصوتية موجة طولية؛ وعندما يلتقي صوتان، فإن كل جسيم من جسيمات الهواء يتأثر بالمجموع الجبري للإزاحتين الناتجتين عن الموجتين.
- عندما يهتز المصدران S_1 و S_2 في الطور نفسه وصدران موجات لها الطول الموجي λ فعند الرصد P التداخل البنّاء (Constructive interference) عدد زوجي = $|PS_1-PS_2|$ lambda/2X أي أن فرق المسار يكون $\Delta d = n\lambda$، حيث $n = 0,1,2,3,...$
التداخل الهدّام (Destructive interference) (عدد فردي) $\times \lambda / 2 = |PS_1-PS_2|$ أي أن فرق المسار يكون: $\Delta d = (n + 1/2)\lambda$، حيث $n = 0,1,2,3,....$ عندما يكون المصدران خارج الطور (Out of phase)
- عندما يكون المصدران خارج الطور، فإن مواضع التداخل البنّاء والهدّام تنعكس مقارنةً بالحالة التي يكون فيها المصدران في الطور.

صندوق المعادلات:

التداخل البنَّاء (للمصادر المترابطة ومتطابقة الطور):	فرق المسار = $n\lambda$
التداخل الهدَّام:	فرق المسار = $\left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda$
سرعة الموجة:	$v = f\lambda$

العد بأنصاف الأطوال الموجية:

يمكن عدّ فرق المسار بمضاعفات $(\lambda/2)$. ويقابل عدد زوجي من أنصاف الأطوال الموجية تداخلًا بنَّاءً للموجات من مصادر متطابقة الطور، بينما يقابل عدد فردي تداخلًا هدَّامًا.



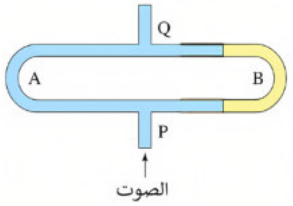
أنبوبة كوينك لقياس الطول الموجي للصوت: أنبوبة كوينك جهاز يقيس الطول الموجي للصوت باستخدام تداخل الصوت. يُقسَّم الصوت من مصدر واحد بواسطة فرعيّ أنبوبة ثم يُعاد دمجه عند المخرج. وبسحب أحد الفرعين (أنبوبة على شكل حرف U) وتغيير طول المسار، يتغيّر «فرق المسار» للموجتين. وباستغلال ظاهرة بلوغ شدة الصوت الحد الأدنى بسبب التداخل الهدَّام عندما يكون فرق المسار مضاعفًا فرديًّا لنصف طول موجي، يمكن حساب الطول الموجي لموجة الصوت بدقة من مسافة سحب الفرع المنزلق.

مثال محلول:

الموقف:

في أنبوبة كوينك الموضح، يُقسَّم الصوت الداخل عند P إلى مسارين ويُعاد دمجه عند Q. وعندما يكون الأنبوبة B مُدخَلًا بالكامل، يتساوى طولا المسارين. وبينما يُسحَب الأنبوبة B ببطء، يحدث أول حد أدنى في شدة الصوت عندما يُسحَب الأنبوبة بمقدار $x = 8.5\ \text{cm}$. وسرعة الصوت $3.4 \times 10^2\ \text{m/s}$. أوجد:

(i) الطول الموجي λ للصوت، بالمتر؛ (ii) تردد الصوت f، بالهرتز.



شكل توضيحي: أنبوبة كوينك

المعطيات والمطلوب:

السحب $x = 8.5\ \text{cm}$، $v = 3.4 \times 10^2\ \text{m s}^{-1}$، أول حد أدنى عند Q $\Leftarrow \lambda = ?$، $f = ?$

التمثيل:

رسم قبل / بعد: طول الفرع A ثابت؛ ويكتسب طول الفرع B مقدار x صعودًا في أحد ذراعيه وx نزولًا في الآخر – كل سنتيمتر من السحب يزيد طول الفرع بمقدار سنتيمترين.

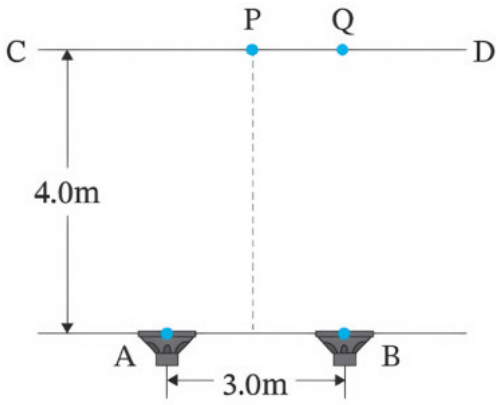
كُتيِّب البيانات:

الشرطان مطبوعان في قسم الموجات بالكُتيِّب — ومهمتك في الامتحان هي إيجاد فرق المسار والعدد الصحيح n، لا تذكُّرهما.

الاستراتيجية:	أوجد فرق المسارين الفرعين أولًا؛ وعبِّر عنه كعدد من أنصاف الأطوال الموجية – عدد زوجي $(n\lambda)$ يُعطي تداخلًا بنَّاءً، وعدد فردي $(n+\frac{1}{2})\lambda$ يُعطي تداخلاً هدَّامًا -- ثم حدِّد λ.
الحل الموضح:	1) $\Delta d = 2 \times 8.5\text{ cm} = 17\text{ cm} = 0.17\text{ m}$. 2) أول حد أدنى: $\frac{\lambda}{2} = 0.17\text{ m}$، إذن $\lambda = 0.34\text{ m}$. 3) $f = \frac{\lambda}{2} = \frac{3.4\times10^2}{0.34} = 1.0\times10^3\text{ Hz}$.
منطقية الحل:	يقع $1.0\times10^3\text{ Hz}$ ضمن النطاق المسموع؛ وسحب بضعة سنتيمترات يُعطي طولًا موجيًّا مقداره بضع عشرات من السنتيمترات، وهذه رتبة مقدار متوقَّعة للصوت المسموع.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يزيد سحب الفرع المنزلق بمقدار x فرق المسار بمقدار $2x$ بدلًا من x؟

حاول بنفسك: نفس الجهاز، تردد مختلف. عند إعادة إدخال الأنبوبة B إلى موضعها، يظهر (يصدر) صوت جديد ثابت التردد عند النقطة (P)؛ ويحدث الحد الأدنى الأول لشدة الصوت عندما يكون المنزلق قد خرج مسافة 5.0 سم فقط. احسب الطول الموجي والتردد لهذا الصوت.

حاول:



(أ) كما في الشكل، يُصدر مكبِّرا صوت صوتًا بالتردد نفسه. وبينما يتحرك مُراقِب على طول الخط CD، الذي يبعد 4.0 m عن الخط AB، تكون شدة الصوت أدنى ما يمكن عند النقطة P، تقاطع الخط CD مع العمود المنصِّف لـ AB. وبينما يبتعد المُراقِب عن تلك النقطة على طول CD، تزداد شدة الصوت تدريجيًّا وتبلغ أقصاها عند النقطة Q، التي تبعد 1.5 m عن النقطة P.

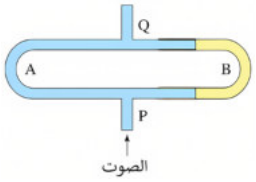
(i) حدِّد ما إذا كانت اهتزازات مصدرَي الصوت A وB متطابقة الطور أم متعاكسة الطور.

(ii) أوجد الطول الموجي للصوت الصادر من المكبِّرين، بالمتر.

(ب) في الجهاز الموضح في الشكل (أنبوبة كوينك)، يُقسَّم الصوت الداخل عند P إلى مسارين، الأنبوبة A على اليسار والأنبوبة B على اليمين، ويُعاد دمجه عند Q. وعندما يكون الأنبوبة B مُدخَلًا بالكامل، يتساوى طولا المسارين. وبينما يُدخَل صوت ثابت التردد عند P، يُسحَب الأنبوبة B ببطء، وتصبح شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة عندما يُسحَب بمقدار 5.0 cm. لتكن سرعة الصوت v تساوي $3.4\times10^2\text{ m s}^{-1}$.

(i) أوجد الطول الموجي λ للصوت، بالمتر.

(ii) أوجد تردد الصوت f، بالهرتز.

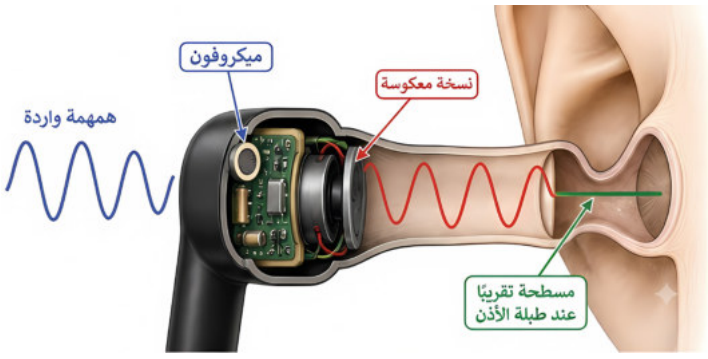


تطبيق سريع:
يُصدر مكبِّرا صوت نغمة واحدة بالطور نفسه؛ وعند مقعدك يختلف المساران بمقدار 0.51 m ويكون الطول الموجي 0.34 m. اذكر ما إذا كان الصوت عاليًا أم هادئًا، واذكر عدد أنصاف الأطوال الموجية في فرق المسار.

حقيقة أساسية:
يحتوي العنصر (أ) على مثلث 5–4–3: تُوجَد AQ باستخدام نظرية فيثاغورس؛ و BQ هي ببساطة 4.0 m بين الخطين -- قبل تطبيق أي تحليل موجي.

في سياق جديد — سماعات إلغاء الضوضاء

تَستخدم سماعات إلغاء الضوضاء ميكروفونات لاكتشاف الصوت الوارد. ثم تُنتج الدوائر الإلكترونية موجة صوتية بالتردد نفسه وبسعة مساوية تقريبًا، لكن بطور معاكس. وعند طبلة الأذن، تتراكب الموجتان وتقلِّلان تغيُّر الضغط المحصَّل. وهذا تداخل هدَّام.



فسِّر: لماذا تُقلِّل سماعات إلغاء الضوضاء طنين محرك ثابتًا بفعالية أكبر من صوت مفاجئ ونبضي كصوت إغلاق باب؟

طبيعة العلم: الأدلة — التداخل دليلاً على السلوك الموجي للضوء

يُعَدُّ الموضع الهادئ في نمط تداخل مصدرين دليلًا قويًّا على السلوك الموجي. فعند هذه النقطة، يتجمع اضطرابان لينتجا أثرًا محصلًا شبه صفري، وهذا لا يمكن تفسيره بنموذج بسيط لتيار جسيمات. واستخدمت تجربة الشق المزدوج ليونغ دليل تداخل مماثل لدعم النموذج الموجي للضوء.

دورك الآن: اقترح لماذا تُعَدُّ مواضع الشدة الدنيا، لا مواضع الشدة القصوى، الدليل الأقوى على أن الصوت موجة.

نصيحة امتحانية:

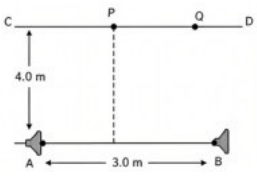
اعرض كل خطوة من عملك بوضوح. وفي أسئلة التداخل، اكتب فرق المسار صراحةً قبل إتمام الحساب.

سؤال الدرس، وإجابته:

عندما يُصدر مكبِّرا صوت مترابطان ومتطابقا الطور النغمة الثابتة نفسها، تتلقى كل نقطة موجتَي صوت ربما قطعتا مسافتين مختلفتين. فإذا كان فرق المسار عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية، تصل الموجتان بالطور نفسه وتتداخلان بشكل بنّاء، منتجتين صوتًا عاليًا.

وإذا كان فرق المسار عددًا فرديًّا من أنصاف الأطوال الموجية، تصل الموجتان بطورين متعاكسين وتتداخلان بشكل هدّام، منتجتين موضعًا هادئًا.

تمرين:



(أ) كما في الشكل، يُصدر مكبِّرا صوت صوتًا بالطور نفسه والتردد نفسه، 1.7×10^2 Hz. لتكن P تقاطع الخط CD، الذي يبعد 4.0 m عن الخط AB، مع العمود المنصِّف لـ AB، ولتكن Q نقطة تبعد 1.5 m عن النقطة P. لتكن سرعة الصوت 3.4×10^2 m s^{-1}.

(i) أوجد الطول الموجي للصوت الصادر من المكبِّرين، بالمتر.

(ii) حدِّد ما إذا كانت النقطة Q نقطة تداخل بنّاء أم هدّام.

(ب) في الجهاز نفسه الموضح في الشكل، مع إدخال الأنبوبة B بالكامل مرة أخرى بحيث يتساوى المساران، يُدخَل صوتٌ ثابتُ التردد عند P. ويُسحَب الأنبوبة B ببطء، وتصبح شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة عندما يُسحَب بمقدار 17 cm. لتكن سرعة الصوت v تساوي $3.4 \times 10^2 \text{ m s}^{-1}$.

(i) أوجد الطول الموجي λ للصوت، بالمتر.

(ii) أوجد تردد الصوت f، بالهرتز.

(جـ) في الجهاز نفسه، مع إدخال الأنبوبة B بالكامل مرة أخرى، يُدخَل صوتٌ ثابتُ التردد عند P. ويُسحَب الأنبوبة B ببطء، وتكون شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة عندما يُسحَب بمقدار 10 cm. لتكن سرعة الصوت v تساوي $3.4 \times 10^2 \text{ m s}^{-1}$.

(i) أوجد الطول الموجي λ للصوت، بالمتر.

(ii) أوجد تردد الصوت f، بالهرتز.

(iii) إذا أُجريت التجربة نفسها باستخدام صوت له ضعف التردد، أوجد المسافة التي يُسحَب بها الأنبوبة B لتكون شدة الصوت أدنى ما يمكن لأول مرة، بالمتر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

يُصدر مكبِّرا صوت، متصلان بمولِّد الإشارة نفسه، موجات صوتية بالطور نفسه. وعند النقطة M تكون شدة الصوت شبه صفرية. فسِّر، بدلالة فرق المسار وفرق الطور، لماذا تكون شدة الصوت صغيرة جدًّا عند M.

الدرس ٢-٨ — تأثير دوبلر

؟ سؤال الدرس:

لماذا تتغيَّر درجة نغمة صفارة الإنذار المُلاحَظة بينما تمر سيارة إسعاف بمُراقِب؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تفسر** كيفيًّا لماذا تُغيِّر الحركة النسبية بين مصدر موجة ومُراقِب التردد المُلاحَظ.

٢. **ترسم** مخططات صدر الموجات لمصدر متحرك وتحدد مناطق الطول الموجي الأقصر والأطول.

٣. **تستخدم** علاقة دوبلر التقريبية للضوء: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

شكل (4.5.1) : تتقارب الموجات أمام المصدر وتتباعد خلفه.

قف في شارع مزدحم بينما تمر سيارة إسعاف، واستمع. يتفق الجميع على أن صفارة الإنذار تبدو مختلفة عندما تمر السيارة. لكن كثيرًا من المستمعين غير متأكدين مما يتغيَّر بالضبط، أو متى.

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) بينما تقترب سيارة إسعاف بسرعة ثابتة، هل ترتفع درجة النغمة المُلاحَظة باستمرار، أم تبقى ثابتة تقريبًا حتى تمر سيارة الإسعاف؟

(ب) بينما تقترب سيارة الإسعاف بسرعة ثابتة، هل تكون درجة النغمة المُلاحَظة أعلى من، أم أقل من، أم تساوي درجة النغمة الصادرة؟

حقيقة أساسية:

بالنسبة للصوت في هواء ساكن، تُحدَّد سرعة الموجة بخصائص الهواء. وترتبط الكميات v وf وλ بالعلاقة: $v = f\lambda$.

استكشف — لاحظ ازاحة دوبلر لمصدر صوت متحرك

ما ستفعله: تُحرِّك مصدر صوت بالنسبة لمستمع وتستمع إلى تغيّرات في درجة النغمة المُلاحَظة.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- هاتف بتطبيق مولِّد نغمات، مضبوط على 600 Hz.
- مساحة مفتوحة وخالية.
- هاتف ثانٍ أو مسجِّل للملاحظات.

الخطوات:

١ يقف طالب ثابتًا بوصفه المستمع.

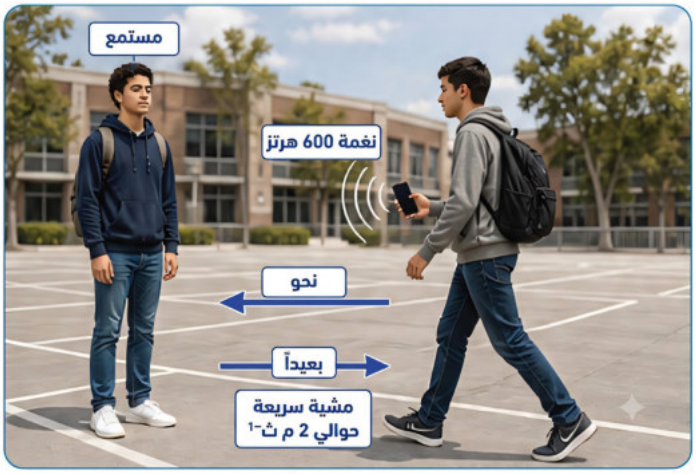
٢ يحمل طالب ثانٍ الهاتف بينما يُصدر نغمة ثابتة (600 Hz). ويسجِّل المستمع هذه النغمة بوصفها درجة النغمة المرجعية.

٣ يتحرك الطالب الثاني بعدها مباشرة نحو المستمع بسرعة مشي ثابتة، ثم يمر ويبتعد.

٤ يسجِّل المستمع ما إذا كانت درجة النغمة أعلى، أم أقل، أم دون تغيير أثناء الاقتراب والابتعاد.

٥ كرر الملاحظة مع مستمعين مختلفين.

ملاحظة القياس:
قد يحكم مستمعون مختلفون على تغيّرات درجة النغمة بصورة مختلفة. كرر الملاحظات مع عدة مستمعين، كما هو موضح في الخطوة 5، للحصول على استنتاج أكثر موثوقية.



حركة المصدر بالنسبة للمستمع	درجة النغمة المُلاحَظة	ملاحظات
متحرك نحو المستمع		
متحرك مبتعدًا عن المستمع		
مصدر ساكن		

حلِّل ما جمعته:

(أ) أثناء الاقتراب بسرعة ثابتة، هل كانت درجة النغمة المُلاحَظة ترتفع باستمرار أم كانت ثابتة تقريبًا وأعلى من درجة النغمة المرجعية؟

(ب) بما أن إعداد تردد الهاتف لم يتغيَّر، ما الذي تغيَّر بين المصدر والمستمع؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

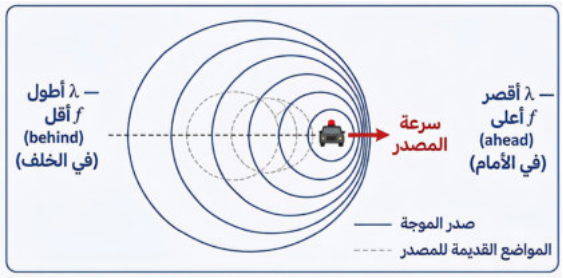
في نشاط الاستكشاف، كانت درجة النغمة المُلاحَظة أعلى، بينما كان المصدر يتحرك نحو المستمع وأقل بينما كان يبتعد. وبالنسبة لحركة مباشرة نحو المستمع أو بعيدًا عنه بسرعة ثابتة، يبقى التردد المُلاحَظ ثابتًا خلال كل مرحلة: أعلى أثناء الاقتراب وأقل أثناء الابتعاد. والارتفاع التدريجي توقع شائع، لكنه ليس ما يُلاحَظ. وبما أن التردد الصادر بقي ثابتًا، فإن التغيُّر في التردد المُلاحَظ نتج عن حركة المصدر بالنسبة للمستمع والهواء المحيط. ويتفق النموذج التالي مع هذا الدليل.

تأثير دوبلر:
التغيُّر في التردد أو الطول الموجي المُلاحَظين لموجة بسبب الحركة النسبية بين المصدر والمُراقِب.

مصدر متحرك وتغيّر الطول الموجي

يُصدر مصدر صوت صدور موجات تنتشر عبر الهواء بسرعة الصوت. وتُحدَّد هذه السرعة بواسطة الهواء. وعندما يتحرك المصدر نحو مُراقِب، تَصدُر صدور الموجات المتتالية من مواضع أقرب إلى المُراقِب. وتكون صدور الموجات أمام المصدر أكثر تقاربًا؛ لذا يكون الطول الموجي المُلاحَظ أقصر، ويكون التردد المُلاحَظ أعلى. وخلف المصدر المتحرك، تكون صدور الموجات المتتالية أكثر تباعدًا، لذا يكون الطول الموجي المُلاحَظ أطول، ويكون التردد المُلاحَظ أقل.

بالنسبة للصوت في هواء ساكن، لا تتغيَّر سرعة الصوت بحركة المصدر. وتُغيِّر حركة المصدر تباعد صدور الموجات، لا سرعة الصوت في الوسط. ولا تتغيَّر سرعة الموجة أبدًا؛ والذي يتغيَّر هو تباعد صدور الموجات.



شكل: 2-8-3- تتقارب الموجات أمام المصدر وتتباعد خلفه

مُراقِب يتحرك نحو مصدر ساكن

إذا كان المصدر ساكنًا وتحرك المُراقِب نحوه، لا يتغيَّر الطول الموجي في الهواء، لكن المُراقِب يلتقي بالأسطح الموجية بصورة أكثر تكرارًا. لذا، يكون التردد المُلاحَظ أعلى. وإذا ابتعد المُراقِب عن المصدر، يلتقي المُراقِب بالأسطح الموجية بصورة أقل تكرارًا، لذا يكون التردد المُلاحَظ أقل.

تأثير دوبلر للضوء

بالنسبة للضوء، يُلاحَظ تأثير دوبلر عند حدوث إزاحة في الأطوال الموجية للخطوط الطيفية. فإذا كان نجم أو مجرة يبتعد عن المُراقِب، تنزاح خطوطه الطيفية نحو أطوال موجية أكبر؛ ويُسمى هذا إزاحة نحو الأحمر (تعني أن الطيف يقترب من اللون الأحمر). وإذا كان يقترب من المُراقِب، تنزاح الخطوط نحو أطوال موجية أقصر؛ ويُسمى هذا إزاحة نحو الأزرق (تعني أن الطيف يقترب من اللون الأزرق).

بالنسبة للسرعات الأصغر بكثير من سرعة الضوء: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$ حيث v هي السرعة الشعاعية على طول خط البصر (خط النظر) و c سرعة الضوء.

نقطة

تأثير دوبلر (Doppler effect): الظاهرة التي يختلف فيها التردد المُلاحظ عن تردد المصدر بسبب الحركة النسبية بين المصدر والمراقب تُسمى تأثير دوبلر.

- عند الاقتراب ← تردد أعلى، وبالتالي نغمة أعلى.
- عند الابتعاد ← تردد أقل، وبالتالي نغمة أخفض.
- وينطبق ذلك سواء كان المصدر هو المتحرك أم المراقب.

لتكن

– V: سرعة الصوت – Vs: سرعة المصدر – Vo: سرعة المراقب

– f′: التردد الذي يسمعه المراقب – fs: تردد المصدر

وترتبط هذه الكميات بالعلاقة $f' = fs\,(v + v_0) / (v + v_0)$

حيث:

! تكون V_0 موجبة عندما يتحرك المراقب نحو المصدر * تكون V_s موجبة عندما يتحرك المصدر نحو المراقب جبهات الموجة أمام مصدر يقترب من المراقب، تكون جبهات الموجة متقاربة من بعضها، ولذلك يكون الطول الموجي المُلاحظ أقصر.

! مهم: حركة المصدر تغيّر المسافة بين جبهات الموجة، لكنها لا تغيّر سرعة الصوت في الوسط

صندوق المعادلات:

إزاحة دوبلر للضوء	$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$

تطبيق سريع:

ينزاح خط هيدروجين في طيف مجرة بمقدار $\Delta\lambda/\lambda = 0.0030$ نحو أطوال موجية أطول.

أوجد سرعة المجرة على طول خط البصر $(c = 3.00 \times 10^8\ m\,s^{-1})$.

مثال محلول:

الموقف:

لتكن سرعة الصوت $340\ m\,s^{-1}$. (أ) بالقرب من معبر سكة حديد، يسمع شخص قطارًا يقترب بسرعة $20\ m\,s^{-1}$ بينما يُصدر بوقًا تردده 720 Hz.
(i) أوجد التردد المسموع بينما يقترب القطار. (ii) أوجد التردد المسموع بينما يبتعد القطار. (ب) تُصدر سيارة تتحرك شرقًا بسرعة ثابتة صوتًا تردده 660 Hz، وتمر دراجة نارية تتحرك غربًا بسرعة $17\ m\,s^{-1}$ بجانبها. ويكون التردد الذي يسمعه راكب الدراجة قبل تجاوزهما 770 Hz.
(i) أوجد سرعة السيارة. (ii) أوجد التردد بعد تجاوزهما.

التمثيل

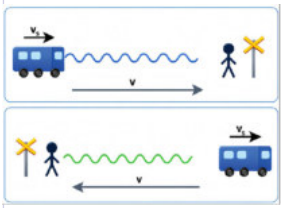
خذ الاتجاه من المصدر إلى المُراقِب — اتجاه الانتشار — موجبًا.
ثم حدِّد إشارة كل سرعة: + إذا كانت تتجه بهذا الاتجاه، – إذا كانت عكسه.

الاستراتيجية:

عوِّض بالسرعات المُشار إليها في علاقة دوبلر $f' = f_s\left(\frac{v + v_o}{v - v_s}\right)$
$(v = 340\ m\,s^{-1})$، ثم حل لإيجاد المجهول.

الحل الموضح:

(أ) القطار يُصدر 720 Hz، المستمع ساكن $v_o = 0$.



(i) الاقتراب: $v_s = +20\ m\,s^{-1}$.

$f' = \frac{340}{340+20} \times 720 = 765\ Hz$.

(ii) الابتعاد: $v_s = -20\ m\,s^{-1}$.

$f' = \frac{340}{340-20} \times 720 = 680\ Hz$.

(ب) السيارة هي المصدر (660 Hz)، والراكب هو المستمع المتحرك.

(i) قبل التجاوز: $f' = 770\ Hz$، $v_o = 17\ m\,s^{-1}$،

إذن سرعة السيارة $v_s = 34\ m\,s^{-1}$.

(ii) بعد التجاوز: $f' = \frac{340-17}{340+v_s} \times 660 = 570\ Hz$.

كُتيِّب البيانات:

اذكر:

$c = 3.00 \times 10^8\ m\,s^{-1}$

و: $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$

من الكُتيِّب؛ وتصح العلاقة فقط عندما $v \ll c$.

منطقية الحل:	يرفع الاقتراب درجة النغمة (720 > 765) ويخفضها الابتعاد (720 > 680)؛ أما في حالة السيارة، يسمع الراكب نغمةً أعلى أثناء الاقتراب (660 > 770) وأقل أثناء الابتعاد (660 > 570). وسرعة السيارة $34\ m\ s^{-1}$ سريعة لكنها واقعية.
فسِّرها بنفسك:	في كلتا حالتي الجزء (أ)، يتحرك القطار بالاتجاه نفسه، ومع ذلك $v_s = +20$ في (i) و-20 في (ii). لماذا؟

حاول بنفسك: ينزاح خط هيدروجين من مجرة بعيدة نحو أطوال موجية أطول بمقدار $\Delta\lambda/\lambda = 4.0 \times 10^{-4}$. خذ $c = 3.00 \times 10^{8}\ m\ s^{-1}$. **أوجد** سرعة المجرة على طول خط البصر، واذكر ما إذا كانت تقترب أم تبتعد.

حقيقة أساسية:

اختبر ذلك: يقف طالبان على جانبَي طريق متقابلين بينما تمر صفارة إنذار. توقَّع ما يسمعه كل منهما في اللحظة نفسها.

حاول:

أوجد ما يلي، بافتراض أن سرعة الصوت $340\ m\ s^{-1}$.

(أ) لكل حالة، أوجد تردد الصوت الذي يسمعه المُراقِب.

(i) يقترب مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ من مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده 720 Hz.

(ii) يبتعد مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ عن مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده 640 Hz.

(iii) يقترب مُراقِب يتحرك بسرعة $34\ m\ s^{-1}$ من مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده 850 Hz.

(iv) يبتعد مُراقِب يتحرك بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ عن مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده 510 Hz.

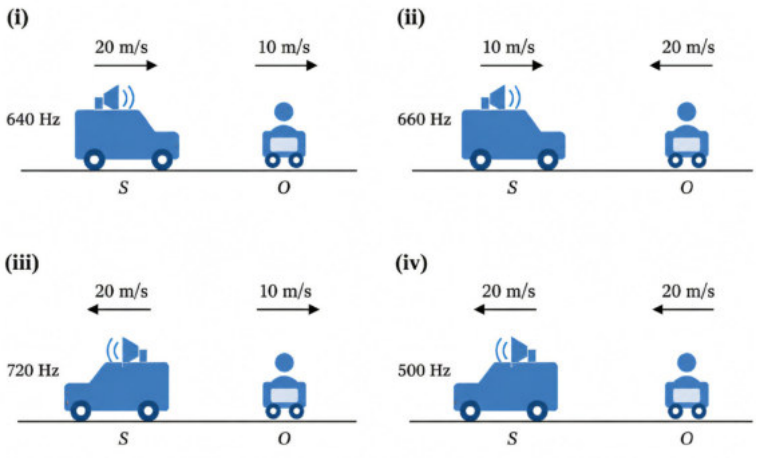
(ب) تُصدر سيارة تتحرك شرقًا بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ صوتًا تردده 720 Hz، وتمر دراجة نارية تتحرك غربًا بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ بجانبها.

(i) أوجد تردد الصوت الذي يسمعه راكب الدراجة النارية قبل تجاوزهما، بالهرتز.

(ii) أوجد تردد الصوت بعد تجاوزهما، بالهرتز.

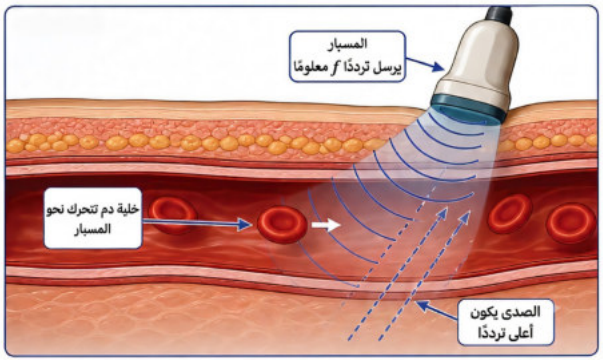
(جـ) بالقرب من معبر سكة حديد، يسمع شخص صوت قطار يقترب بسرعة ثابتة بينما يُصدر بوقًا. تردد الصوت المسموع عندما يقترب القطار من المعبر 800 Hz، وتردد الصوت المسموع عندما يبتعد القطار عن المعبر 600 Hz. أوجد سرعة القطار، بـ $m\ s^{-1}$.

(د) يتحرك مصدر الصوت S والمراقب O على خط مستقيم. حدد تردد الصوت الذي يسمعه المراقب O في كل حالة من الحالات التالية.



في سياق جديد — قياس دوبلر بالموجات فوق الصوتية لتدفق الدم

في قياس دوبلر بالموجات فوق الصوتية، يُصدر مسبار موجات فوق صوتية معلومة التردد داخل وعاء دموي. وتتلقى خلايا الدم المتحركة الموجة فوق الصوتية بوصفها مُراقِبين متحركين ثم تُشتِّتها عائدة بينما تتحرك. ونتيجة لذلك، تنزاح الموجة فوق الصوتية المُشتَّتة إزاحة دوبلر. ويُستخدَم الانزياح المقاس في التردد لتحديد مركبة سرعة الدم على طول اتجاه شعاع الموجة فوق الصوتية.



يكون لصدى الموجة فوق الصوتية من دم يتحرك نحو المسبار(جهاز الفحص) (المستشعر) تردد أعلى من الموجة فوق الصوتية المُصدَّرة. فسِّر لماذا تحدث إزاحة دوبلر مرتين: مرة عندما تتلقى خلية الدم المتحركة الموجة، ومرة أخرى عندما تُشتِّت الموجة عائدة نحو المسبار(جهاز الفحص) (المستشعر).

طبيعة العلم — الأدلة — إزاحة الأحمر دليلًا على تمدد الكون

ينطبق تأثير دوبلر على الضوء أيضًا. وعند مراقبة الضوء من مجرات بعيدة، غالبًا ما تنزاح الخطوط الطيفية نحو أطوال موجية أطول. وتُمكِّن مقارنة هذه الخطوط المنزاحة بالخطوط نفسها المقاسة في المعمل علماء الفلك من تحديد الحركة القطرية للمجرات. وتُعَدُّ إزاحة الأحمر الواسع الانتشار للمجرات البعيدة دليلًا على تمدد الكون.

اقترح: لماذا يأتي دليل إزاحة الأحمر من مقارنة الخطوط الطيفية المُلاحَظة بالأطوال الموجية المعملية المقابلة، بدلًا من فحص طيف المجرة وحده.

سؤال الدرس، وإجابته:

يبقى التردد الصادر لصفارة الإنذار ثابتًا. وبينما تقترب سيارة الإسعاف، تكون الأسطح الموجية أمامها أكثر تقاربًا؛ لذا يتلقى مُراقِب ساكن ترددًا أعلى ويسمع درجة نغمة أعلى. وبعد أن تمر سيارة الإسعاف وتبتعد، تكون الأسطح الموجية الواصلة إلى المُراقِب أكثر تباعدًا؛ لذا يكون التردد المُلاحَظ أقل. وتُحدَّد سرعة الصوت بواسطة الهواء؛ وتُغيِّر حركة المصدر الطول الموجي الواصل إلى المُراقِب.

سؤال للربط:

ما الذي يُنتج أطياف الانبعاث وكيف يمكن استخدامها لتحديد المسافات الفلكية؟ سيتم تناول هذا السؤال بمزيد من التفصيل في موضوعات مستويات الطاقة والنجوم.

كُتيِّب البيانات:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$$

من الكُتيِّب؛ يُعطى في الكتيب ($c = 3.00 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ مع) في الامتحان، يتم اختياره من الكتيب وتعويض الإزاحة الكسرية فيه، دون حفظها. الإجابات النوعية هنا لا تحتاج إلى أي صيغة على الإطلاق.

تمرين:

أوجد ما يلي، بافتراض أن سرعة الصوت $340\ m\ s^{-1}$.

(أ) لكل حالة، أوجد تردد الصوت الذي يسمعه المُراقِب.

(i) يقترب مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ من مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده 800 Hz.

(ii) يبتعد مصدر صوت يتحرك بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ عن مُراقِب ساكن بينما يُصدر صوتًا تردده 720 Hz.

(iii) يقترب مُراقِب يتحرك بسرعة $20\ m\ s^{-1}$ من مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده 510 Hz.

(iv) يبتعد مُراقِب يتحرك بسرعة $34\ m\ s^{-1}$ عن مصدر صوت يُصدر صوتًا تردده 850 Hz.

(ب) تُصدر سيارة تتحرك شرقًا بسرعة ثابتة صوتًا تردده 576 Hz، وتمر دراجة نارية تتحرك غربًا بسرعة $10\ m\ s^{-1}$ بجانبها. وتردد الصوت المسموع بعد تجاوزهما 528 Hz.

(i) أوجد سرعة السيارة.

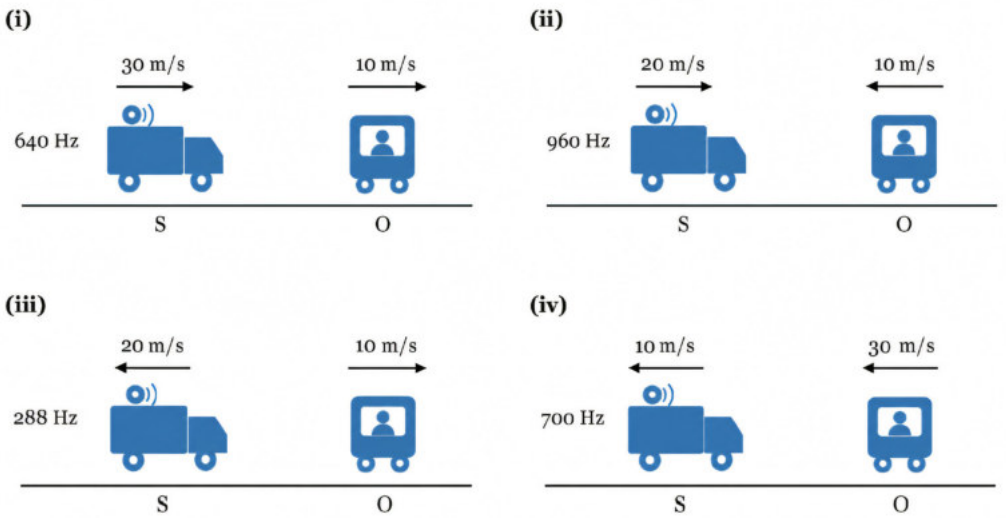
(ii) أوجد التردد قبل تجاوزهما.

(جـ) بالقرب من معبر سكة حديد، يسمع شخص صوت قطار يقترب بسرعة ثابتة بينما يُصدر بوقًا. تردد الصوت المسموع عندما يقترب القطار من المعبر 918 Hz، وتردد الصوت المسموع عندما يبتعد القطار عن المعبر 816 Hz.

(i) أوجد سرعة القطار، بـ $m\ s^{-1}$.

(ii) أوجد تردد البوق، بالهرتز.

(د) يتحرك مصدر الصوت S والمراقب O على خط مستقيم. حدد تردد الصوت الذي يسمعه المراقب O في كل حالة من الحالات التالية.



سؤال بأسلوب الامتحان:

تقترب صفارة إنذار تُصدر صوتًا ثابت التردد بسرعة ثابتة من مُراقِب ساكن. بيِّن بإيجاز لماذا يكون التردد الذي يسمعه المُراقِب أعلى من التردد المُصدَّر.

الدرس ٢-٩ — انكسار الضوء والانعكاس الكلي الداخلي

؟ سؤال الدرس:

عندما ينتقل الضوء من الماء إلى الهواء، هل يمر من خلال السطح الفاصل دائمًا، أم يمكن أن ينعكس كليًّا عائدًا إلى الماء؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تستخدم** معامل الانكسار المطلق: $n = \frac{c}{v}$ وقانون سنِل: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ لتحديد سرعة الضوء أو طوله الموجي أو زاويته عند السطح الفاصل.

٢. **تفسر** شروط الانعكاس الكلي الداخلي عندما ينتقل الضوء من وسط ذي كثافة ضوئية أعلى إلى وسط ذي كثافة ضوئية أقل.

٣. **تحدد** الزاوية الحرجة باستخدام: $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$، حيث $n_1 > n_2$.

حقيقة أساسية:

عند السطح الفاصل بين وسطين شفافين، قد يُغيِّر شعاع ساقط بزاوية اتجاهه لأن سرعته تتغيَّر. وترتبط الزوايا بقانون سنِل: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ يظل تردد الضوء ثابتًا عند السطح الفاصل، بينما تتغير سرعته وطول موجته. تُقاس جميع الزوايا من العمودي على السطح الفاصل.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

عندما ينتقل الضوء من الماء إلى الهواء بزاوية سقوط صغيرة، ينكسر جزء منه إلى الهواء وينعكس جزء عائدًا إلى الماء. وعند زوايا سقوط كبيرة بما يكفي، لا يخرج أي شعاع منكسر إلى الهواء؛ إذ ينعكس الضوء بأكمله عائدًا إلى الماء. وهذا هو الانعكاس الكلي الداخلي.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل يمر الضوء دائمًا عبر سطح شفاف، فينحرف قليلًا لكنه يمر إلى الوسط الثاني، أم يمكن للسطح أن يُعيده بأكمله؟ وإذا كان الأمر كذلك، أي خاصية لزاوية السقوط تحدد ذلك؟

(ب) يبدأ الضوء في الماء (الأكبر كثافة ضوئية) وينتقل نحو الهواء (الأقل كثافة ضوئية). فهل سيظهر الانعكاس الكلي الداخلي لو انتقل من الهواء إلى الماء بدلاً من ذلك؟

استكشف — لاحظ الانعكاس الكلي الداخلي عند السطح الفاصل ماء-هواء

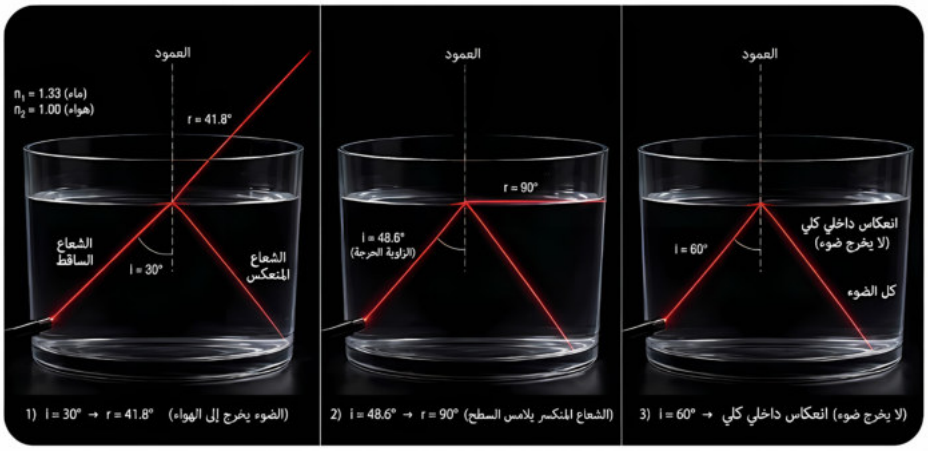
ما ستفعله: ستقوم بتغيير زاوية السقوط لحزمة (شعاع) ضوئية ضيقة تنتقل من الماء إلى الهواء، وستلاحظ الانكسار والانعكاس الجزئي والانعكاس الداخلي الكلي.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- كوب ماء شفاف طويل.
- مصباح هاتف مُغطًى لإنتاج شعاع ضيق.
- غرفة مظلمة.
- ورقة بيضاء.

السلامة: استخدم صندوق أشعة منخفض القدرة أو مصباحًا مُغطًى. في حال استخدام الليزر، يجب أن يكون منخفض الطاقة وأن يُستخدم فقط تحت إشراف المعلم. لا توجِّه الشعاع أبدًا نحو عينَي أي شخص أو نحو سطح عاكس لامع.



الخطوات:

١ في غرفة مظلمة، وجِّه شعاعًا ضيقًا من الضوء إلى أعلى عبر جانب كوب ماء شفاف بحيث يصل إلى سطح الماء–الهواء من أسفل.

٢ ضع ورقة بيضاء فوق السطح لملاحظة أي شعاع منكسر يخرج إلى الهواء.

٣ ابدأ بزاوية سقوط صغيرة، قريبة من العمود المقام. لاحظ الشعاع المنكسر في الهواء والشعاع المنعكس في الماء.

٤ زد زاوية السقوط تدريجيًّا. لاحظ أن الشعاع المنكسر يقترب من السطح وأن الشعاع المنعكس يصبح أكثر سطوعًا.

٥ استمر في زيادة الزاوية حتى يختفي الشعاع المنكسر تمامًا. وبعد هذه الزاوية، ينعكس الضوء كليًّا داخليًّا.

زاوية السقوط	الشعاع المنكسر في الهواء	الشعاع المنعكس في الماء
زاوية صغيرة		
قرب الزاوية الحرجة		
أكبر من الزاوية الحرجة		

حلّل ما جمعته:

(أ) مع زيادة زاوية السقوط، ماذا حدث للشعاع المنكسر والشعاع المنعكس؟

(ب) عندما اختفى الشعاع المنكسر، هل امتُصَّ الضوء، أم انعكس كليًّا عائدًا إلى الماء؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، لم يختفِ الشعاع الخارج تدريجيًّا. فمع زيادة زاوية السقوط، اقترب الشعاع المنكسر من السطح. وعند زاوية معيَّنة، سار على طول السطح. وعندما زادت زاوية السقوط أكثر، لم يخرج أي شعاع منكسر إلى الهواء، وانعكس الضوء عائدًا إلى الماء. وفيما يلي النموذج الذي تؤيده أدلتك. تذكَّر أولاً قانون الانكسار من الدرس 2-6، ثم أدخِل ما هو جديد: معامل الانكسار المطلق الذي يميِّز كل وسط بمفرده.

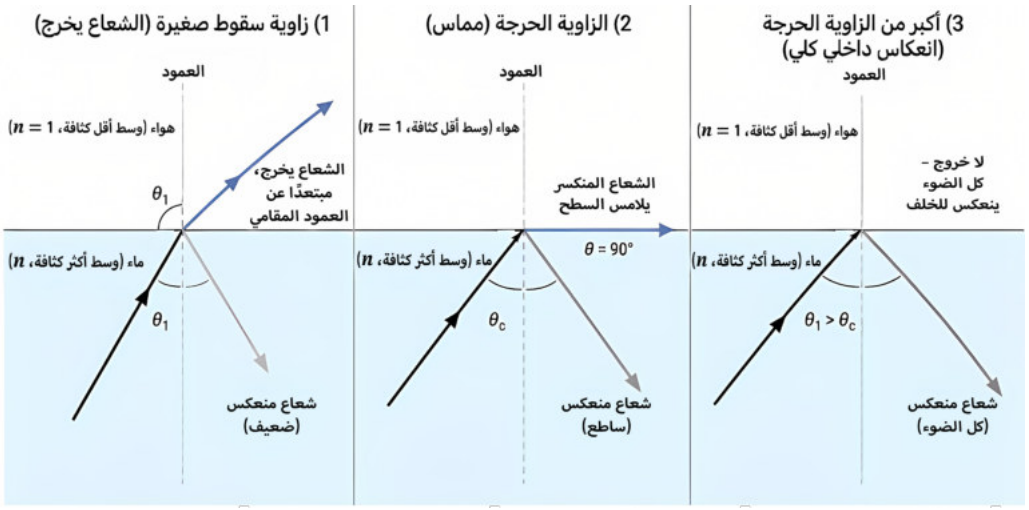
لكل وسط قيمته المميِّزة الخاصة به — معامل الانكسار المطلق

ينتقل الضوء بأقصى سرعة له في الفراغ: $c = 3.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$. وفي وسط شفاف، ينتقل الضوء بسرعة أقل (v). ويُعرَّف معامل الانكسار المطلق (n) للوسط بـ: $n = \frac{c}{v}$.

ويُسمى الوسط ذو معامل الانكسار الأكبر كثافة ضوئية. ويعني هذا أن الضوء ينتقل فيه بصورة أبطأ؛ ولا يعني بالضرورة أن للمادة كثافة كتلية أكبر.

وبالنسبة لضوء يمر بين وسطين: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ حيث تُقاس θ_1 و θ_2 من العمود المقام على السطح الفاصل.

الزاوية الحرجة (θc): هي زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة ضوئية التي تكون عندها زاوية انكسار الشعاع المنكسر 90°؛ ولزوايا سقوط أكبر من θc، يحدث الانعكاس الكلي الداخلي.



الزاوية الحرجة والانعكاس الكلي الداخلي

عندما ينتقل الضوء من وسط أكبر كثافة ضوئية (n_1) إلى وسط أقل كثافة ضوئية (n_2)، حيث $n_1 > n_2$، ينحني الشعاع المنكسر بعيدًا عن العمود المقام. والزاوية الحرجة (θ_c) هي زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة ضوئية التي تكون عندها زاوية الانكسار 90°.

وباستخدام قانون سنِل: $n_1 \sin\theta_c = n_2 \sin 90°$. وبما أن $\sin 90° = 1$، فإن: $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$.

يحدث الانعكاس الكلي الداخلي عندما: ينتقل الضوء من وسط أكبر كثافة ضوئية إلى وسط أقل كثافة ضوئية؛ وتكون زاوية السقوط في الوسط الأكبر كثافة ضوئية أكبر من الزاوية الحرجة. وعند زوايا أكبر من θ_c، لا يتكوَّن أي شعاع منكسر، وينعكس الضوء كليًّا عائدًا إلى الوسط الأكبر كثافة ضوئية.

نقطة

ينتقل الضوء بأقصى سرعة له (c) في الفراغ، بينما ينتقل بسرعة أقل (v) في الوسط الشفاف. ويُعرَّف معامل الانكسار المطلق لهذا الوسط بالمعادلة $n = c/v$؛ ويُطلق على الوسط ذي معامل الانكسار الأكبر اسم "الوسط الأكثر كثافة ضوئية" — حيث ينتقل الضوء فيه ببطء أكبر، وهذا لا يعني بالضرورة أن المادة تتمتع بكثافة كتلية أعلى. وتُكتب صيغة قانون الانكسار باستخدام معاملات الانكسار المطلقة كالآتي: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

عند انتقال الضوء من وسط أكثر كثافة ضوئية إلى وسط أقل كثافة، تُسمى زاوية السقوط التي تصبح عندها زاوية الانكسار مساوية لـ 90 درجة بـ "الزاوية الحرجة". وفي حال كانت زاوية السقوط أكبر من هذه الزاوية، فلن ينفذ أي شعاع منكسر، بل ينعكس الضوء بالكامل؛ وتُعرف هذه الظاهرة بـ "الانعكاس الكلي الداخلي".

صندوق المعادلات:

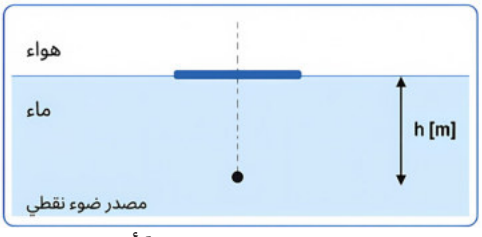
معامل الانكسار المطلق:	$n = \frac{c}{v}$
قانون سنِل للضوء:	$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
الزاوية الحرجة (الأكبر كثافة ضوئية ← أقل كثافة ضوئية):	$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$

تطبيق سريع: يسقط ضوء على سطح ماء–هواء من جانب الماء. خذ معامل انكسار الماء $\sqrt{2}$ (وأن $\sqrt{2} = 1.4$). أوجد $\sin\theta_c$ للانعكاس الكلي الداخلي، باستخدام $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$، ومع الهواء $n_2 = 1$.

مثال محلول:

الموقف:

(أ) ينتقل ضوء في الهواء (معامل الانكسار 1.0) ويدخل مادة معامل انكسارها 1.5. خذ سرعة الضوء في الهواء $c = 3.0 \times 10^8\ m/s$ والطول الموجي في الهواء $\lambda_0 = 6.0 \times 10^{-7}\ m$؛ (i) أوجد السرعة v في المادة بـ m/s. (ii) أوجد الطول الموجي λ في المادة بالمتر.



(ب) يقع مصدر ضوء نقطي على عمق $h\ m$ أسفل سطح الماء. يجب أن يُحجب كل شعاع قد ينكسر في الهواء بتعويم قرص على السطح، أوجد أصغر نصف قطر $r\ m$ للقرص يمنع ضوء المصدر من الخروج إلى الهواء. خذ معامل انكسار الهواء = 1 والماء = n.

المعطيات والمطلوب:

(أ) $n_{air} = 1.0, n_{sub} = 1.5, c = 3.0 \times 10^8\ m/s, \lambda_0 = 6.0 \times 10^{-7}\ m$

$\Leftarrow v = ?\ \lambda = ?$

(ب) $n_{air} = 1, n_{water} = n, h$ عمق $\Leftarrow$ أصغر نصف قطر للقرص.

التمثيل:	عند العبور إلى وسط أكبر كثافة ضوئية، يتباطأ الضوء ويقصر طوله الموجي (يبقى التردد دون تغيير). وتحت الماء، تنكسر الأشعة التي تلتقي بالسطح بزاوية أقل من الزاوية الحرجة إلى الهواء؛ وبعدها يُنتج السطح انعكاسًا كليًّا داخليًّا.
الاستراتيجية:	استخدم قانون الانكسار بالمعاملات المطلقة: $n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$. وللانعكاس الكلي الداخلي، أوجد الزاوية الحرجة i_0 بوضع زاوية الانكسار $90°$: $n \sin i_0 = \sin 90° \Rightarrow \sin i_0 = 1/n$. ثم $r = h \tan i_0$.
الحل الموضح:	(أ) الضوء الداخل إلى المادة (n: 1.0 → 1.5) السرعة: $\frac{3.0\times10^8}{v} = \frac{1.5}{1.0} \Rightarrow v = 2.0\times10^8 \text{ m s}^{-1}$ الطول الموجي: $\frac{6.0\times10^{-7}}{\lambda} = \frac{1.5}{1.0} \Rightarrow \lambda = 4.0\times10^{-7} \text{ m}$ (ب) نصف قطر القرص من الزاوية الحرجة الزاوية الحرجة: $\sin i_0 = \frac{1}{n}$. من المثلث القائم: $\tan i_0 = \frac{1}{\sqrt{n^2-1}} \Rightarrow r = h \tan i_0 = \frac{h}{\sqrt{n^2-1}} m$
منطقية الحل:	يزيد نصف القطر (r) مع العمق (h) وينخفض مع زيادة (n) لأن معامل انكسار أكبر يُعطي زاوية حرجة أصغر ومخروط هروب أضيق: $r = \frac{h}{\sqrt{n^2-1}}$.
فسِّرها بنفسك:	لمصدر عند العمق h نفسه، لماذا يجعل معامل انكسار n أكبر قرص الحجب أصغر؟

نصائح امتحانية:
اعرض العلاقة التي استخدمتها
$n = \frac{c}{v}$،
$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_1} = \frac{n_2}{n_1}$ أو،
$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ أو
والتعويض الذي يليها في كل إجابة؛ يمنح الممتحنون درجات على طريقة الحل.

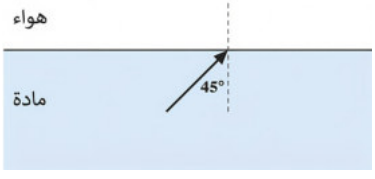
سؤال للربط:
كيف يُستخدَم الانعكاس الكلي الداخلي لتوجيه الضوء في الألياف الضوئية؟

حاول بنفسك: يقع مصباح على عمق $h = 0.30 \text{ m}$ تحت ماء معامل انكساره $\sqrt{2}$.
أوجد أصغر نصف قطر قرص r يحجب كل شعاع خارج، بالمتر.

اختبر ذلك: في كوبك، وجِّه الشعاع الضيق لأسفل من الهواء إلى الماء بزاوية سقوط كبيرة، وأظهر أنه لا يزال هناك شعاع منتقل إلى الماء – على عكس الشعاع الصاعد من الماء إلى الهواء.

حاول:

(أ) كما في الشكل على اليسار، ينتقل ضوء في مادة معامل انكسارها $\sqrt{2}$ ويدخل الهواء الذي معامل انكساره 1.0 بزاوية سقوط $45°$. ولتكن سرعة الضوء في الهواء c تساوي $3.0\times10^8 \text{ m/s}$، وليكن الطول الموجي للضوء في الهواء λ_0 يساوي $5.8\times10^{-7} \text{ m}$، وليكن $\sqrt{2} = 1.4$.

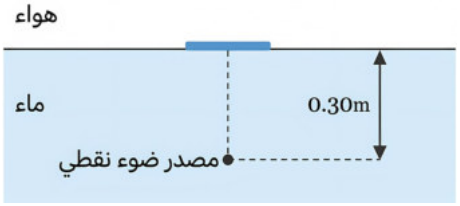


(i) أوجد سرعة الضوء v في المادة، بـ m/s.

(ii) أوجد الطول الموجي للضوء λ في المادة، بالمتر.

(iii) لتكن زاوية الانكسار r. أوجد قيمة $\sin r$.

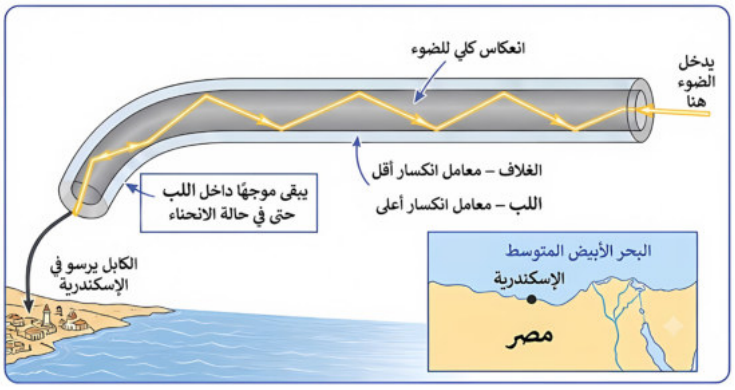
(ب) يوجد مصدر ضوء نقطي على عمق 0.30 m أسفل سطح الماء. لمنع ضوء المصدر النقطي من الخروج إلى الهواء بتعويم قرص على سطح الماء، أوجد أصغر نصف قطر r للقرص بالمتر.



افترض أن معامل انكسار الهواء 1 وأن معامل انكسار الماء $\sqrt{2}$.

في سياق جديد — الألياف الضوئية التي تصل إلى الإسكندرية

يحتوي الليف الضوئي على غلاف داخلي معامل انكساره أكبر من الغلاف المحيط به. يمكن للضوء الموجه المنتقل في الغلاف الداخلي أن يصل إلى السطح الفاصل بين الغلاف الداخلي والغلاف الخارجي الضوء الموجَّه المتحرك في اللُبِّ بحد اللُبِّ–الغلاف بزوايا أكبر من الزاوية الحرجة، فيخضع لانعكاس كلي داخلي ويبقى موجَّهًا على طول الليف.



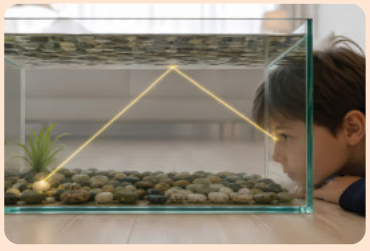
معامل انكسار الغلاف أقل من اللُبِّ؛ لذا يمكن أن ينعكس الضوء الملتقي بحدهما كليًّا. فسِّر لماذا يبقى الضوء محبوسًا في اللُبّ، واذكر ماذا سيحدث للإشارة لو صُنع الغلاف بدلًا من ذلك من زجاج معامل انكساره أعلى من اللُبِّ.

طبيعة العلم: العلم مسعى مشترك — تشارلز كاو وألياف زجاج

يمكن للانعكاس الكلي الداخلي أن يوجِّه الضوء على طول ليف زجاجي، لكن الزجاج قديمًا كان يمتصُّ ضوءًا كثيرًا جدًّا للاتصالات بعيدة المدى. وفي عام ١٩٦٦، أثبت تشارلز كاو أن السبب الرئيسي للفقد كان الشوائب في الزجاج. فسر أن الزجاج النقي بما يكفي يمكنه نقل الضوء عبر مسافات طويلة. وجعلت التحسينات اللاحقة في تصنيع الزجاج اتصالات الألياف الضوئية عملية، وشارك كاو في جائزة نوبل في الفيزياء لعام ٢٠٠٩ عن هذا العمل. وأصبحت الألياف الضوئية تقنية رئيسية للاتصالات العالمية.

دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يجعل رؤية كاو لم تُغيِّر العالم إلا بعد أن تمكن علماء ومهندسون آخرون، في بلدان عديدة، من اختبار حسابه والبناء عليه.

سؤال الدرس، وإجابته:

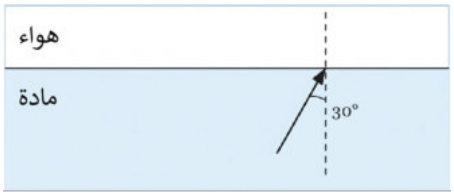


عندما يسقط الضوء من الماء إلى الهواء، هل يعبر السطح دائمًا، أم يمكن أن يعكس السطح الضوء كليًّا؟ لا يعبر دائمًا. فمن الجانب الأكبر كثافة ضوئية إلى الأقل كثافة ضوئية، ينحني الشعاع بعيدًا عن العمود المقام.

ومع انحناء الشعاع الخارج أكثر عن العمود المقام حتى يلامس السطح مماسيًّا، عندما يكون الشعاع الساقط بالزاوية الحرجة $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$. وبعد تلك الزاوية لا يوجد أي شعاع منكسر على الإطلاق: إذ ينعكس الضوء بأكمله عائدًا للماء، ويصبح السطح مرآة مثالية. فوق الزاوية الحرجة، يتوقف السطح الفاصل من الأكبر كثافة ضوئية إلى الأقل كثافة ضوئية عن النفاذ ويعكس الضوء كليًّا — وهذا هو المبدأ الذي يوجِّه إشارات الضوء على طول الألياف الضوئية.

تمرين:

(أ) كما في الشكل على اليسار، ينتقل ضوء في مادة معامل انكساره 1.5 ويدخل الهواء الذي معامل انكساره 1.0 بزاوية سقوط 30°. ولتكن سرعة الضوء في الهواء c تساوي 3.0×10^8 m/s، وليكن الطول الموجي للضوء في المادة λ يساوي 4.0×10^{-7} m.

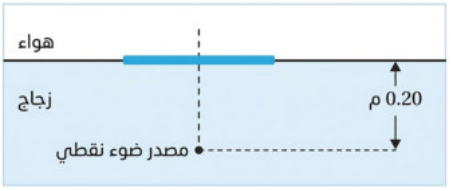


(i) أوجد سرعة الضوء v في المادة، بـ m/s.

(ii) أوجد الطول الموجي λ_0 للضوء في الهواء، بالمتر.

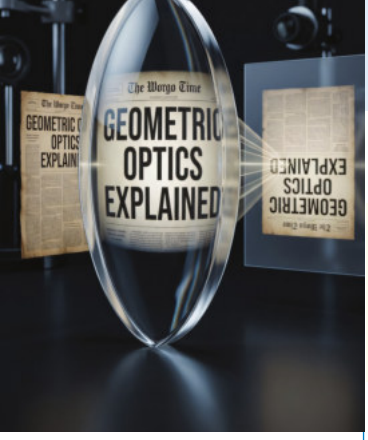
(iii) لتكن زاوية الانكسار r. أوجد قيمة $\sin r$.

(ب) يوجد مصدر ضوء نقطي على بُعد 0.20 m من سطح الزجاج. لمنع ضوء المصدر النقطي من الخروج إلى الهواء بوضع قرص على السطح، أوجد أصغر نصف قطر r للقرص بالمتر. افترض أن معامل انكسار الهواء 1.0 وأن معامل انكسار الزجاج $\sqrt{5}$.



سؤال بأسلوب الامتحان:

يصل ضوء داخل قطعة زجاج معامل انكسارها 1.5 إلى سطح الزجاج – الهواء (معامل انكسار الهواء 1.0). أوجد $\sin\theta_c$ للانعكاس الكلي الداخلي عند هذا السطح، واذكر ماذا يحدث لشعاع يلتقي بالسطح بزاوية سقوط أكبر من θ_c.



الدرس ٢-١٠ — العدسات والصور

؟ سؤال الدرس:

تُنتج عدسة مكبِّرة صورة معتدلة ومكبَّرة عندما تكون قريبة من صحيفة. لماذا يمكن أن تصبح الصورة مقلوبة عندما تُبعَد العدسة أكثر عن الصفحة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **ترسم** الأشعة الرئيسية عبر عدسة رقيقة وتحدد الصورة من تقاطعها.

٢. **تصف** الصورة المتكوِّنة بواسطة عدسة بأنها حقيقية أو تقديرية، مقلوبة أو معتدلة، مكبَّرة أو مصغَّرة.

٣. **تستخدم** معادلة العدسة وعلاقة التكبير لتحديد موضع الصورة وحجمها، باستخدام اصطلاح الإشارة المذكور في الدرس.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

يُمسك جدٌّ بعدسة مكبِّرة قريبة فوق صحيفة، فيبدو العنوان كبيرًا ومعتدلاً. ويرفع العدسة نفسها أعلى فوق الصفحة، فتصبح الحروف أصغر ومقلوبة. نفس العدسة تُستخدَم في الحالتين، فقط تغيَّرت المسافة بين الصفحة والعدسة. لماذا يُغيِّر تغيير هذه المسافة الصورة من معتدلة ومكبَّرة إلى مقلوبة؟

توقَّع قبل أن تستمر :

(أ) هل تجعل العدسة المكبِّرة الأجسام تبدو دائمًا أكبر، أيًا كانت المسافة؟

(ب) إذا غطيت نصف العدسة بإبهامك، هل تفقد نصف الصورة؟

حقيقة أساسية:

ينكسر الضوء عندما يمر من وسط إلى آخر بمعامل انكسار مختلف. وتستخدم العدسة الانكسار عند سطحيها المنحنيين لتغيير اتجاهات أشعة الضوء وتكوين صورة.

استكشف — كوِّن صورة حقيقية بعدسة محدبة

ما ستفعله: تستخدم عدسة محدبة لتكوين صورة حقيقية على شاشة وتقارنها بالصورة التقديرية المُلاحَظة عندما يكون الجسم داخل البُعد البؤري.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- عدسة محدبة أو عدسة مكبِّرة.
- شاشة بيضاء أو جدار عادي.
- جسم صغير ساطع، كلهب شمعة.
- غرفة مظلمة.

الخطوات:

١ ضع جسمًا صغيرًا ساطعًا على بُعد عدة أمتار من جدار أو شاشة بيضاء.

٢ أمسك العدسة المحدبة بين الجسم والشاشة.

٣ حرِّك العدسة ببطء حتى تتكوَّن صورة واضحة على الشاشة.

٤ سجِّل ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة.

٥ ضع العدسة نفسها قريبة من كلمة مطبوعة وانظر عبر العدسة.

٦ حرِّك العدسة ببطء بعيدًا عن الكلمة ولاحظ كيف تتغيَّر الصورة.

موضع الجسم بالنسبة للعدسة	هل تكوَّنت صورة على الشاشة؟	اتجاه الصورة

ملاحظة القياس:

حرِّك العدسة ببطء بالقرب من موضع التركيز الحاد؛ ستصبح الصورة على الجدار مشوشة بسرعة إذا اختلفت المسافة ولو ببضعة ملليمترات.

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل كانت الصورة المتكوِّنة على الجدار حقيقية أم تقديرية؟ كيف تعرف ذلك؟

(ب) عندما كانت الكلمة المطبوعة قريبة جدًّا من العدسة، لماذا لم يكن بالإمكان تكوين صورتها على شاشة؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، التقطت صورة واضحة للمصدر البعيد على الجدار، وكانت مقلوبة. ولم يكن بالإمكان تكوين صورة الكلمة القريبة المرئية عبر العدسة على أي شاشة. ولعلك توقعت أن العدسة تُكبِّر فقط؛ لكن صورتيك مختلفتان بالفعل. وفيما يلي النموذج الذي تشير إليه الأشعة — مرسومًا، دون حساب بعد.

شكلان للعدسات، محور رئيسي واحد:

العدسة المحدبة أكثر سمكًا عند مركزها منها عند حوافها، وتعمل كعدسة مجمِّعة للأشعة المتوازية. والعدسة المقعرة أرق عند مركزها منها عند حوافها، وتعمل كعدسة مفرِّقة للأشعة المتوازية. والمحور الرئيسي هو الخط المستقيم المار بالمركز البصري للعدسة والعمودي على مستوى العدسة. وتقع البؤرتان الرئيسيتان F و F′ على هذا المحور، واحدة على كل جانب من العدسة، على بُعد f، يُسمى البُعد البؤري، من المركز البصري. وتُجمِّع العدسة المحدبة الأشعة المتوازية نحو F′؛ وتُفرِّقها العدسة المقعرة.

ولتحديد الصورة المتكوِّنة بواسطة عدسة رقيقة، ارسم شعاعين من الأشعة الرئيسية التالية من أعلى الجسم:

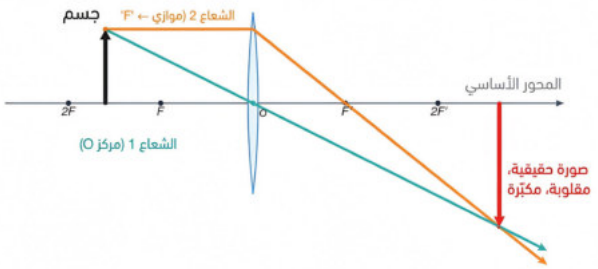
١. شعاع يمر بالمركز البصري للعدسة يستمر دون انحراف.

٢. شعاع موازٍ للمحور الرئيسي ينكسر عبر البؤرة البعيدة F′ لعدسة محدبة أو يبدو قادمًا من البؤرة القريبة F لعدسة مقعرة.

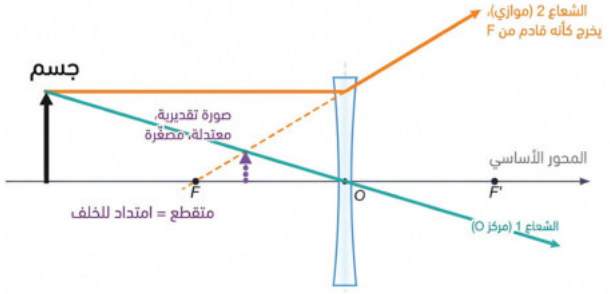
٣. شعاع يمر بالبؤرة القريبة F لعدسة محدبة يخرج موازيًا للمحور الرئيسي. أما بالنسبة لعدسة مقعرة، فإن شعاعًا موجَّهًا نحو البؤرة البعيدة F′ يخرج موازيًا للمحور الرئيسي.

إذا التقت الأشعة المنكسرة فعليًّا، تكون الصورة حقيقية ويمكن تكوينها على شاشة. وإذا تفرقت الأشعة المنكسرة والتقت امتداداتها الخلفية فقط، تكون الصورة تقديرية ولا يمكن تكوينها على شاشة.

1. عدسة مجمعة (محدبة) - صورة حقيقية



2. عدسة مفرقة (مقعرة) - صورة تقديرية



البؤرة الرئيسية (F):

بالنسبة لعدسة محدبة، البؤرة الرئيسية هي النقطة على المحور الرئيسي التي تتجمع عندها الأشعة الموازية للمحور الرئيسي بعد الانكسار.

بالنسبة للعدسة المقعرة، فهي النقطة التي تبدو منها هذه الأشعة وكأنها تتباعد.

والبُعد البؤري f هو المسافة من المركز البصري إلى البؤرة الرئيسية.

المواضع الستة، ملخصة في جدول واحد:

حرِّك الجسم من بعيد جدًّا، وتُنتج العدسة المحدبة تسلسلًا ثابتًا من الصور. أما بالنسبة لعدسة مقعرة، فتبقى الصورة تقديرية ومعتدلة ومصغَّرة، رغم أن موضعها وحجمها يتغيَّران مع تحرك الجسم. اعتبر كل صف كحالة من حالات مخطط الأشعة - يأتي الجبر في الصفحة التالية.

موضع الصورة	طبيعة الصورة	الاتجاه والحجم	موضع الجسم
عند شاشة خلف العدسة	حقيقية	مقلوبة • مصغَّرة	أبعد كثيرًا من 2F
عند شاشة خلف العدسة	حقيقية	مقلوبة • بالحجم نفسه	عند 2F
عند شاشة خلف العدسة	حقيقية	مقلوبة • مكبَّرة	بين F و2F
—	الصورة عند اللانهاية؛ الأشعة الخارجة موازية	—	عند F
أمام العدسة، من جانب الجسم	تقديرية	معتدلة • مكبَّرة	داخل F (أقرب من F)
أمام العدسة، من جانب الجسم	تقديرية	معتدلة • مصغَّرة	عدسة مقعرة — أي موضع

من الرسم إلى الحساب — معادلة العدسة:

تُظهر الأشعة أين تقع الصورة؛ والآن نحددها كميًّا. لتكن a المسافة من الجسم إلى العدسة، وb المسافة من الصورة إلى العدسة، وf البُعد البؤري. وفي هذا الدرس، نستخدم اصطلاح الإشارة التالي: a موجبة دائمًا، وf تُكتب كمقدار موجب، وتُحدِّد إشارة b نوع الصورة.

بالنسبة للعدسة المحدبة (المجمِّعة): $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$

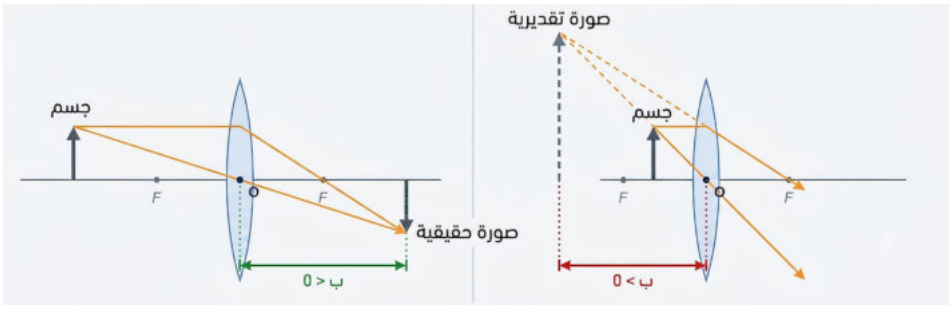
بالنسبة للعدسة المقعرة (المفرِّقة): $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=-\frac{1}{f}$

التكبير M هو نسبة حجم الصورة إلى حجم الجسم: $M=\left|\frac{b}{a}\right|$. وفي هذا الاصطلاح، يُؤخَذ M كنسبة حجم موجبة. ويُوصَف اتجاه الصورة بصورة منفصلة بأنه معتدل أو مقلوب.

الإشارة الحاسمة — إشارة b:

مسافة الصورة b هي الكمية الوحيدة ذات الإشارة. وتُخبرك إشارتها، دون رسم إضافي، بأي جانب تقع الصورة — وبالتالي ما إذا كانت حقيقية أم تقديرية.

إشارة b	أين تقع الصورة	ما هي
b موجبة (+)	خلف العدسة — الجانب البعيد، المقابل للجسم	صورة حقيقية
b سالبة (-)	أمام العدسة — الجانب نفسه للجسم	صورة تقديرية



نصيحة امتحانية:

اذكر b بإشارتها، ثم اقرأ نوع الصورة مباشرة منها: فالموجب يعني حقيقية وخلف العدسة، والسالب يعني تقديرية وأمام العدسة. لا تكتب أبدًا إشارة على M.

نقطة

تُسمى العدسة التي تكون أكثر سُمكاً عند المركز مقارنةً بالأطراف "عدسة محدبة"، وهي تعمل على تجميع الأشعة المتوازية؛ أما العدسة التي تكون أقل سُمكاً عند المركز مقارنةً بالأطراف فتُسمى "عدسة مقعرة"، وتعمل على تفريق تلك الأشعة. ويُعرف الخط المستقيم المار بالمركز البصري والعمودي على العدسة باسم "المحور الرئيسي".

تُسمى الصورة التي تتكون عند نقطة تقاطع الأشعة الضوئية نفسها "صورة حقيقية"؛ بينما تُسمى الصورة التي تتكون عند امتدادات الأشعة المتباعدة "صورة تقديرية" (أو تخيلية). ففي حالة العدسة المحدبة، إذا وُضع الجسم خارج البؤرة، تكون الصورة حقيقية ومقلوبة؛ أما إذا وُضع الجسم داخل البؤرة، فتكون الصورة تقديرية ومعتدلة. وفي حالة العدسة المقعرة، تكون الصورة دائماً تقديرية ومعتدلة ومصغرة، بغض النظر عن موقع الجسم.

ليكن a هو بُعد الجسم، و b هو بُعد الصورة، و f هو البعد البؤري. للعدسة المحدبة: $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ وللعدسة المقعرة: $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}$ وتُحسب قيمة التكبير (M) بالعلاقة: $M = \left|\frac{b}{a}\right|$.

صندوق المعادلات:

العدسة المحدبة	$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$
العدسة المقعرة	$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=-\frac{1}{f}$
التكبير	$M=\left\|\frac{b}{a}\right\|$

تطبيق سريع:

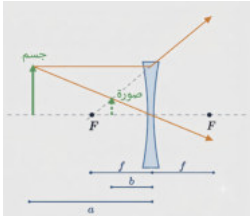
يوضع جسم على بُعد 40 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 10 cm. احسب مسافة الصورة b من $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=-\frac{1}{f}$، ثم التكبير M.

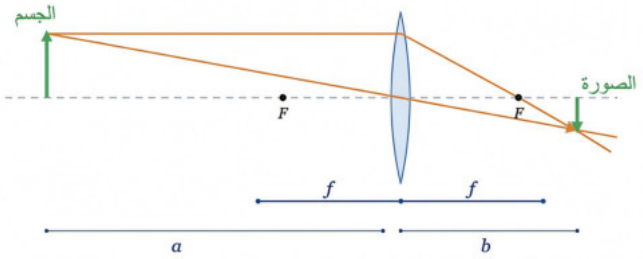
مثال محلول:

الموقف:	يوضع جسم أمام عدسة رقيقة. تُدرَس حالتان منفصلتان: عدسة محدبة (مجمِّعة) وعدسة مقعرة (مفرِّقة).
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** (أ) عدسة محدبة: $f = 20\ cm$ ، $a = 60\ cm$. (ب) عدسة مقعرة: $f = 10\ cm$ ، $a = 20\ cm$. **المطلوب: (لأقرب رقمين معنويين):** (i) نوع الصورة (ii) موضع الصورة (iii) التكبير.
التمثيل:	استخدم معادلة العدسة الرقيقة، حيث تُمثِّل a مسافة الجسم و b مسافة الصورة: استخدم $1/f$ موجبة للعدسة المحدبة (المجمعة) و $1/f$ سالبة للعدسة المقعرة (المفرقة)، مع اعتبار f دائماً قيمة موجبة. • تشير القيمة الموجبة لـ b إلى صورة حقيقية تقع في الجهة المقابلة للعدسة، بينما تشير القيمة السالبة لـ b إلى صورة تقديرية تقع في نفس جهة الجسم. • يُرمز للتكبير الخطي بالرمز M. يتم تحديد موقع كل صورة باستخدام شعاعين رئيسيين: أحدهما موازٍ للمحور، والآخر يمر عبر المركز البصري للعدسة.

حقيقة أساسية:

لا يمكن تكوين صورة تقديرية (b سالبة) على شاشة — إذ يبدو أن الأشعة تصدر منها فقط. والكلمة المعتدلة المرئية عبر عدسة مكبِّرة هي تمامًا من هذا النوع من الصور.

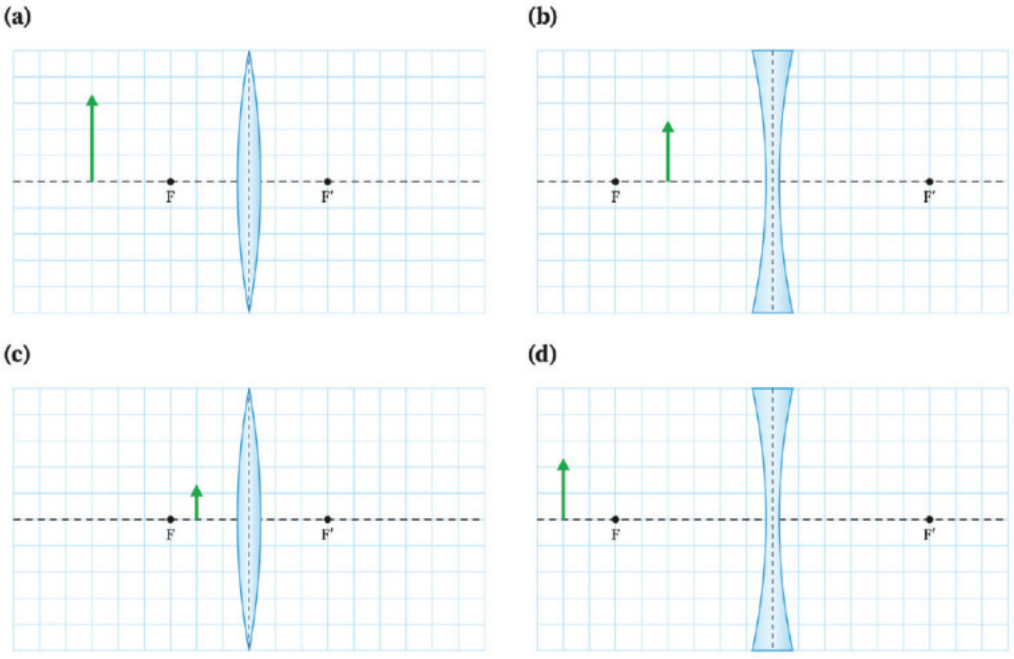


الاستراتيجية:	**١.** حدِّد إشارة حد العدسة: $+\frac{1}{f}$ للمحدبة، $-\frac{1}{f}$ للمقعرة. **٢.** حل معادلة العدسة لإيجاد b، يمثل b الموجب صورة حقيقية على الجانب البعيد من العدسة؛ ويمثل b السالب صورة تقديرية على نفس جانب الجسم. **٣.** أوجد $M = \left\|\frac{b}{a}\right\|$. **٤.** تحقق بمخطط أشعة، يتم تحديد موقع كل صورة باستخدام شعاعين رئيسيين: أحدهما موازٍ للمحور والآخر يمر عبر المركز البصري للعدسة.
الحل الموضح:	(أ) **العدسة المحدبة:** الجسم (60 cm) أبعد من 2f = 40 cm، لذا الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغَّرة. $\frac{1}{60} + \frac{1}{b} = \frac{1}{20} \Longleftarrow b = 30cm$ (خلف العدسة). $M = \frac{30}{60} = 0.50$.  (ب) العدسة المقعرة: الصورة دائمًا تقديرية ومعتدلة ومصغَّرة. $\frac{1}{20} + \frac{1}{b} = \frac{1}{10} \Longleftarrow b = 6.7cm$ (أمام العدسة). $M = \frac{6.7}{20} \approx 0.33$.
منطقية الحل:	جسم أبعد من 2f يُعطي صورة حقيقية بين f و2f؛ و b = 30 cm تقع بين 20 و40 cm. وتُعطي العدسة المقعرة دائمًا صورة تقديرية معتدلة مصغَّرة، و $\|b\| = 6.7\ \text{cm} < \|f\| = 10\ \text{cm}$.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تُكوِّن عدسة مفرِّقة (مقعرة) دائمًا صورة تقديرية ومعتدلة ومصغَّرة، أيًّا كانت مسافة الجسم؟

جرِّب بنفسك: التقط صورة واضحة على الجدار. ثم مرِّر بطاقة فوق نصف العدسة. لاحظ ما الذي يتغيَّر: شكل الصورة، أم سطوعها فقط؟

جرِّب:

١. بفرض أن الجسم يُمثَّل بسهم وأن العدسة ببؤرتين F و F'، ارسم صورة الجسم المتكوِّنة بواسطة العدسة.



٢. أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين:

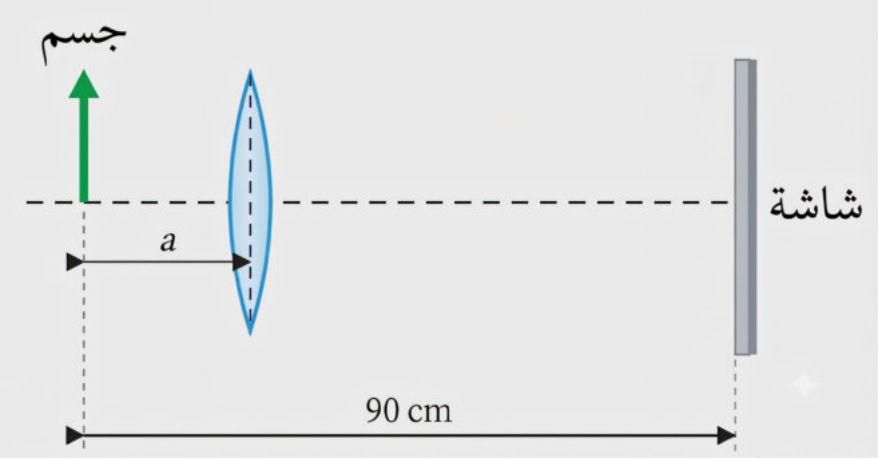
(أ) لكل حالة، أوجد (A) نوع الصورة، (B) موضع الصورة، (C) التكبير.

(i) يوضع جسم على بُعد 30 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 20 cm.

(ii) يوضع جسم على بُعد 4.0 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 6.0 cm.

(iii) يوضع جسم على بُعد 6.0 cm أمام عدسة مقعرة بُعدها البؤري 12 cm.

(ب) كما في الشكل، وضعت شاشة على بُعد 90 cm من جسم، وتُحرَّك عدسة محدبة بُعدها البؤري 20 cm بين الجسم والشاشة. أوجد جميع قيم المسافة a بين العدسة والجسم التي تتكوَّن عندها صورة واضحة على الشاشة.



ملاحظة عملية:

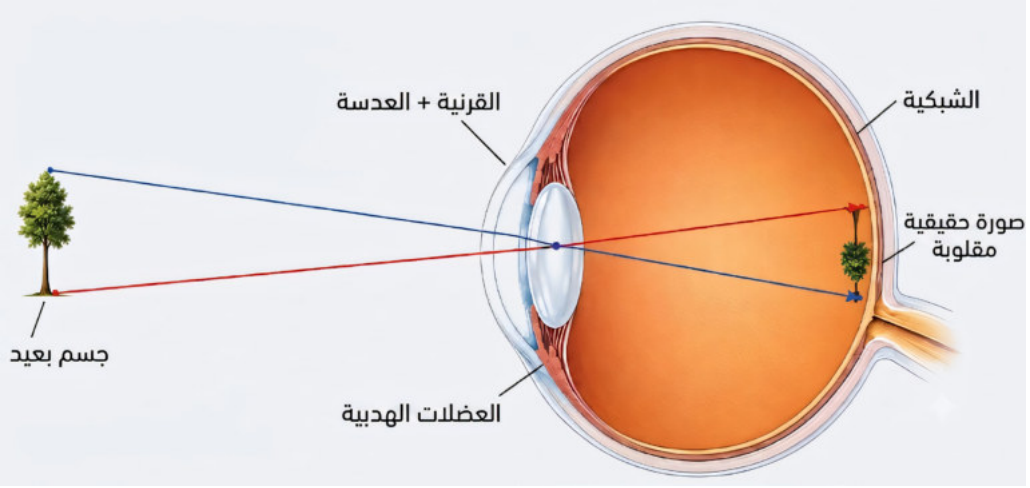
في حالات الصورة الخيالية، تتفرق الأشعة الخارجة؛ مدِّدها إلى الخلف كخطوط متقطعة لإيجاد موضع الصورة التقديرية، أمام العدسة على جانب الجسم.

سؤال للربط:

كيف يسمح الانكسار عند سطح منحنٍ لعدسة واحدة بتكوين صورة؟ – يرتبط هذا بموضوع الانكسار في الدرس 9–2. الانحناء الذي تعرفت عليه هناك هو ما يخضع له كل شعاع رئيسي عند العدسة.

في سياق جديد — العدسة داخل عينك

تعمل القرنية والعدسة البلورية للعين معًا كنظام بصري مجمِّع. ويُكوِّنان صورة حقيقية ومقلوبة على الشبكية. ويُغيِّر التكيُّف شكل العدسة البلورية، فيُعدِّل البُعد البؤري الفعلي بحيث يمكن تركيز صور الأجسام القريبة والبعيدة على الشبكية.



طبِّق فهمك: فسِّر لماذا تكون الصورة على الشبكية حقيقية ومقلوبة، وأي الأشعة الرئيسية سترسمها لتوضيح ذلك..

طبيعة العلم — ابن الهيثم وكتاب المناظر — الرؤية بالضوء الداخل إلى العين

توصل ابن الهيثم بأن الرؤية تحدث لأن الضوء من الأجسام يدخل العين، لا لأن أشعة تخرج من العين. وأكَّد عمله في البصريات على الملاحظة والتجربة، وهما منهجان محوريان في العلم الحديث. (المصدر: ابن الهيثم، كتاب المناظر، نحو ١٠١١–١٠٢١ م.)

دورك الآن: اقترح ملاحظة يومية واحدة تُظهر أننا نرى بالضوء الداخل إلى العين، لا بأشعة تخرج منها.

سؤال الدرس، وإجابته:

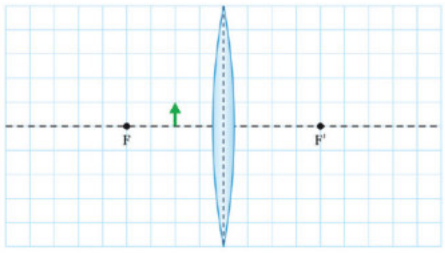
تُكبِّر عدسة مكبِّرة النص عندما تُمسَك قريبة من صحيفة، لكن لماذا تصبح الحروف مقلوبة عندما تُبعَد العدسة أكثر؟ عندما تكون الصحيفة بين العدسة المحدبة وبؤرتها الرئيسية، تُكوِّن العدسة صورة تقديرية ومعتدلة ومكبَّرة. ومع إبعاد العدسة، تزداد مسافة الجسم. وبمجرد أن تصبح الصحيفة أبعد من البؤرة الرئيسية، تُكوِّن العدسة صورة حقيقية ومقلوبة؛ لذا، تعتمد خصائص الصورة على موضع الجسم بالنسبة للبؤرة الرئيسية: فالجسم الموضوع بين العدسة والبؤرة الرئيسية يُنتج صورة تقديرية ومعتدلة، بينما يُنتج الجسم الموضوع أبعد من البؤرة الرئيسية صورة حقيقية ومقلوبة.

مسافة الصورة b، بإشارتها، واذكر ما إذا كانت الصورة حقيقية أم تقديرية.

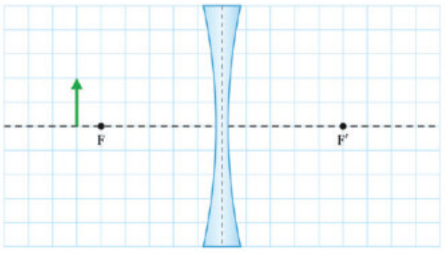
تمرين:

١. بفرض أن الجسم يُمثَّل بسهم وأن العدسة ببؤرتين F و F’ ، ارسم صورة الجسم المتكوِّنة بواسطة العدسة.

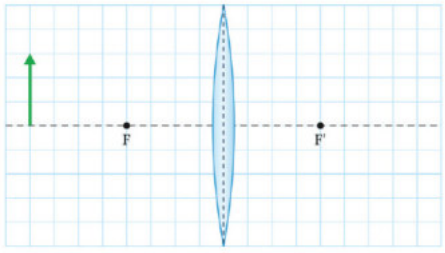
(a)



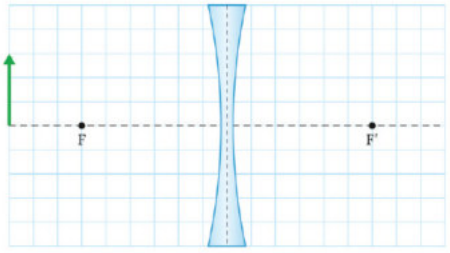
(b)



(c)



(d)



٢. أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين:

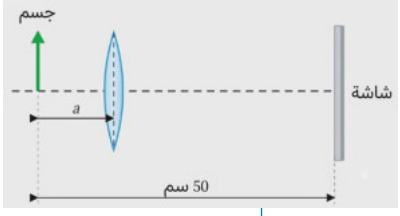
(أ) لكل حالة، أوجد (A) نوع الصورة، (B) موضع الصورة، (C) التكبير.

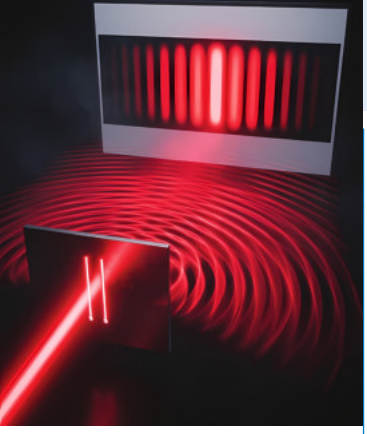
(i) يوضع جسم على بُعد 50 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 30 cm.

(ii) يوضع جسم على بُعد 8.0 cm أمام عدسة محدبة بُعدها البؤري 10 cm.

(iii) يوضع جسم على بُعد 10 cm أمام عدسة مقعرة بُعدها البؤري 15 cm.

(ب) توضع شاشة على بُعد 50 cm من جسم، وتُحرَّك عدسة محدبة بُعدها البؤري 12 cm بين الجسم والشاشة. أوجد جميع قيم المسافة a بين العدسة والجسم التي تتكوَّن عندها صورة واضحة على الشاشة.





الدرس ٢-١١ — تجربة الشق المزدوج ليونج

؟ سؤال الدرس:

عندما يمر ضوء أحادي اللون مترابط عبر شقين ضيقين،
هل تَظهر الشاشة منطقتان مضيئتان فقط، أم نمط تداخل من أهداب مضيئة ومظلمة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تصف** كيف أن ضوء مترابط يمر من شقين ضيقين يكون أهداب تداخل مضيئة ومظلمة على شاشة

٢. **تربط** بين فرق المسار من الشقين والموضع على الشاشة باستخدام: $\Delta = \frac{dx}{D}$ للزوايا الصغيرة.

٣. **تستخدم** شرط الهدب المضيئة: $\Delta = n\lambda$ وعلاقة تباعد الأهداب: $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$ لحل المسائل والتنبؤ بتغيُّرات النمط.

حقيقة أساسية:

عندما تلتقي موجتان مترابطتان عند نقطة ما، تتراكب إزاحتاهما، ويحدث التداخل البنَّاء عندما يكون فرق المسار عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية:

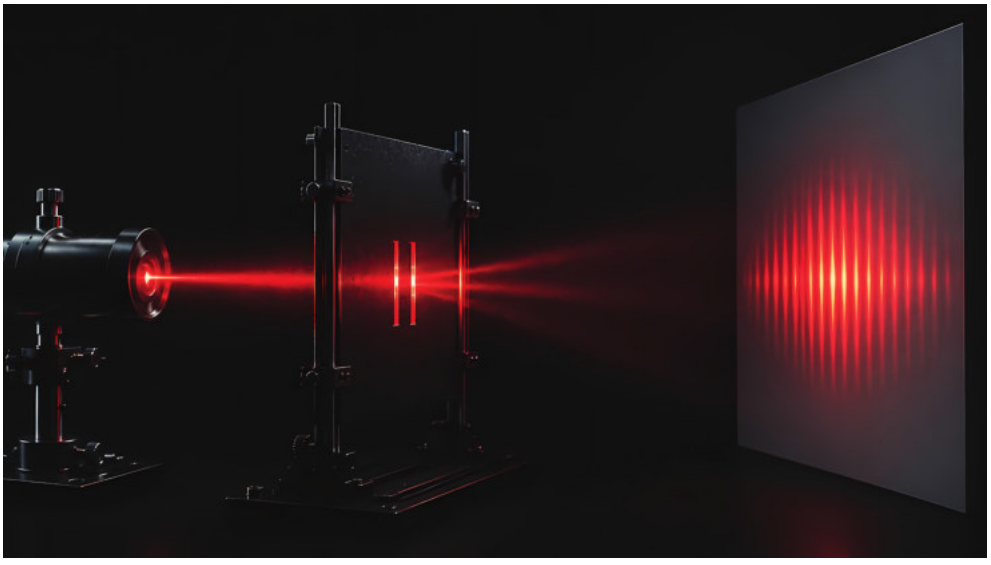
$\Delta = n\lambda$ ، $n = 0, 1, 2, \ldots$

ويحدث التداخل الهدَّام عندما يكون فرق المسار عددًا فرديًّا من أنصاف الأطوال الموجية:

$$\Delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$n = 0, 1, 2, \ldots$

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



عندما يمر ضوء أحادي اللون من ليزر عبر شقين ضيقين متقاربين، يتراكب الضوء من الشقين على الشاشة. وبدلًا من منطقتين مضيئتين فقط، يتكوَّن نمط من أهداب مضيئة ومظلمة. وتكون الهَدَبة المركزية مضيئة؛ لأن الضوء من الشقين يقطع مسافتين متساويتين إلى مركز الشاشة.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) مع فتح الشقين معًا، هل سيظهر على الجدار بقعتان مضيئتان (واحدة لكل شق)، أم صف من أهداب مضيئة عديدة — وأين تكون الأكثر إضاءة؟

(ب) إذا استُخدم شق مزدوج بتباعد أصغر بين الشقين، هل تصبح الأهداب أكثر تقاربًا أم أكثر تباعدًا؟

استكشف — قِس تباعد الأهداب عند مسافات شاشة مختلفة

ما ستفعله: تُمرِّر ضوء ليزر أحادي اللون عبر شق مزدوج، وتلاحظ أهداب التداخل على شاشة، وتقيس تباعد الأهداب.

الزمن: 12 دقيقة.

ما تحتاجه:

- ليزر أحمر منخفض القدرة.
- شق مزدوج.
- شاشة بيضاء أو جدار غير لامع.
- شريط قياس.
- مسطرة متر.
- غرفة مظلمة.

السلامة: استخدم فقط ليزرًا منخفض القدرة تحت إشراف المعلم. لا توجِّه شعاع الليزر أبدًا نحو أي عين أو سطح عاكس. أبقِ الشعاع أسفل مستوى العين وأطفئه عند عدم الاستخدام.

الخطوات:

١ ضع الشق المزدوج أمام الليزر ووجِّه الشعاع نحو شاشة بيضاء على بُعد عدة أمتار.

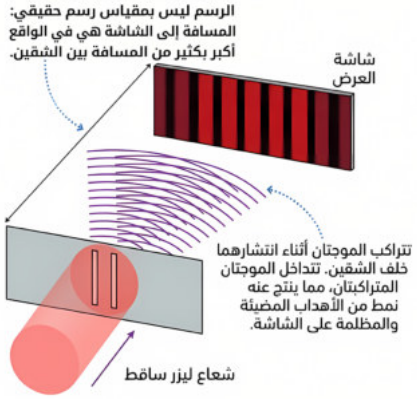
٢ أظلِم الغرفة بحيث يمكن رؤية نمط الأهداب بوضوح.

٣ حدِّد الهدبة المضيئة المركزية والأهداب المضيئة المجاورة على كلا الجانبين.

٤ قِس المسافة عبر عدة أهداب مضيئة متجاورة، ثم اقسم على عدد الفراغات للحصول على متوسط تباعد الأهداب Δy.

٥ قِس مسافة الشق–الشاشة D من الشق المزدوج إلى الشاشة.

٦ حرِّك الشاشة، أبعد، قِس، وسجِّل مسافة الشق–الشاشة الجديدة D، ثم قِس وسجِّل متوسط تباعد الأهداب الجديد $\Delta y'$.



مسافة الشق–الشاشة D/m	المسافة عبر عدة تباعدات هدبية/mm	عدد الفراغات	متوسط تباعد الأهداب $\Delta y/mm$

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل أظهرت الشاشة منطقتين مضيئتين فقط، أم نمطًا من عدة أهداب مضيئة ومظلمة؟ أين وقعت الهدبة المضيئة المركزية؟

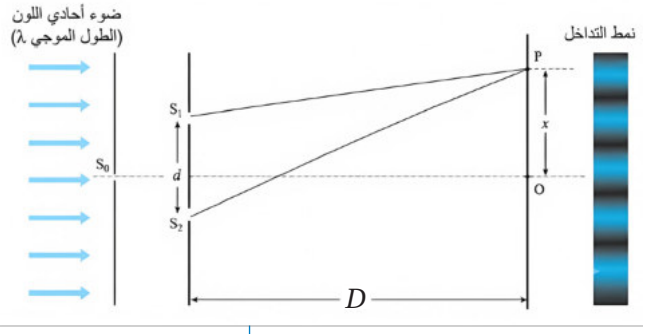
(ب) ماذا حدث لتباعد الأهداب عندما زادت المسافة D من الشقين إلى الشاشة؟

اكتب تفسيرك في سطرين على الأكثر قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

في نشاط الاستكشاف، لم تلاحظ بقعتين مضيئتين فحسب، بل سلسلة من أهداب مضيئة ومظلمة متعاقبة، بهدبة مركزية مضيئة. ووجدت أيضًا أن إبعاد الشاشة عن الشقين زاد تباعد الأهداب. ولعلك توقعت أن يُنتج الشقان بقعتين مضيئتين منفصلتين. لكن الضوء من الشقين كليهما يصل إلى كل نقطة على الشاشة، ويعتمد نمط التداخل الناتج على فرق المسارين الموجتين.

ضوء مترابط من شقين



في تجربة يونغ للشق المزدوج، يُضيء شعاع واحد أحادي اللون شقين ضيقين. ويعمل الشقان كمصدرين مترابطين؛ لأن الضوء الخارج منهما له التردد نفسه وفرق طور ثابت. ويتراكب الشعاعان على الشاشة ويتداخلان. وتحدث الأهداب المضيئة حيث تصل الموجتان بالطور نفسه. وتحدث الأهداب المظلمة حيث تصل الموجتان بطورين متعاكسين.

يختلف المساران بمقدار $\frac{dx}{D}$:

بالنسبة لنقطة P على بُعد x من الخط المركزي على شاشة تبعد D عن شقين متباعدين بمسافة d، فرق المسار تقريبًا: $\Delta = |S_1P - S_2P| \approx d \sin\theta \approx \frac{dx}{D}$. ويصح هذا التقريب عندما: $d \ll D$ و $x \ll D$، بحيث تكون الزاوية صغيرة.

تحدث الأهداب المضيئة عندما: $\Delta = n\lambda$ حيث: $n = 0, 1, 2, \ldots$.

وتحدث الأهداب المظلمة عندما: $\Delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$. وعند مركز الشاشة: $x = 0$ لذا: $\Delta = 0$ والهدبة المركزية مضيئة.

من الأهداب إلى تباعدها:

بالنسبة للأهداب المضيئة المتجاورة، يزيد فرق المسار بمقدار طول موجي واحد: يزيد Δ بمقدار λ. وبما أن $\Delta = \frac{dx}{D}$، فإن التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة هو: $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$

فرق المسار:
فرق المسار هو المسافة الإضافية المقطوعة إلى النقطة (P) بواسطة الضوء من أحد الشقين مقارنة بالضوء من الشق الآخر.

نقطة

- عندما يسقط ضوء أحادي اللون على شق (S_0) ثم على شقين مزدوجين $(S_1$ و$S_2)$ ليُكوّن صورة على شاشة، يحدث تداخل للضوء وتُلاحظ مجموعة من الأهداب المضيئة والمظلمة (أهداب التداخل). يعمل الشقان كمصدرين مترابطين لأن الضوء المنبعث منهما له التردد نفسه وفرق طور ثابت. وفي حال كان الشقان $(S_1$ و$S_2)$ في طور متماثل، فإن الحالة عند نقطة (P) على الشاشة تكون كالتالي:
- الأهداب المضيئة: $|S_1P - S_2P| = \lambda \times 2n$
  الأهداب المظلمة: $|S_1P - S_2P| = \lambda \times (2n + 1)$؛ حيث $n = 0, 1, 2, \ldots$
- ليكن (d) هو المسافة الفاصلة بين الشقين، و(D) هي المسافة من الشقين إلى الشاشة، بحيث تكون $D \gg d$ (أي أن d أصغر بكثير من D) لتكون الزوايا صغيرة. تكون المسافة الفاصلة بين الأهداب المضيئة المتجاورة هي $= \frac{\lambda D}{d}$؛ وبالتالي، فإن استخدام طول موجي أكبر، أو زيادة المسافة (D)، أو تقليل المسافة الفاصلة بين الشقين (d) يؤدي إلى زيادة التباعد بين الأهداب.

صندوق المعادلات:

تباعد الأهداب في تجربة يونغ للشق المزدوج:	$\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$

اقرأ المعادلة قبل التعويض بالقيم العددية.

يُعطى تباعد الأهداب بـ: $\Delta y = \frac{d\lambda}{D}$ وبزيادة الطول الموجي (λ)، أو بزيادة مسافة الشق–الشاشة (D)، فإن تباعد الأهداب (Δy) يزداد. بينما تقليل التباعد بين الشقين (d) يزيد تباعد الأهداب؛ لأن d في المقام. والنتيجة الأساسية هي: $\Delta y \propto \frac{1}{d}$؛ لذا، فإن تقريب الشقين من بعضهما يجعل الأهداب أكثر تباعدًا.

مثال محلول:

الموقف:

يمر ضوء أحادي اللون عبر شق واحد ثم عبر زوج من الشقوق، منتجًا نمط تداخل على شاشة. ويُقاس تباعد الأهداب، ثم يُدرَس تأثير وضع ماء بين الشقين والشاشة.

المعطيات والمطلوب:

المعطيات: $n = 1.3$ ، $D = 3.0\ \text{m}$ ، $d = 0.60\ \text{mm}$ ، $\Delta y = 2.9\ \text{mm}$.

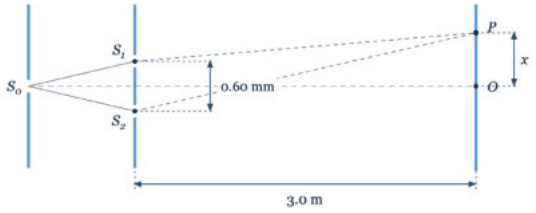
المطلوب:

(أ) الطول الموجي λ

(ب) تباعد الأهداب الجديد $\Delta y'$ في الماء.

التمثيل:

يُضيء الضوءُ المنبعثُ من الشق المفرد S_0 الشقين S_1 وS_2، اللذين تفصل بينهما مسافة d. وتتراكب الموجات الصادرة عن S_1 وS_2 وتتداخل على الشاشة الموجودة على مسافة D؛ حيث تتكون هدبة مضيئة عند النقطة P –التي تبعد مسافة x عن النقطة المركزية O– عندما يكون فرق المسار بين الموجتين القادمتين من الشقين مساوياً لعدد صحيح من الأطوال الموجية.



الاستراتيجية:

تُفصَل الأهداب المضيئة المتتالية بتباعد الأهداب $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$؛ أعد ترتيبها لإيجاد λ. ثم يُقلِّل الماء الطول الموجي إلى $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$، وأعد الحساب لإيجاد $\Delta y'$.

الحل الموضح:

(أ) $\lambda = \frac{d\Delta y}{D} = \frac{(0.60\times10^{-3})(2.9\times10^{-3})}{3.0} = 5.8\times10^{-7}\ \text{m}$

(ب) $\lambda' = \frac{\lambda}{n}\ .\ \Delta y' = \frac{D\lambda'}{d} \approx 2.2\ \text{mm}$.

نصيحة امتحانية:

اكتب دائمًا الصيغة بشكل رمزي، مع إعادة ترتيبها وفقًا للكمية المطلوبة، قبل التعويض بأي أرقام:

$$\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$$

$$\lambda = \frac{d\Delta y}{D}$$

هذا يجعل طريقتك واضحة ويكسبك علامات على الطريقة. ثم استبدل وقرِّب بعناية؛ لأن القيمة النهائية تُقيَّم بشكل منفصل.

منطقية الحل:	الطول الموجي $5.8\times10^{-7}\,m$ (580 nm) يقع في المنطقة المرئية من الطيف. وفي الماء ينخفض الطول الموجي فينخفض تباعد الأهداب: $\Delta y' = 2.2\,\text{mm} < \Delta y = 2.9\,\text{mm}$، بما يتفق مع $\Delta y \propto \lambda$.
فسِّرها بنفسك:	فسِّر: لماذا ينخفض التباعد بين أهداب التداخل عندما ينتقل الضوء من الهواء إلى الماء؟

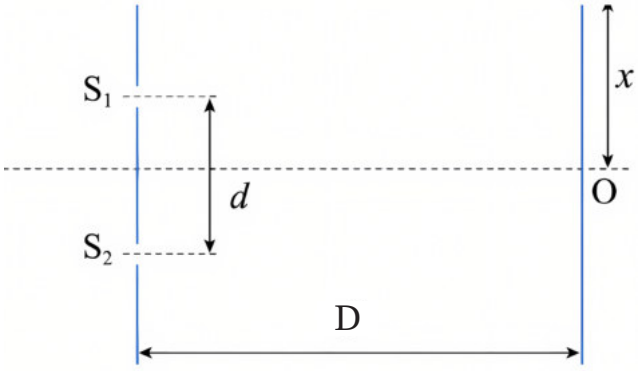
حقيقة أساسية:

توضح العلاقة $y = \frac{\lambda D}{d}$ كيف يؤثر كل متغير على تباعد الأهداب.

بما أن λ و D في البسط، فإن زيادة أي منهما تزيد من s. وبما أن d في المقام، فإن تقليل المسافة بين الشقين يزيد من s.

إذا انتقل الضوء عبر وسط متجانس معامل انكساره n، فإن طول موجته يصبح $\lambda_{\text{وسط}} = \lambda_0 n$، حيث λ_0 هو طول موجته في الهواء أو الفراغ. لذلك، $y_{\text{وسط}} = y_{\text{هواء}} n$

حاول:



كما في الشكل، يمر ضوء أحادي اللون طوله الموجي $\lambda\,[m]$ عبر شق واحد S_0، ثم شقين S_1 و S_2. تتكوَّن أهداب مضيئة ومظلمة على شاشة. والتباعد بين الشقين $d\,[m]$ ومسافة الشق – الشاشة $D\,[m]$.

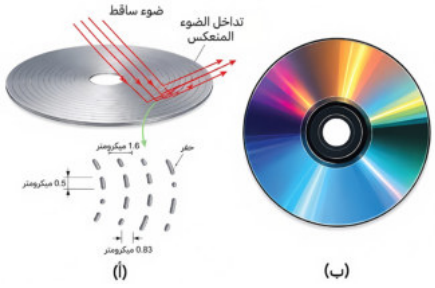
(أ) إذا **زادت** D، حدِّد ما إذا كان التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يصبح أصغر أم أكبر.

(ب) إذا **قلَّت** d، حدِّد ما إذا كان التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يصبح أصغر أم أكبر.

(جـ) تُملأ المنطقة بين الشقين والشاشة بسائل معامل انكساره n. أوجد العامل الذي يتغيَّر به التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة.

في سياق جديد — الألوان الطيفية المرئية على قرص مضغوط

تعمل المسارات المتقاربة جدًّا على قرص مضغوط أو DVD كمحزوز حيود. وعندما ينعكس ضوء أبيض من هذه المسارات المتساوية التباعد بانتظام، تخضع أطوال موجية مختلفة لتداخل بنَّاء في اتجاهات مختلفة؛ لذا، تُرى ألوان مختلفة بزوايا مشاهدة مختلفة. ومع تغيُّر زاوية المشاهدة، تخضع أطوال موجية أخرى لتداخل بنَّاء نحو العين، منتجة تسلسلًا متغيِّرًا من الألوان.



استخدام فكرة أن أطوالًا موجية مختلفة تخضع لتداخل بنَّاء بزوايا مختلفة، فسِّر في جملة أو جملتين لماذا يُنتج القرص المضغوط طيفًا من الألوان بدلًا من بقعة مضيئة واحدة.

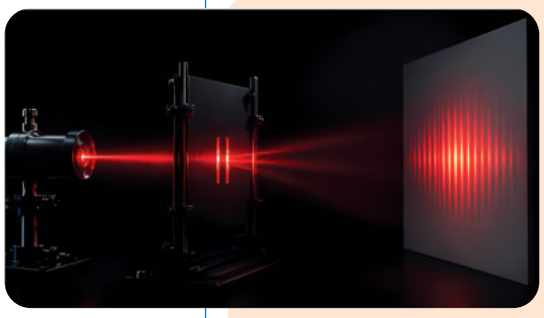
طبيعة العلم: العلم مسعى مشترك — القبول التدريجي لدليل تداخل يونغ

قدَّمت تجربة يونغ للشق المزدوج دليلًا قويًّا على الطبيعة الموجية للضوء لأنها أنتجت أهداب تداخل، وفي ذلك الوقت، كان النموذج الجسيمي للضوء مقبولًا على نطاق واسع، لذا لم يُقبَل التفسير الموجي فورًا، وعزَّز عمل لاحق، خصوصًا لأوغستان-جان فرينل، النموذج الموجي وساعد على ترسيخه على نطاق أوسع.

دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يجعل دليلًا تجريبيًّا قويًّا، كأهداب يونغ، يستغرق جيلًا كاملًا ليُقبَل.

كتيِّب البيانات:

المعادلة $y = \frac{\lambda D}{d}$؛ أعد ترتيبها إلى $\lambda = \frac{yd}{D}$، واحتفظ بالأطوال بالمتر، وقم بالتحويل إلى الوحدة المطلوبة فقط في النهاية.



سؤال الدرس، وإجابته:

عندما يُضيء ضوء أحادي اللون مترابط شقين ضيقين، يظهر على الشاشة نمط تداخل من أهداب مضيئة ومظلمة بدلًا من منطقتين مضيئتين منعزلتين. ويعمل الشقان كمصدرين مترابطين، وتتراكب الموجتان الخارجتان وتتداخلان. وتكون الهدبة المركزية مضيئة لأن فرق المسار عندها يساوي صفرًا.

وللزوايا الصغيرة، فرق المسار عند نقطة على بُعد x من المركز تقريبًا $\Delta \approx \frac{dx}{D}$.

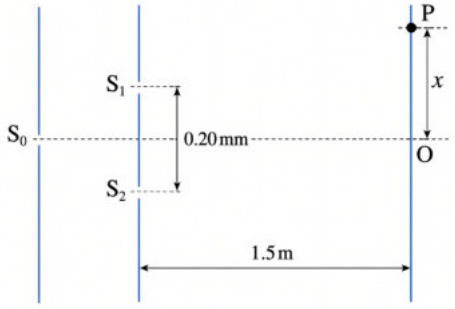
وتحدث الأهداب المضيئة عندما $\Delta = n\lambda$، وتحدث الأهداب المظلمة عندما $\Delta = \left(n + \frac{\lambda D}{d}\right)\lambda$،

حيث $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ لذا، تُفصَل الأهداب المضيئة المتجاورة بمسافة $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$.

تمرين:

(أ) يمر ضوء أحادي اللون طوله الموجي $\lambda\,[m]$ عبر شق واحد S_0، ثم شقين S_1 و S_2، مُكوِّنًا أهدابًا مضيئة ومظلمة على شاشة. والتباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يساوي 4.5 mm. والتباعد بين الشقين 0.20 mm ومسافة الشق-الشاشة 1.5 m.

(i) أوجد الطول الموجي $\lambda\,[m]$ للضوء.



(ii) تُملأ المنطقة بين الشقين والشاشة بماء (معامل انكساره 1.3). أوجد التباعد الجديد بين الأهداب المضيئة المتجاورة، بالمليمتر.

سؤال بأسلوب الامتحان:

في تجربة شق مزدوج، التباعد بين الشقين $d = 0.40\,mm$ والشاشة على بُعد $D = 2.0\,m$. وللضوء طول موجي $\lambda = 6.0 \times 10^{-7}\,m$. أوجد التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة، بالمليمتر.

(ب) في نمط شق مزدوج، حدِّد في كل حالة أدناه ما إذا كان التباعد بين الأهداب المضيئة المتجاورة يصبح أكبر أم أصغر:

(i) يزيد التباعد بين الشقين.

(ii) تُحرَّك الشاشة أبعد عن الشقين.

(iii) يتغيَّر الضوء إلى طول موجي أكبر.

المؤلفون

Maki Komizo
Yukihiro Kawakubo
Tomoaki Tsunoyama
Yoko Sasamori
Yuki Toda
Ritsu Igarashi
Yasser Mahdy
Kotomi Shirai (Designer)

المراجعون

أ.د. هاني نظمي سليمان
أ.د. هند علي محمد علي
أ.د. إسلام محمد شيحة
أ.د. وليد محمد أحمد دسوقى
د. عزيزة رجب خليفة
د. حنان أبو العباس محمد
أ. أيمن شوقي السيد
أ. سعيد محمد على
أ. نورة محمد عبد المجيد

الإشراف العام

د. جبريل أنور حميدة

رئيس الادارة المركزية لتطوير المناهج

EDUCATION SPRINGS NEW LIFE

SPRIX

CACD

رؤية 2030 VISION OF EGYPT