

# الفيزياء للجميع





# الفيزياء للجميع



هذا الكتاب ترجمة لكتاب **College Physics**. يمكنكم الوصول للنسخة  
الإنجليزية عبر الرابط <https://openstax.org/details/books/college-physics>

رخصة النسخة الإنجليزية: ©2020 Rice University. Textbook content produced by OpenStax is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

إنتاج: مبادرة "الكتب المفتوحة بالعربي".  
رخصة الكتاب: (CC BY 4.0)

للتطوع معنا أو إرسال مقترحاتكم أو تعديلاتكم برجاء التواصل عن طريق الإيميل:  
[openbooksinarabic@gmail.com](mailto:openbooksinarabic@gmail.com)

جميع كتبنا على **GitHub**  
<https://github.com/OpenBooksInArabic>

صفحة الفيسبوك:  
[/https://www.facebook.com/OpenBooksInArabic](https://www.facebook.com/OpenBooksInArabic)

تنويه!  
إن المتطوعين غير مسئولين عن آراء المؤلف وأفكاره.

## المشاركون في المشروع (حسب الترتيب الأبجدي)

1. بدور السيد عبد الحميد - الإسكندرية، مصر  
الايمل: bodourbasione1@gmail.com
- 2.
3. مصطفى شاهين – المنوفية، مصر  
الايمل: moustafashahin122@outlook.com
- 4.

## جدول المساهمات في كتاب " الفيزياء للجميع "

المساهمون (حسب ترتيب العمل)	الفصل
ترجمة 1. مصطفى شاهين تدقيق لغوي 1.	1
ترجمة 1. مصطفى شاهين تدقيق لغوي 1.	2
	3
	4
	5
	6
	7
	8
	9
	10
	11
	12
	13
ترجمة 1. بدور السيد عبد الحميد 2. 3. تدقيق لغوي 1.	14





## جدول المحتويات

1	مقدمة: طبيعة العلوم والفيزياء.....
3	1-1 الفيزياء: مقدمة .....
13	2-1 الكميات الفيزيائية والوحدات .....
22	3-1 الصحة والدقة والأرقام المعنوية.....
28	4-1 التقدير التقريبي.....
32	الكينماتيك.....
34	1-2 الإزاحة .....
38	2-2 المتجهات والقيم القياسية ونظم الإحداثيات .....
40	3-2 الزمن والسرعة المتجهة والسرعة .....
46	4-2 التسارع (العجلة).....
60	5-2 معادلات الحركة للتسارع الثابت في بعد واحد .....
76	6-2 أساسيات حل المسائل للكينماتيك أحادية البعد .....
78	7-2 الأجسام الساقطة .....
89	8-2 تحليل بياني للحركة أحادية البعد .....
100	الكينماتيك ثنائية الأبعاد .....
101	1-3 الكينماتيك في بعدين: مقدمة .....
104	2-3 جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية.....
113	3-3 جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية.....
120	4-3 حركة المقذوفات .....
130	5-3 جمع السرعات .....





## الفصل 1

# مقدمة: طبيعة العلوم والفيزياء



**الشكل 1-1:** المجرات متناهية الكبر مثلما أن الذرات متناهية الصغر. ومع ذلك، نفس قوانين الفيزياء تصف كل منها، وكل الطبيعة المتبقية أيضا- في إشارة إلى الوحدة الكامنة في الكون. قوانين الفيزياء- أيضًا- قليلة بدرجة مدهشة، في إحياء بالبساطة الكامنة خلف تعقيد الطبيعة المرئي.

(credit: NASA, JPL-Caltech, P. Barmby, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

## مخطط الفصل

### 1-1 الفيزياء: مقدمة

- الفرق بين المبدأ والقانون.
- الفرق بين النموذج والنظرية.

### 2-1 الكميات الفيزيائية والوحدات

- إجراء تحويلات الوحدات في كل من نظام وحدات الدولي والنظام الإنجليزي.
- التعرف على البادئات الأكثر شيوعا في وحدات الدولي واستخدامها في الكتابة العلمية.

### 3-1 الصحة والدقة والأرقام المعنوية

- تحديد العدد المناسب من الأرقام المعنوية في حسابات كل من الجمع والطرح، وكذلك الضرب والقسمة.
- حساب نسبة الشك في القياس.

### 4-1 التقدير التقريبي

- عمل تقديرات معقولة بناءً على بيانات معطاة.

مقدمة عن العلوم وعالم الفيزياء والكميات الفيزيائية والوحدات: ما انطباعك الأول عندما تسمع كلمة "الفيزياء"؟ هل تتخيل حل المعادلات الصعبة أو حفظ الصيغ التي ليس لها استخدام حقيقي في الحياة خارج الفصول الدراسية؟ كثير من الناس يبدأون علاقتهم بالفيزياء بقليل من الخوف. ولكن عندما تبدأ في استكشاف هذا الموضوع الواسع، قد تدرك قريباً أن الفيزياء تؤدي دوراً، في حياتك، أكبر بكثير مما كنت تعتقد، بغض النظر عن أهداف حياتك أو عملك.

على سبيل المثال، ألق نظرة على الصورة في الأعلى. هذه الصورة لمجرة أندروميديا، التي تحتوي على مليارات النجوم، والغيوم الضخمة من الغازات والغبار. هناك مجرتان أصغر يمكن رؤيتهما- أيضا، هما البقعتان الزرقاوين الزاهيتين في الخلفية. على بعد 2.5 مليون سنة ضوئية مذهلة من الأرض، هذه المجرة هي الأقرب إلى مجرتنا (التي تسمى درب التبانة). قد يبدو أن النجوم والكواكب التي تشكل أندروميديا هي أبعد شيء عن الحياة اليومية العادية لمعظم الناس. لكن أندروميديا هي نقطة انطلاق للتفكير في القوى التي تربط الكون مع بعضه البعض. إن القوى التي تجعل أندروميديا تتصرف كما تفعل الآن هي نفس القوى التي نتعامل معها هنا على الأرض، سواء كنا نخطط لإرسال صاروخ إلى الفضاء أو رفع الجدران لمنزل جديد. نفس الجاذبية التي تتسبب في دوران نجوم أندروميديا حول نفسها وفي مدارات تؤدي أيضا إلى تدفق المياه فوق السدود الكهرومائية هنا على الأرض. الليلة، خذ لحظة وانظر إلى النجوم. القوى هناك هي نفسها الموجودة هنا على الأرض. خلال دراسة الفيزياء، قد تكتسب فهما أكبر للترابط بين كل ما يمكننا رؤيته ومعرفته في الكون.

فكر الآن في جميع الأجهزة التكنولوجية التي تستخدمها استخداما منتظما، قد يتبادر إلى ذهنك أجهزة الحاسوب والهواتف الذكية وأنظمة نظام تحديد المواقع ومشغلات MP3 وراديو الأقمار الصناعية. بعد ذلك، فكر في التقنيات الحديثة، الأكثر إثارة، التي سمعت عنها في الأخبار، مثل القطارات التي ترتفع فوق المسارات، "عباءات الاختفاء" التي تحني الضوء حولها، والروبوتات المجهرية التي تحارب الخلايا السرطانية في أجسامنا. كل هذه التطورات الرائدة، سواء كانت عادية أو لا تصدق، تعتمد على مبادئ الفيزياء. بصرف النظر عن لعب دور مهم في التكنولوجيا، يطبق المحترفون مثل المهندسين والطيارين والأطباء والمعالجين والكهربائيين ومبرمجي الحاسوب مفاهيم الفيزياء في عملهم اليومي. على سبيل المثال، يجب على الطيار أن يفهم كيف تؤثر قوى الرياح على مسار الرحلة ويجب على المعالج الطبي أن يفهم كيف تتأثر العضلات في الجسم بالقوى خلال تحركها وثنيتها. كما ستتعلم في هذا النص، فإن مبادئ الفيزياء تخلق تقنيات جديدة ومثيرة، وتطبق هذه المبادئ في مجموعة واسعة من المجالات.

في هذا النص، سوف تبدأ في استكشاف تاريخ دراسة الفيزياء، بدءا من الفلسفة الطبيعية واليونانيين القدماء، وانتهاء بمراجعة السير إسحاق نيوتن وقوانين الفيزياء التي تحمل اسمه. كما ستتعلم عن المعايير التي يستخدمها العلماء عند دراسة الكميات الفيزيائية ونظام القياس الذي يستخدمه معظم المجتمع العلمي للتواصل بلغة رياضية واحدة. وأخيرا، سوف تدرس حدود قدرتنا على أن نكون مصيبين في القياس.

## 1-1 الفيزياء: مقدمة



**الشكل 1-2:** تخضع تشكيلات طيران الطيور المهاجرة مثل الإوز الكندي لقوانين الفيزياء (Credit: David Merrett).

الكون المادي معقد للغاية. في كل يوم، يلاحظ كل منا مجموعة كبيرة ومتنوعة من الأشياء والظواهر. على مر القرون، أدى الفضول الجماعي للجنس البشري إلى استكشاف وفهرسة ثروة هائلة من المعلومات؛ من رحلات الطيور إلى ألوان الزهور، من البرق إلى الجاذبية، من الكواركات إلى مجموعات المجرات، من تدفق الزمن إلى سر خلق الكون، طرحنا أسئلة وجمعنا مصفوفات ضخمة من الحقائق. في مواجهة كل هذه التفاصيل، اكتشفنا أن مجموعة صغيرة وموحدة من القوانين الفيزيائية يمكن أن تفسر ما نلاحظه. كبشر، ونحن نصنع التعميمات ونبحث عن النظام قد وجدنا أن الطبيعة تعاونية جداً؛ فهي لها نظامها وبساطتها التي نقدرها.

هذا هو النظام الأساسي للطبيعة الذي يجعل العلم عموماً، والفيزياء على وجه الخصوص، ممتعة جداً للدراسة. على سبيل المثال، ما المشترك بين كيس من الرقائق وبطارية السيارة؟ كلاهما يحتوي على طاقة يمكن تحويلها إلى صورة أخرى. يربط قانون حفظ الطاقة (الذي ينص على أن الطاقة يمكن أن تتغير صورتها، ولكنها لا تضيع مطلقاً) بين موضوعات مثل السرعات الحرارية الغذائية والبطاريات والحرارة والضوء وزنبرك الساعة. إن فهم هذا القانون يجعل من السهل التعرف إلى الصور المختلفة التي تتخذها الطاقة وكيفية ارتباطها ببعضها البعض. يبدو أن الموضوعات غير المرتبطة ببعضها البعض تتصل من طريق القوانين الفيزيائية المعمول بها على نطاق واسع، مما يسمح بفهم يتجاوز مجرد حفظ قوائم من الحقائق.

الجانب الموحد لقوانين الفيزياء وبساطة الطبيعة هما الموضوعان الأساسيان لهذا النص. لتعلم كيفية تطبيق هذه القوانين، سوف تدرس أهم الموضوعات في الفيزياء. والأهم من ذلك، أنك ستكتسب قدرات تحليلية ستتمكنك من تطبيق هذه القوانين خارج نطاق ما يمكن حصره في كتاب واحد. ستساعدك هذه المهارات التحليلية على التفوق الأكاديمي، وستساعدك أيضاً على التفكير النقدي في أي عمل تختاره. يناقش هذا الجزء عالم الفيزياء (لتحديد ما هي الفيزياء)، وبعض تطبيقات الفيزياء (لتوضيح أهميتها للتخصصات الأخرى)، وبأسلوب أدق ما يمثله القانون الفيزيائي (لإلقاء الضوء على أهمية التجريب للنظرية).

## العلم وعالم الفيزياء

يتكون العلم من النظريات والقوانين؛ الحقائق العامة للطبيعة. يحاول العلماء باستمرار توسيع هذا الجسد المعرفي وإتقان التعبير عن القوانين التي تصفه. الفيزياء تهتم بوصف تفاعلات الطاقة والمادة والفضاء والزمن، وهي مهمة خصوصا بالآليات الأساسية التي تكمن وراء كل ظاهرة. إن الاهتمام بوصف الظواهر الأساسية في الطبيعة يعرف -أساسا- مجال الفيزياء.

تهدف الفيزياء إلى وصف وظيفة كل شيء من حولنا، من حركة الجسيمات المشحونة الصغيرة إلى حركة الأشخاص والسيارات وسفن الفضاء. في الواقع، يمكن وصف كل شيء تقريبا من حولك بدقة تامة باستخدام قوانين الفيزياء. على سبيل المثال الهاتف الذكي (الشكل 1-3). تصف الفيزياء كيف تتفاعل الكهرباء مع الدوائر المختلفة داخل الجهاز. تساعد هذه المعرفة المهندسين على اختيار المواد المناسبة وتصميم الدوائر عند بناء الهواتف الذكية. بعد ذلك، فكر في نظام تحديد المواقع GPS، تصف الفيزياء العلاقة بين سرعة شيء ما والمسافة التي يقطعها والوقت الذي يستغرقه لقطع تلك المسافة. عند استخدام جهاز تحديد المواقع في سيارة، فإنه يستخدم هذه المعادلات الفيزيائية لتحديد مدة السفر من موقع إلى آخر.



**الشكل 1-3:** "iPhone" هاتف ذكي شائع به وظيفة تحديد المواقع. تصف الفيزياء الطريقة التي تتدفق بها الكهرباء عبر دوائر هذا الجهاز. يستخدم المهندسون معرفتهم بالفيزياء لبناء جهاز iPhone مع ميزات سيستمتع بها المستخدمون. يستخدم نظام تحديد المواقع معادلات الفيزياء لتحديد مدة القيادة بين موقعين على الخريطة. (credit: @gletham GIS, Social, Mobile Tech Images)

## تطبيقات الفيزياء:

لا تحتاج إلى أن تكون عالما لتستخدم الفيزياء. على العكس، فإن معرفة الفيزياء مفيدة في المواقف اليومية وكذلك في المهن غير العلمية. يمكن أن تساعدك الفيزياء على فهم كيفية عمل أفران الميكروويف، ولماذا لا ينبغي وضع المعادن بها، ولماذا قد تؤثر على أجهزة تنظيم ضربات القلب. (انظر الشكل 4-1 والشكل 5-1). الفيزياء تساعدك على فهم أخطار الإشعاع وتقييمها بسهولة أكبر. تشرح الفيزياء أيضا السبب الذي يجعل مبرد السيارة الأسود يساعد في إزالة الحرارة من محرك السيارة، وتشرح لماذا يساعد السقف الأبيض في الحفاظ على برودة المنزل من الداخل. وبالمثل، طريقة عمل نظام الإشعاع في السيارة وكذلك نقل الإشارات الكهربائية عبر الجهاز العصبي لجسمنا يكون فهمهما أسهل بكثير عندما تفكر فيها من منظور فيزيائي.

الفيزياء هي أساس العديد من التخصصات الهامة وتساهم مباشرة في التخصصات الأخرى. الكيمياء -على سبيل المثال- لأنها تتعامل مع تفاعلات الذرات والجزيئات لها جذور في الفيزياء الذرية والجزيئية. معظم فروع الهندسة فيزياء تطبيقية. في الهندسة المعمارية، الفيزياء هي قلب الاستقرار الهيكلي، وداخله في الصوتيات والتدفئة والإضاءة وتبريد المباني. تعتمد أجزاء من الجيولوجيا اعتمادا كبيرا على الفيزياء، مثل التأريخ الإشعاعي للصخور، وتحليل الزلازل، وانتقال الحرارة. بعض التخصصات، مثل الفيزياء الحيوية وفيزياء الأرض، هي مزيج من الفيزياء والتخصصات الأخرى.

الفيزياء لها العديد من التطبيقات في العلوم الحيوية. على المستوى المجهرى، فإنها تساعد على وصف خصائص جدران الخلايا وأغشيتها (الشكل 6-1 والشكل 7-1). على المستوى العياني، يمكن أن تفسر الحرارة والشغل والقدرة المرتبطة بجسم الإنسان. تشارك الفيزياء أيضا في التشخيص الطبي، مثل الأشعة السينية والتصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) وقياس تدفق الدم بالموجات فوق الصوتية. يشمل العلاج الطبي في بعض الأحيان الفيزياء مباشرة؛ على سبيل المثال، يستخدم الإشعاع المؤين لعلاج السرطان. يمكن للفيزياء أيضا تفسير الظواهر الحسية، مثل كيفية صنع الآلات الموسيقية للصوت، وكيف تكتشف العين اللون، وكيف يمكن لليزر نقل المعلومات.

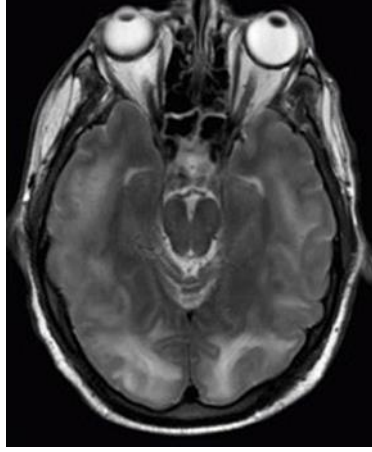
ليس من الضروري دراسة جميع تطبيقات الفيزياء. معرفة القوانين الأساسية للفيزياء ومهارة تطبيقها باستخدام الأساليب التحليلية أفيد. يمكن لدراسة الفيزياء أيضا تحسين مهاراتك في حل المشكلات.

إضافة إلى ذلك، احتفظت الفيزياء بالجوانب الأساسية للعلم، لذلك تستخدم من قبل جميع العلوم، ودراسة الفيزياء تجعل العلوم الأخرى أسهل للفهم.



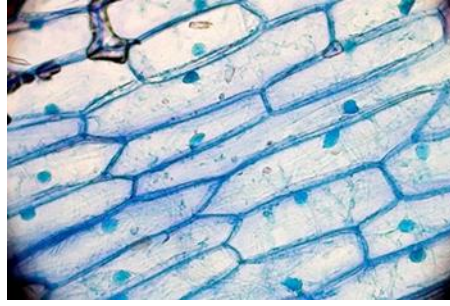
**الشكل 4-1** تساعدنا قوانين الفيزياء في فهم كيفية عمل الأجهزة الشائعة. على سبيل المثال، يمكن أن تساعد قوانين الفيزياء في شرح كيفية تسخين أفران الميكروويف للطعام، وتساعدنا على فهم سبب خطورة وضع الأشياء المعدنية في فرن الميكروويف (credit: MoneyBlogNewz)





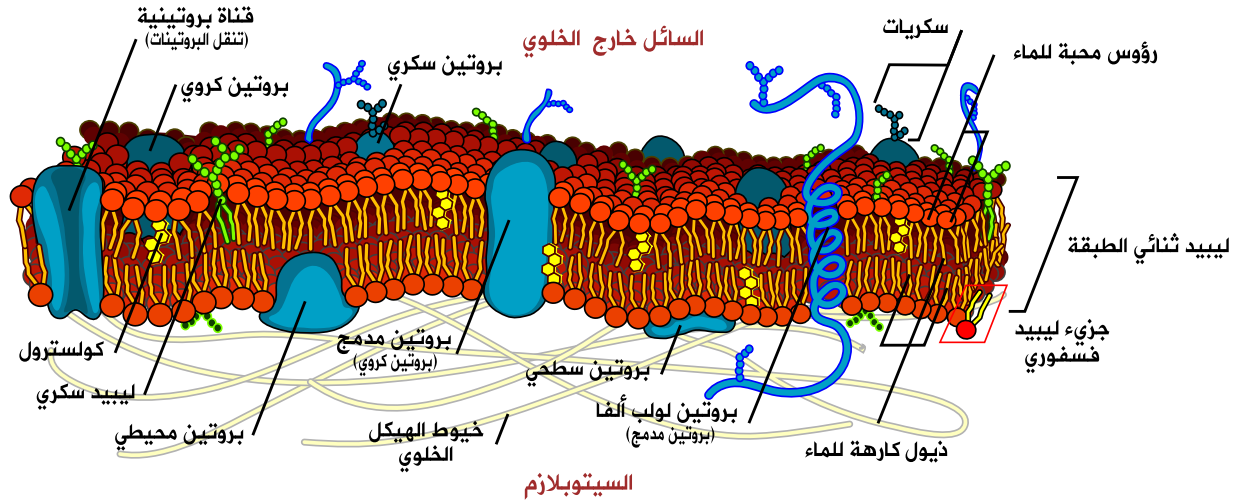
**الشكل 1-5** هناك قواسم مشتركة بين هذين التطبيقين. تستخدم أفران الميكروويف الموجات الكهرومغناطيسية لتسخين الطعام. يستخدم التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) أيضا الموجات الكهرومغناطيسية لإنتاج صورة للدماغ، التي يمكن بواسطتها تحديد الموقع الدقيق للأورام.

(Credit: Rashmi Chawla, Daniel Smith, and Paul E. Marik)



**الشكل 1-6** تساعد الفيزياء والكيمياء والأحياء في وصف خصائص جدران الخلايا النباتية، مثل خلايا البصل التي تظهر هنا.

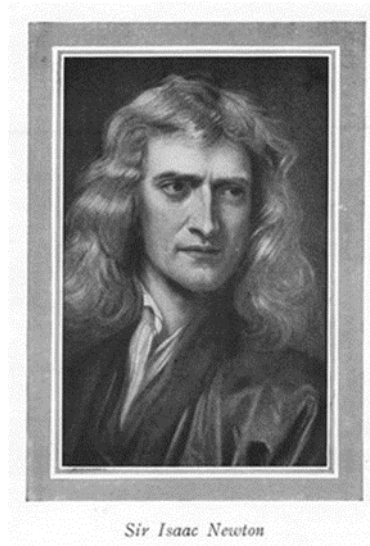
Umberto Salvagnin) (Credit:



**الشكل 1-7** رسمة لهيكل غشاء الخلية. تشكل الأغشية حدود الخلايا الحيوانية وهي معقدة في التركيب والوظيفة. وترتبط بالعديد من الخصائص الأساسية للحياة، مثل عملية إطلاق الخلايا العصبية. تساعدنا تخصصات الأحياء والكيمياء والفيزياء في فهم أغشية الخلايا الحيوانية (credit: Mariana Ruiz)

### النماذج والنظريات والقوانين: دور التجريب

قوانين الطبيعة أوصاف موجزة للكون من حولنا. إنها تعبيرات بشرية للقوانين أو القواعد الأساسية التي تتبعها جميع الإجراءات الطبيعية. هذه القوانين متأصلة في الكون؛ لم يخلقها البشر ولذلك لا يمكنهم تغييرها. يمكننا فقط اكتشافها وفهمها. اكتشافها هو مسعى إنساني للغاية، مع جميع عناصر الغموض والخيال والنضال والانتصار وخيبة الأمل المتأصلة في أي جهد إبداعي. (انظر الشكل 1-8 والشكل 1-9). حجر الزاوية في اكتشاف القوانين الطبيعية هو الملاحظة؛ يجب أن يصف العلم الكون كما هو، وليس كما نتخيله.



**الشكل 1-8** إسحاق نيوتن (1642-1727) كان مترددا جدًا في نشر أعماله الثورية وكان لا بد من إقناعه. في سنواته الأخيرة، استقال من منصبه الأكاديمي وأصبح وزيراً لدار سك العملة الملكية. لقد أخذ هذا العمل على محمل الجد حيث اخترع النقوش على حروف العملات المعدنية لمنع تزويرها.

(credit: Arthur Shuster and Arthur E. Shipley: Britain's Heritage of Science. London, 1917.)



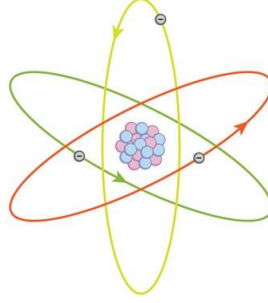
**الشكل 1-9 ماري كوري (1867-1934)** ضحت بأصولها المالية لتساعد في تمويل أبحاثها الثورية وألحقت أضرارا بسلامتها البدنية بسبب التعرض للإشعاع. هي الشخص الوحيد الذي فاز بجائزة نوبل في كل من الفيزياء والكيمياء. فازت إحدى بناتها أيضا بجائزة نوبل (credit: Wikimedia Commons)

نحن جميعا فضوليون إلى حد ما. ننظر حولنا ونصنع تعميمات ونحاول فهم ما نراه. على سبيل المثال، ننظر إلى الأعلى ونسأل عما إذا كان نوع من السحاب يشير إلى عاصفة قادمة. عندما أصبحنا جادين في استكشاف الطبيعة، أصبحنا أكثر تنظيما ورسومية في جمع البيانات وتحليلها. نحاول بدقة أكبر، ونجري تجارب مخططة (إذا استطعنا)، ونكتب أفكارا حول كيفية تنظيم البيانات وتوحيدها. وبعد ذلك، نصيغ النماذج والنظريات والقوانين بناء على البيانات التي جمعناها وحللناها لتعميم ونشر نتائج هذه التجارب.

**النموذج** هو تمثيل لشيء ما والذي يكون، غالبًا، من الصعب جدًا (أو مستحيل) عرضه مباشرة. في حين أن النموذج مبرر بإثبات تجريبي، إلا أنه دقيق فقط في حالات محدودة. مثال على ذلك، النموذج الكوكبي للذرة حيث تصور الإلكترونات وهي تدور حول النواة، على غرار الطريقة التي تدور بها الكواكب حول الشمس. (انظر **الشكل 1-10**). لا يمكننا مراقبة مدارات الإلكترون مباشرة، لكن الصورة الذهنية تساعد في تفسير ما نلاحظه أحيانًا، مثل انبعاث الضوء من الغازات الساخنة (الأطياف الذرية). يستخدم الفيزيائيون النماذج لأغراض متنوعة. على سبيل المثال، يمكن أن تساعد النماذج الفيزيائية في تحليل حالة معينة وإجراء عملية حسابية، أو يمكن استخدامها لتمثيل موقف ما في شكل محاكاة حاسوبية. **النظرية** هي تفسير للأنماط في الطبيعة مدعوم بأدلة علمية وتم التحقق منه عدة مرات من قبل مجموعات مختلفة من الباحثين. بعض النظريات تشمل نماذج للمساعدة في تصور الظواهر، في حين أن البعض الآخر لا. نظرية الجاذبية لنيوتن، على سبيل المثال، لا تتطلب نموذجًا أو صورة ذهنية، لأننا نستطيع أن نلاحظ الأشياء مباشرة بحواسنا. من ناحية أخرى، فإن النظرية الحركية للغازات نموذج يصور الغاز كأنه مكون من ذرات وجزيئات. الذرات والجزيئات صغيرة جدًا بحيث لا يمكن ملاحظتها مباشرة باستخدام حواسنا - وبالتالي، فإننا نتصورها ذهنيًا لفهم ما نخبرنا به أدواتنا عن سلوك الغازات.

**القانون** يستخدم لغة موجزة لوصف نمط معمم في الطبيعة مدعوم بأدلة علمية وتجارب متكررة. في كثير من الأحيان، يمكن التعبير عن القانون في شكل معادلة رياضية واحدة. تتشابه القوانين والنظريات؛ حيث إنهما تعبيران علميان ناتجان عن فرضية مجربة ومدعومان بالأدلة العلمية. ومع ذلك، فإن كلمة قانون محجوزة لتكون بيان موجز ومعمم لوصف الظواهر في الطبيعة، مثل قانون حفظ الطاقة خلال أي إجراء، أو قانون نيوتن الثاني للحركة، الذي يربط القوة والكتلة والتسارع بمعادلة بسيطة  $f = ma$ . على النقيض، فإن النظرية هي بيان أقل إيجازًا للظواهر المرصودة. على سبيل المثال، لا يمكن التعبير عن نظرية التطور ونظرية النسبية بأسلوب موجز بما يكفي كي يكون أي منهما قانونًا. أكبر فرق بين القانون والنظرية هو أن النظرية أكثر تعقيدًا وشمولًا. يصف القانون فعلًا واحدًا، في حين تشرح النظرية مجموعة كاملة من الظواهر المرتبطة ببعضها البعض. مع أنَّ القانون فرضية، إلا أنه أساس المنهج العلمي، حيث إن النظرية هي النتيجة النهائية لتلك العملية.

عادة ما يطلق على العبارات الأقل قابلية للتطبيق على نطاق واسع "المبادئ" (مثل مبدأ باسكال، الذي لا ينطبق إلا على السوائل)، ولكن غالبا لا يماز بين القوانين والمبادئ بعناية.



**الشكل 1-10** ما النموذج؟ هذا هو النموذج الكوكبي للذرة يظهر الإلكترونات تدور حول النواة. إنه رسم نستخدمه لتشكيل صورة ذهنية للذرة التي لا يمكننا رؤيتها بأعيننا مباشرة لأنها صغيرة جدًا.

### النماذج والنظريات والقوانين

تستخدم النماذج والنظريات والقوانين لمساعدة العلماء في تحليل البيانات التي جمعوها. ومع ذلك، في كثير من الأحيان بعد تطوير نموذج أو نظرية أو قانون، فإنه يوجه العلماء نحو اكتشافات جديدة لم نكن لنكتشفها لولا ذلك.

النماذج والنظريات والقوانين التي نبكرها أحيانا تدل على وجود ظواهر وأشياء لم تكتشف بعد. هذه التوقعات انتصار استثنائي وتؤكد قوة العلم. إنه النظام الكامن في الكون الذي يمكن العلماء من إجراء مثل هذه التنبؤات المذهلة. ومع ذلك، إذا لم تؤكد التجربة تنبؤاتنا، فإن النظرية أو القانون خاطئ، بغض النظر عن مدى أنقته أو ملاءمته. لا يمكن أبدا معرفة القوانين بيقين مطلق؛ لأنه من المستحيل إجراء كل تجربة يمكن تخيلها لتأكيد قانون ما في كل حالة ممكنة. يفترض الفيزيائيون أن جميع القوانين والنظريات العلمية صالحة حتى يوجد ما يثبت عكس ذلك. إذا تعارضت تجربة مع قانون راسخ، يجب تعديل القانون أو إسقاطه بالكامل.

تعد دراسة العلوم عموما والفيزياء خصوصا مغامرة تشبه إلى حد بعيد استكشاف المحيطات المجهولة. تصنع الاكتشافات، وتصاغ النماذج والنظريات والقوانين، وأصبح جمال الكون المادي أسمى بسبب المعرفة المكتسبة.

### المنهج العلمي

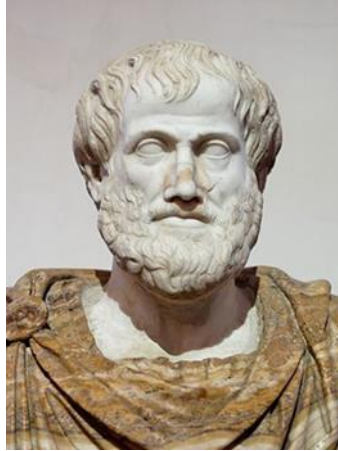
العلماء خلال جمعهم للمعلومات حول العالم، فإنهم يتبعون عملية تسمى المنهج العلمي. تبدأ هذه العملية عادة بملاحظة وسؤال سيبحثه العالم. بعد ذلك، يقوم العالم عادة بإجراء بعض البحوث حول الموضوع ثم يبتكر فرضية. بعد ذلك، يختبر العالم الفرضية عن طريق إجراء تجربة. أخيرا، يحلل العالم نتائج التجربة ويصل إلى استنتاج. لاحظ أنه يمكن تطبيق المنهج العلمي على العديد من المواقف التي لا تقتصر على العلم فقط، ويمكن تعديل هذا المنهج ليناسب الموقف.

تأمل في المثال القادم. لنفترض أنك تحاول تشغيل سيارتك، لكنها لا تعمل. لا شك أنك تتساءل: لماذا لا تبدأ السيارة؟ يمكنك اتباع منهج علمي للإجابة على هذا السؤال. أولا، يمكنك إجراء بعض البحث لتحديد مجموعة متنوعة من الأسباب لعدم بدء السيارة. بعد ذلك، ستصيغ فرضية. على سبيل المثال، قد تعتقد أن السيارة لا تعمل لأنها لا تحتوي

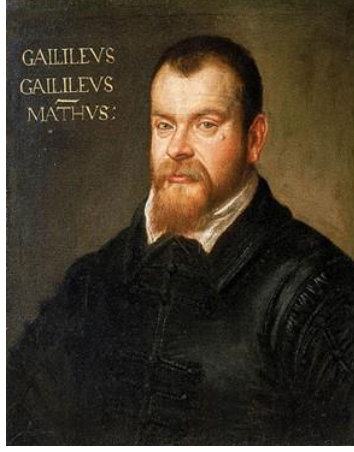
على زيت في محرك. لاختبار ذلك، تفتح غطاء السيارة وتفحص مستوى الزيت. أنت تلاحظ أن الزيت مستواه مقبول، وبالتالي تستنتج أن مستوى الزيت ليس السبب في مشكلة سيارتك. لاستكشاف المشكلة – بدرجة أكبر- وإصلاحها، يمكنك وضع فرضية جديدة لاختبارها ثم تكرر العملية مرة أخرى.

### تطور الفلسفة الطبيعية إلى الفيزياء الحديثة

لم تكن الفيزياء دائما تخصصا منفصلا ومتميزا عن باقي العلوم. ولا تزال الفيزياء مرتبطة بالعلوم الأخرى حتى يومنا هذا. تأتي كلمة فيزياء من اليونانية، وتعني "الطبيعة". كانت دراسة الطبيعة تسمى "الفلسفة الطبيعية". من العصور القديمة حتى عصر النهضة، شملت الفلسفة الطبيعية العديد من المجالات، بما في ذلك علم الفلك وعلم الأحياء والكيمياء، والفيزياء والرياضيات، والطب. على مدى القرون القليلة الماضية، أدى نمو المعرفة إلى زيادة التخصص وتفرعت مجالات منفصلة من الفلسفة الطبيعية، مع احتفاظ الفيزياء بكونها أساس لكل هذه العلوم. (انظر الشكل 1-11، الشكل 1-12، الشكل 1-13). الفيزياء التي تطورت من عصر النهضة إلى نهاية القرن ال 19 تسمى الفيزياء الكلاسيكية. حولت إلى الفيزياء الحديثة بسبب الاكتشافات الثورية التي تمت في بداية القرن العشرين.



**الشكل 1-11** على مر القرون، تطورت الفلسفة الطبيعية إلى فروع أكثر تخصصا، كما يتضح من مساهمات بعض أعظم العقول في التاريخ. الفيلسوف اليوناني أرسطو (322-384 قبل الميلاد) كتب عن مجموعة واسعة من المواضيع بما في ذلك الفيزياء والحيوانات والروح والسياسة والشعر (credit: Jastrow (2006) \Ludovisi Collection)



**الشكل 1-12** غاليليو غاليلي (1564-1642) وضع أساس التجريب الحديث وقدم مساهمات في الرياضيات والفيزياء وعلم الفلك. (Credit: Domenico Tintoretto)



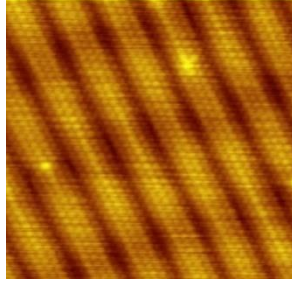
**الشكل 1-13** نيلز بور (1885-1962) قدم مساهمات أساسية في تطوير ميكانيكا الكم؛ جزء من الفيزياء الحديثة . (Credit: United States Library of Congress Prints and Photographs Division)

الفيزياء الكلاسيكية ليست وصفا دقيقا للكون، لكنها تقدير تقريبي ممتاز تحت الظروف التالية: يجب أن تتحرك المادة بسرعات أقل من حوالي 1٪ من سرعة الضوء، ويجب أن تكون الأشياء التي يتعامل معها كبيرة بما يكفي لرؤيتها باستخدام مجهر، ويمكن فقط إشراك مجالات الجاذبية الضعيفة، مثل المجال الذي تولده الأرض. نظرا لأن البشر يعيشون في مثل هذه الظروف، فإن الفيزياء الكلاسيكية تبدو منطقية وحسنة، بينما تبدو العديد من جوانب الفيزياء الحديثة غريبة. هذا السبب في أن النماذج مفيدة جدًا في الفيزياء الحديثة - فهي تتيح لنا تصور الظواهر التي لا نختبرها عادة. يمكننا فهم النماذج من منظورنا وتصور ما يحدث عندما تتحرك الأشياء بسرعات عالية أو تخيل ما قد تكون عليه الأشياء الصغيرة جدًا التي لا يمكننا ملاحظتها بحواسنا. على سبيل المثال، يمكننا فهم خصائص الذرة لأننا نستطيع تصورها بأذهاننا، على الرغم من أننا لم نر أبدا ذرة بأعيننا. تتيح لنا الأدوات الجديدة، بالطبع، تصور أفضل للظواهر التي لا يمكننا رؤيتها. في الواقع، سمحت لنا الأجهزة الجديدة في السنوات الأخيرة "بتصوير" الذرة فعليًا.

### حدود قوانين الفيزياء الكلاسيكية

لتطبيق قوانين الفيزياء الكلاسيكية، يجب استيفاء المعايير التالية: يجب أن تتحرك المادة بسرعات أقل من حوالي 1٪ من سرعة الضوء، ويجب أن تكون الأشياء التي يتعامل معها كبيرة بما يكفي لمشاهدتها بمجهر، وفقط يمكن أن تشارك مجالات الجاذبية الضعيفة (مثل المجال الذي تولده الأرض).





**الشكل 1-14** باستخدام مجهر المسح النفقي (STM)، يمكن للعلماء رؤية الذرات الفردية التي تتكون منها هذه الصفيفة من الذهب (credit: Erwinrossen)

لقد أحرز بعض من أروع التطورات العلمية في الفيزياء الحديثة. عدل أو رفض العديد من قوانين الفيزياء الكلاسيكية، ونتج عن ذلك تغييرات ثورية في التكنولوجيا والمجتمع ونظرتنا للكون. مثل الخيال العلمي، تمتلئ الفيزياء الحديثة بأشياء رائعة تتجاوز تجاربنا الحياتية، لكنها تتميز عن الخيال العلمي بكونها حقيقية للغاية. لماذا إذا معظم هذا النص مخصص لموضوعات الفيزياء الكلاسيكية؟ هناك سببان رئيسان: الفيزياء الكلاسيكية تعطي وصفا دقيقا للغاية للكون في ظل مجموعة واسعة من الظروف اليومية، ومعرفة الفيزياء الكلاسيكية ضروري لفهم الفيزياء الحديثة.

**الفيزياء الحديثة** تتكون من النظريتين الثورتين، النسبية وميكانيكا الكم. تتعامل هذه النظريات مع الأمور السريعة والصغيرة جدًا، على الترتيب. **النسبية** يجب أن تستخدم عندما يتحرك شيء ما بسرعة تزيد عن 1٪ من سرعة الضوء أو يتعرض لحقل جاذبية قوي مثل ذلك القريب من الشمس. **ميكانيكا الكم** يجب أن تستخدم للأشياء الأصغر مما يمكن رؤيته بالمجهر. الجمع بين هاتين النظريتين هي نظرية ميكانيكا الكم النسبية، ونصف سلوك الأجسام الصغيرة التي تسافر بسرعات عالية أو تعاني مجال جاذبية قوي. ميكانيكا الكم النسبية هي أفضل نظرية قابلة للتطبيق عالميا. نظرا لتعقيدها الرياضي، تستخدم فقط عند الضرورة، وتستخدم النظريات الأخرى عندما ينتج عنها نتائج دقيقة بما يكفي. ومع ذلك، سنجد أنه يمكننا دراسة قدر كبير من الفيزياء الحديثة باستخدام الجبر وعلم المثلثات المستخدم في هذا الكتاب.

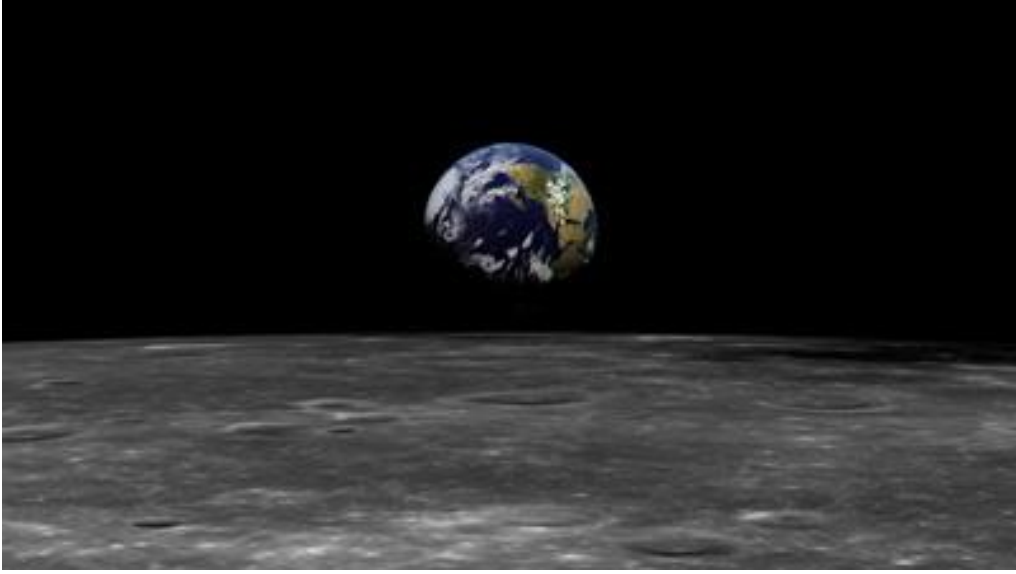
### ✓ تحقق فهمك

يخبرك صديق أنه تعلم عن قانون جديد للطبيعة. ماذا يمكنك أن تعرف عن هذه المعلومات حتى قبل أن يصف صديقك القانون؟ كيف كانت ستختلف هذه المعلومات إذا أخبرك صديقك أنه تعلم عن نظرية علمية بدلا من قانون؟

### الحل

دون معرفة تفاصيل القانون، لا يزال بإمكانك استنتاج أن المعلومات التي تعلمها صديقك تتوافق مع متطلبات جميع قوانين الطبيعة: ستكون وصفا موجزا للكون من حولنا؛ بيان بالقواعد الكامنة وراء جميع العمليات الطبيعية. إذا كانت المعلومات عن نظرية، فستكون قادرا على استنتاج أن المعلومات ستكون تعميما واسع النطاق وقابل للتطبيق الواسع.

## 2-1 الكميات الفيزيائية والوحدات



**الشكل 1-16** قد تبدو المسافة من الأرض إلى القمر هائلة، لكنها مجرد جزء صغير من المسافات بين الأرض والأجرام السماوية الأخرى (Credit: NASA).

إن نطاق الأشياء والظواهر المدروسة في الفيزياء هائل. من العمر القصير بدرجة لا تصدق للنواة إلى عمر الأرض، من الأحجام الصغيرة للجسيمات دون النووية إلى المسافة الشاسعة بين حواف الكون المعروف، من القوة التي تمارسها البراغيث القافزة إلى القوة بين الأرض والشمس، هناك ما يكفي من عوامل 10 لتحدي خيال حتى أكثر العلماء خبرة. إن إعطاء القيم العددية للكميات الفيزيائية والمعادلات للمبادئ الفيزيائية يسمح لنا بفهم الطبيعة فهما أعمق بكثير مما يفعله الوصف الكيفي وحده. لفهم هذه النطاقات الشاسعة، يجب أن يكون لدينا أيضا وحدات مقبولة للتعبير عنها. وسوف نجد أنه (حتى في المناقشة الحياتية للأمتار والكيلوجرامات والثواني) تظهر بساطة عميقة للطبيعة. يمكن التعبير عن جميع الكميات الفيزيائية باستخدام أربع كميات فيزيائية أساسية فقط: الطول والكتلة والوقت والتيار الكهربائي.

نعرف كمية الفيزيائية إما عن طريق تحديد كيفية قياسها أو عن طريق تحديد كيفية حسابها من القياسات الأخرى. على سبيل المثال، نحدد المسافة والوقت بتحديد طرق قياسهما، بينما نحدد متوسط السرعة بأنه المسافة المقطوعة مقسومة على وقت السفر.

يعبر عن قياسات الكميات الفيزيائية باستخدام **الوحدات**، وهي قيم قياسية. على سبيل المثال، يمكن التعبير عن طول سباق، وهو كمية فيزيائية، بوحدات الأمتار (للعدين) أو بالكيلومترات (لعدائي المسافات). دون الوحدات القياسية، سيكون من الصعب للغاية على العلماء التعبير عن القيم المقاسة ومقارنتها.

هناك نوعان من الأنظمة الرئيسية للوحدات المستخدمة في العالم: **وحدات النظام الدولي (SI)** (المعروف أيضا باسم النظام المتري)، **الوحدات الإنجليزية** (المعروف أيضا باسم النظام المعتاد أو الإمبراطوري). **الوحدات الإنجليزية** كانت تستخدم قديما في الدول التي كانت تحكمها الإمبراطورية البريطانية ولا تزال تستخدم على نطاق واسع في الولايات المتحدة. تقريبا، تستخدم كل الدول الأخرى في العالم الآن وحدات النظام الدولي كوحدات قياسية؛ النظام المتري هو أيضا النظام القياسي المتفق عليه من قبل العلماء والرياضيين. يشتق الاختصار "SI" من French *Système International*.



## وحدات النظام الدولي SI: الوحدات الأساسية والمشتقة

الجدول 1-1 يوضح وحدات النظام الدولي الأساسية المستخدمة في الكتاب. يستخدم الكتاب وحدات أخرى في عدد قليل من التطبيقات حيث تكون شائعة الاستخدام، مثل قياس ضغط الدم بالمليمتر الزئبقي (mm Hg) عندما تناقش الوحدات غير التابعة للنظام الدولي للوحدات، فستربط بوحدات النظام الدولي باستخدام التحويلات.

الطول	الكتلة	الزمن	التيار الكهربائي
المتر (m)	كيلوجرام (kg)	الثانية (s)	الأمبير (A)

الجدول 1-1 وحدات النظام الدولي الأساسية

إنها حقيقة غريبة أن بعض الكميات الفيزيائية أساسية أكثر من الآخرين، وأن الكميات الفيزيائية الأساسية يمكن تعريفها فقط من حيث الإجراء المستخدم لقياسها. لذا، فإنّ الوحدات التي تقاس تسمى **الوحدات الأساسية**. في هذا الكتاب، تعتبر الكميات الفيزيائية الأساسية هي الطول والكتلة والزمن والتيار الكهربائي. (لاحظ أنه لن يقدم التيار الكهربائي إلا متأخراً في هذا النص.) يمكن التعبير عن جميع الكميات الفيزيائية الأخرى، مثل القوة والشحنة الكهربائية، في هيئة توليفات من الطول والكتلة والزمن والتيار (على سبيل المثال، السرعة هي الطول مقسوماً على الزمن)؛ هذه الوحدات تسمى **الوحدات المشتقة**.

## وحدات الزمن والطول والكتلة: الثانية، المتر، والكيلوجرام

### الثانية

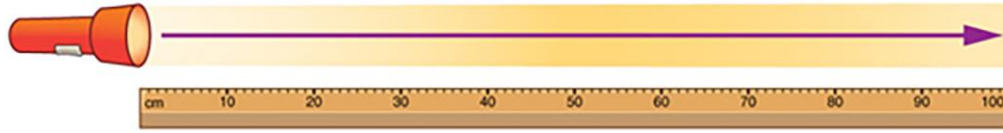
وحدة النظام الدولي للزمن، الثانية (s)، لها تاريخ طويل. لسنوات عديدة عرفت على أنها  $\frac{1}{86400}$  من اليوم الشمسي المتوسط. في الآونة الأخيرة، اعتمد معيار جديد للحصول على صحة أكبر ولتحديد الثانية من حيث ظاهرة فيزيائية ثابتة (لأن اليوم الشمسي يزداد طولاً بسبب التباطؤ التدريجي للغاية في دوران الأرض). يمكن جعل ذرات السيزيوم تهتز بطريقة منتظمة للغاية، ويمكن ملاحظة هذه الاهتزازات بسهولة وعدها. في عام 1967 أعيد تعريف الثانية على أنها الوقت اللازم لـ 9192631770 من هذه الاهتزازات. (انظر الشكل 1-18.) مدى الصحة في الوحدات الأساسية أمر ضروري، لأنه يعبر عن جميع القياسات في نهاية المطاف باستخدام الوحدات الأساسية، ولا يمكن أن تكون أصح من الوحدات الأساسية نفسها.



**الشكل 1-18** تستخدم ساعة ذرية مثل هذه اهتزازات ذرات السيزيوم للحفاظ على دقة الوقت لأقل من ميكرو ثانية في السنة. الوحدة الأساسية الزمن، الثانية، تعتمد على مثل هذه الساعات. تظهر هذه الصورة نافورة ذرية يبلغ ارتفاعها 30 قدماً تقريباً! (Credit: Steve Jurvetson\Flickr)

## المتر

وحدة النظام الدولي للطول هي المتر (m) ؛ لقد تغير تعريفه أيضا بمرور الوقت ليصبح أصح وأدق . عرف المتر أول مرة في عام 1791 على أنه  $\frac{1}{10000000}$  من المسافة من خط الاستواء إلى القطب الشمالي. حسن هذا القياس في عام 1889 من خلال إعادة تعريف المتر ليكون المسافة بين خطين منقوشين على قضيب من سبيكة البلاتين - الإيريديوم محفوظة الآن بالقرب من باريس. بحلول عام 1960، أصبح من الممكن تحديد المتر بدرجة أدق باستخدام الطول الموجي للضوء ، لذلك أعيد تعريفه مرة أخرى على أنه 1650763.73 من الأطوال الموجية للضوء البرتقالي المنبعث من ذرات الكريبتون . في عام 1983، أعطي المتر تعريفه الحالي ( لمزيد من الصحة ) حيث ينتقل الضوء في فراغ في  $\frac{1}{299792458}$  من الثانية . (انظر الشكل 1 - 19 . ) يحدد هذا التغير سرعة الضوء لتكون بالضبط 299792458 مترا في الثانية. سيتغير طول المتر إذا قيست سرعة الضوء يوما ما بصحة أكبر.



يسافر الضوء في الفراغ مسافة 1 متر خلال  $\frac{1}{299792458}$  ثانية

**الشكل 1-19** يعرف المتر على أنه المسافة التي يقطعها الضوء في  $\frac{1}{299792458}$  من الثانية في الفراغ. المسافة المقطوعة هي السرعة مضروبة في الزمن.

## الكيلوجرام

وحدة النظام الدولي للكتلة هي الكيلوجرام (kg) ؛ عرفت سابقا بأنها كتلة أسطوانة بلاتينيوم - إيريديوم محفوظة مع المتر العياري القديم في المكتب الدولي للأوزان والمقاييس بالقرب من باريس. يحتفظ أيضا بنسخ طبق الأصل للكيلوجرام المحدد مسبقا في المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا بالولايات المتحدة، أو NIST ، الموجود في جاثيرسبيرغ ، ميريلاند خارج واشنطن العاصمة ، وفي مواقع أخرى حول العالم . يمكن تحديد جميع الكتل الأخرى في نهاية المطاف بالمقارنة مع الكتلة القياسية. مع أن أسطوانة البلاتين - الإيريديوم مقاومة للتآكل، إلا أن الملوثات المحمولة جوا كانت قادرة على الالتصاق بسطحها بمرور الوقت ، وتغير كتلتها قليلا . في مايو 2019، تبني المجتمع العلمي تعريفا أكثر ثباتا للكيلوغرام . يعرف الكيلوجرام الآن من حيث الثانية، والمتر ، وثابت بلانك h ( قيمة تربط طاقة الفوتون بتردده ) .

سيقدم التيار الكهربائي والوحدة المصاحبة له، الأمبير، عند تغطية الكهرباء والمغناطيسية . تهتم الأجزاء الأولى في هذا الكتاب بالميكانيكا، والسوائل والحرارة والأمواج. في هذه المواضيع يمكن التعبير عن جميع الكميات الفيزيائية بالوحدات الأساسية للطول والكتلة والزمن.

## البادئات المترية

وحدات النظام الدولي هي جزء من **النظام المتري**. النظام المتري مناسب للحسابات العلمية والهندسية لأن الوحدات مصنفة حسب عوامل من 10. جدول (1-2) يوضح البادئات المترية ورموزها المستخدمة لتوضيح عوامل 10.

تتمتع الأنظمة المترية بميزة أن تحويلات الوحدات تتضمن أسس 10 فقط. هناك 100 سم في المتر، 1000 متر في الكيلومتر، وهلم جرا. في الأنظمة غير المترية، مثل نظام الوحدات المعتادة الأمريكية، العلاقات ليست بسيطة—هناك 12 بوصة في القدم، 5280 قدم في ميل، وهلم جرا. ميزة أخرى للنظام المتري هي أنه يمكن استخدام نفس الوحدة على نطاقات كبيرة للغاية من القيم ببساطة باستخدام بادئة مترية مناسبة. على سبيل المثال، المسافات بالأمتار مناسبة في البناء، بينما المسافات بالكيلومترات مناسبة للسفر الجوي، والنانومتر مناسب في التصميم البصري. مع النظام المتري ليست هناك حاجة لاختراع وحدات جديدة لتطبيقات معينة.

المصطلح رتبة المقدار يشير إلى حجم القيمة المعبر عنها في النظام المتري. كل أس 10 في النظام المتري يمثل رتبة مقدار مختلفة. على سبيل المثال  $10^3$ ،  $10^2$ ،  $10^1$ ، وبالمثل لكل رتب المقدار المختلفة. جميع الكميات التي يمكن التعبير عنها كحاصل ضرب لنفس الأس ويقال إنها من نفس الرتبة. على سبيل المثال، العدد 800 يمكن كتابته على النحو التالي  $8 \times 10^2$ ، والعدد 450 يمكن كتابته على النحو التالي  $4.5 \times 10^2$  وهكذا فإن العددين 450 و 800 هما من نفس الرتبة:  $10^2$  يمكن اعتبار رتبة المقدار بمنزلة تقدير لحجم القيمة. قطر الذرة هو على رتبة  $10^{-9}$  m في حين أن قطر الشمس على رتبة  $10^9$  m.

### البحث عن معايير مجهرية للوحدات الأساسية

الوحدات الأساسية المذكورة في هذا الفصل هي التي تنتج أكبر قدر من الصّحة في القياس. هناك شعور بين الفيزيائيين أنّه نظرا لوجود بنية أساسية مجهرية للمادة، سيكون أفضل أن نبنى معايير القياس على الأشياء المجهرية والظواهر الفيزيائية الأساسية مثل سرعة الضوء . أنجز معيار مجهرى للزمن يعتمد على تذبذبات ذرة السيزيوم.

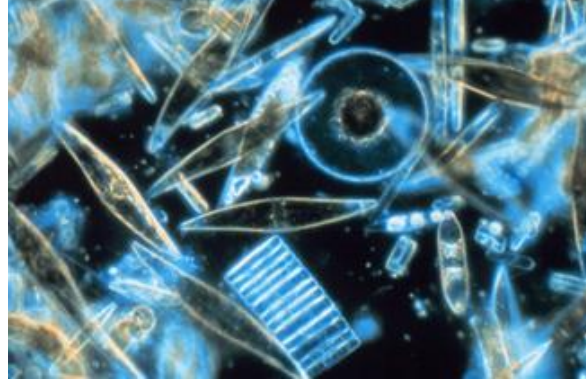
كان معيار الطول يعتمد في السابق على الطول الموجي للضوء المنبعث من نوع معين من الذّرات، ولكن استبدل بالقياس الأدقّ لسرعة الضوء . إذا أصبح من الممكن قياس كتلة الذّرات أو ترتيب معين للذّرات مثل كرة السيليكون بدقّة أكبر من معيار الكيلوجرام، فقد يصبح من الممكن بناء قياسات الكتلة على معيار مجهرى (صغير النّطاق) . هناك أيضا احتمال أن تسمح لنا الظواهر الكهربائية صغيرة النّطاق يوما ما بتأسيس وحدة للشحنة على أساس شحنة الإلكترونات والبروتونات، ولكن في الوقت الحالي يرتبط التّيار والشّحنة بالتّيارات والقوى - العيانية - بين الأسلاك.

السادقة	الرمز E	$10^n$	الرقم العشري	متبني منذ
يوتا	Y	$10^{24}$	1000000000000000000000000000	1991
زيتا	Z	$10^{21}$	100000000000000000000000000	1991
إكسا	E	$10^{18}$	10000000000000000000000000	1975
بيتا	P	$10^{15}$	1000000000000000000000000	1975
تيرا	T	$10^{12}$	100000000000000000000000	1960
جيجا	G	$10^9$	10000000000000000000000	1960
ميغا	M	$10^6$	1000000000000000000000	1960
كيلو	k	$10^3$	1000	1795
هكتو	h	$10^2$	100	1795
ديكا	da	$10^1$	10	1795
	$10^0$	واحد		
ديسي	d	$10^{-1}$	0.1	1795
سنتي	c	$10^{-2}$	0.01	1795
ميلي	m	$10^{-3}$	0.001	1795
ميكرو	$\mu$	$10^{-6}$	0.000001	1960
نانو	n	$10^{-9}$	0.000000001	1960
بيكو	p	$10^{-12}$	0.000000000001	1960
فيمتو	f	$10^{-15}$	0.000000000000001	1964
أتو	a	$10^{-18}$	0.000000000000000001	1964
زيتو	z	$10^{-21}$	0.000000000000000000001	1991
يوكتو	y	$10^{-24}$	0.000000000000000000000001	1991

جدول 2-1: البادئات المترية لأسس 10 ورموزها (المصدر: ويكيبيديا)

## أمداء معروفة من الطول والكتلة والزمن

ضخامة الكون واتساع نطاق تطبيق الفيزياء يظهر في مجموعة واسعة من الأمثلة المعروفة للأطوال والكتل والأزمنة. (انظر الشكل 20-1 والشكل 21-1).



الشكل 20-1 تسبح العوالق النباتية الصغيرة بين بلورات الجليد في بحر القطب الجنوبي (أنثراكتيكا). وهي تتراوح من بضعة ميكرومترات إلى ما يصل إلى 2 ملم في الطول  
(credit: Prof. Gordon T. Taylor, Stony Brook University; NOAA Corps Collections)



الشكل 21-1 تصطدم المجرات على بعد 2.4 مليار سنة ضوئية من الأرض. مجموعة هائلة من الظواهر التي يمكن ملاحظتها في الطبيعة تتحدى الخيال  
(credit: NASA\CXC\UVic.\A. Mahdavi et al. Optical\lensing: CFHT\UVic.\H. Hoekstra et al.)

## تحويل الوحدات والتحليل البعدي

غالبا ما يكون من الضروري التحويل من وحدة إلى وحدة أخرى. على سبيل المثال، إذا قرأت كتاب طبخ أوروبي، فقد يعبر عن بعض الكميات بوحدات اللترات وتحتاج إلى تحويلها إلى أكواب. أو ربما تقرأ اتجاهات المشي من موقع إلى آخر ومهتم بعدد الأميال التي ستقطعها. في هذه الحالة، ستحتاج إلى تحويل وحدات الأقدام إلى أميال.

دعونا ننظر في مثال بسيط لكيفية تحويل الوحدات. لنفترض أننا نريد تحويل 80 مترا (m) إلى كيلومترات (كم).

أول شيء يجب فعله هو سرد الوحدات التي لديك والوحدات التي تريد التحويل لها. في هذه الحالة، لدينا وحدات المترات ونريد تحويلها إلى كيلومترات.

بعد ذلك، علينا تحديد عامل التحويل من الأمتار إلى الكيلومترات. عامل التحويل هو نسبة تعبر عن عدد الوحدات من وحدة معينة إلى ما يساويها في وحدة أخرى. على سبيل المثال، هناك 12 بوصة في القدم، 100 سم في المتر، 60 ثانية في الدقيقة، وهلم جرا. في هذه الحالة، نحن نعلم أن هناك 1000 متر في الكيلومتر.

الآن يمكننا تحويل وحداتنا. سنكتب الوحدات التي لدينا، ثم نضربها في عامل التحويل بحيث تتلاشى الوحدة القديمة، كما هو موضح:

1.1

$$80 \text{ m} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 0.080 \text{ km}$$

لاحظ أن وحدة m غير المرغوب فيها تتلاشى، تاركةً فقط وحدة (كم) المطلوبة. يمكنك استخدام هذه الطريقة للتحويل بين أي نوعين من الوحدات.

### مثال 1-1

#### تحويلات الوحدات:

لنفترض أنك تقود 10.0 كم من جامعتك إلى المنزل في 20.0 دقيقة. احسب متوسط سرعتك (أ) بالكيلومترات في الساعة (كم\ساعة) و (ب) بالأمتار في الثانية (م\ث). (ملاحظة: متوسط السرعة هو المسافة المقطوعة مقسومة على وقت السفر).

#### الاستراتيجية

أولا نحسب متوسط السرعة باستخدام الوحدات المعطاة. ثم يمكننا الحصول على متوسط السرعة بالوحدات المطلوبة عن طريق اختيار عامل التحويل الصحيح والضرب فيه. عامل التحويل الصحيح هو الذي يلغي الوحدة غير المرغوب فيها ويترك الوحدة المطلوبة.

#### الحل ل (أ)

(1) حساب السرعة المتوسطة  $\bar{v}$ . السرعة المتوسطة هي المسافة المقطوعة  $d$  مقسومة على وقت السفر  $t$ ، (خذ هذا التعريف كمعطى -ستغطي السرعة المتوسطة ومفاهيم الحركة الأخرى في جزء لاحق). في هيئة معادلة،

1.2

$$\bar{v} = \frac{d}{t}$$

(2) عوض عن القيم المعطاة للمسافة والزمن.

1.3

$$\bar{v} = \frac{10.0 \text{ km}}{20.0 \text{ min}} = 0.500 \frac{\text{km}}{\text{min}}$$

(3) حول  $\frac{\text{km}}{\text{min}}$  إلى  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ : اضرب في عامل التحويل الذي سيلغى الدقائق ويترك مكانها الساعات. عامل التحويل هو  $60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}$ .

1.4

$$\bar{v} = 0.500 \frac{\text{km}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

### المناقشة: ل(أ)

للتحقق من إجابتك، ضع في فكر فيما يلي:

(1) تأكد من أنك ألغيت الوحدات بطريقة صحيحة في التحويل. إذا كتبت عامل تحويل الوحدة مقلوبا فلن يتم التحويل بطريقة صحيحة. على النحو التالي:

1.5

$$\frac{\text{km}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = \frac{1}{60} \frac{\text{km} \cdot \text{hr}}{\text{min}^2}$$

من الواضح أنها ليست الوحدة المطلوبة ( $\frac{\text{km}}{\text{hr}}$ ).

(2) تحقق من أن وحدات الإجابة النهائية هي الوحدات المطلوبة. طُلب منا في المشكلة أن نحل لإيجاد متوسط السرعة بوحدات  $\frac{\text{km}}{\text{hr}}$  وقد حصلنا فعلا على هذه الوحدات.

(3) تحقق من الأرقام المعنوية. لأن كل من القيم الواردة في المشكلة لديها ثلاثة أرقام معنوية، ينبغي أن يتكون الجواب أيضا من ثلاثة أرقام معنوية، الإجابة  $30.0 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$  لها فعلا ثلاثة أرقام معنوية، لذلك هذا مناسب. لاحظ أن الأرقام المعنوية في عامل التحويل ليس مؤثرة؛ لأن الساعة تتكون من 60 دقيقة، لذا فإنّ دقة عامل التحويل مثالية.

(4) بعد ذلك، تحقق مما إذا كانت الإجابة معقولة. دعونا نتحقق بعض المعلومات من المشكلة-إذا سافرت 10 كم في ثلث ساعة (20 دقيقة)، فسوف تسافر ثلاث أضعاف البعد في ساعة واحدة. الجواب يبدو معقولاً.

### الحل ل(ب)

هناك عدة طرق لتحويل متوسط السرعة إلى متر في الثانية.

(1) ابدأ بالإجابة على (أ) حول كم\ساعة إلى م\ث. هناك حاجة إلى عاملين للتحويل—أحدهما لتحويل الساعات إلى ثوان، والآخر لتحويل الكيلومترات إلى أمتار.

(2) ناتج عملية الضرب

1.6

$$\bar{v} = 30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}}$$

1.7

$$\bar{v} = 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### المناقشة ل(ب)

إذا بدأنا بـ 0.500 كم\دقيقة، كنا سنحتاج إلى عوامل تحويل مختلفة، لكن الإجابة ستكون نفسها: 8.33 م\ث.

ربما لاحظت أن الإجابات في المثال المحلول قد أعطيت لثلاثة أرقام. لم؟ متى تحتاج إلى القلق بشأن عدد الأرقام في شيء تحسبه؟ لماذا لا تكتب جميع الأرقام التي تنتجها الآلة الحاسبة الخاصة بك؟ سيساعدك جزء الصحة والدقة والأرقام المعنوية في الإجابة على هذه الأسئلة.

### وحدات غير قياسية

في حين أن هناك العديد من أنواع الوحدات التي نحن جميعًا على دراية بها، هناك أنواع أخرى أغمض. على سبيل المثال، **فيركين** هي وحدة الحجم التي كانت تستخدم في السابق لقياس المشروبات. واحد فيركين يساوي حوالي 34 لترًا. لمعرفة المزيد حول الوحدات غير القياسية، استخدم قاموساً أو موسوعة للبحث عن "الأوزان والمقاييس" المختلفة. دون أي وحدات غير معتادة، مثل بارليكورن، غير المدرجة في النص. فكر في كيفية تعريف هذه الوحدات وحدد علاقتها بوحدات النظام الدولي SI.

### تحقق فهمك

تضرب بعض الطيور الطنانة أجنتها أكثر من 50 مرة في الثانية. عالم يقيس الزمن الذي يستغرقه الطائر الطنان ليضرب بجناحيه مرة واحدة. ما هي الوحدة الأساسية التي يجب على العالم استخدامها لوصف القياس؟ ما عامل 10 الذي من المرجح أن يستخدمه العالم لوصف الحركة بدقة؟ حدد البادئة المترية التي تقابل هذا العامل.

### الحل

سيقيس العالم الوقت بين كل حركة باستخدام الوحدة الأساسية الثانية. نظراً لأن الأجنحة تضرب بسرعة كبيرة، فربما يحتاج العالم إلى القياس بالملي ثانية، أو  $10^{-3}$  ثواني. (50 ضربة في الثانية تقابل 20 ملي ثانية لكل ضربة).

### تحقق فهمك

سنتيمتر مكعب واحد يساوي مليلتر واحد. ماذا يخبرك هذا عن الوحدات المختلفة في النظام المتري؟

### الحل

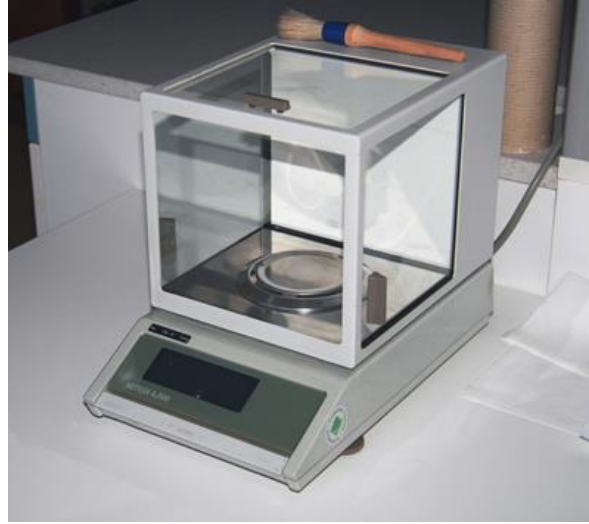
من المحتمل أنه استخدمت وحدة الطول الأساسية (متر) لإنشاء وحدة الحجم المشتقة (لتر). يعتمد قياس المليلتر على قياس السنتيمتر.



### 3-1 الصحة والدقة والأرقام المعنوية



**الشكل 1-22** يستخدم ميزان ميكانيكي مزدوج لمقارنة الكتل المختلفة. عادة ما يوضع شيء ذو كتلة غير معروفة في كفة ويوضع أشياء ذات كتل معلومة في الكفة الأخرى. عندما يكون القضيب الذي يحمل الكفتين أفقيًا، فإن الكتل في كليهما متساوية. عادة ما تكون "الكتل المعروفة" أسطوانات معدنية ذات كتلة قياسية مثل 1 جرام و10 جرام و100 جرام. (Credit:Serge Melki)



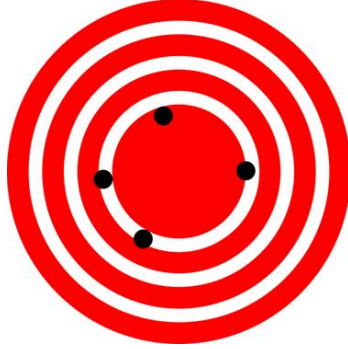
**الشكل 1-23** استُبدل العديد من الموازين الميكانيكية، مثل الموازين المزدوجة، بموازين رقمية، التي يمكن أن تقيس الكتلة قياسًا أدق. في حين أن الميزان الميكانيكي قد يقرأ الكتلة لأقرب عشر جرام فقط، يمكن للعديد من الموازين الرقمية قياس الكتلة لأقرب جزء من ألف جرام. (credit: Karel Jakubec)

#### صحة القياس ودقته

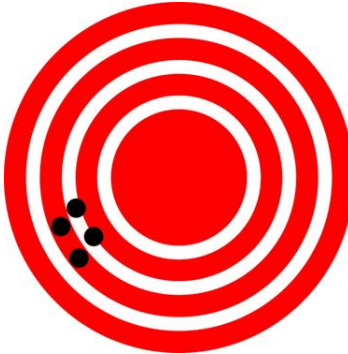
يعتمد العلم على الملاحظة والتجريب—أي على القياسات. **صحة** القياس هي مدى قرب القياس من القيمة الصحيحة لما يقاس. على سبيل المثال، دعنا نقول إنك تقيس طول ورق الحاسوب القياسي، تنص العبوة التي اشترت فيها الورق على أن الورقة لها طول 11.0 بوصة. يمكنك قياس طول الورقة ثلاث مرات والحصول على القياسات التالية: 11.1 بوصة، 11.2 بوصة، و10.9 بوصة. هذه القياسات صحيحة للغاية لأنها قريبة جدًا من القيمة الصحيحة لـ 11.0 بوصة. في المقابل، إذا حصلت على قياس 12 بوصة، فإن القياس الخاص بك ليس صحيحًا جدًا.

تشير دقة القياس إلى مدى الاتفاق بين القياسات المتكررة (التي تتكرر في ظل نفس الظروف). فكر في مثال قياس الورقة، دقة القياسات تشير إلى انتشار القيم المقاسة. تتمثل إحدى طرق تحليل دقة القياس في تحديد المدى أو الفرق بين أكبر وأصغر قيمتين في القيم المقاسة. في هذه الحالة، كانت أصغر قيمة 10.9 بوصة. وكانت أكبر قيمة 11.2 بوصة. لذا انحرفت القيم المقاسة عن بعضها البعض بمقدار 0.3 بوصة على الأكثر. كانت هذه القياسات دقيقة نسبيًا لأنها لم تختلف كثيرًا. ومع ذلك، إذا كانت القيم المقاسة 10.9 و 11.1 و 11.9، فلن تكون القياسات دقيقة للغاية لأنه سيكون هناك اختلاف كبير من قياس إلى آخر.

القياسات في مثال الورقة صحيحة ودقيقة على حد سواء، ولكن في بعض الحالات، تكون القياسات صحيحة، ولكنها ليست دقيقة، أو أنها دقيقة، ولكنها ليست صحيحة. دعونا نفكر في مثال على نظام تحديد المواقع الذي يحاول تحديد موقع مطعم في مدينة، فكر في موقع المطعم كأنه موجود في مركز لعبة السهام، وفكر في كل محاولة لنظام تحديد المواقع لتحديد موقع المطعم كنقطة سوداء. في الشكل 1-24، يمكنك أن ترى أن قياسات نظام تحديد المواقع منتشرة بعيدًا عن بعضها البعض، لكنها كلها قريبة نسبيًا من الموقع الفعلي للمطعم في مركز الهدف. هذا يدل على دقة منخفضة، وقياس ذو صحة عالية. ومع ذلك، في الشكل 1-25، تتركز قياسات نظام تحديد المواقع تحديدًا وثيقًا مع بعضها البعض، لكنها بعيدة عن الموقع المستهدف. هذا يدل على دقة عالية، وانخفاض في صحة القياس.



الشكل 1-24 يحاول نظام تحديد المواقع تحديد موقع مطعم في وسط اللعبة. تمثل النقاط السوداء كل محاولة لتحديد موقع المطعم. تنتشر النقاط بعيدًا عن بعضها البعض، مما يشير إلى دقة منخفضة، لكنها قريبة إلى حد ما من الموقع الفعلي للمطعم، مما يشير إلى صحة عالية. (credit: Dark Evil)



الشكل 1-25 في هذا الشكل، تتركز النقاط تركّزًا وثيقًا مع بعضها البعض، مما يشير إلى دقة عالية، ولكنها بعيدة جدًا عن الموقع الفعلي للمطعم، مما يشير إلى صحة منخفضة. (credit: Dark Evil)

## الصحة والدقة والشك

ترتبط درجة صحة نظام القياس ودقته بالشك في القياسات. الشك مقياس كمي لمدى انحراف القيم المقاسة عن القيمة القياسية أو القيمة المتوقعة. إذا لم تكن قياساتك صحيحة أو دقيقة للغاية، فسيكون الشك في القيم الخاصة بك مرتفعًا جدًا. بعبارة أعم، يمكن عد الشك بمنزلة إخلاء مسؤولية لقيمك المقاسة. على سبيل المثال، إذا سألك شخص عن الأميال المقطوعة لسيارتك، فقد تقول إنها 45000 ميل، زائد أو ناقص 500 ميل. الزائد أو الناقص هو الشك في القيمة. هذا يعني أنك تشير إلى أن المسافة الفعلية لسيارتك قد تكون منخفضة مثل 44500 ميل أو تصل إلى 45500 ميل أو قيمة بينهما. تحتوي جميع القياسات على قدر من الشك. في مثالنا الخاص بقياس طول الورقة، قد نقول إن طول الورقة 11 بوصة زائد أو ناقص 0.2 بوصة. غالبًا ما يشار إلى الشك في القياس  $A$  على أنه  $\delta A$  ("دلتا  $A$ "), لذلك تسجل نتيجة القياس كـ  $A \pm \delta A$ ، في مثال الورقة، يمكن التعبير عن طول الورقة على النحو التالي  $11 \text{ in} \pm 0.2$ .

تشمل العوامل المساهمة في الشك في القياس ما يلي:

1. حدود جهاز القياس،
2. مهارة الشخص الذي يقيس،
3. عدم الانتظام في الجسم الذي يقاس،
4. أي عوامل أخرى تؤثر على النتيجة (تعتمد اعتمادًا كبيرًا على الموقف نفسه).

في مثالنا، يمكن أن تكون هذه العوامل التي تساهم في الشك كما يلي: أصغر تقسيم على المسطرة هو 0.1 بوصة، أو أن الشخص الذي يستخدم المسطرة يعاني ضعف البصر، أو أن أحد جوانب الورقة أطول قليلاً من الآخر. وعلى أية حال، يجب أن يستند الشك في القياس إلى دراسة متأنية لجميع العوامل التي قد تشارك وآثارها المحتملة.

### عمل روابط: حمى أم لا؟

الشك هو جزء مهم من المعلومات، سواء في الفيزياء أو في العديد من تطبيقات العالم الحقيقي الأخرى. تخيل أنك تعتني بطفل مريض. وتشك أن الطفل يعاني الحمى، لذا يمكنك فحص درجة حرارته باستخدام مقياس حرارة. ماذا لو كان الشك في مقياس الحرارة  $3.0^\circ\text{C}$ ؟ إذا كانت قراءة درجة حرارة الطفل  $37^\circ\text{C}$  (وهي درجة حرارة الجسم الطبيعية)، يمكن أن تكون درجة الحرارة "الحقيقية" من  $34.0^\circ\text{C}$  منخفضة جدًا إلى  $40.0^\circ\text{C}$  مستوى عالٍ وخطير. مقياس حرارة مع شك  $3.0^\circ\text{C}$  عديم الفائدة.

### نسبة الشك

إحدى طرق التعبير عن الشك هي كنسبة من القيمة المقاسة. إذا عبر عن القياس  $A$  بالشك  $\delta A$ ، تحدد نسبة الشك %unc على أنها

$$\%unc = \frac{\delta A}{A} \times 100\%$$

1.8

## مثال 2-1

حساب نسبة الشك: حقيبة من التفاح

يبيع محل فواكه حقيبة من التفاح وزنها 5 Ib. تشتري أربع حقائب على مدار شهر وتزن التفاح في كل مرة وتحصل على القياسات التالية:

- الأسبوع 1: 4.8 Ib
- الأسبوع 2: 5.3 Ib
- الأسبوع 3: 4.9 Ib
- الأسبوع 4: 5.4 Ib

أنت تحدد أن وزن الحقيبة 5 Ib به شك  $\pm 0.4$  Ib. ما هي نسبة الشك في وزن الحقيبة؟

الاستراتيجية

أولاً، لاحظ أن القيمة المتوقعة لوزن الحقيبة، A، 5 Ib. الشك في هذه القيمة،  $\delta A$ ، هو 0.4 Ib. يمكننا استخدام المعادلة التالية لتحديد نسبة الشك في الوزن:

1.9

$$\%unc = \frac{\delta A}{A} \times 100\%$$

الحل

عوض عن القيم المعروفة في المعادلة:

1.10

$$\%unc = \frac{0.4 \text{ Ib}}{5 \text{ Ib}} \times 100\% = 8\%$$

المناقشة

يمكننا أن نستنتج أن وزن حقيبة التفاح  $5 \text{ Ib} \pm 8\%$ ، فكر في تغير الشك - كنسبة المئوية - إذا كان لحقيبة التفاح نصف الوزن، لظل الشك في الوزن كما هو. تلميح للحسابات المستقبلية: عند حساب النسبة المئوية للشك، تذكر دائماً أنه يجب عليك ضرب الكسر في 100٪. إذا لم تفعل، فستحصل على قيمة عشرية غير قيمة النسبة المئوية.

## الشك في الحسابات

هناك شك في أي شيء محسوب من الكميات المقاسة. على سبيل المثال، مساحة الأرضية المحسوبة من قياسي الطول والعرض بها شك لأن الطول والعرض بكل منهما شك. ما هو مقدار الشك في شيء تقوم بحسابه عن طريق الضرب أو القسمة؟ إذا احتوت القياسات الداخلة في الحساب على قدر ضئيل من الشك، فيمكن استخدام طريقة إضافة النسب في الضرب أو القسمة. تقول هذه الطريقة أن نسبة الشك في الكمية المحسوبة بالضرب أو القسمة هي مجموع نسب الشك في العناصر المستخدمة لإجراء الحساب. على سبيل المثال، إذا كان الطابق له طول 4.00 m وعرض 3.00 m مع شك 2% و 1% على التوالي، فإن مساحة الأرض 12.0 m<sup>2</sup> ولها شك 3%، (يمثل مساحة 0.36 m<sup>2</sup>، والتي قمنا بتقريبها إلى 0.4 m<sup>2</sup> نظراً لأن مساحة الأرضية معطاة لعشر المتر المربع).

## تحقق فهمك

اشترى مدرب في مدرسة ثانوية ساعة إيقاف جديدة. ينص دليل ساعة الإيقاف على أن ساعة الإيقاف بها شك  $\pm 0.05$  s. العدائين في فريق المدرب عادة يسجلون في سباقات الـ 100 متر أرقام تتراوح من 11.49 s إلى 15.01 s. في السباق الأخير بالمدرسة، كان رقم العداء صاحب المركز الأول 12.04 s وكان العداء صاحب المركز الثاني 12.07 s، هل ستكون ساعة الإيقاف الجديدة للمدرب مفيدة في توقيت فريق العدو؟ ولماذا؟

## الحل

لا، الشك في ساعة الإيقاف أكبر من أن يميز بفاعلية بين أرقام العدائين.

## دقة أدوات القياس والأرقام المعنوية

دقة أداة القياس عامل مهم في صحة ودقة القياسات. عمومًا، أداة القياس الدقيقة هي أداة يمكنها قياس القيم الصغيرة جدًا. على سبيل المثال، يمكن للمسطرة القياسية قياس الطول لأقرب مليمتر، بينما يمكن للفرجار قياس الطول لأقرب 0.01 مليمتر. الفرجار أدق لأنه يمكنه قياس أطوال صغيرة للغاية. كلما كانت أداة القياس قادرة على قياس كميات صغيرة، كانت أصح وأدق.

عندما نعبر عن القيم المقاسة، يمكننا فقط سرد عدد من الأرقام كما قسنا باستخدام أداة القياس الخاصة بنا. على سبيل المثال، إذا استخدمت مسطرة قياسية لقياس طول العصا، فيمكنك قياسها لتكون 36.7 cm لا يمكنك التعبير عن هذه القيمة كـ 36.71 cm لأن أداة القياس الخاصة بك ليست دقيقة بما يكفي لقياس جزء من مئة من السنتيمتر. وتجدر الإشارة إلى أن الرقم الأخير في القيمة المقاسة قد قدر بطريقة ما من قبل الشخص الذي يقوم بالقياس. على سبيل المثال، يلاحظ الشخص الذي يقيس طول العصا بمسطرة أن طول العصا يبدو في مكان ما بين 36.6 cm و 36.7 cm ويجب عليه تقدير قيمة الرقم الأخير. باستخدام طريقة الأرقام المعنوية، والقاعدة هو أن آخر رقم مكتوب في قيمة قياس هو الرقم الأول مع بعض الشك. لتحديد عدد الأرقام المعنوية في قيمة ما، ابدأ بأول القيمة المقاسة على اليسار وعد عدد الأرقام منه إلى آخر رقم مكتوب على اليمين. على سبيل المثال، تحتوي القيمة المقاسة 36.7 cm على ثلاثة أرقام معنوية. تشير الأرقام المعنوية إلى دقة أداة القياس التي استخدمت لقياس القيمة.

## الأصفار

يعطى اهتمام خاص للأصفار عند عد الأرقام المعنوية. الأصفار الموجودة في 0.053 ليست معنوية، لأنها موجودة فقط لحجز الأماكن؛ لتحديد مكان النقطة العشرية. هناك رقمان معنويان في 0.053. الأصفار في 10.053 ليست لحجز الأماكن، ولكنها معنوية. يحتوي هذا العدد على خمسة أرقام معنوية. الأصفار في 1300 قد تكون أو لا تكون معنوية اعتمادًا على أسلوب كتابة الأرقام. يمكن أن تعني أن الرقم معلوم للرقم الأخير، أو يمكن أن يكونوا لحجز الأماكن. لذلك 1300، يمكن أن يكون له اثنين أو ثلاثة أو أربعة أرقام معنوية. (لتجنب هذا الغموض، اكتب 1300 باستخدام الترميز العلمي.) الأصفار معنوية إلا إذا عملت فقط لحجز الأماكن.

## تحقق فهمك

حدد عدد الأرقام المعنوية في القياسات التالية:

أ- 0.0009

ب- 15450.0

ت-  $6 \times 10^3$

ث- 87.990

## الحل

- أ- 1؛ الأصفار في هذا العدد لحجز الأماكن.  
 ب- 6؛ هنا، تشير الأصفار إلى أنه تم إجراء القياس حتى 0.1، وبالتالي فإن الأصفار معنوية  
 ت- 1؛ القيمة  $10^3$  تميز الأماكن العشرية، وليس عدد أرقام القيمة المقاسة  
 ث- 5؛ يشير الصفر الأخير إلى أنه تم إجراء قياس لأقرب 0.001، لذلك فهو معنوي  
 ج- 4؛ أي أصفار موجودة بين الأرقام المعنوية في عدد هي أيضا معنوية

## الأرقام المعنوية في الحسابات

عند الجمع بين القياسات بدرجات مختلفة من الصحة والدقة، لا يمكن أن يكون عدد الأرقام المعنوية في الإجابة النهائية أكبر من عدد الأرقام المعنوية في أقل القيم المقاسة دقة. هناك قاعدتان مختلفتان، واحدة للضرب والقسمة والأخرى للجمع والطرح، كما هو موضح أدناه.

1. بالنسبة إلى الضرب والقسمة: يجب أن يكون للنتيجة نفس عدد الأرقام المعنوية مثل الكمية التي تحتوي على أقل عدد من الأرقام المعنوية وتدخل في الحساب. على سبيل المثال، يمكن حساب مساحة الدائرة من نصف قطرها باستخدام العلاقة  $A = \pi r^2$ ، دعونا نرى عدد الأرقام المعنوية في المساحة إذا احتوى نصف القطر على اثنين فقط - على سبيل المثال،  $r = 1.2 \text{ m}$ ، إذن،

1.11

$$A = \pi r^2 = (3.1415927 \dots) \times (1.2 \text{ m})^2 = 4.5238934 \text{ m}^2$$

هو ما ستحصل عليه باستخدام آلة حاسبة؛ ناتج مكون من ثمانية أرقام. ولكن نظرا لأن نصف القطر يحتوي على رقمين معنويين فقط، فإنه يحد الكمية المحسوبة إلى رقمين معنويين أو

1.12

$$A = 4.5 \text{ m}^2$$

حتى على الرغم من أن  $\pi$  صحيحة إلى ثمانية أرقام على الأقل.

2. بالنسبة للجمع والطرح: لا يمكن أن تحتوي الإجابة على أرقام معنوية أكثر من أقل قياس دقة. لنفترض أنك اشتريت 7.56 كجم من البطاطس من محل بقالة وقيست بميزان بدقة 0.01 كجم. ثم تترك 6.052 كجم من البطاطس في المختبر الخاص بك؛ بعد أن قيس بميزان بدقة 0.001 كجم. أخيرا، تذهب إلى المنزل وتضيف 13.7 كجم من البطاطس؛ قيس بميزان بدقة 0.1 كجم. كم كيلوجرامات من البطاطس لديك الآن، وكم عدد الأرقام المعنوية المناسبة في الإجابة؟ حسبت الكتلة باستخدام الجمع والطرح:

1.13

$$\begin{array}{r} 7.56 \text{ kg} \\ - 6.052 \text{ kg} \\ + 13.7 \text{ kg} \\ \hline 15.208 \text{ kg} \end{array} = 15.2 \text{ kg}$$

بعد ذلك، نحدد القياس الأقل دقة: 13.7 كجم. يعبر عن هذا القياس لأقرب رقم عشري 0.1، لذلك يجب أيضا التعبير عن إجابتنا النهائية لأقرب رقم عشري أيضًا، مما يعطينا 15.2 كجم.

## الأرقام المعنوية في هذا النص

في هذا النص، يفترض أن معظم الأعداد تحتوي على ثلاثة أرقام معنوية. علاوة على ذلك، تستخدم أعداد متسقة من الأرقام المعنوية في جميع الأمثلة المحلولة. ستلاحظ أن الإجابة المعطاة لثلاثة أرقام صحيحة تستند إلى مدخل صحيح لثلاثة أرقام على الأقل، على سبيل المثال. إذا احتوت المدخلات على عدد أقل من الأرقام المعنوية، فسيكون للإجابة أيضا عددا أقل من الأرقام المعنوية. كما يحرص على أن عدد الأرقام المعنوية معقول لكل حالة، في بعض الموضوعات، لا سيما في البصريات، هناك حاجة إلى أعداد أصح؛ لذلك نستخدم أكثر من ثلاثة أرقام معنوية، أخيرًا، إذا كان العدد ثابت، مثل رقم 2 في معادلة محيط الدائرة  $c = 2\pi r$ ، فإنه لا يؤثر على عدد الأرقام المعنوية في الحساب.

### تحقق فهمك

قم بإجراء الحسابات التالية وعبر عن إجابتك باستخدام العدد الصحيح من الأرقام المعنوية.

(أ) لدى المرأة حقيبتين تزن واحدة 13.5 رطلاً وأخرى بوزن 10.2 رطلاً. ما الوزن الكلي للحقائب؟

(ب) القوة  $F$  على جسم تساوي كتلته  $m$  مضروبة في تسارعه  $a$ ، إذا تسارعت عربة ذات كتلة 55 كجم بمعدل  $0.0255 \frac{m}{s^2}$ ، ما القوة على العربة؟ (تسمى وحدة القوة نيوتن، ويعبر عنها بالرمز  $N$ .)

### الحل

(أ) 37.2 رطلاً؛ لأن عدد الحقائب هو قيمة صحيحة، فإنه لا يؤثر في عدد الأرقام المعنوية.

(ب) 1.4 N؛ نظراً لأن القيمة 55 kg تحتوي على رقمين محددين فقط، يجب أن تحتوي القيمة النهائية أيضاً على رقمين معنويين.

## 4-1 التقدير التقريبي

في العديد من المناسبات، يحتاج الفيزيائيون والعلماء الآخرون والمهندسون إلى إجراء تقديرات تقريبية أو "تقديرات تخمينية" - هما مختلفان - لكمية معينة. ما هي المسافة إلى وجهة معينة؟ ما هي الكثافة التقريبية لعنصر معين؟ ما هو حجم التيار في الدائرة؟ تبنى العديد من الأعداد التقديرية، في الأساس، على الصيغ التي تعرف فيها الكميات المدخلة بصحة محدودة. في أثناء تطويرك مهارات حل المشكلات (التي يمكن تطبيقها على مجموعة متنوعة من المجالات) خلال دراستك الفيزياء، ستقوم أيضاً بتطوير مهارات التقريب. ستطور هذه المهارات من خلال التفكير كمياً، والاستعداد لتحمل المخاطر. كما هو الحال مع أي مسعى، تساعد الخبرة، وكذلك الإلمام بالوحدات، تسمح لنا هذه التقديرات التقريبية باستبعاد سيناريوهات معينة أو أرقام خيالية. تسمح لنا التقريبات أيضاً بتحدي الآخرين، وترشدنا في طريقنا إلى عالمنا العلمي. دعونا نقوم بعمل مثالين؛ لتوضيح هذا المفهوم.

### مثال 3-1

#### قدر الارتفاع التقريبي لمبنى

هل يمكنك تقدير ارتفاع أحد المباني في الحرم الجامعي الخاص بك أو في منطقتك؟ دعونا نجري تقديراً تقريبياً بناءً على ارتفاع الشخص. في هذا المثال، سنحسب ارتفاع مبنى مكون من 39 طابقاً.

#### الاستراتيجية

فكر في متوسط ارتفاع الذكور البالغين. يمكننا تقريب ارتفاع المبنى بواسطة المقارنة مع ارتفاع شخص ما.



## الحل

بناءً على المعلومات الواردة في المثال، نعلم أن هناك 39 طابقاً في المبنى. إذا استخدمنا حقيقة أن ارتفاع طابق واحد يساوي تقريباً طول شخصين بالغين (يبلغ طول كل إنسان حوالي مترين)، فيمكننا تقدير الارتفاع الإجمالي للمبنى ليكون

1.14

$$156 \text{ m} = 39 \text{ طابق} \times \frac{2 \text{ شخص}}{1 \text{ طابق}} \times \frac{2 \text{ m}}{1 \text{ شخص}}$$

## المناقشة

يمكنك استخدام الكميات المعروفة لتحديد تقدير تقريبي للكميات غير المعروفة. إذا طول كف يدك 10 سم، كم من أطوال كف يدك يساوي عرض مكتبك؟ ما القياسات الأخرى التي يمكنك تقديرها تقريبياً إلى جانب الطول؟

## مثال 4-1



تقدير تقريبي للأعداد هائلة: تريليون دولار



**الشكل 1.27** تحتوي رزمة البنك على 100 ورقة فئة 100 دولار، وتبلغ قيمتها 10000 دولار. كم عدد رزم البنك التي تشكل تريليون دولار؟ (Credit: Andrew Magill)

كان الدين الفيدرالي للولايات المتحدة في السنة المالية 2008 أقل بقليل من 10 تريليون دولار. معظمنا ليس لديه أي معرفة عن مقدار التريليون. افترض أنك حصلت على تريليون دولار من فئة 100 دولار. إذا صنعت رزم من فئة 100 دولار واستخدمتها لتغطية ملعب كرة قدم، فاعمل تقدير تقريبي لمدى ارتفاع كومة الأموال. (سنستخدم القدم \ البوصات بدلاً من الأمتار هنا لأن ملاعب كرة القدم تقاس باليارد). يقول أحد أصدقائك 3 بوصات، بينما يقول آخر 10 أقدام. ماذا تعتقد؟

## الاستراتيجية

عندما تتخيل الموقف، فمن المحتمل أن تتخيل الآلاف من الرزم الصغيرة المكونة من 100 ورقة من فئة 100 دولار، مثل ما قد تشاهده في الأفلام أو في أحد البنوك. نظراً لأن هذه كمية سهلة التقريب، فلنبدأ هناك. يمكننا إيجاد حجم رزمة من



100 ورقة، ومعرفة عدد الرزم التي تشكل تريليون دولار، ثم ساوى هذا الحجم لمساحة ملعب كرة القدم مضروبة في ارتفاع غير المعروف.

**الحل**

(1) حساب حجم رزمة  $v$  من 100 ورقة. تبلغ أبعاد الورقة الواحدة تقريبا 3 بوصات  $\times$  6 بوصات. سمك رزمة من 100 من هؤلاء حوالي 0.5 بوصة. لذا فإن الحجم الإجمالي للرزمة هو:

1.15

$$v = l \times w \times h$$

$$v = 6 \text{ in.} \times 3 \text{ in.} \times 0.5 \text{ in.}$$

$$v = 9 \text{ in.}^3$$

الطول (l) العرض (w) الارتفاع (h) بوصة (in.)

(2) احسب عدد الرزم. لاحظ أن تريليون دولار تساوى  $10^{12}$  دولار، ورزمة من 100 ورقة فئة 100 دولار. تساوى 10000 دولار أو  $10^4$  دولار. عدد الرزم سيكون

1.16

$$\frac{10^{12}}{10^4} = 10^8 \text{ رزمة}$$

(3) احسب مساحة ملعب كرة القدم بوحدة البوصة المربعة. مساحة ملعب كرة القدم  $100 \text{ yd} \times 50 \text{ yd}$ ، الذي يساوى  $5000 \text{ yd}^2$ ، لأننا نحسب بالبوصة، إننا نحتاج إلى تحويل الياردات المربعة إلى بوصات مربعة:

1.17

$$6480000 \text{ in.}^2 = 5000 \text{ yd}^2 \times \frac{3 \text{ ft}}{1 \text{ yd}} \times \frac{12 \text{ in.}}{1 \text{ ft}} \times \frac{12 \text{ in.}}{1 \text{ ft}} = \text{المساحة}$$

$$\text{المساحة} \approx 6 \times 10^6 \text{ in.}^2$$

هذا التحويل يعطينا  $6 \times 10^6 \text{ in.}^2$  لمساحة الملعب. (لاحظ أننا نستخدم رقم معنوي واحد في هذه الحسابات)

(4) حساب الحجم الكلي للورق. حجم جميع رزم الأوراق النقدية

$$9 \frac{\text{in.}^3}{\text{رزمة}} \times 10^8 \text{ رزمة} = 9 \times 10^8 \text{ in.}^3$$

(5) احسب الارتفاع. لتحديد ارتفاع الورق، استخدم المعادلة:

1.18

$$\text{حجم الورق} = \text{ارتفاع الأموال} \times \text{مساحة الملعب}$$

$$\frac{\text{حجم الورق}}{\text{مساحة الملعب}} = \text{ارتفاع الأموال}$$

$$1.33 \times 10^2 \text{ in.} = \frac{9 \times 10^8 \text{ in.}^3}{6 \times 10^6 \text{ in.}^2} = \text{ارتفاع الأموال}$$

$$100 \text{ in.} \approx 10^2 \text{ in.} = \text{ارتفاع الأموال}$$

ارتفاع الأموال سيكون حوالي 100 بوصة. تحويل هذه القيمة إلى أقدام يعطينا

1.19

$$100 \text{ in.} \times \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in.}} = 8.33 \text{ ft} \approx 8 \text{ ft.}$$

### المناقشة

القيمة التقريبية النهائية أعلى بكثير من تقدير 3 بوصات، لكن التقدير الآخر 10 أقدام (120 بوصة) كان صحيحا تقريبا. كيف كان تخمينك الأول مقارنة بالتقدير؟ ماذا تتعلم من هذا التمرين من حيث "التخمينات التقريبية" مقابل التقديرات التقريبية المحسوبة بعناية؟

### تحقق فهمك

باستخدام الرياضيات الذهنية وفهمك للوحدات الأساسية، قرب مساحة ملعب كرة السلة. صف العملية التي استخدمتها للوصول إلى التقدير النهائي.

### الحل

يبلغ متوسط طول الذكر حوالي مترين. سيستغرق الأمر حوالي 15 رجلا وضعوا طرفا إلى طرف لتغطية الطول، حوالي 7 لتغطية العرض. هذا يعطي تقدير لمساحة  $420 \text{ m}^2$ .

## الفصل 2

# الكينماتيكا



**الشكل 1-2** حركة العوسق الأمريكي يمكن وصفها بالإزاحة والسرعة والسرعة المتجهة والعجلة. حينما يطير في خط مستقيم، دون أي تغيير في الاتجاه، تسمى حركته بالحركة أحادية البعد. (Credit: Vince Maiden, Wikimedia Commons)

### مخطط الفصل

#### 1-2 الإزاحة

- تعريف الموضع والإزاحة والمسافة والمسافة المقطوعة.
- شرح العلاقة بين الموضع والإزاحة.
- التمييز بين الإزاحة والمسافة المقطوعة.
- حساب الإزاحة والمسافة عند معرفة الموضع الأولي والموضع النهائي والمسار بين الاثنين.

#### 2-2 المتجهات والكميات القياسية ونظم الإحداثيات

- التمييز بين الكميات القياسية والكميات المتجهة.
- تعيين نظام إحداثيات لموقف يتضمن حركة أحادية البعد.

#### 3-2 الزمن والسرعة المتجهة والسرعة

- شرح العلاقات بين السرعة المتجهة اللحظية ومتوسط السرعة المتجهة والسرعة اللحظية ومتوسط السرعة والإزاحة والزمن.
- حساب السرعة المتجهة والسرعة وفقًا للموضع الأولي والزمن الأولي والموضع النهائي والزمن النهائي.

- اشتقاق رسم بياني للسرعة المتجهة مقابل الزمن من رسم بياني للموضع مقابل الزمن.
- شرح الرسم البياني للسرعة المتجهة مقابل الزمن.

#### 4-2 التسارع

- التمييز بين التسارع اللحظي ومتوسط التسارع والتباطؤ.
- حساب العجلة عند معرفة الزمن الأولي والسرعة المتجهة الأولية والزمن النهائي والسرعة المتجهة النهائية.

#### 5-2 معادلات الحركة للتسارع الثابت في بعد واحد

- حساب إزاحة كائن لا يتسارع، عند معرفة الموضع الأولي والسرعة الأولية.
- حساب السرعة المتجهة النهائية للجسم المتسارع، عند معرفة السرعة المتجهة الأولية والتسارع والزمن.
- حساب الإزاحة والموضع النهائي لجسم متسارع، عند معرفة الموضع الأولي، والسرعة الأولية والزمن والتسارع.

#### 6-2 أساسيات حل مسائل الكينماتيكا أحادية البعد

- تطبيق خطوات وطرق حل المسائل لحل مسائل الكينماتيكا أحادية البعد.
- تطبيق طرق تحديد ما إذا كانت نتيجة مسألة ما معقولة أم لا، وإذا لم تكن كذلك، تحديد السبب.

#### 7-2 الأجسام الساقطة

- تأثيرات الجاذبية على الأجسام المتحركة.
- الحركة خلال السقوط الحر.
- حساب الموضع والسرعة المتجهة للأجسام خلال السقوط الحر.

#### 8-2 تحليل بياني للحركة أحادية البعد

- وصف الرسم البياني لخط مستقيم بدلالة ميله وتقاطعه مع محور  $y$ .
- تحديد متوسط السرعة المتجهة والسرعة اللحظية من الرسم البياني للموضع مقابل الزمن.
- تحديد متوسط التسارع والتسارع اللحظي من الرسم البياني للسرعة المتجهة مقابل الزمن.
- اشتقاق رسم بياني للسرعة مقابل الزمن من رسم بياني للموضع مقابل الزمن.
- اشتقاق رسم بياني للتسارع مقابل الزمن من رسم بياني للسرعة المتجهة مقابل الزمن.

**مقدمة عن الكينماتيكا أحادية البعد** تتحرك الكائنات في كل مكان؛ خلال اللعب والتحليق وحتى كوكب نبتون يتحرك. عندما تستريح، يحرك قلبك الدم عبر عروقك. وحتى في الجماد، هناك حركة مستمرة في اهتزازات الذرات والجزيئات. الأسئلة المتعلقة بالحركة مثيرة للاهتمام في حد ذاتها: كم من الوقت سيستغرق وصول مسبار فضائي إلى المريخ؟ أين ستهبط كرة إذا رميت بزاوية معينة؟ فهم الحركة، أيضًا، المفتاح لفهم المفاهيم الفيزيائية الأخرى. فهم التسارع، على سبيل المثال، مهم لدراسة القوة.

تبدأ دراستنا الرسمية للفيزياء بعلم الكينماتيكا (KINEMATICS) الذي يُعرّف بأنه دراسة الحركة دون النظر في أسبابها. في الكينماتيكا أحادية البعد والكينماتيكا ثنائية الأبعاد، سوف ندرس حركة كرة القدم، على سبيل المثال، دون الاهتمام بشأن القوى التي تسبب حركتها أو تغييرها. هذه الاعتبارات تأتي في فصول أخرى. في هذا الفصل ندرس أبسط نوع من الحركة وهي الحركة على طول خط مستقيم، أو الحركة أحادية البعد. في الكينماتيكا ثنائية الأبعاد، نطبق المفاهيم المطورة هنا لدراسة الحركة على طول المسارات المنحنية؛ على سبيل المثال، سيارة تسير على طريق منحنى.

## 1-2 الإزاحة



**الشكل 2-2** يمكن وصف راكبي الدراجات في فيتنام بموضعهم بالنسبة للمباني والقناة. يمكن وصف حركتهم بالتغير في الموضع، أو الإزاحة، في هذا الإطار المرجعي. (credit: Suzan Black، Fotopedia)

### الموضع

من أجل وصف حركة كائن، يجب أن تكون قادرًا أولاً على وصف موضعه-أين يكون في أي لحظة من الزمن. بتعبير أدق، تحتاج إلى تحديد موضعه بالنسبة إلى إطار مرجعي مناسب. غالبًا ما تُستخدم الأرض كإطار مرجعي، وكثيرًا ما نصف موضع كائن من حيث صلته بالكائنات الثابتة في الإطار. على سبيل المثال، يمكن وصف إطلاق صاروخ بموضع الصاروخ بالنسبة إلى الأرض، في حين يمكن وصف موضع المعلمة بموضع وجودها بالنسبة للسبورة البيضاء القريبة. (انظر الشكل 2-3). في حالات أخرى، نستخدم إطارات مرجعية متحركة بالنسبة إلى الأرض. لوصف موضع شخص في طائرة، على سبيل المثال، نستخدم الطائرة، ليس الأرض، كإطار مرجعي. (انظر الشكل 2-4).

### الإزاحة

إذا تحرك كائن بالنسبة إلى إطار مرجعي (على سبيل المثال، إذا تحركت المعلمة إلى اليمين بالنسبة إلى السبورة البيضاء أو تحرك الراكب نحو الجزء الخلفي من الطائرة)، فإن الموضع يتغير. ويُعرف هذا التغير في الموضع باسم الإزاحة تشير كلمة "الإزاحة" إلى أن كائن قد تحرك أو تمت إزاحته.

### الإزاحة

الإزاحة هي التغير في الموضع:

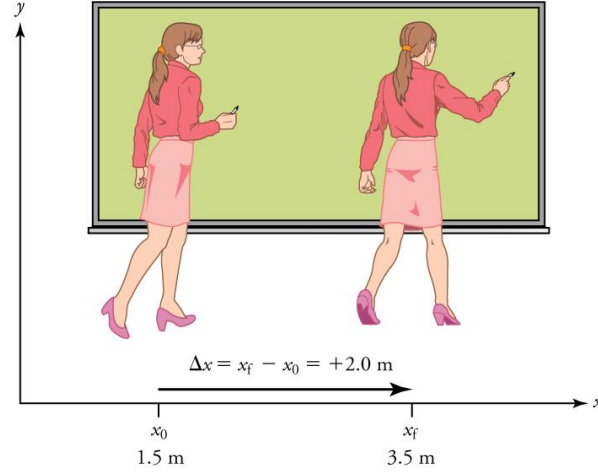
2.1

$$\Delta x = x_f - x_o$$

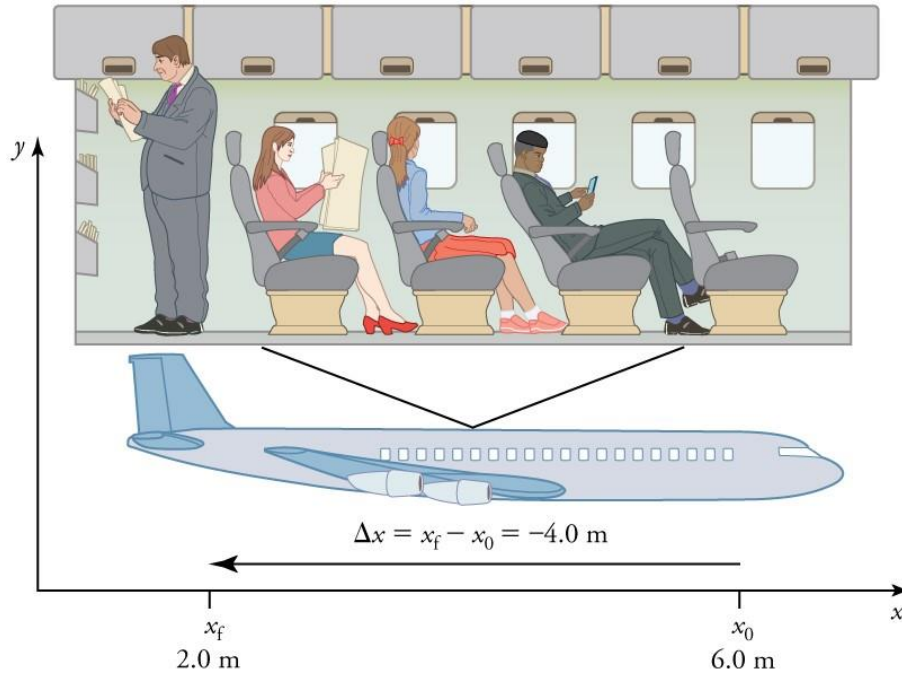
حيث  $\Delta x$  الإزاحة،  $x_f$  الموضع النهائي و  $x_o$  الموضع الابتدائي.

في هذا النص، يعني الحرف اليوناني العلوي  $\Delta$  (دلتا) دائما "التغير في" أي كمية تتبعه؛ وبالتالي  $\Delta x$  يعني التغير في الموضع. احسب دائمًا الإزاحة عن طريق طرح الموضع الأولي  $x_o$  من الموضع النهائي  $x_f$ .

لاحظ أن وحدة SI للإزاحة هي المتر (م) (انظر الكميات الفيزيائية والوحدات)، ولكن في بعض الأحيان تستخدم الكيلومترات والأميال والأقدام ووحدات الطول الأخرى. ضع في اعتبارك أنه عند استخدام وحدات أخرى غير المتر في مسألة ما، قد تحتاج إلى تحويلها إلى أمتار لإكمال الحساب.



**الشكل 3-2** تتحرك المعلمة إلى اليسار وإلى اليمين خلال إعطاء الدرس. موضعها بالنسبة للأرض يرمز له بـ  $x$ . إزاحة المعلمة (+2.0 م) بالنسبة للأرض تمثل بسهم يشير إلى اليمين.



**الشكل 4-2** يتحرك راكب من مقعده إلى الجزء الخلفي من الطائرة. إزاحة الراكب (-4.0 م) بالنسبة للطائرة تمثل بسهم باتجاه الجزء الخلفي من الطائرة. لاحظ أن السهم الذي يمثل إزاحة الراكب يبلغ ضعف طول السهم الذي يمثل إزاحة المعلمة (يتحرك بمقدار الضعف) في **الشكل 3-2**.

لاحظ أن الإزاحة لها اتجاه ومقدار. إزاحة المعلمة 2.0 متر إلى اليمين، وإزاحة راكب الطائرة 4.0 متر نحو الخلف. في الحركة أحادية البعد، يمكن تحديد الاتجاه بعلامة زائد أو ناقص. عندما تبدأ مسألة، يجب عليك تحديد الاتجاه الموجب (عادةً ما يكون ذلك إلى اليمين أو لأعلى، لكن لك مطلق الحرية في اعتبار الاتجاه الموجب أي اتجاه).  
الموضع الأولي للمعلمة هو  $x_0 = 1.5 \text{ m}$  والموضع النهائي هو  $x_f = 3.5 \text{ m}$ ، وبالتالي الإزاحة هي

2.2

$$\Delta x = x_f - x_0 = 3.5 \text{ m} - 1.5 \text{ m} = +2.0 \text{ m}.$$

في نظام الإحداثيات هذا، الحركة إلى اليمين موجبة، بينما الحركة إلى اليسار سالبة. وبالمثل، فإن الموضع الأولي لراكب الطائرة هو  $x_0 = 6.0 \text{ m}$  والموضع النهائي هو  $x_f = 2.0 \text{ m}$ ، لذلك الإزاحة

2.3

$$\Delta x = x_f - x_0 = 2.0 \text{ m} - 6.0 \text{ m} = -4.0 \text{ m}$$

إزاحته سالبة لأن حركته باتجاه مؤخرة الطائرة، أو في اتجاه  $x$  السالبة في نظام الإحداثيات.

### المسافة

مع أن الإزاحة توصف بواسطة الاتجاه، فإن **المسافة** لا. المسافة هي مقدار أو حجم الإزاحة بين موضعين. لاحظ أن المسافة بين موضعين ليست المسافة المقطوعة بينهما. **المسافة المقطوعة** هي الطول الإجمالي للمسار المقطوع بين موضعين. المسافة ليس لها اتجاه، وبالتالي، ليس لها إشارة. على سبيل المثال، المسافة التي تمشيها المعلمة 2.0 متر. المسافة التي يمشيها راكب الطائرة هي 4.0 متر.

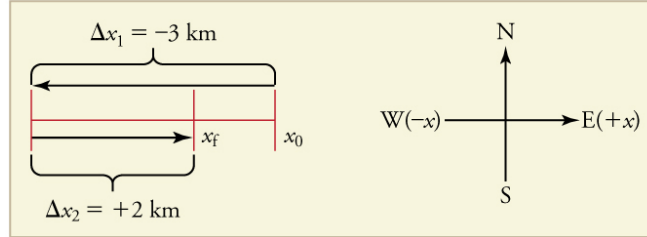
### تنبيه سوء الفهم: المسافة المقطوعة مقابل مقدار الإزاحة

من المهم ملاحظة أن المسافة المقطوعة، يمكن أن تكون أكبر من مقدار الإزاحة (بالمقدار، نعي فقط مقدار الإزاحة بغض النظر عن اتجاهها؛ أي مجرد عدد له وحدة). على سبيل المثال، يمكن للمعلمة أن تمشي ذهابًا وإيابًا عدة مرات، وربما تمشي مسافة 150 مترًا خلال المحاضرة، ومع ذلك ينتهي بها الأمر على مسافة 2.0 متر فقط على يمين نقطة البداية. في هذه الحالة ستكون إزاحتها +2.0 متر، ومقدار إزاحتها سيكون 2.0 متر، ولكن المسافة التي قطعتها ستكون 150 متر. في الكينماتيكا، نتعامل دائمًا تقريبًا مع الإزاحة ومقدار الإزاحة، وتقريبًا لا نتعامل أبدًا مع المسافة المقطوعة. إحدى طرق التفكير في هذا افتراض أنك وضعت علامة عند نقطتي بداية الحركة ونهايتها. الإزاحة ببساطة الفرق بين موضع العلامتين وهي مستقلة عن المسار المتبع في السفر بين العلامتين. ومع ذلك، فإن المسافة المقطوعة هي الطول الإجمالي للمسار المتبع بين العلامتين.

تحقق فهمك

راكبة دراجة تقود 3 كيلومتر غربًا ثم تستدير وتقود 2 كيلومتر شرقًا. (أ) ما إزاحتها؟ (ب) ما المسافة التي تقطعها؟  
(ج) ما مقدار إزاحتها؟

الحل



### الشكل 5-2

(أ) إزاحة الراكبة  $\Delta x = x_f - x_0 = -1 \text{ km}$  (الإزاحة سالبة لأننا نعتبر الشرق الاتجاه الموجب والغرب الاتجاه السالب)

(ب) المسافة المقطوعة  $3 \text{ km} + 2 \text{ km} = 5 \text{ km}$

(ج) مقدار الإزاحة  $1 \text{ km}$



## 2-2 المتجهات والقيم القياسية ونظم الإحداثيات



**الشكل 2-6** يمكن وصف حركة هذه الطائرة بالمسافة التي قطعتها (كمية قياسية) أو إزاحتها في اتجاه معين (كمية متجهة). من أجل تحديد اتجاه الحركة، يجب وصف إزاحتها بناءً على نظام إحداثيات. في هذه الحالة، قد يكون من الملائم اختيار الحركة نحو اليسار كحركة موجبة (هذا هو الاتجاه الأمامي للطائرة)، مع أنه في كثير من الحالات، تكون إحداثيات  $x$  من اليسار إلى اليمين، بمعنى أن الحركة إلى اليمين موجبة والحركة إلى اليسار سالبة. (Credit: Armchair Aviator, Flickr)

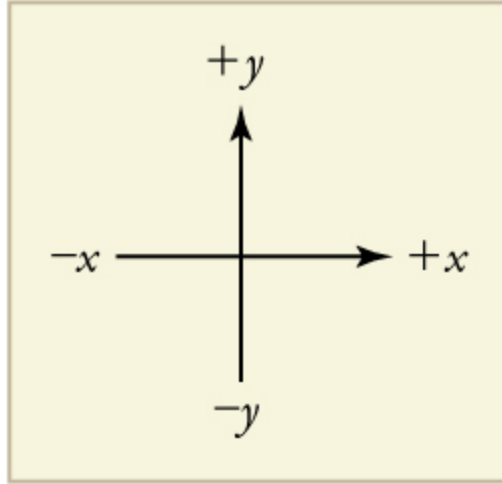
ما الفرق بين المسافة والإزاحة؟ في حين تُحدد الإزاحة بكل من الاتجاه والمقدار، تحدد المسافة، فقط، بالمقدار. الإزاحة مثال على الكمية المتجهة. المسافة مثال على الكمية العددية (القياسية). **المتجه** هو أي كمية ذات مقدار واتجاه. الأمثلة الأخرى للمتجهات مثل سرعة 90 كم \ ساعة شرقًا وقوة 500 نيوتن لأسفل.

يحدد اتجاه المتجه في الحركة أحادية البعد ببساطة بواسطة علامة زائد (+) أو ناقص (-). تُمثل المتجهات بيانيًا بواسطة أسهم. السهم المستخدم لتمثيل المتجه له طول يتناسب مع مقدار المتجه (على سبيل المثال، كلما زاد المقدار، زاد طول المتجه) ويشير في نفس اتجاه المتجه.

بعض الكميات الفيزيائية، مثل المسافة، ليس لها اتجاه. **الكمية العددية** هي أي كمية لها مقدار، ولكن لا يوجد لها اتجاه. على سبيل المثال، درجة الحرارة  $20^{\circ}\text{C}$ ، سرعة حرارية من الطاقة في قطعة حلوى، حد السرعة 90 كم \ ساعة، طول الشخص 1.8 متر، ومسافة 2.0 متر كلها كميات قياسية - كميات ليس لها اتجاه محدد. نلاحظ أن الكميات القياسية يمكن أن تكون سالبة، مثل درجة الحرارة  $20^{\circ}\text{C}$  - في هذه الحالة، تشير علامة الطرح إلى نقطة على مقياس وليس الاتجاه. لا تُمثل القيم العددية أبدًا بالسهم.

### نظم الإحداثيات للحركة أحادية البعد

من أجل وصف اتجاه كمية متجهة، يجب عليك تعيين نظام إحداثي داخل الإطار المرجعي. بالنسبة للحركة أحادية البعد، فإن نظام إحداثياتها بسيط يتكون من خط إحداثيات أحادي البعد. عمومًا، عند وصف الحركة الأفقية، عادةً ما تُعتبر الحركة إلى اليمين موجبة، وتعد الحركة إلى اليسار سالبة. بالنسبة للحركة الرأسية، تكون الحركة لأعلى عادةً موجبة والحركة لأسفل سالبة. ومع ذلك، في بعض الحالات، كما هو الحال مع الطائرة في **الشكل 2.6**، قد يكون من الأنسب تبديل الاتجاهات الموجبة والسالبة. على سبيل المثال، إذا كنت تحلل حركة الأجسام الساقطة، فقد يكون من أفضل عد الاتجاه لأسفل الاتجاه الموجب. إذا كان الأشخاص في السباق يركضون إلى اليسار، فمن الأفضل عد اليسار الاتجاه الموجب. لا يهم أي اتجاه تختار، مادام النظام واضح ومتسق. بمجرد تعيين اتجاه موجب والبدء في حل مسألة ما، لا يمكنك تغييره.



**الشكل 2-7** من المناسب عادة عد الحركة لأعلى أو لليمين موجبة (+) والحركة لأسفل أو لليسار سالبة (-).

✓ **تحقق فهمك**

يمكن أن تظل سرعة الشخص كما هي عندما يأخذ منعطف ويغير اتجاهه. بالنظر إلى هذه المعلومات، هل السرعة عددية أم كمية متجهة؟ اشرح.

الحل

السرعة كمية عددية. لا تتغير على الإطلاق مع تغير الاتجاه؛ لذلك، لها مقدار فقط. إذا كانت كمية متجهة، فإنها ستتغير مع تغير الاتجاه (حتى لو ظل مقدارها ثابتاً).

## 3-2 الزمن والسرعة المتجهة والسرعة



الشكل 8-2 يمكن وصف حركة الحلزونات المتسابقة هذه بسرعاتها وسرعاتها المتجهة.

(credit: tobitasflickr, Flickr)

هناك مفاهيم أخرى تصف الحركة، بالإضافة إلى المسافة والإزاحة. أسئلة مثل، "كم من الوقت يستغرق سباق؟" و "ما سرعة العداء؟" لا يمكن الإجابة عليها دون فهم المفاهيم الأخرى. في هذا القسم نضيف تعريفات للزمن والسرعة المتجهة والسرعة لتوسيع وصفنا للحركة.

### الزمن

كما نوقش في الكميات والوحدات الفيزيائية، تُحدد الكميات الفيزيائية الأساسية بكيفية قياسها. هذا الحال مع الزمن. يتضمن كل قياس للزمن قياس لتغير. قد يكون تغير رقمًا على ساعة رقمية أو نبضة قلب أو تغير موضع الشمس في السماء. في الفيزياء، تعريف الزمن بسيط - الزمن هو التغير أو الفاصل الزمني الذي يحدث خلاله التغير. من المستحيل أن نعرف أن الزمن قد مر، ما لم يتغير شيء.

يتم معايرة مقدار الزمن بالمقارنة مع قيمة قياسية. وحدة SI للزمن الثانية (s). قد نلاحظ، على سبيل المثال، أن بندول معين يصنع تأرجحًا كاملاً كل 0.75 ثانية. يمكننا بعد ذلك استخدام البندول لقياس الوقت عن طريق عد تأرجحاته أو، بالطبع، عن طريق توصيل البندول بآلية تُسجل الوقت على قرص. هذا لا يسمح لنا فقط بقياس مقدار الوقت، ولكن أيضًا بتحديد تسلسل الأحداث.

كيف يرتبط الزمن بالحركة؟ عادة ما نهتم بالزمن المنقضي لحركة معينة، مثل المدة التي يستغرقها راكب طائرة للانتقال من مقعده إلى الجزء الخلفي من الطائرة. لإيجاد الوقت المنقضي، نلاحظ الوقت في بداية الحركة ونهايتها ونطرح الاثنين. على سبيل المثال، قد تبدأ محاضرة في الساعة 11:00 صباحًا. وتنتهي الساعة 11:50 صباحًا، بحيث يكون الوقت المنقضي 50 دقيقة. الزمن المنقضي  $\Delta t$  هو الفرق بين وقت الانتهاء ووقت البداية،

2.4

$$\Delta t = t_f - t_0$$

حيث  $\Delta t$  هو التغير في الزمن أو الزمن المنقضي، و  $t_f$  الزمن في نهاية الحركة، و  $t_0$  الزمن في بداية الحركة. (كعادة، رمز دلتا، يعني التغير في الكمية التي تليها.)

تكون الحياة أبسط إذا اعتبرنا الزمن عند البداية صفرًا، كما هو الحال عندما نستخدم ساعة توقيت. إذا كنا نستخدم ساعة توقيت، فستقرأ ببساطة صفرًا في بداية المحاضرة و50 دقيقة في النهاية. إذا  $t_0 = 0$ ، فإن  $\Delta t = t_f$ .

في هذا النص، من أجل التبسيط،

- تبدأ الحركة عند زمن يساوي صفر ( $t_0 = 0$ )
- يُستخدم الرمز  $t$  للوقت المنقضي ما لم يُنص على خلاف ذلك ( $\Delta t = t_f \equiv t$ )

### السرعة المتجهة

فكرتك عن السرعة المتجهة هي على الأرجح نفس تعريفها العلمي. أنت تعلم أنه إذا كانت الإزاحة كبيرة في مدة زمنية صغيرة، فستكون السرعة المتجهة كبيرة، وأن هذه السرعة المتجهة لها وحدة المسافة مقسومة على وحدة الوقت، مثل أميال في الساعة أو كيلومترات في الساعة.

#### متوسط السرعة المتجهة

متوسط السرعة المتجهة هو الإزاحة (التغير في الموضع) مقسومة على وقت السفر،

2.5

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_o}{t_f - t_o}$$

حيث  $\bar{v}$  هو متوسط السرعة المتجهة (المشار إليها بشرطة على  $v$ )،  $\Delta x$  هو التغير في الموضع (أو الإزاحة)، و  $x_o$  و  $x_f$  هما الموضع النهائي والابتدائي عند الزمن  $t_o$  و  $t_f$ ، على التوالي. إذا اعتبرنا وقت البدء  $t_o$  ليكون صفراً، فإن متوسط السرعة ببساطة

2.6

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{t}$$

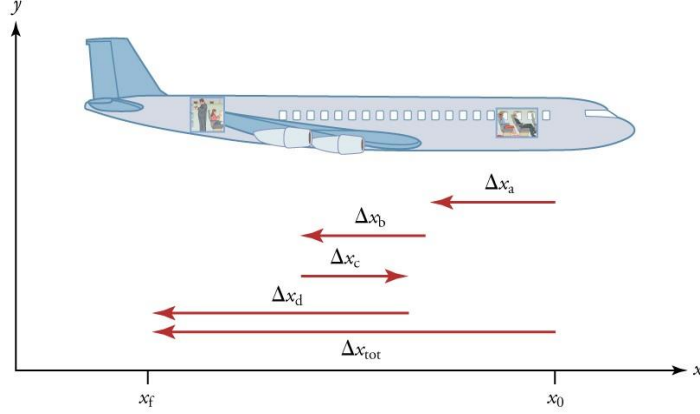
لاحظ أن هذا التعريف يشير إلى أن السرعة متجه لأن الإزاحة متجه؛ لها مقدار واتجاه. وحدة SI للسرعة المتجهة هي متر في الثانية أو  $m/s$ ، ولكن العديد من الوحدات الأخرى، مثل  $km/h$  و  $mi/h$  (تكتب أيضًا  $mph$ )، و  $cm/s$ ، شائعة الاستخدام. لنفترض، على سبيل المثال، أن راكبًا بطائرة استغرق 5 ثوانٍ للتحرك -4 م (تشير علامة السالب إلى أن الإزاحة باتجاه الجزء الخلفي من الطائرة). سيكون متوسط سرعته المتجهة

2.7

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{t} = \frac{-4 \text{ m}}{5 \text{ s}} = -0.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

تشير علامة السالب إلى أن السرعة المتجهة المتوسطة تتجه أيضًا نحو مؤخرة الطائرة.

لا تجربنا السرعة المتجهة المتوسطة لكائن ما بأي شيء عما حدث له بين نقطة البداية ونقطة النهاية. على سبيل المثال، لا يمكننا معرفة ما إذا كان راكب الطائرة يتوقف مؤقتًا أو يتراجع قبل أن يذهب إلى الجزء الخلفي من الطائرة من السرعة المتوسطة. للحصول على مزيد من التفاصيل، يجب أن نأخذ في الاعتبار الأجزاء الأصغر من الرحلة ذات الفترات زمنية الأصغر.



**الشكل 2-9** سجل أكثر تفصيلاً لراكب طائرة يتجه نحو الجزء الخلفي من الطائرة، ويظهر أجزاء أصغر من رحلته.

كلما كانت الفترات الزمنية المعتبرة أصغر، زادت المعلومات التفصيلية. عندما نطبق هذه العملية بشكل مثالي، ننتهي إلى مدة متناهية الصغر. خلال هذه المدة الزمنية، يصبح متوسط السرعة المتجهة هو السرعة المتجهة لحظية أو السرعة المتجهة في لحظة محددة. عداد سرعة السيارة، على سبيل المثال، يوضح مقدار (وليس اتجاه) السرعة المتجهة اللحظية للسيارة. (تمنح الشرطة المخالفات بناءً على السرعة المتجهة اللحظية، ولكن عند حساب المدة التي ستستغرقها في الانتقال من مكان إلى آخر في رحلة برية، فأنت بحاجة إلى استخدام متوسط السرعة المتجهة.) **السرعة المتجهة اللحظية** هي متوسط السرعة المتجهة في لحظة معينة من الزمن (أو خلال فترة زمنية متناهية الصغر).

رياضيًا، حساب السرعة المتجهة اللحظية، في لحظة معينة يمكن أن يتضمن حساب النهاية، عملية رياضية خارج نطاق النص. ومع ذلك، في ظل ظروف كثيرة، يمكننا حساب قيم دقيقة للسرعة المتجهة اللحظية دون اللجوء لهذه العملية.

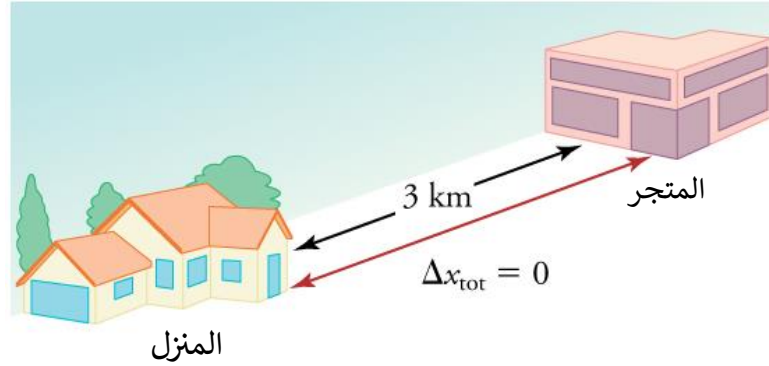
## السرعة

في اللغة اليومية، يستخدم معظم الناس مصطلحي "السرعة speed" و "السرعة المتجهة velocity" بالتبادل. في الفيزياء، يختلفان في المعنى وهما مفهومان مختلفان. أحد الاختلافات الرئيسية أن السرعة ليس لها اتجاه. وبالتالي السرعة قيمة قياسية. مثلما نحتاج إلى التمييز بين السرعة المتجهة اللحظية ومتوسط السرعة المتجهة، نحتاج أيضًا إلى التمييز بين السرعة اللحظية ومتوسط السرعة.

**السرعة اللحظية** هي مقدار السرعة المتجهة اللحظية. على سبيل المثال، افترض أن راكب الطائرة في لحظة ما كانت سرعته المتجهة اللحظية تبلغ -3.0 م/ث (معنى الإشارة السالبة أن الحركة باتجاه مؤخرة الطائرة)، فإن سرعته اللحظية 3.0 م/ث. أو افترض أن سرعتك المتجهة اللحظية في وقت ما خلال رحلة تسوق 40 كم/ساعة باتجاه الشمال، فإن سرعتك اللحظية في تلك اللحظة 40 كم/ساعة نفس المقدار، ولكن دون اتجاه. متوسط السرعة، يختلف كثيرًا عن متوسط السرعة المتجهة. **متوسط السرعة** هو المسافة المقطوعة مقسومة على الوقت المنقضي.

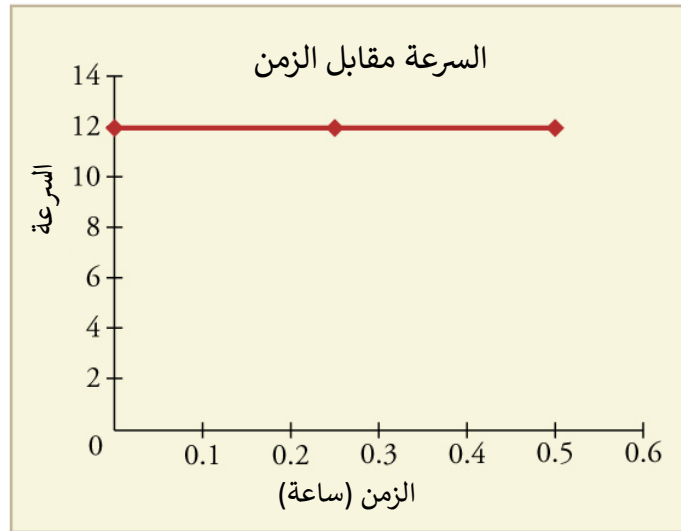
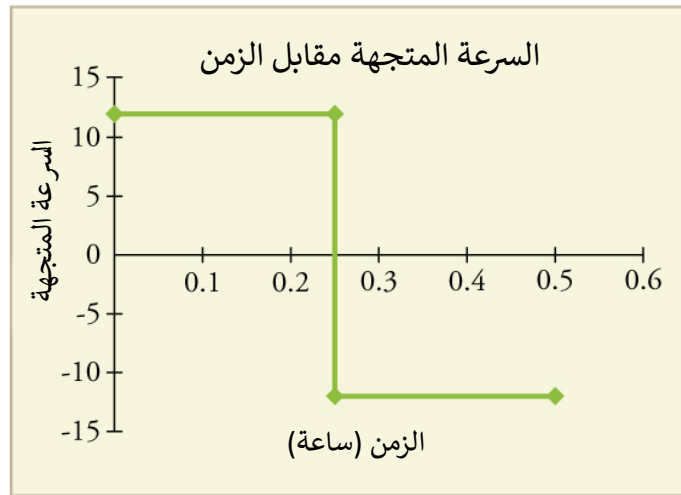
لاحظنا أن المسافة المقطوعة يمكن أن تكون أكبر من مقدار الإزاحة. لذلك يمكن أن تكون السرعة المتوسطة أكبر من السرعة المتجهة المتوسطة (الإزاحة مقسومة على الزمن). على سبيل المثال، إذا كنت تقود سيارتك إلى متجر وعدت إلى المنزل خلال نصف ساعة، ويظهر عداد المسافات في سيارتك أن إجمالي المسافة المقطوعة كانت 6 كيلومترات، فإن متوسط سرعتك 12 كم/ساعة. مع ذلك، كانت سرعتك المتجهة المتوسطة صفرًا، لأن إزاحتك

في رحلة الذهاب والإياب تساوي صفرًا. (الإزاحة هي التغير في الموضع، وبالتالي فهي صفر لرحلة ذهاب وإياب.)  
لذا فإنّ متوسط السرعة ليس مقدار متوسط السرعة المتجهة.



**الشكل 2-10** خلال رحلة ذهاب وإياب مدتها 30 دقيقة إلى المتجر، تبلغ المسافة الإجمالية المقطوعة 6 كيلومترات. متوسط السرعة 12 كم \ ساعة. الإزاحة في رحلة ذهاب وإياب صفر، حيث لا صافي تغير في الموضع  
لذا فإنّ متوسط السرعة المتجهة صفر.

طريقة أخرى لتصوير حركة الجسم هي استخدام الرسم البياني. يمكن أن يكون مخطط الموضع أو السرعة المتجهة كدالة في الزمن مفيدًا جدًا. على سبيل المثال، بالنسبة لهذه الرحلة إلى المتجر، تُعرض الرسوم البيانية للموضع والسرعة المتجهة والسرعة مقابل الزمن في **الشكل 2-11**. (لاحظ أن هذه الرسوم البيانية تصور نموذجًا مبسطًا للغاية للرحلة. نحن نفترض أن السرعة ثابتة خلال الرحلة، وهو أمر غير واقعي نظرًا لأننا على الأرجح سنتوقف عند المتجر. ولكن من أجل التبسيط، سنعمل على تصميمها دون توقف أو تغيرات في السرعة. نفترض أيضًا أن الطريق بين المتجر والمنزل خط مستقيم تمامًا.)



**الشكل 11-2** الموضع مقابل الزمن والسرعة المتجهة مقابل الزمن والسرعة مقابل الزمن للرحلة. لاحظ أن السرعة المتجهة لرحلة العودة سالبة.

### عمل روابط: الشعور بالسرعة

إذا كنت تقود لفترات طويلة، فمن المحتمل أن يكون لديك إحساس جيد بالسرعات بين حوالي 10 و 70 ميلاً في الساعة. لكن كم تساوى هذه السرعات بالأمتار في الثانية؟ ماذا نعني عندما نقول إن شيئاً ما يتحرك بسرعة 10 م \ ث؟ للحصول على فكرة أفضل عما تعنيه هذه القيم حقاً، قم ببعض الملاحظات والحسابات بنفسك:

- احسب سرعات السيارة العادية بالأمتار في الثانية
- قدر سرعة الركض والمشي باستخدام ساعة توقيت؛ حول القياسات إلى كل من م \ ث وميل \ س
- حدد سرعة النملة أو الحلزون أو الأوراق المتساقطة

### تحقق فهمك

يسافر قطار ركاب من بالتيمور إلى واشنطن العاصمة، ويعود في غضون ساعة و 45 دقيقة. المسافة بين المحطتين حوالي 40 أميال. ما (أ) متوسط السرعة المتجهة للقطار، و (ب) متوسط سرعة القطار بـ م \ ث؟

### الحل

(أ) متوسط السرعة المتجهة للقطار صفر لأن  $x_f = x_0$ ؛ القطار ينتهي في نفس المكان الذي بدأ منه.  
(ب) يُحسب متوسط سرعة القطار أدناه. لاحظ أن القطار يسافر 40 ميلاً في اتجاه واحد و 40 ميلاً إلى الوراء، المسافة إجمالية قدرها 80 أميال.

2.8

$$\frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}} = \frac{80 \text{ ميل}}{105 \text{ دقيقة}}$$

2.9

$$\frac{80 \text{ ميل}}{105 \text{ دقيقة}} \times \frac{5280 \text{ قدم}}{1 \text{ ميل}} \times \frac{1 \text{ متر}}{3.28 \text{ قدم}} \times \frac{1 \text{ دقيقة}}{60 \text{ ثواني}} = 20 \text{ m/s}$$



## 4-2 التسارع (العجلة)



**الشكل 2-12** تتباطأ الطائرة أو تبطئ عند وصولها للهبوط في سانت مارتن. تسارعها عكس اتجاه سرعتها المتجهة. (credit: Steve Conry، Flickr)

في المحادثات اليومية، التسارع يعنى زيادة السرعة. في الواقع، يتسبب المُسرّع في السيارة في تسريعها. كلما زاد التسارع، زاد التغير في السرعة المتجهة خلال مدة زمنية معينة. يتوافق التعريف الرسمي للتسارع مع هذه المفاهيم، ولكنه أكثر شمولاً.

### التسارع المتوسط

التسارع المتوسط هو المعدل الذي تتغير به السرعة المتجهة

2.10

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_o}{t_f - t_o}$$

$\bar{a}$  متوسط التسارع،  $v$  السرعة المتجهة،  $t$  الزمن. (الشرطة فوق  $a$  تعني متوسط التسارع.)

نظراً لأن التسارع هو السرعة المتجهة بوحدة م/ث مقسوماً على الوقت بالثانية، فإن وحدات SI الخاصة بالتسارع هي م/ث<sup>2</sup>، متر لكل ثانية مربعة أو متر لكل ثانية في الثانية، وهو ما يعني حرفياً عدد الأمتار في الثانية التي تتغيرها السرعة المتجهة كل ثانية.

تذكر أن السرعة المتجهة متجه - له مقدار واتجاه. وهذا يعني أن التغير في السرعة المتجهة يمكن أن يكون تغيراً في المقدار (أو السرعة)، ولكن يمكن أن يكون أيضاً تغيراً في الاتجاه. على سبيل المثال، إذا انعطفت السيارة في زاوية بسرعة ثابتة، فإنها تتسارع لأن اتجاهها يتغير. كلما كان الدوران أسرع، كلما زاد التسارع. لذلك هناك تسارع عندما تتغير السرعة المتجهة إما في المقدار (زيادة أو نقصان في السرعة) أو في الاتجاه، أو كليهما.

## التسارع كمتجه

التسارع هو متجه في نفس اتجاه التغير في السرعة المتجهة  $\Delta v$ . بما أن السرعة متجه، يمكن أن تتغير إما في المقدار أو في الاتجاه. بالتالي فإن التسارع تغير في السرعة أو الاتجاه، أو كليهما.

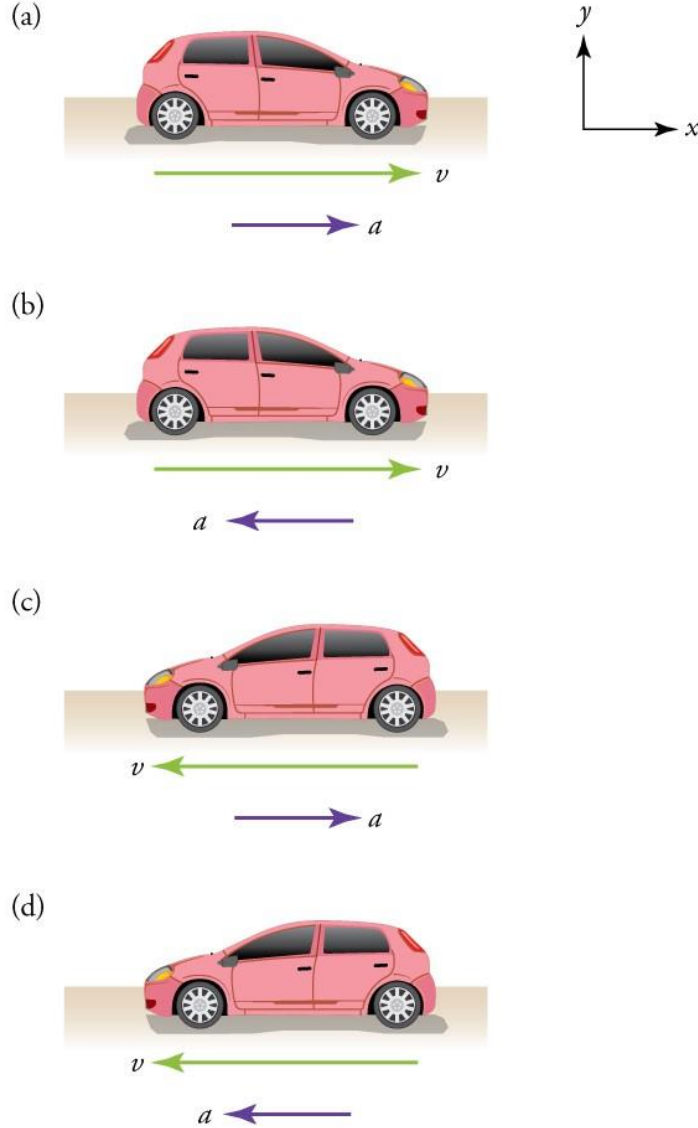
ضع في اعتبارك أنه: مع أن التسارع في اتجاه التغير في السرعة المتجهة، إلا أنه ليس دائماً في اتجاه الحركة. عندما يتباطأ جسم ما، فإن تسارعه يكون عكس اتجاه حركته. يُعرف هذا بالتباطؤ.



**الشكل 2-13** يتباطأ قطار مترو أنفاق في ساو باولو بالبرازيل عندما يصل إلى المحطة. إنه يتسارع في اتجاه معاكس لاتجاه حركته. (credit: Yusuke Kawasaki, Flickr)

### تنبيه سوء فهم: التباطؤ مقابل التسارع السالب

يشير التباطؤ دائماً إلى التسارع في الاتجاه المعاكس لاتجاه السرعة المتجهة. يؤدي التباطؤ دائماً إلى تقليل السرعة. ومع ذلك، فإن التسارع السالب هو التسارع في الاتجاه السالب في نظام الإحداثيات المختار. قد يكون التسارع السالب تباطؤاً وقد لا يكون، وقد يُعتبر التباطؤ تسارعاً سلبياً أو لا. على سبيل المثال، ضع في اعتبارك **الشكل 2-14**.



**الشكل 2-14 (أ)** هذه السيارة تزيد من سرعتها خلال التحرك إلى اليمين. ولذلك، فإن لها تسارع موجب في نظام الإحداثيات الخاص بنا. **(ب)** هذه السيارة تخفض من سرعتها خلال تحركها ناحية اليمين. ولذلك، فإن لها تسارع سالب في نظام الإحداثيات الخاص بنا، لأن التسارع باتجاه اليسار. هذه السيارة أيضاً تتسارع في الاتجاه المعاكس لحركتها. **(ج)** هذه السيارة تتحرك إلى اليسار، ولكنها تخفض من سرعتها بمرور الزمن. ولذلك، فإن تسارعها موجب في نظام الإحداثيات الخاص بنا لأنها تتحرك إلى اليمين. ومع ذلك، السيارة تتباطأ لأن تسارعها في عكس اتجاه حركتها. **(د)** هذه السيارة تزيد من سرعتها خلال حركتها إلى اليسار. تسارعها سالب لأن التسارع باتجاه اليسار. ومع ذلك، لأن تسارعها في نفس اتجاه حركتها، فإنها تزيد من سرعتها (لا تتباطأ)

## مثال 1-2

حساب التسارع: فرس السباق يغادر البوابة

فرس السباق الخارج من البوابة يتسارع من السكون إلى سرعة 15.0 م \ ث في اتجاه الغرب في 1.80 ثانية. ما متوسط تسارعه؟

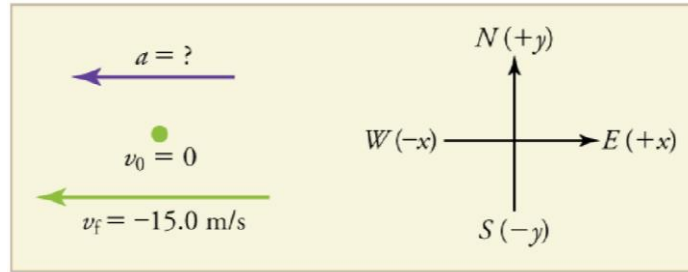


الشكل 15-2

(credit: Jon Sullivan, PD Photo.org)

### طريقة الحل

أولاً نرسم مخططاً ونخصص نظام إحداثيات للمسألة. المسألة في حالتنا هذه بسيطة، ولكن الرسم يساعد على تخيل المسألة دائماً. لاحظ أننا نصنف الشرق بأنه موجب والغرب سالب. في هذه الحالة، السرعة المتجهة سالبة.



الشكل 16-2

يمكننا حل هذه المسألة بواسطة تحديد  $\Delta v$  و  $\Delta t$  من المعطيات، ثم حساب التسارع المتوسط مباشرةً من

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_0}{t_f - t_0} \quad \text{المعادلة}$$

### الحل

1. حدد القيم المعلومة.  $V_0 = 0$  ،  $v_f = -15.0 \frac{m}{s}$  (الإشارة السالبة تشير إلى الاتجاه ناحية الغرب)،

$$\Delta t = 1.80s$$

2. احسب التغير في السرعة المتجهة. حيث إن الحصان يزيد سرعته من صفر إلى 15.0 م \ ث، التغير في

$$\Delta v = v_f = -15.0 \frac{m}{s} \quad \text{سرعته المتجهة يساوى سرعته النهائية:}$$

3. عوض عن القيم المعلومة لإيجاد قيمة  $\bar{a}$

2.11

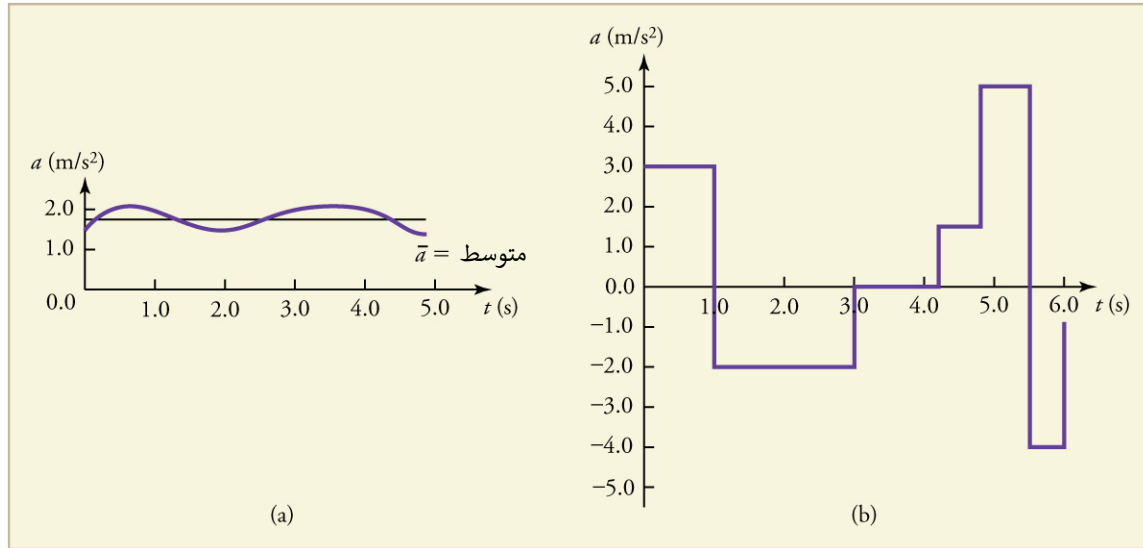
$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{-15.0 \frac{m}{s}}{1.80 s} = -8.33 \frac{m}{s^2}$$

### المناقشة

تشير الإشارة السالبة إلى أن التسارع باتجاه الغرب. التسارع  $8.33 \text{ م}^2 \text{ ث}^{-2}$  في اتجاه الغرب يعني أن الحصان يزيد سرعته بمقدار  $8.33 \text{ م}^2 \text{ ث}^{-2}$  ناحية الغرب كل ثانية، أي  $8.33 \text{ م}^2 \text{ ث}^{-2}$  في الثانية في الثانية، وهو ما نكتبه على النحو التالي  $8.33 \text{ م}^2 \text{ ث}^{-2}$ . هذا حقًا متوسط التسارع، لأن الطريق ليس منتظمًا، سنرى لاحقًا أن تسارعًا بهذا الحجم سيتطلب من الراكب التمسك بقوة تساوي وزنه تقريبًا.

### التسارع اللحظي

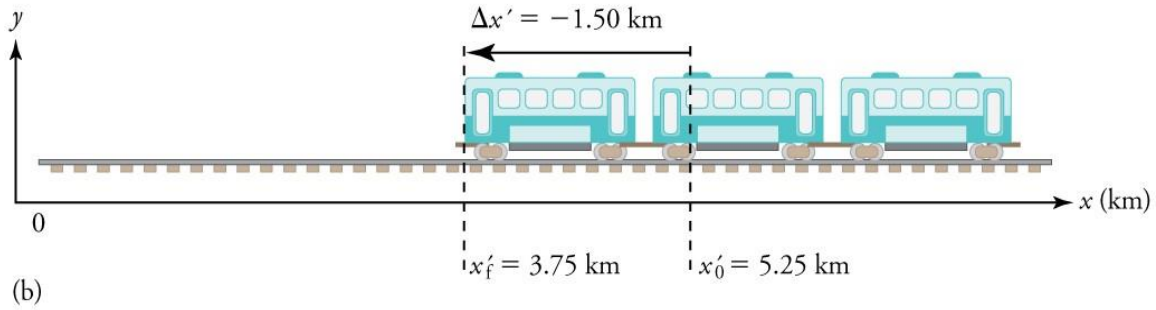
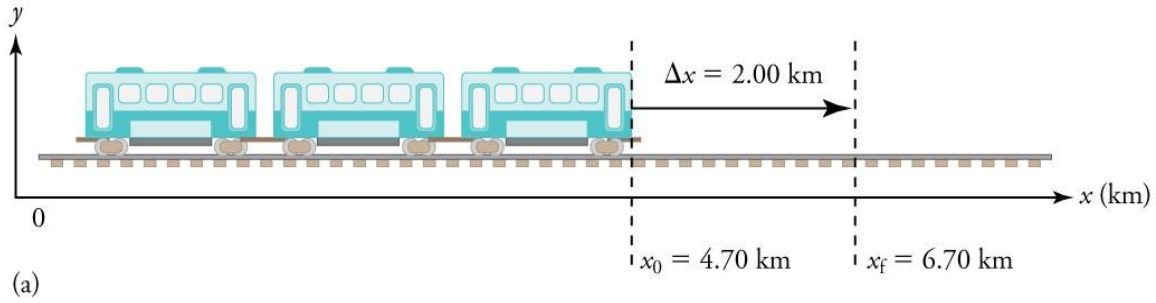
نحسب التسارع اللحظي  $a$  أو التسارع في لحظة معينة من الزمن، بنفس العملية التي تمت مناقشتها للسرعة المتجهة اللحظية في الزمن والسرعة المتجهة والسرع، - أي باعتبار مدة زمنية صغيرة متناهية الصغر. كيف نجد التسارع اللحظي باستخدام الجبر فقط؟ الإجابة أننا نختار متوسط للتسارع يمثل الحركة. يوضح الشكل 17-2 الرسوم البيانية للتسارع اللحظي مقابل الزمن لحركتين مختلفتين للغاية. في الشكل 17-2 (أ)، يختلف التسارع اختلافًا طفيفًا ويكون المتوسط خلال المدة كلها تقريبًا هو نفسه التسارع اللحظي في أي لحظة. في هذه الحالة، يجب أن نتعامل مع هذه الحركة كما لو كان لها تسارع ثابت يساوي المتوسط (في هذه الحالة حوالي  $1.8 \text{ م}^2 \text{ ث}^{-2}$ ). في الشكل 17-2 (ب)، يختلف التسارع بشكل كبير بمرور الوقت. في مثل هذه الحالات، من الأفضل التفكير في فترات زمنية أصغر واختيار متوسط تسارع لكل منها. على سبيل المثال، يمكننا التفكير في الحركة في الفترات من 0 إلى 1.0 ثانية ومن 1.0 إلى 3.0 ثانية كأنه حركات منفصلة بتسارع  $3.0+ \text{ م}^2 \text{ ث}^{-2}$  و  $-2.0 \text{ م}^2 \text{ ث}^{-2}$ ، على التوالي.



الشكل 17-2 رسوم بيانية للتسارع اللحظي مقابل الزمن لحركتين مختلفتين في بعد واحد. (أ) هنا يختلف التسارع بشكل طفيف ودائمًا ما يكون في نفس الاتجاه. ولذلك، فإنه موجب. المتوسط على مدى المدة الزمنية هو تقريبًا

نفس التسارع في أي لحظة. (ب) هنا يختلف التسارع اختلافاً كبيراً، ربما يمثل حُرْمة على حزام ناقل في مكتب بريد يتم تسريعها للأمام والخلف. من الضروري اعتبار فترات زمنية صغيرة (مثل من 0 إلى 1.0 ثانية) مع تسارع ثابت أو شبه ثابت في مثل هذه الحالة.

تتناول الأمثلة العدة التالية حركة قطار الأنفاق الموضح في الشكل 2-18. في (أ) يتحرك القطار إلى اليمين، وفي (ب) يتحرك إلى اليسار. صممت الأمثلة لتوضيح جوانب الحركة بشكل أكبر ولتوضيح بعض التفكير المنطقي الذي يدخل في حل المسائل.



**الشكل 2-18** الحركة أحادية البعد لقطار أنفاق يتم معالجتها في الأمثلة من المثال 2-2 إلى المثال 2-7. هنا اخترنا المحور  $x$  بحيث يكون الاتجاه الموجب ناحية اليمين والاتجاه السالب ناحية اليسار للإزاحة، والسرعة المتجهة، و التسارع. (أ) قطار الأنفاق يتحرك إلى اليمين من  $x_0$  إلى  $x_f$ . الإزاحة  $\Delta x$  تساوي  $+2.0 \text{ km}$ . (ب) قطار يسير إلى اليسار من  $x'_0$  إلى  $x'_f$ . الإزاحة  $\Delta x'$  تساوي  $-1.5 \text{ km}$ . (لاحظ أن العلامة ') تستخدم للتمييز بين الإزاحة في موقفين مختلفين. المسافات المقطوعة وحجم السيارات بمقاييس مختلفة لتوضيح جميعها في رسمة واحدة.)

## مثال 2-2

**حساب الإزاحة: قطار الأنفاق**

ما مقدار واتجاه الإزاحة لقطار الأنفاق الموضحة في الجزأين (أ) و (ب) من الشكل 2-18؟

**طريقة الحل**

الرسم معطى بنظام إحداثيات فعلاً، لذلك لا نحتاج إلى عمل رسم تخطيطي، ولكن يجب علينا تحليله للتأكد من فهمنا له. اهتم اهتماماً خاص بنظام الإحداثيات. لإيجاد الإزاحة، نستخدم المعادلة  $\Delta x = x_f - x_0$ . هذا واضح ومباشر حيث أعطيت المواضع الأولية والنهائية.

**الحل**

1. حدد المعلوم. في الشكل نرى أن  $x_f = 6.70 \text{ km}$  و  $x_0 = 4.70 \text{ km}$  للجزء (أ)، و  $x'_f = 3.75 \text{ km}$  و  $x'_0 = 5.25 \text{ km}$  بالنسبة للجزء (ب).

2. احسب الإزاحة في الجزء (أ).

2.12

$$\Delta x = x_f - x_0 = 6.70 \text{ km} - 4.70 \text{ km} = +2.00 \text{ km}$$

3. احسب الإزاحة في الجزء (ب).

2.13

$$\Delta x' = x'_f - x'_0 = 3.75 \text{ km} - 5.25 \text{ km} = -1.50 \text{ km}$$

### المناقشة

اتجاه الحركة في (أ) إلى اليمين وبالتالي فإن الإزاحة لها إشارة موجبة، في حين أن الحركة في (ب) إلى اليسار وبالتالي لها إشارة سالبة.

## مثال 3-2

مقارنة المسافة المقطوعة مع الإزاحة: قطار مترو الأنفاق

ما المسافات المقطوعة للحركات الموضحة في الجزأين (أ) و (ب) لقطار الأنفاق في الشكل 2-18؟

### طريقة الحل

للإجابة على هذا السؤال، فكر في تعريف كل من المسافة والمسافة المقطوعة، وكيف يرتبط بالإزاحة. تُعرف المسافة بين موضعين على أنها مقدار الإزاحة، التي حسبناها في المثال 2-2. المسافة المقطوعة هي الطول الإجمالي للمسار المقطوع بين الموضعين. في حالة قطار الأنفاق الموضح في الشكل 2-18، تكون المسافة المقطوعة نفس المسافة بين الموضعين الأولي والنهايي للقطار.

### الحل

1. كانت الإزاحة للجزء (أ)  $+2.00 \text{ km}$ . لذلك، كانت المسافة بين الموضعين الأولي والنهايي  $2.00 \text{ km}$ ، وكانت المسافة المقطوعة  $2.00 \text{ km}$ .

2. كانت الإزاحة للجزء (ب)  $-1.50 \text{ km}$ . وبالتالي، كانت المسافة بين الموضعين الأولي والنهايي  $1.50 \text{ km}$ ، وكانت المسافة المقطوعة  $1.50 \text{ km}$ .

### المناقشة

المسافة كمية قياسية. لها مقدار، وليس لها اتجاه.

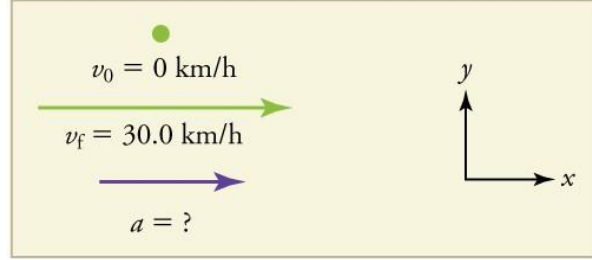
## مثال 4-2

حساب التسارع: قطار مترو الأنفاق يزيد من سرعته

افترض أن القطار في الشكل 2-18 (أ) يتسارع من السكون إلى 30.0 كم \ ساعة في أول 20.0 ثانية من حركته. ما متوسط تسارعه خلال تلك المدة الزمنية؟

### طريقة الحل

يجدر في هذه المرحلة عمل مخطط بسيط:



الشكل 2-19

تتضمن هذه المسألة ثلاث خطوات. أولاً يجب أن نحدد التغير في السرعة المتجهة، ثم علينا تحديد التغير في الزمن، وأخيراً نستخدم هذه القيم لحساب العجلة.

### الحل

1. حدد المعلوم.  $v_0 = 0$  (تبدأ القطارات من السكون)،  $v_f = 30.0 \text{ km/h}$  و  $\Delta t = 20.0 \text{ s}$ .

2. احسب  $\Delta v$ . بما أن القطار يبدأ من السكون، فإن التغير في السرعة المتجهة يكون  $\Delta v = +30.0 \text{ km/h}$ ، حيث تعني علامة الجمع أن السرعة المتجهة إلى اليمين.

3. أدخل القيم المعروفة واحسب المجهول  $\bar{a}$ ،

2.14

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{+30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{20.0 \text{ s}}$$

4. نظرًا لأن الوحدات مختلفة (لدينا الساعات والثواني للزمن)، نحتاج إلى تحويل كل الوحدات إلى وحدات SI من الأمتار والثواني. (انظر الكميات الفيزيائية والوحدات لمزيد من الإرشادات).

2.15

$$\bar{a} = \left( \frac{+30 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{20.0 \text{ s}} \right) \left( \frac{10^3}{1 \text{ km}} \right) \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 0.417 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



## المناقشة

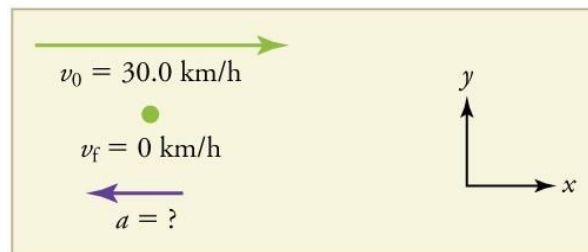
الإشارة الموجبة تعني أن التسارع جهة اليمين. هذا معقول لأن القطار يبدأ من السكون ويتحرك إلى اليمين بسرعة (موجبة أيضًا). إذن، فإن التسارع في نفس اتجاه التغير في السرعة المتجهة، كما هو الحال دائمًا

## مثال 5-2

حساب التسارع: قطار مترو الأنفاق يخفض سرعته

افترض الآن أنه في نهاية رحلته، تباطأ القطار في الشكل 2-18 (أ) إلى التوقف من سرعة 30.0 كم \ ساعة في 8.00 ثانية. ما متوسط تسارعه خلال عملية التوقف؟

طريقة الحل



الشكل 20-2

في هذه الحالة، يتباطأ القطار ويكون تسارعه سالب لأنه باتجاه اليسار. كما في المثال السابق، يجب أن نحسب التغير في السرعة المتجهة والتغير في الزمن ثم نحسب التسارع.

الحل

1. حدد المعلوم.  $v_0 = 30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ,  $v_f = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  (القطار يتوقف، لذلك سرعته النهائية صفر)،  $\Delta t = 8.00 \text{ s}$ .

2. احسب التغير في السرعة،  $\Delta v$ .

$$\Delta v = v_f - v_0 = 0 - 30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}} = -30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

2.16

3. عوض عن المعلوم، واحسب  $\bar{a}$ .

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{-30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{8.00 \text{ s}}$$

2.17

4. حول الوحدات الى الأمتار والثواني.

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \left( \frac{-30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{8.00 \text{ s}} \right) \left( \frac{10^3}{1 \text{ km}} \right) \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = -1.04 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

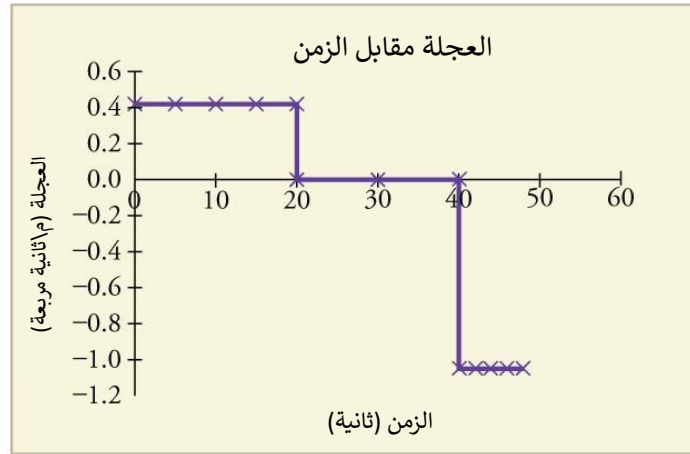
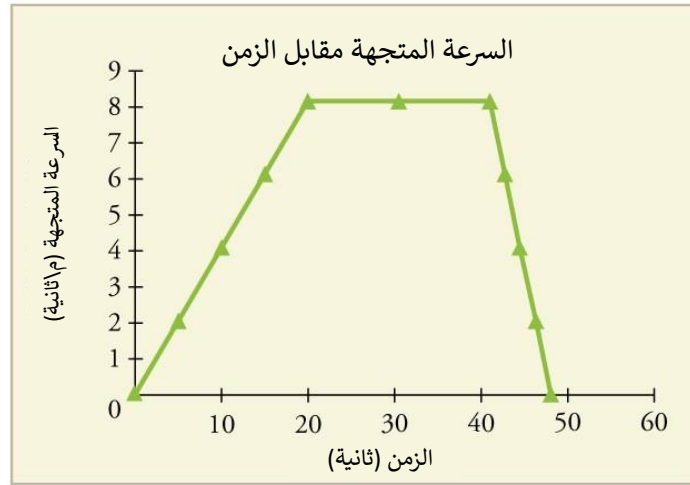
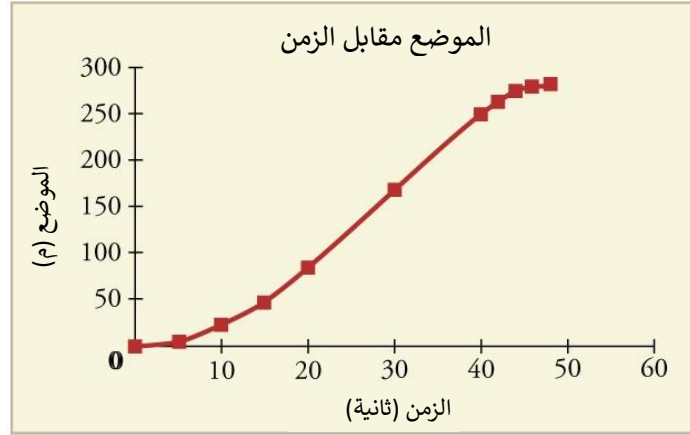
2.18

## المناقشة

تشير علامة السالب إلى أن التسارع إلى اليسار. هذه العلامة معقولة لأن القطار سرعته المتجهة في البداية موجبة، في هذه المسألة، والتسارع السالب سيعارض الحركة. مرة أخرى، التسارع في نفس اتجاه التغير في السرعة المتجهة، وهو سالب هنا. يمكن تسمية هذا التسارع بالتباطؤ لأنه عكس اتجاه السرعة المتجهة.

---

تُعرض الرسوم البيانية للموضع والسرعة المتجهة والتسارع مقابل الزمن للقطارات في المثال 2-4 والمثال 2-5 في **الشكل 21-2** (اعتبرنا أن السرعة ثابتة من 20 إلى 40 ثانية، وبعد ذلك يتباطأ القطار).

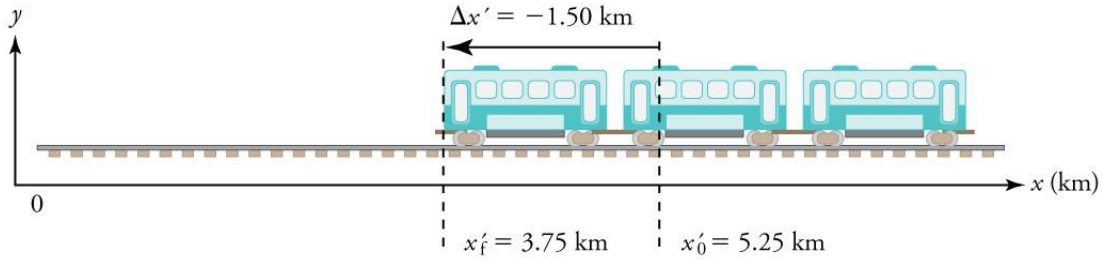


**الشكل 21-2 (أ)** موضع القطار مع مرور الزمن. لاحظ أن موضع القطار يتغير ببطء في بداية الرحلة، ثم أسرع مع زيادة سرعته. ثم يتغير موضعه بشكل أبطأ عندما يتباطأ في نهاية الرحلة. في منتصف الرحلة، بينما تظل السرعة المتجهة ثابتة، يتغير الموضع بمعدل ثابت. (ب) السرعة المتجهة للقطار بمرور الزمن. تزداد السرعة المتجهة للقطار خلال تسارعه في بداية الرحلة. تظل ثابتة في منتصف الرحلة (حيث لا يتسارع القطار). تتناقص مع تباطؤ القطار في نهاية الرحلة. (ج) تسارع القطار بمرور الزمن. القطار تسارعه موجب في بداية الرحلة لأنه يتسارع. ليس له تسارع حيث يتحرك بسرعة ثابتة في منتصف الرحلة. تسارعه سالب لأنه يتباطأ في نهاية الرحلة.

## مثال 6-2

حساب متوسط السرعة المتجهة: قطار الأنفاق

ما متوسط السرعة المتجهة للقطار في الجزء (ب) من المثال 2-2، والمبين مرة أخرى أدناه، إذا استغرق 5.00 دقائق للقيام برحلته؟



الشكل 22-2

### طريقة الحل

متوسط السرعة هو الإزاحة مقسومة على الزمن. ستكون القيمة سالبة هنا، لأن القطار يتحرك إلى اليسار وإزاحته سالبة.

### الحل

1. حدد القيم المعروفة.  $x'_f = 3.75 \text{ km}$ ،  $x'_0 = 5.25 \text{ km}$ ،  $\Delta t = 5.00 \text{ min}$
2. احسب الإزاحة،  $\Delta x'$ ، حسبنا  $\Delta x'$  وكانت  $-1.5 \text{ km}$  في المثال 2-2
3. احسب السرعة المتجهة المتوسطة

2.19

$$\bar{v} = \frac{\Delta x'}{\Delta t} = \frac{-1.50 \text{ km}}{5.00 \text{ min}}$$

4. حول الوحدات.

2.20

$$\bar{v} = \frac{\Delta x'}{\Delta t} = \left( \frac{-1.50 \text{ km}}{5.00 \text{ min}} \right) \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right) = -18.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

### المناقشة

تشير السرعة السالبة إلى الحركة ناحية اليسار

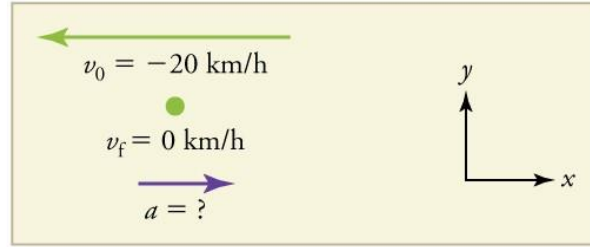
## مثال 7-2

حساب التباطؤ: قطار الأنفاق

أخيراً، افترض أن القطار في الشكل 22-2 يتباطأ إلى أن يتوقف من سرعة 20.0 كم \ ساعة في 10.0 ثوانٍ. ما متوسط تسارعه؟

طريقة الحل

مرة أخرى، دعونا نرسم المسألة:



الشكل 23-2

كما في السابق، يجب علينا إيجاد التغير في السرعة والتغير في الزمن لحساب متوسط التسارع.

الحل

1. حدد القيم المعروفة.  $\Delta t = 10.0 \text{ s}$ ،  $v_f = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ،  $v_o = -20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .
2. احسب  $\Delta v$ . التغير في السرعة المتجهة هنا موجب، حيث

2.21

$$\Delta v = v_f - v_o = 0 - \left(-20 \frac{\text{km}}{\text{h}}\right) = +20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

3. احسب  $\bar{a}$

2.22

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{+20.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{10.0 \text{ s}}$$

4. حول الوحدات

2.23

$$\bar{a} = \left(\frac{+20.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{10.0 \text{ s}}\right) \left(\frac{10^3 \text{ m}}{1 \text{ km}}\right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) = +0.556 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

## المناقشة

علامة الموجب تعني أن التسارع جهة اليمين. هذا معقول لأن القطار له في البداية سرعة سالبة (إلى اليسار) في هذه المسألة وتسارع موجب يعارض الحركة. مرة أخرى، يكون التسارع في نفس اتجاه التغير في السرعة، وهو موجب هنا. كما في المثال 2-5، هذا يسمى تباطؤ لأنه في الاتجاه المعاكس للسرعة.

## الإشارة والاتجاه

لعل أهم شيء يجب ملاحظته حول هذه الأمثلة هو إشارات الإجابات. في نظام الإحداثيات الذي اخترناه، تعني علامة الجمع أن اتجاه الكمية إلى اليمين واليسار أنها إلى اليسار. من السهل تخيل الإزاحة والسرعة المتجهة. لكنه أصعب بالنسبة للتسارع. يفسر معظم الناس التسارع السالب على أنه تباطؤ الجسم. لم يكن هذا الحال في المثال 2-7، حيث أدى تسارع موجب إلى إبطاء سرعة سالبة. كان الفارق الجوهرى هو أن العجلة كانت في الاتجاه المعاكس للسرعة. في الواقع، سيزيد التسارع السالب من السرعة السالبة. على سبيل المثال، يسرع القطار الذي يتحرك إلى اليسار في الشكل 2-22 بالتسارع إلى اليسار. في هذه الحالة، على حد سواء  $v$  و  $a$  سالبان. الإشارتان الموجبة والسالبة تعطي اتجاه التسارع. إذا كانت العجلة لها نفس إشارة السرعة، فإن الجسم يتسارع. إذا كانت العجلة لها إشارة معاكسة للسرعة، فإن الجسم يتباطأ.

## تحقق فهمك

طائرة تهبط على مدرج متجهة شرقاً. صف تسارعها.

## الحل

إذا اعتبرنا الشرق موجب، فسنجد أن تسارع الطائرة سالب، حيث إنها تتسارع باتجاه الغرب. إنها تتباطأ أيضًا: تسارعها عكس اتجاه سرعتها

## 5-2 معادلات الحركة للتسارع الثابت في بعد واحد



**الشكل 25-2** يمكن أن تساعدنا معادلات الحركة في وصف وتوقع حركة الأجسام المتحركة مثل سباقات قوارب الكاياك هذه في نيويورك في إنجلترا. (credit: Barry Skeates، Flickr)

نعلم أنه كلما زادت عجلة السيارة مثلاً، زادت الإزاحة في زمن معين. لكننا لم نطور معادلة محددة تتعلق بالتسارع والإزاحة. في هذا القسم، نطور بعض المعادلات لعلاقات الحركة، بدءاً من تعريفات الإزاحة والسرعة المتجهة والتسارع التي تم تناولها بالفعل.

**الرموز:  $t, x, v, a$**

أولاً، دعونا نبسط الرموز. إن عد الوقت الأولي صفراً، كما لو كان الوقت يقاس بساعة إيقاف، تبسيط كبير. حيث إن الوقت المنقضي  $\Delta t = t_f - t_0$ ، يعني ذلك أن  $\Delta t = t_f$ ، الزمن الأخير على ساعة الإيقاف. عندما يعتبر الزمن الأولي صفراً، فإننا نستخدم اللاحقة 0 للإشارة إلى القيم الأولية للموضع والسرعة.  $x_0$  الموضع الابتدائي و  $v_0$  السرعة الابتدائية. لا نضع أي لاحقات بعد القيم النهائية.  $t$  الزمن عند النهاية، و  $x$  الموضع النهائي، و  $v$  السرعة المتجهة النهائية. هذا يعطينا تعبيراً أبسط للوقت المنقضي، الآن،  $\Delta t = t$ . بالإضافة إلى ذلك يُبسط التعبير عن الإزاحة،  $\Delta x = x - x_0$ . أيضاً، التعبير عن التغير في السرعة المتجهة يبسط إلى  $\Delta v = v - v_0$ . لذلك، باستخدام الترميز المبسط، باعتبار الزمن الأولي صفراً،

2.24

$$\begin{aligned}\Delta t &= t \\ \Delta x &= x - x_0 \\ \Delta v &= v - v_0\end{aligned}$$

حيث يشير الرمز 0 إلى القيمة الأولية ويشير غياب الرمز إلى القيمة النهائية في أي حركة قيد الدراسة.

نفترض الآن أن التسارع ثابت. يسمح لنا هذا الافتراض بتجنب استخدام حساب التفاضل والتكامل لإيجاد التسارع اللحظي. بما أن التسارع ثابت، فإن التسارع المتوسط واللحظي متساويان. بما يعني،

2.25

$$\bar{a} = a = \text{ثابت}$$

لذلك نستخدم رمز التسارع  $a$  في جميع الأوقات. إن افتراض أن التسارع ثابت لا يحد بدرجة كبيرة من المواقف التي يمكننا دراستها أو دقة حلنا. والسبب أن التسارع ثابت في عدد كبير من المواقف. إضافةً إلى ذلك، في العديد من المواقف الأخرى، يمكننا وصف الحركة بدقة بافتراض تسارع ثابت يساوي متوسط تسارع تلك الحركة. أخيراً، في الحركات التي يتغير فيها التسارع بشكل كبير، مثل تسارع السيارة إلى السرعة القصوى ثم الكبح حتى التوقف، يمكن

دراسة الحركة في أجزاء منفصلة، لكل منها تسارعها الثابت.

### حساب الإزاحة $\Delta x$ والموضع النهائي $x$ عند معرفة السرعة المتجهة المتوسطة والتسارع $a$ الثابت

لنحصل على معادلتين جديدتين، نبدأ بتعريف السرعة المتجهة المتوسطة

2.26

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

بالتعويض عن  $\Delta x$  و  $\Delta t$  نحصل على

2.27

$$\bar{v} = \frac{(x - x_0)}{t}$$

حساب  $x$  يعطي

2.28

$$x = x_0 + \bar{v}t$$

حيث السرعة المتجهة المتوسطة تساوي

2.29

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} \quad (a \text{ ثابتة})$$

المعادلة  $\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$  توضح أنه عندما يكون التسارع ثابت، تكون  $v$  مجرد متوسط السرعتين الابتدائية والنهائية. على سبيل المثال، إذا زدت السرعة بمعدل ثابت (بمعنى أن العجلة ثابتة) من 30 إلى 60 كم\ساعة، تكون سرعتك المتجهة المتوسطة خلال التسارع الثابت 45 كم\ساعة باستخدام المعادلة  $\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$  لتحقيق ذلك

2.30

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{\left(30 \frac{km}{h} + 60 \frac{km}{h}\right)}{2} = 45 \frac{km}{h}$$

هذا الناتج يبدو منطقيًا



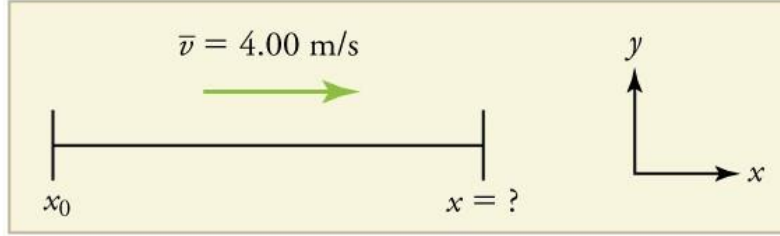
## مثال 8-2

حساب الإزاحة: إلى أي بعد يجري عداء؟

يركض عداء في طريق مستقيم بمتوسط سرعة 4.00 م/ث لمدة 2.00 دقيقة. ما الموضع النهائي، مع اعتبار الموضع الأولي صفرًا؟

طريقة الحل

ارسم مخطط.



الشكل 26-2

يعطى الموضع النهائي  $x$  بالمعادلة

2.31

$$x = x_0 + \bar{v}t$$

لإيجاد  $x$  نحدد قيم  $x_0$  و  $\bar{v}$  و  $t$  من نص المسألة ونعوض عنهم في المعادلة

الحل

1. حدد القيم المعروفة.  $\bar{v} = 4.00 \text{ m/s}$  ،  $\Delta t = 2.00 \text{ min}$  ،  $x_0 = 0 \text{ m}$ .
2. ادخل القيم المعروفة في المعادلة.

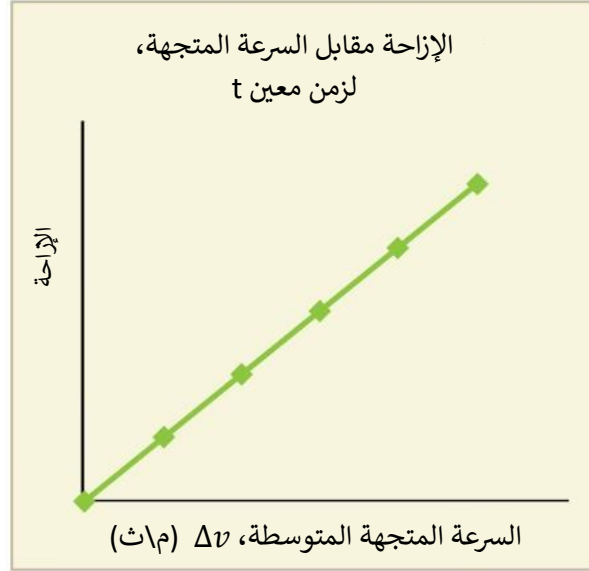
2.32

$$x = x_0 + \bar{v}t = 0 + \left(4.00 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (120 \text{ s}) = 480 \text{ m}$$

المناقشة

كل من السرعة المتجهة والإزاحة النهائية موجب، مما يعني أنهما في نفس الاتجاه.

المعادلة  $x = x_0 + \bar{v}t$  تعطي فكرة عن العلاقة بين الإزاحة ومتوسط السرعة المتجهة والزمن. توضح، على سبيل المثال، أن الإزاحة دالة خطية في متوسط السرعة المتجهة. (نعني بالدالة الخطية أن الإزاحة تعتمد على  $\bar{v}$  وليس  $\bar{v}^2$  آخر مثل  $\bar{v}^2$  عند رسمها بيانيًا، تبدو الدوال الخطية كخطوط مستقيمة ذات ميل ثابت.) في رحلة بالسيارة، على سبيل المثال، سنصل إلى ضعف المسافة، في نفس الوقت، إذا كان متوسط سرعتنا 90 كم/ساعة بدلاً من 45 كم/ساعة.



**الشكل 2-27** هناك علاقة خطية بين الإزاحة ومتوسط السرعة المتجهة. لزمن معين  $t$ ، يتحرك الجسم ضعف المسافة بضعف السرعة.

### حساب السرعة النهائية

نشتق معادلة أخرى مهمة من طريق التلاعب بتعريف التسارع.

2.33

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

بالتعويض بالرموز المبسطة  $\Delta v$ ,  $\Delta t$  نجد أن

2.34

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad (a \text{ ثابتة})$$

حساب  $v$  يعطينا

2.35

$$v = v_0 + at \quad (a \text{ ثابتة})$$

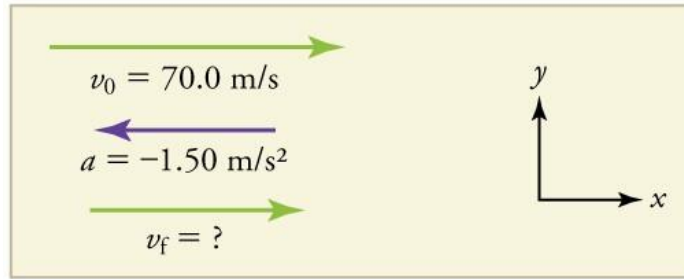
## مثال 9-2

حساب السرعة النهائية: طائرة تتباطأ بعد هبوطها

تهبط طائرة بسرعة ابتدائية 70.0 م/ث ثم تتباطأ بعجلة  $1.50 \text{ m/s}^2$  لمدة 40.0 ثانية. ما سرعتها النهائية؟

طريقة الحل

ارسم مخطط. نرسم متجه التسارع في الاتجاه المعاكس لمتجه السرعة لأن الطائرة تتباطأ.



الشكل 28-2

الحل

1. حدد القيم المعروفة.  $v_0 = 70.0 \text{ m/s}$ ،  $a = -1.50 \text{ m/s}^2$ ،  $t = 40.0 \text{ s}$ .
2. حدد المجهول. في هذه الحالة، المجهول هو السرعة النهائية،  $v_f$ .
3. حدد المعادلة التي يجب استخدامها. يمكننا حساب السرعة النهائية باستخدام المعادلة  $v = v_0 + at$ .
4. عوض بالقيم المعروفة واحسب.

2.36

$$v = v_0 + at = 70.0 \frac{\text{m}}{\text{s}} + \left(-1.50 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(40.0 \text{ s}) = 10.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

المناقشة

السرعة النهائية أقل بكثير من السرعة الابتدائية، كما يُتوقع عند التباطؤ، لكنها تظل موجبة. باستخدام المحركات النفاثة، يمكن الحفاظ على الدفع العكسي لفترة كافية لإيقاف الطائرة والبدء في تحريكها للخلف. عندها ستكون السرعة نهائية سالبة، وهذا ليس الحال هنا.



**الشكل 2-29** تهبط الطائرة بسرعة ابتدائية 70.0 م\ث وتتباطأ إلى سرعة نهائية 10.0 م\ث قبل التوجه إلى المحطة النهائية. لاحظ أن العجلة سالبة لأن اتجاهها معاكس للسرعة الموجبة.

بالإضافة إلى كونها مفيدة في حل المسائل، فإن المعادلة  $v = v_0 + at$  تعطينا رؤى عن العلاقات بين السرعة والتسارع والزمن. من ذلك يمكننا أن نرى، على سبيل المثال:

- تعتمد السرعة النهائية على مقدار التسارع ومدة استمراره
- إذا كان التسارع صفراً، فإن السرعة النهائية تساوي السرعة الابتدائية ( $v = v_0$ ) كما هو متوقع (أي السرعة ثابتة)
- إذا كانت  $a$  سالبة، فإن السرعة النهائية أقل من السرعة الابتدائية.

(تتلاءم كل هذه الملاحظات مع حدسنا، ومن المفيد دائماً فحص المعادلات الأساسية بحدسنا وخبراتنا للتحقق أنها تصف الطبيعة بدقة حقاً).

#### عمل روابط: الصلة بالعالم الحقيقي



**الشكل 2-30** مكوك الفضاء إنديفور ينطلق من مركز فضاء كيندي في فبراير 2010  
(credit: Matthew Simantov, Flickr)

الصاروخ الباليستي انتركونتيننتال (ICBM) متوسط تسارعه أكبر من تسارع مكوك الفضاء ويحقق سرعة أكبر في أول دقيقة أو دقيقتين من الانطلاق (زمن احتراق ICBM الفعلي سري – الصواريخ ذات زمن الاحتراق القصير من الصعب أن يدمرها العدو). مكوك الفضاء يحقق سرعة نهائية أكبر، حتى يصل إلى مدار الأرض، يفعل هذا بالتسارع لفترة أطول.

### حساب الموضع النهائي عندما تكون السرعة متغيرة ( $a \neq 0$ )

عند دمج المعادلتين في الأعلى نحصل على معادلة ثالثة والتي تمكننا من حساب الموضع النهائي لجسم ذو عجلة ثابتة. نبدأ بـ

2.37

$$v = v_0 + at$$

بإضافة  $v_0$  لكلا الجانبين والقسمة على 2، نحصل على

2.38

$$\frac{v_0 + v}{2} = v_0 + \frac{1}{2}at$$

حيث إن  $\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$  للتسارع الثابت، إذاً

2.39

$$\bar{v} = v_0 + \frac{1}{2}at$$

نعوض عن  $\bar{v}$  في معادلة الإزاحة،  $x = x_0 + \bar{v}t$ ، نحصل على

2.40

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (a \text{ ثابتة})$$

### مثال 10-2

حساب الإزاحة لكائن متسارع: متسابقون في سباق سحب

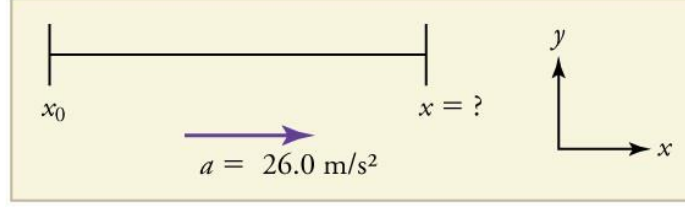
يحقق المتسابقون في سباق السحب عجلة متوسطة  $26.0 \text{ m/s}^2$ . افترض أن متسابق منهم يتسارع من سكون بهذا المعدل لـ  $5.56 \text{ s}$ . إلى أي بعد يصل؟



الشكل 31-2 طيار الجيش الأمريكي يبدأ السباق باحتراق محكوم.  
(credit: Lt. Col. William Thurmond. Photo Courtesy of U.S. Army.)

طريقة الحل

ارسم مخطط للمسألة.



الشكل 2-32

يجب أن نحدد الإزاحة  $x$ . إذا اعتبرنا  $x_0$  صفر. (فكر في الأمر كما لو أننا على خط البداية - الذي يمكن أن يكون في أي مكان، ونسميه 0 ونقيس جميع المواضع بالنسبة له). يمكننا استخدام المعادلة  $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  بمجرد تحديد  $v_0$ ،  $a$  و  $t$  من نص المسألة.

### الحل

1. حدد القيم المعلومة. بدءًا من الراحة يعني أن  $v_0 = 0$ ،  $a$  تساوي  $26.0 \text{ m/s}^2$  و  $t$  تساوي 5.56 ثانية.

2. عوض عن القيم المعلومة في المعادلة واحسب المجهول  $x$ :

2.41

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

بما أن الموضع الأولي والسرعة الأولية كل من هما يساوي صفر، نحصل على

2.42

$$x = \frac{1}{2} a t^2$$

التعويض بقيمتي  $a$  و  $t$  يعطينا

2.43

$$x = \frac{1}{2} \left( 26.0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (5.56 \text{ s})^2$$

الناتج يكون

2.44

$$x = 402 \text{ m}$$

### المناقشة

إذا حولنا 402 م إلى أميال، فسنجد أن المسافة المقطوعة قريبة جدًا من ربع ميل، وهي المسافة القياسية لسباقات السحب. لذا فإن الجواب معقول. هذه إزاحة مثيرة للإعجاب في 5.56 ثانية فقط، ولكن يمكن لمتسابق الدرجة الأولى أن يقطعوا ربع ميل في زمن أقل من هذا.

ما الذي يمكننا تعلمه أيضًا من فحص المعادلة  $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  ؟ نرى أن:

- الإزاحة تعتمد على مربع الوقت المنقضي عندما لا يكون التسارع صفر. في المثال 2-10، لا تغطي المركبة سوى ربع المسافة الإجمالية في النصف الأول من الزمن المنقضي.

- إذا كان التسارع صفر، فإن السرعة الابتدائية تساوي متوسط السرعة ( $v_0 = \bar{v}$ ) و  
 $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  تصبح  $x = x_0 + v_0 t$

### حساب السرعة المتجهة النهائية عندما لا تكون السرعة المتجهة ثابتة ( $a \neq 0$ )

معادلة رابعة مفيدة يمكن الحصول عليها من تلاعب جبري آخر في المعادلات السابقة. إذا حللنا المعادلة  $v = v_0 + at$  لحساب  $t$  نحصل على

2.45

$$t = \frac{v - v_0}{a}$$

بالتعويض بهذا و  $\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$  في  $x = x_0 + \bar{v}t$  نحصل على

2.46

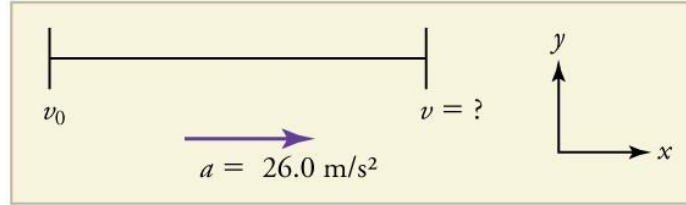
$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \quad (a \text{ ثابتة})$$

## مثال 11-2

حساب السرعة النهائية لمتسابق السحب في المثال 10-2 دون استخدام معلومات عن الزمن.

طريقة الحل

ارسم مخطط.



الشكل 33-2

المعادلة  $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$  مناسبة تمامًا لهذه المهمة؛ لأنها تربط السرعات والعجلة والإزاحة ولا تتطلب أي معلومات عن الزمن.

عوض بالقيم المعروفة في المعادلة

الحل

1. حدد القيم المعروفة. نعلم أن  $v_0 = 0$ ، حيث إن متسابق السحب يبدأ من السكون. بعدها نلاحظ أن  $x - x_0 = 402 \text{ m}$  (هذه كانت إجابة مثال 10-2). أخيرًا، متوسط العجلة  $a = 26.0 \text{ m/s}^2$ .
2. عوض بالقيم المعروفة في المعادلة  $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$  واحسب  $v$ .

2.47

$$v^2 = 0 + 2 \left( 26.0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (402 \text{ m})$$

وهكذا

2.48

$$v^2 = 2.09 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

لنحصل على  $v$ ، نأخذ الجذر التربيعي:

2.49

$$v = \sqrt{2.09 \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 145 \text{ m/s}$$

### المناقشة

145 م \ ث حوالي 522 كم \ ساعة أو حوالي 324 ميل \ ساعة، ولكن حتى هذه السرعة الفائقة أقل من الرقم القياسي لربع ميل. لاحظ أيضًا أن الجذر التربيعي له قيمتان؛ أخذنا القيمة الموجبة للإشارة إلى السرعة في نفس اتجاه العجلة.

فحص المعادلة  $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$  يمكن أن ينتج المزيد من الرؤى حول العلاقات العامة بين الكميات الفيزيائية:

- تعتمد السرعة النهائية على مقدار العجلة والمسافة التي موجودة خلالها
- في حالة التباطؤ الثابت، لا تتوقف السيارة التي تسير بضعف السرعة بعد ضعف المسافة ببساطة؛ فهي تقطع مسافة أطول للتوقف. (لهذا السبب تُقلل مناطق السرعة بالقرب من المدارس).

### وضع المعادلات معًا

في الأمثلة التالية، نستكشف أكثر الحركة أحادية البعد، ولكن في المواقف التي تتطلب معالجة جبرية أكثر. تعطي الأمثلة أيضًا فكرة عن تقنيات حل المسائل. يوفر المربع أدناه مرجعًا سهلاً للمعادلات المطلوبة.



### ملخص معادلات الكينماتيكا (للعجلة الثابتة)

2.50
2.51
2.52
2.53
2.54

$$x = x_0 + \bar{v}t$$

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$$

$$v = v_0 + at$$

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

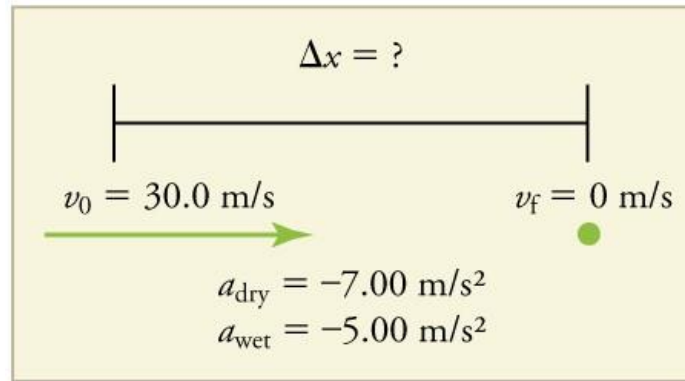
$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

### مثال 12-2

حساب الإزاحة: كم المسافة التي تقطعها السيارة قبل أن تتوقف؟  
على خرسانة جافة، تتباطأ سيارة بمعدل  $7.00 \text{ m/s}^2$  بينما على خرسانة رطبة تتباطأ بمعدل  $5.00 \text{ m/s}^2$ .  
فقط. احسب المسافات اللازمة لإيقاف سيارة تتحرك بسرعة  $30.0 \text{ m/s}$  (حوالي  $110 \text{ km/h}$ ) (أ) على  
الخرسانة الجافة و (ب) على الخرسانة الرطبة. (ج) كرر كلا الحسابين، لإيجاد الإزاحة من النقطة التي يرى فيها  
السائق إشارة المرور تتحول إلى اللون الأحمر، مع مراعاة وقت رد فعله البالغ  $0.500$  ثانية لوضع قدمه على  
الفرامل.

#### طريقة الحل

ارسم مخطط.



الشكل 34-2

من أجل تحديد المعادلات الأفضل للاستخدام، نحتاج إلى سرد جميع القيم المعروفة وتحديد ما نحتاج إلى حله بالضبط. سنعمل ذلك بشكل صريح في الأمثلة العدة التالية، باستخدام جداول.

الحل ل (أ)

1. حدد القيم المعلومة وما نريد حسابه. نحن نعلم أن  $a = -7.00 \text{ m/s}^2$ ،  $v = 0$ ،  $v_0 = 30.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  سالبة لأنها في اتجاه معاكس للسرعة). نعتبر  $x_0$  تساوي صفر. نريد حساب الإزاحة  $\Delta x$  أو  $x - x_0$ .

2. حدد المعادلة التي ستساعد في حل المسألة. أفضل معادلة للاستخدام

2.55

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

هذه المعادلة هي الأفضل لأنها تتضمن مجهولاً واحداً فقط،  $x$  نعرف قيم جميع المتغيرات الأخرى في هذه المعادلة. (هناك معادلات أخرى من شأنها أن تمكننا من حساب  $x$  لكنهم يتطلبون منا معرفة وقت التوقف الذي لا نعرفه  $t$ . يمكننا استخدامها، ولكنها تتطلب حسابات إضافية).

3. أعد ترتيب المعادلة لحساب  $x$ .

2.56

$$x - x_0 = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

4. عوض بالقيم المعلومة

2.57

$$x - 0 = \frac{0^2 - \left(30.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(-7.00 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}$$

وهكذا

2.58

$$x = 64.3 \text{ m على الخرسانة الجافة}$$

**الحل لـ(ب)**

يمكن حل هذا الجزء بنفس الطريقة تمامًا مثل الجزء أ. والفرق الوحيد هو أن التباطؤ  $-5.00 \text{ m/s}^2$ . والنتيجة

2.59

$$x_{\text{ميل}} = 90.0 \text{ m}$$

**الحل لـ(ج)**

بمجرد أن يتفاعل السائق، تكون مسافة التوقف نفسها كما في الجزأين أ وب للخرسانة الجافة والرطبة. للإجابة على هذا السؤال، نحتاج إلى حساب المسافة التي تقطعها السيارة خلال وقت رد الفعل، ثم نضيف ذلك إلى مسافة وقت التوقف. من المعقول أن نفترض أن السرعة تظل ثابتة أثناء وقت رد فعل السائق.

1. حدد القيم المعلومة وما نريد إيجاده. نعرف أن  $\bar{v} = 30.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ، رد الفعل  $t$ ، رد الفعل  $a$ . نعتبر

رد الفعل  $x_0 = 0$  تساوي 0. نريد إيجاد  $x$ .

2. حدد أفضل معادلة لاستخدامها.  $x = x_0 + \bar{v}t$  جيدة؛ القيمة الوحيدة غير المعروفة هي  $x$  وهي ما نريد معرفتها.

3. عوض بالقيم المعلومة في المعادلة.

2.60

$$x = 0 + \left(30.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(0.500 \text{ s}) = 15.0 \text{ m}$$

هذا يعني أن السيارة تسافر 15.0 مترًا بينما يستجيب السائق، مما يجعل إجمالي الإزاحات في الحالتين (الخرسنة الجافة والرطبة) أكبر بمقدار 15.0 مترًا مما لو استجاب على الفور.

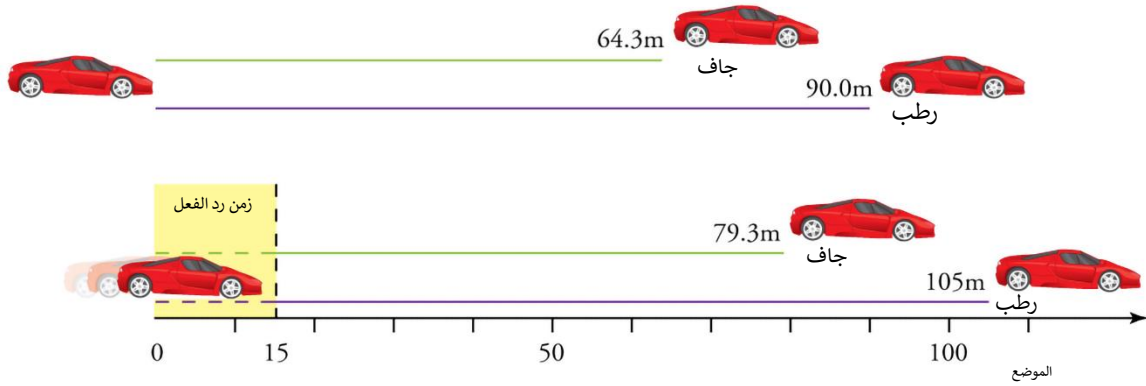
4. أضف الإزاحة خلال وقت رد الفعل (الاستجابة) إلى الإزاحة خلال الكبح.

2.61

$$x_{\text{الكبح}} + x_{\text{رد الفعل}} = x_{\text{الكلية}}$$

أ- 64.3 م + 15.0 م = 79.3 م في الحالة الجافة

ب- 90.0 م + 15.0 م = 105 م في الحالة الرطبة



**الشكل 2-35** تختلف المسافة اللازمة لإيقاف السيارة اختلافًا كبيرًا، اعتمادًا على حالة الطريق وزمن رد فعل السائق. تظهر هنا مسافات الكبح للطريقين الجاف والرطب، كما حسبت في هذا المثال، لسيارة تسير مبدئيًا بسرعة 30.0 م/ث. يظهر أيضًا إجمالي المسافات المقطوعة من النقطة التي يرى فيها السائق الضوء يتحول إلى اللون الأحمر، بافتراض أن وقت رد الفعل 0.500 ثانية.

### المناقشة

يبدو أن الإزاحة الموجودة في هذا المثال معقولة لإيقاف سيارة سريعة الحركة. يجب أن يستغرق الأمر وقتًا أطول لإيقاف السيارة على الطريق الرطب من الطريق الجاف. من المثير للاهتمام أن وقت رد الفعل يضيف بشكل كبير إلى الإزاحة. لكن الأهم من ذلك، النهج العام لحل المسائل. نحدد القيم المعروفة والكميات المراد تحديدها ثم نجد المعادلة المناسبة. غالبًا ما يكون هناك أكثر من طريقة لحل المسألة. يمكن في الواقع حل الأجزاء المختلفة من هذا المثال بطرق أخرى، لكن الحلول المقدمة أعلاه هي الأقصر.

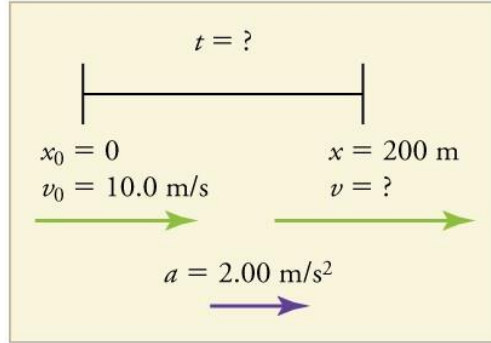
## مثال 13-2

حساب الزمن: سيارة تدخل الطريق السريع

افترض أن سيارة تدخل طريق سريع من طريق منحدر 200 متر. إذا كانت السرعة الابتدائية 10 مترًا ثانية وتتسارع  $2.00 \text{ m/s}^2$ ، كم من الوقت تستغرق لقطع المنحدر؟ (مثل هذه المعلومات مفيدة لمهندسي المرور)

طريقة الحل

ارسم مخطط.



الشكل 36-2

يطلب منا أن نجد الزمن  $t$ . كما في السابق، نحدد الكميات المعروفة من أجل اختيار علاقة فيزيائية مناسبة (أي، معادلة ذات مجهول واحد،  $t$ ).

الحل

1. حدد القيم المعلومة وما نريد أن نجده. نحن نعرف أن  $x = 200 \text{ m}$ ،  $a = 2.00 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ،  $v_0 = 10 \text{ m/s}$

2. نريد حساب  $t$ . اختر أفضل معادلة.  $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  مناسبة لأن المجهول الوحيد في المعادلة هو المتغير  $t$  والذي نريد أن نجده.

3. سنحتاج إلى إعادة ترتيب المعادلة لحساب  $t$ . في هذه الحالة، سيكون من الأسهل التعويض بالقيم المعلومة أولاً.

2.62

$$200 \text{ m} = 0 \text{ m} + \left(10.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) t + \frac{1}{2} \left(2.00 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) t^2$$

4. بسط المعادلة. وحدات متر (م) تتلشى لأنها في كل حد. يمكننا جعل وحدات الثواني تتلشى عن طريق أخذ  $t = t \text{ s}$  حيث  $t$  مقدار الزمن و  $\text{s}$  الوحدة. بفعل هذا، يتبقى لنا

2.63

$$200 = 10t + t^2$$

5. استخدم الصيغة التربيعية لحساب  $t$ .

أ- أعد ترتيب المعادلة لجعل جانب يساوي صفر

2.64

$$t^2 + 10t - 200 = 0$$

هذه معادلة تربيعية لها الصورة

2.65

$$at^2 + bt + c = 0$$

حيث الثوابت  $a = 1.00$  ،  $b = 10.0$  ،  $c = -200$ .

ب- حل هذه المعادلة يُعطى باستخدام الصيغة التربيعية:

2.66

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

تعطينا هذه حلين لـ  $t$ ، هما

2.67

$$t = 10.0 , -20.0$$

في هذه الحالة، الزمن  $t = t$  بالثواني، أو

2.68

$$t = 10.0 \text{ s} , -20.0 \text{ s}$$

القيمة السالبة للزمن غير معقولة، لأنها تعني أن الحدث حدث قبل 20 ثانية من بدء الحركة. يمكننا تجاهل هذا الحل. وهكذا،

2.69

$$t = 10.0 \text{ s}$$

### المناقشة

عندما تحتوي المعادلة على مربع غير معلوم، سيكون هناك حلان. في بعض المسائل يكون كلا الحلين ذا مغزى، ولكن في مسائل أخرى، مثلما ورد أعلاه، يكون حل وحيد معقول. تبدو الإجابة 10.0 ثواني معقولة بالنسبة لطريق سريع نموذجي على منحدر.

---

بإعادة أساسيات الكينماتيكا، يمكننا الانتقال إلى العديد من الأمثلة والتطبيقات الأخرى المثيرة للاهتمام. خلال دراسة الكينماتيكا، لقد لمحننا نهجًا عامًا لحل المسائل ينتج عنه إجابات صحيحة ورؤى عن العلاقات الفيزيائية. يناقش أساسيات حل المسائل أساسيات حل المسائل وتوضح النهج الذي سيساعدك على النجاح في هذه المهمة التي لا تقدر بثمن.

### عمل روابط: تجربة منزلية - أخبار عاجلة

لقد استخدمنا وحدات SI، المتر في الثانية المربعة، لوصف بعض الأمثلة على تسارع أو تباطؤ السيارات والعدائين والقطارات. لتحصل على إحساس أفضل بهذه الأرقام، يمكن قياس تباطؤ الكبح لسيارة تتوقف ببطء (بطريقة آمنة). تذكر أن متوسط التسارع  $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ . أثناء السفر في السيارة، اضغط على الفرامل ببطء عند إشارة التوقف. اطلب من راكب ملاحظة السرعة الأولية بالأميال في الساعة والوقت المستغرق (بالثواني) للتوقف. من هذا، احسب التباطؤ بالأميال في الساعة في الثانية. حول هذا إلى متر لكل ثانية مربعة وقارن مع التباطؤات الأخرى المذكورة في هذا الفصل. احسب المسافة المقطوعة أثناء الكبح.

### تحقق فهمك

صاروخ يتسارع بمعدل  $20 \text{ m/s}^2$  خلال الإطلاق. كم من الوقت يستغرق الصاروخ للوصول إلى سرعة 400 م\ث؟

### الحل

للإجابة عن هذا، اختر معادلة تسمح لنا بإيجاد الزمن  $t$ ، القيم المعروفة  $a$  و  $v_0$  و  $v$ .

2.70

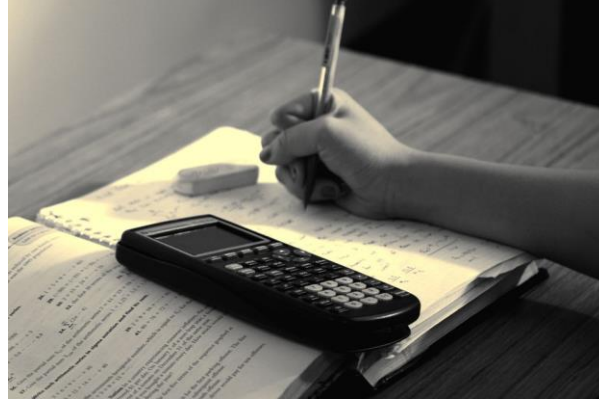
$$v = v_0 + at$$

أعد الترتيب واحسب  $t$ .

2.71

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{400 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{20 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 20 \text{ s}$$

## 6-2 أساسيات حل المسائل للكينماتيكا أحادية البعد



**الشكل 2-37** مهارات حل المسائل ضرورية لنجاحك في الفيزياء. (credit: scui3asteveo, Flickr)

من الواضح أن مهارات حل المسائل ضرورية للنجاح في دورة عن الفيزياء. والأهم من ذلك، أن القدرة على تطبيق مبادئ فيزيائية واسعة، وعادة ما تمثلها المعادلات، على مواقف محددة هي شكل قوي جدًا من المعرفة. إنه أقوى بكثير من حفظ قائمة من الحقائق. يمكن تطبيق المهارات التحليلية وقدرات حل المسائل على المواقف الجديدة، بينما لا يمكن جعل قائمة الحقائق طويلة بما يكفي لاحتواء كل الظروف الممكنة. هذه المهارات التحليلية مفيدة لحل المسائل في هذا النص وتطبيق الفيزياء في الحياة اليومية والمهنية.

### خطوات حل المسائل

على الرغم من عدم وجود طريقة بسيطة تحل كل المسائل، فإن الإجراءات العامة التالية تسهل حل المسائل وتوضح معناها. مطلوب قدر معين من الإبداع والبصيرة كذلك.

#### الخطوة 1

افحص الموقف لتحديد المبادئ الفيزيائية المتضمنة فيه. غالبًا ما يساعد رسم مخطط بسيط في البداية. ستحتاج أيضًا إلى تحديد الاتجاه الموجب واطهار ذلك في الرسم التخطيطي الخاص بك. بمجرد تحديد المبادئ الفيزيائية، يصبح العثور على المعادلات التي تمثل تلك المبادئ وتطبيقها أسهل بكثير. مع أن العثور على المعادلة الصحيحة أمر ضروري، تذكر، دائمًا، أن المعادلات تمثل المبادئ الفيزيائية وقوانين الطبيعة والعلاقات بين الكميات الفيزيائية. دون فهم المسألة، فإن الحل العددي لا معنى له.

#### الخطوة 2

اصنع قائمة بالقيم المعلومة أو ما يمكن استنتاجه من المسألة. تُذكر العديد من المسائل بإيجاز شديد وتتطلب بعض الفحص لتحديد المعطيات. الرسم يمكن أن يكون مفيدًا جدًا في هذه المرحلة. تحديد المعطيات له أهمية خاصة في تطبيق الفيزياء على مواقف العالم الحقيقي. تذكر أن كلمة "متوقف" تعني أن السرعة تساوي صفرًا، ويمكننا غالبًا اعتبار الوقت الأولي والموضع الأولي صفرًا.

#### الخطوة 3

حدد بالضبط ما نحتاج حسابه في المسألة (حدد المجهول). في المسائل المعقدة، على وجه الخصوص، ليس من الواضح دائمًا ما المطلوب إيجاداه أو في أي ترتيب. عمل قائمة يمكن أن يساعد.

## الخطوة 4

ابحث عن معادلة أو مجموعة معادلات التي يمكن أن تساعدك في حل المسألة. ستساعدك قائمة الأشياء المعروفة والمجهولة الخاصة بك في فعل هذا. من الأسهل العثور على معادلات تحتوي على مجهول واحد فقط؛ أي إن جميع المتغيرات الأخرى معروفة، لذا يمكنك بسهولة حساب هذا المجهول. إذا كانت المعادلة تحتوي على أكثر من مجهول، فحينئذٍ تكون هناك حاجة إلى معادلة إضافية لحل المسألة. في بعض المسائل، يجب حساب العديد من الأشياء المجهولة للوصول إلى ما نحتاج. في مثل هذه المسائل، من المهم بشكل خاص مراعاة المبادئ الفيزيائية لتجنب الغرق في بحر من المعادلات. قد تضطر إلى استخدام معادلتين مختلفتين (أو أكثر) للحصول على الإجابة النهائية.

## الخطوة 5

عوّض بالمعطيات مع وحداتها في المعادلة المناسبة، واحصل على حلول عددية كاملة بالوحدات. تنتج هذه الخطوة الإجابة العددية؛ توفر أيضًا فحصًا للوحدات الذي يمكن أن يساعدك في العثور على الأخطاء. إذا كانت وحدات الإجابة غير صحيحة، فهذا يعني حدوث خطأ. ومع ذلك، كن حذرًا من أن الوحدات الصحيحة لا تضمن صحة الجزء العددي من الإجابة.

## الخطوة 6

تحقق الإجابة لمعرفة ما إذا كانت معقولة: هل هي منطقية؟ هذه الخطوة الأخيرة مهمة للغاية - هدف الفيزياء وصف الطبيعة بطريقة صحيحة. لمعرفة ما إذا كانت الإجابة معقولة أم لا، تحقق المقدار والإشارة، بالإضافة إلى الوحدات. سوف يتحسن حكمك عندما تحل المزيد والمزيد من مسائل الفيزياء، وسيصبح من الممكن لك الحكم أفضل فيما يتعلق بما إذا كانت الإجابة على مسألة ما تصف الطبيعة جيدًا. هذه الخطوة تُرجع المسألة إلى معناها العقلي. إذا كان بإمكانك الحكم على الإجابة، فلديك فهم أعمق للفيزياء من مجرد القدرة على حل مسألة رياضية. عند حل المسائل، غالبًا ما ننفذ هذه الخطوات بترتيب مختلف، ونميل أيضًا إلى عمل عدة خطوات في آن واحد. لا يوجد طريقة واحدة تعمل في كل مرة. ينمو الإبداع والبصيرة مع الخبرة، وتصبح أساسيات حل المسائل تلقائية تقريبًا. طريقة للتدريب حل أمثلة الكتاب بنفسك وأنت تقرأ. طريقة أخرى حل أكبر عدد ممكن من مسائل نهاية الفصل، بدءًا من أسهلها لبناء ثقة ثم التقدم إلى الأصعب. بمجرد أن تنخرط في الفيزياء، سترأها في كل مكان من حولك، ويمكنك البدء في تطبيقها على المواقف التي تواجهها خارج الفصل الدراسي، تمامًا كما هو الحال في العديد من التطبيقات في هذا النص.

## نتائج غير معقولة

يجب أن تصف الفيزياء الطبيعة بشكل صحيح. بعض المسائل لها نتائج غير معقولة لأن أحد الافتراضات غير معقول أو لأن بعضها غير متسق مع الآخرين. على سبيل المثال، إذا كان شخص يبدأ سباق يتسارع لمدة 100 ثانية، فإن سرعته النهائية ستكون 40 م/ث (حوالي 150 كم/ساعة) - من الواضح أن هذا غير معقول؛ لأن الوقت البالغ 100 ثانية افتراض غير معقول. الفيزياء صحيحة بشكل ما، لكن تحتاج لأكثر من مجرد التلاعب بالمعادلات لوصف الطبيعة بشكل صحيح. التحقق من نتيجة المسألة، لمعرفة ما إذا كانت معقولة، يساعد أكثر من مجرد الكشف عن الأخطاء في حل المسائل - إنه ينمي حدس الحكم على وصف الطبيعة: أهو صحيح أم لا.

استخدم الطرق التالية لتحديد إذا ما كانت الإجابة معقولة، وإذا لم تكن كذلك، حدد السبب



## الخطوة 1

حل المسألة باستخدام الطرق الموضحة في الأمثلة المحلولة في النص. في المثال الوارد في الفقرة السابقة، يمكنك تحديد المعطيات، وهي التسارع والزمن. استخدام المعادلة أدناه لحساب السرعة النهائية المجهولة. هكذا

2.72

$$v = v_0 + at = 0 + \left(0.40 \frac{m}{s^2}\right) (100 s) = 40 m/s$$

## الخطوة 2

تحقق ما إذا كان الجواب معقول. هل هو كبير جدًا أو صغير جدًا أو يحتوي على إشارة خاطئة، أو وحدات غير صحيحة، ...؟ في هذه الحالة، قد تحتاج إلى تحويل المتر في الثانية إلى وحدة مألوفة أكثر، مثل ميل في الساعة.

2.73

$$\left(\frac{40 m}{s}\right) \left(\frac{3.28 ft}{m}\right) \left(\frac{1 mi}{5280 ft}\right) \left(\frac{60 min}{1 h}\right) = 89 mph$$

السرعة أكبر بأربعة أضعاف سرعة الركض الممكنة لأي شخص - لذا فهي كبيرة جدًا.

## الخطوة 3

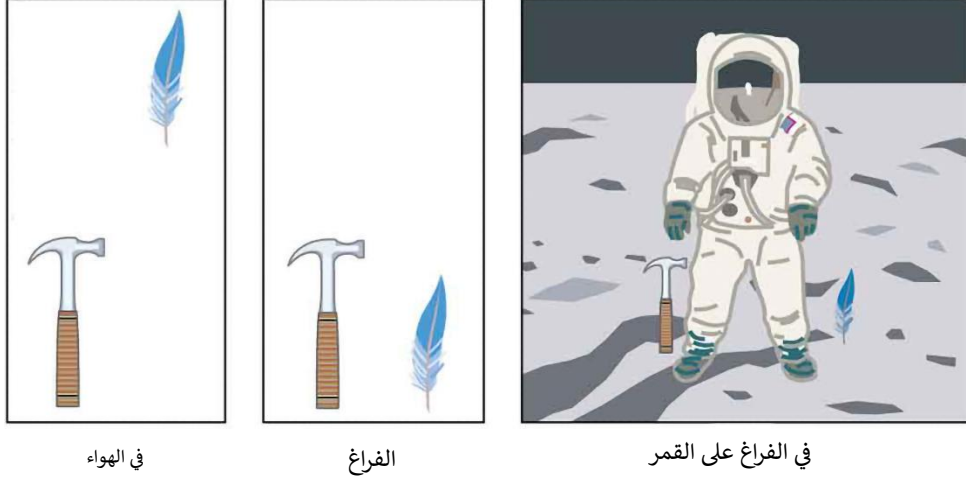
إذا كانت الإجابة غير معقولة، فابحث عن السبب. في مثال العداء، هناك افتراضان فقط مشكوك فيهما. قد يكون التسارع كبيرًا جدًا أو الوقت كبير جدًا. تحقق أولاً العجلة وفكر فيما يعنيه العدد. إذا تسارع شخص ما  $0.40 m/s^2$ ، فإن سرعته تزداد بمقدار  $0.4 m/s$  كل ثانية. هل يبدو هذا معقولًا؟ إذا كان الأمر كذلك، يجب أن يكون الزمن كبير جدًا. لا يمكن لأي شخص أن يتسارع بمعدل ثابت قدره  $0.40 m/s^2$  لـ 100 ثانية (دقيقتان تقريبًا).

## 7-2 الأجسام الساقطة

الأجسام الساقطة فئة مثيرة للاهتمام من مسائل الحركة. على سبيل المثال، يمكننا تقدير عمق عمود حفر المنجم عن طريق إسقاط صخرة فيه والاستماع إلى الصخرة تضرب القاع. خلال تطبيق الكينماتيكا المدروسة حتى الآن على الأجسام الساقطة، يمكننا دراسة بعض المواقف المثيرة للاهتمام ومعرفة الكثير عن الجاذبية في أثناء هذه العملية.

### الجاذبية

الحقيقة الأكثر بروزًا وغير المتوقعة حول الأجسام الساقطة أنه إذا كانت مقاومة الهواء والاحتكاك مهملين، فعندئذٍ تسقط جميع الأجسام نحو مركز الأرض بنفس التسارع الثابت، بغض النظر عن الكتلة. هذه الحقيقة المعروفة تجريبيًا غير متوقعة، لأننا معتادون على تأثيرات مقاومة الهواء والاحتكاك لدرجة أننا نتوقع أن تسقط الأجسام الخفيفة أبطأ من الأجسام الثقيلة.



**الشكل 2-38** ستسقط المطرقة والريشة بنفس التسارع الثابت إذا اعتبرت مقاومة الهواء مهملة. هذه خاصية عامة للجاذبية ليست فريدة من نوعها على الأرض، كما أوضح رائد الفضاء ديفيد آر سكوت على سطح القمر في عام 1971، حيث التسارع بسبب الجاذبية  $1.67 \text{ m/s}^2$  فقط.

في العالم الحقيقي، يمكن أن تتسبب مقاومة الهواء في سقوط جسم أخف أبطئ من جسم أثقل له نفس الحجم. ستصل كرة التنس إلى الأرض بعد كرة البيسبول مع أنهما أسقطا في نفس اللحظة. (قد يكون من الصعب ملاحظة الاختلاف إذا لم يكن الارتفاع كبيرًا). مقاومة الهواء تعارض حركة الجسم عبر الهواء، والاحتكاك بين الأشياء - مثل الحجر المُسَقَط في حمام السباحة - يعارض أيضًا حركتها. بالنسبة للمواقف المثالية في الفصول القليلة الأولى، يُعرف الجسم الساقط دون مقاومة الهواء أو الاحتكاك بأنه في حالة **سقوط الحر**.

تتسبب قوة الجاذبية في سقوط الأجسام باتجاه مركز الأرض. لذلك يسمى تسارع سقوط الأجسام الحر بتسارع الجاذبية. تسارع الجاذبية ثابت، مما يعني أنه يمكننا تطبيق معادلات الحركة على أي جسم ساقط حيث مقاومة الهواء والاحتكاك مهملتان. هذا يفتح لنا فئة واسعة من المواقف المثيرة للاهتمام. **التسارع بسبب الجاذبية مهم جدًا لدرجة أنه يُعطى رمزه الخاص  $g$ . إنه ثابت في أي مكان على الأرض وقيمته المتوسطة**

2.74

$$g = 9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

مع أنه يختلف من  $9.78 \text{ m/s}^2$  إلى  $9.83 \text{ m/s}^2$ ، اعتمادًا على موقعك على السطح والتكوينات الجيولوجية تحتك والتضاريس المحلية، فإن متوسط قيمته  $9.80 \text{ m/s}^2$  ستستخدم في هذا النص، ما لم ينص على خلاف ذلك. اتجاه التسارع بسبب الجاذبية للأسفل (نحو مركز الأرض). في الواقع، يعرف اتجاهه ما نسميه اتجاه رأسي. لاحظ أن التسارع  $a$  في معادلات الحركة قيمته  $+g$  أو  $-g$  اعتمادًا على نظام الإحداثيات. إذا اعتبرنا الاتجاه لأعلى هو الاتجاه السالب، عندئذٍ  $a = -g = -9.80 \text{ m/s}^2$  وإذا حددنا الاتجاه لأسفل الاتجاه الموجب، عندئذٍ  $a = g = 9.80 \text{ m/s}^2$ .

### حركة أحادية البعد تتضمن الجاذبية

أفضل طريقة لرؤية السمات الأساسية للحركة التي تتضمن الجاذبية هي البدء بأبسط المواقف ثم التقدم نحو المواقف الأعقد. لذلك، نبدأ بالتفكير في الحركة المستقيمة لأعلى ولأسفل دون مقاومة الهواء أو الاحتكاك. تعني هذه الافتراضات أن السرعة (إن وجدت) رأسية. إذا سقط الجسم، فإننا نعلم أن السرعة الابتدائية تساوي صفرًا. بمجرد أن ينفصل الجسم عن أي كائن يمسكه، يكون الجسم في حالة سقوط حر. في ظل هذه الظروف، تكون الحركة أحادية البعد ولها تسارع ثابت المقدار  $g$ . سنمثل الإزاحة الرأسية بالمتغير  $y$  والإزاحة الأفقية بالمتغير  $x$ .

## معادلات الحركة للأجسام الساقطة سقوطًا حرًا حيث العجلة -g

2.75
2.76
2.77

$$v = v_0 - gt$$

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$$

$$v^2 = v_0^2 - 2g(y - y_0)$$

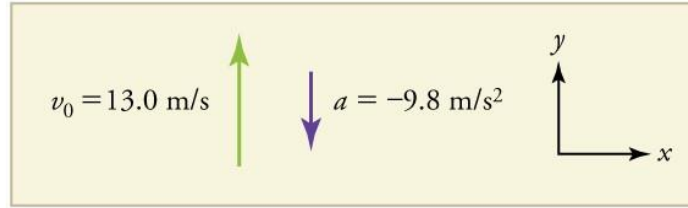
## مثال 14-2

حساب موضع وسرعة جسم ساقط: صخرة مقذوفة لأعلى

شخص يقف على حافة جرف مرتفع يرمي صخرة بشكل مستقيم لأعلى بسرعة ابتدائية 13.0 م/ث. تسقط الصخرة ولا تصطدم بحافة الجرف. احسب موقع الصخرة وسرعتها بعد 1.00 ثانية و2.00 ثانية و3.00 ثانية بعد رميها، مع تجاهل تأثير مقاومة الهواء.

طريقة الحل

ارسم مخطط.



الشكل 39-2

يطلب منا حساب الموضع  $y$  عند أزمنة مختلفة. من المعقول اعتبار الموضع الأولي  $y_0$  صفر. تتضمن هذه المسألة حركة أحادية البعد في الاتجاه الرأسي. نستخدم علامتي الموجب والسالب للإشارة إلى الاتجاه، حيث الأعلى موجب والأسفل سالب. نظرًا لأن الأعلى موجب، والصخرة تقذف لأعلى، يجب أن تكون السرعة الأولية موجبة أيضًا. عجلة الجاذبية لأسفل، وبالتالي سالبة. من المهم أن السرعة الابتدائية والعجلة بسبب الجاذبية لهما إشارتان متعاكستان. تشير الإشارات المتعاكسة إلى أن التسارع الناتج عن الجاذبية يتعارض مع الحركة الأولية وسيبطلها ويعكسها في النهاية.

نظرًا لأننا مطالبون بقيم الموضع والسرعة ثلاث مرات، فسنشير إليها بالرموز  $y_1$  و  $v_1$ ،  $y_2$  و  $v_2$ ،  $y_3$  و  $v_3$ .

حساب الموضع

$y_1$

1. حدد القيم المعروفة. نعلم أن  $y_0 = 0$  و  $v_0 = 13.0$  م/ث و  $a = -g = -9.80$  م/ث<sup>2</sup> و  $t = 1.00$  ث.

2. حدد أفضل معادلة مناسبة للاستخدام. سوف نستخدم  $y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ ، لأنها تتضمن مجهول واحد،  $y$ ، (أو  $y_1$  في حالتنا)، والذي نريد حسابه.

3. عوض عن القيم المعلومة واحسب  $y_1$ .

2.78

$$y_1 = 0 + \left(13.0 \frac{m}{s}\right)(1.00 s) + \frac{1}{2} \left(-9.80 \frac{m}{s^2}\right)(1.00 s)^2 = 8.10 m$$

### المناقشة

الصخرة على ارتفاع 8.10 م فوق نقطة البداية عند  $t = 1.00$  s، حيث إن  $y_1 > y_0$ ، يمكنها أن تتحرك لأعلى أو لأسفل؛ الطريقة الوحيدة لتحديد ذلك؛ هي الحساب ومعرفة ما إذا كانت  $v_1$  موجبة أم سالبة.

### حساب السرعة

1. حدد القيم المعلومة. نحن نعلم أن  $y_0 = 0$  و  $v_0 = 13.0 \frac{m}{s}$  و  $a = -g = -9.80 m/s^2$  و  $t = 1.00$  s. ونعلم أيضا من الحل أعلاه، أن  $y_1 = 8.10$  m.

2. حدد أفضل معادلة للاستخدام. الأبسط هي  $v = v_0 - gt$  (من المعادلة  $v = v_0 + at$ )، حيث  $a$  (تسارع الجاذبية) يساوي  $-g$ .

3. عوض بالقيم المعلومة وحل.

2.79

$$v_1 = v_0 - gt = 13.0 \frac{m}{s} - \left(9.80 \frac{m}{s^2}\right)(1.00 s) = 3.20 m/s$$

### المناقشة

القيمة الموجبة لـ  $v_1$  تعني أن الصخرة مازالت متجهة إلى أعلى عند  $t = 1.00$  s. ومع ذلك، فقد تباطأت من 13.0 م/ث، كما هو متوقع.

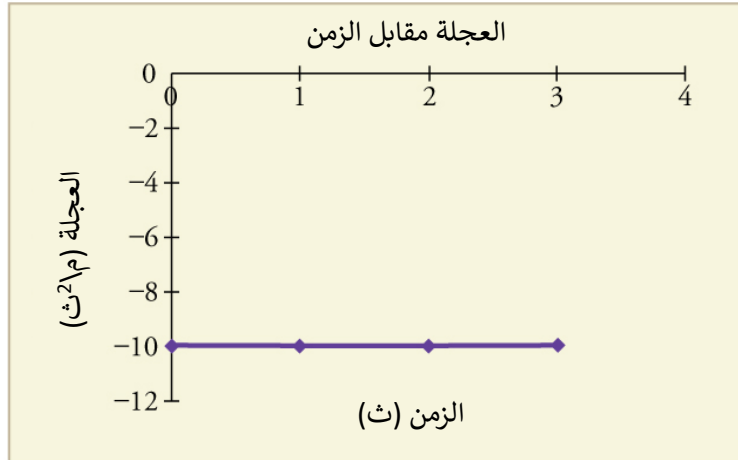
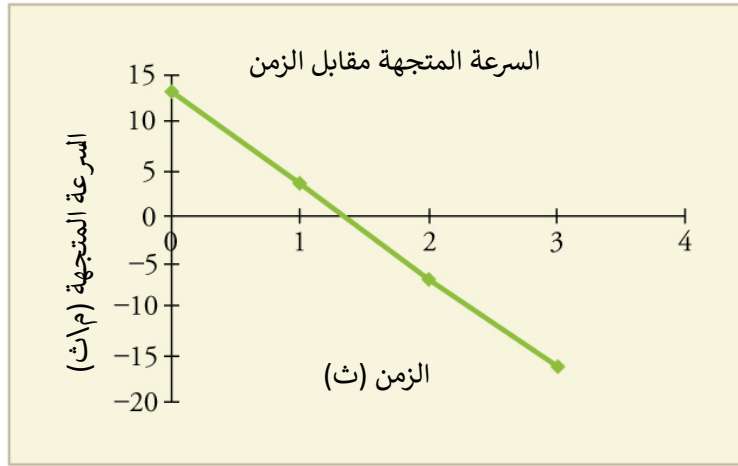
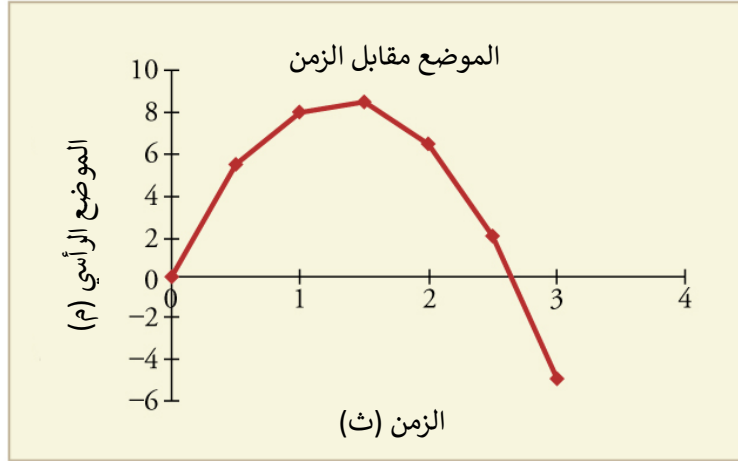
### حساب الأزمنة المتبقية

إجراءات حساب الموضع والسرعة عند  $t = 2.00$  s و  $t = 3.00$  s هي نفس الإجراءات المذكورة أعلاه. ويرد موجز للنتائج في الجدول 1-2 ويرد بيانها في الشكل 2-40.

الزمن t	الموضع y	السرعة المتجهة v	العجلة a
1.00s	8.10 m	3.2 m/s	-9.80 m/s <sup>2</sup>
2.00s	6.40 m	-6.60 m/s	-9.80 m/s <sup>2</sup>
3.00s	-5.10 m	-16.4 m/s	-9.80 m/s <sup>2</sup>

### الجدول 1-2 النتائج

الرسوم البيانية للبيانات تساعدنا على فهمها أكثر.



**الشكل 2-40** الموضع الرأسي والسرعة الرأسية والتسارع الرأسي كل منهم مقابل الزمن لصخرة مقذوفة رأسياً لأعلى عند حافة جرف. لاحظ أن السرعة تتغير خطياً بمرور الوقت وأن التسارع ثابت. **تنبيه سوء فهم!** لاحظ أن الرسم البياني للموضع مقابل الزمن يُظهر الموضع الرأسي فقط. من السهل الحصول على انطباع بأن الرسم البياني يظهر الحركة الأفقية أيضاً؛ الرسم البياني يشبه مسار القذيفة. ولكن هذا ليس الحال هنا؛ المحور الأفقي هو الزمن وليس الفضاء. المسار الفعلي للصخرة في الفضاء هو مستقيم للأعلى وللأسفل.

## المناقشة

تفسير هذه النتائج مهم للغاية. عند زمن 1.00 ثانية، تكون الصخرة فوق نقطة البداية وتتجه لأعلى، نظرًا لأن  $y_1$  و  $v_1$  كلاهما موجب. عند 2.00 ثانية، لا تزل الصخرة فوق نقطة البداية، لكن السرعة السالبة تعني أنها تتحرك إلى أسفل. عند 3.00 s، كلا  $y_3$  و  $v_3$  سالبان، وهذا يعني أن الصخرة تحت نقطة البداية ومستمرة في التحرك إلى أسفل. لاحظ أنه عندما تكون الصخرة عند أعلى نقطة لها (عند 1.5 ثانية)، تكون سرعتها صفرًا، لكن تسارعها لا يزال  $-9.80 \text{ m/s}^2$ . تسارعها  $-9.80 \text{ m/s}^2$  خلال الرحلة كلها؛ خلال تحركها لأعلى وتحركها لأسفل. لاحظ أن قيم  $y$  هي مواضع (أو إزاحات) الصخرة، وليست إجمالي المسافات المقطوعة. أخيرًا، لاحظ أن السقوط الحر ينطبق على الحركة لأعلى وكذلك للأسفل. لكلاهما نفس التسارع؛ التسارع الناتج عن الجاذبية، والذي يظل ثابتًا طوال الوقت. يتدرب رواد الفضاء في طائرات الصفر-جاذبية، على سبيل المثال، على تجربة السقوط الحر في أثناء اتجاههم لأعلى ولأسفل، كما سنناقش بمزيد من التفصيل لاحقًا.

### عمل روابط: تجربة منزلية - وقت رد الفعل

يمكن إجراء تجربة بسيطة لتحديد وقت رد فعلك. اطلب من صديقك أن يضع مسطرة بين إبهامك وسبابتك، مفصولة عنهما بحوالي 1 سم. ضع علامة على الجزء من المسطرة بين إصبعيك. اطلب من صديقك إسقاط المسطرة بشكل غير متوقع وحاول الإمساك بها بإصبعيك. لاحظ القراءة الجديدة على المسطرة. بافتراض أن التسارع بسبب الجاذبية، احسب وقت رد فعلك. كم المسافة التي ستقطعها في سيارة تتحرك بسرعة 30 م/ث إذا كان الوقت الذي تستغرقه قدمك للانتقال من دواسة الوقود إلى الفرامل ضعف وقت رد الفعل هذا قبل أن تتوقف؟

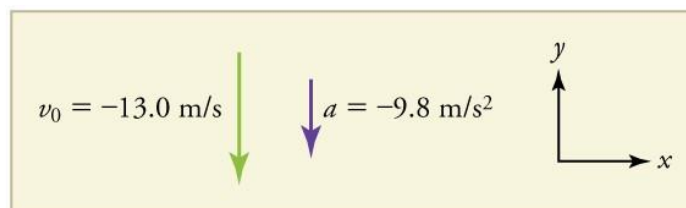
## مثال 15-2

حساب سرعة سقوط جسم: رميت صخرة لأسفل

ماذا يحدث إذا رمى الشخص على الجرف الصخرة لأسفل مباشرةً بدلاً من إلقائها لأعلى؟ لدراسة هذا السؤال، احسب سرعة الصخرة عندما تكون تحت نقطة البداية بـ 5.10 م، ورميت لأسفل بسرعة ابتدائية 13.0 م/ث.

طريقة الحل

ارسم مخطط.



الشكل 41-2

نظرًا لأن الاتجاه لأعلى موجب، فإن الموضع النهائي للصخرة سالب؛ لأنه أسفل نقطة البداية  $y_0$ . وبالمثل، لأن السرعة الابتدائية لأسفل، فهي سالبة، كما هو الحال بالنسبة لعجلة الجاذبية. نتوقع أن السرعة النهائية سالبة؛ لأن الصخرة ستستمر في التحرك للأسفل.

### الحل

1. حدد القيم المعروفة.  $y_0 = 0$  و  $y_1 = -5.10 \text{ m}$  و  $v_0 = -13.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  و  $a = -g = -9.80 \text{ m/s}^2$ .
2. اختر معادلة الحركة الأبسط للحل. المعادلة  $v^2 = v_0^2 + 2a(y - y_0)$  مناسبة؛ لأن المجهول الوحيد فيه هو  $v$ . (سنعوض بـ  $y_1$  عن  $y$ )
3. عوض عن القيم المعروفة

$$v^2 = \left(-13.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 2 \left(-9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (-5.10 \text{ m} - 0 \text{ m}) = 268.96 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

احتفظنا بأرقام معنوية إضافية لأن هذه نتيجة وسيطة.

نأخذ الجذر التربيعي، مع ملاحظة أن الجذر التربيعي يمكن أن يكون موجبًا أو سالبًا ونحصل على

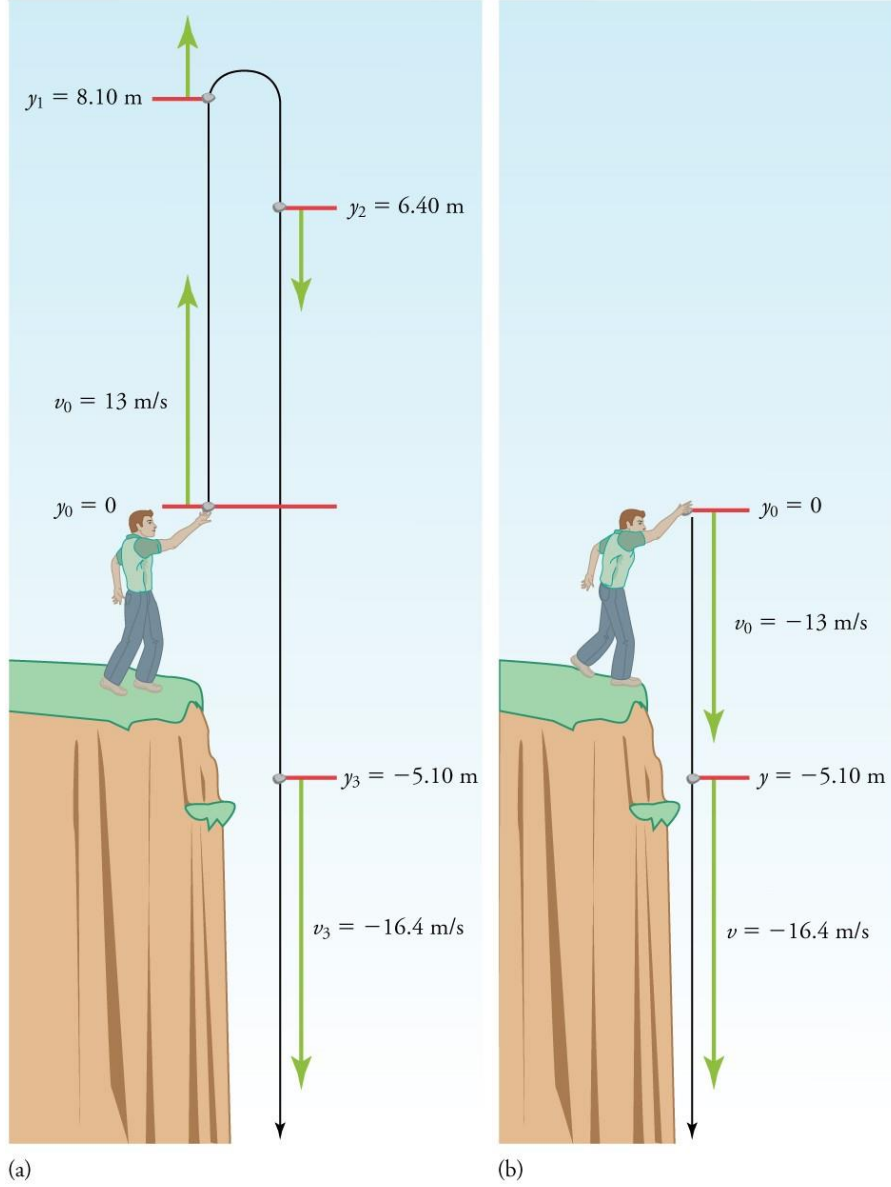
$$v = \pm 16.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

نختار الجذر السالب للإشارة إلى أن الصخرة لا تزال تتجه لأسفل. وهكذا،

$$v = -16.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### المناقشة

لاحظ أن هذه بالضبط السرعة نفسها التي كانت للصخرة عند هذا الموضع عندما رميت لأعلى بشكل مستقيم بنفس السرعة الابتدائية. (انظر المثال 2-14 والشكل 2-42 (a)). هذه ليست صدفة؛ لأننا نأخذ في الاعتبار، فقط، التسارع بسبب الجاذبية، فإن سرعة الجسم الساقط تعتمد فقط على سرعته الابتدائية وموضعه الرأسي بالنسبة لنقطة البداية. على سبيل المثال، إذا حسبنا سرعة الصخرة على ارتفاع 8.10 م فوق نقطة البداية (باستخدام الطريقة من المثال 2-14) عندما تكون السرعة الابتدائية 13.0 م/ث، نحصل على  $\pm 3.20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . كلتا الإشارتان هنا ذاتا مغزى؛ القيمة الموجبة عندما تكون الصخرة عند 8.10 متر وتتجه لأعلى، وتحدث القيمة السالبة عندما تكون الصخرة عند 8.10 متر وتتجه لأسفل. لها نفس السرعة ولكن في الاتجاه المعاكس.



**الشكل 2-42 (أ)** يرمي شخص صخرة لأعلى، كما هو موضح في المثال 2-14. الأسهم هي متجهات السرعة عند الأزمنة 0 و 1.00 و 2.00 و 3.00 s. (ب) يلقي الشخص صخرة مباشرة من جرف بنفس السرعة الأولية كما كان من قبل، كما في المثال 2-15. لاحظ أنه على نفس المسافة تحت نقطة الإطلاق، فإن الصخرة لها نفس السرعة في كلتا الحالتين.


طريقة أخرى للتفكير في الأمر: في المثال 2-14، تُرمى الصخرة بسرعة أولية  $13.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . ترتفع ثم تسقط لأسفل. عندما يكون موضعها  $y = 0$  في الطريق لأسفل، سرعتها  $-13.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . أي إن لها نفس السرعة في طريقها لأسفل كما في طريقها. عندئذ نتوقع أن سرعتها في الموضع  $y = -5.10 \text{ m}$ ، نفسها إذا كانت قد أُلقيت لأعلى بسرعة  $+13.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  أو أُلقيت لأسفل بسرعة  $-13.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . سرعة الصخرة في طريقها لأسفل من  $y = 0$  هي نفسها إذا أُلقيت الصخرة لأعلى أو لأسفل في البداية، طالما أن السرعة التي أُلقيت بها في البداية واحدة.

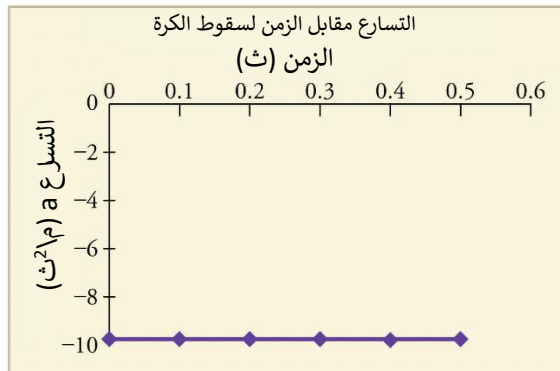
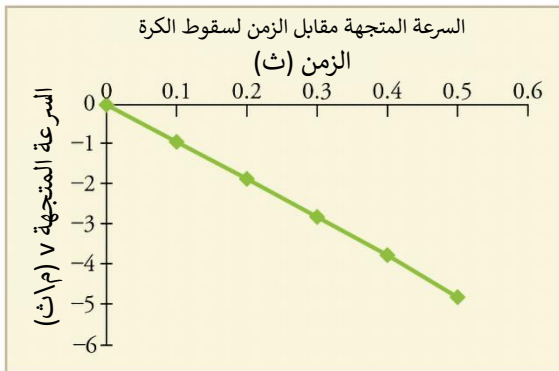
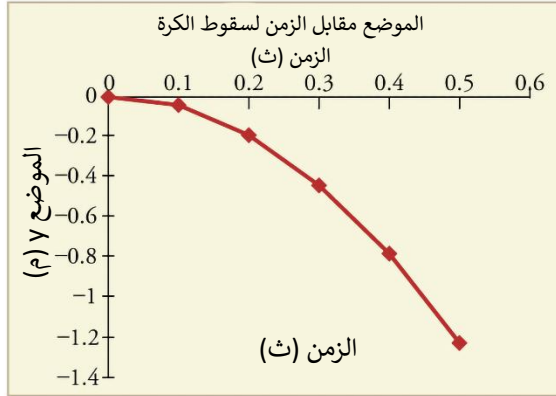


## مثال 2-16

### حساب $g$ من بيانات جسم ساقط

يختلف التسارع الناجم عن جاذبية الأرض قليلاً من مكان إلى آخر، اعتماداً على التضاريس (على سبيل المثال، تختلف الجاذبية إذا كنت على تل أو في وادي) والجيولوجيا تحت السطحية (سواء كانت هناك صخور كثيفة مثل خام الحديد، أو صخور خفيفة مثل الملح تحتك). يمكن حساب التسارع الدقيق بسبب الجاذبية من البيانات المأخوذة في المعامل الفيزيائية. يتم إسقاط جسم، عادةً كرة معدنية حيث مقاومة الهواء لها مهملة، ويُقاس الزمن الذي يستغرقه لسقوط مسافة معلومة. انظر، على سبيل المثال، الشكل 2-43. يمكن الحصول على نتائج دقيقة للغاية بهذه الطريقة، إذا كنا حريصين كفايةً في قياس المسافة المقطوعة والزمن.

	$y \text{ (m)}$	$v \text{ (m/s)}$	$t \text{ (s)}$
	0	0	0
	-0.049	-0.98	0.1
	-0.196	-1.96	0.2
	-0.441	-2.94	0.3
	-0.784	-3.92	0.4
	-1.225	-4.90	0.5

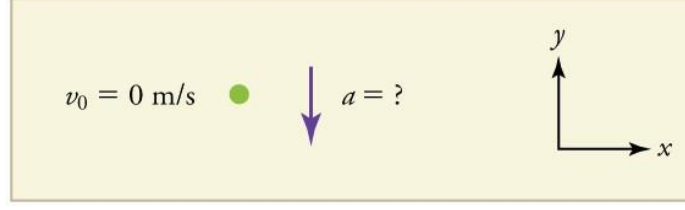


**الشكل 2-43** مواضع وسرعات كرة معدنية تنطلق من السكون حيث مقاومة الهواء مهملة. السرعة تزداد خطيًا بمرور الزمن بينما تزداد الإزاحة مع مربع الزمن. التسارع ثابت ويساوي عجلة الجاذبية.

لنفترض أن الكرة سقطت 1.0000 م في 0.45173 ثانية. بافتراض أن الكرة لا تتأثر بمقاومة الهواء، ما التسارع الدقيق بسبب الجاذبية في هذا الموقع؟

**طريقة الحل**

ارسم مخطط.



الشكل 2-44

1. حدد القيم المعروفة.  $y_0 = 0$  و  $y = -1.0000$  m و  $t = 0.45173$  s و  $v_0 = 0$ .
2. اختر المعادلة المناسبة لحساب  $a$  باستخدام القيم المعروفة.

2.83

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

3. عوض عن  $v_0$  بصفر وأعد ترتيب المعادلة لحساب  $a$ .

2.84

$$y = y_0 + \frac{1}{2} a t^2$$

عند وضع  $a$  في طرف، نحصل على

2.85

$$a = \frac{2(y - y_0)}{t^2}$$

4. التعويض عن القيم المعروفة يعطينا

2.86

$$a = \frac{2(-1.0000 \text{ m} - 0)}{(0.45173 \text{ s})^2} = -9.8010 \text{ m/s}^2$$

لأن  $a = -g$  حسب الاتجاهات المختارة،

2.87

$$g = 9.8010 \text{ m/s}^2$$

### المناقشة

تشير القيمة السالبة لـ  $a$  إلى أن عجلة الجاذبية تتجه نحو الأسفل، كما هو متوقع. نتوقع أن تكون القيمة في مكان ما قريبة من متوسط قيمة  $9.80 \text{ m/s}^2$ ، لذا،  $9.8010 \text{ m/s}^2$  منطقية. نظراً لأن البيانات التي تدخل في الحساب دقيقة نسبياً، فإن هذه القيمة لـ  $g$  أدق من متوسط القيمة  $9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ؛ وتمثل القيمة المحلية للتسارع بسبب الجاذبية.

تحقق فهمك ✓

تنفصل قطعة جليد من جبل جليدي وتقع 30.0 مترًا قبل أن تصطدم بالمياه. بافتراض سقوطها سقوطًا حرًا (لا يوجد مقاومة للهواء)، كم من الوقت يلزمها للوصول للماء؟

الحل

نعلم أن الموضع الابتدائي  $y_0 = 0$ ، الموضع النهائي  $y = -30.0 \text{ m}$  و  $a = -g = -9.80 \text{ m/s}^2$ . يمكننا استخدام المعادلة  $y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  لنحسب  $t$ . بالتعويض عن  $a = -g$ ، نحصل على

2.88

$$y = 0 + 0 - \frac{1}{2} g t^2$$

$$t^2 = \frac{2y}{-g}$$

$$t = \pm \sqrt{\frac{2y}{-g}} = \pm \sqrt{\frac{2(-30.0 \text{ m})}{-9.80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \pm \sqrt{6.12 \text{ s}^2} = 2.47 \text{ s} \approx 2.5 \text{ s}$$

القيمة الموجبة هي الإجابة الصحيحة فيزيائياً. وبالتالي، يستغرق الأمر حوالي 2.5 ثانية حتى تصل قطعة الجليد إلى الماء.

## 8-2 تحليل بياني للحركة أحادية البعد

الرسم البياني، كما في الصورة، يساوي ألف كلمة. لا تحتوي الرسوم البيانية على معلومات عددية فقط؛ بالإضافة إلى ذلك، إنها تكشف عن العلاقات بين الكميات الفيزيائية. يستخدم هذا الجزء من الكتاب الرسوم البيانية للموضع والسرعة والتسارع مقابل الزمن لتوضيح الحركة أحادية البعد.

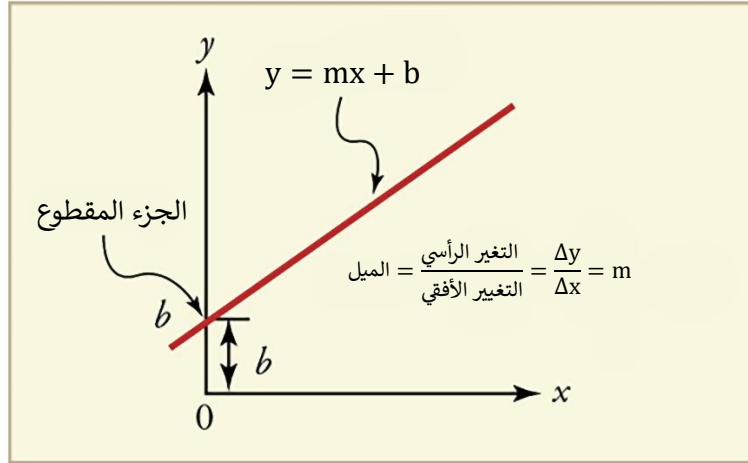
### الميل والعلاقات العامة

لاحظ أولاً أن الرسوم البيانية في هذا النص لها محورين متعامدين، أحدهما أفقي والآخر رأسي. عندما تُرسم كميتين فيزيائيتين مقابل بعضهما البعض، في مثل هذا الرسم البياني، يُعتبر المحور الأفقي عادةً متغيراً مستقلاً والمحور الرأسي متغيراً تابعاً. إذا أطلقنا على المحور الأفقي  $x$  والمحور الرأسي  $y$ ، كما في الشكل 2-46، الرسم البياني لخط مستقيم له الصورة العامة

2.89

$$y = mx + b$$

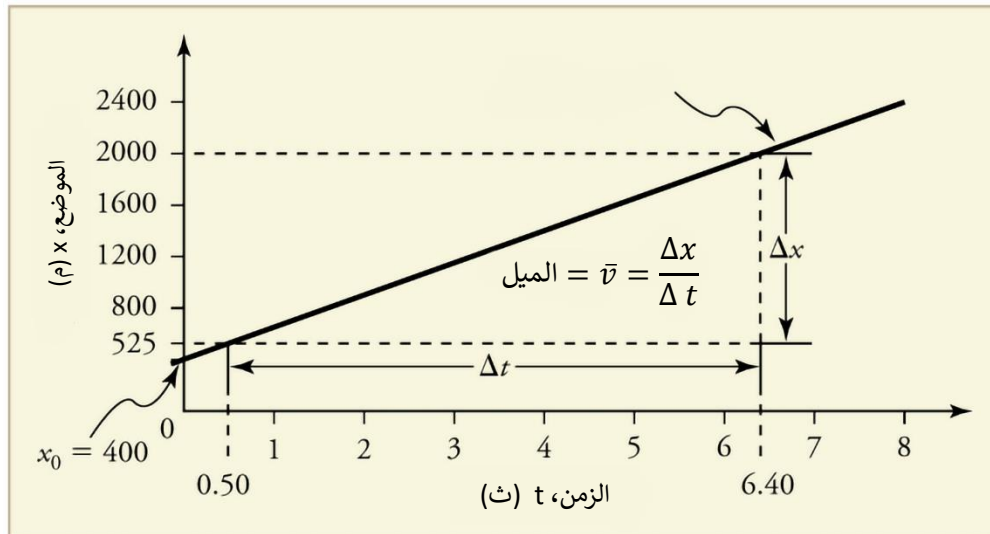
حيث  $m$  هو الميل، المعروف بأنه التغير في متغير المحور الرأسي على التغير في متغير المحور الأفقي (كما هو موضح في الشكل) للخط المستقيم. يستخدم الحرف  $b$  ليرمز إلى الجزء المقطوع من  $y$ ، وهو النقطة التي يتقاطع عندها الخط مع المحور الرأسي.



الشكل 46-2 رسم بياني لخط مستقيم. معادلة الخط المستقيم  $y = mx + b$ .

### رسم بياني للموضع مقابل الزمن ( $a = 0$ ، لذا $v$ ثابتة)

عادة ما يكون الزمن متغيرًا مستقلًا تعتمد عليه كميات أخرى، مثل الموضع. وبالتالي، سيكون الرسم البياني للموضع مقابل الزمن،  $x$  على المحور الرأسي و  $t$  على المحور الأفقي. الشكل 47-2 هو مجرد رسم بياني لخط مستقيم. يُظهر رسمًا بيانيًا للموضع مقابل الزمن لسيارة تعمل بالطاقة النفاثة على قاع مسطح لبحيرة جافة في نيفادا.



الشكل 47-2 رسم بياني للموضع مقابل الزمن لسيارة تعمل بالطاقة النفاثة في بونفيل سولت فلاتس.

باستخدام العلاقة بين المتغيرات التابعة والمستقلة، نرى أن الميل في الرسم البياني أعلاه هو متوسط السرعة  $\bar{v}$  وأن الجزء المقطوع هو الموضع عند الزمن صفر - أي،  $x_0$ . بالتعويض عن هذه الرموز في  $y = mx + b$  نحصل على

$$2.90$$

$$x = \bar{v}t + x_0$$

أو

2.91

$$x = x_0 + \bar{v}t$$

وبالتالي، يعطي الرسم البياني للموضع مقابل الزمن علاقة عامة بين الإزاحة (التغيير في الموضع) والسرعة والزمن، بالإضافة إلى تقديم معلومات عددية مفصلة حول موقف معين.

### ميل x مقابل t

الميل للموضع x مقابل الزمن t هو السرعة v.

2.92

$$\text{الميل} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = v$$

لاحظ أن هذه المعادلة هي نفسها المشتقة جبريًا من معادلات الحركة الأخرى في معادلات الحركة للتسارع الثابت في بعد واحد.

من الشكل يمكننا أن نرى أن السيارة لها موضع 525 متر عند 0.50 ثانية و 2000 متر عند 6.40 ثانية. يمكن قراءة موضعها عند أزمنة أخرى من الرسم البياني. إضافةً إلى ذلك، يمكن أيضًا الحصول على معلومات حول سرعتها وتسارعها من الرسم البياني.

## مثال 17-2

تحديد متوسط السرعة من الرسم البياني للموضع مقابل الزمن: سيارة نفائة  
أوجد متوسط السرعة للسيارة الموضح موضعها بيانيًا في الشكل 2-47.

### طريقة الحل

الميل  $x$  مقابل  $t$  هو متوسط السرعة، لأن الميل يساوي التغير في متغير المحور الرأسي (الموضع) على التغير في متغير المحور الأفقي (الزمن). في هذه الحالة، التغير في المحور الرأسي = التغير في الموضع والتغير في المحور الأفقي = التغير في الزمن، لذلك

2.93

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{الميل}$$

بما أن الميل ثابت، فيمكن استخدام أي نقطتين على الرسم لإيجاد الميل. (عمومًا، من الأدق استخدام نقطتين منفصلتين ومتباعدتين على الخط المستقيم. لأن أي خطأ في قراءة البيانات من الرسم البياني يكون أصغر نسبيًا إذا كان الفاصل الزمني أكبر.)

### الحل

- اختر نقطتين على الخط. في هذه الحالة، نختار النقطتين الموضحتين على الرسم البياني: (6.4 ثانية، 2000 م) و (0.50 ثانية، 525 م). (مع ذلك، يمكنك اختيار أي نقطتين.)
- عوض عن قيمتي  $x$  و  $t$  للنقطتين المختارتين في المعادلة. تذكر أننا نستخدم دائمًا القيمة النهائية مطروحًا منها القيمة الأولية عند حساب التغير ( $\Delta$ ).

2.94

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2000 \text{ m} - 525 \text{ m}}{6.4 \text{ s} - 0.50 \text{ s}}$$

والذي يعطينا

2.95

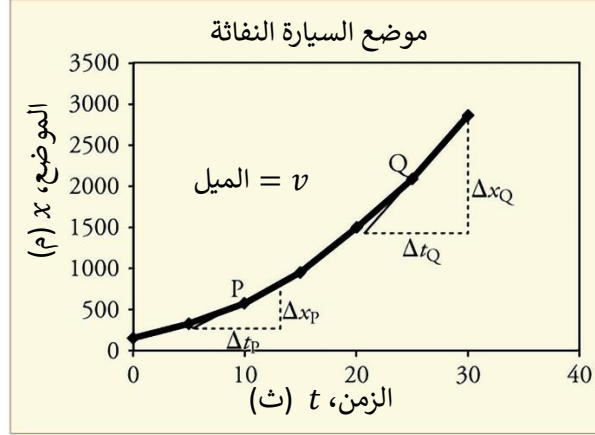
$$\bar{v} = 250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### المناقشة

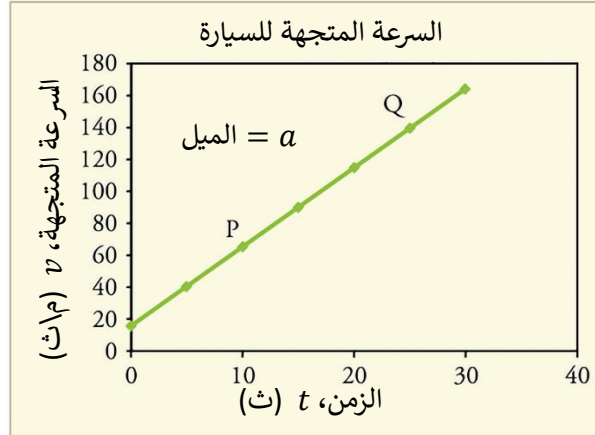
هذه سرعة أرضية كبيرة بطريقة مثيرة للإعجاب (900 كم \ ساعة، أو حوالي 560 ميل \ ساعة): أكبر بكثير من الحد الأقصى لسرعة الطريق السريع العادي البالغة 60 ميل \ ساعة (27 م \ ث أو 96 كم \ ساعة)، ولكنها أقل إلى حد كبير من الرقم القياسي 343 م \ ث (1234 كم \ س أو 766 ميل \ س) الذي وضع في عام 1997.

### الرسوم البيانية للحركة حيث $a \neq 0$ ليست ثابتة؛ $a \neq 0$

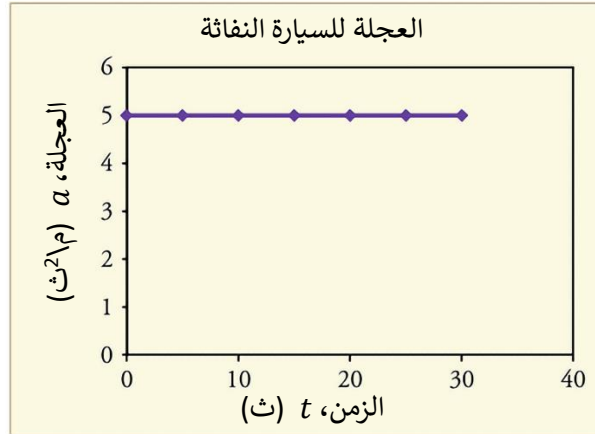
تمثل الرسوم البيانية في الشكل 2-48 أدناه حركة سيارة تعمل بالطاقة النفاثة خلال تسارعها إلى سرعتها القصوى، ولكن، فقط، خلال الوقت الذي يكون فيه تسارعها ثابت. يبدأ الزمن من الصفر لهذه الحركة (كما لو تم قياسه بساعة توقيت)، والموضع والسرعة الابتدائيين 200 م و 15 م/ث، على التوالي.



(a)



(b)



(c)



**شكل 2-48** الرسوم البيانية لحركة سيارة تعمل بالطاقة النفاثة خلال الفترة الزمنية حيث تسارعها ثابت. (أ) ميل  $x$  مقابل  $t$  هو السرعة المتجهة. يُعرض الميل عند نقطتين، وتُرسَم السرعات اللحظية التي تم الحصول عليها في الرسم البياني التالي. السرعة اللحظية عند أي نقطة هي ميل المماس عند تلك النقطة. (ب) ميل  $v$  مقابل  $t$  ثابت لهذا الجزء من الحركة، مما يشير إلى تسارع ثابت. (ج) التسارع له قيمة ثابتة  $5.0 \frac{m}{s^2}$  خلال الفترة الزمنية الموضحة.

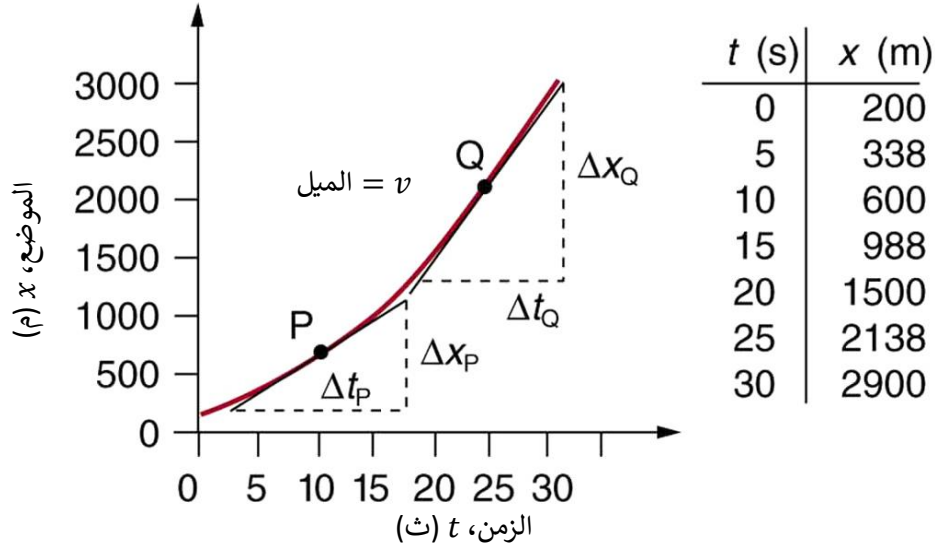


**الشكل 2-49** سيارة نفاثة تابعة للقوات الجوية الأمريكية تتسارع في مسار. (credit: Matt Trostle, Flickr)

الرسم البياني للموضع مقابل الزمن في **الشكل 2-48** (أ) منحنى وليس خطًا مستقيمًا. يصبح ميل المنحنى أكبر مع مرور الزمن، مما يدل على أن السرعة تتزايد بمرور الزمن. الميل عند أي نقطة على الرسم البياني للموضع مقابل الزمن هو السرعة اللحظية عند تلك النقطة. نحصل عليه عن طريق رسم خط مستقيم مماس للمنحنى عند النقطة المطلوبة وحساب ميل هذا الخط. يُعرض الخطان المماسان لنقطتين في **الشكل 2-48** (أ). إذا تم ذلك عند كل نقطة على المنحنى ورسمت القيم مقابل الزمن، فسنحصل على الرسم البياني للسرعة مقابل الزمن الموضح في **الشكل 2-48** (ب). إضافةً إلى ذلك، فإن ميل الرسم البياني للسرعة مقابل الزمن هو التسارع، الذي يظهر في **الشكل 2-48** (ج).

## مثال 2-18

حساب السرعة اللحظية من الميل عند نقطة: سيارة نفاثة  
احسب السرعة لسيارة نفاثة عند زمن 25 ثانية بإيجاد ميل  $x$  مقابل  $t$  للرسم في الشكل التالي.



**الشكل 2-50** ميل  $x$  مقابل  $t$  هو السرعة المتجهة. الميل موضح عند نقطتين. السرعة اللحظية عند أي نقطة هي ميل المماس عند هذه النقطة.

#### طريقة الحل

ميل المنحنى عند نقطة ما يساوي ميل خط مستقيم مماس للمنحنى عند تلك النقطة. هذا المبدأ موضح في **الشكل 2-50**، حيث  $Q$  هي النقطة عند  $t = 25$  s.

#### الحل

1. أوجد المماس للمنحنى عند  $t = 25$  s.

2. حدد نهايتي المماس. هما الموضع 1300 م عند زمن 19 ثانية والموضع 3120 م عند زمن 32 ثانية.

3. عوض بالنهايتين في المعادلة لحساب الميل،  $v$ .

2.96

$$v_Q = \frac{\Delta x_Q}{\Delta t_Q} = \frac{(3120 \text{ m} - 1300 \text{ m})}{32 \text{ s} - 19 \text{ s}}$$

لذلك،

2.97

$$v_Q = \frac{(1820 \text{ m})}{13 \text{ s}} = 140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### المناقشة

هذه هي القيمة المعطاة في الجدول لـ  $v$  عند  $t = 25$  s. القيمة  $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  لـ  $v_Q$  مرسومة في الشكل 2-50. الرسم الكامل لـ  $v$  مقابل  $t$  يمكن الحصول عليه بنفس الطريقة.

إذا استكملنا على نفس المنوال سنلاحظ أن ميل السرعة مقابل الزمن هو العجلة. الميل هو التغير في المتغير على المحور الرأسي على التغير في المتغير على المحور الأفقي؛ على رسم  $v$  مقابل  $t$ ، التغير الرأسي = التغير في السرعة  $\Delta v$  والتغير الأفقي = التغير في الزمن  $\Delta t$ .

### ميل v مقابل t

ميل السرعة v مقابل الزمن t هو العجلة a.

2.98

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a$$

بما أن الرسم البياني للسرعة مقابل الزمن في الشكل 2-48 (ب) خط مستقيم، فإن ميله ثابت لكل النقاط، مما يعني أن التسارع ثابت. رسم التسارع مقابل الزمن موضح في الشكل 2-48 (c).

يمكن الحصول على معلومات إضافية من الشكل 2-50 ومعادلة الخط المستقيم،  $y = mx + b$ .

في هذه الحالة، المحور الرأسي y هو v، الجزء المقطوع b هو  $v_0$ ، الميل m هو العجلة a، والمحور الأفقي x هو الزمن t. بالتعويض عن هذه المتغيرات نحصل على

2.99

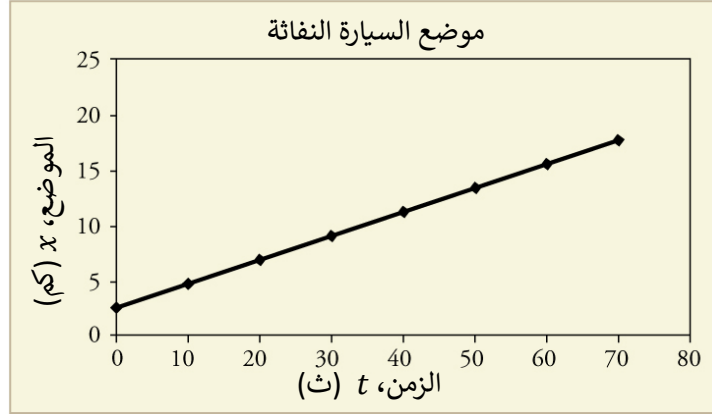
$$v = v_0 + at$$

حصلنا على علاقة عامة للسرعة والتسارع والزمن مرة أخرى من الرسم البياني. لاحظ أن هذه المعادلة مشتقة، أيضاً، جبرياً من معادلات الحركة الأخرى في معادلات الحركة للتسارع الثابت في بعد واحد.

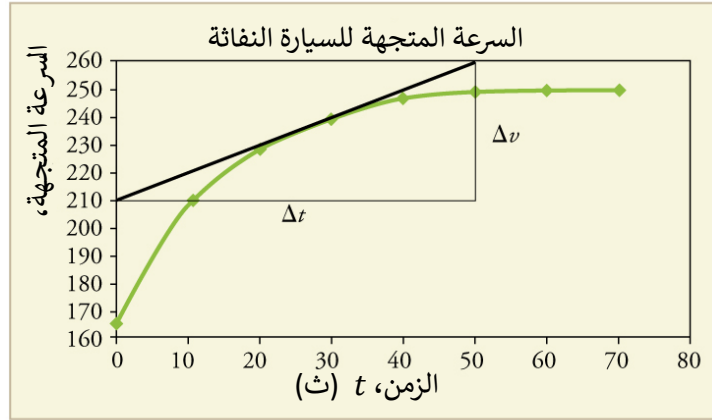
ليست مصادفة أن نحصل على نفس المعادلات بواسطة التحليل البياني والطرق الجبرية. في الواقع، تتمثل إحدى الطرق المهمة لاكتشاف العلاقات الفيزيائية في قياس الكميات الفيزيائية المختلفة، ثم عمل رسوم بيانية لكمية مقابل أخرى لمعرفة ما إذا ما كانا مرتبطين بأي من الأشكال. تقتضي الارتباطات العلاقات الفيزيائية وقد تظهر بواسطة الرسوم البيانية السلسلة مثل تلك المذكورة أعلاه. من هذه الرسوم البيانية، يمكن أحياناً افتراض العلاقات الرياضية. ثم تُجرى المزيد من التجارب لتحديد صحة العلاقات المفترضة.

### الرسوم البيانية للحركة حيث التسارع غير ثابت

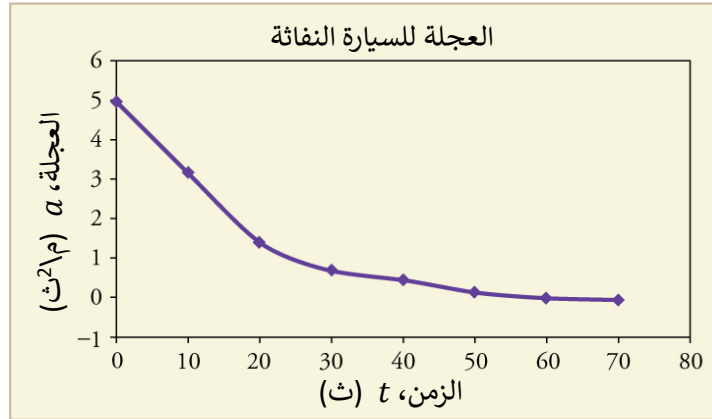
فكر في حركة السيارة النفائة خلال انتقالها من 165 م\ث إلى سرعتها القصوى البالغة 250 م\ث، كما موضح في الشكل 2-51. يبدأ الزمن مرة أخرى من الصفر، والموضع الأولي والسرعة الأولية 2900 م و 165 م\ث، على التوالي. (كانا الموضع النهائي والسرعة النهائية للسيارة في الحركة الموضحة في الشكل 2-48). ينخفض التسارع تدريجياً من  $5.0 \frac{m}{s^2}$  إلى الصفر عندما تصل السيارة إلى 250 م\ث. ميل x مقابل t يزداد حتى  $t = 55$  s، بعدها يصبح الميل ثابتاً. وبالمثل، تزيد السرعة حتى 55 ثانية ثم تصبح ثابتة؛ لأن التسارع ينخفض إلى صفر عند 55 ثانية ويبقى صفراً بعد ذلك.



(a)



(b)



(c)

**شكل 2-51** الرسوم البيانية لحركة سيارة تعمل بالطاقة النفاثة حيث تصل إلى سرعتها القصوى. تبدأ هذه الحركة حيث تنتهي الحركة في **الشكل 2-48**. (أ) ميل الرسم البياني هو السرعة؛ الموضحة في الرسم البياني التالي. (ب) تقترب السرعة تدريجياً من قيمتها القصوى. ميل هذا الرسم هو التسارع؛ الموضح في الرسم البياني الأخير. (ج) ينخفض التسارع تدريجياً إلى الصفر عندما تصبح السرعة ثابتة.

## مثال 19-2

حساب التسارع من رسم بياني للسرعة مقابل الزمن  
احسب عجلة السيارة النفاثة عند زمن مقداره ٢٥ ث بإيجاد ميل  $v$  مقابل  $t$  في الرسم البياني في الشكل 51-2 (ب).

### طريقة الحل

ميل المنحنى عند  $t = 25 \text{ s}$  يساوي ميل المماس عند تلك النقطة، كما هو موضح في الشكل 51-2 (ب).

### الحل

حدد نهايتي المماس من الشكل، ثم عوض بهما في المعادلة لإيجاد الميل،  $a$ .

2.100

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{260 \frac{m}{s} - 210 \frac{m}{s}}{51 \text{ s} - 1.0 \text{ s}}$$

2.101

$$a = \frac{50 \frac{m}{s}}{50 \text{ s}} = 1.0 \frac{m}{s^2}$$

### المناقشة

لاحظ أن هذه القيمة لـ  $a$  تتوافق مع القيمة الموضحة في الشكل 51-2 (ج) عند  $t = 25 \text{ s}$

يمكن استخدام الرسم البياني للموضع مقابل الزمن لإنشاء رسم بياني للسرعة مقابل الزمن، ويمكن استخدام الرسم البياني للسرعة مقابل الزمن لإنشاء رسم بياني للتسارع مقابل الزمن. نفعل ذلك بإيجاد الميل عند كل نقطة. إذا كان الرسم البياني خطيًا (على سبيل المثال، خط ذو ميل ثابت)، فمن السهل حساب الميل عند أي نقطة؛ الميل ثابت. يمكن استخدام التحليل البياني للحركة لوصف كل من الخصائص المحددة والعامة الكينماتيكية. يمكن أيضًا استخدام الرسوم البيانية في مواضيع أخرى في الفيزياء. أحد الجوانب المهمة لاستكشاف العلاقات الفيزيائية رسمها بيانيًا والبحث عن العلاقات الأساسية.

### تحقق فهمك

فيما يلي رسم بياني للسرعة مقابل الزمن لسفينة قادمة إلى ميناء. (أ) صف حركة السفينة بناءً على الرسم البياني. (ب) كيف سيبدو الرسم البياني لتسارع السفينة؟

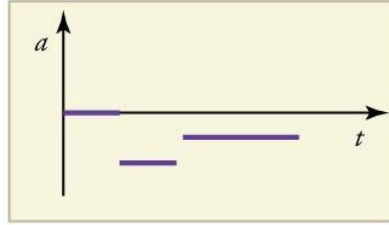


الشكل 52-2

### الحل

(أ) تتحرك السفينة بسرعة ثابتة ثم تبدأ في التباطؤ بمعدل ثابت. في مرحلة ما، ينخفض معدل التباطؤ. تحافظ على معدل التباطؤ المنخفض هذا حتى تتوقف.

(ب) الرسم البياني للتسارع مقابل الزمن سيظهر تسارعًا صفيحًا في المرحلة الأولى، وتسارعًا سالبًا ثابتًا وكبيرًا في المرحلة الثانية، وتسارعًا سالبًا ثابتًا أقل في المرحلة الأخيرة.



الشكل 53-2

# الكينماتيك ثنائية الأبعاد



**الشكل 3-1** الحوكة التي نخترها كل يوم، لحسن الحظ، غير مجهدة كوكوب قطار ملاهي كهذا في متنزه بورت أفينشورا العالمي في إسبانيا. بالرغم من ذلك، أغلب الحوكات تكون منحنية، وليست مستقيمة. الحوكة على مسار منحنى هي حوكة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، ويمكن وصفها على نحو مماثل للحوكة أحادية البعد. (credit: Boris23/Wikimedia Commons)

## مخطط الفصل

### 3-1 الكينماتيك في بعدين: مقدمة

- الإشارة إلى أن الحركة في بعدين تتكون من مركبتين أفقية ورأسية.
- فهم استقلالية المركبتين الأفقية والرأسية في الحركة ثنائية الأبعاد.

### 3-2 جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية

- فهم قواعد الجمع والطرح والضرب الاتجاهي باستخدام الطرق البيانية.
- تطبيق طرق بيانية لجمع المتجهات وطرحها لحساب إزاحة الأجسام المتحركة.

### 3-3 جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية

- فهم قواعد الجمع والطرح الاتجاهي باستخدام الطرق التحليلية.
- تطبيق طرق تحليلية لحساب المركبتين الرأسية والأفقية للمتجهات.
- تطبيق طرق تحليلية لتحديد مقدار واتجاه المتجه المحصل.

### 3-4 حركة المقذوفات

- تعريف الكميات المتعلقة بالمقذوفات وشرحها، مثل التسارع بسبب الجاذبية والمدى والارتفاع الأقصى والمسار.
- حدد موقع المقذوف وسرعته عند نقاط مختلفة في مساره.
- تطبيق مبدأ استقلالية الحركة لحل مسائل حركة المقذوفات.



### 5-3 جمع السرعات المتجهة

- تطبيق مبادئ جمع المتجهات لحساب السرعة النسبية المتجهة.
- توضيح أهمية المراقب في قياس السرعة.

**مقدمة عن الحركة ثنائية الأبعاد** قوس كرة السلة، مدار القمر الصناعي، سباح يغوص في حمام سباحة، دم يتدفق من جرح، وجرو يطارد ذيله ليست سوى أمثلة على حركات على طول مسارات منحنية. في الواقع، تتبع معظم الحركات في الطبيعة مسارات منحنية وليس خطوط مستقيمة. الحركة على طول مسار منحنى على سطح مستوي أو مستوى (مثل كرة على طاولة بلياردو أو متزلج على حلبة للتزلج) ثنائية الأبعاد، وبالتالي توصف بواسطة الكينماتيكا ثنائية الأبعاد. الحركة غير المحدودة في مستوى، مثل السيارة التي تسير على طريق جبلي متعرج، توصف بواسطة الكينماتيكا ثلاثية الأبعاد. كل من الكينماتيكا الثنائية والثلاثية الأبعاد امتداد بسيط للكينماتيكا أحادية البعد التي درسناه لفهم الحركة في خط مستقيم في الفصل السابق. سيسمح لنا هذا الامتداد البسيط بتطبيق الفيزياء على العديد من المواقف، كما أنه سيُنتج عنه رؤى غير متوقعة حول الطبيعة.

### 1-3 الكينماتيكا في بعدين: مقدمة

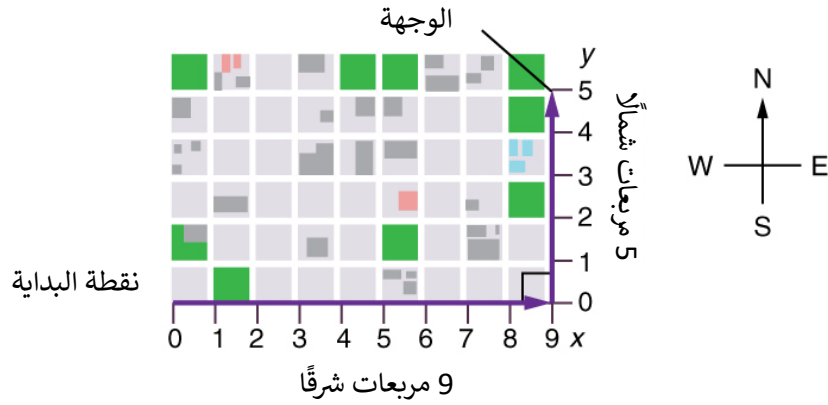


**الشكل 2-3** من النادر أن يتمكن المشاة والسائقون في مدينة مثل نيويورك من السير في خطوط مستقيمة إلى وجهاتهم. بدلاً من ذلك، يجب عليهم السير في الطرق وعلى الأرصفة، في مسارات منحنية، ثنائية الأبعاد. (credit: Margaret W. Carruthers)

### الحركة ثنائية الأبعاد: السير في مدينة

لنفترض أنك تريد المشي من نقطة إلى أخرى في مدينة ذات مربعات سكنية موحدة، كما موضح في **الشكل 3-3**.

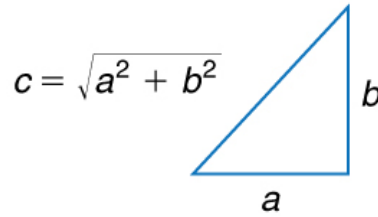




**الشكل 3-3** يمشي أحد المشاة في مسار ثنائي الأبعاد بين نقطتين في المدينة. في هذا المثال، كل المباني مربعة ولها نفس الحجم.

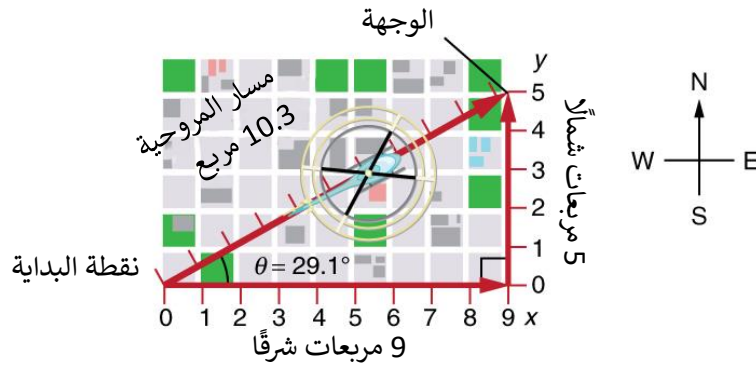
لا يمكنك السير في خط مستقيم- فقط المروحيات يمكنها فعل هذا في المدينة، لذا فأنت مضطر لاتخاذ مسار ثنائي الأبعاد، مثل المسار الموضح. تمشي 14 مربع، 9 شرقاً يليها 5 شمالاً. ما البعد بين النقطتين؟

يقول المثل القديم: إن أقصر مسافة بين نقطتين هي خط مستقيم. يشكل ضلعا المسار والخط المستقيم مثلثاً قائماً، وبالتالي يمكن استخدام مبرهنة فيثاغورس  $a^2 + b^2 = c^2$ ، لإيجاد البعد بين النقطتين.



**الشكل 3-4:** تربط مبرهنة فيثاغورس طول ضلعا المثلث القائم الزاوية  $a$ ،  $b$  بالوتر  $c$  بالعلاقة  $a^2 + b^2 = c^2$ . ولحساب  $c$ :  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$

الوتر في المثلث هو البعد بين النقطتين، وفي هذه الحالة يكون طوله بوحدات المربعات مربعات  $10.3 = \sqrt{(9 \text{ مربعات})^2 + (5 \text{ مربعات})^2}$ ، أقصر من الـ 14 مربع المقطوعة. (لاحظ أننا نستخدم ثلاثة أرقام معنوية في الإجابة. على الرغم من أن الرقمين "9" و "5" يبدو أن لهما رقم معنوي فقط، إلا أنهما رقمان متقطعان discrete. في هذه الحالة "9 مربعات" هي نفسها "9.0 أو 9.00 مربعات." لقد قررنا استخدام ثلاثة أرقام معنوية في الإجابة لإظهار النتيجة بشكل أدق.)



**الشكل 3-5** المسار المستقيم الذي تتبعه المروحية بين النقطتين أقصر من المربعات الـ 14 التي يسيرها المشاة. جميع المربعات لها نفس الحجم.

حقيقة أن المسافة المستقيمة (10.3 مربع) في **الشكل 3-5** أقل من إجمالي المسافة المقطوعة (14 مربع) هي مثال على خاصية عامة للمتجهات. (تذكر أن **المتجهات** لها مقدار واتجاه.)

أما بالنسبة للحركة أحادية البعد، فإننا نستخدم الأسهم لتمثيل المتجهات. يتناسب طول السهم مع مقدار المتجه. يُوضح طول السهم بالشَّرْط في **الشكل 3-3** و**الشكل 3-5**، يشير السهم في نفس اتجاه المتجه. فيما يخص الحركة ثنائية الأبعاد، يمكن تمثيل مسار الجسم بثلاثة متجهات: متجه المسار المستقيم بين النقطتين الأولى والنهائية، ومتجه المركبة الأفقية للحركة، ومتجه المركبة الرأسية للحركة. تضاف المركبتان الأفقية والرأسية للحركة معًا لإعطاء المسار المستقيم. على سبيل المثال، لاحظ المتجهات الثلاثة في **الشكل 3-5**. الأول يمثل إزاحة 9 مربعات شرقًا. يمثل الثاني إزاحة 5 مربعات شمالًا. يُجمع هذان المتجهان لإعطاء المتجه الثالث، المُمثل لإزاحة كلية مقدارها 10.3 مربع. المتجه الثالث هو المسار المستقيم بين النقطتين. في هذا المثال، لاحظ أن المتجهين المجموعين متعامدان مع بعضهما البعض وبالتالي يشكلان، مع المتجه المحصل، مثلثًا قائم الزاوية. هذا يعني أنه يمكننا استخدام مبرهنة فيثاغورس لحساب مقدار الإزاحة الكلية. (لاحظ أنه لا يمكننا استخدام مبرهنة فيثاغورس لجمع متجهين غير متعامدين. سندرس تقنيات لجمع المتجهات التي لها أي اتجاه، وليس فقط المتعامدة، في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية وجمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية**.)

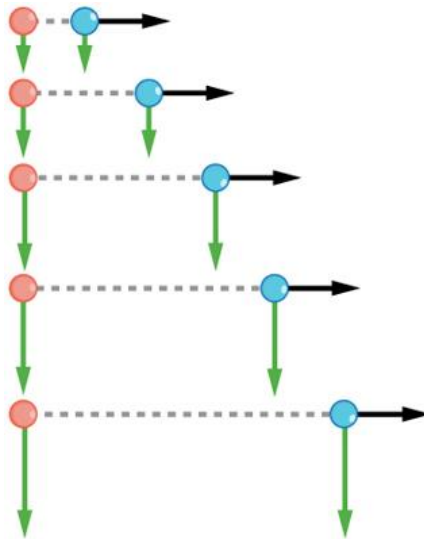
### استقلالية الحركات المتعامدة

الشخص الذي يسلك المسار الموضح في **الشكل 3-5** يمشي شرقًا ثم شمالًا (اتجاهان متعامدان). المسافة التي يمشيها هو شرقًا، تتأثر فقط بحركته أو حركتها باتجاه الشرق. وبالمثل، فإن المسافة التي يمشيها شمالًا، تتأثر فقط بحركته باتجاه الشمال.

#### استقلالية الحركة

المركبتين الأفقية والرأسية للحركة ثنائية الأبعاد مستقلة عن بعضهما البعض. أي حركة في الاتجاه الأفقي لا تؤثر على الحركة في الاتجاه الرأسي والعكس صحيح.

هذا صحيح في موقف بسيط مثل السير في اتجاه واحد أولًا، متبوعًا بآخر. وينطبق ذلك أيضًا على الحركة الأبعد التي تتضمن حركة في اتجاهين في آن. على سبيل المثال، دعنا نقارن حركة كل من كرتي بيسبول. تُسقط كرة من السكون، وفي نفس اللحظة، تُلقى أخرى أفقيًا من نفس الارتفاع وتتبع مسارًا منحنياً. التقط ستروبوسكوب مواضع الكرتين عند فترات زمنية متساوية خلال سقوطها.



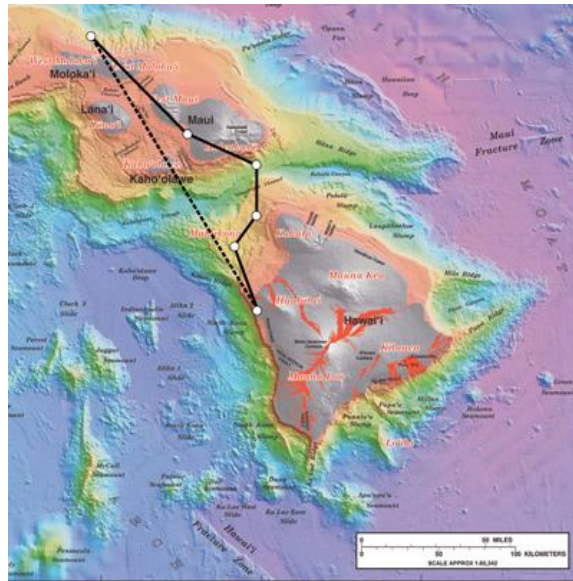
**الشكل 3-6** يوضح حركة كرتين متطابقتين - إحداها تسقط من سكون والأخرى لها سرعة أفقية أولية. كل موضع لاحق، هو موضع الكرتين عند نفس الزمن. تمثل الأسهم السرعتين الأفقية والرأسية عند كل موضع.

الكرة على اليمين لها سرعة أفقية ابتدائية، بينما الكرة على اليسار ليس لها سرعة أفقية. على الرغم من الاختلاف في السرعة الأفقية، فإن السرعة والمواضع الرأسية متطابقة لكلتا الكرتين. هذا يدل على أن الحركتين الرأسية والأفقية مستقلتان.

من اللافت للنظر أنه لكل نقطة من الستروبوسكوب، المواضع الرأسية للكرتين متطابقة. يشير هذا التطابق إلى أن الحركة الرأسية مستقلة عن الحركة الأفقية. (بافتراض عدم وجود مقاومة للهواء، فإن الحركة الرأسية لجسم يسقط تتأثر بالجاذبية فقط، ولا تتأثر بأي قوى أفقية.) يُظهر الفحص الدقيق للكرة الملقاة أفقياً أنها تقطع نفس المسافة الأفقية بين اللقطات. هذا يرجع إلى حقيقة أنه لا توجد قوى مؤثرة على الكرة في الاتجاه الأفقي بعد رميها. هذه النتيجة تعني أن السرعة الأفقية ثابتة، ولا تتأثر بالحركة الرأسية ولا بالجاذبية (الرأسية). لاحظ أن هذه الحالة صحيحة فقط في الظروف المثالية. في العالم الحقيقي، ستؤثر مقاومة الهواء على سرعة الكرتين في كلا الاتجاهين الأفقي والرأسي.

يتكون المسار المنحني، ثنائي الأبعاد، للكرة الملقاة أفقياً من حركتين مستقلتين أحاديتا البعد (أفقية ورأسية). إن مفتاح تحليل هذه الحركة، التي تسمى حركة المقذوفات، هو تحليلها إلى حركتين على طول اتجاهين متعامدين. يمكن تحليل الحركة ثنائية الأبعاد إلى مركبتين متعامدتين لأن المركبتين مستقلتان عن بعضهما البعض. سنرى طريقة تحليل المتجهات في جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية وجمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية. سنجد أن مثل هذه التقنيات مفيدة في العديد من مجالات الفيزياء.

## 2-3 جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية



**الشكل 3-8** يمكن تحديد الإزاحة بيانياً باستخدام خريطة ذات مقياس، مثل خريطة جزر هاواي في الصورة. تشتمل الرحلة من هاواي إلى مولوكا على عدد من أجزاء الرحلة. يمكن جمع هذه الأجزاء بيانياً باستخدام مسطرة لتحديد إجمالي الإزاحة ثنائية الأبعاد للرحلة. (credit: US Geological Survey)

### المتجهات في بعدين

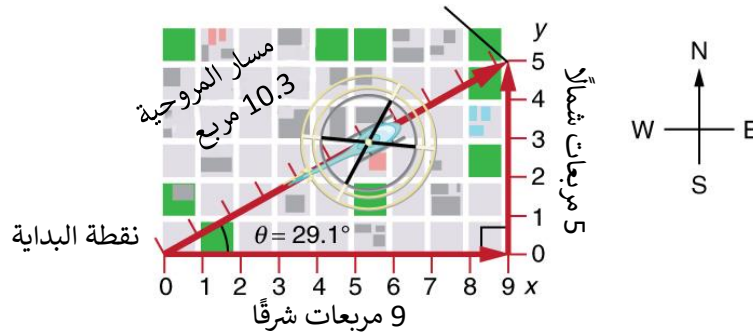
**المتجه** كمية لها مقدار واتجاه. الإزاحة والسرعة والتسارع والقوة، على سبيل المثال، كلها متجهات. في الحركة أحادية البعد أو الحركة في خط مستقيم، يمكن تحديد اتجاه المتجه ببساطة بعلامة زائد أو ناقص. ومع ذلك، في بعدين (2D)، نحدد اتجاه المتجه بالنسبة لإطار مرجعي (أي، نظام إحداثيات)، باستخدام سهم له طول يتناسب مع مقدار المتجه ويشير في اتجاه المتجه.

يوضح الشكل 9-3 مثال على التمثيل البياني للمتجه، باستخدام مثال الإزاحة الإجمالية للشخص الذي يمشي في مدينة الذي ناقشناه في الكينماتيكا في بعدين: مقدمة. سنستخدم نظام الترميز القائل بأن الرمز الذي فوقه سهم مثل  $\vec{D}$ ، يُشير إلى المتجه  $D$ . يُشار إلى مقداره بالرمز دون السهم مثل  $D$  واتجاهه بالرمز  $\theta$ .

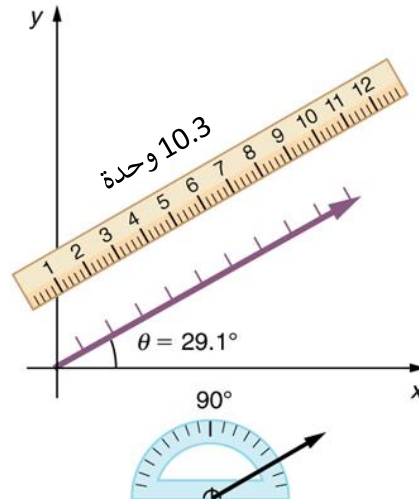
ملحوظة: في الرسوم التوضيحية يُستخدم نظام آخر، فيه يُشار إلى المتجه برمز غامق مثل  $\mathbf{D}$  وإلى مقداره بالرمز  $D$ .

### المتجهات في هذا الكتاب

في هذا الكتاب، سنمثل المتجه بمتغير فوقه سهم. على سبيل المثال، سوف نمثل القوة بالمتجه  $\vec{F}$ ، والتي لها مقدار واتجاه. سنمثل مقدار المتجه بالمتغير فقط دون السهم، مثل  $F$ ، وسنشير إلى اتجاهه بالزاوية  $\theta$ .



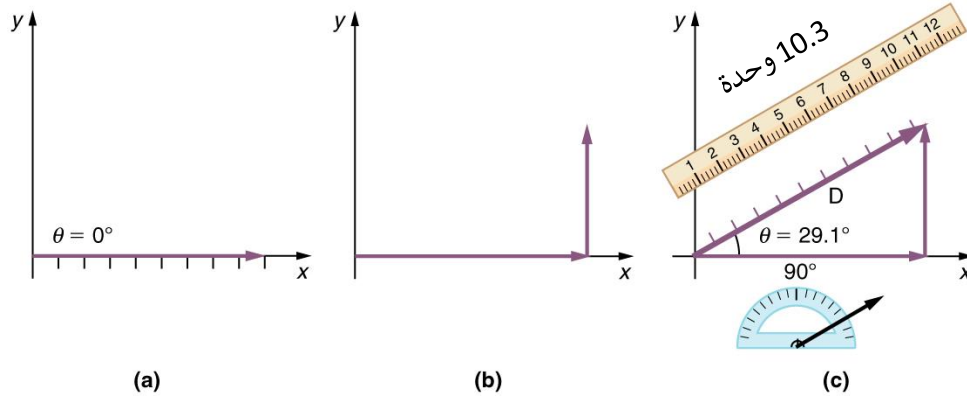
الشكل 9-3 شخص يمشي 9 مربعات شرقاً و5 مربعات شمالاً. الإزاحة 10.3 مربعات بزاوية  $29.1^\circ$  شمال الشرق.



الشكل 10-3 لوصف المحصلة للشخص الذي يمشي في المدينة في الشكل 9-3 بيانياً، نرسم متجه يمثل الإزاحة الكلية  $\vec{D}$ . باستخدام منقلة (أداة قياس الزوايا)، نرسم خط بزاوية  $\theta$  بالنسبة للمحور الأفقي (اتجاه الشرق). الطول  $D$  للسهم يتناسب مع مقدار المتجه ويقاس بمسطرة على طول الخط. في هذا المثال، المقدار  $D$  للمتجه هو 10.3 وحدات، واتجاهه  $(\theta) 29.1^\circ$  شمال الشرق.

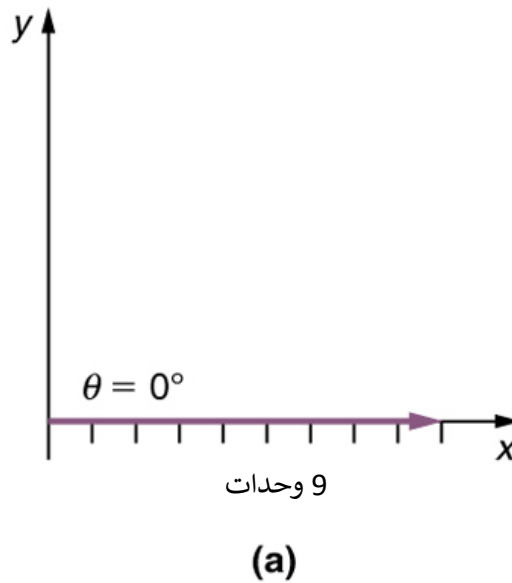
## جمع المتجهات: طريقة "رأس إلى ذيل"

طريقة "رأس إلى ذيل" طريقة بيانية لجمع المتجهات الموضحة في الشكل 3-11 أدناه وفي الخطوات التالية. ذيل المتجه هو نقطة بداية المتجه، ورأس المتجه هو رأس السهم (النهاية المدببة للسهم).



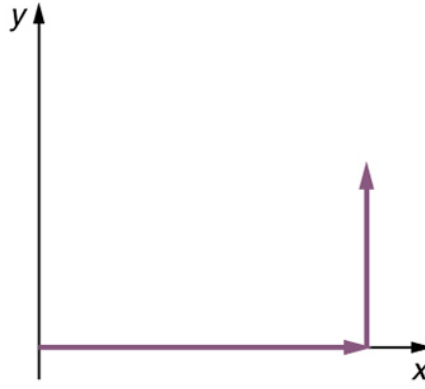
**الشكل 3-11** طريقة "رأس إلى ذيل": طريقة رأس إلى ذيل لجمع المتجهات بيانيًا موضحة لإزاحتي الشخص الذي يمشي في المدينة في الشكل 3-9. (أ) ارسم متجهًا يمثل الإزاحة إلى الشرق. (ب) ارسم متجهًا يمثل الإزاحة إلى الشمال. يجب أن تنشئ ذيل هذا المتجه من رأس المتجه الأول الذي يشير إلى الشرق. (ج) ارسم خطًا من ذيل المتجه الذي يشير إلى الشرق إلى رأس المتجه الذي يشير إلى الشمال لتكوين المجموع أو المحصلة  $\vec{D}$ . يتناسب طول السهم  $D$  مع مقدار المتجه 10.3 وحدة. واتجاهه هو الزاوية مع اتجاه الشرق (أو المحور الأفقي)  $\theta$  الذي يمكن قياسه بمنقلة يساوي  $29.1^\circ$ .

**الخطوة 1:** مثل المتجه الأول عن طريق رسم سهم (9 مربعات إلى الشرق) باستخدام المسطرة والمنقلة.



**الشكل 3-12**

**الخطوة 2:** مثل المتجه الثاني عن طريق رسم سهم (5 مربعات إلى الشمال)، ضع ذيل المتجه الثاني على رأس المتجه الأول.

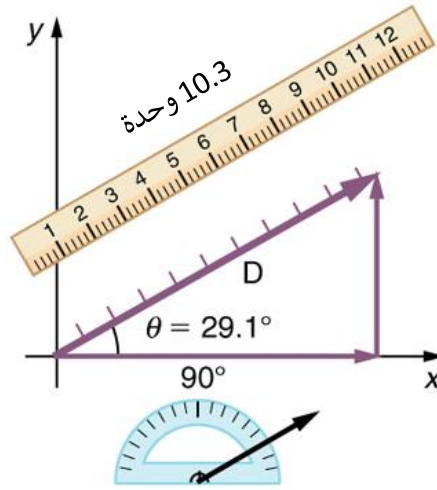


(b)

الشكل 13-3

**الخطوة 3:** إذا كان هناك المزيد من المتجهات، فاستمر في هذه العملية لجمع كل هذه المتجهات. لاحظ أنه في مثالنا، يوجد متجهان فقط، لذلك انتهينا.

**الخطوة 4:** ارسم سهم من ذيل المتجه الأول إلى رأس المتجه الأخير. هذا هو ناتج الجمع، أو **محصلة** المتجهين.



(c)

الشكل 14-3

**الخطوة 5:** لمعرفة مقدار المحصلة، قس طولها بمسطرة. (لاحظ أنه في معظم الحسابات، سنستخدم مبرهنة فيثاغورس لتحديد هذا الطول).

**الخطوة 6:** للحصول على اتجاه **المحصلة**، قس الزاوية التي يصنعها مع الإطار المرجعي باستخدام منقلة. (لاحظ أنه في معظم الحسابات، سنستخدم العلاقات المثلثية لتحديد هذه الزاوية).

تقتصر صحة طريقة جمع المتجهات بيانياً على دقة الرسم ودقة أدوات القياس. وهي صالحة لأي عدد من المتجهات.

### مثال 1-3

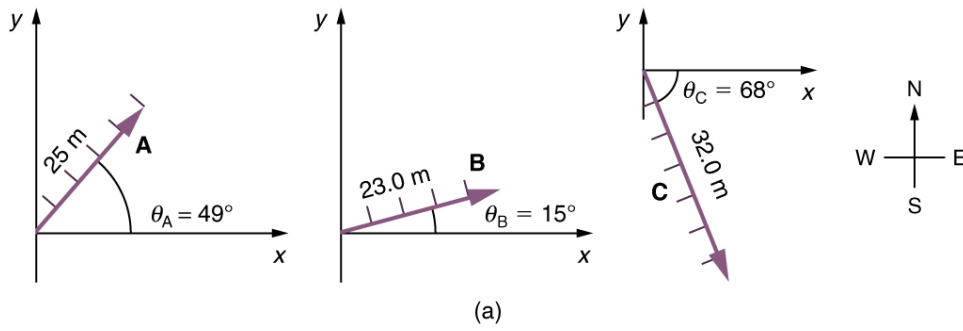
جمع المتجهات بيانيًا باستخدام طريقة "رأس إلى ذيل": امرأة تمشي استخدم الطريقة البيانية لجمع المتجهات لإيجاد الإزاحة الكلية للشخص الذي يسير في المسارات الثلاثة التالية (الإزاحات). أولاً، تمشي 25.0 مترًا في اتجاه  $49.0^\circ$  شمال الشرق. ثم تمشي مسافة 23.0 مترًا متجهة  $15.0^\circ$  شمال الشرق. أخيرًا، استدارت وسارت 32.0 مترًا في اتجاه  $68.0^\circ$  جنوب الشرق.

#### طريقة الحل

مثل كل متجهات الإزاحة بيانيًا، سمي المتجهات كالآتي: الأول  $\vec{A}$  والثاني  $\vec{B}$  والثالث  $\vec{C}$ ، اجعل طول السهم متناسب مع المسافة التي يمثلها وحدد الاتجاهات بالنسبة لاتجاه الشرق. ستوفر طريقة "رأس إلى ذيل" الموضحة أعلاه طريقة لتحديد مقدار واتجاه الإزاحة المحصلة، المشار إليها بـ  $\vec{R}$ .

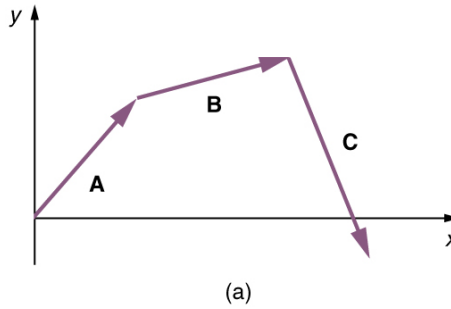
#### الحل

(1) ارسم متجهات الإزاحة الثلاثة.



الشكل 15-3

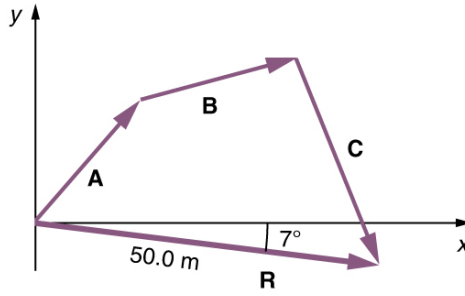
(2) ضع رأس كل متجه على ذيل متجه آخر (وفقًا لطريقة "رأس إلى ذيل") مع الحفاظ على مقدار واتجاه كل متجه.



الشكل 16-3

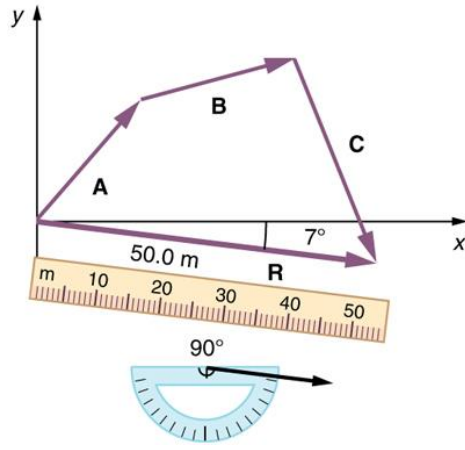
(3) ارسم المحصلة،  $\vec{R}$





الشكل 17-3

(4) استخدم مسطرة لقياس مقدار  $\vec{R}$  ، ومنقلة لقياس اتجاه  $\vec{R}$  . يمكن تحديد اتجاه المحصلة بعدة طرق، أسهل طريقة هي قياس الزاوية بين المتجه وأقرب محور أفقي أو رأسي. نظرًا لأن المتجه الناتج يقع جنوب المحور المشير باتجاه الشرق، فإننا نقلب المنقلة رأسًا على عقب ونقيس الزاوية بين المحور المتجه شرقًا والمتجه.

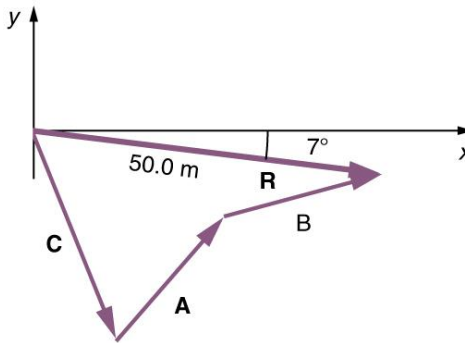


الشكل 18-3

في هذه الحالة، الإزاحة الكلية  $\vec{R}$  مقدارها 50.0 م وفي اتجاه  $7.0^\circ$  جنوب الشرق. باستخدام مقدار المتجه واتجاهه، يمكن التعبير عن هذا المتجه بهذه الطريقة:  $R = 50.0 \text{ m}$  و  $\theta = 7.0^\circ$  جنوب الشرق.

#### المناقشة

يمكن تطبيق الطريقة البيانية "رأس إلى ذيل" لجمع المتجهات على أي عدد من المتجهات. من المهم أيضًا ملاحظة أن المحصلة مستقلة عن الترتيب الذي تتم فيه عملية جمع المتجهات. لذلك، يمكننا جمع المتجهات بأي ترتيب كما هو موضح في الشكل 19-3 وسنحصل - دائمًا - على نفس الحل.



الشكل 19-3



هنا، نرى أنه عند جمع نفس المتجهات بترتيب مختلف، نحصل على نفس الحل. هذه الخاصية صحيحة في كل الحالات وهي خاصية مهمة للمتجهات. جمع المتجهات تبادلي. يمكن جمع المتجهات بأي ترتيب.

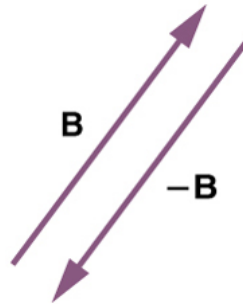
3-1

$$A + B = B + A$$

(هذا صحيح أيضًا لجمع الأعداد - نحصل على نفس النتيجة سواء قمت بجمع 2 + 3 أو 3 + 2 ، على سبيل المثال).

## طرح المتجهات

طرح المتجهات هو امتداد، مباشر، لجمع المتجهات. لتعريف الطرح (سنفترض أننا نريد طرح  $\vec{B}$  من  $\vec{A}$  ، نكتب  $\vec{A} - \vec{B}$  ، يجب علينا أولاً تحديد ما نعنيه بالطرح. يُعرّف سالب المتجه  $\vec{B}$  بأنه  $-\vec{B}$  ، بيانياً، يكون لسالب أي متجه نفس المقدار، ولكن عكس الاتجاه، كما هو موضح في الشكل 20-3. أي أن،  $\vec{B}$  له طول مساوي لـ  $-\vec{B}$  ، لكنه يشير إلى الاتجاه المعاكس. ببساطة، نقبل المتجه، ليشير إلى الاتجاه المعاكس.



الشكل 20-3 سالب المتجه هو مجرد متجه آخر له نفس المقدار، ولكنه يشير إلى الاتجاه المعاكس. لذلك،  $\vec{B}$  سالب المتجه  $-\vec{B}$  ؛ له نفس المقدار، ولكن في الاتجاه المعاكس.

يُعرّف طرح المتجه  $\vec{B}$  من المتجه  $\vec{A}$  ببساطة على أنه جمع  $-\vec{B}$  و  $\vec{A}$  . لاحظ أن الطرح الاتجاهي هو جمع سالب المتجه المطروح. ترتيب الطرح لا يؤثر على الناتج.

3-2

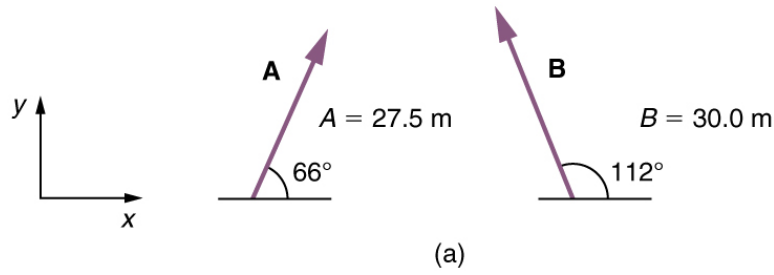
$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B})$$

هذا مشابه لطرح الكميات العددية (على سبيل المثال،  $(-2) + 5 = 5 - 2$  ). مرة أخرى، تكون النتيجة مستقلة عن الترتيب الذي تُجرى به عملية الطرح. عند طرح المتجهات بيانياً، يتم استخدام الأساليب الموضحة أعلاه، كما يوضح المثال التالي.

## مثال 2-3

طرح المتجهات بيانياً: امرأة تبحر بقارب

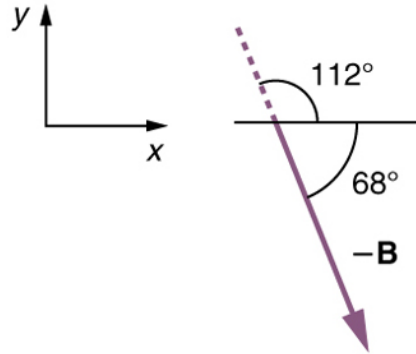
تتبع المرأة، التي تبحر بقارب في الليل، الاتجاهات المؤدية إلى الرصيف. نصت التعليمات على الإبحار أولاً مسافة 27.5 مترًا في اتجاه  $66.0^\circ$  شمال الشرق من موقعها الحالي، ثم السفر 30.0 مترًا في اتجاه  $112^\circ$  شمال الشرق (أو  $22.0^\circ$  غرب الشمال). إذا أخطأت المرأة وسافرت في الاتجاه المعاكس في الجزء الثاني من الرحلة، فأين تنتهي؟ قارن هذا الموقع بموقع الرصيف.



الشكل 21-3

### طريقة الحل

سنمثل المرحلة الأولى من الرحلة بالمتجه  $\vec{A}$  ، والمرحلة الثانية من الرحلة بالمتجه  $\vec{B}$  . يقع الرصيف عند الموقع  $\vec{A} + \vec{B}$  . إذا سافرت المرأة عن طريق الخطأ في الاتجاه المعاكس في الجزء الثاني من الرحلة، فسوف تقطع مسافة  $B$  (30.0 مترًا) في اتجاه  $180^\circ - 112^\circ = 68^\circ$  جنوب الشرق. نمثل هذا بـ  $-\vec{B}$  ، كما هو موضح أدناه. المتجه  $-\vec{B}$  له نفس مقدار  $\vec{B}$  ولكنه في الاتجاه المعاكس. وبالتالي، سوف ينتهي بها الأمر عند الموقع  $\vec{A} + (-\vec{B})$  ، أو  $\vec{A} - \vec{B}$  .

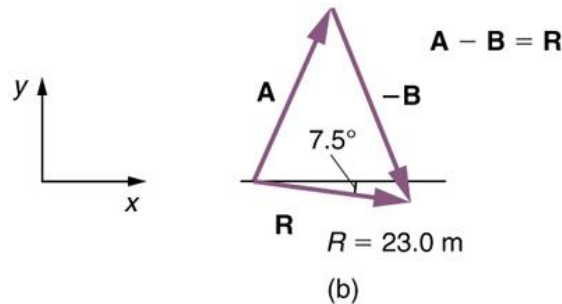


الشكل 22-3

سنجري جمع اتجاهي لمقارنة موقع الرصيف  $\vec{A} + \vec{B}$  ، مع الموقع الذي وصلت إليه المرأة عن طريق الخطأ  $\vec{A} + (-\vec{B})$  .

### الحل

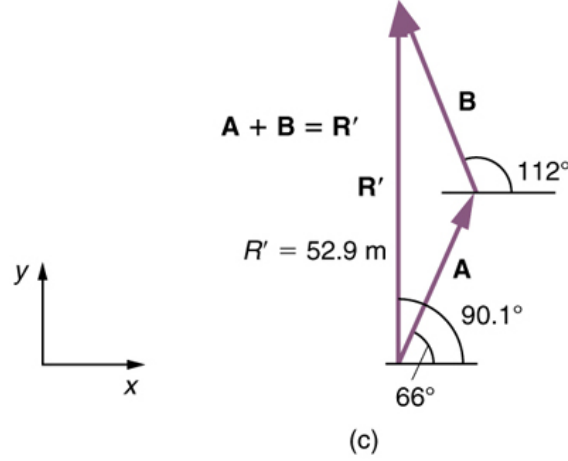
- (1) لتحديد المكان الذي تصل إليه المرأة بالصدفة، ارسم المتجهين  $\vec{A}$  و  $-\vec{B}$  .
- (2) ضع رأس المتجه على ذيل الآخر.
- (3) ارسم المحصلة  $\vec{R}$  .
- (4) استخدم مسطرة ومنقلة لقياس مقدار واتجاه  $\vec{R}$  .



### الشكل 23-3

في هذه الحالة،  $R = 23.0 \text{ m}$  و  $\theta = 7.5^\circ$  جنوب الشرق.

(5) لتحديد موقع الرصيف، نكرر نفس الطريقة لجمع المتجهين  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$ . نحصل على المحصلة  $\vec{R}$ :



### الشكل 24-3

في هذه الحالة،  $R = 52.9 \text{ m}$  و  $\theta = 90.1^\circ$  شمال الشرق.

يمكننا أن نرى أن المرأة ستنتهي على بعد كبير عن الرصيف إذا سافرت في الاتجاه المعاكس في الجزء الثاني من الرحلة.

### المناقشة

نظرًا لأن طرح متجه يكافئ جمع سالب المتجه المطروح (نفس المتجه، ولكن في عكس الاتجاه)، فإن الطريقة البيانية لطرح المتجهات هي نفسها طريقة الجمع.

## ضرب المتجهات في الكميات العددية

إذا قررنا أن نسير أبعد ثلاث مرات في الجزء الأول من الرحلة المذكورة في المثال السابق، فسنمشي  $3 \times 27.5 \text{ m}$ ، أو  $82.5 \text{ مترًا}$ ، في اتجاه شمال الشرق. هذا مثال على ضرب عدد موجب (كمية عددية) في متجه. لاحظ أن المقدار يتغير، لكن الاتجاه يظل كما هو.

إذا كان العدد سالب، فإن ضربه في المتجه يغير مقدار المتجه ويكون المتجه الجديد في عكس اتجاه المتجه الأصلي. على سبيل المثال، إذا ضربت المتجه في  $-2$ ، يتضاعف المقدار ويُعكس الاتجاه. يمكننا تلخيص هذه القواعد في الآتي: عند ضرب المتجه  $\vec{A}$  في العدد  $c$ ،

- يصبح مقدار المتجه القيمة المطلقة لـ  $cA$
- إذا كان  $c$  موجبًا، فإن اتجاه المتجه لا يتغير،
- إذا كان  $c$  سالب، يُعكس الاتجاه.

في حالتنا،  $c = 3$  و  $A = 27.5 \text{ m}$ . تُضرب المتجهات في أعداد في العديد من الحالات. لاحظ أن القسمة هي عكس الضرب. على سبيل المثال، القسمة على 2 هي نفسها الضرب في القيمة  $(\frac{1}{2})$ . قواعد ضرب المتجهات في الأعداد هي نفسها للقسمة؛ عامل المقسوم عليه على أنه عدد قياسي بين 0 و 1.

## تحليل المتجهات إلى مركبات

في الأمثلة أعلاه، جمعنا المتجهات لتحديد المحصلة. ومع ذلك، في كثير من الحالات، سنحتاج إلى عكس ذلك. سنحتاج إلى إيجاد المتجهات التي جمعها معًا ينتج متجه معين. في معظم الحالات، يتضمن ذلك تحديد المركبتين المتعامدتين لمتجه ما، على سبيل المثال، المركبتان  $x$  و  $y$  أو مركبتا الشمال والجنوب أو الشرق والغرب.

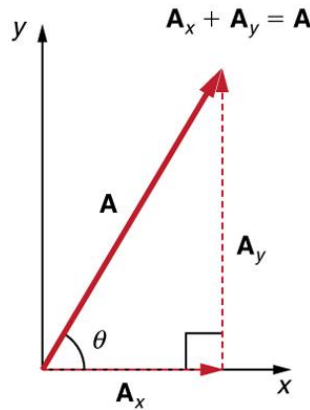
على سبيل المثال، قد نعلم أن الإزاحة الكلية لشخص يسير في مدينة هي 10.3 مربعات في اتجاه  $29.0^\circ$  شمال الشرق ونريد معرفة عدد المربعات في اتجاه الشرق والشمال التي سارها الشخص. تسمى هذه الطريقة "إيجاد المركبات" أو الإزاحة في الاتجاهين الشرقي والشمالي، وهي معكوس العملية المتبعة لإيجاد الإزاحة الكلية. هناك العديد من التطبيقات في الفيزياء حيث يكون هذا أمرًا مفيدًا. سنرى هذا قريبًا في حركة المقذوفات، وأكثر من ذلك بكثير عندما نغطي القوى في علم الديناميكا: قوانين نيوتن للحركة. إيجاد المركبات على طول المحاور المتعامدة (مثل الشمال والشرق)، جزء أساسي فيهم. ولأن المركبتين متعامدتان، المثلثات القائمة أساسية في إيجادهما. التقنيات التحليلية المقدمة في جمع والمتجهات طرحها: الطرق التحليلية مثالية لإيجاد المركبات.

### 3-3 جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية

تستخدم الطرق التحليلية لجمع المتجهات وطرحها الهندسة وعلم المثلثات بدلاً من المسطرة والمنقلة في الطرق البيانية. مع ذلك، يستعان بجزء من الطريقة البيانية، لأنه لا يزال علينا تمثيل المتجهات بواسطة أسهم لتسهيل التصور. وبالرغم من هذا، فإن الطرق التحليلية أكثر إيجازًا وصحة ودقة من الطرق البيانية محدودة الصحة. يحد صحة الطرق التحليلية ودقتها، فقط، الصحة والدقة التي تعرف بها الكميات الفيزيائية.

#### تحليل المتجهات إلى مركبات متعامدة

تسير الطرق التحليلية والمثلثات القائمة جنبًا إلى جنب في الفيزياء لأن الحركات على طول الاتجاهات المتعامدة مستقلة عن بعضها البعض. نحتاج، غالبًا، إلى فصل المتجه إلى مركباته المتعامدة. على سبيل المثال، بالنسبة للمتجه  $\vec{A}$  في الشكل 3-26، قد نرغب في إيجاد المتجهين المتعامدين،  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$  ونضيفهما لإنتاج  $\vec{A}$ .



الشكل 3-26 المتجه  $\vec{A}$ ، ذيله عند أصل نظام إحداثيات، ويظهر معه مركباته في اتجاه  $x$  و  $y$ ،  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$ . هذه المتجهات تشكل مثلث قائم الزاوية. تُلخص العلاقات التحليلية بين هذه المتجهات أدناه.

$\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$  يُعرفا على أنهما مركبتا  $\vec{A}$  على طول المحورين  $x$  و  $y$ . المتجهات الثلاثة  $\vec{A}$ ،  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$  تشكل مثلث قائم:

3-3

$$\vec{A}_x + \vec{A}_y = \vec{A}$$

لاحظ أن هذه العلاقة بين مركبتي المتجه والمتجه تكون صحيحة فقط للكميات المتجهة (التي لها كل من مقدار واتجاه). هذه العلاقة لا تنطبق على المقادير فقط. على سبيل المثال، إذا كان  $A_x = 3 \text{ m}$  في اتجاه الشرق و  $A_y = 4 \text{ m}$  في اتجاه الشمال و  $A = 5 \text{ m}$  في اتجاه شمال الشرق، فمن الصحيح أن  $\vec{A}_x + \vec{A}_y = \vec{A}$ . مع ذلك، فليس صحيحًا أن مجموع مقادير المركبات يساوي مقدار المحصلة. أي أن،

3-4

$$3 \text{ m} + 4 \text{ m} \neq 5 \text{ m}$$

وهكذا،

3-5

$$A_x + A_y \neq A$$

إذا كان المتجه  $\vec{A}$  معلومًا، فإن مقداره  $A$  (طوله) وزاويته  $\theta$  (اتجاهه) معلومان. لإيجاد مركبتي المتجه في اتجاه  $x$  و  $y$ ، نستخدم علاقات المثلث القائم التالية.

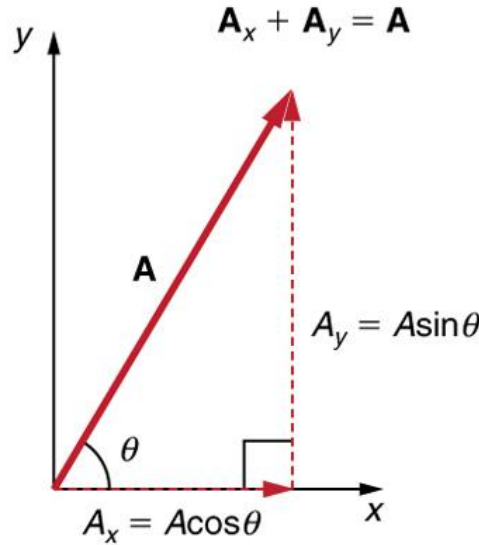
3-6

$$A_x = A \cos \theta$$

و

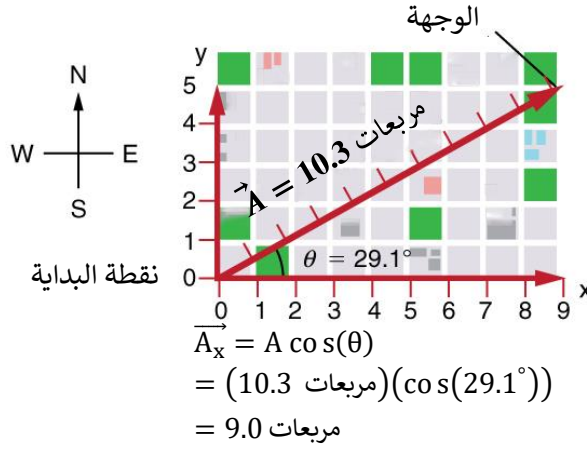
3-7

$$A_y = A \sin \theta$$



**الشكل 3-27** تربط المتطابقات المثلثية بين مقداري المركبتين للمتجهين  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$ ، والمحصلة  $\vec{A}$  والزاوية  $\theta$ . هنا نرى أن  $A_x = A \cos \theta$  و  $A_y = A \sin \theta$ .

افترض، على سبيل المثال، أن  $\vec{A}$  هو المتجه الممثل للإزاحة الكلية لشخص يمشي في المدينة التي قابلناها في الكينماتيكا في بعدين: مقدمة وجمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية.



$$\begin{aligned}\vec{A}_y &= A \sin(\theta) \\ &= (10.3 \text{ مربعات})(\sin(29.1^\circ)) \\ &= 5.0 \text{ مربعا شمالاً}\end{aligned}$$

**الشكل 3-28** يمكننا استخدام العلاقتين  $A_x = A \cos \theta$  و  $A_y = A \sin \theta$  لتحديد مقدار المركبتين الأفقية والرأسية في هذا المثال.

إذا كان مربع  $A = 10.3$  و  $\theta = 29.1^\circ$ ، فإن

3-8
3-9

$$A_x = A \cos \theta = (10.3 \text{ مربع})(\cos 29.1^\circ) = 9.0 \text{ مربع}$$

$$A_y = A \sin \theta = (10.3 \text{ مربع})(\sin 29.1^\circ) = 5.0 \text{ مربع}$$

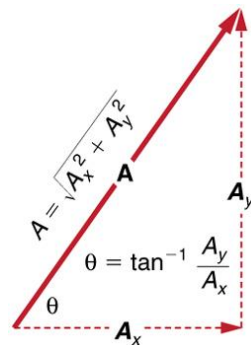
### حساب المحصلة

إذا عُلِّمت المركبتان المتعامدتان  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$  لمتجه، يمكن إيجاد  $\vec{A}$  تحليليًا. لإيجاد المقدار  $A$  والاتجاه  $\theta$  لمتجه بواسطة مركبتيه المتعامدين  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$ ، نستخدم العلاقات التالية:

3-10
3-11

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{A_y}{A_x} \right)$$



**الشكل 3-29** يمكن تحديد مقدار واتجاه المحصلة بمجرد حساب المركبتين الأفقية والرأسية  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$ .

لاحظ أن المعادلة  $A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$  هي مبرهنة فيثاغورس التي تربط بين ضلعي المثلث القائم الزاوية وطول الوتر. على سبيل المثال، إذا كانت  $A_x$  و  $A_y$ ، 9 و 5 مربعات، على التوالي، فإن

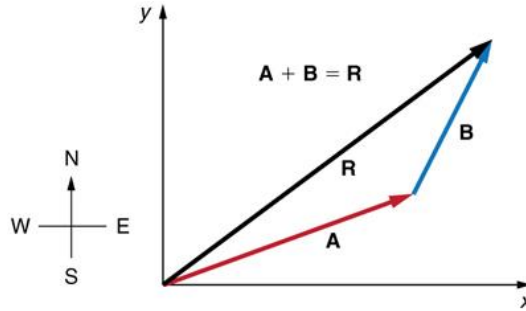
مربع  $A = \sqrt{9^2 + 5^2} = 10.3$  ، وهذا يتسق مع مثال الشخص الذي يسير في المدينة. وأخيرًا، فإن الاتجاه هو  $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{5}{9}\right) = 29.1^\circ$  نفس الاتجاه، أيضًا.

### تحديد المتجهات ومركبات المتجهات بالطرق التحليلية

نُستخدم المعادلتان  $A_x = A \cos(\theta)$  و  $A_y = A \sin \theta$  لإيجاد المركبتين المتعامدتين للمتجه - أي الانتقال من  $A$  و  $\theta$  إلى  $A_x$  و  $A_y$  . المعادلتان  $A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$  و  $\theta = \tan^{-1} \frac{A_y}{A_x}$  تستخدم لإيجاد المتجه من مركبتيه المتعامدتين—أي، الانتقال من  $A_x$  و  $A_y$  إلى  $A$  و  $\theta$  . كلتا العمليتان أساسيتان للطرق التحليلية لجمع المتجهات وطرحها.

### جمع المتجهات باستخدام الطرق التحليلية

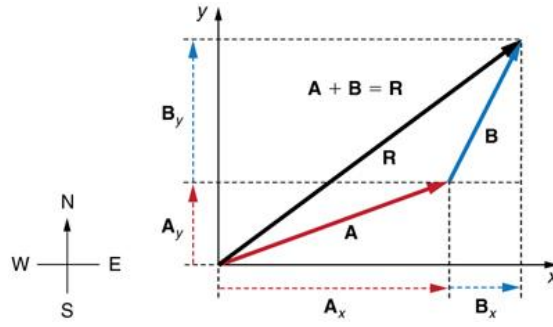
لمعرفة كيفية جمع متجهات باستخدام المركبتين المتعامدتين، انظر **الشكل 30-3**، حيث يُجمع المتجهان  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  لإنتاج  $\vec{R}$ .



**الشكل 30-3** المتجهان  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  هما جزأ المشي، و  $\vec{R}$  هي المحصلة أو الإزاحة الكلية. يمكنك استخدام طرق تحليلية لتحديد مقدار واتجاه  $\vec{R}$ .

إذا كان  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  يمثلان جزأين من المشي (إزاحتان)، فهذا يعني أن  $\vec{R}$  هي الإزاحة الكلية. الشخص الذي يمشي ينتهي به الأمر عند رأس  $\vec{R}$  . هناك طرق عديدة للوصول إلى نفس النقطة. على وجه الخصوص، يمكن للشخص أن يسير أولاً في اتجاه  $x$  ، ثم في اتجاه  $y$  . هذان المساران هما المركبتان الأفقية والرأسية، و  $\vec{R}_x$  و  $\vec{R}_y$  . إذا كنا نعلم  $R_x$  و  $R_y$  ، يمكننا أن نجد  $R$  و  $\theta$  باستخدام المعادلتين  $A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$  و  $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x}\right)$  . عندما تستخدم الطريقة التحليلية لجمع المتجهات، يمكنك تحديد المركبات أو مقدار واتجاه المتجه.

**الخطوة 1:** حدد المحورين  $x$  و  $y$  اللذين سيستخدمان في المسألة. ثم جد مركبات كل متجه على طول كل محور. استخدم المعادلتين  $A_x = A \cos \theta$  و  $A_y = A \sin \theta$  لإيجاد المركبات. في **الشكل 30-3**، المركبات هي  $A_x$  و  $A_y$  و  $B_x$  و  $B_y$  . الزوايا التي يصنعها المتجهين  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  مع المحور  $x$  هي  $\theta_A$  و  $\theta_B$  ، على التوالي.



**الشكل 31-3** لجمع المتجهين  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  ، حدد أولاً المركبات الأفقية والرأسية. المركبات هي  $A_x$  و  $A_y$  و  $B_x$  و  $B_y$  ، المتجهات المنقطة في الصورة.

**الخطوة 2.** جد مركبتي المحصلة على طول كل محور، عن طريق جمع مركبات المتجهات على طول هذا المحور. كما هو مبين في **الشكل 32-3**،

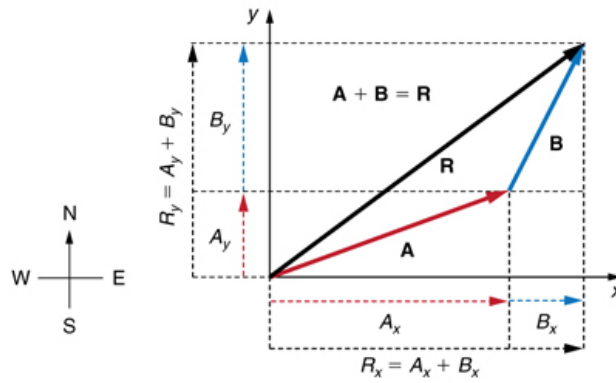
3-12

$$R_x = A_x + B_x$$

و

3-13

$$R_y = A_y + B_y$$



**الشكل 32-3** مجموع مقدار  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$  هو  $R_x$  مقدار المحصلة على المحور الأفقي. بالمثل، مجموع مقدار  $\vec{A}_y$  و  $\vec{B}_y$  هو  $R_y$  مقدار المحصلة على المحور الرأسي.

المركبات الموجودة على نفس المحور، مثل المحور الأفقي، هي متجهات على طول نفس الخط، وبالتالي يمكن جمعها مثل الأعداد. وينطبق الشيء نفسه على المركبات الموجودة على طول المحور الرأسي. (على سبيل المثال، يمكن السير 9 مربعات باتجاه الشرق على مرحلتين، أولاً 3 مربعات شرقاً وثانياً 6 مربعات شرقاً، تكون المحصلة 9 مربعات، لأنهم في نفس الاتجاه.) لذلك تحليل المتجهات إلى مركبات على محورين، يجعل من السهل جمعها. الآن بعد أن عرفت مركبتي  $\vec{R}$  ، يمكن إيجاد مقدارها واتجاهها.

**الخطوة 3** للحصول على مقدار المحصلة  $\vec{R}$  ، استخدم مبرهنة فيثاغورس:

3-14

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

**الخطوة 4.** للحصول على اتجاه المحصلة:

3-15

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{R_y}{R_x}\right)$$

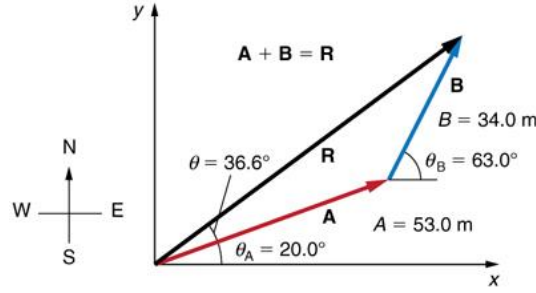


يوضح المثال التالي هذه الطريقة لجمع المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة.

### مثال 3-3

#### جمع المتجهات باستخدام طرق تحليلية

- اجمع المتجه  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  المبينين في الشكل 3-3، باستخدام المركبات المتعامدة على طول المحورين  $x$  و  $y$ .  
المتجه  $\vec{A}$  يمثل الجزء الأول من المسير، حيث يمشي الشخص  $53.0 \text{ m}$  في اتجاه  $20.0^\circ$  شمال الشرق.  
المتجه  $\vec{B}$  يمثل الجزء الثاني من المسير، حيث يمشي الشخص  $34.0 \text{ m}$  في اتجاه  $63.0^\circ$  شمال الشرق.



**الشكل 3-3** المتجه  $\vec{A}$  مقداره  $53.0 \text{ m}$  واتجاهه  $20.0^\circ$  شمال المحور  $x$ . المتجه  $\vec{B}$  مقداره  $34.0 \text{ m}$  واتجاهه  $63.0^\circ$  شمال المحور  $x$ . يمكن استخدام الطرق التحليلية لتحديد مقدار واتجاه  $\vec{R}$ .

#### طريقة الحل

مركبات  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  على طول المحور  $x$  و  $y$  تمثل المسير في اتجاه الشرق والشمال للوصول إلى نقطة النهاية. بمجرد إيجادهما، يمكن جمعهما لإيجاد المحصلة.

#### الحل

باتباع الطريقة الموضحة أعلاه، أولاً نجد مركبات  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  على طول المحورين  $x$  و  $y$ . لاحظ أن  $A = 53.0 \text{ m}$ ،  $\theta_A = 20.0^\circ$ ،  $B = 34.0 \text{ m}$ ، و  $\theta_B = 63.0^\circ$ . نجد المركبات على طول محور  $x$  من العلاقة  $A_x = A \cos \theta$ ، والتي تعطي

3-16

$$\begin{aligned} A_x &= A \cos \theta_A = (53.0 \text{ m})(\cos 20.0^\circ) \\ &= (53.0 \text{ m})(0.940) = 49.8 \text{ m} \end{aligned}$$

و

3-17

$$\begin{aligned} B_x &= B \cos \theta_B = (34.0 \text{ m})(\cos 63.0^\circ) \\ &= (34.0 \text{ m})(0.454) = 15.4 \text{ m} \end{aligned}$$

وعلى نحو مماثل، مركبات  $y$  يمكن الحصول عليها من العلاقة  $A_y = A \sin(\theta_A)$ :

3-18

$$\begin{aligned} A_y &= A \sin \theta_A = (53.0 \text{ m})(\sin 20.0^\circ) \\ &= (53.0 \text{ m})(0.342) = 18.1 \text{ m} \end{aligned}$$

و

3-19

$$\begin{aligned} B_y &= B \sin \theta_B = (34.0 \text{ m})(\sin 63.0^\circ) \\ &= (34.0 \text{ m})(0.891) = 30.3 \text{ m} \end{aligned}$$

مركبتي المحصلة على طول المحورين x و y هما:

3-20

$$R_x = A_x + B_x = 49.8 \text{ m} + 15.4 \text{ m} = 65.2 \text{ m}$$

و

3-21

$$R_y = A_y + B_y = 18.1 \text{ m} + 30.3 \text{ m} = 48.4 \text{ m}$$

الآن يمكننا حساب مقدار المحصلة باستخدام مبرهنة فيثاغورس:

22-3

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(65.2)^2 + (48.4)^2} \text{ m}$$

لذلك،

3-23

$$R = 81.2 \text{ m}$$

أخيرًا، نجد اتجاه المحصلة:

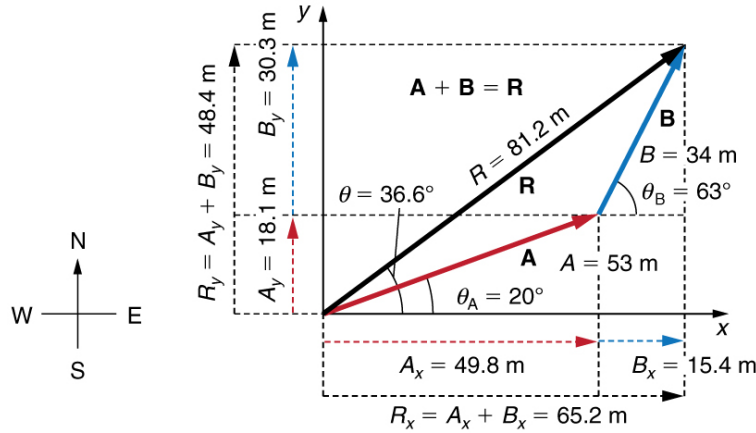
3-24

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{R_y}{R_x} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{48.4}{65.2} \right)$$

لذلك،

3-25

$$\theta = \tan^{-1}(0.742) = 36.6^\circ$$



الشكل 3-34 باستخدام الطرق التحليلية، حددنا مقدار  $\vec{R}$  ( 81.2 m ) واتجاهه (  $36.6^\circ$  ).

### المناقشة

يوضح هذا المثال جمع المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة. طرح المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة مشابه تمامًا للجمع؛ إنه جمع سالب المتجه.

تُطرح المتجهات عن طريق جمع سالب المتجه. أي أن،  $\vec{A} - \vec{B} \equiv \vec{A} + (-\vec{B})$ . وبالتالي، فإن طريقة طرح المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة مطابقة لطريقة الجمع. مركبات  $-\vec{B}$  هي سالب متجهات  $\vec{B}$ . وبالتالي، فإن مركبات x و y للمحصلة  $\vec{R} = \vec{A} - \vec{B}$  هي

3-26

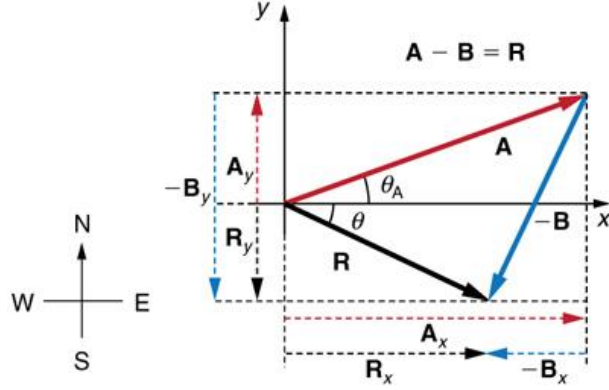
$$R_x = A_x + (-B_x)$$

و

$$R_y = A_y + (-B_y)$$

وباقى الطريقة مطابقة لطريقة الجمع. (انظر الشكل 3-35).

يُعد تحليل المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة مفيدًا جدًا في العديد من مجالات الفيزياء، لأن الكميات المتعامدة غالبًا ما تكون مستقلة عن بعضها البعض. في الجزء القادم، حركة المقذوفات، يساعد استخدام المركبات المتعامدة في توضيح الصورة وتبسيط الفيزياء.



**الشكل 3-35** طرح المتجهين الموضحين في الشكل 3-30. مركبتا  $\vec{B}$  هي سالب مركبتي  $\vec{B}$ . طريقة الطرح هي نفس طريقة الجمع.

### 4-3 حركة المقذوفات

حركة المقذوفات هي حركة جسم قُذف أو رُمي في الهواء ويخضع فقط لتسارع الجاذبية. يسمى الجسم المرمي **مقذوف**، لأن مساره يشبه مسار المقذوفات. حركة الأجسام الساقطة، كما تم تناولها في أساسيات حل مسائل الحركة أحادية البعد، هي نوع بسيط، أحادي البعد، من حركة المقذوفات التي لا يوجد فيها حركة أفقية. في هذا الجزء، نأخذ في الاعتبار حركة المقذوفات ثنائية الأبعاد، مثل حركة كرة القدم أو أي جسم آخر تكون مقاومة الهواء له مهملة.

أهم حقيقة، يجب تذكرها هنا، هي أن الحركات على طول المحاور المتعامدة مستقلة عن بعضها البعض. وبالتالي، يمكن تحليلها بشكل منفصل. تمت مناقشة هذه الحقيقة في الكينماتيكا في بعدين: مقدمة، حيث شاهدنا أن الحركات الرأسية والأفقية مستقلة عن بعضها البعض. مفتاح تحليل حركة المقذوفات ثنائية الأبعاد هو فصلها إلى حركتين، واحدة على طول المحور الأفقي والأخرى على طول المحور الرأسي. (هذا الاختيار للمحاور هو الأكثر منطقية، لأن التسارع بسبب الجاذبية رأسي - وبالتالي، ليس هناك تسارع على طول المحور الأفقي، عندما تكون مقاومة الهواء مهملة.) كما هو معتاد، نسمي المحور الأفقي المحور x والمحور الرأسي المحور y. يوضح الشكل 3-36 رمز الإزاحة، حيث  $\vec{s}$  تُعرّف بأنها إجمالي الإزاحة  $\vec{x}$  و  $\vec{y}$  هما مركبتاها على طول المحورين الأفقي والرأسي، على التوالي. مقادير هذه المتجهات هي x و y و s. (لاحظ أنه في الجزء الأخير، استخدمنا الرمز  $\vec{A}$  لتمثيل المتجه الذي مركبتاه  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$ . إذا وصلنا على هذا النمط، كنا سنرمز للإزاحة بالرمز  $\vec{s}$  ومركبتها  $\vec{s}_x$  و  $\vec{s}_y$ . ولكن، لتبسيط الترميز، سنرمز للمركبتين بالرمزين  $\vec{x}$  و  $\vec{y}$ ).

لوصف الحركة، بالطبع، يجب أن نتعامل مع السرعة والتسارع، وكذلك مع الإزاحة. يجب أن نجد مركباتهم على طول المحورين x و y أيضًا. سنفترض أن جميع القوى باستثناء الجاذبية (مثل مقاومة الهواء والاحتكاك، على سبيل المثال) مهملة. في هذه الحالة، يمكننا إيجاد مركبتي التسارع بسهولة:

(لاحظ أن هذا يفترض أن الاتجاه لأعلى هو الاتجاه الموجب. إذا اخترت نظام أحداثيات فيه الاتجاه لأسفل هو الموجب، فإن التسارع بسبب الجاذبية يكون موجب أيضًا.) لأن

الجاذبية رأسية،  $a_x = 0$  . كلا التسارعين ثابتان، لذلك، يمكن استخدام معادلات الكينماتيكا للعجلة الثابتة.

### مراجعة معادلات الكينماتيكا (العجلة الثابتة)

3-28

$$x = x_0 + \bar{v}t$$

3-29

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$$

3-30

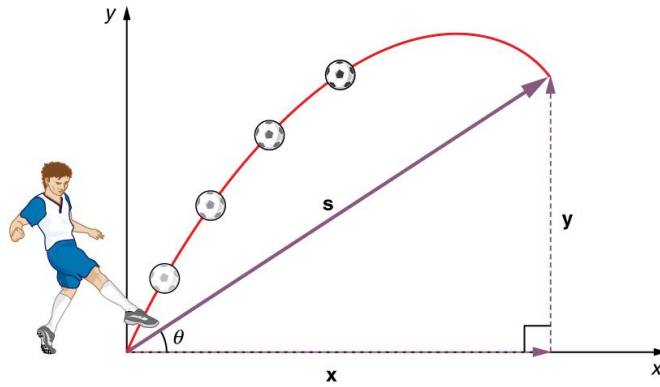
$$v = v_0 + at$$

3-31

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

3-32

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$



**الشكل 3-36** الإزاحة الكلية لكرة القدم هي  $\vec{s}$  على أي نقطة على مسارها. المتجه  $\vec{s}$  له مركبتان على طول المحورين الأفقي والرأسي  $x$  و  $y$  . مقدار الإزاحة هو  $s$  ويصنع زاوية  $\theta$  مع الأفقي.

مع هذه الافتراضات، تُستخدم الخطوات التالية بعد ذلك لتحليل حركة المقذوفات:

**الخطوة 1** حل الحركة إلى مركبات أفقية ورأسية على طول المحورين  $x$  و  $y$ . هذان المحوران متعامدان، لذلك نحصل عليهم من خلال العلاقتين  $A_x = A \cos \theta$  و  $A_y = A \sin \theta$  . مقدار مركبتنا الإزاحة  $\vec{s}$  على طول هذين المحورين هو  $x = s \cos \theta$  و  $y = s \sin \theta$  . مقدار مركبتي السرعة المتجهة  $\vec{v}$  هما  $v_x = v \cos \theta$  و  $v_y = v \sin \theta$  ، حيث  $v$  مقدار السرعة المتجهة و  $\theta$  اتجاهها، كما هو موضح في الشكل 3-37. يُشار إلى القيم الأولية باللاحقة السفلية 0، كالمعتاد.

**الخطوة 2.** نعامل مع الحركة كحركتين مستقلتين أحاديّتي البعد، واحدة أفقية والأخرى رأسية. معادلات الحركة الأفقية والرأسية تكون على الصور التالية:

#### الحركة الأفقية ( $a_x = 0$ )

3-33

$$x = x_0 + v_x t$$

3-34

$$v_x = v_{0x} = v_x = \text{السرعة ثابتة}$$

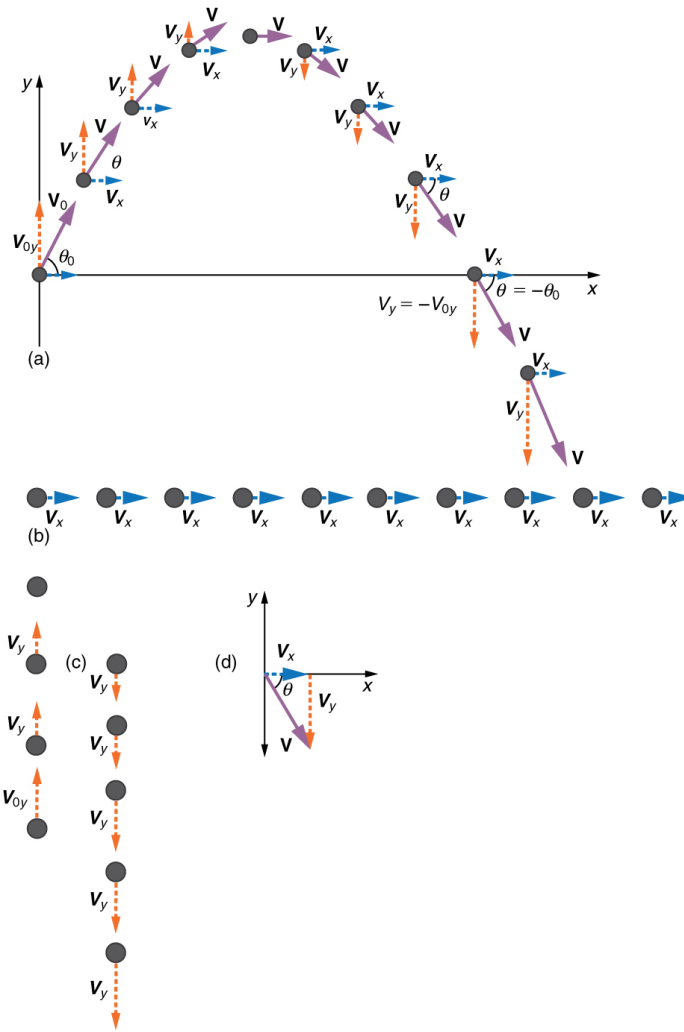
**الحركة الرأسية (  $a_y = -g = -9.80 \text{ m/s}^2$  )**

3-35	$y = y_0 + \frac{1}{2}(v_{0y} + v_y)t$
3-36	$v_y = v_{0y} - gt$
3-37	$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$
3-38	$v_y^2 = v_{0y}^2 - 2g(y - y_0)$

**الخطوة 3.** احسب القيم المجهولة في الحركتين المنفصلتين - إحداهما أفقية والأخرى رأسية. لاحظ أن المتغير المشترك الوحيد بين الحركتين هو الزمن  $t$ . إجراءات حل المسائل هنا هي نفسها المذكورة في الكينماتيكا أحادية البعد وهي موضحة في الأمثلة أدناه.

**الخطوة 4.** أعد الجمع بين الحركتين (الأفقية والرأسية) لإيجاد الإزاحة الكلية  $\vec{s}$  والسرعة المتجهة  $\vec{v}$ . نظرًا لأن الحركات على طول  $x$  و  $y$  متعامدتان، فإننا نجد هذه المتجهات باستخدام التقنيات الموضحة في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية**؛ باستخدام العلاقتين  $A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$  و  $\theta = \tan^{-1} \frac{A_y}{A_x}$  ، حيث  $\theta$  اتجاه الإزاحة  $\vec{s}$  و  $\theta_v$  هي اتجاه السرعة  $\vec{v}$  :  
الإزاحة والسرعة الكلية

3-39	$s = \sqrt{x^2 + y^2}$
3-40	$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$
3-41	$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$
3-42	$\theta_v = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x}$



**الشكل 3-37 (a)** نحلل حركة المقذوف ثنائية الأبعاد إلى حركتين مستقلتين أحاديتي البعد على طول المحورين الأفقي والرأسي. (b) الحركة الأفقية بسيطة، لأن  $a_x = 0$  و  $v_x$  ثابت. (c) السرعة الرأسية تقل كلما ارتفع الكائن؛ عند نقطة أقصى ارتفاع، السرعة الرأسية تساوي صفر. مع سقوط الكائن ناحية الأرض مرة أخرى، السرعة الرأسية تزداد في المقدار، مرة أخرى، لكن في عكس اتجاه السرعة الرأسية الأولية. (d) الحركتان الأفقية والرأسية تجمعان معاً للحصول على السرعة المتجهة الكلية عند أي نقطة على المسار.

### مثال 4-3

#### قذيفة الألعاب النارية تنفجر عالياً بعيداً

أثناء عرض الألعاب النارية، أطلقت قذيفة في الهواء بسرعة أولية تبلغ 70.0 م / ث بزاوية  $75.0^\circ$  فوق الأفقي، كما هو موضح في **الشكل 3-38**. يُضبط الفتيل لإشعال القذيفة بمجرد وصولها إلى أعلى نقطة فوق سطح الأرض. (أ) احسب الارتفاع الذي تنفجر عنده القذيفة. (ب) كم من الوقت يمضي بين إطلاق القذيفة والانفجار؟ (ج) ما الإزاحة الأفقية للقذيفة عندما تنفجر؟

#### طريقة الحل

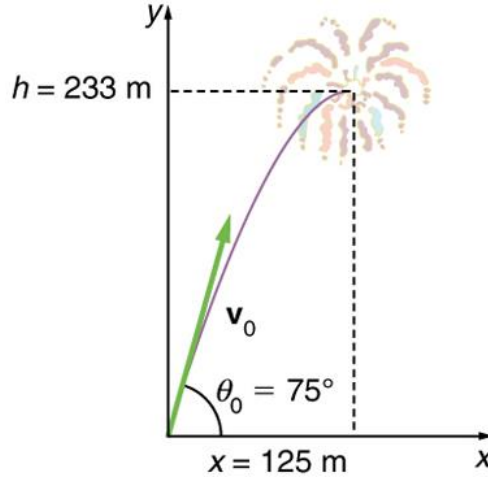
لأن مقاومة الهواء مهملة بالنسبة للقذيفة قبل الانفجار، يمكن استخدام طريقة التحليل الموضحة أعلاه. يمكن تقسيم الحركة إلى حركتين أفقية ورأسية حيث  $a_x = 0$  و  $a_y = -g$ . يمكننا بعد ذلك افتراض أن  $x_0$  و  $y_0$  كلاهما يساوي صفر، ثم نحسب الكميات المطلوبة.

#### الحل لـ (أ)

نعني بكلمة "الارتفاع" الموضع الرأسى  $y$  فوق نقطة البداية. تكون نقطة أقصى ارتفاع، عند  $v_y = 0$ . نظرًا لأننا نعلم السرعتين الابتدائية والنهائية بالإضافة إلى الموضع الأولي، فإننا نستخدم المعادلة التالية لإيجاد  $y$ :

3-43

$$v_y^2 = v_{0y}^2 - 2g(y - y_0)$$



**الشكل 3-38** مسار قذيفة الألعاب النارية. ضُبط الفتيل لتفجير القذيفة عند أعلى نقطة في مسارها، والتي وجدنا أنها تقع على ارتفاع 233 مترًا وعلى بعد 125 مترًا أفقيًا.

نظرًا لأن كل من  $y_0$  و  $v_y$  يساوي صفر، تصبح المعادلة أبسط

3-44

$$0 = v_{0y}^2 - 2gy$$

منها نحسب  $y$

3-45

$$y = \frac{v_{0y}^2}{2g}$$

الآن يجب أن نجد  $v_{0y}$ ، مركبة السرعة الابتدائية الرأسية. تعطى بالعلاقة  $v_{0y} = v_0 \sin \theta$ ، حيث  $v_{0y}$  هي السرعة الابتدائية وتساوي 70.0 m/s، و  $\theta_0 = 75.0^\circ$  هي الزاوية الابتدائية. لذلك،

3-46

$$v_{0y} = v_0 \sin \theta_0 = \left(70.0 \frac{m}{s}\right) (\sin 75^\circ) = 67.6 \frac{m}{s}$$

و  $y$  تساوي

3-47

$$y = \frac{\left(67.6 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9.80 \frac{m}{s^2}\right)}$$

لذلك،

3-48

$$y = 233 \text{ m}$$

**مناقشة 1 (أ)**

لاحظ أنه لأن الاتجاه لأعلى موجب، فإن السرعة الابتدائية موجبة، وكذلك أقصى ارتفاع، لكن التسارع بسبب الجاذبية سالب. لاحظ، أيضًا، أن أقصى ارتفاع يعتمد فقط على المركبة الرأسية للسرعة الأولية، بحيث يصل

أي مقذوف ذي مركبة سرعته الأولية تساوي 67.6 م / ث إلى أقصى ارتفاع قدره 233 م (عند إهمال مقاومة الهواء). الأعداد في هذا المثال معقولة بالنسبة لعروض الألعاب النارية الكبيرة، التي تصل قذائفها إلى مثل هذه الارتفاعات قبل أن تنفجر. في الحياة العملية، مقاومة الهواء ليست مهملة تمامًا؛ أي أن قيمتها صغيرة، وبالتالي يجب أن تكون السرعة الأولية أكبر، إلى حد ما، من المذكورة في المثال السابق للوصول إلى نفس الارتفاع.

### الحل (ب)

كما هو الحال في العديد من مسائل الفيزياء، هناك أكثر من طريقة لحساب زمن الوصول إلى أعلى نقطة. في هذه الحالة، أسهل طريقة هي استخدام العلاقة  $y = y_0 + \frac{1}{2}(v_{0y} + v_y)t$ . لأن  $y_0$  تساوي صفر، هذه المعادلة تصبح، أبسط،

3-49

$$y = \frac{1}{2}(v_{0y} + v_y)t$$

لاحظ أن السرعة الرأسية النهائية  $v_y$  عند أقصى ارتفاع تساوي صفر. لذلك،

3-50

$$t = \frac{2y}{v_{0y} + v_y} = \frac{2(233 \text{ m})}{67.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6.90 \text{ s}$$

### مناقشة ل (ب)

هذه الزمن مناسب، أيضًا، للألعاب النارية الكبيرة. إذا رأيت إطلاق الألعاب النارية من قبل، ستلاحظ مرور عدة ثوان قبل انفجار القذيفة. (هناك طريقة أخرى لإيجاد الزمن وهي باستخدام العلاقة  $y = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$  وحل المعادلة التربيعية لحساب الزمن  $t$ .)

### الحل ل (ج)

لأن مقاومة الهواء مهملة،  $a_x = 0$  والسرعة الأفقية ثابتة، كما هو موضح أعلاه. الإزاحة الأفقية هي السرعة الأفقية مضروبة في الزمن، من العلاقة  $x = x_0 + v_x t$ ، حيث  $x_0$  تساوي صفر:

3-51

$$x = v_x t$$

حيث  $v_x$  هي المركبة الأفقية للسرعة، التي تعطى بالعلاقة  $v_x = v_0 \cos \theta_0$ . لذلك

3-52

$$v_x = v_0 \cos \theta_0 = (70.0 \frac{\text{m}}{\text{s}})(\cos 75.0^\circ) = 18.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

الزمن  $t$  لكلا الحركتين له نفس القيمة، لذلك  $x$  تساوي

3-53

$$x = \left(18.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(6.90 \text{ s}) = 125 \text{ m}$$

### المناقشة ل (ج)

سرعة الحركة الأفقية ثابتة في غياب مقاومة الهواء. يمكن أن تكون الإزاحة الأفقية مفيدة في منع شظايا الألعاب النارية من السقوط على المتفرجين. بمجرد أن تنفجر القذيفة، يكون لمقاومة الهواء تأثير كبير، لذلك، ستسقط العديد من الشظايا لأسفل مباشرة.



عند حل الجزء (أ) في المثال السابق، التعبير المستخدم لحساب  $y$  يمكن استخدامه لحركة أي مقذوف عند إهمال مقاومة الهواء. تذكر أنه إذا كان أقصى ارتفاع  $y = h$ ، فإن

3-54

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2g}$$

تُعرف هذه المعادلة أقصى ارتفاع للمقذوف وتعتمد فقط على المركبة الرأسية للسرعة الابتدائية.

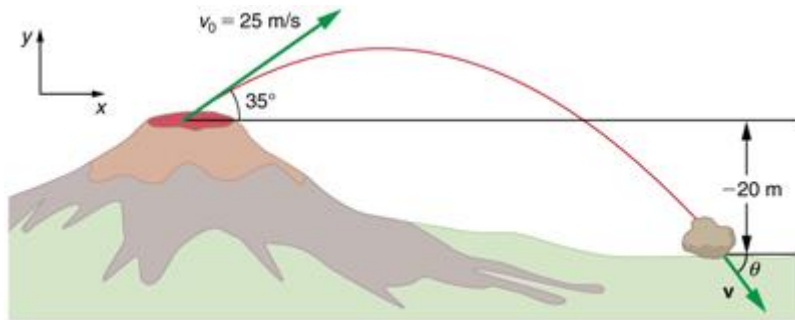
### تحديد نظام الإحداثيات

من المهم إعداد نظام إحداثيات عند تحليل حركة المقذوفات. جزء من تحديد نظام الإحداثيات هو تحديد نقطة الأصل للموضعين  $x$  و  $y$ . غالبًا ما يكون من الملائم اختيار نقطة الأصل كالموضع الأولي للجسم؛ أي أن  $x_0 = 0$  و  $y_0 = 0$ . من المهم أيضًا تحديد الاتجاهات الموجبة والسالبة في الاتجاهين  $x$  و  $y$ . عادةً، نحدد الاتجاه الرأسي الموجب بأنه الاتجاه الصاعد لأعلى، وعادة ما يكون الاتجاه الأفقي الموجب هو اتجاه حركة الجسم. إذا كان نظام الإحداثيات كما ذكرنا، فإن التسارع الرأسي،  $g$ ، سالب (لأنه يتجه لأسفل نحو الأرض). من المفيد أحيانًا أخرى تحديد الإحداثيات بطريقة مختلفة. على سبيل المثال، إذا كنت تحلل حركة كرة ألقيت لأسفل من أعلى جرف، فقد يكون من المنطقي اختيار الاتجاه لأسفل هو الاتجاه الموجب؛ لأن حركة الكرة تكون فقط في الاتجاه لأسفل. في هذه الحالة، التسارع  $g$  سالب.

### مثال 5-3

#### حساب حركة المقذوف: قذيفة هوت روك

كيلويا في هاواي هو البركان الأكثر نشاطًا في العالم. تقذف البراكين النشطة جدًا الصخور الحمراء الساخنة والحمم البركانية وليس الدخان والرماد. افترض قذف صخرة كبيرة من البركان بسرعة 25.0 م / ث وبزاوية  $35.0^\circ$  فوق الأفقي، كما هو موضح في الشكل 3-39. تضرب الصخرة جانب البركان على ارتفاع 20.0 مترًا أقل من الارتفاع الأولي. (أ) احسب الزمن الذي تستغرقه الصخرة لاتباع هذا المسار. (ب) ما مقدار واتجاه سرعة الصخرة عند الاصطدام؟



الشكل 3-39 مسار صخرة مقذوفة من بركان كيلويا.

#### طريقة الحل

مرة أخرى، سيتيح لنا تحليل هذه الحركة ثنائية الأبعاد إلى حركتين مستقلتين أحاديّتي البعد إيجاد الكميات المطلوبة. يعتمد الزمن الذي تقضيه القذيفة في الهواء على الحركة الرأسية وحدها. سنحسب  $t$  أولاً. بينما ترتفع الصخور وتنخفض رأسياً، تستمر الحركة الأفقية بسرعة ثابتة. يتطلب هذا المثال السرعة النهائية. وبالتالي، سنحتاج إلى جمع السرعتين الرأسية والأفقية للحصول على  $v$  و  $\theta_v$  عند الزمن النهائي  $t$  المحسوب في الجزء الأول من المثال.

### الحل ل (أ)

خلال وجودها في الهواء، ترتفع الصخرة ثم تنخفض إلى الموضع النهائي 20.0 m أقل من الارتفاع الابتدائي. يمكننا أن نجد زمن هذه الحركة باستخدام

3-55

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

إذا اعتبرنا الموضع الأولي  $y_0$  يساوي صفر، فإن الموضع النهائي  $y = -20.0$  m . السرعة الابتدائية الرأسية تساوي  $v_{0y} = v_0 \sin \theta_0 = (25.0 \frac{m}{s})(\sin 35.0^\circ) = 14.3 \frac{m}{s}$  . بالتعويض عن القيم المعلومة نحصل على

3-56

$$-20.0 \text{ m} = (14.3 \frac{m}{s})t - (4.90 \frac{m}{s^2})t^2$$

بإعادة ترتيب المعادلة التربيعية للمتغير  $t$  :

3-57

$$(4.90 \frac{m}{s^2})t^2 - (14.3 \frac{m}{s})t - (20.0 \text{ m}) = 0$$

هذا التعبير هو معادلة تربيعية لها الصورة  $at^2 + bt + c = 0$  ، حيث الثوابت  $a = 4.90$  و  $b = -14.3$  و  $c = -20.0$  . نحصل على حلول هذه المعادلة من الصيغة التربيعية:

3-58

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

من هذه المعادلة نحصل على حلين:  $t = 3.96$  و  $t = -1.03$  . القيمة السالبة للزمن تقتضي وصول الصخرة لنقطة النهاية قبل بداية الحركة، وهذا حل غير منطقي لذلك نرفضه.

3-59

$$t = 3.96 \text{ s}$$

### مناقشة ل (أ)

يعتمد زمن حركة المقذوف على حركته الرأسية فقط. لذا فإن أي مقذوف سرعته الأولية الرأسية 14.3 م / ث ويهبط 20.0 م تحت موضعه الأولي، سوف يقضي 3.96 ث في الهواء.

### الحل ل (ب)

باستخدام القيم المعلومة لنا، يمكننا حساب  $v_x$  و  $v_y$  وجمعهما لحساب السرعة الكلية  $v$  والزاوية  $\theta_0$  التي تصنعها مع المحور الأفقي. لأن  $v_x$  ثابتة، يمكننا حسابها عند أي موضع أفقي. لذلك:

3-60

$$v_x = v_0 \cos \theta_0 = (25.0 \frac{m}{s})(\cos 35^\circ) = 20.5 \frac{m}{s}$$

نحصل على السرعة النهائية من المعادلة:

3-61

$$v_y = v_{0y} - gt$$

وجدنا في الجزء (a) أن  $v_{0y}$  تساوي  $14.3 \frac{m}{s}$  . لذلك،

3-62

$$v_y = -24.5 \frac{m}{s}$$

لذلك،

3-63

$$v_y = -24.5 \text{ m/s}$$

لإيجاد قيمة السرعة النهائية  $v$  ، نجمع مركبتيها المتعامدتين، باستخدام العلاقة التالية:

3-64

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\left(20.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + \left(-24.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}$$

منها نحصل على

3-65

$$v = 31.9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

يمكننا حساب الاتجاه  $\theta_v$  من المعادلة:

3-66

$$\theta_v = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x}$$

لذلك،

3-67

$$\theta_v = \tan^{-1} \left( -\frac{24.5}{20.5} \right) = \tan^{-1}(-1.19)$$

وهكذا،

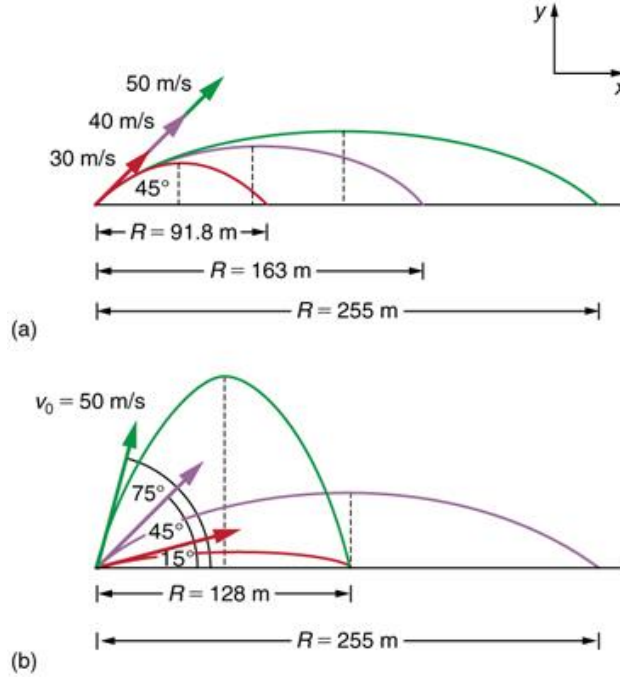
3-68

$$\theta_v = -50.1^\circ$$

#### مناقشة ل (ب)

الزاوية السالبة تعني أن اتجاه السرعة  $50.1^\circ$  تحت الأفقي. تتسق هذه النتيجة مع حقيقة أن السرعة الرأسية النهائية سالبة ومن ثم تتجه إلى الأسفل - كما قد تتوقع لأن الارتفاع النهائي أقل بمقدار 20.0 مترًا من الارتفاع الأولي. (انظر الشكل 3-39).

من أهم الأشياء التي توضحها حركة المقذوفات أن الحركتين الرأسية والأفقية مستقلتان عن بعضهما البعض. كان جاليليو أول شخص يفهم هذه السمة تمامًا. استخدمها للتنبؤ بمدى القذيفة. على الأرض المستوية، نعرف المدى بأنه المسافة الأفقية  $\vec{R}$  التي تقطعها قذيفة. كان جاليليو وآخرين مهتمين بمدى المقذوفات للأغراض العسكرية في المقام الأول - مثل تصويب المدافع. ومع ذلك، فإن دراسة مدى المقذوفات يمكن أن يلقي الضوء على ظواهر أخرى مثيرة للاهتمام، مثل مدارات الأقمار الصناعية حول الأرض. دعونا نبحث في مدى القذيفة أكثر.



**الشكل 3-40** مسارات المقذوفات على الأرض المستوية. (a) كلما زادت السرعة الابتدائية  $v_0$  ، زاد المدى للمقذوف لنفس زاوية القذف الابتدائية. (b) تأثير الزاوية الابتدائية  $\theta_0$  على مدى المقذوف لنفس السرعة الابتدائية. لاحظ أن المدى هو نفسه لـ  $15^\circ$  و  $75^\circ$  ، لكن، أقصى ارتفاع مختلف.

كيف تؤثر السرعة الابتدائية للقذيفة على مداها؟ من الواضح أنه كلما زادت السرعة الأولية، زاد المدى، كما هو موضح في الشكل 3-40 (أ). الزاوية الأولية  $\theta_0$  لها أيضًا تأثير كبير على المدى، كما هو موضح في الشكل 3-40 (ب). فيما يخص السرعة الأولية الثابتة، مثل التي يمكن أن ينتجها مدفع، يكون أقصى مدى هو المدى عند الزاوية  $\theta_0 = 45^\circ$  . هذا صحيح فقط عند إهمال مقاومة الهواء. إذا أخذت مقاومة الهواء بعين الاعتبار، تكون الزاوية القصوى  $38^\circ$  تقريبًا. ومن المثير للاهتمام، أنه لكل زاوية ابتدائية ماعدا  $45^\circ$  ، هناك زاويتان تعطيان نفس المدى- مجموع هاتين الزاويتين  $90^\circ$  . يعتمد المدى أيضًا على قيمة تسارع الجاذبية  $g$  . تمكن رائد الفضاء آلان شيرد من ضرب كرة الغولف لمسافة كبيرة على القمر لأن الجاذبية تكون أضعف هناك. يُعطى مدى المقذوف  $R$  على أرض مستوية حيث تكون مقاومة الهواء مهملة من العلاقة

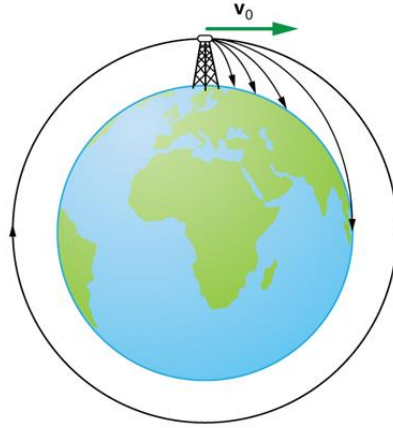
3-69

$$R = \frac{(v_0^2 \sin 2\theta_0)}{g}$$

حيث  $v_0$  هي السرعة الأولية و  $\theta_0$  هي الزاوية الأولية مع الأفقي. يُترك إثبات هذه المعادلة كتمرين للقارئ، ولكنه يتناسب مع السمات الرئيسية لمدى المقذوفات كما هو موضح.

عندما نتحدث عن مدى قذيفة على أرض مستوية، نفترض أن  $\vec{R}$  صغيرة جدًا مقارنة بمحيط الأرض. ومع ذلك، إذا كان المدى كبير، فإن الأرض تنحني أسفل القذيفة وتسارع الجاذبية يغير اتجاهه على طول المسار، ولذلك المدى أكبر مما يُتوقع بمعادلة المدى المذكورة أعلاه (انظر الشكل 3-41). إذا كانت السرعة الأولية كبيرة بما فيه الكفاية، فإن المقذوف يدخل مدار. هذه الاحتمالية معروفة قبل قرون من تحقيقها. عندما يكون جسم ما في مدار، تنحني الأرض تحتها بنفس معدل سقوطه. وهكذا، يسقط الجسم باستمرار، ولكنه لا يصطدم بالسطح أبدًا. ستُغطى هذه الجوانب وغيرها من جوانب الحركة المدارية، مثل دوران الأرض، بأسلوب تحليلي وبعمق أكبر لاحقًا في هذا الكتاب.

نرى أن التفكير في موضوع واحد فقط، مثل مدى المقذوف، يمكن أن يقودنا إلى مواضيع أخرى، مثل مدارات الأرض. في **جمع السرعات**، سوف ندرس جمع السرعات، والتي تعد جانبًا مهمًا في الكينماتيكا ثنائية الأبعاد، وسوف نقدم أيضًا رؤى تتجاوز الموضوع نفسه.

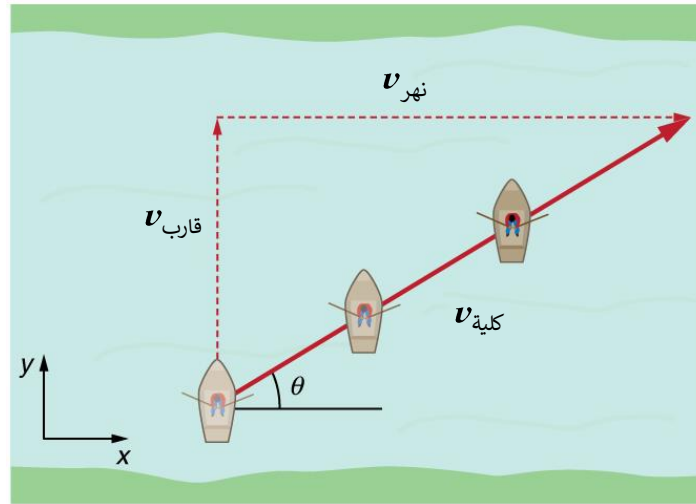


**الشكل 3-41** قذيفة ثم قمر صناعي. في كل حالة موضحة هنا، يتم إطلاق قذيفة من برج مرتفع للغاية لتجنب مقاومة الهواء. كلما زادت السرعة الأولية، ازداد نطاق القذيفة، ويصبح أطول مما سيكون عليه على الأرض المستوية، لأن الأرض تنحني تحت مسار القذيفة. إذا كانت السرعة الأولية كبيرة بما يكفي، يتحقق المدار.

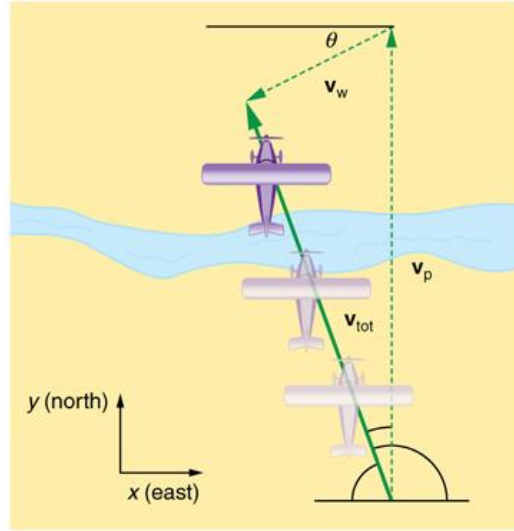
### 5-3 جمع السرعات

#### السرعة النسبية

إذا جدد شخص بقارب عبر نهر سريع التدفق وحاول التوجه مباشرة إلى الشاطئ الآخر، فإن القارب يتحرك بشكل قطري مائل بالنسبة للشاطئ، كما في **الشكل 3-43**. لا يتحرك القارب في الاتجاه الذي يشير إليه. السبب، أن النهر يحمل القارب في اتجاه مجرى النهر. وبالمثل، إذا حلقت طائرة صغيرة في رياح قوية، يمكنك أحياناً أن ترى أن الطائرة لا تتحرك في الاتجاه الذي تُشير إليه، كما هو موضح في **الشكل 3-44**. تتحرك الطائرة للأمام بشكل مستقيم بالنسبة للهواء، لكن حركة الكتلة الهوائية بالنسبة إلى الأرض تحمل الطائرة ناحية الجانب.



**الشكل 3-43** قارب يحاول عبور النهر سيتحرك بشكل قطري بالنسبة إلى الشاطئ كما هو موضح. سرعتها الكلية (السهم الغامق) بالنسبة إلى الشاطئ هو مجموع سرعته بالنسبة إلى النهر وسرعة النهر بالنسبة إلى الشاطئ.



**شكل 3-44** تحمل الرياح الطائرة المتجهة شمالاً إلى الغرب وتبطئ سرعتها. لا تتحرك الطائرة بالنسبة للأرض في الاتجاه الذي تشير إليه؛ بدلاً من ذلك، تتحرك في اتجاه سرعتها الكلية (السهم الغامق).

في كلا الموقفين، يكون للجسم سرعة بالنسبة إلى وسط (مثل النهر) ويكون لهذا الوسط سرعة بالنسبة إلى مراقب ثابت. سرعة الجسم بالنسبة للمراقب هي مجموع متجهات السرعة، كما هو موضح في **الشكل 3-43** و**الشكل 3-44**. هذان الموقفان ليسا سوى حالتين من العديد من الحالات التي يكون من المفيد فيها جمع السرعات. في هذا الجزء، نعيد أولاً فحص كيفية جمع السرعات، ثم سندرس جوانب معينة للسرعة النسبية.

كيف نجمع السرعات؟ السرعة متجه (لها مقدار واتجاه)؛ تنطبق قواعد جمع المتجهات التي تمت مناقشتها في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية وجمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية** على جمع السرعات، كأى متجه آخر. في الحركة أحادية البعد، جمع السرعات بسيط – حيث تُجمع مثل الأرقام العادية. على سبيل المثال، إذا كان لاعب هوكي يتحرك بسرعة  $5 \text{ m/s}$  مباشرة نحو المرمى ويدفع الكرة في نفس الاتجاه بسرعة  $30 \text{ m/s}$  بالنسبة لجسمه، فإن سرعة الكرة  $35 \text{ m/s}$  بالنسبة إلى حارس المرمى الثابت، الذي يقف أمام المرمى.

في الحركة ثنائية الأبعاد، يمكن استخدام تقنيات بيانية أو تحليلية لجمع السرعات. سنركز على التقنيات التحليلية. تُعطي المعادلات التالية العلاقات بين مقدار واتجاه السرعة ( $v$  و  $\theta$ ) ومركبتيهما ( $v_x$  و  $v_y$ ) على طول محورين  $x$  و  $y$  لنظام الإحداثيات المختار:

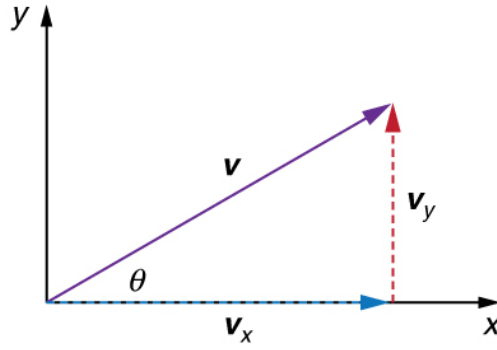
3-70
3-71
3-72
3-73

$$v_x = v \cos \theta$$

$$v_y = v \sin \theta$$

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

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x}$$



**شكل 3-45** السرعة  $v$  ، لكائن يتحرك بزاوية  $\theta$  بالنسبة للمحور الأفقي هي مجموع المركبتين  $\vec{v}_x$  و  $\vec{v}_y$  .

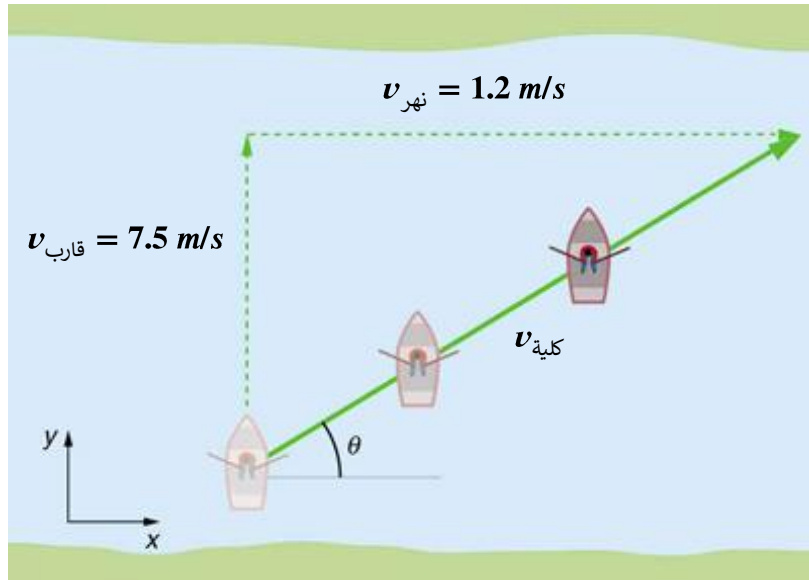
هذه المعادلات صالحة لأي متجهات وكيفية خصيصاً للسرعة. تُستخدم أول معادلتين لإيجاد مركبتي السرعة عندما يكون مقدارها واتجاهها معروفين. تُستخدم آخر اثنتين لإيجاد مقدار واتجاه السرعة عندما تكون مركباتها معروفتين.

### تجربة منزلية: السرعة النسبية للقارب

املاً نصف حوض الاستحمام بالماء. خذ قارب لعبة أو أي شيء آخر يطفو على الماء. انزع سدادة المصرف حتى يبدأ تصريف الماء. حاول دفع القارب من أحد جانبي الحوض إلى الجانب الآخر عمودياً على تدفق المياه. ما الطريقة التي يجب أن تدفع بها القارب حتى ينتهي في الاتجاه المقابل مباشرة؟ قارن بين اتجاه تدفق المياه واتجاه القارب والسرعة الفعلية للقارب.

### مثال 3-6

جمع السرعات: قارب على نهر



**الشكل 3-46** قارب يحاول السفر مباشرة عبر نهر بسرعة 0.75 م / ث. يتدفق التيار في النهر بسرعة 1.20 م / ث إلى اليمين.

راجع الشكل 3-46، الذي يُظهر قاربًا يحاول العبور مباشرة عبر النهر. دعونا نحسب مقدار واتجاه سرعة القارب بالنسبة لمراقب على الشاطئ،  $v_{\text{كلية}}$ . تبلغ سرعة القارب،  $v_{\text{قارب}}$ ، 0.75 م / ث في الاتجاه  $y$  بالنسبة للنهر وسرعة النهر،  $v_{\text{نهر}}$ ، 1.20 م / ث إلى اليمين.

### طريقة الحل

نبدأ باختيار نظام إحداثيات له محور مواز لسرعة النهر، كما هو موضح في الشكل 3-46. نظرًا لأن القارب يتوجه مباشرة نحو الشاطئ الآخر، فإن سرعته بالنسبة إلى الماء تكون موازية للمحور  $y$  وعمودية على سرعة النهر. وبالتالي، يمكننا جمع السرعتين باستخدام المعادلتين

$$v_{\text{كلية}} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \text{ و } \theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x}$$

### الحل

مقدار السرعة الكلية هو

3-74

$$v_{\text{كلية}} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

حيث

3-75

$$v_x = v_{\text{نهر}} = 1.20 \frac{m}{s}$$

و

3-76

$$v_y = v_{\text{قارب}} = 0.750 \frac{m}{s}$$

لذلك،

3-77

$$v_{\text{كلية}} = \sqrt{\left(1.20 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(0.750 \frac{m}{s}\right)^2}$$

وهكذا،

3-78

$$v_{\text{كلية}} = 1.42 \frac{m}{s}$$

اتجاه السرعة الكلية  $\theta$  يعطى بالعلاقة:

3-79

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} = \tan^{-1} \left( \frac{0.750}{1.20} \right)$$

وهكذا،

3-80

$$\theta = 32.0^\circ$$

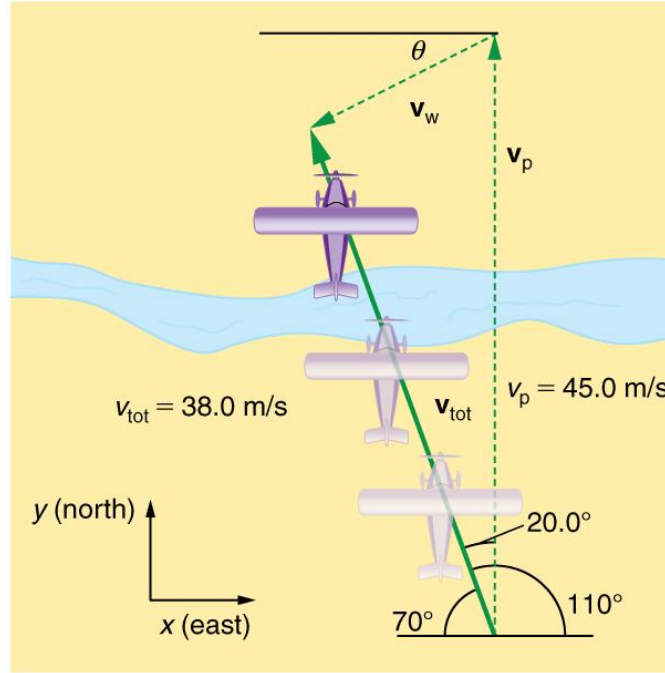
### المناقشة

يتوافق كل من مقدار  $v$  واتجاه السرعة الإجمالية  $\theta$  مع الشكل 3-46. لاحظ أنه نظرًا لأن سرعة النهر كبيرة مقارنة بسرعة القارب، فإنه ينحرف بسرعة في اتجاه مجرى النهر. تتضح هذه النتيجة من خلال الزاوية الصغيرة ( $32.0^\circ$  فقط) للسرعة الكلية بالنسبة إلى ضفة النهر.



### مثال 7-3

حساب السرعة: سرعة الرياح تتسبب في انجراف الطائرة  
احسب سرعة الرياح للموقف الموضح في الشكل 3-47. من المعروف أن الطائرة تتحرك بسرعة 45.0 م / ث في اتجاه الشمال بالنسبة للكتلة الهوائية، في حين أن سرعتها بالنسبة إلى الأرض (سرعتها الإجمالية) تبلغ 38.0 م / ث في اتجاه  $20.0^\circ$  غرب الشمال.



الشكل 3-47 من المعروف أن الطائرة تتجه شمالاً بسرعة 45.0 م / ث، على الرغم من أن سرعتها بالنسبة إلى الأرض تبلغ 38.0 م / ث بزاوية غرب الشمال. ما سرعة الرياح واتجاهها؟

#### طريقة الحل

هذه المسألة، تختلف نوعاً ما عن المثال السابق، نعرف السرعة الكلية  $v_{\text{الكلية}}$  وهي مجموع سرعتين آخرين،  $v_w$  (الرياح) و  $v_p$  (الطائرة بالنسبة إلى الكتلة الهوائية). الكمية  $v_p$  معروفة، ومطلوب منا إيجاد  $v_w$ . لا يوجد سرعات متعامدة مع بعضها البعض، ولكن من الممكن إيجاد مركباتها على طول محورين متعامدين مشتركين للسرعات كلها. إذا تمكنا من إيجاد مركبتَي  $v_w$ ، فيمكننا دمجهما لإيجاد مقدارها واتجاهها. كما هو مبين في الشكل 3-47، نختار نظام الإحداثيات الذي فيه محور  $x$  في اتجاه الشرق ومحور  $y$  باتجاه الشمال (وموازي لـ  $v_p$ ). (قد ترغب في إلقاء نظرة على مناقشة جمع المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة في جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية.)

#### الحل

لأن  $v_{\text{الكلية}}$  هي ناتج الجمع الاتجاهي لـ  $v_p$  و  $v_w$ ، فإن كل من مركبتَيها  $x$  و  $y$  هو مجموع مركبات سرعة الرياح والطائرة على طول المحورين  $x$  و  $y$ ، على التوالي. لاحظ أن الطائرة لها مركبة سرعة رأسية فقط، لذلك  $v_{px} = 0$  و  $v_{py} = v_p$  أي

3-81

$$v_{x\text{الكلية}} = v_{wx}$$

3-82

$$v_y = v_{wy} + v_p$$

ويمكننا استخدام المعادلتين السابقتين لحساب  $v_{wx}$

3-83

$$v_{wx} = v_{x \text{ الكلبة}} = v_{\text{الكلبة}} \cos 110^\circ$$

لأن  $\cos 110^\circ = -0.342$  و  $v_{\text{الكلبة}} = 38.0 \frac{m}{s}$

3-84

$$v_{wx} = \left(38.0 \frac{m}{s}\right)(-0.342) = -13 \frac{m}{s}$$

الإشارة السالبة تشير إلى الحركة باتجاه الغرب وهذا يتفق مع مخطط المسألة. الآن، يمكننا حساب  $v_{wy}$ . لاحظ أن

3-85

$$v_y = v_{wy} + v_p$$

لأن  $v_{y \text{ الكلبة}} = v_{\text{الكلبة}} \sin 110^\circ$ ، لذلك

3-86

$$v_{wy} = \left(38.0 \frac{m}{s}\right)(0.940) - 45.0 \frac{m}{s} = -9.29 \frac{m}{s}$$

الإشارة السالبة تشير إلى الحركة باتجاه الجنوب وهذا يتفق مع مخطط المسألة. الآن، نعلم المركبات المتعامدة لـ  $v_{wx}$  و  $v_{wy}$ ، لذلك يمكننا حساب مقدار واتجاه  $\vec{v}_w$ . أولاً، المقدار هو

3-87

$$v_w = \sqrt{v_{wx}^2 + v_{wy}^2} \\ = \sqrt{\left(-13.0 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(-9.29 \frac{m}{s}\right)^2}$$

لذلك،

3-88

$$v_w = 16.0 \frac{m}{s}$$

الاتجاه هو

3-89

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_{wy}}{v_{wx}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-9.29}{-13.0}\right)$$

وهذا يعطينا

3-90

$$\theta = 35.6^\circ$$

### المناقشة

تتسق سرعة واتجاه الرياح مع التأثير الكبير للرياح على السرعة الإجمالية للطائرة، كما هو موضح في **الشكل 3-47**. نظرًا لأن الطائرة تقاوم مزيجًا قويًا من الرياح العرضية والرياح الامامية، فإنها سرعتها الإجمالية أقل بكثير من سرعتها بالنسبة إلى الكتلة الهوائية وفي اتجاه مختلف، أيضًا.

لاحظ أنه في آخر مثالين، تمكنا من تسهيل الحساب باختيار نظام إحداثيات له محور مواز لإحدى السرعات. سنجد مرارًا وتكرارًا أن اختيار نظام إحداثيات مناسب يجعل حل المسائل أسهل. على سبيل المثال، في حركة المقذوفات، نستخدم دائمًا نظام إحداثيات بمحور مواز للجاذبية.

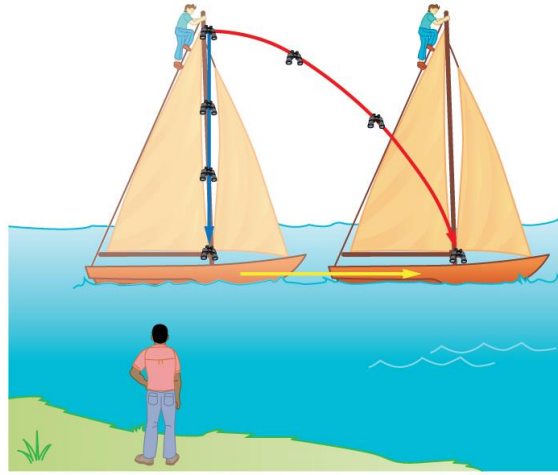
### السرعات النسبية والنسبية الكلاسيكية

خلال جمع السرعات، أكدنا على أن السرعة تكون بالنسبة لبعض الإطارات المرجعية. تسمى هذه السرعات **بالسرعات النسبية**. على سبيل المثال، تختلف سرعة الطائرة بالنسبة إلى كتلة الهواء عن سرعتها بالنسبة إلى الأرض. وكلاهما يختلف تمامًا عن سرعة الطائرة بالنسبة إلى ركبها (والتي يجب أن تكون قريبة من الصفر).

السرعات النسبية هي أحد جوانب النسبية، والتي تُعرّف بأنها دراسة كيفية قياس أو إدراك المراقبين المختلفين، الذين يتحركون بالنسبة لبعضهم البعض، لنفس الظاهرة.

لقد سمع الجميع تقريبًا عن النسبية وألبرت أينشتاين (1879-1955)، أعظم فيزيائيين القرن العشرين. أحدث أينشتاين ثورة في نظرتنا إلى الطبيعة من خلال نظريته النسبية الحديثة، والتي سنقوم بدراستها في فصول لاحقة. السرعات النسبية، في هذا الجزء، هي جوانب من النسبية الكلاسيكية، كان أول من ناقشها بطريقة صحيحة هما جاليليو وإسحاق نيوتن. النسبية الكلاسيكية تقتصر فقط على الحالات التي تكون فيها السرعات أقل من حوالي 1٪ من سرعة الضوء - أي أقل من 3000 km/s . معظم الأشياء التي نتعامل معها في الحياة اليومية تتحرك أبطأ من هذه السرعة.

دعونا نفكر في مثال على ما يراه مراقبين مختلفين في موقف حلله غاليليو منذ فترة طويلة. لنفترض أن بحارًا على قمة صاري سفينة متحركة يُسقط منظره. أين سيصطدم بسطح السفينة؟ هل سيصطدم بقاعدة الصاري أم سيصطدم خلف الصاري لأن السفينة تتحرك إلى الأمام؟ الجواب هو أنه إذا كانت مقاومة الهواء مهملة، فإن المنظار سيصطدم بقاعدة الصاري عند نقطة أسفل نقطة إسقاطه مباشرةً. الآن دعونا نفكر فيما يراه مراقبين مختلفين أثناء سقوط المنظار. أحدهما على السفينة والآخر على الشاطئ. المنظار ليس لها سرعة أفقية بالنسبة للمراقب على السفينة، لذا يراه المراقب، الذي على السفينة، يسقط مباشرةً أسفل الصاري. (انظر الشكل 3-48). ولكن المراقب على الشاطئ، يرى المنظار والسفينة يتحركان نفس المسافة للأمام أثناء سقوط المنظار؛ لأن المنظار والسفينة لهما نفس السرعة الأفقية بالنسبة له. يرى هذا المراقب المسار المنحني الموضح في الشكل 3-48. على الرغم من أن المسارات تبدو مختلفة بالنسبة إلى المراقبين، فإن كل منهما يرى نفس النتيجة - يقع المنظار عند قاعدة الصاري وليس خلفها. للحصول على الوصف الصحيح للحركة، من الضروري معرفة السرعات الصحيحة بالنسبة إلى المراقب.



**الشكل 3-48** النسبية الكلاسيكية. نفس الحركة كما رآها مراقبان مختلفان. يرى المراقب على السفينة المتحركة أن المنظار يسقط من أعلى صاريها مباشرةً لأسفل. يرى المراقب على الشاطئ أن المنظار يأخذ المسار المنحني، ويتحرك للأمام مع السفينة. يرى كلا المراقبين المنظار يضرب سطح السفينة عند قاعدة الصاري. تختلف السرعة الأفقية الأولية بالنسبة لكلا المراقبين.

### مثال 8-3

**حساب السرعة النسبية: أحد ركاب طائرة يُسقط عملة معدنية**  
يُسقط أحد ركاب طائرة قطعة نقود معدنية أثناء تحرك الطائرة بسرعة 260 م / ث. ما سرعة العملة المعدنية عندما تضرب الأرض على بعد 1.50 متر من نقطة إطلاقها؟ (أ) بالنسبة للطائرة؟ (ب) بالنسبة إلى الأرض؟



**الشكل 3-49** حركة عملة معدنية سقطت داخل طائرة كما يراها مراقبان مختلفان. (أ) يرى المراقب في الطائرة أن العملة المعدنية تسقط مباشرة لأسفل. (ب) يرى المراقب على الأرض أن العملة تتحرك أفقيًا تقريبًا.

### طريقة الحل

يمكن حل كلتا المسألتين بالطرق المستخدمة في سقوط الأجسام والمقذوفات. في الجزء (أ)، السرعة الابتدائية للعملة صفر بالنسبة للطائرة، وبالتالي فإن هذه الحركة هي حركة جسم ساقط (حركة أحادية البعد). في الجزء (ب)، تكون السرعة الابتدائية 260 م / ث أفقيًا بالنسبة للأرض والجاذبية رأسية، أيضًا، لذا فإن هذه الحركة عبارة عن حركة مقذوفات. في كلا الجزأين، من الأفضل استخدام نظام إحداثيات ذي محورين رأسي وأفقي.

### الحل لـ (أ)

باستخدام المعلومات المعطاة، نلاحظ أن السرعة والموضع الابتدائيين يساويان صفر، والموضع النهائي 1.50 م. يمكن إيجاد السرعة النهائية باستخدام المعادلة:

3-91

$$v_y^2 = v_{0y}^2 - 2g(y - y_0)$$

التعويض عن القيم المعروفة في المعادلة يعطينا

3-92

$$v_y^2 = 0^2 - 2 \left( 9.80 \frac{m}{s^2} \right) (-1.50 m - 0 m) = 29.4 \frac{m^2}{s^2}$$

لذا

3-93

$$v_y = -5.42 \frac{m}{s}$$

نعلم أن أخذ الجذر التربيعي لـ 29.4 يُعطي جذرين: 5.42 و -5.42. نختار الجذر السالب لأننا نعلم أن السرعة تتجه لأسفل، وقد حددنا الاتجاه الموجب هو الاتجاه لأعلى. لا توجد سرعة ابتدائية أفقية بالنسبة للطائرة ولا تسارع أفقي، وبالتالي فإن الحركة مباشرةً لأسفل بالنسبة للطائرة.

### الحل لـ (ب)

نظرًا لأن السرعة الرأسية الأولية تساوي صفر بالنسبة إلى الأرض والحركة الرأسية مستقلة عن الحركة الأفقية، فإن السرعة الرأسية النهائية للعملة المعدنية بالنسبة إلى الأرض هي  $v_y = -5.42 \text{ m/s}$  نفسها في الجزء (أ).

ولكن على عكس الجزء (أ)، هناك مركبة أفقية للسرعة. بالرغم من ذلك، نظرًا لعدم وجود تسارع أفقي، فإن سرعتين الأفقية الأولية والنهائية متساويتان ويساويان  $v_x = 260 \text{ m/s}$  يمكن جمع مركبتي السرعة على طول المحورين x و y لإيجاد مقدار السرعة النهائية:

3-94

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

وهكذا،

3-95

$$v = \sqrt{\left(260 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + \left(-5.42 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}$$

هذا يعطينا

3-96

$$v = 260.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

يعطى الاتجاه بالعلاقة:

3-97

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} = \tan^{-1} \left( -\frac{5.42}{260} \right)$$

لذلك،

3-98

$$\theta = \tan^{-1}(-0.0208) = -1.19^\circ$$

### المناقشة

في الجزء (أ)، تكون السرعة النهائية بالنسبة للطائرة هي نفسها إذا أسقطت العملة من السكون على الأرض وسقطت 1.50 متر. هذه النتيجة تناسب تجربتنا؛ تسقط الأشياء في الطائرة بالطريقة نفسها في أثناء طيران الطائرة أفقيًا كما في حالة سكون الطائرة على الأرض. هذه النتيجة صحيحة أيضًا في حالة السيارات المتحركة. في الجزء (ب)، يرى المراقب على الأرض حركة مختلفة كثيرًا للعملة. تتحرك الطائرة أفقيًا بسرعة كبيرة. كما ذكرنا، في بعدين، لا تُجمع المتجهات مثل الأرقام العادية - السرعة النهائية  $v$  في الجزء (ب) ليست  $(260 - 5.42) \text{ m/s}$ ؛ بل  $260.06 \text{ m/s}$ . كان لابد من حساب مقدار السرعة إلى خمسة أرقام لملاحظة الفرق عن سرعة الطائرة. تشبه الحركتين كما يراهما المراقبان المختلفان (أحدهما في الطائرة والآخر على الأرض) في هذا المثال تلك التي تُوقشت للمنظار الذي أسقط من صاري سفينة متحركة، باستثناء أن سرعة الطائرة أكبر بكثير، لذلك فإن المراقبين يرون مسارين مختلفين تمامًا. (انظر الشكل 3-49). بالإضافة إلى ذلك، يرى كلا المراقبين أن العملة سقطت 1.50 مترًا رأسيًا، لكن الشخص الموجود على الأرض يرى أيضًا أنها تتحرك للأمام 144 مترًا (تُرك هذا الحساب للقارئ). وهكذا، يرى أحد المراقبين مسارًا رأسيًا، والآخر يرى مسارًا أفقيًا تقريبًا.

### عمل روابط: النسبية وآينشتاين

نظرًا لأن آينشتاين كان قادرًا على تحديد كيفية إجراء القياسات بوضوح (بعضها يتضمن الضوء) ولأن سرعة الضوء هي نفسها لجميع المراقبين، فإن النتائج غير متوقعة بطريقة مذهلة. يختلف الزمن مع اختلاف المراقب، وتُخزن الطاقة في صورة زيادة في الكتلة، وهناك، أيضًا، المزيد من المفاجآت.

الفصل 4

الفصل 5

الفصل 6

الفصل 7

الفصل 8

الفصل 9

الفصل 10

الفصل 11

الفصل 12

الفصل 13

الفصل 14

الفصل 15

الفصل 16

الفصل 17