إدارة المناهج والكتب المدرسية

الفيزياء

الصف الحادي عشر

للفرعين

العلمي والصناعي

الفيزياء

الصف الحادي عشر

للفرعين العلمي والصناعي

١٤٤٠هـ / ٢٠١٩م

ISBN: 978-9957-84-748-7

إدارة المناهج والكتب المدرسية

الفيزياء

للصف الحادي عشر

الناشر

وزارة التربية والتعليم

إدارة المناهج والكتب المدرسية

يسر إدارة المناهج والكتب المدرسية استقبال ملاحظاتكم وآرائكم على هذا الكتاب على العناوين الآتية:

هاتف: ٨-٥/٤٦١٧٣٠٤، فاكس: ٤٦٣٧٥٦٩، ص.ب: ١٩٣٠ الرمز البريدي: ١١١١٨

أو بوساطة البريد الإلكتروني: E-mail: Scientific.Division@moe.gov.jo

قـرّرت وزارة التربية والتعليم تدريس هـذا الكتاب في مدارس المملكة الأردنية الهاشـمية جميعها، بناءً على قرار مجلس التربية والتعليم رقم ١٨/ ٢٠١٦، تاريخ ١٢/١/٢٠١٦م، بدءًا من العام الدراسي ٢٠١٦م/ ٢٠١٧م.

ص . ب (١٩٣٠) عمّان – الأردن

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(٢٠١٦/٣/١٢٧٤)
ISBN: 978 - 9957 - 84 - 748 - 7

أشرف على تأليف هذا الكتاب كل من:

أ.د خالد موسى أبومراد (رئيسًا)
د.محمد أحمد حسين
د.عدنان خلف جرادات
بديع صالح الخطيب
موسى محمود جرادات
إياد يحيى زهران (مقررًا)

وقام بتأليفه كل من:

د.حسين محمود الخطيب
عمر إبراهيم البلاونة
أمل محمد الحوامدة
نور نواف العواد
نعيمة صالح طليب

التحرير العلمي: إياد يحيى زهران
التصميم : نايف محمد أمين مراشدة
الرسم : نايف محمد أمين مراشدة
التحرير الفني: أنس خليل الجرابعة
التحرير اللغوي: د. محمد سلمان كنانة
الإنتاج: د. عبد الرحمن سليمان أبو صعيليك

دقّق الطباعة وراجعها: شفاء طاهر عباس

الطبعة الأولى **١٤٣٧ هـ/ ٢٠١٦ م**
أعيدت طباعته **٢٠١٧ - ٢٠١٩م**

المحتويـــات

الموضوع	الصفحة

الفصل الدراسي الثاني

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

نضع كتاب الفيزياء للصف الحادي عشر للفرعين العلمي والصناعي الشامل بين أيدي أبنائنا الطلبة وزملائنا المعلمين تحقيقًا لنتاجات التعلم العامة والخاصة من أجل تهيئة جيل من المتعلمين القادرين على مواكبة تطورات العلم، والتعامل مع التكنولوجيا.

وقد روعي في إعداد الكتاب طبيعة علم الفيزياء الذي يبنى على الملاحظة الموجهة والقياس الدقيق. والفيزياء علم أساس ذو تأثير كبير في العلوم الأخرى وفي العلوم التطبيقية، يطال العالم المتناهي في الصغر كالذرات وما دون إلى العالم المتناهي في الكبر كالكواكب والنجوم.

يشتمل الكتاب على وحدتين رئيستين هما: الميكانيكا التي تهدف إلى إكساب الطالب المفاهيم والحقائق المتعلقة بالميكانيكا، وتوظيف قوانين الميكانيكا ومبادئها ونظرياتها في الحياة اليومية لتفسير ظواهر ومواقف مختلفة، والوحدة الثانية التذبذبات والموجات التي تهدف إلى إكساب الطالب المفاهيم المتعلقة بالحركة التذبذبية والموجات، وإلى تقدير أهمية التطبيقات الحياتية للحركة التذبذبية والموجات. وجاءت الوحدات مكونة من فصول يحوي كل منها عددًا من البنود ينتهي كل بند منها بموضوع إضافي تحت عنوان توسع لا يدخل في الاختبارات التقويمية، وانتهت الفصول بأسئلة الفصل، ومشروع عملي يهدف إلى تنمية مهارات الطلبة العملية.

الفصل الدراسي الأول

الوحدة الأولى: الميكانيكا

الفصل الأول

المتجهات
Vectors

في هذا الفصل

الأهمية

تعدّ دراسة المتجهات مهمة؛ لأننا نحتاج في كثير من التطبيقات في الحياة، مثل توجيه الطائرات والسفن والقطارات، وبعض القياسات الهندسية، والإنشاءات، وتحديد المواقع الجغرافية، إلى التعامل مع كميات فيزيائية، وغالبية الكميات الفيزيائية هي كميات متجهة.

يركض الطفل عكس اتجاه الريح ليجعل طائرته الورقية ترتفع في الهواء، كذلك يفعل قائد الطائرة. يراعى عند تصميم مدارج المطارات أن يكون إقلاع الطائرات وهبوطها بعكس اتجاه الريح ما أمكن ذلك؛ ما يساعد على رفع الطائرة وتحليقها بأقل سرعة ممكنة. تظهر في الصورة طائرة تتعرّض لرياح شديدة متعامدة مع اتجاه المدرج عند هبوطها، ما اضطر قائدها لإجراء تعديلات ضرورية على طريقة الهبوط.

فكر:

- أنت تقود الطائرة، ويبدو أنّ الرياح تهبّ من جهة اليمين، كيف ستغيّر من اتجاه الطائرة في هذا الموقف؟

درست في الصف التاسع الحركة في خط مستقيم (بعد واحد)، وتعرّفت مفاهيم الموقع والإزاحة والسرعة والتسارع، واستخدمت نظام الإشارات الموجبة والسالبة للدلالة على اتجاه الحركة، أمّا إذا كانت الحركة في مستوى ثنائي الأبعاد، أو في فضاء ثلاثي الأبعاد، فيوجد اتجاهات مختلفة، لا يكفي معها نظام الإشارات السابق؛ وعليه لا بُدّ من تعرّف مفهوم جديد لوصف الحركة بسهولة في هذه الحالات، ألا وهو المتجهات، وفي هذا الفصل ستتعرّف بعض خصائص المتجهات، وتطبيقها في بعدين.

بعد دراستك هذا الفصل يتوقّع منك أن:

- توضح المقصود بالكمية الفيزيائية القياسية، والكمية الفيزيائية المتجهة.
- تعبر رياضيًّا عن الكميات المتجهة.
- تمثل المتجهات بيانيًّا.
- تتعرف بعض خصائص المتجهات، وتطبقها على بعض الكميات الفيزيائية.
- تحلل المتجه إلى مركبتين متعامدتين.
- تجد محصلة متجهات عدّة بتحليل كلّ منها إلى مركبتين متعامدتين.
- توضح المقصود بالضرب النقطي والضرب التقاطعي للمتجهات.

١-١ الكمية القياسية والكمية المتجهة
Scalar and Vector Quantities

نشاط تمهيدي

اقرأ الكميات الآتية:

- كثافة الماء النقي ١ غ/ سم٣.
- درجة حرارة الغرفة ٢٠ °س.
- يقع منزل أحمد على بعد ٨٠٠م عن المدرسة.
- تتأثر المملكة بمرتفع جوي تصاحبه رياح سرعتها ٥٠ كم/ س.

درست في صفوف سابقة كميات فيزيائية عديدة، مثل: الطول والكتلة والسرعة والزمن والقوة وغيرها، وتعلمت في الصف التاسع أن هذه الكميات تندرج تحت نوعين رئيسين هما: الكميات الأساسية مثل، الكتلة والزمن ودرجة الحرارة، والكميات المشتقة، مثل: الحجم والكثافة والقوة والسرعة، والتي اشتُقَت من الكميات الأساسية باستخدام قوانين فيزيائية. وقد كنا نتعامل مع هذين النوعين من الكميات بطريقة واحدة، فنعبّر عن أيّ منها بعدد ووحدة مناسبين؛ فنقول مثلًا: كتلة الكتاب ٥٠٠ غ، تسارع السيارة ٣م/ ث٢. إنّ التسارع يلزمه تحديد اتجاه، فيوصف بأنّه **كمية متجهة**، في حين لا يلزم تحديد اتجاه للكتلة؛ لذا، تُعرف الكتلة بأنّها **كمية قياسية**. فما الكمية القياسية وما الكمية المتجهة؟ هذا ما ستتعلمه في هذا الدرس.

من النشاط التمهيدي، أي الكميات في النشاط وُصفت بصورة تامّة، وأيها يلزم إضافة معلومة أو أكثر ليكتمل وصفها؟

لا شكّ أنك توصلت من النشاط السابق إلى أنّ هناك كميات فيزيائية يكفي لوصفها ذكرُ مقدارها فقط، وتسمّى كميات قياسية، فالكمية الفيزيائية القياسية: هي الكمية التي تُحدّد بمقدار فقط وليس لها اتجاه؛ إذ يكفي أن نقول مثلاً: إنّ درجة حرارة الغرفة ٢٠ °س، وإن طول ملعب المدرسة ٥٠م؛ إذ تُعدّ كلّ من درجة الحرارة، والطول (المسافة) كمية قياسية. ومن الأمثلة الأخرى على الكميات القياسية: الزمن والكتلة والشغل، أما الكمية الفيزيائية المتجهة: فهي كمية تُحدّد بمقدار واتجاه معًا. فلا يكفي المقدار وحده لتحديد الكمية المتجهة؛ لأنّ وصفها يكون غير تام. ولمعرفة أهمية تحديد الاتجاه للكميات المتجهة نفذ النشاط الآتي:

نشاط (١-١) **أهمية تحديد الاتجاه للكمية المتجهة.**

١ ضع كتاب الفيزياء أمامك على الطاولة.

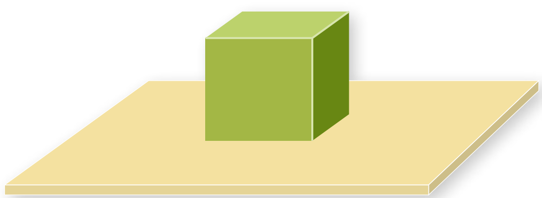
٢ أثّر في الكتاب بقوة بعيدًا عنك. ماذا تلاحظ؟

٣ أعد الكتاب مكانه، ثم أثّر فيه بقوة من الجانب الأيمن. ماذا تلاحظ؟

٤ أعد الكتاب مكانه، ثمّ أثّر فيه بقوة من الجانب الأيسر. ماذا تلاحظ؟ ماذا تستنتج من ذلك؟

تلاحظ أن اتجاه قوة دفع يدك للكتاب حدّدت اتجاه حركته؛ فالقوة إذن كميّة متجهة ولا يكفي أن نقول مثلًا: أثرت في الجسم الموضح في الشكل (١-١) قوّة مقدارها ٨ نيوتن، فاتجاه القوة لم يُحدّد، وبالتالي لا نستطيع وصف اتجاه الحركة الناتجة، فوصف العبارة السابقة للقوة غير تامّ.

ومن الأمثلة الأخرى على الكميات الفيزيائية المتجهة: الإزاحة، والمجال الكهربائي، وعزم القوة.



الشكل (١-١): قوة تؤثر في جسم لم يحدد اتجاهها.

فكر: هل يمكننا القول: إنّ قوة مقدارها ١٠ نيوتن باتجاه الشرق تساوي سرعة مقدارها ١٠م/ث باتجاه الشرق؟ لماذا؟ وما استنتاجك من ذلك؟

لتمييز الكمية المتجهة من الكمية القياسية بالرموز، يوضع عادة فوق رمز الكمية المتجهة سهمٌ يدل على أن الكمية متجهة، فنرمز للقوة مثلًا بالرمز $\overleftarrow{\text{ق}}$ ، بينما نرمز للكتلة بالرمز ك ، أما مقدار القوة فيرمز له بالرمز $|\overleftarrow{\text{ق}}|$، أي القيمة المطلقة (المقدار الموجب)، أو للتبسيط بالرمز ق .

تمثيل الكمية المتجهة بالرسم

لتمثيل الكمية المتجهة بيانيًّا نرسم سهمًا يتناسب طوله مع مقدار الكمية المتجهة، باختيار مقياس رسم مناسب، واتجاهه يشير إلى اتجاهها، ويوضح هذا المثالُ الآتي:

مثال (١-١)

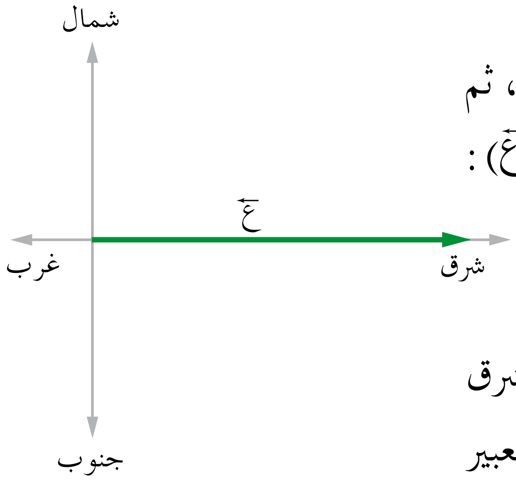
تسير سيارة بسرعة ٥٠ كم/ س نحو الشرق. مثّل متجه السرعة بالرسم.

الحـلّ:

نختار أولًا مقياس رسم مناسبًا، وليكن ١سم لكل(١٠كم/ س)، ثم نحسب طول السهم كما يأتي: طول السهم الممثل لمتجه السرعة ($\overleftarrow{ع}$) :

$$|\overleftarrow{ع}| = \frac{١\text{سم}}{١٠\text{كم/ساعة}} \times ٥٠\text{كم/ س} = ٥ \text{ سم}$$

إذن، نرسم باستخدام المسطرة سهمًا طوله ٥ سم، باتجاه الشرق (محور السينات الموجب)، كما في الشكل (١-٢)، ويمكن التعبير عن المتجه رياضيًّا على الشكل: $\overleftarrow{ع}$ = ٥٠كم/ ساعة، شرقًا.



الشكل(١-٢): مثال (١-١).

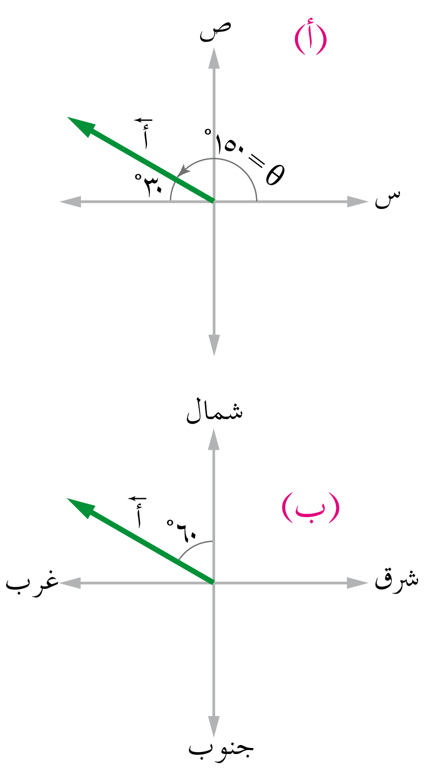
سـؤال

سار أحمد من بيته إلى المدرسة التي تقع على بعد ٨٠٠م باتجاه الغرب. مثّل بالرسم الإزاحة التي قطعها أحمد، وعبّر عنها رياضيًّا.

وبوجه عام، يمكن تحديد اتجاه المتجه نسبة إلى اتجاه مرجعي (محور السينات الموجب مثلًا، أو الاتجاه الجغرافي الشرقي)، فالمتجه $\overleftarrow{أ}$ في الشكل (١- ٣) يمكن التعبير عنه رياضيًّا بطريقتين:

١ $\overleftarrow{أ}$ = (أ، θ). حيث θ: هي الزاوية التي يصنعها المتجه $\overleftarrow{أ}$ مع محور السينات الموجب، وتقاس باتجاه عكس دوران عقارب الساعة، ففي الشكل (١-٣/ أ)، θ تساوي ١٥٠°.

٢ $\overleftarrow{أ}$ = أ، ٣٠° شمال الغرب، أو $\overleftarrow{أ}$ = أ، ٦٠° غرب الشمال؛ كما يظهر من الشكل (١-٣/ ب).



الشكل (١-٣): طرق التعبير عن المتجه.

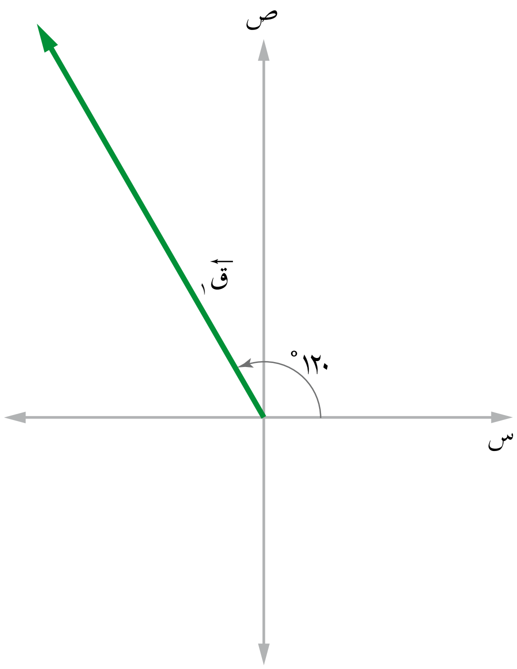
مثال (١-٢)

مثل بالرسم القوى الآتية:

١ $\overleftarrow{ق_1}$ = ٦ نيوتن، ١٢٠ °

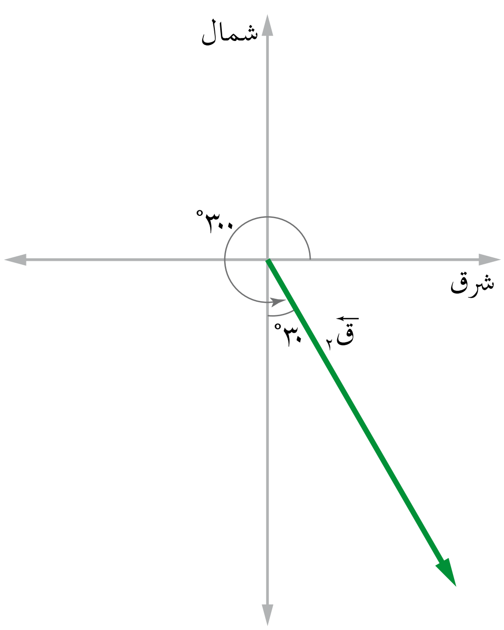
٢ $\overleftarrow{ق_2}$ = ١٥٠ نيوتن، ٣٠ ° شرق الجنوب

الحل:



الشكل (١-٤): مثال (١-٢) (١).

١ مقياس الرسم المناسب هنا، هو ١سم/١ نيوتن؛ لذا يكون طول السهم الممثل للقوة ٦سم، فنرسم سهمًا طوله ٦ سم ويصنع زاوية ١٢٠ ° مع محور السينات الموجب، كما في الشكل (١-٤).



الشكل (١-٥): مثال (١-٢) (٢).

٢ يمكن أن نختار مقياس رسم ١سم/٣٠ نيوتن؛ لذا يكون طول السهم الممثل للقوة $\overleftarrow{ق_2}$ يساوي:

$$\frac{١ \text{سم}}{٣٠ \text{ نيوتن}} \times ١٥٠ \text{ نيوتن} = ٥ \text{ سم}$$

أما الاتجاه فهو ٣٠°شرق الجنوب،

أو θ = ٢٧٠ + ٣٠ = ٣٠٠°

أي أن: $\overleftarrow{ق_2}$ = ١٥٠نيوتن، ٣٠٠°، انظر الشكل (١- ٥).

توسع

تتميز الكمية المتجهة من الكمية القياسية بأنه يلزم تحديد اتجاهها، لكن ليس كل كمية فيزيائية لها اتجاه تعدّ كمية متجهة، فتحديد الاتجاه للكمية الفيزيائية شرط لكنه غير كافٍ للحكم على أن الكمية متجهة. فمثلًا: يحدد التيار الكهربائي بمقدار واتجاه، لكنه لا يعد كمية متجهة، وإنما كمية قياسية.

ابحث عن كميات فيزيائية أخرى نحدد لها اتجاهًا ولا نعدها متجهة، وابحث عن سبب معاملتنا لها على أنها قياسية.

مراجعة (١-١)

١ وضح المقصود بكل من: الكمية الفيزيائية القياسية، الكمية الفيزيائية المتجهة.

٢ صنف الكميات الآتية إلى قياسية ومتجهة: عمرك، ارتفاع المدرسة، موقع منزلك بالنسبة إلى المدرسة، وزنك، الشغل، المقاومة الكهربائية، معامل انكسار الزجاج.

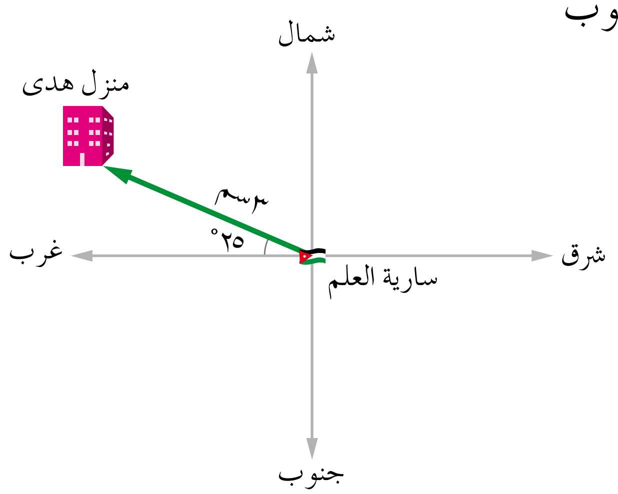
٣ مثّل بالرسم الكميات المتجهة الآتية، وعبّر عنها رياضيًّا:

أ $\overleftarrow{ع}$ = ٨٠ كم/س باتجاه ٦٠° غرب الجنوب

ب $\overleftarrow{ت}$ = ٣م/ث^{٢} باتجاه الشمال

جـ $\overleftarrow{ق}$ = ٧٠ نيوتن، ٢٢٠°

٤ في الشكل (١-٦) رسمت هدى متجه الموقع لمنزلها نسبة إلى سارية العلم في ساحة المدرسة، بوصفها نقطة إسناد (مرجعية)، واستخدمت مقياس رسم ١سم/١٠٠م. عبّر عن متجه الموقع لمنزل هدى مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (١-٦): السؤال الرابع.

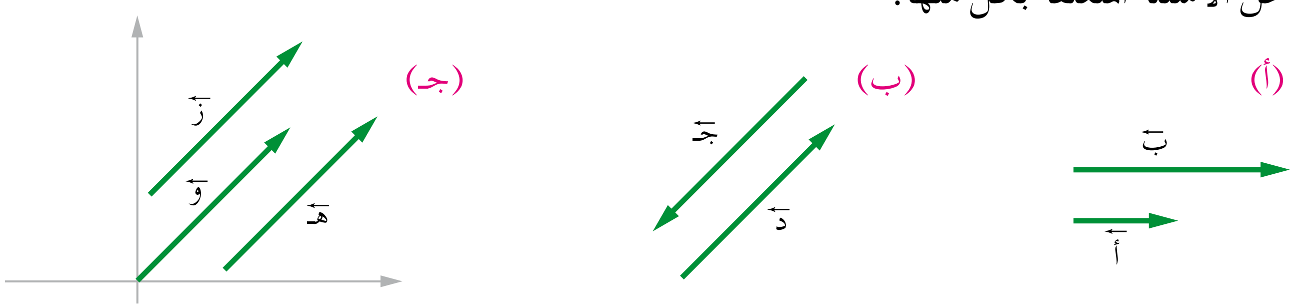
١–٢ بعض خصائص المتجهات

Some Properties of Vectors

نشاط تمهيدي

- ادرس المتجهات في الشكل (١–٧)، ثمّ أجب عن الأسئلة المرافقة له.

نحتاج في كثير من التطبيقات الفيزيائية إلى أن نتعامل مع أكثر من متجه؛ لذا لا بدّ أن نعرِف بعض خصائص المتجهات. تأمّل الحالات المبينة في الشكل (١–٧) جيدًا، ثمّ حاول الإجابة عن الأسئلة المتعلقة بكلّ منها:



(أ) على ماذا يدل اختلاف طول هذين المتجهين؟

(ب) بماذا يختلف المتجهان عن بعضهما؟

(جـ) هل تختلف المتجهات الثلاثة عن بعضها باختلاف نقطة بداية كل منها؟

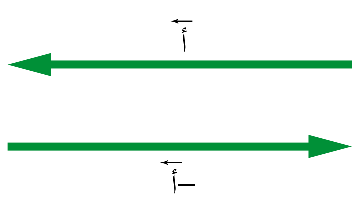
الشكل (١–٧): النشاط التمهيدي.

(١-٢-١) تساوي متجهين

يتساوى متجهان إذا كان لهما المقدار والاتجاه نفسهما، فنقول مثلًا إن $\vec{\text{أ}} = \vec{\text{ب}}$ إذا كان أ = ب، وكل منهما يشير إلى الاتجاه نفسه. فالمتجهات الثلاثة في الشكل (١–٧/ جـ) متساوية لأنّها متساوية الطول (المقدار نفسه)، وتشير جميعها إلى اتجاه واحد، وهذه الخاصية تسمح لنا بنقل المتجه إلى أي موقع شريطة ألاّ نغيّر مقداره أو اتجاهه.

(١-٢-٢) سالب المتجه

يعرف سالب المتجه $\vec{\text{أ}}$ بأنّه متجه إذا أضيف إلى المتجه $\vec{\text{أ}}$ كان ناتج الجمع صفرًا، وهذا يعني أنّ: $\vec{\text{أ}} + (-\vec{\text{أ}}) =$ صفرًا، فالمتجه $(-\vec{\text{أ}})$ هو سالب المتجه $\vec{\text{أ}}$، وهما متساويان مقدارًا ومتعاكسان اتجاهًا. انظر الشكل (١–٨).



الشكل (١–٨): سالب المتجه.

سؤال

إذا كان $\vec{\text{أ}} =$ ٥ وحدة، ١٢٠°. جد المتجه $(-\vec{\text{أ}})$

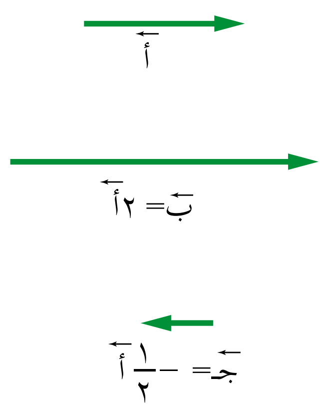
(١-٢-٣) ضرب متجه بكمية قياسية

عند ضرب متجه $\overrightarrow{\text{أ}}$ بمقدار موجب (ن) ينتج متجه جديد $\overleftarrow{\text{ب}}$ = ن $\overrightarrow{\text{أ}}$ له اتجاه $\overrightarrow{\text{أ}}$ ومقداره يساوي ن أ، وإذا كان المقدار سالبًا (−ن) يكون الناتج $\overleftarrow{\text{جـ}}$ = −ن $\overrightarrow{\text{أ}}$، مقداره يساوي ن أ واتجاهه معاكس لاتجاه $\overrightarrow{\text{أ}}$.

من التطبيقات الفيزيائية على ضرب متجه بكمية قياسية: إيجاد القوة والدفع والزخم الخطي.

مثال (١-٣)

إذا كان $\overrightarrow{\text{أ}}$ = ٤ وحدة، صفر°. جد المتجهين: $\overleftarrow{\text{ب}}$ = ٢ $\overrightarrow{\text{أ}}$، $\overleftarrow{\text{جـ}}$ = − $\frac{١}{٢}$ $\overrightarrow{\text{أ}}$.



الحلّ:

$\overleftarrow{\text{ب}}$ = ٢ $\overrightarrow{\text{أ}}$

ب = ٢×٤ = ٨ وحدة، واتجاه $\overleftarrow{\text{ب}}$ يكون باتجاه $\overrightarrow{\text{أ}}$؛ أي إنّ:

$\overleftarrow{\text{ب}}$ = ٨ وحدة، صفر°.

$\overleftarrow{\text{جـ}}$ = − $\frac{١}{٢}$ $\overrightarrow{\text{أ}}$

جـ = $\frac{١}{٢}$ × ٤ = ٢ وحدة، واتجاه $\overleftarrow{\text{جـ}}$ يكون بعكس اتجاه $\overrightarrow{\text{أ}}$؛ أي إنّ:

$\overleftarrow{\text{جـ}}$ = ٢ وحدة، ١٨٠°. انظر الشكل (١-٩).

الشكل (١-٩): $\overrightarrow{\text{أ}}$، $\overleftarrow{\text{ب}}$ لهما الاتجاه نفسه بينما $\overleftarrow{\text{جـ}}$ يعاكس $\overrightarrow{\text{أ}}$ بالاتجاه.

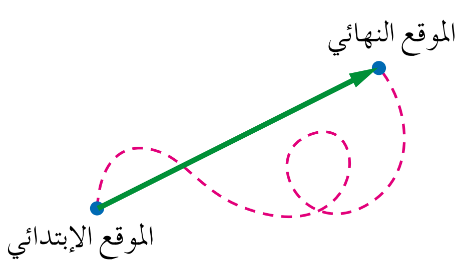
سـؤال

هل يمكن أن نعدّ سالب المتجه ناتجًا عن ضرب المتجه بعدد سالب؟ وضح إجابتك.

(١-٢-٤) جمع (تركيب) متجهات

عندما نجمع عددين معًا، مثل: (٣+٤)، فإنّ الناتج يكون (٧)، ولا تحتمل الإجابة غير ذلك.

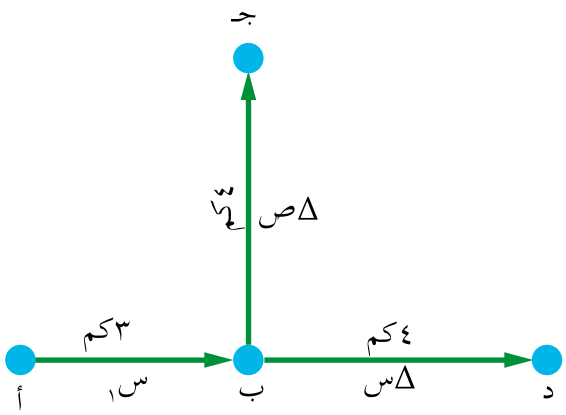
هل تنطبق قاعدة جمع الأعداد هذه على المتجهات؟ الموقع والإزاحة كميتان متجهتان درستهما سابقًا؛ إذ تُحدّد الإزاحة بمعرفة التغيّر في موقع الجسم؛ فمقدارها يساوي المسافة المستقيمة بين الموقعين الابتدائي والنهائي للجسم، بغضّ النظر عن المسار الذي سلكه، واتجاهها يكون من الموقع الابتدائي إلى الموقع النهائي، والشكل (١-١٠) يوضح ذلك.



الشكل (١-١٠): الإزاحة والمسافة.

يقف شخصان عند النقطة (ب)، التي يُحدّد موقعها بالنسبة إلى نقطة الإسناد (أ) كما في الشكل (١-١١)، بالمتجه: $س_{١}$ = ٣كم، شرقًا، تحرّك الأول إزاحة Δس= ٤كم، شرقًا، بينما تحرك الثاني إزاحة Δ ص= ٤كم، شمالًا. سيكون متجه الموقع النهائي للشخص الأول بالنسبة إلى نقطة الإسناد (أ)، هو:

$س_{٢}$ = $س_{١}$ + Δس = ٣+٤ = ٧كم، شرقًا؛ أي عند النقطة (د).



الشكل (١-١١): جمع متجهين.

هل سيكون الموقع النهائي للشخص الثاني عند (د) أيضًا؟

تذكر: $\vec{أ}$ + $\vec{ب}$ **كمية تختلف عن أ + ب**

نستنتج من ذلك أنّ ناتج جمع متجهين يكون متجهًا ثالثًا، يختلف مقداره ويختلف اتجاهه باختلاف الزاوية بين المتجهين ويتضح أيضًا أنّه لا يمكن جمع متجهين من غير معرفة اتجاه كلّ منهما، أو الزاوية بينهما، وهذا ما يميّز جمع الكميات المتجهة من جمع الكميات القياسية. يطلق على حاصل الجمع الاتجاهي لمتجهين أو اكثر اسم المتجه المحصل resultant vector، والمثال الآتي يوضح ذلك:

مثال (١-٤)

تحركت سيارة مسافة ٢٠ كم شرقًا، ثم ٢٥ كم باتجاه ٣٠° شرق الشمال. أوجد:

١ المسافة الكلية التي قطعتها السيارة.

٢ الإزاحة المحصلة للسيارة.

الحلّ:

١ بما أنّ المسافة كمية قياسية، فلا نأخذ في الاعتبار اتجاه حركة السيارة، بل نجمع المسافات جمعًا عدديًّا؛ لذا فإنّ:

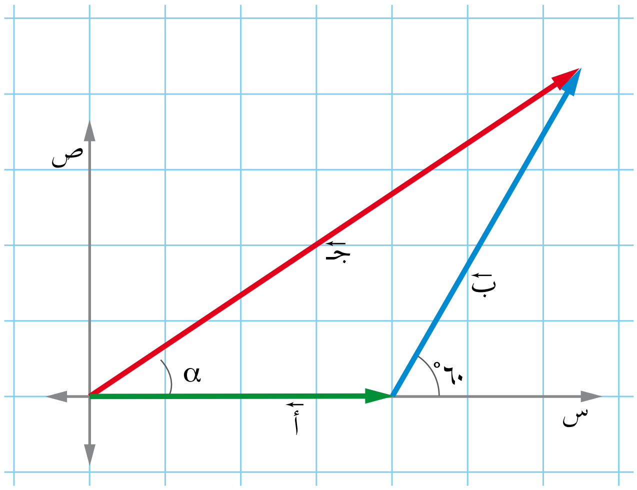
$$ف = ف_{١} + ف_{٢} = ٢٠ + ٢٥ = ٤٥ \text{ كم}$$

٢ $\vec{أ}$ = ٢٠ كم، صفر°، $\vec{ب}$ = ٢٥ كم، ٦٠°

- نأخذ مقياس رسم مناسب، وليكن ١سم/ ٥كم، على ورقة رسم بياني كما في الشكل (١-١٢).

■ نرسم سهمًا طوله ٤ سم باتجاه الشرق (صفر° مع محور السينات الموجب) ليمثل الإزاحة $\overleftarrow{\text{أ}}$.

■ باستخدام المنقلة والمسطرة نرسم من رأس المتجه $\overleftarrow{\text{أ}}$ سهمًا آخر طوله ٥ سم، ويصنع ٦٠° مع محور السينات الموجب ليمثل الإزاحة $\overleftarrow{\text{ب}}$.



الشكل (١-١٢): محصلة متجهين بالرسم.

■ من بداية المتجه $\overleftarrow{\text{أ}}$ نرسم سهمًا يصل إلى رأس المتجه $\overleftarrow{\text{ب}}$ ليمثل الإزاحة المحصلة $\overleftarrow{\text{جـ}}$ (حاصل الجمع $\overleftarrow{\text{أ}} + \overleftarrow{\text{ب}}$)، كما يوضح الشكل (١-١٢).

■ نقيس طول السهم الممثل للمتجه $\overleftarrow{\text{جـ}}$ باستخدام المسطرة، ثم نقسم هذا الطول على مقياس الرسم المستخدم، ليمثل الناتج مقدار الإزاحة المحصلة. فمن الشكل:

طول السهم = ٧٫٨ سم، س = $\dfrac{٧٫٨}{\frac{١}{٥}}$ = ٣٩٫٠ كم

■ نقيس باستخدام المنقلة الزاوية (α) التي تصنعها الإزاحة المحصلة مع محور السينات الموجب، لتحديد اتجاه هذه الإزاحة. من الشكل: α = ٣٤°، أي أنّ:

الإزاحة المحصلة: $\overleftarrow{\text{جـ}} = \overleftarrow{\text{أ}} + \overleftarrow{\text{ب}}$ = ٣٩ كم، ٣٤°.

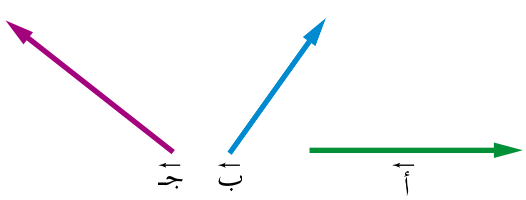
ويطلق على هذه الطريقة اسم تركيب المتجهات.

سـؤال

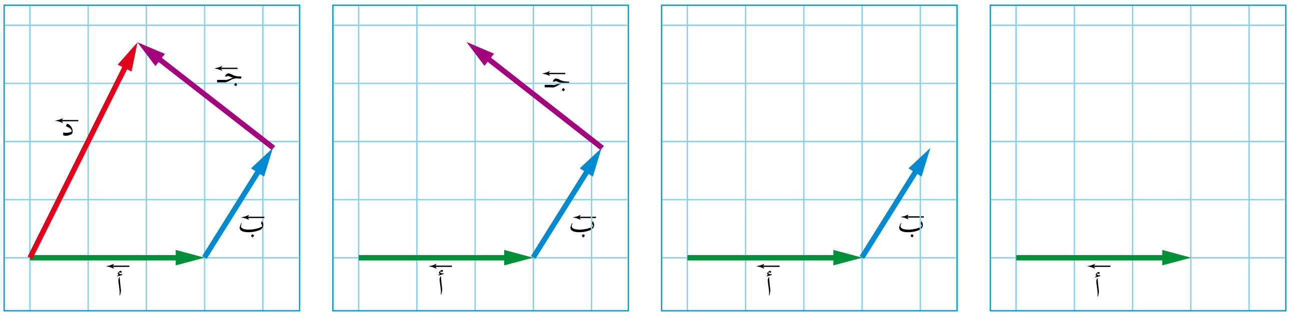
فسّر سبب اختلاف مقدار المسافة الكلية عن مقدار الإزاحة المحصلة.

فكر: هل يمكن القول إنّ: $\overleftarrow{\text{أ}} + \overleftarrow{\text{ب}} = \overleftarrow{\text{ب}} + \overleftarrow{\text{أ}}$ ؟ تحقق من ذلك بالرسم.

باستخدام طريقة التركيب، يمكن إيجاد المتجه المحصل لثلاثة متجهات: $\overleftarrow{\text{أ}}$ ، $\overleftarrow{\text{ب}}$ ، $\overleftarrow{\text{جـ}}$ الموضحة في الشكل (١-١٣)، باتباع مجموعة خطوات، يبينها الشكل (١-١٤).



الشكل (١-١٣): ثلاثة متجهات مختلفة.



١– نرسم المتجه الأول مقدارًا واتجاهًا.

٢– من رأس المتجه الأول نرسم المتجه الثاني مقدارًا واتجاهًا.

٣– من رأس المتجه الثاني نرسم المتجه الثالث مقدارًا واتجاهًا.

٤– نوصل بداية المتجه الأول مع نهاية المتجه الأخير ليمثل المتجه المحصل.

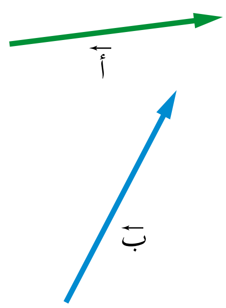
الشكل (١–١٤): خطوات إيجاد المتجه المحصل لثلاثة متجهات بطريقة الرسم.

سـؤال

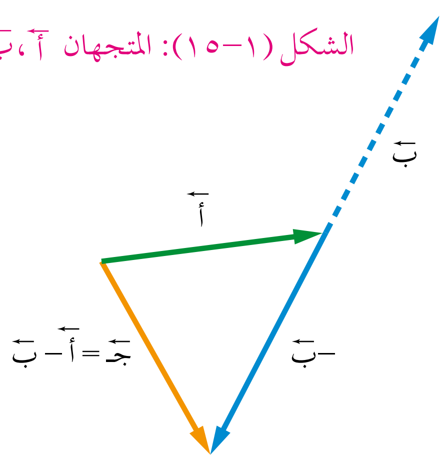
معتمدًا على طريقة التركيب السابقة، متى يكون المتجه المحصل لعدة متجهات مساويًا للصفر؟

(١–٢–٥) طرح المتجهات

لإجراء عملية طرح متجهين مثل أ – ب نستخدم تعريف سالب المتجه الذي درسته سابقًا، لتصبح عملية الطرح على الصورة أ + (–ب)، أي نحولها إلى عملية جمع، حيث (–ب) هو سالب المتجه ب. إذا كان لدينا متجهين (أ، ب) كما هو موضح في الشكل (١–١٥)، وكان المتجه الناتج من حاصل الطرح هو جـ، فإنه يمكن إيجاد جـ بالرسم، حيث نرسم سالب المتجه ب ونضيفه للمتجه أ، كما تعلمنا في الدرس السابق، فيكون جـ هو المتجه المحصل للمتجهين أ، –ب، والشكل (١ – ١٦) يوضح ذلك.



الشكل (١–١٥): المتجهان أ، ب .



الشكل (١–١٦): جـ المتجه المحصل للمتجهين أ – ب .

من التطبيقات الفيزيائية على طرح المتجهات حساب الإزاحة، والتسارع، وكذلك تطبيقات الزخم الخطي والتصادمات.

سؤال

هل يمكن القول إنّ: $\overleftarrow{أ} - \overleftarrow{ب} = \overleftarrow{ب} - \overleftarrow{أ}$ ؟ وضح إجابتك بالرسم.

توسع

من خصائص جمع المتجهات أنه:

تبديلي: $\overleftarrow{أ} + \overleftarrow{ب} = \overleftarrow{ب} + \overleftarrow{أ}$

تجميعي: $\overleftarrow{أ} + (\overleftarrow{ب} + \overleftarrow{جـ}) = (\overleftarrow{أ} + \overleftarrow{ب}) + \overleftarrow{جـ}$

مراجعة (١-٢)

١ ماذا نعني بكل من: المتجه المحصل، سالب المتجه؟

٢ بماذا تختلف $\overleftarrow{أ} + \overleftarrow{ب}$ عن أ + ب؟

٣ بما أنّ: $\overleftarrow{أ} - \overleftarrow{ب} = \overleftarrow{أ} + (-\overleftarrow{ب})$، فهل يعني هذا أنّ عملية طرح المتجهات هي حالة خاصة من عملية جمعها؟ وضح ذلك.

٤ متى يكون $|\overleftarrow{أ} + \overleftarrow{ب}| = |\overleftarrow{أ} - \overleftarrow{ب}|$ ، علمًا بأنّ $\overleftarrow{أ} \neq$ صفر، $\overleftarrow{ب} \neq$ صفر؟

٥ اختر الإجابة الصحيحة:

إذا كان $\overleftarrow{أ} - \overleftarrow{ب} =$ صفرًا، فإن المتجهين $\overleftarrow{أ}$ ، $\overleftarrow{ب}$:

أ متساويان مقدارًا، متماثلان اتجاهًا.

ب مختلفان مقدارًا، متماثلان اتجاهًا.

جـ متساويان مقدارًا، متعاكسان اتجاهًا.

د مختلفان مقدارًا، متعاكسان اتجاهًا.

١–٣ تحليل المتجهات

Vectors Analysis

نشاط تمهيدي

- سار أحمد في ساحة المدرسة مبتدئًا حركته من عند سارية العلم، فاتجه شمالاً وقطع مسافة ١٢م، ثم اتجه غربًا وقطع مسافة ١٦م. احسب الإزاحة المحصلة.
  - بطريقة الرسم.
  - باستخدام نظرية فيثاغورس. ولاحظ ما يأتي:
- في أي الطريقتين كانت النتيجة أكثر دقة؟ لماذا؟
- في أي الطريقتين لزم وقت أقل؟

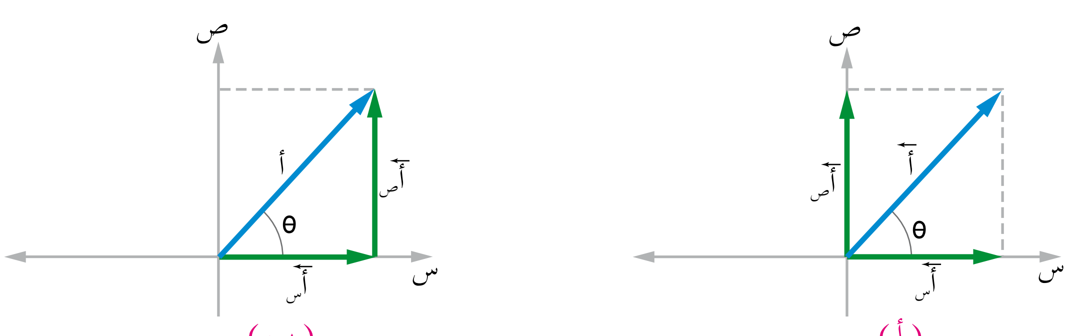
تعاملنا مع المتجهات في الدروس السابقة بطريقة الرسم، وهي طريقة عملية بسيطة لتمثيل المتجه، لكنّها لا تخلو من الأخطاء بسبب استخدام أدوات القياس، وهي ليست عملية عندما نتعامل مع متجهات عدّة؛ لذا سنتعرف طريقة رياضية هي **تحليل المتجهات**.

من تنفيذك للنشاط التمهيدي، توصلت رياضيًّا إلى المتجه المحصل لمتجهين متعامدين، وإذا كان أيّ متجه يتركب من متجهين متعامدين، فإنَّ معرفة مقدار متجه ما واتجاهه توصلنا إلى معرفة المتجهين المتعامدين اللذين يتركب منهما، أي أنّنا سنجري عملية معاكسة لعملية التركيب السابقة، وهي عملية تحليل؛ لذا سنطلق على المتجهين المتعامدين اسم **مركبتي المتجه**.

ولتوضيح ذلك، لنأخذ متجه $\vec{أ} =$ (أ، θ) الذي يمكن تمثيله على محورين متعامدين (سيني وصادي). نحلّل المتجه $\vec{أ}$ إلى مركبتين متعامدتين، إحداهما تمثل مسقط المتجه على محور السينات، تسمى مركبة سينية ($\vec{أ}_{س}$)، والأخرى تمثل مسقط المتجه على محور الصادات، وتسمى مركبة صادية ($\vec{أ}_{ص}$)، والشكل (١–١٧/أ) يوضح ذلك، وإذا أخذنا في الحسبان خاصية تساوي المتجهين، فإنّه يمكن نقل المركبة $\vec{أ}_{ص}$ كما في الشكل (١–١٧/ب) من غير أن تتأثّر، ليصبح لدينا مثلث قائم الزاوية، فيه:

$\vec{أ} = \vec{أ}_{س} + \vec{أ}_{ص}$ .... (١–١)

أي أنّه يمكن الاستعاضة عن المتجه بمركبتيه، فهو يمثل محصلتهما. وباستخدام قوانين النسب المثلثية يمكن أن نحسب كلًّا من $أ_{س}$، $أ_{ص}$ كما يأتي:



الشكل (١–١٧): تحليل المتجه.

$\text{جتا}\theta = \frac{\text{أ}_{\text{س}}}{\text{أ}} \leftarrow \text{أ}_{\text{س}} = \text{أ جتا}\theta$، المركبة السينية .... (١ – ٢)

$\text{جا}\theta = \frac{\text{أ}_{\text{ص}}}{\text{أ}} \leftarrow \text{أ}_{\text{ص}} = \text{أ جا}\theta$، المركبة الصادية .... (١ – ٣)

وبما أنّ هاتين المركبتين تشكلان ضلعي مثلث قائم الزاوية طول وتره يساوي أ، فإنّ:

$\text{أ} = \sqrt{\text{أ}_{\text{س}}^{2} + \text{أ}_{\text{ص}}^{2}}$ .... (١ – ٤)

$\text{ظا}\,\theta = \frac{\text{أ}_{\text{ص}}}{\text{أ}_{\text{س}}} \leftarrow \theta = \text{ظا}^{-1}\left(\frac{\text{أ}_{\text{ص}}}{\text{أ}_{\text{س}}}\right)$ .... (١ – ٥)

فإذا كان المتجه $\vec{\text{أ}}$ معلومًا، فإنّه يمكن إيجاد مركبتيه من المعادلتين (١–٢)، (١–٣)، وإذا كانت مركبتا المتجه $\vec{\text{أ}}$ معلومتين، فإنّ مقدار المتجه يحسب من المعادلة (١–٤)، واتجاهه يُحدّد من المعادلة (١–٥).

فكر: هل يمكن استخدام النسبة المثلثية جاθ، أو النسبة جتاθ لتحديد الاتجاه بدلًا من ظاθ؟ فسر إجابتك.

مثال (١–٥)

إذا كان $\vec{\text{أ}}$ = ٤ وحدة، ١٢٠°. جد مركبتي المتجه $\vec{\text{أ}}$.

الحل:

$\text{أ}_{\text{س}} = \text{أ جتا}\theta$ = ٤ جتا ١٢٠ = −٢ وحدة.

$\text{أ}_{\text{ص}} = \text{أ جا}\theta$ = ٤ جا ١٢٠ = ٣,٤٦ وحدة.

سؤال

إذا كانت $\text{أ}_{\text{س}}$ = ٢ وحدة، $\text{أ}_{\text{ص}}$ = ٢ وحدة، $\text{ب}_{\text{س}}$ = −٢ وحدة، $\text{ب}_{\text{ص}}$ = −٢ وحدة . جد كلًّا من $\vec{\text{أ}}$ ، $\vec{\text{ب}}$.

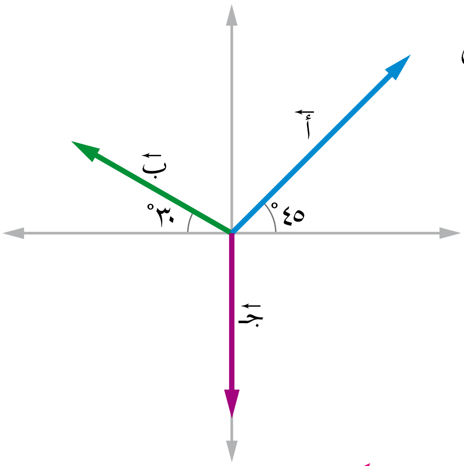
حساب المتجه المحصل لمتجهات عدّة بطريقة التحليل

إذا أردنا حساب المتجه المحصل لعدة متجهات، فإنّنا نحلل كلّ متجه إلى مركبتيه، ثم نجمع المركبات السينية معًا، والمركبات الصادية معًا، ثم نطبق المعادلتين (١–٤) و (١–٥) لحساب المتجه المحصل. والمثال الآتي يوضح ذلك:

مثال (١-٦)

احسب المتجه المحصل للمتجهات $\overleftarrow{أ}$، $\overleftarrow{ب}$، $\overleftarrow{جـ}$ المرسومة في الشكل (١-١٨)، علمًا بأنّ:

أ = ٨ وحدة، ب = ٦ وحدة، جـ = ٦ وحدة.



الشكل (١-١٨): مثال (١-٦).

الحلّ:

نحدد أولًا الزاوية التي يصنعها كل متجه مع محور السينات الموجب، وهي على الترتيب:

θ_1 = ٤٥°، θ_2 = ١٨٠−٣٠ = ١٥٠°، θ_3 = ٢٧٠°، ثم

نحلل المتجهات إلى مركباتها السينية والصادية، كما يأتي:

$أ_{س}$ = أ جتا θ_1 = ٨ جتا ٤٥ = ٥,٦٦ وحدة

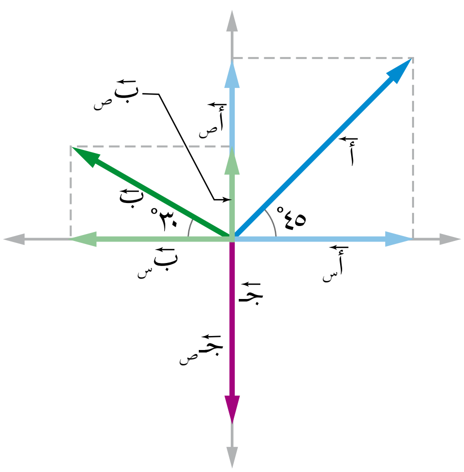
$أ_{ص}$ = أ جا θ_1 = ٨ جا ٤٥ = ٥,٦٦ وحدة

$ب_{س}$ = ب جتا θ_2 = ٦جتا ١٥٠ = −٥,٢٠ وحدة

$ب_{ص}$ = ب جا θ_2 = ٦ جا ١٥٠ = ٣ وحدة

$جـ_{س}$ = جـ جتا θ_3 = ٦ جتا ٢٧٠ = ٠

$جـ_{ص}$ = جـ جا θ_3 = ٦ جا ٢٧٠ = −٦ وحدة.



الشكل (١-١٩): التحليل بالرسم.

انظر الشكل (١-١٩) الذي يوضح عملية التحليل بالرسم.

بفرض أنّ: $\overleftarrow{د}$ هو المتجه المحصل للمتجهات الثلاثة؛ أي أنّ: $\overleftarrow{د} = \overleftarrow{أ} + \overleftarrow{ب} + \overleftarrow{جـ}$، فإن:

$د_{س} = أ_{س} + ب_{س} + جـ_{س}$ = ٥,٦٦ + (−٥,٢٠) + ٠ = ٠,٤٤ وحدة.

$د_{ص} = أ_{ص} + ب_{ص} + جـ_{ص}$ = ٥,٦٦ + ٣ + (−٦) = ٢,٦٦ وحدة.

$د = \sqrt{د_{س}^{2} + د_{ص}^{2}} = \sqrt{(٠,٤٤)^{2} + (٢,٦٦)^{2}}$ = ٢,٧٠ وحدة.

ظا $\theta = \frac{د_{ص}}{د_{س}} = \frac{٢,٦٦}{٠,٤٤}$ = ٦,٠٥ ، لاحظ أنّ كلًّا من $د_{س}$ ، $د_{ص}$ موجبتان.

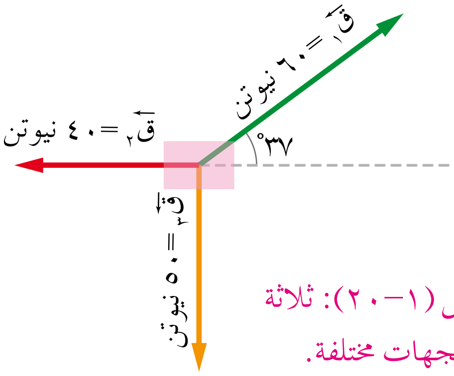
وهذا يعني أن θ تقع في الربع الأول للمستوى الديكارتي.

θ = ظا$^{-1}$ (٦,٠٥) = ٨٠,٦°

إذن، $\overleftarrow{د}$ = ٢,٧٠ وحدة، ٨٠,٦°

سـؤال

احسب القوة المحصلة لمجموعة القوى الممثلة في الشكل (١-٢٠).



الشكل (١-٢٠): ثلاثة متجهات مختلفة.

تـوسـع

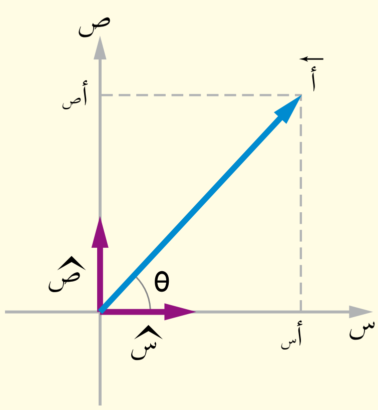
غالبًا ما يُعبّر عن المتجهات بدلالة ما يسمى متجه الوحدة "unit vector"، وهو متجه مقداره يساوي (١) ويستخدم لتحديد الاتجاه في الفضاء، وليس له أي مدلول فيزيائي آخر.

فمثلًا يمكن أن نكتب المتجه $\vec{أ}$ على الصورة: $\vec{أ} = أ\ \hat{أ}$، حيث $\hat{أ}$ هو متجه وحدة، مقداره يساوي (١) واتجاهه باتجاه $\vec{أ}$ نفسه، وفي المستوى الديكارتي، يمكن استخدام الرموز $\hat{س}$ و $\hat{ص}$ لتدل على متجهي الوحدة باتجاه السينات الموجب والصادات الموجب على الترتيب، فإذا كان المتجه $\vec{أ}$ يصنع زاوية θ مع السينات الموجب، فإنه يمكن التعبير عن هذا المتجه بدلالة متجهات الوحدة على الصورة:

$\vec{أ} = أ_{س}\ \hat{س} + أ_{ص}\ \hat{ص}$ ، والشكل (١-٢١) يوضح ذلك.

ومن أهم خصائص متجه الوحدة، أنه يمكن التعبير عن المتجهات المتوازية جميعها بدلالة متجه الوحدة نفسه (لماذا؟).

ابحث في أهميه متجه الوحدة للتعبير عن المتجهات، وكيف يمكن الاستفادة من الخاصية المذكورة آنفًا في إجراء العمليات الحسابية على المتجهات، ثم حاول وبالاستفادة من الشكل (١-٢١) أن تحدد المتجه $\hat{أ}$ على الرسم، وأن تربط بينه من جهة، وبين $\hat{س}$ و $\hat{ص}$ من جهة أخرى، ثم قارن بين الصيغة الرياضية للمتجه $\vec{أ}$ السابقة، وتلك الواردة في المعادلة (١-١).



الشكل (١-٢١): متجه الوحدة.

مراجعة (١-٣)

١ ما المقصود بتحليل المتجه؟

٢ إذا كان $أ_{س}$ = ٤ وحدة، $أ_{ص}$ = ٢ وحدة، $ب_{س}$ = -٢ وحدة، $ب_{ص}$ = -١ وحدة، فاحسب:

- $\vec{ب}$
- $\vec{جـ} = \vec{أ} - \vec{ب}$
- $\vec{هـ} = \vec{أ} + \vec{ب}$
- $\vec{و} = ٢\ \vec{أ} - ٣\ \vec{ب}$

١-٤ ضرب المتجهات
Vectors Product

نشاط تمهيدي

• ارجع إلى تعريف الشغل الذي مر معك، وابحث عن تأثر الشغل بمقدار الزاوية بين الإزاحة والقوة المؤثرة.

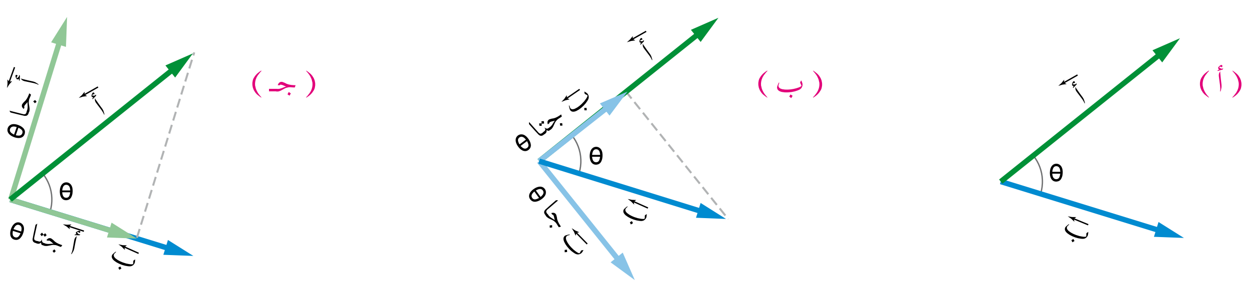
سنتناول نوعين من الضرب يمكن إجراؤهما على المتجهات، أحدهما ينتج عنه كمية قياسية ويسمى **"الضرب القياسي"**، والآخر ينتج عنه كمية متجهة ويسمى **"الضرب المتجهي"**. وفي ما يأتي توضيح لهذين النوعين:

(١-٤-١) الضرب القياسي (النقطي) للمتجهات

إذا كان لدينا متجهان أ، ب مرسومان من النقطة نفسها، وبينهما زاوية محصورة θ كما في الشكل (١-٢٢/أ)، فإنّ حاصل الضرب القياسي للمتجهين يُعرّف على الصورة:

أ . ب = أ ب جتا θ .... (١-٦)

حيث θ هي الزاوية الصغرى بين المتجهين ($θ \geq$ ١٨٠°)، ويطلق على نوع الضرب هذا أحياناً اسم الضرب النقطي؛ لأنه يُعبَّر عنه رياضيًّا بنقطة (•)، لاحظ المعادلة (١- ٦).



الشكل (١-٢٢): تحليل المتجه إلى مركبتين متعامدتين، تنطبق إحداهما على متجه آخر.

يمكن تحليل أيّ المتجهين أ، أو ب في الشكل (١-٢٢) إلى مركبتين متعامدتين، إحداهما تنطبق على المتجه الآخر، والأخرى متعامدة معه، انظر الشكل (١-٢٢/ب) الذي يوضح تحليل ب، بينما يوضح الشكل (١-٢٢/ جـ) تحليل أ؛ لذا يمكن تعريف الضرب القياسي لمتجهين على أنه حاصل ضرب مقدار أحد المتجهين في مقدار مسقط المتجه الآخر على الأول؛ أي أنّ:

أ . ب = أ (ب جتا θ) = ب (أ جتا θ) .... (١-٧)

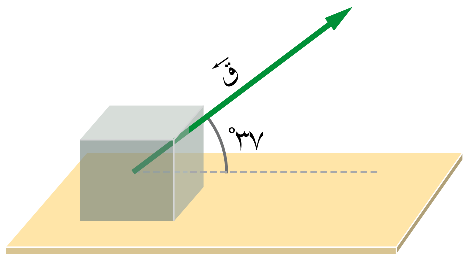
من التطبيقات الفيزيائية على الضرب القياسي للمتجهات حساب الشغل، والتدفق الكهربائي والمغناطيسي، وفرق الجهد الكهربائي.

فكر: اعتماداً على المعادلة (١-٧)، هل يمكن القول: إنّ أ . ب = ب . أ؟ وضح إجابتك.

مثال (١-٧)

من التطبيقات الفيزيائية على الضرب القياسي للمتجهات حساب الشغل الذي درسته سابقًا، إذ يُعطى بالعلاقة: ش = ق . س، حيث ق القوة و س الإزاحة.

يبين الشكل (١-٢٣) قوة مقدارها (٢٠) نيوتن تؤثّر في جسم، فتحركه مسافة (٦)م إلى اليمين، على سطح أفقي. احسب الشغل الذي تبذله القوة على الجسم.



الشكل (١-٢٣): مثال (١-٧).

الحلّ:

نلاحظ من الشكل أنّ الزاوية بين ق ، س تساوي ٣٧°.

ش = ق س جتا θ

= ٢٠ × ٦ × جتا ٣٧ = ٩٦ نيوتن. م.

= ٩٦ جول.

سـؤال

معتمدًا على المعادلة (١-٦)، أجب عما يأتي:

١ ما حاصل الضرب القياسي لمتجه مع نفسه؟

٢ متى يكون حاصل الضرب القياسي لمتجهين مساويًا صفرًا؟

٣ متى يكون حاصل الضرب القياسي لمتجهين موجبًا؟ ومتى يكون سالبًا؟

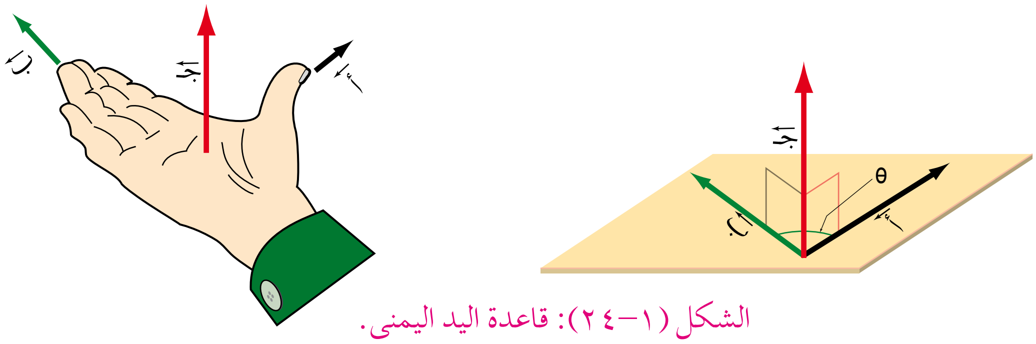
(١-٤-٢) الضرب المتجهي (التقاطعي) للمتجهات

يُعرّف حاصل الضرب المتجهي لمتجهين (أ ، ب)، الزاوية بينهما θ على الصورة:

أ × ب = جـ وبما أن ناتج هذا النوع من الضرب هو كمية متجهة فإن مقدار المتجه الناتج يُعطى على الصورة:

| جـ | = أ ب حا θ .... (١-٨)

أمّا اتجاهه فيُحدّد باستخدام قواعد خاصة، نذكر منها **قاعدة اليد اليمنى** التي تنص على ما يأتي: "إذا بسطت راحة يدك اليمنى بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه المتجه الأول (أ)، وتشير بقية الأصابع إلى اتجاه المتجه الثاني (ب)، فإنّ اتجاه الكمية المتجهة الناتجة جـ يكون عموديًّا على راحة اليد وخارجًا منها". والشكل (١-٢٤) يوضح هذه القاعدة.



الشكل (١-٢٤): قاعدة اليد اليمنى.

واعتمادًا على هذه القاعدة، فإنّه يمكن استنتاج ما يأتي:

١ $\overleftarrow{\text{أ}} \times \overleftarrow{\text{ب}} = -\overleftarrow{\text{ب}} \times \overleftarrow{\text{أ}}$، أي أنّهما متساويان في المقدار ومتعاكسان في الاتجاه.

٢ المتجه الناتج من عملية الضرب ($\overleftarrow{\text{أ}} \times \overleftarrow{\text{ب}}$) يكون دائمًا متعامدًا مع كل من المتجهين $\overleftarrow{\text{أ}}$ و$\overleftarrow{\text{ب}}$، وحيث إنّنا نرسم المتجهات هنا في المستوى الديكارتي (مستوى الصفحة)، فإنّ المتجه $\overleftarrow{\text{جـ}}$ يكون متعامدًا مع مستوى الصفحة؛ فإمّا أن يكون متجهًا نحو الداخل (بعيدًا عن الناظر)، أو نحو الخارج (باتجاه الناظر).

ملاحظة: يستخدم الرمز ⊙ للدلالة على أنّ الاتجاه خارج من الصفحة، كما يستخدم الرمز ⊗ للدلالة على أنّ الاتجاه داخل في الصفحة.

بالرجوع إلى الشكل (١-٢٢)، الذي يوضح التحليل المتعامد لمتجهين بينهما زاوية، فإنّه يمكن تعريف مقدار الضرب المتجهي لمتجهين على أنّه حاصل ضرب مقدار المتجه الأول ($\overleftarrow{\text{أ}}$) في مركبة المتجه الثاني ($\overleftarrow{\text{ب}}$) المتعامدة مع $\overleftarrow{\text{أ}}$، لذلك يطلق على هذا النوع من الضرب اسم الضرب التقاطعي.

ومن التطبيقات الفيزيائية على الضرب التقاطعي: إيجاد عزم القوة، والقوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة تتحرك في مجال مغناطيسي.

مثال (١-٨)

إذا كان كل من المتجهين $\overleftarrow{\text{أ}}$ = ٥ وحدات، ٠°، و $\overleftarrow{\text{ب}}$ = ٤ وحدات، ٦٠°، يقعان في مستوى الورقة. فأوجد حاصل الضرب التقاطعي $\overleftarrow{\text{أ}} \times \overleftarrow{\text{ب}}$

الحلّ:

$\overleftarrow{\text{أ}} \times \overleftarrow{\text{ب}} = \overleftarrow{\text{جـ}}$

$|\overleftarrow{\text{أ}} \times \overleftarrow{\text{ب}}|$ = أ ب جا θ = ٥ × ٤ × جا ٦٠° = ١٧,٣ (مقدار المتجه $\overleftarrow{\text{جـ}}$)

حسب قاعدة اليد اليمنى، فإنّ اتجاه $\overleftarrow{\text{جـ}}$ يكون عموديًّا على مستوى الورقة خارجًا منها (باتجاه الناظر ⊙).

سؤال

اعتمادًا على المعادلة (١–٨)، أجب عما يأتي:

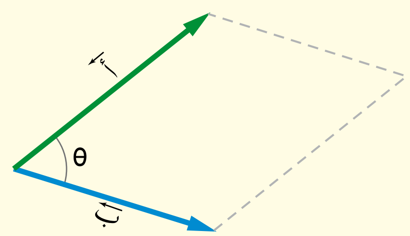
❶ ما حاصل ضرب المتجه مع نفسه؟

❷ متى يكون حاصل الضرب التقاطعي لمتجهين مساويًا صفرًا؟

توسع

يمكن استخدام عملية الضرب التقاطعي في إيجاد مساحة متوازي الأضلاع الذي يتشكل من المتجهين ($\overleftarrow{\text{أ}}$ ، $\overleftarrow{\text{ب}}$) كما في الشكل (١–٢٥).

استخدم خصائص تحليل المتجهات، والضرب المتجهي، وقوانين النسب المثلثية للتوصل إلى العلاقة بين مقدار الضرب المتجهي للمتجهين ($\overleftarrow{\text{أ}}$ ، $\overleftarrow{\text{ب}}$)، ومساحة متوازي الأضلاع.



الشكل (١–٢٥): متوازي الأضلاع.

مراجعة (١–٤)

❶ ما الفرق بين الضرب النقطي والضرب التقاطعي للمتجهات؟

❷ إذا كان حاصل ضرب متجهين متعامدين يساوي صفرًا، فما نوع الضرب؟ فسّر إجابتك.

❸ إذا علمت أن مقدار حاصل الضرب التقاطعي لمتجهين يعتمد على مقدار الزاوية بينهما، فما أكبر قيمة لذلك المقدار؟ وكم تكون الزاوية بينهما حينئذ؟

❹ هل $(-\text{ن}\overleftarrow{\text{أ}}) \times \overleftarrow{\text{ب}} = \text{ن}\overleftarrow{\text{أ}} \times (-\overleftarrow{\text{ب}})$؟ حيث ن كمية قياسية. وضح إجابتك.

المشروع الأول: البحث عن الكنز

■ **فكرةُ المشروعِ:** **الملاحة وتحديد الأماكن من أهم التطبيقات على المتجهات.**

تحتاج إلى ورق رسم، وأقلام، ومتر قياس، وبوصلة لكل مجموعة.

■ **الإجراءاتُ:** يوزَّع الطلبة إلى مجموعتين، المجموعة الأولى تعمل على إخفاء الكنز في مكان ما في المدرسة، وترسم خريطة لموقع الكنز، والمجموعة الثانية تستخدم الخريطة التي رسمتها المجموعة الأولى للبحث عن الكنز.

أولًا: المجموعة الأولى

1. خبّئ الكنز في موقع ما في المدرسة.
2. اختر نقطة بداية (إسناد) ليبدأ منها البحث عن الكنز.
3. استخدم نظام وحدات قياس مناسبة: المتر، القدم، الخطوة...
4. حدد معالم مختلفة لوضعها على الخريطة: (شجرة، عارضة ، سارية العلم، ...).
5. حدد المتجه الذي يمثل المَعْلَم السابق بالطريقة الآتية:
   قف عند نقطة البداية ودَوِّر البوصلة إلى أن ينطبق مؤشرها الأحمر على اتجاه الشمال N
6. دَوِّر البوصلة بحيث يصبح الحرف N على استقامة مع المَعْلَم (في هذه الخطوة يجب أن تقف بحيث تواجه المَعْلَم).
7. سجل الزاوية بين المَعْلَم واتجاه الشمال.
8. قِس المسافة بين نقطة البداية والمَعْلَم.
9. تحرك إلى المَعْلَم، وكرر الخطوات السابقة على مَعْلَم آخر.
10. كرر الخطوات السابقة حتى تصل إلى الموقع الذي خبأت فيه الكنز (يجب أن تحصل على خمسة متجهات على الأقل).
11. اختبر خريطتك: باستخدام ورقة الرسم ارسم المتجهات التي حصلت عليها، وحدد المتجه المحصل، ثم عد إلى نقطة البداية وتتبع المتجه المحصل، هل وصلت إلى الكنز؟
12. حوّل الخريطة إلى جدول يشابه الجدول الآتي:

الخطوة	المقدار	الزاوية
١		
٢		
٣		
٤		
٥		

ثانيًا: المجموعة الثانية:

استعمل الجدول المتوافر لديك للبحث عن الكنز.

■ **مناقشة النتائج:**

- هل وصلت إلى الكنز عندما استخدمت المتجه المحصل؟
- هل تمكنت المجموعة الثانية من الوصول إلى الكنز باستخدام الجدول؟

❶ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ أي الكميات الفيزيائية الآتية تعد متجهة:

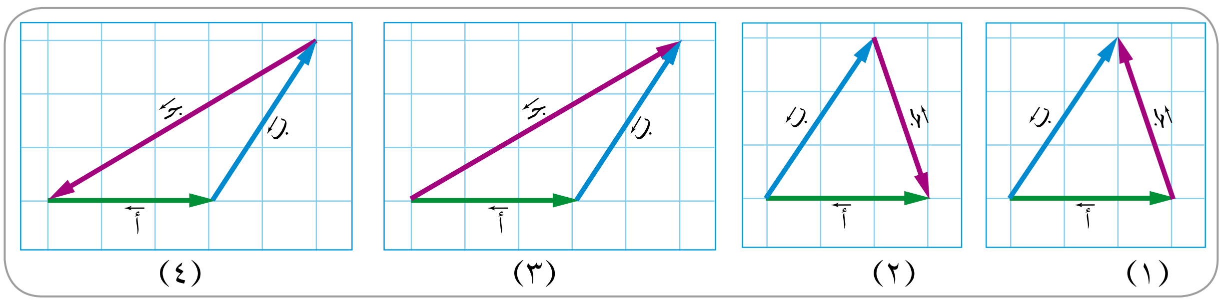
أ) المسافة ب) الكتلة جـ) الزمن د) الإزاحة

٢ لديك متجهان، مقدار الأول ١٢ وحدة، ومقدار الثاني ٨ وحدات. أي المقادير الآتية على الترتيب يمكن أن تمثل أكبر مقدار وأصغر مقدار لحاصل جمعهما:

أ) ١٤,٤ وحدة، ٤ وحدات ب) ١٢ وحدة، ٨ وحدات

جـ) ٢٠ وحدة، ٨ وحدات د) ٢٠ وحدة، ٤ وحدات

رسم طالب الرسومات الموضحة في الشكل (١-٢٦) للتعبير عن العلاقة بين ثلاثة متجهات $\vec{\text{أ}}$ ، $\vec{\text{ب}}$، $\vec{\text{جـ}}$.



الشكل (١-٢٦): السؤال الأول، الفقرات (٣، ٤، ٥).

معتمدًا على الشكل (١-٢٦)، أجب عن الفقرات (٣، ٤، ٥) الآتية:

٣ أي الرسومات تمثل العلاقة: $\vec{\text{جـ}} = \vec{\text{ب}} - \vec{\text{أ}}$ ؟

أ) ١ ب) ٢ جـ) ٣ د) ٤

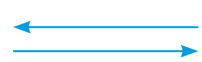
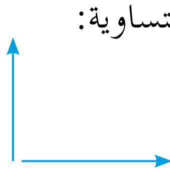
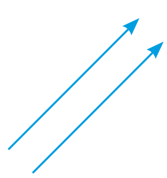
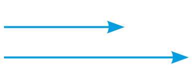
٤ في أي الرسومات كان المتجه المحصل للمتجهات الثلاثة مساويًا صفرًا؟

أ) ١ ب) ٢ جـ) ٣ د) ٤

٥ في أي الأشكال يكون $\vec{\text{أ}}$ محصلًا للمتجهين $\vec{\text{ب}}$ ، $\vec{\text{جـ}}$

أ) ١ ب) ٢ جـ) ٣ د) ٤

٦ إحدى أزواج المتجهات الآتية تعد متساوية:

أ)  ب)  جـ)  د) 

٧ إذا علمت أن $\vec{\text{أ}}$ = ١٠ وحدات، ٥٣° فإن المتجه (−٣ $\vec{\text{أ}}$) يساوي:

أ) −٣٠ وحدة، ٥٣°. ب) ٣٠ وحدة، ٥٣°.

جـ) ٣٠ وحدة، ٢٣٣°. د) −٣٠ وحدة، ٥٣° جنوب الشرق.

٢ وضح المقصود بكل مما يأتي:

الكمية الفيزيائية المتجهة، المتجه المحصل، الضرب النقطي لمتجهين، قاعدة اليد اليمنى.

٣ هل يمكن جمع كمية متجهة مع كمية قياسية؟ فسر ذلك.

٤ وضح متى يكون:

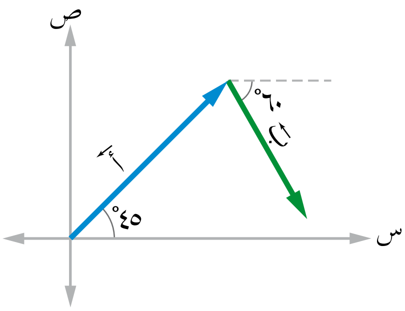
أ $|\vec{أ} + \vec{ب}| = أ + ب$ ب $|\vec{أ} - \vec{ب}| = أ - ب$ جـ $|\vec{أ} \times \vec{ب}| = \vec{أ} \cdot \vec{ب}$

٥ لديك المتجهات الآتية:

$\vec{أ}$ = ٦ وحدات، صفر° $\vec{ب}$ = ٥ وحدات، ٣٣٠° $\vec{جـ}$ = ٤ وحدات، ٢١٠°

أ أثبت بالرسم أن $\vec{أ} + (\vec{ب} + \vec{جـ}) = (\vec{أ} + \vec{ب}) + \vec{جـ}$.

ب جد المتجه المحصل لجمعهما باستخدام طريقة التحليل.



الشكل (١-٢٧): السؤال السادس.

٦ معتمدًا على البيانات الموضحة في الشكل (١-٢٧).

حيث: أ = ٦ وحدات، ب = ٥ وحدات. جد ما يأتي:

أ $\vec{أ} + \vec{ب}$ ب $\vec{أ} - ٢\vec{ب}$

جـ $\vec{أ} \cdot \vec{ب}$ د $\vec{أ} \times \vec{ب}$

٧ إذا كانت المركبات السينية والصادية على الترتيب للمتجه $\vec{أ}$: − ٨,٧ سم، ١٥ سم،

وللمتجه $\vec{ب}$: ١٣,٢ سم، − ٦,٦ سم. فجد ما يأتي:

أ $\vec{أ} + \vec{ب}$

ب المركبتين السينية والصادية للمتجه $\vec{جـ}$، بحيث $\vec{أ} - \vec{ب} + ٣\vec{جـ}$ = صفر.

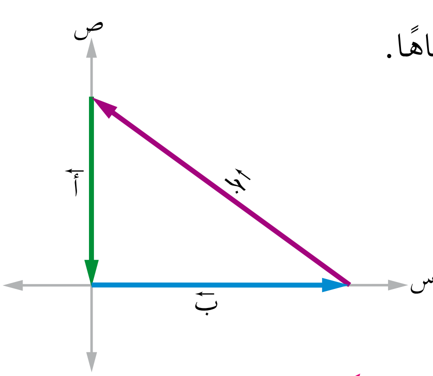
٨ متجهان متساويان مقدارًا، مقدار كل منهما ٥ وحدات، وناتج جمعهما ٦ وحدات باتجاه الصادات الموجب. ما مقدار الزاوية بين المتجهين؟

٩ يبين الشكل (١ – ٢٨) ثلاثة متجهات $\vec{أ}$ ، $\vec{ب}$، $\vec{جـ}$ ، أ = ٣ وحدات، ب = ٤ وحدات. جد ما يأتي:

أ المتجه المحصل للمتجهات الثلاثة. ب المتجه $\vec{جـ}$ مقدارًا واتجاهًا.

جـ $\vec{أ} \cdot \vec{ب}$ د $\vec{أ} - \vec{ب}$

هـ $\vec{أ} \cdot \vec{جـ}$



الشكل (١-٢٨): السؤال التاسع.

الفصل الثاني

الحركة
Motion

في هذا الفصل

(٢–١): الحركة في بعد واحد.

(٢–٢): الحركة في بعدين.

الأهمية

استخدمت وسائل النقل منذ زمن بعيد، ومع التقدم العلمي أتيح لنا استخدام وسائل نقل حديثة، أصبح معها الاهتمام بالدقة وضبط المواعيد أمرًا بالغ الأهمية، لا يقل عنه أهميةً إدراكنا لمفاهيم الزمن والسرعة والتسارع.

يصنف الكنغر على أنه من صف الثدييات التي تقطن أستراليا، ويعد من أشهر الحيوانات الجرابية وأكبرها، ويعيش هذا الصف في المناطق العشبية المكشوفة على شكل جماعات. وباستطاعة الكنغر البالغ أن يقفز مسافة خمسة أمتار، ويجتاز حاجزًا علوه متران ونصف.

فكر:

- على فرض أن الكنغر يقفز قفزًا حرًّا، فكم تبلغ سرعته الابتدائية مقدارًا واتجاهًا لحظة القفز؟
- ما الزمن الذي يبقى فيه الكنغر محلقًا في الهواء في أثناء القفز؟ وما زمن وصوله إلى أقصى ارتفاع؟

إن أولى خطوات دراسة الميكانيكا (علم الحركة)، هي وصف الحركة (الموقع، والسرعة، والتسارع) بدلالة الزمن، وبصرف النظر عن مسببات هذه الحركة، وهذا الجزء من الميكانيكا يطلق عليه اسم: كينماتيكا (Kinematics) التي تعني: الوصف الرياضي للحركة. سنهتم في هذا الفصل بوصف الحركة في بعد واحد، أي الحركة في خط مستقيم (التي تعلمت جزءًا منها بشيء من التفصيل في الصف التاسع)، والحركة في بعدين (أي الحركة في مستوى). وسنتعرف أولًا على مفاهيم الموقع والإزاحة والسرعة والتسارع، ثم نستخدم هذه المفاهيم في دراسة حركة الأجسام بتسارع ثابت، سواء أكان في بعد واحد أم في بعدين.

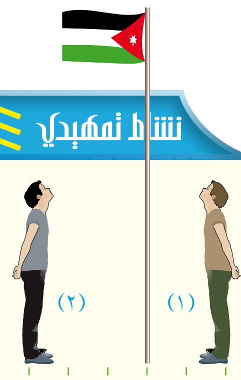
بعد دراستك هذا الفصل يتوقع منك أن:

- توضح المقصود بالمفاهيم الآتية: الموقع، الإزاحة، السرعة، التسارع، السقوط الحر، المقذوف، وتعبر عنها رياضيًّا.
- تصف حركة السقوط الحر في مجال الجاذبية الأرضية.
- تتوصل إلى معادلات الحركة بتسارع ثابت.
- تمثل العلاقات بيانيًّا: (موقع– زمن)، (سرعة– زمن)، (تسارع – زمن).
- تحلل العلاقات البيانية: (موقع – زمن)، (سرعة – زمن)، (تسارع – زمن).
- تصف حركة المقذوف في مجال الجاذبية الأرضية، وتعبر عنها رياضيًّا.
- تطبق العلاقات الرياضية الخاصة بالحركة في حل مسائل حسابية.
- تقدر أهمية علم الميكانيكا في الحياة بفضل تطبيقاته الواسعة.

٢-١ الحركة في بعد واحد

Motion in One Dimension

نشاط تمهيدي



• انظر الشكل (٢-١) وحاول أن تحدد موقع سارية العلم بالنسبة إلى كل من الطالبين (١، ٢).

الشكل (٢-١): طالبان ينظران إلى سارية علم من مكانين مختلفين.

نعرف من خبراتنا اليومية أن حركة جسم ما تمثل تغيرًا مستمرًّا في موقع ذلك الجسم، وتصنف حركة الأجسام في علم الفيزياء إلى ثلاثة أنواع: انتقالية، ودورانية، واهتزازية، فحركة سيارة على طريق تمثل حركة انتقالية، في حين أن دوران الأرض حول محورها يمثل حركة دورانية، وحركة الأرجوحة أو البندول البسيط تمثلان حركة اهتزازية. وفي هذا الفصل والفصل الذي يليه، سنهتم بدراسة حركة الأجسام الانتقالية، بينما سنتعرف النوعين الآخرين في فصول لاحقة من هذا الكتاب.

وفي دراستنا للحركة الانتقالية سنستخدم نموذج الجسيم النقطي (Particle Model)، بحيث نتعامل مع الجسم المتحرك بوصفه نقطة لها كتلة، بغض النظر عن حجمه أو شكله، وذلك لتسهيل دراسة شكل الحركة، وتطبيق المعادلات الرياضية لوصف هذه الحركة.

سـؤال

هل يمكن تبرير أن الأرض نقطة تدور حول الشمس؟

(٢-١-١) الموقع

الفكرة الأساسية في دراسة حركة جسم ما، هي تحديد موقع (Position) ذلك الجسم عند كل لحظة من لحظات حركته، وموقع الجسم ما هو إلا مكانه بالنسبة إلى نقطة إسناد معلومة. ولتوضيح مفهوم الموقع، ادرس النشاط التمهيدي.

تلاحظ أن موقع سارية العلم يختلف باختلاف المكان الذي يقف فيه كل من الطالبين (نقطة الإسناد)، بالرغم من أن مكان السارية لم يتغير، فالموقع كمية متجهة، يحدد بمقدار (مسافة) واتجاه من نقطة الإسناد (النقطة المرجعية) إلى مكان الجسم.

سـؤال

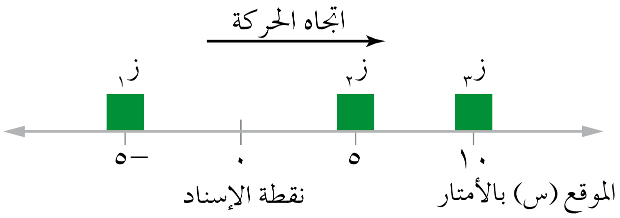
ارسم متجه الموقع لسارية العلم بالنسبة إلى كل من الطالبين (١، ٢).

سنستخدم في هذا الفصل نظام الإحداثيات الديكارتي لتحديد الموقع بالنسبة إلى نقطة الأصل بوصفها نقطة إسناد، وسنستخدم للحركة في بعد واحد محور السينات أو الصادات، وذلك حسب

اتجاه حركة الجسم (أفقية أو رأسية)، وسنعبر عن الموقع بإشارة (+) إذا كان الجسم على يمين نقطة الأصل (الإسناد) أو أعلاها، وبإشارة (−) إذا كان على يسار نقطة الإسناد أو أسفلها، وسنرمز للموقع بالرمز (س) إذا كانت الحركة أفقية، وبالرمز (ص) إذا كانت رأسية. والمثال الآتي يوضح ذلك:

مثال (٢-١)

يوضح الشكل (٢-٢) أماكن مختلفة لجسم في أثناء رصد حركته، حدد موقع الجسم عند كل من اللحظات الزمنية (ز$_١$، ز$_٢$، ز$_٣$) على الترتيب.

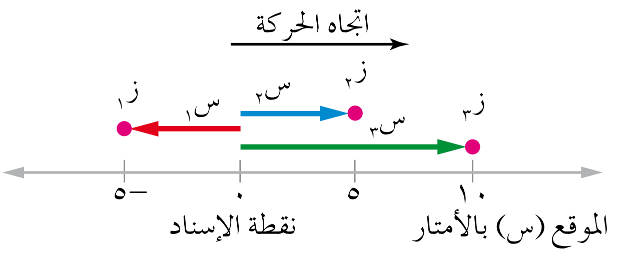


الشكل (٢-٢): مثال (٢-١).

الحلّ:

باستخدام نموذج الجسيم النقطي، نعبر عن المواقع التي كان يوجد فيها الجسم بنقاط ممثلة له، ثم نرسم سهمًا يمثل متجه الموقع بالنسبة إلى نقطة الإسناد (نقطة الأصل) عند كل من اللحظات الثلاث، كما في الشكل (٢-٣)، حيث: س$_١$ = −٥م، والإشارة السالبة تعني أن الجسم على يسار نقطة الإسناد

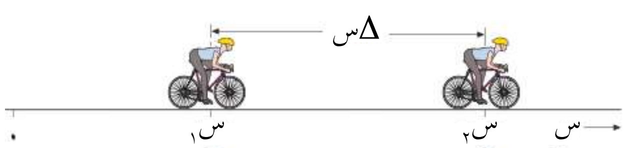
س$_٢$ = +٥م   س$_٣$ = +١٠م



الشكل (٢-٣): تمثيل الحركة باستخدام نموذج الجسيم النقطي.

(٢-١-٢) الإزاحة

مر بك في الصف التاسع أن **المسافة** (Distance) هي طول المسار الكلي الذي يسلكه الجسم في أثناء حركته، في حين أن الإزاحة (Displacement) هي التغير في موقع الجسم بالنسبة إلى نقطة إسناد معلومة، بغض النظر عن المسار الذي يسلكه الجسم، فعندما يتحرك الطالب على دراجته كما في الشكل (٢-٤) من موقع ابتدائي (س$_١$) إلى موقع نهائي (س$_٢$)، فإن إزاحته تكون (س$_٢$ − س$_١$). وإذا رمزنا للتغير بالرمز (Δ)، فإن الإزاحة تعرف على الصورة:



الشكل (٢-٤): الحركة في خط مستقيم.

Δس = س$_٢$ − س$_١$ .... (٢-١)

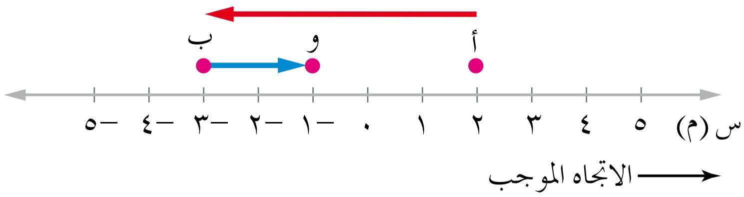
مثال (٢-٢)

يتحرك جسم في خط مستقيم مبتدئًا حركته من النقطة (أ) إلى النقطة (ب)، ثم يعود إلى النقطة (و)، كما في الشكل (٢-٥). مستفيدًا من المعلومات على الشكل جد ما يأتي:

١ الإزاحة التي يحققها الجسم عندما ينتقل من ب إلى و.

٢ الإزاحة الكلية للجسم.

٣ المسافة التي قطعها الجسم.



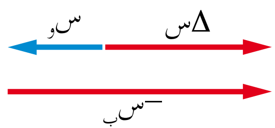
الشكل (٢-٥): مثال (٢-٢).

الحلّ:

١ لحساب الإزاحة نحدد موقعي الجسم الابتدائي والنهائي بالنسبة إلى نقطة إسناد معلومة، وبحسب الشكل (٢-٥) فإنه يمكن اختيار أي نقطة على الخط المستقيم لتمثل نقطة الإسناد، فإذا اخترنا نقطة الأصل نقطة إسناد، فإن:

$\Delta س = س_{و} - س_{ب}$

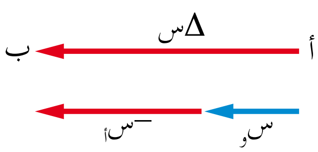
$= -١ - (-٣) = ٢$م، باتجاه اليمين، وكما تعلمت في درس طرح المتجهات من الفصل السابق، فإنه يمكن رسم متجه الإزاحة كما في الشكل (٢-٦)



الشكل (٢-٦): الإزاحة من ب إلى و.

٢ $\Delta س = س_{و} - س_{أ}$

$= -١ - ٢ = -٣$م، والإشارة السالبة تعني أن الإزاحة باتجاه اليسار، انظر الشكل (٢-٧).



الشكل (٢-٧): الإزاحة الكلية.

٣ المسافة (ف) = طول المسار الكلي الذي يسلكه الجسم

= ف (أ إلى ب) + ف (ب إلى و)

= ٥ + ٢ = ٧ م

لاحظ أن الإزاحة تعتمد على موقعي الجسم الابتدائي والنهائي، وبغض النظر عن المسار الذي يسلكه، فهي كمية متجهة، وهي تشير إلى مدى بعد الجسم عن موقعه الابتدائي، في حين أن المسافة تعتمد على طول المسار الفعلي للجسم، فهي كمية قياسية؛ لذا فإن المسافة تكون دائمًا موجبة (تذكر أن الإشارة الموجبة والسالبة تستخدم هنا للاتجاه فقط).

سؤال

إذا عاد الجسم إلى النقطة (أ) فكم تكون إزاحته الكلية؟

فكِّر: متى تتساوى المسافة مع مقدار الإزاحة؟

(٢-١-٣) السرعة

إن من أهم مظاهر وصف حركة جسم ما السرعة التي يتحرك بها، سواء أكان ذلك متعلقًا بالسرعة القياسية Speed أم السرعة المتجهة Velocity. وتشير **السرعة القياسية** إلى المسافة التي يقطعها الجسم في زمن معين، وبغض النظر عن اتجاه حركته، فهي الكمية التي تهتم بها قوانين السير، وتقيد فيها حركة المركبات على الطرقات عن طريق شواخص المرور، وهي الكمية التي يهتم بها الرياضيون في مسابقات الجري أو سباق السيارات أو ما شابهها، ففي هذه الحالات وغيرها، لا نهتم باتجاه السرعة، وإنما نكتفي بالمقدار فقط. وحيث إن حركة الأجسام تكون متغيرة مع الزمن فإننا نهتم بما يسمى **متوسط السرعة القياسية**، التي تعرف بأنها: طول المسار الكلي الذي يقطعه الجسم في أثناء حركته مقسومًا على الزمن الذي يحتاجه لقطع هذا المسار، أي أن:

$$\text{متوسط السرعة القياسية} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن الكلي}}$$

، وإذا رمزنا لمتوسط السرعة بالرمز $\bar{ع}$، فإن:

$$\bar{ع} = \frac{ف}{ز} \quad \text{.............} \quad (٢-٢)$$

سؤال

ما وحدة قياس السرعة في النظام العالمي للوحدات الذي عرفته في الصف التاسع؟

تكون السرعة ثابتة، إذا قطع الجسم مسافات متساوية في أزمنة متساوية، فعندما نقول: إن سيارة تتحرك بسرعة (٩٠ كم/ ساعة)، فهذا يعني أنها تقطع مسافة (٩٠ كم) كل ساعة (كم تقطع في عشر دقائق؟).

وعلى الجانب الآخر، يوجد حالات لا نكتفي فيها بمعرفة مقدار السرعة، بل يلزمنا معرفة اتجاهها، فلا يكفي مثلًا أن نقول: إن سرعة الرياح (٥٠ كم/ ساعة)، خاصة أن معرفة اتجاه حركة الرياح ضروري في الملاحة البحرية والجوية، ففي هذه الحالات نهتم بالسرعة المتجهة.

وكما هي السرعة القياسية، فإن السرعة المتجهة يمكن أن تكون ثابتة (المقدار والاتجاه)، أو متغيرة (المقدار أو الاتجاه أو كليهما معًا). ويعرف متوسط السرعة المتجهة بأنه: الإزاحة التي يحققها الجسم مقسومة على زمن حدوثها، أي أن:

متوسط السرعة المتجهة = $\frac{\text{الإزاحة}}{\text{زمن حدوثها}}$ وإذا رمزنا لمتوسط السرعة المتجهة بالرمز $\overleftarrow{\bar{ع}}$ ، فإن:

$$\overleftarrow{\bar{ع}} = \frac{\Delta \overleftarrow{س}}{ز} = \frac{س_٢ - س_١}{ز} \quad .... (٢-٣)$$

لاحظ أن اتجاه السرعة المتجهة يكون باتجاه الإزاحة، وحيث إننا ندرس الحركة هنا في بعد واحد، فإننا نكتفي بنظام الإشارات (موجب، سالب)، المتفق عليه لمتجهي الموقع والإزاحة، لتحديد اتجاه السرعة، من غير أن نضع إشارة المتجه على السرعة المتجهة أو الإزاحة.

سـؤال

متى تكون السرعة المتجهة موجبة ومتى تكون سالبة، بحسب نظام الإشارات الوارد ذكره آنفًا؟

مثال (٢-٣)

افرض أنك ذهبت من منزلك، لشراء بعض الحاجات من محل تجاري يقع إلى الشرق من منزلك، وعلى بعد ٣٠٠ م منه، وبعد أن قطعت نصف المسافة (١٥٠ م) تذكرت أنك لم تحضر نقودًا معك، فعدت أدراجك إلى المنزل لتحضر النقود، ثم تابعت مسيرك إلى المحل التجاري، وقد استغرقت منك الرحلة كاملة مدة عشر دقائق. احسب:

١ متوسط سرعتك القياسية.

٢ متوسط سرعتك المتجهة.

الحلّ:

لحساب السرعة القياسية، نحتاج إلى معرفة المسافة المقطوعة، بينما لحساب السرعة المتجهة نحتاج إلى معرفة الإزاحة.

١ $ف = ١٥٠ + ١٥٠ + ٣٠٠ = ٦٠٠$م

$ز = ١٠ \times ٦٠ = ٦٠٠$ ث

$\bar{ع} = \frac{ف}{ز} = \frac{٦٠٠}{٦٠٠} = ١$م/ث

٢ $\Delta \overleftarrow{س} = ٣٠٠$م ، باتجاه الشرق.

$\overleftarrow{\bar{ع}} = \frac{\Delta س}{ز} = \frac{٣٠٠}{٦٠٠} = ٠,٥$م/ث، باتجاه الشرق

سـؤال

احسب متوسط السرعة القياسية ومتوسط السرعة المتجهة (للرحلة كاملة) بعد العودة مباشرة إلى المنزل، إذا استغرقت رحلة العودة خمس دقائق.

فكِّر: متى تتساوى السرعة القياسية مع مقدار السرعة المتجهة؟

لاحظ أن متوسط السرعة لا يتضمن معلومات تفصيلية عن الحركة، مثل: متى تزداد السرعة أو تتناقص وأين، أو متى يتحرك الجسم بسرعة ثابتة أو يتوقف عن الحركة. يمكن وصف هذه التفاصيل باستخدام التمثيل البياني للحركة، والمعادلات الرياضية.

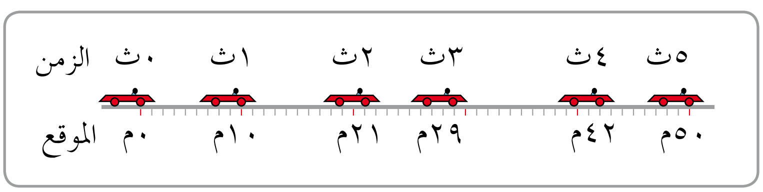
(٢-١-٤) التمثيل البياني للحركة في بعد واحد

أولاً: منحنى (الموقع– الزمن)

في هذا المنحنى يُحَدّد عدد من المواقع التي مر بها الجسم في أثناء حركته، بوصفها نقاطًا ممثلة للمواقع التي مر بها جميعها، وزمن مروره بكل من هذه المواقع، ومن نقطة بداية رصد حركته وحتى نقطة نهاية رصد الحركة، ثم نرسم العلاقة البيانية بين هذه المواقع التي توضع على محور الصادات، وزمن المرور بها على محور السينات، والأمثلة الآتية توضح ذلك:

مثال (٢-٤)

يظهر الشكل (٢–٨) رسمًا تخطيطيًّا لسيارة تتحرك على طريق أفقي، بحيث رصد زمن الوصول إلى المواقع المحددة كما هو موضح بالرسم. ارسم منحنى (الموقع– الزمن) لحركة السيارة.



الشكل (٢–٨): مثال (٢–٤).

الحلّ:

نرسم محورين، أحدهما للزمن (محور السينات) والآخر للموقع (محور الصادات)، ثم نتعامل مع القيم المثبتة على الرسم بوصفها إحداثيات سينية وصادية (كما مر معك في الرياضيات)، وبعد تحديد نقاط الإحداثيات في المستوى الديكارتي، نرسم أقرب خط مستقيم يمر في هذه النقاط. والشكل (٢–٩) يوضح ذلك.

لكن ماذا يمكن أن نقرأ من هذا الشكل؟

- يمكن معرفة نقطة بداية رصد الحركة (عندما ز = صفر) بالنسبة إلى نقطة الإسناد، فيظهر من الشكل (٢–٩) أن رصد حركة السيارة بدأ من نقطة الإسناد (نقطة الأصل).

- يمكن معرفة موقع السيارة عند أي لحظة زمنية (ضمن فترة رصد الحركة)، فيظهر من الشكل (٢– ٩) أن السيارة على يمين نقطة الإسناد وعلى بعد (١٥م) منها بعد (١,٥) ثانية من رصد الحركة.

كما يمكن معرفة الزمن الذي تكون فيه السيارة عند أي موقع من المواقع التي مرت بها. (متى كانت السيارة على بعد (٢٥) م من نقطة الإسناد؟)

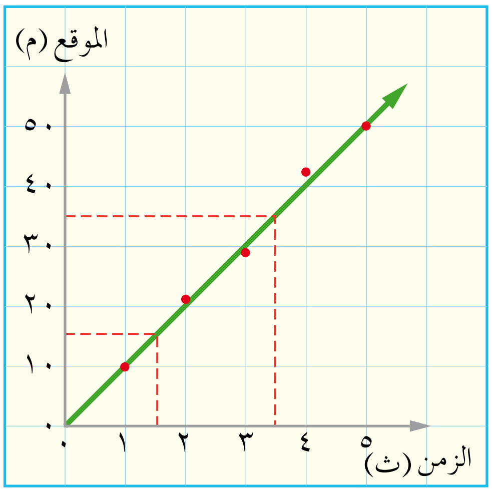
- المنحنى الناتج هو خط مستقيم، أي أن ميله ثابت، وكما تعلمت في الرياضيات، فإن:

$$\text{ميل الخط المستقيم} = \frac{\text{فرق الصادات}}{\text{فرق السينات}} = \frac{\Delta \text{س}}{\Delta \text{ز}}$$

وبحسب المعادلة (٢–٣)، فإن هذا المقدار يمثل مقدار متوسط السرعة المتجهة، وحيث إن هذا الميل ثابت، فإن السرعة المتجهة للسيارة ثابتة المقدار، أي أن:

مقدار السرعة المتجهة للسيارة = ميل الخط المستقيم

$$= \frac{٣٥-١٥}{٣,٥-١,٥} = ١٠ \text{م/ث}$$



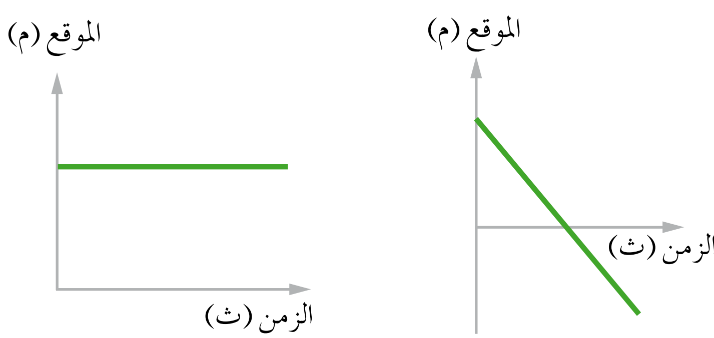
الشكل (٢– ٩): منحنى (الموقع–الزمن).

(يمكن أخذ أي قيمتين على الخط المستقيم لحساب الميل، انظر الشكل (٢– ٩))، وحيث إن ميل المنحنى (الخط المستقيم) موجب ، فإن السرعة تكون بالاتجاه الموجب، أي باتجاه السينات الموجب. وهذا يعنى أن الميل السالب للمنحنى يشير إلى أن سرعة الجسم وإزاحته تكونان بالاتجاه السالب، كما أن زيادة الميل، سواء أكان موجبًا أم سالبًا، تشير إلى سرعة أكبر (لماذا؟).

فكِّر: أين تكون السيارة بعد ٣٠ ثانية من انطلاقها لو استمرت بحركتها بهذا النمط؟

سـؤال

على ماذا يدل كل من منحنيي (الموقع – الزمن) الموضحين في الشكل (٢– ١٠)؟



الشكل (٢– ١٠): سؤال.

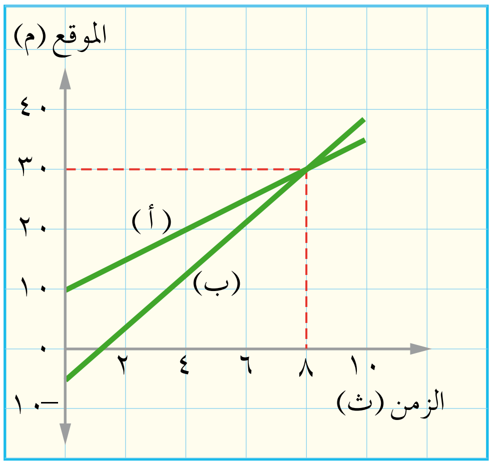
مثال (٢-٥)

رُصِدت حركة عداءينِ (أ، ب) في سباق جري، وفي مواقع مختلفة من مضمار السباق، ثم رُسِم منحنيي (الموقع– الزمن) لهذين العداءين، فكانت كما يظهر في الشكل (٢– ١١). حدد:

١ موقع كل من العداءين بالنسبة إلى نقطة الإسناد لحظة بداية رصد الحركة (ز = صفر).

٢ الزمن الذي كان فيه العداءينِ عند الموقع نفسه.

٣ أي العداءينِ كانت سرعته أكبر.



الشكل (٢– ١١): مثال (٢–٥).

الحلّ:

١ $س_{أ}$ = +١٠م (الموقع الابتدائي للعداء أ).

$س_{ب}$ = –٥م (الموقع الابتدائي للعداء ب).

٢ ز = ٨ ث، أي أن العدائين التقيا بعد (٨) ثوانٍ من بدء رصد الحركة، وعلى بعد (٣٠م) من نقطة الإسناد لجهة اليمين.

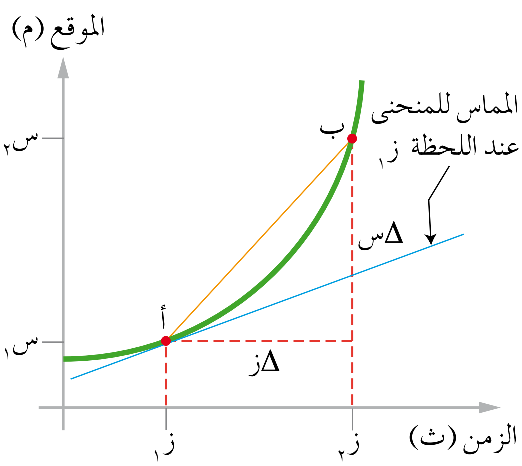
٣ سرعة العداء (ب) أكبر، لأن ميل منحنى (الموقع– الزمن) له أكبر.

سـؤال

احسب سرعة كل من العداءينِ (أ) و (ب).

في المثالين السابقين كانت السرعة ثابتة المقدار والاتجاه، ماذا لو كانت السرعة غير ثابتة وأردنا معرفة السرعة عند موقع معين أو زمن معين؟ في هذه الحالة نتعامل مع ما يسمى بالسرعة اللحظية، التي تساوي ميل المماس لمنحنى (الموقع– الزمن) عند تلك اللحظة.

ففي الشكل (٢–١٢)، الذي يمثل منحنى (الموقع– الزمن) لحركة جسم على خط مستقيم تتغير سرعته مع الزمن يكون متوسط السرعة في الفترة الزمنية ($ز_{٢}$ – $ز_{١}$): هو ميل الخط المستقيم أ ب . ومتوسط السرعة = $\frac{\Delta س}{\Delta ز}$ ، وعندما تقترب Δ ز من الصفر، فإن النقطة (ب) تقترب من النقطة (أ)، إلى أن ينطبق الخط (أ ب) على مماس المنحنى عند النقطة (أ)،



الشكل (٢–١٢): السرعة اللحظية.

وبذلك نحصل على سرعة الجسم اللحظية عند النقطة (أ) (في اللحظة الزمنية ($ز_١$)).

فالسرعة اللحظية عند نقطة = ميل المماس لمنحنى (الموقع– الزمن) عند تلك النقطة. **ويشار هنا إلى أنه حيثما وردت كلمة سرعة فإنه يقصد بها السرعة المتجهة اللحظية.**

سؤال

أيهما أكبر $ع_{أ}$ أم $ع_{ب}$ ؟ ولماذا؟

فكّر: يظهر من الشكل (٢–١٢) وجود فرق بين متوسط السرعة والسرعة اللحظية. فهل يمكن أن يتساويا في فترة زمنية ضمن ظروف معينة للحركة؟ وضح إجابتك.

مثال (٢-٦)

يتحرك جسم على طريق أفقي، بحيث يتغير موقعه مع الزمن كما هو موضح في الشكل (٢– ١٣).

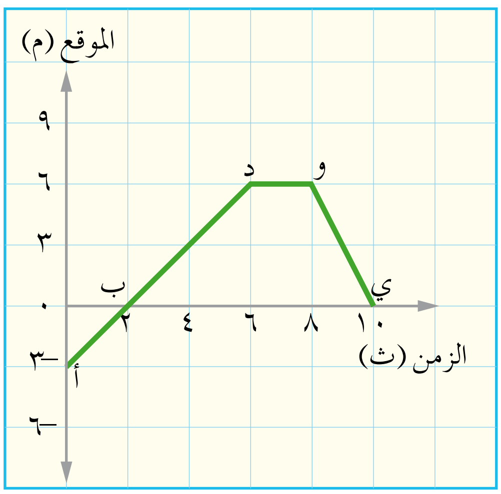
أجب عما يأتي:

١ ما زمن الرحلة؟

٢ صف حركة الجسم خلال الرحلة.

٣ احسب متوسط السرعة القياسية للجسم خلال الرحلة.

٤ احسب متوسط السرعة المتجهة خلال الرحلة.



الشكل (٢– ١٣): مثال (٢–٦).

الحلّ:

١ زمن الرحلة = ١٠ ثوانٍ.

٢ بدأ رصد الحركة عندما كان الجسم على يسار نقطة الإسناد، وعلى بعد (٣م) منها، وكان يتحرك بسرعة ثابتة نحو اليمين، وبعد (٦) ثوانٍ توقف تمامًا عن الحركة مدة ثانيتين، ثم أخذ بالرجوع إلى الخلف (نحو اليسار) بسرعة ثابتة.

٣ لحساب متوسط السرعة القياسية، نحسب أولاً المسافة التي قطعها الجسم

$ف_{الكلية} = ف_{أ ب} + ف_{ب د} + ف_{د و} + ف_{و ي}$

= ٣ + ٦ + ٠ + ٦ = ١٥م ، لاحظ أن الجسم توقف عن الحركة بين النقطتين (د، و)

$$\bar{ع} = \frac{ف}{ز} = \frac{١٥}{١٠} = ١,٥ م/ث$$

٤ لحساب متوسط السرعة المتجهة، نحدد الموقع النهائي ($س_ي$)، والموقع الابتدائي ($س_أ$)،

Δس = $س_ي$ − $س_أ$

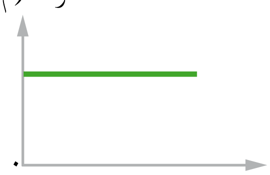
= ٠ − (−٣) = ٣م، أي أن الإزاحة باتجاه اليمين (السينات الموجب)

$\bar{ع} = \frac{\Delta س}{ز} = \frac{٣}{١٠} = ٠,٣$ م/ ث، باتجاه اليمين.

سؤال

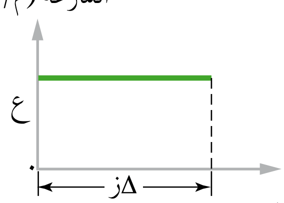
احسب متوسط السرعة القياسية ومتوسط السرعة المتجهة بين النقطتين (أ، د). ماذا تلاحظ؟

ثانيًا: منحنى (السرعة – الزمن)



الشكل (٢–١٤/ أ).

لا يختلف رسم هذا المنحنى عن منحنى (الموقع– الزمن)، إلا أن قيم السرعة توضع على محور الصادات بدلًا من قيم الموقع. فالمنحنى في الشكل (٢–١٤/ أ) يدل على أن سرعة الجسم ثابتة؛ لأنها لم تتغير مع مرور الزمن.

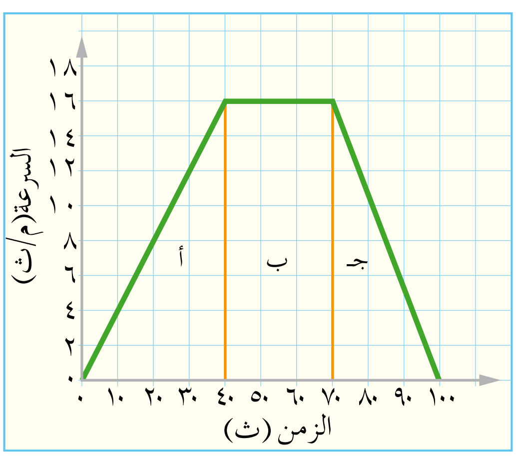


الشكل (٢–١٤/ ب).

وإذا نظرنا إلى الشكل (٢–١٤/ ب)، نلاحظ مستطيلًا أبعاده (ع، Δ ز)، ومساحته تساوي ع × Δ ز، ومن المعادلة (٢–٣) نجد أن هذا المقدار يساوي مقدار الإزاحة (Δس)، وهذا يعني أن المساحة المحصورة بين منحنى (السرعة– الزمن) ومحور الزمن تمثل الإزاحة التي يقطعها الجسم في الفترة الزمنية Δ ز.

مثال (٢–٧)

يوضح الشكل (٢–١٥) كيفية تغير سرعة سيارة بين إشارتين ضوئيتين متتاليتين.



الشكل (٢–١٥): مثال (٢–٧).

١ صف حركة السيارة.

٢ احسب الإزاحة التي قطعتها السيارة بين الإشارتين.

الحلّ:

١ انطلقت السيارة من السكون (سرعة = صفر)، وأخذت سرعتها تزداد بانتظام مع الزمن إلى أن وصلت سرعتها (١٦م/ ث) بعد مرور (٤٠ ث) من انطلاقها، وثبتت سرعتها عند هذه القيمة مدة (٣٠ث)، ثم أخذت

سرعتها تتناقص بانتظام مع الزمن مدة (٣٠ث) إلى أن توقفت تمامًا عن الحركة بعد مرور (١٠٠ ث) من بدء انطلاقها.

٢ لحساب الإزاحة التي قطعتها السيارة، نحسب المساحة الكلية أسفل المنحنى.

المساحة الكلية = مساحة المنطقة (أ) + مساحة المنطقة (ب) + مساحة المنطقة (جـ)

$$= \frac{١}{٢} \times ٤٠ \times ١٦ + (٧٠ - ٤٠) \times ١٦ + \frac{١}{٢} \times (١٠٠ - ٧٠) \times ١٦$$

$$= ٣٢٠ + ٤٨٠ + ٢٤٠ = ١٠٤٠ \text{م}.$$

إذن، الإزاحة = ١٠٤٠ م، نحو اليمين.

سـؤال

قارن مقدار الإزاحة بالمسافة بين الإشارتين. ماذا تلاحظ؟ ثم احسب السرعة القياسية.

(٢-١-٥) التسارع

عندما تتغير سرعة جسم مع الزمن كما في المثال الأخير، فإننا نقول إن الجسم يتسارع، فمتوسط التسارع هو: التغير في السرعة مقسومًا على التغير في الزمن، وإذا رمزنا لمتوسط التسارع بالرمز ($\bar{ت}$)، فإن:

$$\bar{ت} = \frac{\Delta ع}{\Delta ز} = \frac{ع_٢ - ع_١}{\Delta ز} \quad \text{.........} \quad (٢-٤)$$

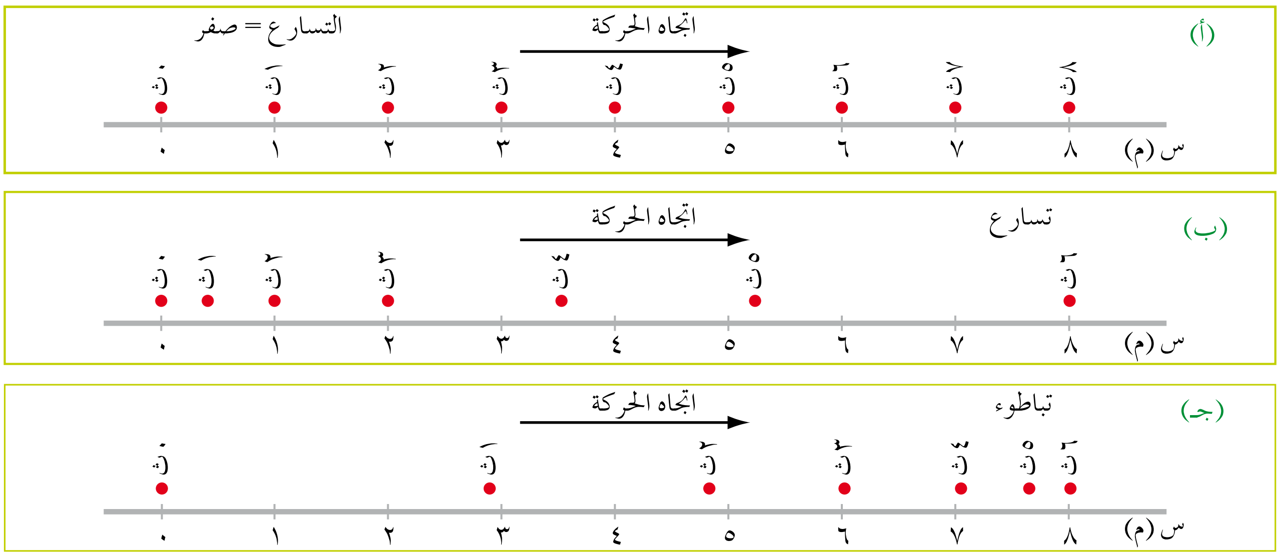
حيث: $ع_١$: السرعة الابتدائية، $ع_٢$: السرعة النهائية، $\Delta ز$: الفترة الزمنية التي حدث فيها التغير في السرعة.

وسندرس في هذا الكتاب الحركة بتسارع ثابت فقط؛ لذا يكون متوسط التسارع في أي فترة زمنية مساويًا للتسارع اللحظي عند أي لحظة ضمن تلك الفترة، وفي هذه الحالة يكون معدل السرعة ثابت مع الزمن، أي أن: $\bar{ت} = ت = \frac{\Delta ع}{\Delta ز} = \frac{ع_٢ - ع_١}{ز_٢ - ز_١}$

وحيث إن السرعة كمية متجهة، فإن التسارع أيضًا كمية متجهة، واتجاهه يكون باتجاه التغير في السرعة (انظر المعادلة السابقة)، ويقاس التسارع بوحدة (م/ث^٢).

يظهر في الشكل (٢-١٦) ثلاثة أوضاع مختلفة (أ، ب، جـ) لحركة جسم، في الوضع (أ) يحقق الجسم إزاحات متساوية في أزمنة متساويةٍ، وهذا يعني أن الجسم يتحرك بسرعة ثابتة؛ لذا فإنه وحسب المعادلة (٢-٤) يكون تسارعه صفرًا. وفي الوضع (ب) يلاحظ أن الإزاحات التي

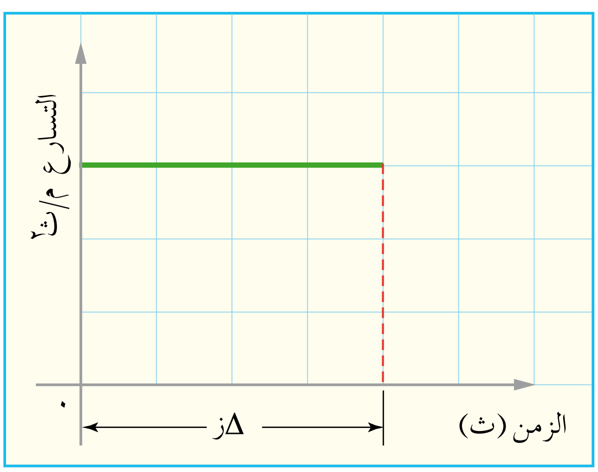
يحققها الجسم تزداد مع الزمن، ففي الثانية الأولى مثلاً قطع أقل من نصف متر، في حين أنه قطع في الثانية الأخيرة (٣م) تقريبًا، وهذا يعني أن سرعته في تزايد مستمر، وبالتالي فإنه وضمن أي فترة زمنية تكون ($ع_{٢}$) أكبر من ($ع_{١}$)؛ لذا وحسب المعادلة (٢-٤) يكون تسارعه موجبًا (باتجاه الحركة)، ونقول في هذه الحالة إن الجسم متسارع.



الشكل (٢-١٦): الحركة بأوضاع مختلفة.

أما في الوضع (جـ)، فإن الإزاحات التي يحققها الجسم تتناقص مع الزمن، وهذا يعني أن سرعته في تناقص مستمر، وعليه فإنه وضمن أي فترة زمنية تكون ($ع_{٢}$) أقل من ($ع_{١}$)؛ لذا يكون التسارع عكس اتجاه الحركة، ونقول في هذه الحالة إن الجسم متباطئ.

ويمكن تمثيل التسارع بدلالة الزمن بيانيًّا كما في الشكل (٢-١٧)، حيث يظهر من الشكل أن مقدار التسارع لا يتغير مع مرور الزمن.



الشكل (٢-١٧): منحنى (التسارع-الزمن).

سؤال

ماذا تمثل المساحة بين منحنى (التسارع- الزمن) ومحور الزمن في الشكل السابق؟

مثال (٢-٨)

انطلق جسم من السكون بتسارع ثابت مقداره ٤ م/ ث٢، وفي خط مستقيم. احسب سرعته بعد مرور خمس ثوانٍ على انطلاقه.

الحلّ:

$ت = \frac{ع_٢ - ع_١}{\Delta ز}$ ، وبما أن الجسم بدأ حركته من السكون، فإن $ع_١$ = صفر،

$ع_٢ = ت \; \Delta ز = ٤ \times ٥ = ٢٠$ م/ ث

لكن ماذا يعني أن جسمًا يتحرك بتسارع مقداره ٤ م/ ث٢؟ من المعادلة (٢-٤) يتضح أن ذلك يعني أن سرعة الجسم تزداد بمقدار ٤ م/ ث في الثانية الواحدة.

سـؤال

ماذا يعني أن جسمًا يتحرك نحو اليسار بتسارع (- ٤ م/ ث٢)؟

وهذا يعني أن السرعة تتغير بمعدل زمني ثابت، ولذلك يمكن حساب متوسط السرعة في هذه الحالة على أي فترة زمنية من العلاقة الآتية:

$$\bar{ع} = \frac{ع_١ + ع_٢}{٢} \quad (٢-٥)$$

ومن المعادلة (٢-٣)، والمعادلة (٢-٥) يمكن إعادة تعريف الإزاحة على الصورة:

$$\Delta س = \bar{ع} \times ز = \frac{ع_١ + ع_٢}{٢} \times ز \quad (٢-٦)$$

وتمتاز المعادلة الأخيرة في أنها تربط بين متغيرات الحركة الثلاثة: الإزاحة، والسرعة، والزمن. وإذا كان الجسم يتحرك بسرعة ثابتة فإن: $ع_١ = ع_٢ = ع$ ، وعندها تصبح المعادلة على الصورة:

$$\Delta س = ع \times ز \quad (٢-٧)$$

وقد عرفت هذه المعادلة في صفوف سابقة بما يعرف بقانون السرعة الثابتة.

مثال (٢-٩)

إذا تغيرت سرعة جسم يتحرك نحو اليمين في خط مستقيم بمعدل ثابت من ٨ م/ ث إلى ٤ م/ ث خلال ثانيتين. فاحسب:

١ تسارع الجسم

٢ متوسط سرعته

٣ إزاحته في فترة التغير

الحلّ:

١ $ت = \frac{ع_٢ - ع_١}{\Delta ز} = \frac{٤ - ٨}{٢} = -٢$ م/ ث^٢، والإشارة السالبة تعني أن الجسم في حالة تباطؤ

٢ $\bar{ع} = \frac{ع_١ + ع_٢}{٢} = \frac{٤ + ٨}{٢} = ٦$ م/ ث

٣ $\Delta س = \bar{ع} \times ز = ٦ \times ٢ = ١٢$ م

(٢-١-٦) معادلات الحركة بتسارع ثابت

تعلمنا وصف الحركة بطرائق عدة، وهذه الطرائق في الغالب تزودنا بنظرة شمولية للحركة، وحتى يكتمل وصف الحركة، فلا بد من التعرض للطرائق الرياضية.

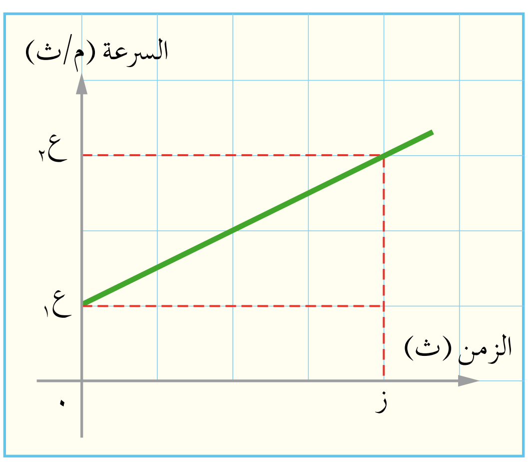
يمكن إعادة كتابة المعادلة (٢- ٤) على الصورة:

$ع_٢ - ع_١ = ت \Delta ز$ ، وحيث إن الزمن يقاس ابتداءً من الصفر فإن $ز_١ =$ صفر، $\Delta ز = ز_٢ = ز$،

لذلك تصبح المعادلة على الصورة:

$ع_٢ = ع_١ + ت ز$ .... (٢- ٨)

ومن هذه المعادلة يمكن حساب سرعة جسم عند أي لحظة زمنية إذا عرفت سرعته الابتدائية $ع_١$ وتسارعه ت، وهي تشير إلى أن العلاقة بين السرعة والزمن علاقة خطية (من الدرجة الأولى)؛ لذا يمكن تمثيلها بيانيًّا كما في الشكل (٢-١٨).



الشكل (٢- ١٨): الحركة بتسارع ثابت.

وميل الخط المستقيم في الشكل يساوي التسارع (لماذا؟)، أما المساحة أسفل الخط، فهي تمثل الإزاحة (كما تعلمت سابقًا)، وحسب الشكل فإن:

$\Delta س = ع_١ ز + \frac{١}{٢} \times ز \times (ع_٢ - ع_١)$،

ومن المعادلة (٢ - ٨)، فإن $(ع_٢ - ع_١) = ت ز$ ؛

لذا تصبح المعادلة الأخيرة على الصورة:

$\Delta س = ع_١ ز + \frac{١}{٢} ت ز^٢$ .... (٢- ٩)

وهذه المعادلة تحدد العلاقة بين الإزاحة والزمن (ما نوع العلاقة بينهما؟)، فعن طريقها يمكن حساب الإزاحة، وتحديد الموقع عند أي لحظة زمنية (تذكر أن: Δ س = $س_٢$ − $س_١$)، ومن المعادلتين (٢− ٦) و (٢− ٨) يمكن تحديد العلاقة بين الإزاحة والسرعة، وذلك بتعويض (ز) من المعادلة (٢− ٨) في المعادلة (٢− ٦) للتوصل إلى المعادلة الآتية:

$ع_٢^٢ = ع_١^٢ + ٢ ت \Delta س$ .... (٢−١٠)

سـؤال

استخدم المعادلتين (٢− ٦) و (٢− ٨) في التوصل إلى المعادلة (٢− ١٠).

من هذه المعادلة يمكن حساب السرعة عند أي موقع يمر فيه الجسم في أثناء حركته. وبالمجمل، فإن المعادلات الثلاث الأخيرة، بالإضافة إلى المعادلة (٢−٦) هي معادلات الحركة بتسارع ثابت، والتي يمكن استخدامها لحل أي مسألة تتعلق بحركة جسم على خط مستقيم بتسارع ثابت المقدار والاتجاه، سواء أكان في الاتجاه الأفقي، أم في الاتجاه الرأسي. وفي ما يأتي ملخص لهذه المعادلات:

١. $ع_٢ = ع_١ + ت ز$ ، المعادلة الأولى
٢. $\Delta س = \frac{ع_١ + ع_٢}{٢} \times ز$ ، المعادلة الثانية
٣. $\Delta س = ع_١ ز + \frac{١}{٢} ت ز^٢$ ، المعادلة الثالثة
٤. $ع_٢^٢ = ع_١^٢ + ٢ ت \Delta س$ ، المعادلة الرابعة

إن اختيار أي من هذه المعادلات لاستخدامها في حل مسألة ما يعتمد على ما هو معطى في هذه المسألة وما هو مطلوب، فإذا علمت السرعة الابتدائية ($ع_١$) والتسارع (ت) مثلاً (وهي الثوابت المشتركة في المعادلات ١، ٣، ٤)، فإنه يمكن استخدام المعادلة الأولى لحساب السرعة بعد فترة زمنية معينة، والمعادلة الثالثة لحساب الإزاحة. وعند استخدام هذه المعادلات في حل المسائل، فإنه يجب الانتباه إلى ما يأتي:

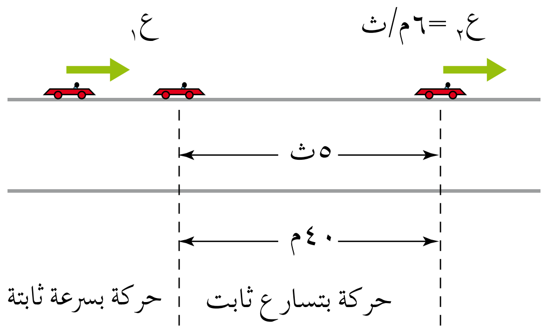
١. إذا انطلق الجسم من السكون فإن $ع_١$ = صفرًا
٢. إذا توقف الجسم المتحرك عن الحركة بعد فترة، فإن $ع_٢$ = صفرًا
٣. إذا تحرك الجسم بسرعة ثابتة ($ع_١ = ع_٢ = ع$) فإن ت = صفرًا، لذا تصبح كلا المعادلتين (٢، ٣) على الصورة: Δ س = ع ز ، وهي المعادلة (٢− ٧) نفسها.

مثال (٢-١٠)

تتحرك سيارة بسرعة ثابتة باتجاه الشرق، ضغط السائق على الكوابح مدة (٥) ثوانٍ، فتناقصت سرعة السيارة بصورة منتظمةٍ إلى (٦) م/ ث بعد أن قطعت مسافة (٤٠ م). جد ما يأتي:

١ السرعة الابتدائية التي كانت تتحرك بها السيارة.

٢ تسارع السيارة بعد أن ضغط السائق على الكوابح.



الشكل (٢- ١٩): مثال (٢-١٠).

الحلّ:

في هذا المثال، تتحرك السيارة بسرعة ثابتة ثم بتسارع ثابت.

١ من المعطيات كما في الشكل (٢- ١٩)، يتضح أن المعادلة المناسبة لحساب $ع_١$ هي معادلة (٢):

$$\Delta س = \frac{ع_١ + ع_٢}{٢} \times ز$$

$$٤٠ = \frac{ع_١ + ٦}{٢} \times ٥ \quad، \quad ع_١ = ١٠ \text{ م/ ث}$$

٢ يمكن استخدام المعادلات (١ أو ٣ أو ٤) لحساب التسارع، ومن معادلة (١):

$$ع_٢ = ع_١ + ت ز$$

$٦ = ١٠ + ت \times ٥$ ، $ت = -٠,٨$ م/ ث^٢ ، والإشارة السالبة تشير إلى أن اتجاه التسارع باتجاه السينات السالب أي أنه معاكس لاتجاه الحركة.

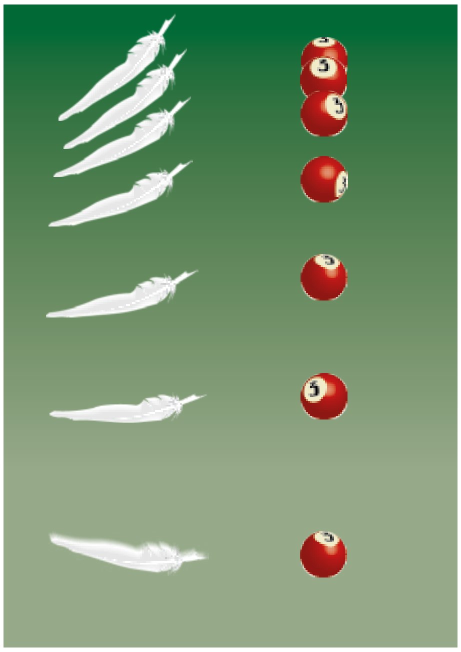
سـؤال

احسب التسارع باستخدام كل من المعادلتين (٣، ٤)، ولاحظ أنك ستحصل على النتيجة نفسها في الحالتين.

(٢-١-٧) السقوط الحر

من المعروف أن أي جسم يتحرك بالقرب من سطح الأرض تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية فقط، فإنه سيسقط في النهاية على سطح الأرض، وهذا ما يعرف بالسقوط الحر (Free Fall)، سواء أكانت حركته الابتدائية للأعلى أم للأسفل. وقد اهتم بعض علماء المسلمين بحركة الأجسام بوجه عام، ومنهم من وصف حركة الأجسام في مجال الجاذبية الأرضية، فقد أشار كل من الهمداني وأبو الريحان البيروني إلى أن الأثقال تتجه إلى أسفل.

أما هبــة الله بن ملــكا البغـــدادي (١٠٨٧–١١٦٥) م فقـد ذكــر في كتابــه (المعتبر في الحكمــة): "لو تحركت الأجسام في الخلاء لتساوت حركة الثقيل والخفيف والكبير والصـغير"، وهو بذلـك قد عارضـ الفيلسـوف اليوناني أرسـطو (٣٨٤–٣٢٢) ق.م، الذي أشـار إلى أن الجسـم الثقيل يسقط بصورة أسرع من الجسم الخفيف، بينما وافقه في ذلك العالم الإيطالي غاليليو (١٥٦٤–١٦٤٢) م، الذي توصل بالتجارب التي قـام بـها إلى أن الأجسام جميعها التي تسقط من الارتفاع نفســه تصل إلى الأرض بالوقت نفسه، وبغض النظر عن كتلها، انظر الشكل (٢– ٢٠).



الشكل (٢–٢٠): السقوط الحر.

والأجسام جميعها التي تتحرك بالقرب من سطح الأرض تكتسب التسارع نفسه (بإهمال مقاومة الهواء)، وهو ما يعرف بتسارع السقوط الحر، والذي يرمز له بالرمز (جـ) وقيمته ثابتة بالقرب من سطح الأرض، وتساوي (٩,٨م/ ث^{٢}) تقريبًا واتجاهه لأسفل دائمًا. وحيث إن تسارع السقوط الحر ثابت المقدار والاتجاه، سنستخدم معادلات الحركة السابقة بتسارع ثابت، مع وضع (جـ) بدل (ت) و (Δص) بـدل (Δس)، على اعتبار أن الحركة ستكون موازية لمحور الصادات. وبحسب نظام الإشارات المتبع في هذا الكتاب، فإن كلاًّ من الإزاحة (Δص) والسرعة (ع) تكون موجبة إذا كانت باتجاه الصادات الموجب (للأعلى)، وسالبة إذا كانت باتجاه الصادات السالب (للأسفل)، أما (جـ) فهي دائمًا إلى أسفل، لذا فهي دائمًا سالبة بغض النظر عن مكان نقطة الإسناد أو اتجاه الحركة. وفي ما يأتي الصور الرياضية لمعادلات الحركة السابقة في حالة السقوط الحر:

١ $ع_{٢} = ع_{١} + جـ\,ز$

٢ $Δص = \frac{ع_{١} + ع_{٢}}{٢} \times ز$

٣ $Δص = ع_{١}\,ز + \frac{١}{٢}\,جـ\,ز^{٢}$

٤ $ع_{٢}^{٢} = ع_{١}^{٢} + ٢\,جـ\,Δص$

حيث جـ = – ٩,٨ م/ث^{٢}

مثال (٢-١١)

إذا سقط جسم من السكون من ارتفاع (٥) م عن سطح الأرض سقوطًا حرًّا. فاحسب:

١. سرعه الجسم عندما أصبح على ارتفاع (٢) م.
٢. سرعة الجسم عند وصوله إلى سطح الأرض.
٣. الزمن المستغرق لوصول الجسم إلى سطح الأرض.

الحلّ:

١. من المعادلة (٤)، وعلى فرض نقطة الإسناد عند سطح الأرض، انظر الشكل (٢-٢١).

$$\text{ع}_{٢}^{٢} = \text{ع}_{١}^{٢} + ٢\,\text{جـ}\,\Delta\text{ص} \quad ، \quad \Delta\text{ص} = \text{ص}_{٢} - \text{ص}_{١}$$

$$= ٠ + ٢ \times (-٩{,}٨) \times (٢ - ٥) = ٥٨{,}٨$$

$\text{ع}_{٢} = -٧{,}٦٧$ م/ث، والإشارة السالبة تدل على أن اتجاه السرعة إلى أسفل.

٢.
$$\text{ع}_{٣}^{٢} = \text{ع}_{١}^{٢} + ٢\,\text{جـ}\,\Delta\text{ص}$$

$$\Delta\text{ص} = \text{ص}_{٣} - \text{ص}_{١}$$

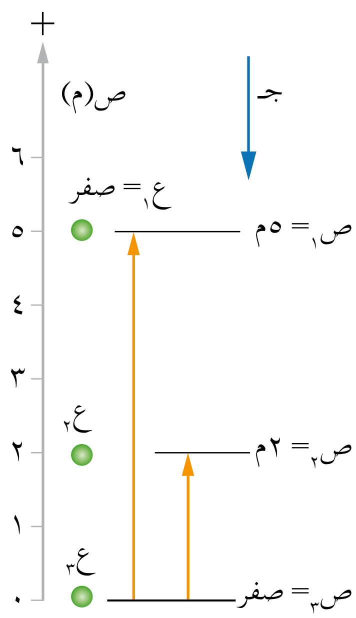
$$\text{ع}_{٣}^{٢} = ٠ + ٢ \times (-٩{,}٨) \times (٠ - ٥) = ٩٨$$

$\text{ع}_{٣} = -٩{,}٩$ م/ث.

٣.
$$\Delta\text{ص} = \text{ع}_{١}\,\text{ز} + \frac{١}{٢}\,\text{جـ}\,\text{ز}^{٢}$$

$$(٠ - ٥) = ٠ \times \text{ز} + \frac{١}{٢} \times (-٩{,}٨) \times \text{ز}^{٢}$$

$\text{ز}^{٢} = ١{,}٠٢$ ، ز = ١,٠١ ث.



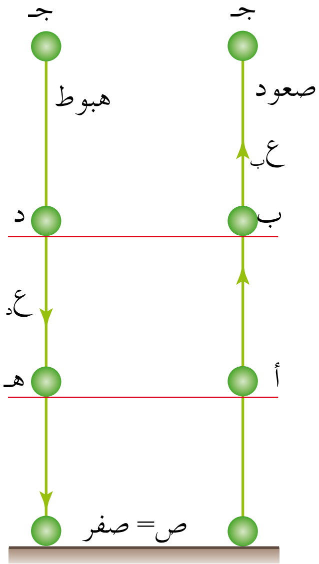
الشكل (٢-٢١): مثال (٢-١١).

مثال (٢-١٢)

قذف جسم من سطح الأرض رأسيًّا إلى أعلى بسرعة ابتدائية مقدارها (١٥) م/ ث. احسب:

١. أقصى ارتفاع يصل إليه الجسم.
٢. زمن وصوله إلى أقصى ارتفاع.
٣. سرعته عند عودته إلى سطح الأرض.

❹ الزمن الذي استغرقه الجسم ليعود إلى سطح الأرض.



الشكل (٢-٢٢): مثال (٢-١٢).

الحلّ:

❶ يصل الجسم إلى أقصى ارتفاع عندما تصبح سرعته صفرًا، أي $\text{ع}_{٢}$ = صفر

$$\text{ع}_{٢}^{٢} = \text{ع}_{١}^{٢} + ٢\,\text{جـ}\,\Delta\,\text{ص}$$

$$٠ = ٢٢٥ + ٢ \times (-٩{,}٨) \times \Delta\,\text{ص}$$

$$\Delta\text{ص} = ١١{,}٤٨\,\text{م}$$

❷ $$\text{ع}_{٢} = \text{ع}_{١} + \text{جـ}\,\text{ز}$$

$$٠ = ١٥ + (-٩{,}٨)\,\text{ز} \longrightarrow \text{ز} = ١{,}٥٣\ \text{ث}$$

❸ عندما يعود الجسم إلى سطح الأرض تكون إزاحته صفرًا.

$\text{ع}_{٢}^{٢} = \text{ع}_{١}^{٢} + ٢\,\text{جـ}\,\Delta\,\text{ص}$ ، وبما أن Δ ص = صفرًا، فإن: $\text{ع}_{٢} = \text{ع}_{١}$ ، إلا أنهما متعاكستان في الاتجاه (لماذا؟)، أي أن $\text{ع}_{٢}$ = −١٥م/ ث، وهذا يعني أن سرعة الصعود من نقطة ما تساوي في المقدار سرعة الهبوط إلى النقطة نفسها. ففي الشكل (٢-٢٢)، يتضح أن $\text{ع}_{\text{ب}} = -\text{ع}_{\text{د}}$، $\text{ع}_{\text{أ}} = -\text{ع}_{\text{هـ}}$.

❹ $$\Delta\text{ص} = \text{ع}_{١}\,\text{ز} + \frac{١}{٢}\,\text{جـ}\,\text{ز}^{٢}$$

$$٠ = ١٥ \times \text{ز} + \frac{١}{٢} \times (-٩{,}٨)\,\text{ز}^{٢}$$

$$\text{ز} = ٣{,}٠٦\ \text{ث}$$

لاحظ أن هذا الزمن هو مثلي زمن الصعود المحسوب في (٢)، وهذا يعني أن زمن الصعود يساوي زمن الهبوط إلى النقطة نفسها، فالزمن الذي يلزم الجسم للانتقال من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) في الشكل (٢-٢٢) مثلاً، يساوي الزمن الذي يلزمه للانتقال من النقطة (د) إلى النقطة (هـ).

مثال (٢-١٣)

إذا قذف عامل بناء طوبة رأسيًّا إلى أسفل عن سطح بناية ارتفاعها (٢٠م) عن سطح الأرض بسرعة ابتدائية مقدارها (٤م/ث). فاحسب:

❶ سرعة وصول الطوبة إلى سطح الأرض.

❷ الزمن المستغرق لوصول الطوبة إلى سطح الأرض.

الحلّ:

السرعة الابتدائية = $ع_١$ = − ٤م/ث لأنَّ اتجاه الحركة إلى أسفل، $ع_٢$: هي سرعة الجسم عندما يصل الأرض.

١ $ع_٢^٢ = ع_١^٢ + ٢ جـ \Delta ص$

$= ٤^٢ + ٢ \times (-٩,٨) \times (-٢٠) = ٤٠٨$

$ع_٢ = -٢٠,٢$م/ث

٢ $ع_٢ = ع_١ + جـ ز$

$(-٢٠,٢) = -٤ + (-٩,٨)$ ز

ز = ١,٦٥ ث

سؤال

هل يعد سقوط الطوبة في المثال الأخير سقوطًا حرًّا؟ وضح إجابتك.

توسع

تطبق معادلات السقوط الحر في غياب قوى الاحتكاك، ولحركات الأجسام بالقرب من سطح الأرض فقط، وهي معادلات عامة يمكن تطبيقها تحت تأثير قوة جاذبية أي كوكب، فمثلاً يبلغ تسارع السقوط الحر على سطح القمر سدس قيمته على سطح الأرض تقريبًا.

ابحث في قيم تسارع السقوط الحر لكواكب المجموعة الشمسية وعلاقتها بتسارع السقوط الحر على سطح الأرض، ثم تخيل أنك تقف على سطح كل من هذه الكواكب، واحسب أقصى ارتفاع يمكن أن تصله في كل مرّة تقفز فيها قفزًا حرًّا، إذا كان أقصى ارتفاع يمكن أن تصله على سطح الأرض مترًا واحدًا.

مراجعة (٢-١)

١ ما المقصود بكل من: الموقع، السقوط الحر؟

٢ ما الفرق بين: (المسافة والإزاحة) و (السرعة القياسية والسرعة المتجهة)؟ وهل يمكن أن نُعدّ أن المسافة هي مقدار الإزاحة، أو أن السرعة القياسية هي مقدار السرعة المتجهة؟ وضح إجابتك.

٣ أعط مثالاً عمليًّا لكل من:

- جسم سرعته موجبة وتسارعه سالب.
- جسم سرعته سالبة وتسارعه موجب.
- جسم سرعته سالبة وتسارعه صفر.

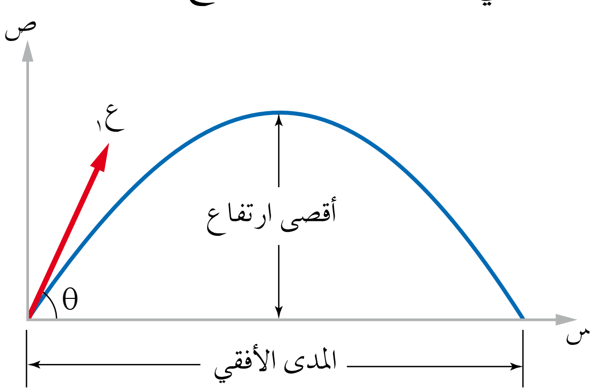
نشاط تمهيدي

ارسم المسار الذي تسلكه كرة السلة بعد أن يرميها اللاعب حتى تصل إلى الأرض.
- صف حركة الكرة.
- في كم بعدٍ تحركت الكرة؟

تعلمنا في بند الحركة في بعد واحد أنه يمكن وصف حركة جسم يتحرك في خط مستقيم بصورة تامة إذا استطعنا تحديد موقعه في كل لحظة من لحظات حركته. وقد عبرنا عن الموقع بالرمز (س) عندما كانت الحركة أفقية، وبالرمز (ص) عندما كانت الحركة رأسية. في هذا البند سنوسع مفهوم الحركة ليكون في بعدين (مستوى)، وسنتعرف أحد أنواع الحركة في بعدين في هذا الفصل، وهي حركة المقذوفات، بينما سنتعرف نوعًا آخر في فصل لاحق، وهو الحركة الدائرية.

حركة المقذوفات

تطلق كلمة مقذوف (Projectile) على أي جسم يُقْذَف في الهواء بحيث تخضع حركته لقوة الجاذبية الأرضية فقط (بإهمال مقاومة الهواء)، وبذلك فإن السقوط الحر يمثل حركة لمقذوف في بعد واحد، وتأخذ حركة الجسم المقذوف مسارًا منحنيًا (يطلق عليه اسم قطع مكافئ)، يسمى مسار الجسم المقذوف، والمسار العام للجسم المقذوف يأخذ الشكل الظاهر في الشكل (٢- ٢٣).



الشكل (٢- ٢٣): المسار العام للجسم المقذوف.

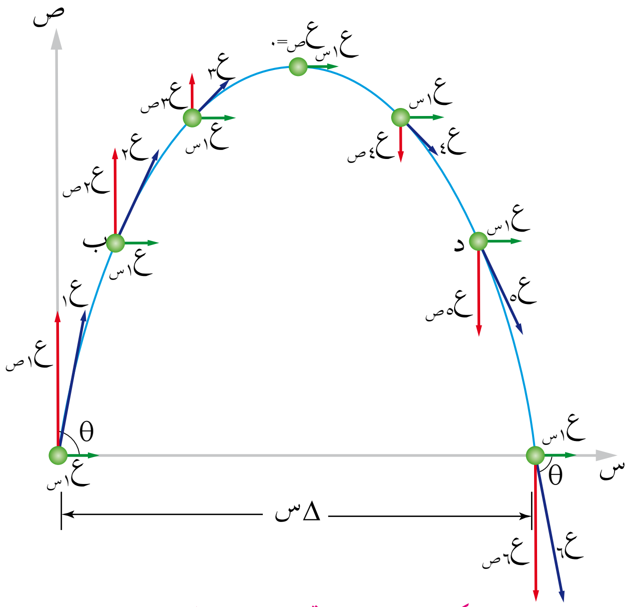
والفكرة الأساسية التي تقوم عليها حركة المقذوفات هي أنها مركبة من حركتين مستقلتين تمامًا، أفقية ورأسية، أي لا تعتمد أي منهما على الأخرى، فالحركة الرأسية تخضع لقوة الجاذبية الأرضية بينما لا تخضع الحركة الأفقية لأي قوة، لذلك سنحلل حركة المقذوف إلى حركتين، إحداهما على محور السينات والأخرى على محور الصادات، أي أننا لغرض وصف حركة الجسم المقذوف، سنحلل متجهات الموقع والسرعة إلى مركبات سينية، لوصف الحركة في البعد الأفقي، وصادية لوصف الحركة في البعد الرأسي، أما التسارع ، فهو لا يؤثر إلا في البعد الرأسي فقط. وحيث إن التسارع ثابت (تسارع الجاذبية الأرضية)، فإننا سنطبق معادلات الحركة بتسارع ثابت السابقة لوصف الحركة في البعد الرأسي.

يظهر من الشكل (٢-٢٤)، أنه يمكن تحليل سرعة الجسم المقذوف إلى مركبتين سينية وصادية في أي موقع من المواقع التي يمر بها عبر مساره، فعند نقطة القذف تحلل السرعة، كما يأتي:

$$\text{ع}_{\text{س}١} = \text{ع}_١ \text{ جتا } \theta$$

$$\text{ع}_{\text{ص}١} = \text{ع}_١ \text{ جا } \theta$$

ويلاحظ أن المركبة السينية للسرعة لا تتغير على طول المسار (لماذا؟)، بينما تتغير المركبة الرأسية للسرعة تبعًا لبعد الجسم عن نقطة القذف.



الشكل (٢-٢٤): تحليل سرعة المقذوف إلى مركبتيه.

وعن طريق المركبة السينية للسرعة نحسب المدى الأفقي (س) للجسم المقذوف كما يأتي:

$$\Delta\text{س} = \text{ع}_{\text{س}١} \text{ ز} \quad \text{.............} \quad (٢-١١)$$

حيث:

Δس (المدى الأفقي) : أبعد مسافة أفقية يصلها الجسم المقذوف عن نقطة القذف.

$\text{ع}_١$: السرعة الابتدائية للجسم المقذوف.

$\text{ع}_{\text{س}١}$: المركبة السينية للسرعة الابتدائية.

θ : الزاوية التي تصنعها $\text{ع}_١$ مع المستوى الأفقي.

ز : الزمن الذي يمكثه الجسم المقذوف في الهواء، منذ لحظة قذفه وحتى وصوله إلى الهدف (سطح الأرض أو أي سطح آخر)، ويطلق عليه زمن التحليق.

وحيث إن (س) هي إحداثي موقع، فإن المعادلة السابقة تستخدم أيضًا لتحديد البعد الأفقي للجسم المقذوف عن نقطة القذف عند أي لحظة زمنية (بعد فترة زمنية (ز))، فهي المعادلة الوحيدة التي تستخدم لوصف الحركة في البعد الأفقي.

أما في البعد الرأسي فإننا نستخدم معادلات الحركة بتسارع ثابت السابقة، بحيث تصبح على الصورة الآتية:

$$\text{ع}_{\text{ص}٢} = \text{ع}_{\text{ص}١} + \text{جـ ز} \quad \text{.............} \quad (٢-١٢)$$

$$\Delta\text{ص} = \text{ع}_{\text{ص}١} \text{ ز} + \frac{١}{٢} \text{ جـ ز}^٢ \quad \text{.............} \quad (٢-١٣)$$

$$\text{ع}_{\text{ص}٢}^٢ = \text{ع}_{\text{ص}١}^٢ + ٢ \text{ جـ } \Delta\text{ص} \quad \text{.............} \quad (٢-١٤)$$

حيث:

$ع_{١ص}$: المركبة الصادية للسرعة الابتدائية.

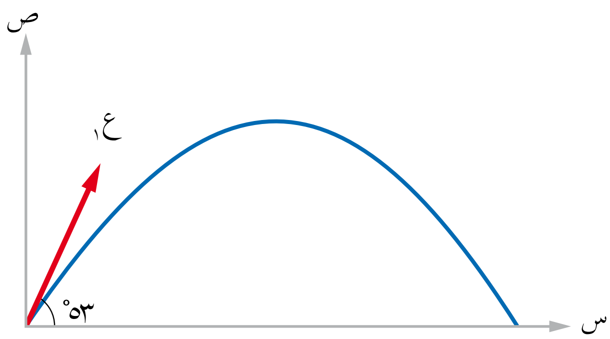
$ع_{٢ص}$: المركبة الصادية للسرعة بعد فترة زمنية (ز) من قذفه.

Δص : الإزاحة الرأسية بين نقطتي البداية والنهاية خلال فترة زمنية ز.

وباستخدام المعادلات السابقة يمكن تحديد موقع الجسم المقذوف وسرعته عند أي لحظة.

مثال (٢-١٤)

قذفت كرة باتجاه يميل عن الأفق إلى الأعلى بزاوية مقدارها (٥٣°)، وبسرعة ابتدائية (٢٠) م/ث، كما في الشكل (٢-٢٥). احسب:



الشكل (٢-٢٥): مثال (٢-١٤).

1. أقصى ارتفاع تصل إليه الكرة.
2. الزمن الذي تستغرقه الكرة لتعود إلى الأرض (زمن التحليق).
3. المدى الأفقي.
4. الإحداثي السيني (س) للكرة بعد ثانيتين من قذفها على فرض أن نقطة الأصل (الإسناد) هي نقطة القذف أي ($س_٠$ = صفر).

الحلّ:

لوصف حركة الكرة، نحلل السرعة إلى مركبتيها الأفقية والرأسية:

$ع_{١س} = ع_١$ جتاθ = ٢٠ جتا٥٣ = ١٢م/ث

وهذه السرعة تبقى ثابتة على طول مسار الحركة للكرة، وهي تستخدم فقط في البعد الأفقي.

$ع_{١ص} = ع_١$ جاθ = ٢٠ جا٥٣ = ١٦م/ث

وهذه السرعة تستخدم فقط في البعد الرأسي وهي متغيرة بسبب تسارع الجاذبية الأرضية.

1. يصل الجسم إلى أقصى ارتفاع عندما تصبح سرعته الرأسية صفرًا، أي أن:

$ع_{٢ص}$ = صفر من معادلة (٢-١٤)،

$ع^٢_{٢ص} = ع^٢_{١ص}$ + ٢جـ Δص

٠ = $(١٦)^٢$ + ٢ × (-٩,٨) Δص ، Δص = ١٣,٠٦م

❷ عندما تعود الكرة إلى الأرض تكون إزاحتها الرأسية (ارتفاعها) صفرًا، أي أن:

Δص = صفر   من معادلة (٢–١٣)،

Δص = ع$_{١ص}$ ز + $\frac{١}{٢}$ جـ ز^{٢}

٠ = ١٦ × ز + $\frac{١}{٢}$ × (–٩,٨) × ز^{٢} ، ز = ٣,٢٧ ث، وهو يساوي زمن التحليق (ز)

❸ لحساب المدى الأفقي نستخدم المركبة الأفقية للسرعة من معادلة (٢–١١)،

Δس = ع$_{١س}$ ز

= ١٢ × ٣,٢٧ = ٣٩,٢٤م

❹ Δس = س – س.

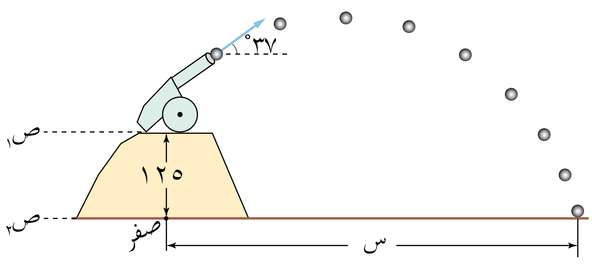
س = ع$_{١س}$ ز = ١٢ × ٢ = ٢٤م

مثال (٢–١٥)

مدفع على قمة تلة ارتفاعها (١٢٥) م عن سطح الأرض، أطلق قذيفة بسرعة (٢٠٠) م/ث باتجاه يميل عن الأفق بزاوية (٣٧°)، كما في الشكل (٢–٢٦). بإهمال أبعاد المدفع، احسب:

❶ زمن التحليق للقذيفة.

❷ الإحداثي السيني لموقع القذيفة على الأرض.



الشكل (٢–٢٦): مثال (٢–١٥).

الحلّ:

نحلل السرعة إلى مركبتيها الأفقية والرأسية:

ع$_{١س}$ = ع$_{١}$ جتاθ = ٢٠٠ × جتا٣٧° = ١٦٠م/ث

ع$_{١ص}$ = ع$_{١}$ جاθ = ٢٠٠ × جا٣٧° = ١٢٠م/ث

مسقط موقع المدفع على الأرض تعد نقطة الإسناد كما في الشكل (٢–٢٦)،

ص$_{٢}$ = صفر ،   ص$_{١}$= ١٢٥م.

❶ Δص = ع$_{١ص}$ ز + $\frac{١}{٢}$ جـ ز^{٢}

–١٢٥= ١٢٠ × ز + $\frac{١}{٢}$ × (–٩,٨) × ز^{٢} = ١٢٠ ز – ٤,٩ ز^{٢} ،

بالقسمة على (٤,٩) وإعادة ترتيب الحدود ينتج:

ز^{٢} – ٢٤,٥ ز – ٢٥,٥ = ٠ ، وبتحليل المعادلة إلى عواملها ينتج:

$(ز - ٢٥{,}٥)(ز + ١) = ٠$ ، $ز = ٢٥{,}٥$ ث

٢ $س = ع_{١س} \, ز$

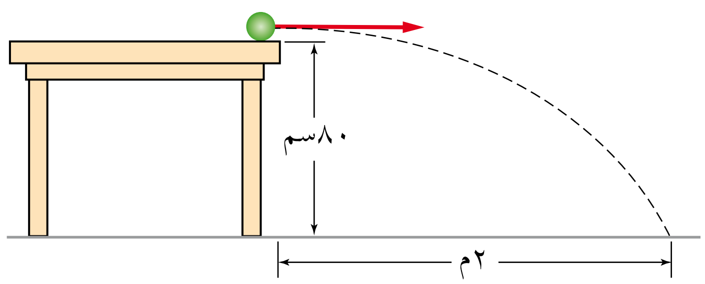
$= ١٦٠ \times ٢٥{,}٥ = ٤٠٨٠م = ٤{,}٠٨$كم

سـؤال

حل السؤال "فكر" الوارد في بداية هذا الفصل.

مثال (٢-١٦)

قذفت كرة باتجاه أفقي عن سطح طاولة ارتفاعها عن سطح الأرض (٨٠) سم، فارتطمت بالأرض على بعد (٢)م من النقطة التي تقع أسفل حافة الطاولة التي غادرتها الكرة، كما في الشكل (٢-٢٧).



الشكل (٢-٢٧): مثال (٢-١٦).

أحسب:

١ زمن التحليق.

٢ السرعة الابتدائية للكرة.

الحلّ:

الكرة بدأت الحركة بسرعة ابتدائية أفقية ($ع_١ = ع_{١س}$)، من $س_١ =$ صفر، $ص_١ = ٠{,}٨$م وانتهت إلى $ص_٢ =$ صفر و$س_٢ = ٢$م

١ $\Delta ص = ع_{١ص} \, ز + \frac{١}{٢} جـ ز^٢$

$-٠{,}٨ = ٠ \times ز + \frac{١}{٢} \times (-٩{,}٨) \times ز^٢$

$ز^٢ = ٠{,}١٦$ ، $ز = ٠{,}٤$ ثانية

٢ $\Delta س = ع_{١س} \, ز$

$٢ = ع_{١س} \times ٠{,}٤$ ، $ع_{١س} = ٥$ م/ث

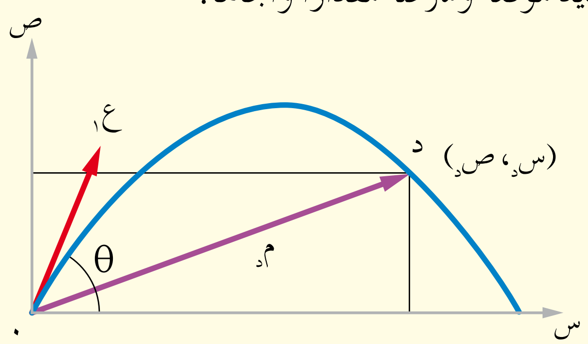
سـؤال

إذا سقطت الكرة سقوطًا حرًّا عن حافة الطاولة، فاحسب الزمن الذي تستغرقه للوصول إلى سطح الأرض، ثم قارنه مع الزمن المحسوب في المثال. ماذا تستنتج من ذلك؟

توسع

يمكن تحديد موقع الجسم المقذوف عند أي نقطة عبر مسار حركته عن طريق تحديد الإحداثي السيني والإحداثي الصادي للموقع، وتحديد سرعته عن طريق تحديد سرعته الأفقية وسرعته الرأسية عند تلك النقطة، ويمكن بعد ذلك بالاستفادة من نظرية فيثاغورس والنسب المثلثية تحديد موقعه وسرعته مقدارًا واتجاهًا.

حاول وبالاستعانة بالشكل (٢-٢٨) أن تحدد الموقع وتحسب السرعة للجسم المقذوف عند نقطة مثل (د) على مسار حركته، وذلك بعد افتراض قيم معينة لكل من $ع_١$، θ، وتحديد (د) بوساطة أي من الكميات الآتية: ز، $س_د$، $ص_د$، ثم حساب الكميات المتبقية بوساطة معادلات الحركة.



الشكل (٢-٢٨): تحديد الموقع للجسم المقذوف عند نقطة على مساره.

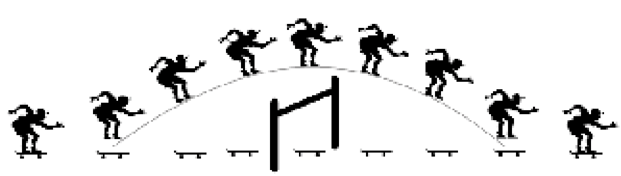
مراجعة (٢-٢)

١ كيف يمكن أن تقذف كرة بحيث تكون سرعتها عند أقصى ارتفاع:

أ - تساوي صفرًا.

ب- لا تساوي صفرًا.

٢ يتحرك متزلج بسرعة ثابتة، وعندما يقفز عن حاجز تاركًا مزلجته، فإنه يلتقي بها على الجانب الآخر كما في الشكل (٢-٢٩). كيف تفسر ذلك؟


الشكل (٢-٢٩): متزلج يقفز عن حاجز.

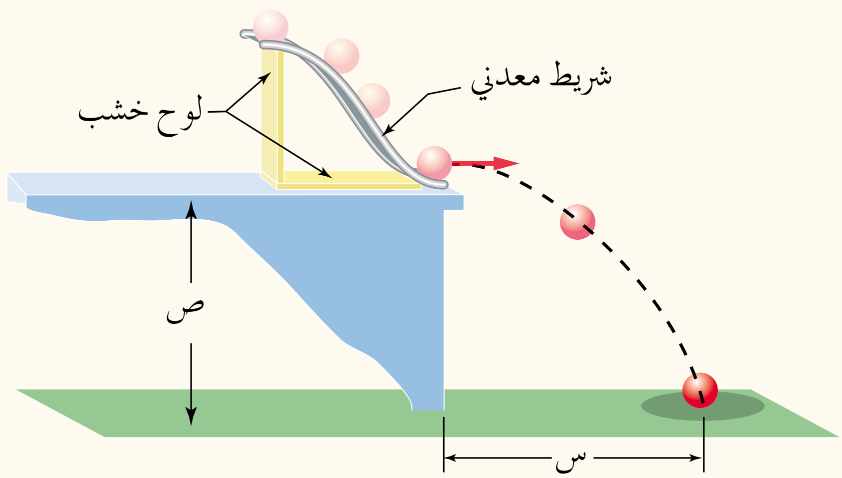
٣ قذف جسمان (أ، ب) باتجاه أفقي من الارتفاع نفسه وبسرعتين ابتدائيتين ($ع_١$، $ع_٢$) على الترتيب، بحيث ($ع_١ > ع_٢$). أيهما يصل الأرض أولًا؟ ولماذا؟

٤ بإهمال مقاومة الهواء أي الكميات الفيزيائية الآتية تبقى ثابتة لجسم مقذوف بسرعة $ع_١$ و بزاوية (θ) في أثناء حركته: سرعته القياسية، المركبة الأفقية لسرعته المتجهة، المركبة الرأسية لسرعته المتجهة، تسارعه.

المشروع الثاني: حركة المقذوفات

فكرة المشروع:

يوجد العديد من التطبيقات العلمية والعملية على حركة المقذوفات التي يحكمها متغيرين رئيسين، هما: سرعة المقذوف الابتدائية وزاوية قذفه، فبوساطتهما يمكن تحديد المدى الأفقي وأقصى ارتفاع تصل إليه القذيفة، حيث يتغير المسار الذي يأخذه المقذوف بتغير سرعته الابتدائية أو تغير زاوية قذفه أو كليهما معًا. ويمكن لك أن تصمم جهازًا بسيطًا تستطيع بوساطته دراسة العلاقة بين هذين المتغيرين وكل من المدى الأفقي وأقصى ارتفاع للقذيفة، والشكل (٢-٣٠) يبين أحد التصاميم المقترحة لذلك.



الشكل (٢-٣٠): تصميم جهاز القذف.

الفرضية:

بالاستفادة من معادلات الحركة التي درستها والأمثلة ذات العلاقة، يضع أعضاء المجموعة فرضيات عدة تحدد العلاقة بين سرعة المقذوف الابتدائية وزاوية قذفه من جهة، وأقصى ارتفاع يصل إليه الجسم المقذوف ومداه الأفقي من جهة أخرى.

الخطة:

بعد الاتفاق على صياغة الفرضيات، يضع أعضاء المجموعة التصميم المناسب لاختبار كل فرضية على حدة، ثم يجمعون المواد والأدوات اللازمة لذلك: لوحان خشبيان، شريط معدني أملس ذو حواف جانبية، كرة (زجاجية، أو معدنية) ، أوراق بيضاء، ورقة كربون، مسطرة مترية، مجموعة مسامير صغيرة.

الإجراءات:

١. ركب الجهاز بحيث يصبح الشريط المعدني ممرًّا مناسبًا لتتدحرج عليه الكرة بتأثير وزنها، وتنطلق على شكل مقذوف.
٢. ضع الجهاز الذي صممته على سطح أفقي.
٣. ضع الكرة في موقع تختاره على الممر المعدني، واتركها تتدحرج بتأثير وزنها، وراقب شكل المسار الذي تتخذه بعد مغادرتها الشريط المعدني، ثم ضع ورقة بيضاء وفوقها ورقة الكربون في المكان الذي اصطدمت فيه الكرة بالسطح.

٤ أعد الخطوة السابقة مع تسجيل القياسات التي تحتاجها لاختبار فرضيتك، مع تكرار هذه الخطوة مرات عدة ((٤–٥) مرات) وأخذ الوسط الحسابي لكل من القياسات التي سجلتها. (مع ملاحظة إسقاط الكرة من المكان نفسه في كل مرّة).

٥ أعد الخطوتين السابقتين مع تغيير المكان الذي تضع فيه الكرة على الشريط المعدني (أعلى أو أسفل من المكان السابق)، وسجل قياساتك، ثم لاحظ الفرق بين مسار الكرة في هذه الحالة والحالة السابقة.

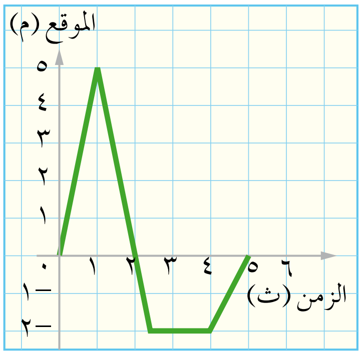
٦ غيّر من زاوية ميل الطرف السفلي للشريط المعدني، ثم أعد الخطوات (٣–٥) السابقة، وسجل قياساتك في كل مرّة.

مناقشة النتائج:

- يدرس أفراد كل مجموعة النتائج التي تم التوصل إليها، ويلاحظون مدى اتفاقها أو اختلافها مع الفرضيات الموضوعة.
- تعرض المجموعات ما تم التوصل إليه أمام المجموعات الأخرى، ثم تُناقش التعديلات التي يمكن إجراؤها على الجهاز، والإجراءات المتبعة للخروج بنتائج أفضل.

١ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

استخدم الشكل (٢–٣١) للإجابة عن الفقرتين ١ و ٢



الشكل(٢–٣١): السؤال الأول ، الفقرتين ١و٢.

١ الإزاحة بعد مرور ٣ ثوانٍ بوحدة المتر تساوي:

أ ٦ ب ٢–

جـ ٨ د ٢

٢ متوسط السرعة المتجهة خلال الفترة الزمنية من (٠ إلى ٣) ثوانٍ بوحدة م/ث:

أ ٢– ب ٠,٦٧ جـ ٠ د ٠,٦٧–

٣ إذا بدأت كرة بالتدحرج من أعلى منحدر من السكون بتسارع مقداره ٤م/ث^{2}، بعد ٧ ثانية، فإن إزاحتها بالمتر تساوي:

أ ١٢ ب ٩٨ جـ ١٢٠ د ١٩٠

٤ أي العبارات الآتية صحيحة:

أ للتسارع والإزاحة الإشارة نفسها دائمًا.

ب للتسارع وللسرعة المتجهة الإشارة نفسها دائمًا.

جـ إشارة التسارع تعتمد على كيفية تغير السرعة المتجهة.

د إشارة التسارع موجبة دائمًا.

٢ قطار يسير بسرعة مقدارها ٣٠م/ث تتناقص سرعته بانتظام، فإذا توقف في ٥٠ ثانية، احسب ما يأتي:

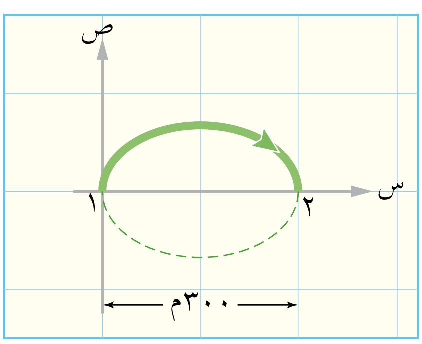
أ تسارع القطار.

ب المسافة المقطوعة في فترة التسارع.

٣ سيارة تسير على مسار بيضاوي كما في الشكل (٢–٣٢) بسرعة ثابتة مقدارها ٣٠م/ث، احسب ما يأتي:

أ سرعة السيارة المتجهة عند كل من النقاط ١ و ٢ .

ب إذا استغرقت السيارة ٤٠ ثانية لتصل من ١ إلى ٢ فاحسب متوسط السرعة المتجهة بين النقطتين.



الشكل (٢–٣٢): السؤال الثالث.

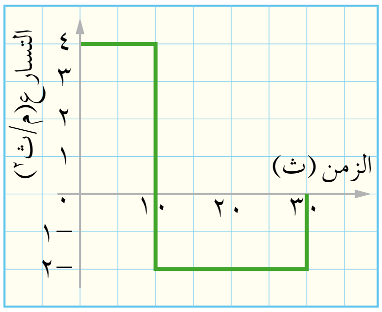
٤ إذا علمت أن حقيبة سقطت من طائرة تطير بسرعة أفقية ثابتة مقدارها ١٠٠م/ث على ارتفاع ١٠٠٠م عن سطح الأرض، فأين ستسقط الحقيبة بالنسبة إلى النقطة التي سقطت منها؟

٥ تحركت سيارة من السكون ومثلت العلاقة البيانية بين تسارعها والزمن في الشكل (٢-٣٣).

١ أوجد سرعتها: أ بعد ١٠ ثوانٍ

ب بعد ٣٠ ثانية

٢ ارسم منحنى (الزمن – السرعة).



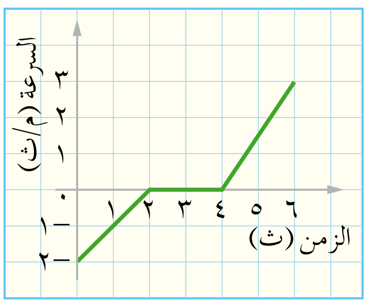
الشكل (٢-٣٣): السؤال الخامس.

٦ جسم يتحرك على خط مستقيم، وتتغير سرعته مع الزمن كما هو موضح في الشكل (٢-٣٤).

أ صف حركة الجسم.

ب احسب الإزاحة الكلية للجسم.

جـ احسب المسافة الكلية.

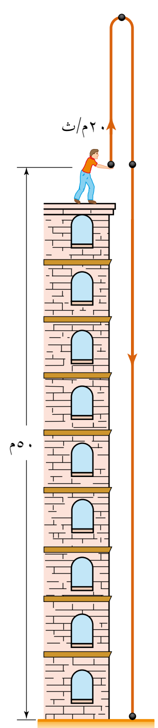


الشكل (٢-٣٤): السؤال السادس.

٧ يقف شخص على سطح عمارة ارتفاعها (٥٠) م عن سطح الأرض، ويقذف كرة رأسيًّا إلى الأعلى بسرعة ابتدائية مقدارها (٢٠) م/ث، كما في الشكل (٢-٣٥). بإهمال ارتفاع الشخص احسب:

أ الزمن الذي تستغرقه الكرة للوصول إلى الأرض.

ب أقصى ارتفاع تصله الكرة نسبة إلى سطح الأرض.



الشكل (٢-٣٥): السؤال السابع.

الوحدة الأولى: الميكانيكا

الفصل الثالث

القوة وقوانين الحركة

Force and Laws of Motion

في هذا الفصل

(٣-١):القوة.

(٣-٢):قوانين الحركة لنيوتن.

(٣-٣):تطبيقات.

(٣-٤):الحركة الدائرية المنتظمة وقانون الجذب العام.

الأهمية

تنطوي حياتنا اليومية على نشاطات عدّة مثل: القعود والمشي ورفع الأشياء، والنوم. ولا يمكن أن نتخيل الحياة من غير قوى، فعندما نسير على الأرض نؤثر بقوى، وكذلك عندما نكتب بالقلم، ولنسيّر وسائل النقل المختلفة فنحن بحاجة إلى القوى.

عندما تطلق مركبة فضائية مأهولة إلى مدار حول الأرض لتستقر هناك، يعاني رواد الفضاء من حالة انعدام الوزن، فيطفون، ولا يساعدهم على الثبات سوى استخدام أحزمة الأمان.

فكر:

- ما سبب شعور رواد الفضاء بانعدام الوزن في أثناء الدوران حول الأرض؟ هل انعدمت الجاذبية الأرضية هناك فعلاً؟ ما القوة المحصلة المؤثرة في روّاد الفضاء؟

وصفنا في الفصل السابق حركة الجسم بدلالة متجهات الموقع والسرعة والتسارع، من غير النظر إلى مسبب الحركة بوساطة ما يسمى بعلم الكينماتيكا Kinematics، وفي هذا الفصل سنتعرف مسبب الحركة؛ القوة Force، إذ سنجيب عن أسئلة مثل: لماذا تتغير الحالة الحركية للجسم؟ ما الذي يجعل جسم في حالة سكون وآخر يتحرك بتسارع؟ لماذا يعدّ تحريك جسم خفيف أكثر سهولة من جسم آخر ثقيل؟ إن العلم الذي يدرس العلاقة بين حركة الجسم والقوة المؤثرة فيه هو علم الديناميكا Dynamics، وهو فرع من الميكانيكا الكلاسيكية Classical mechanics.

بعد دراستك هذا الفصل، يتوقّع منك أن:

- تحلل متجه القوة إلى مركبتين متعامدتين وتجد محصلة قوى عدّة.
- تذكر نص كل من قوانين الحركة الثلاثة لنيوتن، وقانون الجذب العام في الميكانيكا.
- تصنف القوى في الطبيعة إلى قوى تلامس وقوى مجال.
- تحسب تسارع الجاذبية الأرضية من قانون الجذب العام.
- تذكر أمثلة من الواقع على قوى التلامس المختلفة.
- تفسر منشأ قوة الاحتكاك، وتعبر عنها رياضيًّا.
- تميز بين معامل الاحتكاك السكوني، ومعامل الاحتكاك الحركي.
- تطبق قوانين الحركة لنيوتن في حل مسائل حسابية، مثل: السطح المائل، نظام مكون من جسمين.
- توضح مفهوم القوة المركزية، وتعبر عنها رياضيًّا.
- تستقصي الأشكال المتعددة للقوة المركزية التي تؤثر في الأجسام.
- تفسر مشاهدات حياتية اعتمادًا على قوانين نيوتن الثلاثة.
- تستقصي أهمية قوانين الحركة لنيوتن في التطبيقات التكنولوجية الحديثة.

٣-١ القوة
Force

نشاط تمهيدي

- لاحظ الشكل (٣-١)، ثم ناقش التغيرات التي تحدث للكرة عندما يؤثر فيها لاعب بقوة.

إنك تؤثر بقوة عندما تسحب مقبض باب غرفتك لتفتحه، وعندما تدفع دُرج مكتبك لتغلقه، وكذلك تؤثر بقوة في الكرة عندما ترميها بيدك أو تركلها بقدمك، والآلات تؤثر بقوة عند استعمالها؛ فالرافعة الهيدروليكية تؤثر بقوة في سيارة فترفعها إلى الأعلى. في هذه الحالات كلّها، يشير مفهوم القوة إلى تأثير مؤثّر ما في جسم، فيحدث تغييرًا في حالته الحركية. وليتّضح مفهوم القوة، تأمّل الشكل (٣-١)، ثم ناقش التغيّرات التي تحدث للكرة في كل من الحالات الثلاث الواردة فيه.

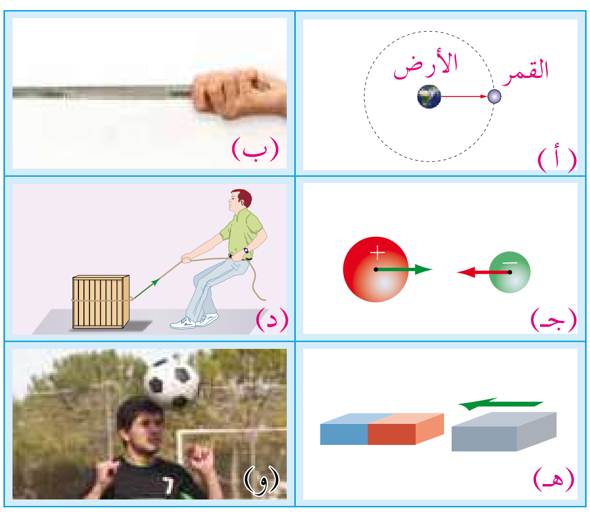
الشكل (٣-١): تأثير القوة في الحالة الحركية للكرة.

نتوصل من الأشكال السابقة إلى أن القوة عندما تؤثر في جسم ساكن تحركه، وعندما تؤثر في جسم متحرك، تغير مقدار سرعته أو اتجاهها أو كليهما معًا؛ لذا يمكننا القول إن القوة كمية فيزيائية متجهة تؤثر في الجسم فتغير من حالته الحركية.

فكّر: هل تتسبب القوة دائمًا بتغيير الحالة الحركية لجسم يقع تحت تأثيرها؟ أعط أمثلة توضح إجابتك.

(٣-١-١) أشكال القوى

يمكن تصنيف القوى وفق الطريقة التي ينتقل بها أثر تلك القوى في الأجسام إلى: قوى تلامس، وقوى تأثير عن بعد (قوى مجال). وللتمييز بينها، تأمّل الشكل (٣-٢) جيدًا، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٣-٢): بعض أشكال القوى.

- أي القوى يتطلب تأثيرها وجود اتصال مادي بين جسمين؟ اكتب هذه القوى ضمن المجموعة ١ في الجدول (٣-١).
- أي القوى لا يتطلب تأثيرها وجود اتصال مادي بين جسمين؟ اكتب هذه القوى ضمن

المجموعة ٢ في الجدول (٣-١).

تسمى القوى في المجموعة ١ قوى تلامس (Contact forces)، وتسمى القوى في المجموعة ٢ قوى مجال (Field Forces).

الجدول (٣-١) تصنيف القوى وفق طريقة انتقال أثرها إلى الأجسام.

المجموعة ١					
المجموعة ٢					

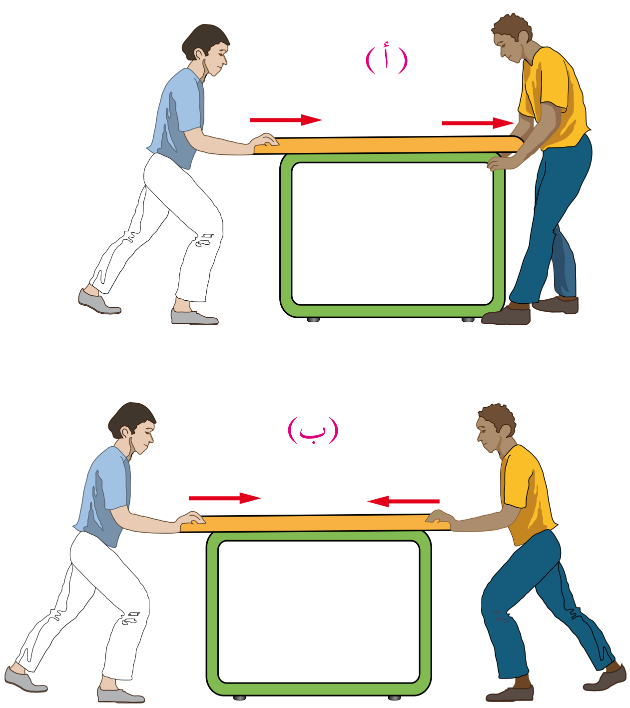
سؤال

اذكر أمثلة أخرى على كل شكل من أشكال القوى.

(٣-١-٢) القوة المحصلة

يؤثر في الجسم الواحد غالبًا أكثر من قوة مختلفة في المقدار أو في الاتجاه أو في كليهما معًا، ولتحديد الأثر الناتج عن تلك القوى مجتمعة نلجأ إلى جمعها جمعًا متجهًا لإيجاد **القوة المحصلة**، وهي القوة التي لو أثرت منفردة في الجسم لكان لها تأثير يكافئ تأثير تلك القوى مجتمعة. فمن الممكن أن تؤثر قوتان أو أكثر في جسم، من غير أن تغير حالته الحركية؛ إذ إن تأثير هذه القوى يلغي بعضه بعضًا، أي أن محصلتها تساوي صفرًا؛ لذا، فإنّه لإحداث تغيير في الحالة الحركية لجسم ما، يلزم التأثير فيه بقوى تكون محصلتها لا تساوي صفرًا.

وليتضح لديك مفهوم القوة المحصلة، هب أن صديقك طلب إليك يومًا مساعدته لتغيير موقع طاولة، فسحبتها أنت من طرف، ودفعها هو من الطرف الآخر، لاحظ أن القوتين لهما الاتجاه نفسه، كما يظهر في الشكل (٣-٣/أ). لكن تخيّل أن كلًّا منكما دفع الطاولة بعكس اتجاه الآخر كما في الشكل (٣-٣/ب)، كيف تُحسب القوة المحصلة في هاتين الحالتين، وفي حالات أخرى غيرهما؟



الشكل (٣-٣): القوة المحصلة.

سؤال

في أي الشكلين (٣-٣/أ) و (٣-٣/ب) يمكن أن تكون القوة المحصلة مساوية للصفر؟

إذا كانت القوة المحصلة المؤثرة في جسم مساوية للصفر يكون الجسم متزنًا، ويطلق على مجموعة القوى المؤثرة فيه اسم قوى متزنة.

(٣-١-٣) إيجاد محصلة قوتين أو أكثر بطريقة التحليل

إذا أثرت عدّة قوى مختلفة الاتجاهات في جسم، فإنه لإيجاد القوة المحصلة نحلل تلك القوى إلى مركباتها السينية والصادية، كما تعلمت في فصل المتجهات، ثم نجمع تلك المركبات في كلا الاتجاهين؛ السينية معًا، والصادية معًا، كما يأتي:

$$ح_س = \sum_{ر=١}^{ن} ق_{رس} = ق_{١س} + ق_{٢س} + ق_{٣س} + \dots\dots + ق_{نس} \quad \dots\dots (٣-١)$$

$$ح_ص = \sum_{ر=١}^{ن} ق_{رص} = ق_{١ص} + ق_{٢ص} + ق_{٣ص} + \dots\dots + ق_{نص} \quad \dots\dots (٣-٢)$$

حيث: $ح_س$ المركبة السينية للقوة المحصلة، $ح_ص$ المركبة الصادية للقوة المحصلة، ن عدد القوى المؤثرة.

وتكون القوة المحصلة: $\overleftarrow{ح} = \overleftarrow{ح}_س + \overleftarrow{ح}_ص$

$$ح = \sqrt{(ح_س^٢ + ح_ص^٢)} \quad \dots\dots (٣-٣)$$

$$\theta = ظا^{-١} \frac{ح_ص}{ح_س} \quad \dots\dots (٣-٤)$$

حيث θ: الزاوية التي تصنعها القوة المحصلة مع محور السينات الموجب. ارجع إلى الشكل (١-٢٠).

توسع

تصنف القوى في الكون إلى أربعة أنواع، نوردها مرتبة وفق شدتها من الأقوى إلى الأضعف وفق الآتي:

- القوة النووية القوية بين الجسيمات المكونة للنواة (Strong Nuclear Force) التي تربط البروتونات والنيوترونات داخل النواة.
- القوة الكهرومغناطيسية بين الشحنات الكهربائية (Electromagnetic Force)، مثل قوة التنافر بين إلكترونين، وقوى التلاصق والتماسك بين الجزيئات.
- القوة النووية الضعيفة (Weak Nuclear Force) التي تظهر في بعض عمليات الاضمحلال النووي. (ابحث عن تعريف الاضمحلال النووي).
- قوة الجاذبية بين كتل الأجسام (Gravitational Force)، مثل وزن الكتاب (القوة بين الكتاب والأرض).

ابحث في المصادر المختلفة للمعرفة، لتتوصل إلى المزيد عن خصائص كل من قوى المجال الأساسية في الكون.

مراجعة (٣-١)

١ ما التغييرات التي يمكن أن تحدثها القوة في الأجسام التي تؤثر فيها؟

٢ ما المقصود بالقوة المحصلة؟

٣ صنف القوى الآتية إلى قوى تلامس وقوى مجال: الوزن، قضيب أبونايت مدلوك بالصوف يجذب قضيب زجاج مدلوك بالحرير، قوة الشد في الحبل، قوة التنافر المغناطيسي بين أقطاب متشابهة، قوة الطفو المؤثرة في جسم معلق في سائل، قوة سحب حصان لعربة.

٤ نشاهد في حياتنا اليومية الكثير من الأجسام في حالة سكون، هل يعني ذلك أنّه لا يوجد قوى تؤثّر فيها؟ أعط مثالاً يوضح إجابتك.

نشاط تمهيدي

• يبين الشكل (٣-٤) كأس زجاجية فارغة، وقطعة نقد، وقطعة ورق مقوى. رتب أدوات النشاط كما في الشكل، ثم انقر قطعة الورق بقوّة بطرف إصبعك، فسّر ما شاهدته.

الشكل (٣-٤): نشاط تمهيدي.

السكون والحركة من الظواهر الطبيعية المألوفة في هذا الكون، وقد استحوذت على اهتمام الكثير من الفلاسفة والعلماء على مر العصور؛ فقد اعتقد أرسطو أن الحالة الطبيعية للأجسام هي السكون، واعتمد في اعتقاده على ملاحظات مألوفة، إذ إن تحريك جسم على أرض أفقية، يتطلب التأثير فيه بقوة، وعند زوال أثر القوة يسكن الجسم. وفي بداية القرن السابع عشر، تنبه غاليليو لخطأ فكرة أرسطو، واقترح أنه إذا استطعنا إلغاء أثر قوى الاحتكاك، فإن كرة صلبة ملساء تستمر في حركتها على مستوى أفقي أملس، ما أن تبدأ بالحركة، واستنتج بذلك أن سرعة الكرة لا تتغير.

فكِّر: أعط مثالاً تدعم فيه استنتاج غاليليو.

واعتمادًا على استنتاجات غاليليو بنى نيوتن نظريته في الحركة بصياغة ثلاثة قوانين، سميت في ما بعد باسمه، وتعدّ من أهم قوانين علم الحركة، لما لها من تطبيقات واسعة في حياتنا.

(٣-٢-١) القانون الأول في الحركة لنيوتن

ينص القانون الأول في الحركة على أن: **الجسم الساكن يبقى ساكنًا، والجسم المتحرك بسرعة متجهة ثابتة يبقى كذلك، ما لم تؤثر فيه قوة محصلة تغير من حالته.**

يشير الشق الأول من القانون إلى عجز الجسم عن تغيير حالته الحركية من تلقاء نفسه، أي أنه قاصر ذاتيًا، بينما يشير الشق الثاني إلى أن القوة المحصلة فقط هي التي تجبر الجسم على تغيير حالته الحركية؛ ولذا يعرف القانون الأول في الحركة باسم "**قانون القصور**"، فأي جسم قاصر عن تغيير حالته الحركية بنفسه. أما **القصور الذاتي** فهو خاصية للجسم تصف ميله إلى المحافظة على حالته الحركية، وممانعة أي تغيير فيها.

فعندما تكون راكبًا في السيارة وهي تسير بسرعة ما، فإن سرعتك تساوي سرعة السيارة مقدارًا واتجاهًا، وإذا غيرت السيارة من سرعتها فجأة، سواء أكان ذلك في المقدار أم في الاتجاه أم في كليهما معًا، فإنك تبقى محافظًا على سرعتك بسبب قصورك الذاتي؛ لذا فإنك تبقى مندفعًا إلى الأمام في حال توقف السيارة المفاجئ أو التناقص الكبير والمفاجئ في سرعتها، وتميل إلى يمين الاتجاه الجديد إذا انعطفت

السيارة إلى جهة اليسار، والعكس بالعكس، ولذا يبرز هنا الدور الكبير لحزام الأمان في المحافظة على سلامة الركاب من أي خطر قد يتعرضون له في حال تغيّرت سرعة السيارة بصورة مفاجئة.

فكِّر: كيف يعمل حزام الأمان للمحافظة على سلامة الركاب؟

نشاط (٣-١) من يتقن اللعبة؟

رتّب عشر قطع نقد معدنية متماثلة بعضها فوق بعض على منضدة أفقية، ثم استخدم مسطرة فولاذية مناسبة واضرب بحافتها الحادة بسرعة وخفة قطعة النقد السفلى. ماذا تلاحظ؟ استمر بضرب قطعة النقد السفلية في كل مرة، وإزاحتها واحدة تلو الأخرى. أي القطع ستبقى للنهاية؟ فسّر ما حدث.

(٣-٢-٢) القانون الثاني في الحركة لنيوتن

وصف القانون الأول في الحركة سلوك الجسم في حال كانت القوة المحصلة المؤثرة فيه مساوية للصفر؛ لكن ممارساتنا اليومية تبين لنا أن الكثير من الأجسام حولنا غير متزنة، فالجسم الساقط سقوطًا حرًّا في مجال الجاذبية، والسيارة التي تغير من حالتها الحركية باستمرار، والأشجار التي تحركها الرياح، جميعها غير متزنة.

سؤال

أعط أمثلة أخرى من واقع الحياة لأجسام تخضع لقوى غير متزنة.

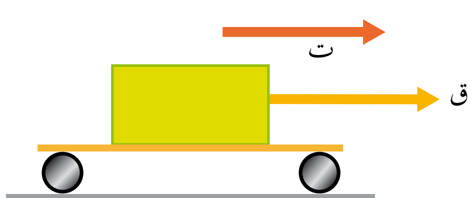
وقد وصف نيوتن سلوك الأجسام في الحالات السابقة وغيرها بالقانون الثاني في الحركة الذي ينص على ما يأتي: **إذا أثرت قوة محصلة في جسم فإنها تكسبه تسارعًا باتجاهها يتناسب طرديًّا معها**، ويكون ثابت التناسب هو كتلة الجسم (ك). ويعبّر عن ذلك بالعلاقة الرياضيّة:

∑ ق = ك × ت .... (٣-٥)

حيث (∑ق): القوة المحصلة المؤثرة في الجسم، و(ك): كتلة الجسم بوحدة (كغ)، و(ت): تسارعه بوحدة (م/ث²). ويكون اتجاه التسارع باتجاه القوة المحصلة، كما في الشكل (٣-٥). وتقاس القوى في النظام العالمي بوحدة نيوتن.

حيث ١ نيوتن = ١ كغ × $\frac{\text{١ م}}{\text{١ ث}^{٢}}$ = $\frac{\text{كغ. م}}{\text{ث}^{٢}}$

وللتحقّق من العلاقة الطردية، نفّذ النشاط الآتي:



الشكل (٣-٥): اتجاه التسارع مع اتجاه القوة المحصلة.

نشاط (٣-٢) القانون الثاني في الحركة

هدف النشاط: استقصاء العلاقة بين القوة والتسارع رياضيًّا.

نفذ طالب نشاطًا عمليًّا لاستقصاء العلاقة بين القوة المحصلة المؤثرة في العربة في الشكل (٣-٥) وتسارع العربة، فتوصل إلى النتائج المبينة في الجدول (٣-٢).

الجدول (٣-٢): نشاط (٣-٢).

القوة المحصلة (نيوتن)	التسارع (م/ث٢)
٠,١	٠,٤١
٠,٢	٠,٧٩
٠,٣	١,٣٠
٠,٤	١,٥٨

مثل بيانيًّا منحنى (القوة – التسارع)، بحيث يمثل المحور الأفقي التسارع والمحور العمودي يمثل القوة المحصلة،(يمكنك استخدام برمجية إكسل (Excel)، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

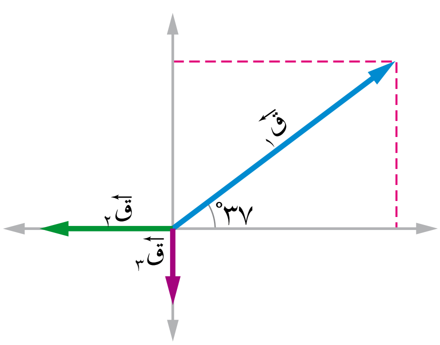
١ ما نوع العلاقة بين القوة المحصلة المؤثرة في العربة والتسارع الذي اكتسبته؟

٢ جد ميل المنحنى (القوة– التسارع)، ما الذي يمثله هذا الميل؟

فكّر: إذا كانت القوة المحصلة المؤثرة في جسم تساوي صفرًا، فكم يبلغ تسارعه؟ وعلام يدل ذلك؟ وما علاقته بالقانون الأول في الحركة؟

مثال (٣-١)

إذا أثرت ثلاث قوى في جسم كتلته ٥ كغ، $ق_١$ = ١٠٠ نيوتن، $ق_٢$ = ٥٠ نيوتن، $ق_٣$ = ٢٠ نيوتن. بالاتجاهات الموضحة في الشكل (٣-٦). فجد التسارع الذي يكتسبه الجسم.



الشكل (٣-٦): مثال (٣-١).

الحلّ:

نجد القوة المحصلة بطريقة التحليل، ثم نطبق القانون الثاني في الحركة.

١ **إيجاد المركبات السينية للقوى الثلاث:**

$ق_{١س}$ = $ق_١$ جتا ٣٧° = ١٠٠ × ٠,٨ = ٨٠ نيوتن، باتجاه المحور السيني الموجب.

$ق_{٢س}$ = $ق_٢$ جتا ١٨٠° = ٥٠ × −١ = −٥٠ نيوتن = ٥٠ نيوتن، باتجاه المحور السيني السالب.

$ق_{٣س}$ = $ق_٣$ جتا ٢٧٠° = ٢٠ × ٠ = صفر

٢ إيجاد المركبات الصادية للقوى الثلاث:

ق$_{ص١}$ = ق$_{١}$ جا ٣٧° = ١٠٠×٠,٦ = ٦٠ نيوتن، باتجاه المحور الصادي الموجب.

ق$_{ص٢}$ = ق$_{٢}$ جا ١٨٠° = ٥٠×٠ = صفر

ق$_{ص٣}$ = ق$_{٣}$ جا ٢٧٠° = ٢٠×−١ = −٢٠ نيوتن = ٢٠ نيوتن، باتجاه المحور الصادي السالب.

٣ إيجاد المركبة السينية للقوة المحصلة:

ح$_{س}$ = ∑ق$_{س}$ = ق$_{س١}$ + ق$_{س٢}$ + ق$_{س٣}$

= ٨٠ + −٥٠ + ٠ = ٣٠ نيوتن، باتجاه المحور السيني الموجب.

٤ إيجاد المركبة الصادية للقوة المحصلة:

ح$_{ص}$ = ∑ق$_{ص}$ = ق$_{ص١}$ + ق$_{ص٢}$ + ق$_{ص٣}$

= ٦٠ + ٠ + −٢٠ = ٤٠ نيوتن، باتجاه المحور الصادي الموجب.

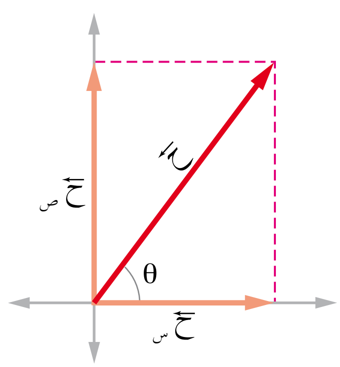
٥ إيجاد القوة المحصلة:

بعد تمثيل المركبتين السينية والصادية للقوة المحصلة (ح) كما في الشكل (٣−٧) نحسب القوة المحصلة:

$$\text{ح} = \sqrt{(\text{ح}_{\text{س}})^{٢} + (\text{ح}_{\text{ص}})^{٢}}$$

$$= \sqrt{(٣٠)^{٢} + (٤٠)^{٢}}$$

$$= \sqrt{٢٥٠٠} = ٥٠ \ \text{نيوتن}$$



الشكل (٣−٧): مثال (٣−١).

لإيجاد قيمة الزاوية θ التي تحدد اتجاه ح نطبق العلاقة:

$$\text{ظا}\,\theta = \frac{\text{ح}_{\text{ص}}}{\text{ح}_{\text{س}}} = \frac{٤٠}{٣٠} = ١,٣٣$$

، ومنها: θ = ٥٣°

بتطبيق القانون الثاني في الحركة لنيوتن: ح = ك ت

$$\text{ت} = \frac{\text{ح}}{\text{ك}} = \frac{٥٠}{٥} = ١٠ \ \text{م/ث}^{٢}$$

باتجاه القوة المحصلة نفسها.

سؤال

جد التسارع الناتج عن كل قوة منفردة، ثم احسب التسارع المحصل بطريقة التحليل، وقارنه بنتيجة المثال (٣−١)، طبق القانون الثاني في الحركة لإيجاد القوة المحصلة من العلاقة:

القوة المحصلة = الكتلة × التسارع المحصل.

(٣-٢-٣) القانون الثالث في الحركة لنيوتن

إذا قذفت كرة باتجاه الحائط ستلاحظ أنها تصطدم به، ثم ترتد نحوك، إن ارتداد الكرة يدل على تأثرها بقوةٍ غيرت اتجاه حركتها، فما مصدر هذه القوة؟ وما علاقتها بقوة دفع الكرة للحائط؟ إن كنت تجيد السباحة، ما الذي تفعله عند اقترابك من الجدار كي تعود بالاتجاه المعاكس؟ ربما تدفع الجدار بقدميك نحو الخلف، عندها ستشعر بقوة تدفعك، ما مصدر هذه القوة؟ وما اتجاهها؟ من دراستك للقانون الثالث، ستتمكن من تفسير تلك المشاهدات؛ إذ ينص على أنه: **إذا تفاعل جسمان بحيث أثّر الجسم الأول في الجسم الثاني بقوة، فإن الثاني يؤثر في الأول بقوة تساويها مقدارًا، وتعاكسها اتجاهًا.**

ولتوضيح ما يشير إليه القانون الثالث، انظر الشكل (٣-٨/أ) الذي يبين جسمين متلاصقين (١، ٢) يستقران على سطح أفقي، وكما يلاحظ من الشكل فإن القوة (ق) تؤثر في الجسم الأول ولا تؤثر في الثاني. وإذا كانت القوة كافية لتحريك الجسمين على السطح فإن الجسم الأول يتحرك بفعل القوة المؤثرة (ق)، فما الذي يحرك الجسم الثاني؟ لا بد من وجود قوة حركته، وهذه القوة نتجت من تفاعل الجسمين، بحيث أثر الجسم الأول في الجسم الثاني بقوة ($ق_{٢١}$) نحو اليمين أدت إلى حركة الجسم الثاني، وبالمقابل أثر الجسم الثاني في الجسم الأول بقوة ($ق_{١٢}$) نحو اليسار، كما يظهر في الشكل (٣-٨/ب).

الشكل (٣-٨): التفاعل بين جسمين متلاصقين نتيجة تأثر أحدهما بقوة خارجية.

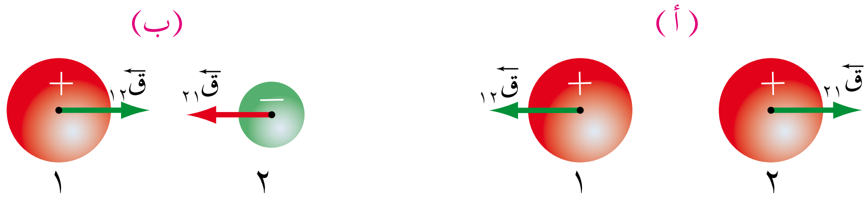
فكر: دلت حركة الجسم الثاني على أنه تأثر بقوة من الجسم الأول، كيف تستدل على أن الجسم الثاني أثر بقوة في الجسم الأول؟

ويمكن التعبير عن هاتين القوتين بالعلاقة الرياضيّة:

$$\overleftarrow{ق}_{٢١} = - \overleftarrow{ق}_{١٢} \quad .... \quad (٣-٦)$$

ويطلق على هاتين القوتين اسم فعل ورد فعل؛ لذا يطلق على القانون الثالث في الحركة لنيوتن اسم: **قانون الفعل ورد الفعل. بمعنى أن لكل فعل رد فعل مساوٍ له في المقدار ومعاكس له في الاتجاه.**

ومن الجدير بالذكر أن قانون الفعل ورد الفعل لا يقتصر على قوى التلامس كما في الأمثلة السابقة، إنما يشمل أيضًا قوى المجال كما في القوى الكهربائية المتبادلة بين شحنتين نقطيتين. انظر الشكل (٣-٩).



الشكل(٣-٩): أزواج القوى الكهربائية المتبادلة بين شحنتين نقطيتين: (أ) قوى تنافر بين شحنتين متماثلتين ، (ب) قوى تجاذب بين شحنتين مختلفتين.

عند دراستنا للقانون الثالث في الحركة لنيوتن نستخلص النقاط الآتية:

- أنّ القوى في الطبيعة توجد على شكل أزواج (فعل ورد فعل)، أي لا توجد قوة مفردة.
- أنّ زوجي القوى المتبادلة بين جسمين متجانسان، فإذا كان الفعل قوة جذب فإنّ رد الفعل يكون قوة جذب.
- أنّ زوجي القوى المتبادلة بين جسمين متزامنان، فهما ينشآن معًا ويختفيان معًا.
- أنّ الفعل ورد الفعل قوتان تؤثران في جسمين مختلفين؛ لذا لا تحسب محصلتهما.

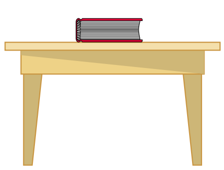
توسع

يصف القانون الثاني في الحركة العلاقة الطردية بين القوة والتسارع، وتمثّل كتلة الجسم المتحرك ثابت التناسب الطردي لتلك العلاقة. ماذا لو كانت الكتلة غير ثابتة؟ ما الذي سيحدث؟

عند إطلاق صاروخ إلى الأعلى، تندفع منه الغازات إلى الأسفل بتأثير قوة محرك الصاروخ، فيتأثر الصاروخ بقوة ردّ فعل تدفعه نحو الأعلى، بتسارع يُتوقّع أن يكون ثابتًا، نتوصل إليه من القانون الثاني، لكن كتلة الصاروخ تتناقص بسبب نفثه للغازات، ممّا يجعل تسارع الصاروخ يتزايد باستمرار على الرغم من أنّ قوة دفعه للغازات ثابتة.

مراجعة (٣-٢)

١ ماذا تتوقع أن يحدث لحمولة شاحنة لم تثبّت جيدًا عند التوقف المفاجئ، ثم عند الانطلاق بتسارع. فسر إجابتك.



الشكل (٣-١٠): كتاب ساكن.

٢ (الجسم الساكن على سطح الطاولة في الشكل (٣-١٠) لا تؤثر فيه أيّة قوة)، هل هذه العبارة صحيحة؟ فسر إجابتك.

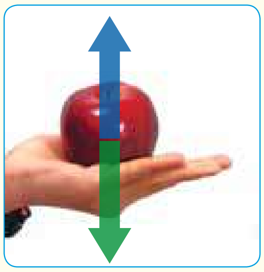
٣ حدد أزواج القوى والأجسام المتفاعلة، في كل من: طائرة نفاثة تتسارع على المدرج، ورقتي كشاف كهربائي مشحون بشحنة موجبة، رياضي يسبح في بركة باتجاه الغرب، مغناطيسين أقطابهما المتخالفة متقابلة، عدّاء يركض باتجاه شارة النهاية.

٤ شاحنة نقل محملة بالرمل تتسارع بمعدل ثابت على طريق سريع، إذا بقيت القوة المحركة ثابتة، ماذا يحدث لتسارع الشاحنة إذا تسرب الرمل بمعدل ثابت من ثقب في أرضية الشاحنة؟

درست في صفوف سابقة بعضًا من أنواع القوى، ولأغراض دراسة تطبيقات على قوانين الحركة لنيوتن، سنستذكر معًا قوتي الوزن والشد، وسنتعرف على قوتين جديدتين هما، القوة العمودية وقوة الاحتكاك.

نشاط تمهيدي

- لاحظ الشكل (٣-١١)، ثم ناقش ما القوى المؤثرة في التفاحة التي تجعلها في حالة اتزان سكوني.



الشكل (٣-١١): الاتزان السكوني.

(٣-٣-١) الوزن

تؤثر الأرض بقوة جذب في الأجسام باتجاه مركزها، وتسمى هذه القوة الوزن (Weight)، ويعطى بالعلاقة:

و = ك جـ .... (٣-٧)

حيث ك: كتلة الجسم (كغ)

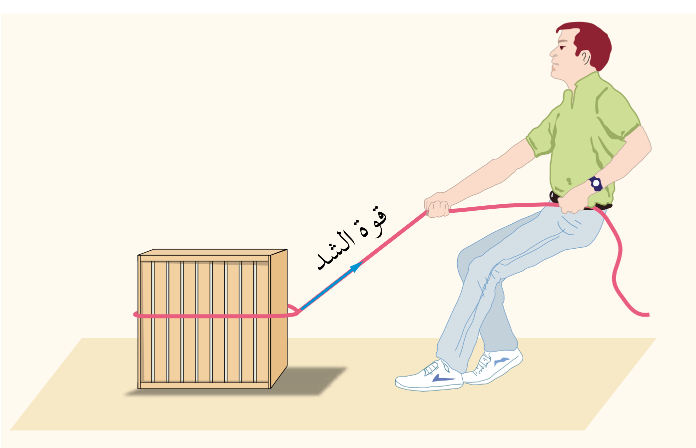
جـ : مقدار التسارع الذي تسببه الجاذبية الأرضية، الذي مر معك في فصل الحركة باسم تسارع السقوط الحر، ويساوي ٩,٨م/ث^{٢} (ستعرف إلى طريقة حسابه لاحقًا في هذا الفصل).

فكرة

تعتمد الكتابة باستخدام أقلام الحبر على الجاذبية الأرضية؛ لذلك لا تستطيع الكتابة عندما يكون رأس القلم لأعلى أو في مركبة فضائية، لذلك استخدم رواد الفضاء أقلام الرصاص في الرحلات الأولى، ثم استُخدم نوع آخر من الأقلام لما يشكله غبار الغرافيت من خطر على الأجهزة الإلكترونية.

(٣-٣-٢) قوة الشد

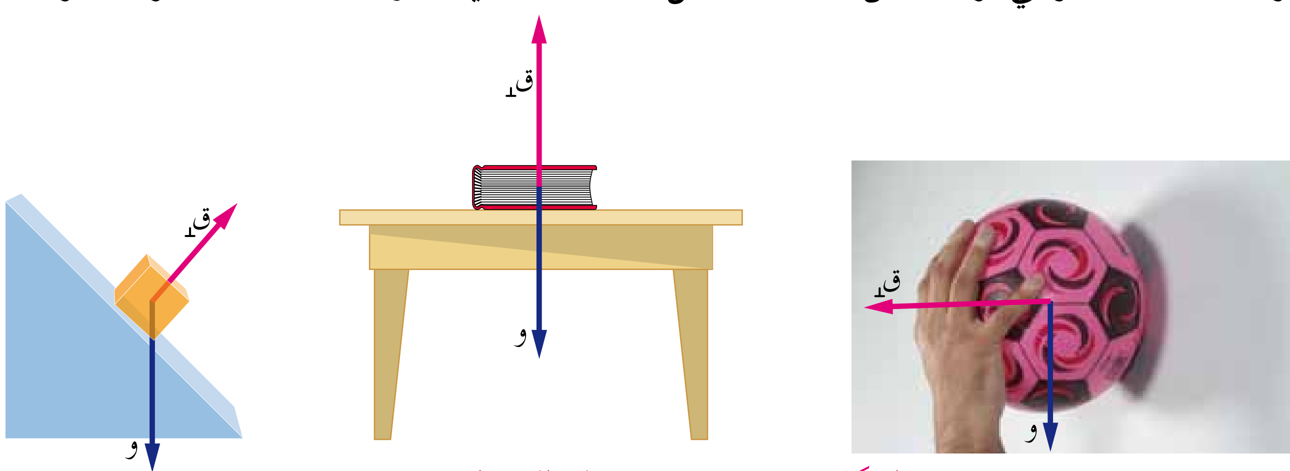
هي القوة التي تنتقل إلى جسم عبر حبل (أو سلك أو خيط) مربوط بالجسم بحيث يسحب بقوة تؤثر فيه من الطرف الآخر للحبل، ويكون اتجاه قوة الشد (Tension Force) على طول الحبل بعيدًا عن الجسم، كما في الشكل (٣-١٢).



الشكل (٣-١٢): قوة الشد في الحبل.

(٣-٣-٣) القوة العمودية

ما الذي يجعل التفاحة في الشكل (٣-١١) في حالة اتزان سكوني؟ ما القوة الموازنة لقوة جذب الأرض لها؟ يشكل وزن التفاحة قوة فعل تؤثر في اليد نحو الأسفل، وفي المقابل تؤثر اليد في التفاحة بقوة رد فعل نحو الأعلى، وبوجه عام يطلق على قوة رد الفعل التي يؤثر بها السطح في جسم يلامسه ويؤثر فيه بقوة (فعل) تسمى **القوة العمودية** (Normal Force)؛ لأنها تكون دائمًا عمودية على السطح وتتجه بعيدًا عنه، وهي قوة تلامس، لاحظ الشكل (٣-١٣) الذي يظهر حالات مختلفة للقوة العمودية.



الشكل (٣-١٣): حالات مختلفة للقوة العمودية.

(٣-٣-٤) قوة الاحتكاك

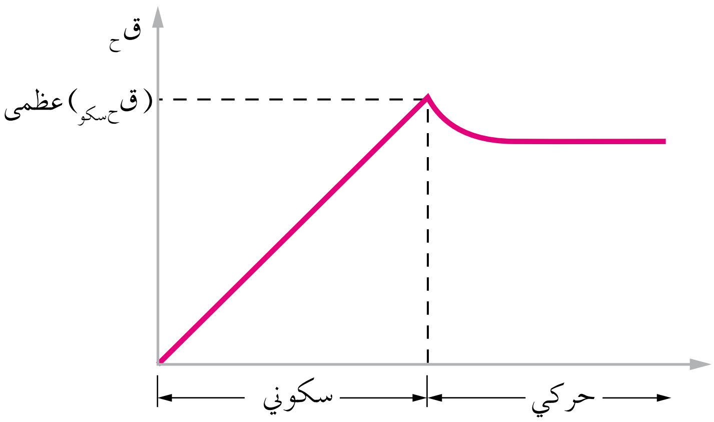
قد تركل كرة على الأرض نحو زميلك ولا تصل إليه، هل فكرت لماذا تباطأت الكرة حتى توقفت؟ ما المؤثر الذي جعل الكرة تتوقف قبل أن تصل؟ إن إبطاء حركة الكرة ومن ثم وقوفها يحتاج إلى قوة تعاكس اتجاه حركتها، هذه القوة التي أثرت بها أرضية الملعب في الكرة، تدعى قوة الاحتكاك، فهي قوة تعيق حركة الأجسام بعضها فوق بعض، ولها تطبيقات واسعة في الحياة، بعضها مفيد وضروري، وبعضها الآخر ضار لا بد من معالجته، فقوة الاحتكاك مع الأرض ضرورية للمشي ولحركة السيارة، في حين أن قوة الاحتكاك بين أجزاء محرك السيارة ضارة يجب تقليل أثرها.

ولفهم طبيعة قوة الاحتكاك، لنأخذ مثالاً من واقع حياتنا اليومية، فعندما تدفع صندوقًا ثقيلاً على سطح أفقي بقوة أفقية بسيطة، تلاحظ أن الصندوق لا يتحرك، لأنه ما إن تبدأ بالتأثير بالقوة على الصندوق، تنشأ قوة احتكاك بين الصندوق والسطح تساوي القوة المؤثرة في المقدار وتعاكسها في الاتجاه، ويبقى الصندوق في حالة اتزان سكوني؛ لذا يطلق على قوة الاحتكاك في هذه الحالة اسم:

قوة الاحتكاك السكوني (ق ح سكو) Static Frictional Force.

فكرة

يطلق على القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني اسم: قوة الاحتكاك الحديّة Limiting Frictional Force.



الشكل (٣-١٤): تغير قوة الاحتكاك السكوني والحركي مع القوة المؤثرة.

ومع ازدياد مقدار القوة المؤثرة تزداد تبعًا لذلك قوة الاحتكاك بالمقدار نفسه، إلى أن تصل قيمتها العظمى (ق ح) عظمى عندما يصبح الجسم على وشك الحركة، كما يظهر في الشكل (٣-١٤).

وقد وجد عمليًا أن القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني تتناسب طرديًا مع القوة العمودية (ق⊥) التي يؤثر بها السطح على الجسم، وترتبط معها بالعلاقة الرياضيّة:

(ق ح) عظمى = ق⊥ × μ_s .... (٣-٨)

حيث μ_s: معامل الاحتكاك السكوني الذي يعتمد على طبيعة السطحين المتلامسين.

وعند زيادة القوة المؤثرة بحيث تصبح أكبر من القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني، فإن الصندوق سوف يتحرك بتسارع، حسب قانون نيوتن الثاني، وتنخفض عندها قيمة قوة الاحتكاك عن القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني، كما يظهر في الشكل (٣-١٤)، ويطلق على قوة الاحتكاك عندما يكون الجسم في حالة حركة اسم: **قوة الاحتكاك الحركي** (ق ح حر) Kinetic Frictional Force وهي تتناسب أيضًا مع القوة العمودية وترتبط معها بالعلاقة الرياضيّة:

ق ح حر = ق⊥ × μ_k .... (٣-٩)

حيث μ_k: معامل الاحتكاك الحركي.

وقد أظهرت التجارب العملية أن قوة الاحتكاك بوجه عام تعتمد على طبيعة السطحين المتلامسين ولا تعتمد على مساحة سطح التلامس، فهي ذات طبيعة كهرسكونية تنشأ بين ذرات السطوح المتلامسة.

نستخلص من ذلك ما يأتي:

- إذا كان الجسم ساكنًا، فإن مقدار قوة الاحتكاك السكوني يزداد بزيادة مقدار القوة الخارجية حتى يصل قيمته العظمى (ق ح) عظمى ، وتكون هاتان القوتان (القوة الخارجية وقوة الاحتكاك السكوني) متساويتين عند قيم (ق)الخارجية المؤثرة جميعها، أي أن:

$\text{صفر} \le ق_{\text{ح سكو}} \le (ق_{\text{ح}})_{\text{عظمى}}$

- عندما يبدأ الجسم حركته، تنقص قيمة قوة الاحتكاك عن قيمتها العظمى، أي أن:

$(ق_{\text{ح}})_{\text{عظمى}} > ق_{\text{ح حر}}$ وتبقى الأخيرة ثابتة في أثناء حركة الجسم ومعاكسة لاتجاه حركته.

سـؤال

أيهما أكبر μ_s أم μ_k ؟

من الأمثلة على الاحتكاك السكوني، عندما تسحب بلطف ملاءة فوق الطاولة، وفوقها أطباق طعام، فتتحرك الأطباق معها، فيكون الاحتكاك بين الملاءة والأطباق سكونيًّا، والاحتكاك بين عجلات السيارة والأرض سكوني أيضًا في أثناء حركتها من غير انزلاق. أما مثال الاحتكاك الحركي، فهو كأن تسحب صندوقًا على سطح خشن ويتحرك الصندوق.

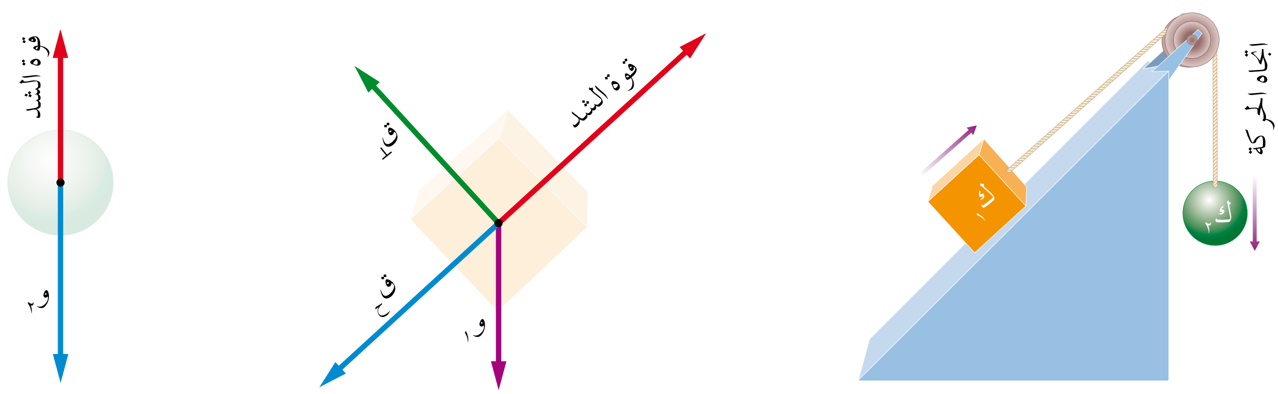
فكِّر: لماذا يستخدم العاملون في المصانع، وأماكن الصيانة والمحطات التي تكون أرضياتها مغطّاة بالزيوت والسوائل المختلفة أحذية خاصة، تصنع من موادّ مطاطيّة لها معامل احتكاك كبير؟

انظر الشكل (٣–١٥)، ثمّ تعرّف على مواصفات مثل هذه الأحذية.

الشكل (٣–١٥): حذاء أمان.

(٣–٣–٥) مخطط الجسم الحر

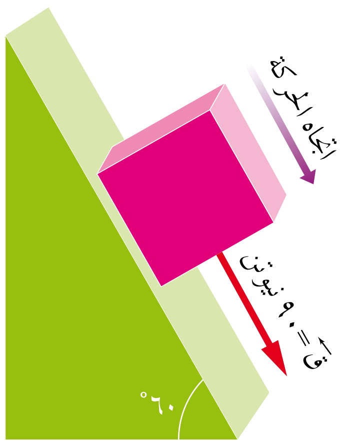
هو رسم تخطيطي يستخدم لتمثيل القوى المؤثرة جميعها في جسم، بحيث يُمَثّل فيه الجسم بنقطة، ومن ثم تُمثّل كل قوة من القوى المؤثرة بسهم يتناسب طوله مع مقدار تلك القوة واتجاهه يشير إلى اتجاهها، كما في الشكل (٣–١٦).



الشكل (٣–١٦): مخطط الجسم الحر للجسمين ك١، ك٢ .

مثال (٣–٢)

إذا أثرت قوة مقدارها ٩٠ نيوتن في صندوق كتلته ١٥ كغ يتحرك على مستوى أملس يميل عن الأفق بزاوية ٦٠ °، كما في الشكل (٣–١٧). فاحسب:



الشكل (٣–١٧): المثال (٣–٢).

١ القوة العمودية (ق⊥).

٢ تسارع الصندوق.

الحلّ:

١ نرسم مخطط الجسم الحر، ونحلل الوزن إلى مركبتين كما في الشكل (٣–١٨)، ثم نطبق القانون الثاني في الحركة في الاتجاه العمودي على المستوى المائل:

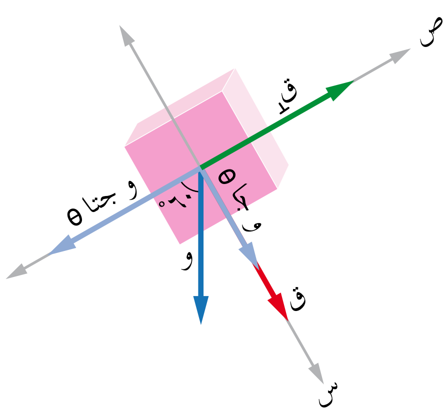
Σ ق$_{\text{ص}}$ = ك ت$_{\text{ص}}$ ،بما أن الصندوق متزن عموديًّا، فإن ت$_{\text{ص}}$ = صفر

ق⊥ – وجتا θ = صفر

ق⊥ = وجتا θ = ك جـ جتا θ

ق⊥ = ١٥ × ٩,٨ × جتا ٦٠ °

= ١٥ × ٩,٨ × ٠,٥ = ٧٣,٥ نيوتن، لاحظ أن: ق⊥ < و



الشكل (٣–١٨): مخطط الجسم الحر للمثال (٣–٢).

٢ لحساب تسارع الصندوق نطبق القانون الثاني في الحركة في الاتجاه الموازي للمستوى المائل:

Σ ق$_{\text{س}}$ = ك ت$_{\text{س}}$

ق + وجا ٦٠ ° = ك × ت$_{\text{س}}$

٩٠ + ١٥ ×٩,٨×٠,٨٧ = ١٥ × ت$_{\text{س}}$

٢١٧,٨٩ = ١٥ ت$_{\text{س}}$ ← ت$_{\text{س}}$ = ١٤,٥٢م/ ث^{٢}

مثال (٣–٣)

وضع مكعب كتلته (٤) كغ على سطح مستوي يميل عن الأفق بزاوية (٣٧°)، كما في الشكل (٣–١٩/أ)، إذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين المكعب والسطح يساوي (٠,٨)، فبيّن أن المكعب في حالة اتزان سكوني، ثم احسب قوة الاحتكاك مع السطح.

الحلّ:

يبقى الجسم في حالة اتزان سكوني إذا كان مقدار مركبة الوزن الموازية للسطح (ق) أقل من أو تساوي القيمة العظمى لقوة الاحتكاك،

(ق ح) عظمى = ق⊥ × μ_s ، لكن ق⊥ = ك جـ جتا ٣٧°،

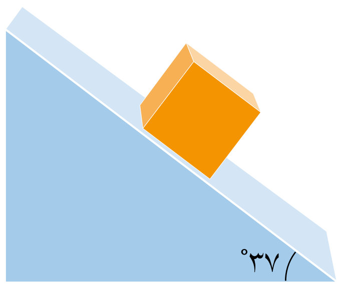
انظر الشكل (٣–١٩/ب)

(ق ح) عظمى = ٤ × ٩,٨ × ٠,٨ × ٠,٨ = ٢٥,٠٩ نيوتن

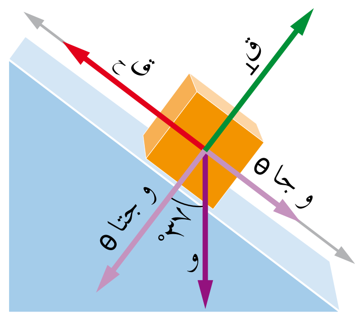
ق = ك جـ جا ٣٧° = ٤ × ٩,٨ × ٠,٦ = ٢٣,٥٢ نيوتن

بما أن ق < (ق ح) عظمى ، فإن المكعب في حالة اتزان سكوني،

ق ح سكو = ق = ٢٣,٥٢ نيوتن، موازية للسطح نحو الأعلى.



الشكل (٣–١٩/أ): مثال (٣–٣).

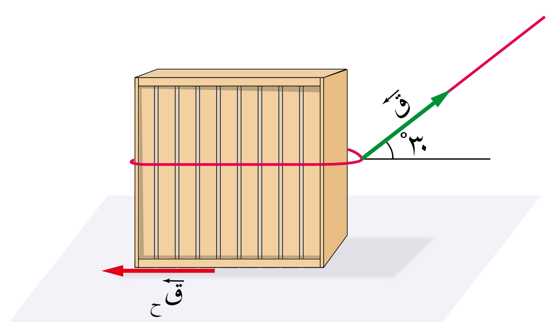


الشكل (٣–١٩/ب): مثال (٣–٣).

مثال (٣–٤)

يُسحب صندوق كتلته ١٠ كغ، على أرض أفقية بواسطة حبل بقوة مقدارها ٤٠ نيوتن، تميل عن الأفق بزاوية ٣٠°، كما في الشكل (٣–٢٠)، إذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين الأرض والصندوق μ_k =٠,٣ ،

فاحسب تسارع الصندوق.



الشكل (٣–٢٠): مثال (٣–٤).

الحلّ:

- نرسم مخطط الجسم الحر للصندوق، ونبين عليه القوى المؤثرة فيه، كما في الشكل (٣–٢١).
- نحلل قوة الشد إلى مركبتين سينية وصادية.
  - نطبق القانون الثاني لنيوتن في الحركة على محور الصادات:

Σ ق ص = ك ت ص

ق⊥ + ق جا ٣٠° – و = صفر، (حيث إن الصندوق متزن رأسيًّا)

ق⊥ = ك جـ – ق جا٣٠° = ١٠ × ٩,٨ – ٤٠ × ٠,٥ = ٧٨ نيوتن

لاحظ أن القوة العمودية أقل من الوزن.

- نطبق القانون الثاني لنيوتن في الحركة على محور السينات:

$$\sum ق_س = ك\ ت_س$$

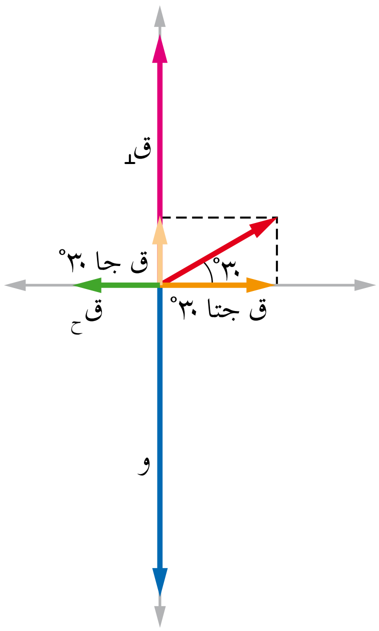
$$ق\ جتا ٣٠° - ق_{حر} = ك\ ت_س$$

$$ق\ جتا ٣٠° - \mu_k\ ق_١ = ك\ ت_س$$

$$ت_س = \frac{(ق\ جتا ٣٠° - \mu_k \times ق_١)}{ك}$$

$$ت_س = \frac{(٤٠ \times ٠{,}٨٧ - (٠{,}٣ \times ٧٨))}{ك}$$

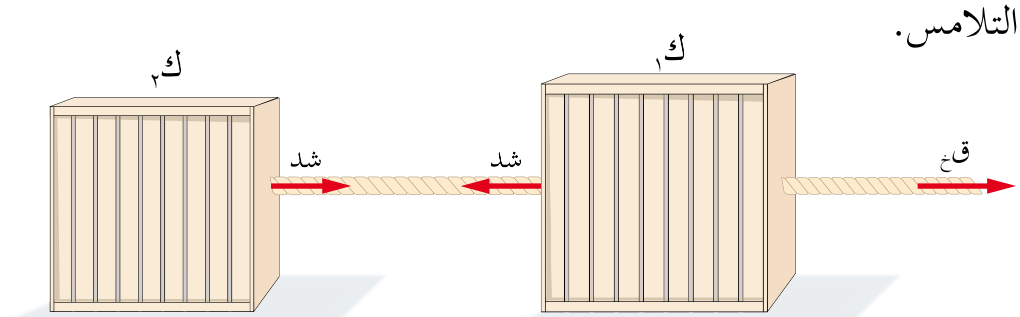
$$= \frac{(٣٤{,}٦ - ٢٣{,}٤)}{١٠} = ١{,}١٢\ م/ث^٢$$



الشكل (٣-٢١): مخطط الجسم الحر مثال (٣-٤).

(٣-٣-٦) نظام من جسمين

عندما يُسحب جسم بوساطة حبل، فإنّ الحبل يؤثر فيه بقوة تُسمّى قوة الشدّ، وهي تُعدّ مثالًا على قوى التلامس.



الشكل (٣-٢٢): نظام مكون من جسمين.

يبين الشكل (٣-٢٢) نظامًا يتكون من جسمين في حالة حركة تحت تأثير قوة سحب خارجية نحو اليمين ($ق_خ$)، يتصل الجسمان معًا بوساطة حبل، فتؤثّر فيهما قوّتا شدّ متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه (شد). لدراسة النظام نطبق عليه القانون الثاني في الحركة، ونهمل قوى الشدّ في الحبل، لأنها قوى داخلية، ويتحرك النظام بتسارع واحد وفق العلاقة الآتية:

$ق_خ = ك_{نظام} \times ت_{نظام}$ .... (٣-١٠)

أمّا لدراسة حركة أحد الجسمين بشكل منفصل، فإننا سنتعامل مع القوى المؤثرة جميعها في هذا الجسم بشكل مباشر، مثل وزنه وقوة الشدّ والقوى الخارجية وقوة الاحتكاك، والأمثلة الآتية توضح ذلك.

مثال (٣-٥)

إذا كانت كتلة الجسم الأول في الشكل (٣-٢٢) تساوي ٣ كغ، وكتلة الجسم الثاني ٢ كغ، $ق_{خ}$ = ١٠ نيوتن، وكلا الجسمان موضوعين على سطح أملس، فاحسب كلًّا من تسارع المجموعة والشد في الحبل.

الحلّ:

$ق_{خ} = ك_{نظام} \times ت_{نظام}$

$١٠ = (٣ + ٢) \times ت_{نظام}$

$ت_{نظام} = ٢ م/ث^{٢}$

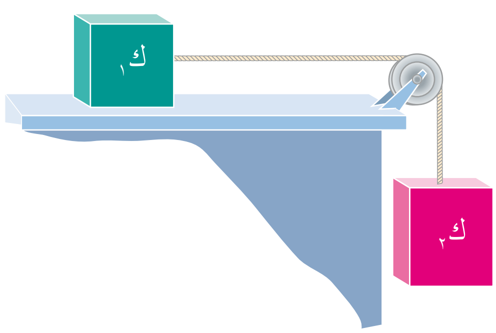
وبدراسة الجسم الثاني، حيث تؤثر به قوة الشد إلى اليمين، وتسارعه مساوٍ لتسارع النظام فإنّ:

$شد = ك_{٢} \times ت_{نظام}$

$= ٢ \times ٢ = ٤$ نيوتن

مثال (٣-٦)

نظام مكون من جسمين يتصلان بحبل يمر من فوق بكرة ملساء؛ الأول كتلته ٤ كغ، موضوع على سطح أفقي أملس، والثاني كتلته ٦ كغ، معلق في الحبل، كما في الشكل (٣-٢٣) إذا تحركت المجموعة. فجد كل من: تسارع المجموعة، والشد في الحبل.



الشكل (٣-٢٣): مثال (٣-٦).

الحلّ:

نلاحظ أن $ك_{١}$، $ك_{٢}$ لهما التسارع ذاته

نرسم مخطط الجسم الحر لكل من الجسمين بصورة منفردة كما في الشكل (٣-٢٤).

بتطبيق القانون الثاني في الحركة على الكتلة ($ك_{٢}$)

$\sum ق = ك_{٢}\, ت$

$ك_{٢}\, جـ - شد = ك_{٢}\, ت$ .... (١)

بتطبيق القانون الثاني في الحركة على الكتلة ($ك_{١}$) بالاتجاه الموازي للسطح نحصل على:

$شد = ك_{١}\, ت$ .... (٢)

بجمع المعادلتين (١) و(٢)، نحصل على:

$ك_٢ جـ = (ك_١ + ك_٢) ت$

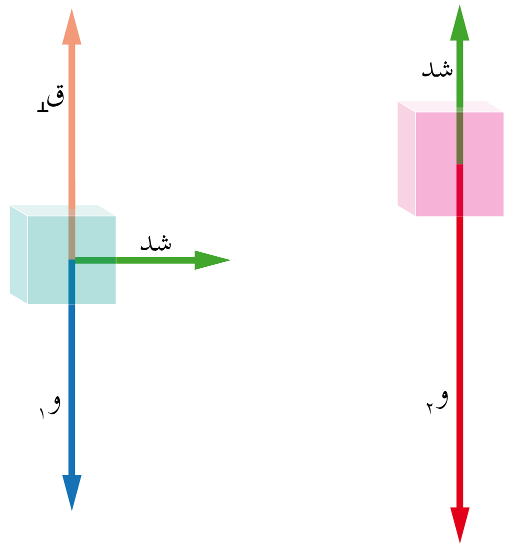
٦ ×٩,٨ = (٦+٤) ت

٥٨,٨ = ١٠ ت

ت = ٥,٨٨ م/ث^٢

لحساب قوة الشد نعوض في المعادلة (٢)

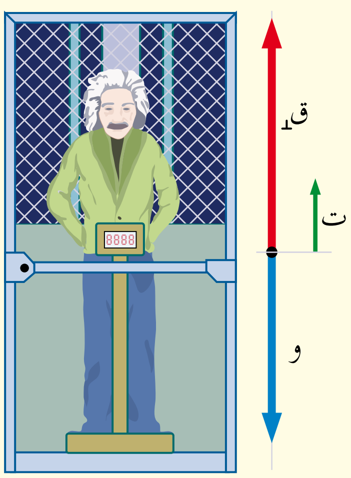
شد = (٤ × ٥,٨٨) = ٢٣,٥٢ نيوتن



الشكل (٣-٢٤): مخطط الجسم الحر، مثال (٣-٦).

توسع

من المعروف أن المصعد يتحرك إلى أعلى أو إلى أسفل، وعند بداية الحركة في الحالتين فإنه يتحرك بتسارع، ثم بسرعة ثابتة، ثم يتباطأ قبل أن يتوقف، وعندما تكون واقفًا في المصعد فإنك تشعر بزيادة وزنك عند بداية انطلاقه إلى أعلى، وبنقصانه قبل أن يتوقف، بينما يحدث العكس تمامًا عند هبوط المصعد إلى أسفل، أي تشعر بنقصان الوزن عند بداية انطلاقه إلى أسفل وبزيادته قبل التوقف، فما علاقة تغير شكل الحركة للمصعد بشعورك بتغير الوزن؟



الشكل(٣-٢٥): مصعد يتحرك إلى أعلى.

يمثل الشكل (٣-٢٥) شخص وزنه (و) يقف على ميزان نابضي يستقر على أرضية مصعد ساكن، وفي هذه الحالة يؤثر في الشخص قوتان: وزنه إلى أسفل، ورد فعل أرضية المصعد إلى أعلى (القوة العمودية)، وحيث إن الشخص ساكن، فإن هاتين القوتين تكونان متساويتين في المقدار، أي أن:

$ق_⊥$ = و ، وهي تمثل قراءة الميزان.

عندما يتحرك المصعد إلى أعلى بتسارع (ت)، فإنه وحسب القانون الثاني في الحركة لنيوتن، تكون القوة المحصلة المؤثرة في الشخص ($ق_م$):

$ق_م = ق_⊥ - و$ = ك ت ، حيث ك: كتلة الشخص، أي أن:

$ق_⊥$ = و + ك ت، أي أن قراءة الميزان تزداد بمقدار (ك ت) عن الوزن الحقيقي للشخص، لذا يطلق عليها

اسم الوزن الظاهري، ويزداد شعور الشخص بزيادة وزنه كلما زاد تسارع المصعد (لماذا؟).

بعد مدة وجيزة من انطلاق المصعد تصبح حركته منتظمة السرعة (يتحرك بسرعة ثابتة؛ لذا يعود الشخص إلى حالة الاتزان مرة أخرى، أي أن: ت = صفرًا ، ومنها: ق$_{١}$ = و ، وعندها يشعر الشخص بانعدام الحركة لأن وزنه الظاهري أصبح مساويًا لوزنه الحقيقي.

عندما يتباطأ المصعد قبل التوقف يكون اتجاه التسارع إلى أسفل (تذكر أنه في حالة التباطؤ يكون اتجاه التسارع بعكس اتجاه الحركة)، أي أن التسارع يكون سالبًا، وتكون القوة المحصلة المؤثرة في الشخص:
ق$_{م}$ = ق$_{١}$ – و = ك (– ت) ، ومنها ق$_{١}$ = و – ك ت ؛ لذا يشعر الشخص بنقصان وزنه بمقدار (ك ت)، أي أن وزنه الظاهري في هذه الحالة يكون أقل من وزنه الحقيقي.

على غرار ما سبق، حاول أن تتوصل إلى علاقة الوزن الظاهري للشخص بوزنه الحقيقي في أثناء هبوط المصعد، ثم حدد الحالة التي يصبح فيها الوزن الظاهري للشخص صفرًا، وهي ما يطلق عليها اسم: ظاهرة انعدام الوزن.

مراجعة (٣-٣)

١ ما المقصود بقوة الاحتكاك، وكيف تنشأ؟

٢ ما العوامل التي تعتمد عليها قوة الاحتكاك؟

٣ أعط أمثلة تميز فيها بين الاحتكاك السكوني والاحتكاك الحركي.

٤ تؤثر القوة العمودية في أجسام موضوعة فوق سطوح أفقية. متى تكون هذه القوة مساوية لوزن الجسم، ومتى تكون أقل منه، ومتى تكون أكبر؟

نشاط تمهيدي

• ربما ركبت هذا الدولاب الضخم كما في الشكل (٣-٢٦).

هل قمت بقياس الزمن في الدورات؟ احسب سرعتك الدورانية، هل تحتاج لمعرفة طول محيط هذا المسار الدائري؟

الشكل (٣-٢٦) دولاب دوّار.

(٣-٤-١) الحركة الدائرية المنتظمة.

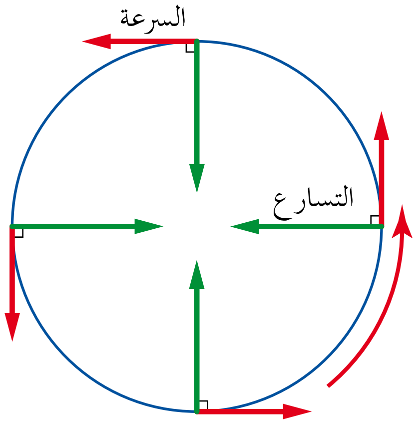
في الحركة الدائرية المنتظمة يتحرك الجسم على محيط دائرة بسرعة مماسية ثابتة مقدارًا، تعطى بالعلاقة:

$$ع = \frac{\text{طول المسار الدائري}}{\text{الزمن اللازم لإتمام دورة واحدة}}$$

ويسمى الزمن اللازم لإتمام دورة واحدة الزمن الدوري.

$$ع = \frac{٢\pi \text{ نق}}{ز_{\text{دوري}}} \quad \text{.........} \quad (٣-١١)$$

الشكل (٣-٢٧/أ): حركة المرور حول دوار.



الشكل (٣-٢٧/ب): مخطط الحركة.

يبين الشكل (٣-٢٧/أ) حركة المرور في دوار، وعند رسم المخطط التوضيحي لحركة سيارة، كما في الشكل (٣-٢٧/ب)، يتبين أن اتجاه السرعة يتغير من موقع إلى آخر على محيط الدائرة، وهذا يعني أن السيارة تتسارع. فما سبب هذا التسارع؟ تعرّفنا سابقًا إلى مفهوم التسارع المتوسط، وهو معدل تغير السرعة بالنسبة إلى الزمن، أي أنّ:

$$ت = \frac{\Delta ع}{\Delta ز} = \frac{ع_٢ - ع_١}{ز_٢ - ز_١} \quad \text{.........} \quad (٣-١٢)$$

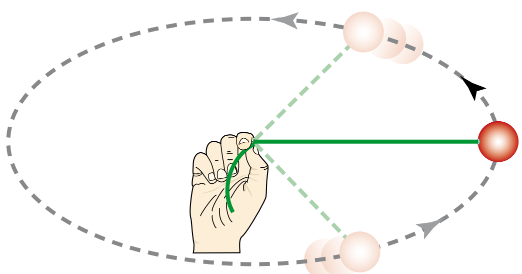
وينتج التسارع في الحركة الدائرية المنتظمة عن تغيّر في اتجاه السرعة، مع بقاء مقدارها ثابتًا،

وحيث إن التسارع كمية متجهة، فإن اتجاهه عند أي لحظة يكون باتجاه مركز المسار الدائري، عموديًّا على اتجاه السرعة المماسية؛ لذا يطلق عليه اسم: **التسارع المركزي** Centripetal Acceleration، ويرتبط بالسرعة المماسية بالعلاقة:

$$ت_م = \frac{ع^2}{نق} \quad .... (٣-١٣)$$

حيث $ت_م$: التسارع المركزي.

(٣-٤-٢) القوة المركزية


الشكل (٣-٢٨): القوة المركزية.

اربط كرة صغيرة بطرف خيط وأمسك بطرفه الآخر، ولوّح به بحركة دائرية في مستوى أفقي كما في الشكل (٣-٢٨)، تشعر أن عليك أن تسحب الخيط باستمرار إلى الداخل لتحافظ على دوران الكرة في مسار دائري نصف قطره ثابت؛ لأنك إذا أفلت الخيط ستلاحظ خروج الكرة عن المسار الدائري وابتعادها؛ ما يعني أنه توجد قوة تؤثر في الكرة باستمرار نحو مركز الدوران. إن الحركة الدائرية كغيرها من أشكال الحركة الأخرى تخضع لقوانين نيوتن، وحيث إن الكرة التي تتحرك بسرعة مماسية ثابتة، لها تسارع مركزي، فلا بد من وجود قوة محصلة وفق القانون الثاني في الحركة لنيوتن سببت هذا التسارع، وتكون باتجاهه، أي نحو مركز الدوران؛ لذا تدعى القوة المركزية ($ق_م$) Centripetal Force. وفي حالة الكرة، تكون القوة المركزية المؤثرة فيها هي قوة شد الخيط.

وبتطبيق القانون الثاني في الحركة لنيوتن:

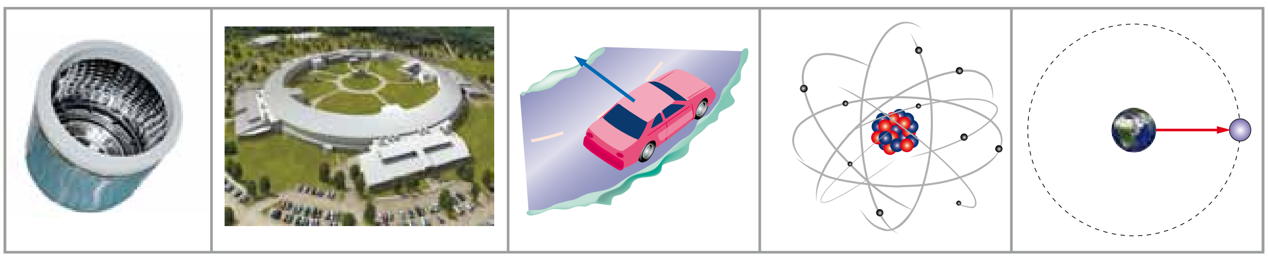
$ق_م = ك\ ت_م$ نجد أن:

$$ق_م = \frac{ك\ ع^2}{نق} \quad .... (٣-١٤).$$

ويشار هنا إلى أن القوة المركزية ليست نوعًا جديدًا من القوى، بل هي صفة لأية قوة تؤثر في جسم فتجبره على الحركة في مسار دائري، فهي يمكن أن تكون:

- قوة شدّ في خيط تؤثر في الكرة المربوطة به، لتدور في مسار دائري. كما في الشكل (٣-٢٨).
- قوة جذب كتلي تؤثر بها الأرض في القمر، فيدور القمر حولها، كما في الشكل (٣-٢٩/أ).

- قوة جذب كهربائي تؤثر بها النواة في إلكترون، فيدور الإلكترون حولها، كما في الشكل (٣-٢٩/ب).
- قوة احتكاك سكوني بين سطحي جسمين، كما هو حال سيارة تسير حول دوار، كما في الشكل (٣-٢٩/جـ).
- قوة مغناطيسية يؤثر بها مجال مغناطيسي منتظم في جسيم مشحون يتحرك بسرعة عمودية على المجال كما في المسارعات النووية، كما في الشكل (٣-٢٩/د).
- قوة عمودية يؤثر بها السطح الداخلي لأسطوانة دوارة على جسم بداخلها، فيدور معها، كما في الغسالة، كما في الشكل (٣-٢٩/هـ).



(أ) (ب) (جـ) (د) (هـ)

الشكل (٣-٢٩): صور مختلفة لقوى تعمل على أنها قوى مركزية.

سـؤال

هل يُعدّ الجسم الذي يدور في مسار دائري منتظم متزنًا؟ فسّر إجابتك.

(٣-٤-٣) تطبيقات القوة المركزية

أولا: القوة العمودية في الغسالة: تحتوي غسالة الملابس على حوض تجفيف أسطواني الشكل مثقب، كما في الشكل (٣-٢٩/هـ)، يدور بسرعة كبيرة، وتتأثر الملابس الرطبة الملاصقة لجداره الداخلي بقوة عمودية تعمل كقوة مركزية، في حين لا تتأثر قطرات الماء العالقة بالملابس بهذه القوة فتخرج من ثقوب الحوض؛ ما يساعد على تجفيف الملابس.

ثانيًا: قوة الاحتكاك السكوني في السيارة: إن انعطاف السيارة في مسار دائري على طريق أفقية يحتاج إلى قوة مركزية كافية لإبقائها في المسار، وهذا ما يجب أن توفره قوة الاحتكاك السكوني بين عجلات السيارة والطريق. وعندما لا تكون هذه القوة كافية، كما يحدث في الأيام الممطرة، أو العجلات المتآكلة، تنزلق السيارة وتخرج عن مسارها الدائري، باتجاه المماس.

مثال (٣-٧)

تسير سيارة على طريق أفقية بسرعة ١٤م/ ث، إذا انعطفت السيارة لتسير في مسار دائري نصف قطره ٥٠ م، ما أقل قيمة لمعامل الاحتكاك السكوني بين عجلات السيارة والطريق التي تضمن عدم خروج السيارة عن المسار الدائري؟

الحلّ:

من الشكل (٣-٢٩/جـ) نرسم مخطط الجسم الحر للسيارة كما في الشكل (٣-٣٠).

$$ق_{حسكو} = ق_{م}$$

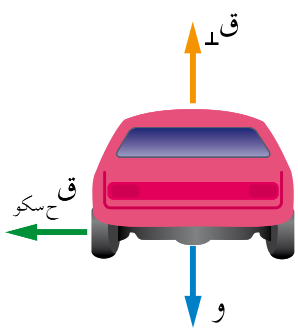
$$\mu_s\, ق_{\perp} = \frac{ك\, ع^{٢}}{نق}$$

$$\mu_s\, ك\, جـ = \frac{ك\, ع^{٢}}{نق}$$

$$\mu_s = \frac{ع^{٢}}{نق\, جـ}$$

$$\mu_s = \frac{(١٤)^{٢}}{٥٠ \times ٩,٨}$$

μ_s = ٠,٤ أقل قيمة لمعامل الاحتكاك تضمن بقاء السيارة في المسار الدائري.



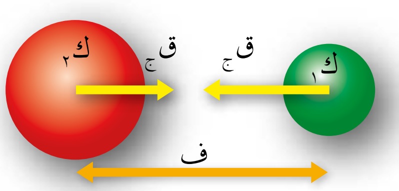
الشكل (٣-٣٠): مثال (٣-٧).

(٣-٤-٤) قانون الجذب العام

تعرّفت أن قوة جذب الأرض للأجسام قوة مجال تؤثر عن بعد. ويطلق على المنطقة المحيطة بالأرض التي تظهر فيها آثار قوة الجذب اسم: مجال الجاذبية الأرضية، ويمكن تمثيله عند أي نقطة بخط مجال يمر بالجسم الموجود عند تلك النقطة، ويتجه نحو مركز الأرض، كما في الشكل (٣-٣١).


الشكل (٣-٣١): مجال جذب الأرض.

لقد بين نيوتن أن أي جسمين ماديين في الكون يوجد بينهما قوة جذب متبادلة، وصاغ قانونًا يدعى قانون الجذب العام ينص على: **كل جسمين ماديين في الكون يتجاذبان بقوة، تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب كتلتيهما، وعكسيًّا مع مربع المسافة بين مركزيهما.** انظر الشكل(٣-٣٢)



الشكل (٣-٣٢): قوة الجذب.

وعبّر عن ذلك بالعلاقة الرياضيّة الآتية:

$$ق_ج = \frac{ث_ج (ك_١ ك_٢)}{ف^٢} \quad .... (٣-١٥)$$

حيث: $ث_ج = ٦,٦٧ \times ١٠^{-١١}$ نيوتن. م^٢/ كغ^٢، ويسمى ثابت الجذب العام، ف: المسافة بين مركزي الكتلتين $ك_١$، $ك_٢$

حساب تسارع الجاذبية الأرضية

لو فرضنا وجود جسم كتلته $ك_{جسم}$ على سطح الأرض، ويبعد عن مركز الأرض مسافة $نق_{أرض}$، فإنه وفق قانون الجذب العام يتأثر بقوة جذب كتلي:

$$ق_ج = \frac{ث_ج (ك_{أرض} \times ك_{جسم})}{نق^٢_{أرض}} \quad .... (٣-١٦)$$

إذا سُمح لهذا الجسم بالحركة تحت تأثير قوة الجذب، فإنه وفق القانون الثاني لنيوتن في الحركة سيكتسب تسارعًا جـ ، حيث:

$جـ = \frac{ق_ج}{ك_{جسم}}$ ، أي أن:

$$جـ = \frac{ث_ج ك_{أرض}}{نق^٢_{أرض}} \quad .... (٣-١٧)$$

$$جـ = \frac{(٦,٦٧ \times ١٠^{-١١} \times ٥,٩٧ \times ١٠^{٢٤})}{(٦,٣٨ \times ١٠^{٦})^٢} \cong ٩,٨١ \text{ م/ ث}^٢.$$

وهي القيمة المقبولة لتسارع السقوط الحر، كما تعرفتها سابقًا.

ولحساب تسارع السقوط الحر على سطح أي كوكب، تعمم العلاقة السابقة، لتصبح:

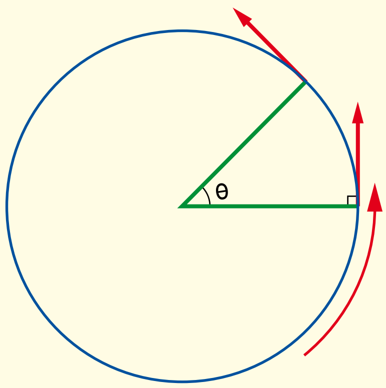
$$جـ_{كوكب} = \frac{ث_ج ك_{كوكب}}{نق^٢_{كوكب}} \quad .... (٣-١٨)$$

نلاحظ أن تسارع السقوط الحر على سطح أي كوكب يعتمد على كتلة الكوكب ونصف قطره فقط.

إن مقدار تسارع الجاذبية الأرضية جـ يتغير بتغير الارتفاع عن سطح الأرض، فهو يقل في المناطق المرتفعة، وتبعًا لذلك يتغير وزن الجسم، وهذا بخلاف الكتلة، أي أن الوزن ليس خاصية ذاتية للجسم، ويمكننا استخدام وزني جسمين للمقارنة بين كتلتيهما، إذا كانا في المكان نفسه فقط، كما نفعل عند استخدام الميزان ذي الكفتين.

توسع

تعرفت في الدرس الكميات المستخدمة في وصف الحركة الدائرية، مثل نصف قطر المسار الدائري، والسرعة المماسية والتسارع المركزي. هناك وصف آخر لهذه الحركة؛ إذ يمكن ربط المفاهيم السابقة بالزاوية المركزية ونصف القطر؛ فيُنظر **للإزاحة الزاوية**، على أنّها الزاوية المركزية التي يمسحها نصف قطر الحركة الدائرية للجسم عند دورانه، ويرمز لها بالرمز: (θ). انظر الشكل (٣-٣٣)، **والسرعة الزاويّة** (ω)، هي الزاوية المركزية التي يمسحها نصف القطر في الثانية، وعندما تكون السرعة الزاويّة متغيّرة، فإنّ هناك تسارعًا زاويًا (α).



الشكل(٣-٣٣): الإزاحة الزاوية.

مراجعة (٣-٤)

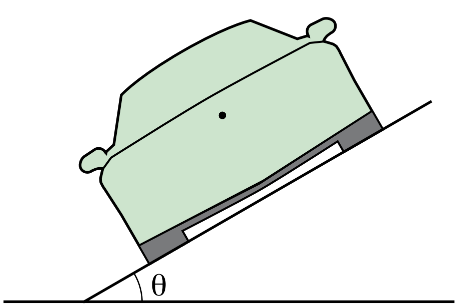
١ كرة مربوطة بخيط تتحرك حركة دائرية، وضح كيف سيكون اتجاه حركتها، لحظة إفلات الخيط.

٢ تنجذب الأرض نحو جسم معين بقوة مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه للقوة التي تجذب بها الأرض هذا الجسم. وضح لماذا لا يكون تسارع الأرض مساويًا لتسارع الجسم.

٣ علل كلاً مما يأتي:

- كلما ازداد بعد الجسم عن مركز الأرض قل وزنه.
- يشعر رائد الفضاء بانعدام الوزن عند وجوده داخل مركبة في مدار حول الأرض.

٤ **فكر**: تُصمم المنعطفات الدائرية بحيث تميل بزاوية θ عن الأفق، كما في الشكل (٣-٣٤)، ارسم مخطط الجسم الحر لسيارة تتحرك بسرعة ع. وبين عليه القوى المؤثرة في السيارة، ثم حدد القوة المركزية.



الشكل (٣-٣٤): فكر.

المشروع الثالث: رافعة تعمل بقوة الاحتكاك

■ فكرة المشروع:

تستخدم الروافع في مجالات واسعة في الحياة، منها الصغيرة التي يرفع بها محرك سيارة في ورشة، ومنها ما يستخدم في الموانئ، ويرفع الحمولات الكبيرة، وتؤثر الرافعة في الثقل المراد رفعه بقوة شد بوساطة حبل مناسب، وتنتهي بخطاف، أو بمغناطيس قوي أحيانًا يلتقط الكتل الحديدية فقط. تقوم فكرة المشروع على تصميم رافعة لاختبار مقدرة الاحتكاك على رفع الكتل.

■ الفرضية:

ضع فرضية لاختبار قوة الاحتكاك القصوى بين صفحات كتابين، يثبت أحدهما في حبل يمر فوق بكرة، ويثبت الكتاب الثاني في الثقل المراد رفعه. انظر الشكل (٣-٣٥). قد تكون الفرضية " يمكن رفع كتلة ٣٠ كغ بقوة احتكاك بين صفحات كتابين كل منهما يتألف من ٢٠٠ صفحة تقريبًا".

الشكل (٣-٣٥): تشابك أوراق الكتابين.

■ الخطة:

يخطط أعضاء الفريق لعمل رافعة بسيطة، ثم تجريبها، والتأكد من نجاحها، ثم استخدام كتل مختلفة، وتعليقها بالخطاف المتصل بالكتاب، ورفع الكتلة للوصول إلى الحد الأقصى. تتضمن الخطة أيضًا رصد الملاحظات وإجراء التعديلات الضرورية لضمان نجاح الخطة. وقد تلزم الأدوات الآتية: أجسام بأوزان مختلفة (٥، ١٠، ٢٠كغ)، خطاف للتعليق، ملزمة للتثبيت، بكرة، مكان لتثبيت البكرة، حبال.

■ الإجراءات:

الشكل (٣-٣٦): تشابك أوراق الكتابين.

1. أدخل صفحات الكتابين بحيث يتشابكان معًا، كما في الشكل (٣-٣٦).
2. ثبت ملزمة صغيرة على كعب كل من الكتابين وشدّها جيدًا.
3. ثبت بكرة في سطح أفقي بحيث تتدلى نحو الأسفل، كأن تعلق في السقف، أو أعلى الباب.
4. مرّر حبل فوق البكرة، وثبته بوساطة خطاف في إحدى الملزمتين، وابق طرفه الآخر حرًّا لتطبيق قوة الشد.
5. علّق في الخطاف المتصل بالملزمة الثانية ثقلٌ مناسب، يزن ٥ كغ مثلاً، ثم ارفع للأعلى بشد الحبل.
6. أعد الخطوة السابقة مع زيادة الثقل في كل مرة، ودوّن الملاحظات.

■ مناقشة النتائج:

- ما مصدر الخطأ في التجربة؟
- كيف يمكن تحسين التجربة وإدخال متغيرات عليها، مثل تغيير أعداد الصفحات.
- هل من علاقة بين عدد الصفحات، أو طريقة التداخل بينها مع الثقل الذي يمكن رفعه؟

١ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ ينزلق جسمان على مستوى مائل أملس، إذا كانت كتلة الأول تساوي مثلي كتلة الثاني، فإن نسبة تسارع الثاني إلى تسارع الأول، هي:

أ نصفها. ب نفسها. جـ مثلاها. د أربعة أمثالها.

٢ تنشأ قوة الاحتكاك بين سطحي جسمين خشنين، بسبب:

أ قوتي الفعل ورد الفعل. ب وزني الجسمين.

جـ قوة كهرسكونية. د قوة نووية.

٣ تؤثر قوتا الفعل ورد الفعل في جسمين متفاعلين، على الصورة الآتية:

أ تؤثر القوتان في كلا الجسمين. ب تؤثر قوة واحدة في كل جسم.

جـ تؤثر القوتان في جسم واحد. د تلغي القوتان بعضهما.

٤ جسم كتلته ١٠ كغ فإن وزنه (و) على سطح القمر بوحدة نيوتن:

أ صفر ب و > ٩٨ جـ و =٩٨ د و < ٩٨

٥ جسم كتلته ٥ كغ موضوع على سطح أفقي خشن معامل احتكاكه ٠,٢ ، أثرت فيه قوة أفقية مقدارها ٩ نيوتن، و لم يتحرك الجسم. فإن قوة الاحتكاك السكوني، تساوي بوحدة نيوتن:

أ صفر. ب ١ جـ ٩ د ١٠

٦ صورة جدارية كتلتها ١,٢ كغ، علقت رأسيًا على جدار بوساطة مسمار. القوة العمودية التي يؤثر بها الجدار في الصورة تساوي:

أ صفر. ب ١٠ نيوتن. جـ ١٢ نيوتن. د ٢٠ نيوتن.

٧ يقف رجل كتلته ٦٠ كغ على منصة حاملاً طفلته التي كتلتها ١٥ كغ على كتفيه. القوة العمودية التي تؤثر بها أرضية المنصة في الرجل تساوي:

أ صفرًا. ب ٧٥٠ نيوتن. جـ ٤٥٠ نيوتن. د ٦٠٠ نيوتن.

٨ كتلتان المسافة بين مركزيهما (ف) وقوة التجاذب الكتلي بينهما (٤×١٠$^{-٨}$) نيوتن، فإذا أصبح البعد بينهما (٢ف) فإن قوة التجاذب تصبح بوحدة نيوتن:

أ ١×١٠$^{-٨}$. ب ٢×١٠$^{-٨}$. جـ ٨×١٠$^{-٨}$. د ١٦×١٠$^{-٨}$.

٩ يبدأ جسم كتلته ٢كغ بالانزلاق من السكون على سطح مائل، ويقطع مسافة ٠,٨م في ٠,٥ ث فإن القوة المحصلة التي تؤثر في الجسم في أثناء انزلاقه على السطح المائل بوحدة نيوتن:

أ ٣,٢. ب ٦,٤. جـ ١,٦. د ١٢,٨.

٢ أجب عمّا يأتي:

أ وضح المقصود بكل من: قوة الاحتكاك السكوني، قوة الاحتكاك الحركي، مجال الجاذبية الأرضية، القوة المركزية، القوة العمودية.

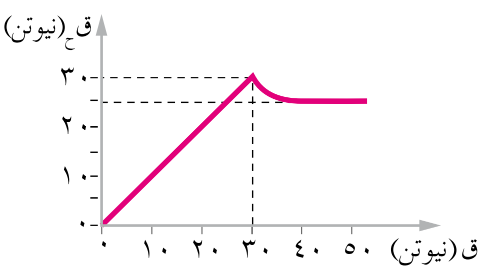
ب قذفت كرة كتلتها ك إلى الأعلى بسرعة ابتدائية، فإذا أهملنا مقاومة الهواء، فما القوى المؤثرة في الكرة في أثناء صعودها؟ وعندما تصل أقصى ارتفاع لها؟

جـ علل: قوة جذب القمر لجسم على سطحه أقل من قوة جذب الأرض للجسم نفسه عندما يكون على سطحها.

٣ يتحرك صندوق كتلته ٨ كغ بتسارع ٣ م/ث^{٢} على مستوى مائل خشن نحو الأسفل، فإذا كانت زاوية ميل السطح ٣٠° ، فاحسب:

أ قوة الاحتكاك بين الصندوق والسطح. ب معامل الاحتكاك الحركي.

٤ صندوق كتلته ٢٥كغ موضوع على أرض أفقية، تؤثر فيه قوة أفقية يتزايد مقدارها تدريجيًّا، والشكل (٣–٣٧) يوضح تغير قوة الاحتكاك بين سطح الصندوق والأرض بتغير القوة المؤثرة، اعتمادًا على بيانات الشكل جد ما يأتي:



الشكل (٣–٣٧): السؤال الرابع.

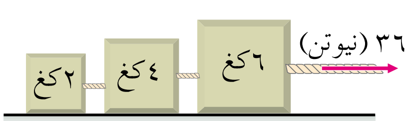
أ معامل الاحتكاك السكوني بين الأرض والصندوق.

ب معامل الاحتكاك الحركي بين الأرض والصندوق.

جـ تسارع الصندوق عندما كانت القوة المؤثرة ٤٠ نيوتن.

٥ ثلاث كتل متصلة بوساطة حبال مهملة الكتلة، سحبت بقوة أفقية على سطح أملس، كما في الشكل (٣–٣٨). جد ما يأتي:

أ تسارع النظام. ب قوة الشد في كل حبل.



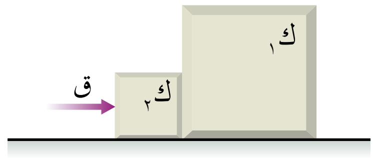
الشكل (٣–٣٨): السؤال الخامس.

٦ وضع صندوقان كتلتاهما: ك$_{١}$=٦كغ ، ك$_{٢}$=٤كغ جنبًا إلى جنب على طاولة أفقية ملساء. أثرت قوة دفع أفقية (ق) ثابتة مقدارها ٢٠ نيوتن نحو اليمين في الصندوق الصغير، كما في الشكل (٣-٣٩). أجب عن الأسئلة الآتية:

أ ما تسارع النظام (الصندوقين)؟

ب ارسم مخطط الجسم الحر للكتلة ك$_{٢}$؟

جـ احسب قوة التلامس بين الصندوقين.

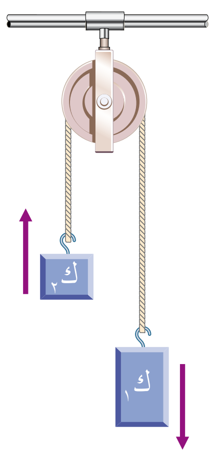


الشكل (٣-٣٩): السؤال السادس.

٧ يقود متسابق دراجة على مسار دائري أفقي نصف قطره ٣٠ م، بسرعة مماسية ١٠م/ ث. إذا كانت كتلة الدراجة والمتسابق معًا ٩٣كغ، فاحسب ما يأتي:

أ مقدار قوة الاحتكاك السكوني التي تؤثر كقوة مركزية.

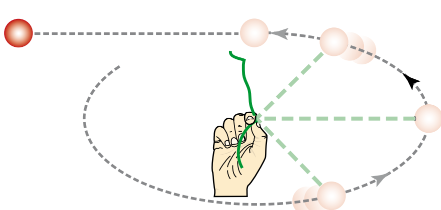
ب معامل الاحتكاك السكوني بين الطريق وعجلات الدراجة.



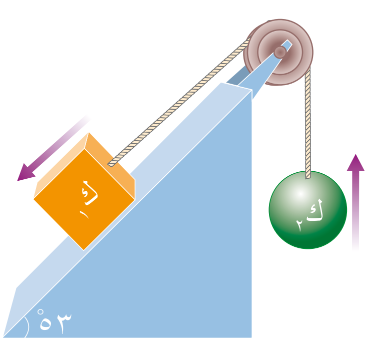
الشكل (٣-٤٠): السؤال الثامن.

٨ جسمان كتلة الأول ٥كغ، والثاني ٣كغ مربوطان معًا بواسطة حبل مهمل الكتلة، يمرر فوق بكرة ملساء مهملة الكتلة كما في الشكل(٣-٤٠) فإذا بدأ الجسمان حركتهما من السكون، فجد ما يأتي:

أ الشد في الحبل. ب تسارع النظام.


الشكل (٣-٤١): السؤال التاسع.

٩ كرة في نهاية خيط تدور في مسار أفقي نصف قطره ٠,٣ م على ارتفاع عن الأرض ١,٨م، انظر الشكل (٣-٤١). قُطِع الخيط وسقطت الكرة على مسافة أفقية ٢م من مسقط موقع الكرة على الأرض لحظة قطع الخيط. احسب التسارع المركزي للكرة في أثناء دورانها.



الشكل(٣-٤٢): السؤال العاشر.

١٠ نظام مكون من جسمين يتصلان بحبل يمر فوق بكرةملساء؛ الأول كتلته ٦ كغ، ينزلق على سطح مائل أملس، والثاني كتلته ٤ كغ، معلق في الحبل، كما في الشكل (٣-٤٢). جد كلًّا من:

أ تسارع النظام. ب الشد في الحبل.

الوحدة الأولى: الميكانيكا

الفصل الرابع

الشغل والطاقة
Work and Energy

في هذا الفصل

(٤–١): الشغل.

(٤–٢): الطاقة الميكانيكية والقدرة.

(٤–٣): حفظ الطاقة الميكانيكية.

الأهمية

يرتبط مفهوم الطاقة الميكانيكة بحياتنا ارتباطًا وثيقًا، فلا تخلو أيّ من الأنشطة اليومية التي نقوم بها من تحولات مختلفة للطاقة، كالمشي، وصعود الحافلة، وحمل الحقيبة، وتناول الطعام، والتمارين الرياضية. كل هذه النشاطات تمثل تحولات في الطاقة.

يبدأ المتسابق في رياضة القفز بالزانة باندفاع سريع وهو يحمل في يديه عصًا مرنة طويلة (تدعى الزانة)، وعندما يصل إلى الحاجز المرتفع يغرز الزانة في الأرض ويرتقي في الهواء محاولاً اجتياز الحاجز . وترتكز هذه الرياضة في جوهرها على مبدأ فيزيائي مهم ألا وهو تحويل الطاقة الحركية جراء سرعة اندفاع المتسابق إلى طاقة مرنة كامنة في الزانة ، ومن ثم تحويل الطاقة المرنة إلى طاقة وضع ترتقي بالمتسابق عاليًا في الهواء.

فكر:

- ما العوامل التي يعتمد عليها ارتفاع اللاعب في أثناء قفزه؟ وما أهمية استخدامه للزانة؟ وما الفائدة من انحنائها؟

الطاقة من حولنا

درست في الفصول السابقة حركة الأجسام، وأشكال تلك الحركة، وتعرّفت إلى مفهوم القوّة وأثرها في الحركة. وما سنتناوله في هذا الفصل لا يقل أهمية عن تلك المفاهيم؛ فالشغل والطاقة الميكانيكية كميتان فيزيائيتان ترتبطان بالقوة والحركة معًا، ويساعد فهمهما على تكوين صورة واضحة لعلم الميكانيكا. ولا تكاد تخلو لحظات حياتنا من التطبيقات العملية لهذه المفاهيم الفيزيائية.

بعد دراستك هذا الفصل، يتوقّع منك أن:

- توضح المقصود بالشغل الفيزيائي وحسابه باستخدام خاصية الضرب النقطي للمتجهات.
- تحلل الرسوم البيانية (القوة – المسافة) لحساب الشغل الذي تنجزه قوة ثابتة، وقوة متغيرة مثل النابض.
- تثبت العلاقة بين الشغل والتغير في الطاقة الحركية؛ مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية).
- تعرف الطاقة الميكانيكية والطاقة الحركية والطاقة الكامنة في مجال الجاذبية الأرضية والطاقة الكامنة (المرونيّة) والقدرة وتعبِّر عنهما رياضيًّا.
- توضح المقصود بالقوة المحافظة، والقوة غير المحافظة، والنظام المحافظ.
- تستنتج قانون حفظ الطاقة الميكانيكية في النظام المحافظ.
- تحل مسائل حسابية على الشغل، ونظرية الشغل، والطاقة، وحفظ الطاقة.
- تبين أهمية التطبيقات التكنولوجية المتعلقة بمفاهيم الشغل والطاقة في الحياة، مثل منصات القفز والنوابض في السيارة والمضخات.

٤–١ الشغل
WORK

نشاط تمهيدي

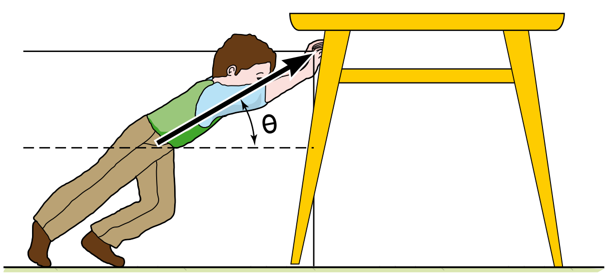
• يوضح الشكل (٤–١) صورًا لبعض النشاطات الحياتية التي توضح مفهوم الشغل. تأمل الشكل، ثم أجب عن الأسئلة التي تليه.

درست في صفوف سابقة مفهوم الشغل، وتعرفت العوامل التي يعتمد عليها، تأمّل الشكل (٤–١)، ثم أجب عن الأسئلة التي تليه:

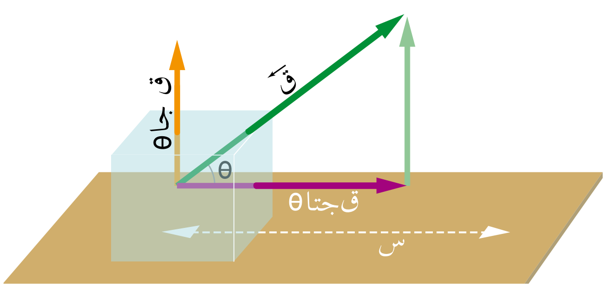
الشكل (٤–١): المفهوم الفيزيائي للشغل.

- هل تُعدّ الأعمال جميعها التي نقوم بها شغلاً بالمفهوم الفيزيائي؟
- أيّ المواقف في الأشكال السابقة تمثل حالات يُبذل فيها شغل؟

(٤–١–١) الشغل الذي تبذله قوة ثابتة



الشكل (٤–٢/أ): التأثير بقوة مائلة.



الشكل (٤–٢/ب): تحليل قوة دفع الصبي.

يبين الشكل (٤–٢/أ) صبيًّا يدفع طاولة، لاحظ الزاوية (θ) بين قوة دفعه والإزاحة التي ستحصل للطاولة. إذا حللنا قوة دفع الصبي للطاولة كما في الشكل (٤–٢/ب) إلى مركبتيها، سنجد أنّ المركبة الأفقية (السينية) لقوة الدفع (ق جتاθ) تكون باتجاه إزاحة الطاولة، وهي التي تنجز شغلاً، في حين أنّ المركبة الثانية (الصادية) (ق جاθ) المتعامدة مع المركبة الأولى لا تنجز شغلاً؛ أي إنّ:

ش = ق س جتاθ

حيث قَ: القوة المؤثرة، بوحدة نيوتن، سَ: الإزاحة بوحدة متر، θ: الزاوية المحصورة بين متجهي القوة والإزاحة، ش: الشغل الذي تنجزه القوة (ق).

ويقاس الشغل بوحدة نيوتن متر، وتسمى جول.

وباستخدام الضرب النقطي للمتجهات يمكن كتابة العلاقة الرياضية للشغل لتصبح:

ش = $\vec{\text{ق}}$. $\vec{\text{س}}$ .... (٤–١)

فكّر: في الشكل (٤–٢)، لا تبذل المركبة العمودية للقوة (ق جاθ) شغلاً على الجسم. لماذا؟

> **فكرة**
>
> عندما تتحرك شحنة كهربائية في مجال مغناطيسي منتظم وباتجاه متعامد معه فإنها تتأثر بقوة مغناطيسية تجعلها تتحرك حركة دائرية منتظمة. هذا يعني أن القوة المغناطيسية لا تبذل شغلاً على الشحنة.

مثال (٤–١)

يسحب شاب حقيبة سفره مسافة ٢٠ مترًا على أرضية أفقية بقوة مقدارها ٥٠ نيوتن تميل عن الأفق بزاوية مقدارها ٣٧ ° . كما في الشكل (٤–٣) جد مقدار الشغل الذي يبذله الشاب في سحب الحقيبة؟

الحلّ:

يمكن إيجاد شغل القوة بتطبيق العلاقة (٤–١) مع مراعاة تحليل القوة إلى مركبتين أفقية وعمودية بالنسبة إلى السطح.

ش= ق س جتا θ

ش = ٥٠ × ٢٠ × جتا ٣٧ °

ش = ٨٠٠ جول.

الشكل (٤–٣): مثال (٤–١).

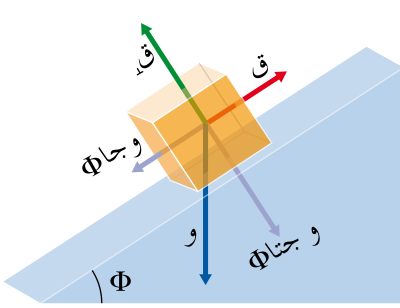
فكر:

- كيف يمكن للشاب أن يزيد من الشغل الذي يبذله، مع ثبات مقداري القوة والإزاحة؟
- ما العوامل التي يعتمد عليها الشغل؟ هل يمكن أن يكون الشغل سالبًا؟

مثال (٤–٢)

استخدم عامل مستوىً مائلاً أملس طوله ٥م، ويرتفع طرفه عن سطح الأرض ٣م، لسحب صندوق كتلته ٤٠ كغ بسرعة ثابتة كما في الشكل (٤–٤). احسب:

1. الشغل الذي بذله العامل لرفع الصندوق إلى أعلى السطح.
2. شغل قوة الجاذبية الأرضية (الوزن) في أثناء رفع الصندوق.



الشكل (٤–٤): مثال (٤–٢).

③ الشغل الكلي على الصندوق.

الحلّ:

لحساب شغل قوة العامل يلزم أولًا تحليل القوى بالنسبة إلى المستوى المائل، حيث يحلل الوزن إلى مركبة عمودية على السطح (وجتا Φ)، حيث Φ هي زاوية ميل المستوى عن الأفق، وأخرى موازية للسطح هي (وجا Φ).

① الشغل الذي بذله العامل:

ش $_{\text{خارجي}}$ = ق س جتا θ، حيث θ الزاوية بين اتجاه قوة العامل والإزاحة.

وحيث إن الجسم يتحرك بسرعة ثابتة، فإن:

قوة العامل ق تساوي مركبة الوزن الموازية للسطح من حيث المقدار أي أن:

ق – و جاΦ = ٠ و= ك جـ = ٤٠ × ٩,٨ = ٣٩٢ نيوتن، جاΦ = المقابل/ الوتر

ق = و جاΦ = ٣٩٢ $\left(\frac{٣}{٥}\right)$ ، ق= ٢٣٥,٥ نيوتن،

ش$_{\text{خارجي}}$ = ق س جتا θ، حيث θ = صفر (الإزاحة باتجاه القوة).

ش$_{\text{خارجي}}$ = ٢٣٥,٥ × ٥ × ١ = ١١٧٦ جول

② الشغل الذي بذلته الجاذبية:

ش$_{\text{جاذبية}}$ = (و جاΦ) س جتاθ. لاحظ أن مركبة الوزن العمودية على المستوى لا تبذل شغلاً على الصندوق، وأن مركبة الوزن الموازية للمستوى (وجاΦ) تصنع زاوية مقدارها ١٨٠° مع الإزاحة؛ أي أنّ: θ = ١٨٠°

ش$_{\text{جاذبية}}$ =(٤٠×٩,٨ × ٠,٦) × ٥ × –١ = –١١٧٦ جول.

ماذا تعني الإشارة السالبة؟

③ الشغل الكلي على الصندوق

ش$_{\text{كلي}}$ = ش$_{\text{خارجي}}$ + ش$_{\text{جاذبية}}$ + ش$_{\text{احتكاك}}$ (ش$_{\text{احتكاك}}$ = صفر، لأن السطح أملس)

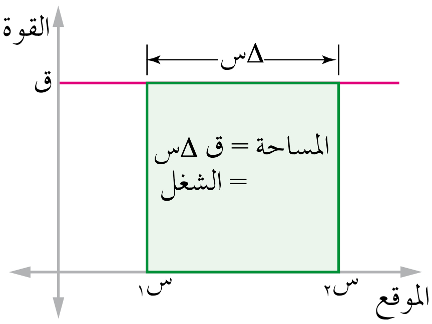
= ١١٧٦ – ١١٧٦ – صفر = صفر

سـؤال

هل يمكن التعميم أنه إذا تحرك جسم بسرعة ثابتة تحت تأثير مجموعة قوى فإن الشغل الكلي المبذول على الجسم يساوي صفرًا؟ فسّر إجابتك.

(٤-١-٢) الشغل الذي تبذله قوة متغيرة

يوضح الشكل (٤-٥)، تمثيلاً بيانيًّا للعلاقة بين قوة ثابتة تؤثر في جسم والإزاحة الناتجة. يتضح من الشكل أن المساحة المحصورة تحت المنحنى تساوي الشغل المبذول، فالمساحة على شكل مستطيل، قاعدته تساوي مقدار الإزاحة، وارتفاعه يساوي مقدار القوة.

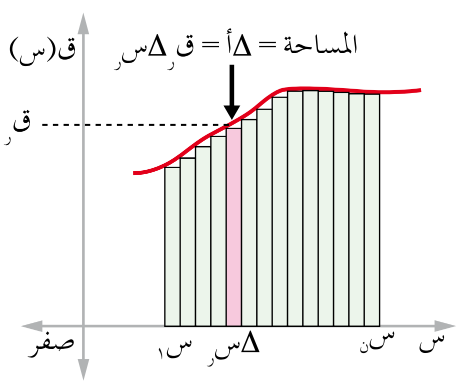


الشكل (٤-٥): تمثيل الشغل بيانيًا.

ماذا لو كانت القوة المؤثرة في الجسم متغيرة؟ هل جربت أن تشد نابضًا قويًّا بين يديك؟ كما في الشكل (٤-٦)، لعلك لاحظت أن مثل هذه الممارسة أو غيرها، تتطلب منك التأثير بقوة يتغيّر مقدارها باستمرار لإنجاز العمل المطلوب، فكلما زادت استطالة النابض تطلّب الأمر زيادة مقدار قوّتك.


الشكل (٤-٦): القوة المؤثرة في نابض.

هل يمكنك في مثل هذه الحالة حساب شغل القوة المتغيرة؟ إنّ حسابها يحتاج إلى مهارات رياضية متقدمة؛ لذا سنلجأ إلى طريقة مبسطة تعتمد على الرسم البياني. عند تمثيل العلاقة بين القوة المتغيرة والإزاحة بيانيًّا، كما في الشكل (٤-٧)، نلجأ إلى تجزئة الإزاحة إلى إزاحات صغيرة، بحيث نفترض أنّ مقدار القوة $ق_ر$: يكون ثابتًا خلال الإزاحة الجزئية $\Delta س_ر$، عندها يمكن التوصل إلى حساب الشغل $\Delta ش_ر$ الذي تنجزه القوة ($ق_ر$) من العلاقة الآتية:



الشكل (٤-٧): العلاقة (القوة – الإزاحة).

$$\Delta ش_ر = \vec{ق}_ر \cdot \Delta \vec{س}_ر \quad \text{.......} \quad (٤-٢)$$

حيث تمثل $\Delta ش_ر$ عدديًّا مساحة المستطيل (Δأ).

بجمع الأشغال $\Delta ش_ر$ نحصل على الشغل الكلي (ش):

$ش = \sum_{ر=١}^{ن} \Delta ش_ر = \sum_{ر=١}^{ن} (ق_ر \cdot \Delta \vec{س}_ر)$ حيث ن : عدد المستطيلات.

أي أن الشغل الكلي يساوي مجموع المساحات تحت المنحنى؛ سواء أكانت القوة ثابتة أم متغيرة.

مثال (٤–٣)

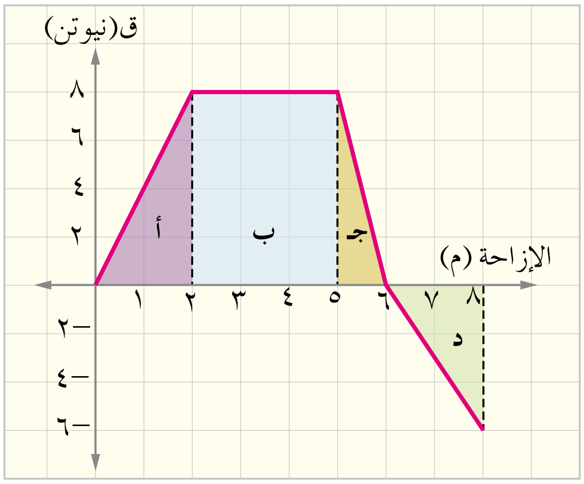
يمثل الشكل (٤–٨) العلاقة بين قوة خارجية متغيرة أثرت في جسم والإزاحة الناتجة عنها. احسب:

١ شغل القوة من س$_{١}$ = صفر إلى س$_{٢}$ = ٦م

٢ شغل القوة من س$_{٢}$ = ٦م إلى س$_{٣}$ = ٨م

٣ الشغل الكلي الذي بذلته القوة.

٤ أين كانت القوة ثابتة المقدار؟



الشكل (٤–٨)، مثال (٤–٣).

الحلّ:

تمثل المساحة تحت المنحنى لكل شكل من الأشكال الموضحة بالرسم الشغل لقوة تتغير باستمرار مع الإزاحة.

١ شغل القوة ق = مساحة أ + مساحة ب + مساحة جـ

ش$_{١}$ = مساحة المثلث أ = $\frac{١}{٢}$ القاعدة × الارتفاع

= $\frac{١}{٢}$ × ٢ × ٨ = ٨ جول

ش$_{٢}$ = مساحة المستطيل ب = الطول × العرض

= ٣ × ٨ = ٢٤ جول

ش$_{٣}$ = مساحة المثلث جـ

= $\frac{١}{٢}$ × ١ × ٨ = ٤ جول

ش = ش$_{١}$ + ش$_{٢}$ + ش$_{٣}$ = ٨ + ٢٤ + ٤ = ٣٦ جول

٢ شغل القوة ق = مساحة المثلث د

ش = $\frac{١}{٢}$ × ٢ × (–٦) = –٦ جول

٣ الشغل الكلي يساوي المجموع الجبري للشغل: ش$_{\text{كلي}}$ = ٣٦ – ٦ = ٣٠ جول.

٤ القوة كانت ثابتة المقدار خلال الإزاحة بين الموقعين: ٢م و ٥م.

(٤-١-٣) شغل القوة المتغيرة في النابض

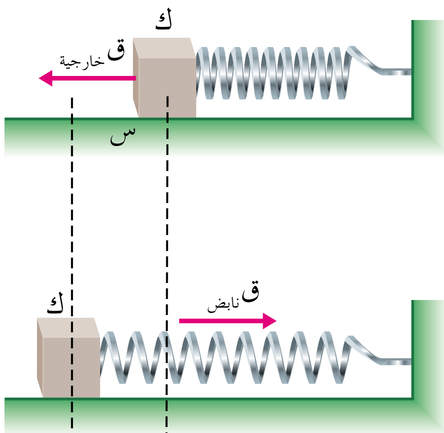
من الأمثلة على القوى المتغيرة، قوة المرونة في النابض، حيث إنها تتناسب طرديًا مع الإزاحة الناتجة عن استطالة النابض، وسوف نتطرق هنا إلى حالة خاصة وهي سحب طرف النابض إزاحة مقدارها س عن موضع اتزانه في حالة الارتخاء وفي هذه الحالة تكون قوة النابض بعكس اتجاه الإزاحة. تعطى قوة المرونة بالعلاقة:

$$ق_{نابض} = - أ س \quad .... (٤-٣)$$

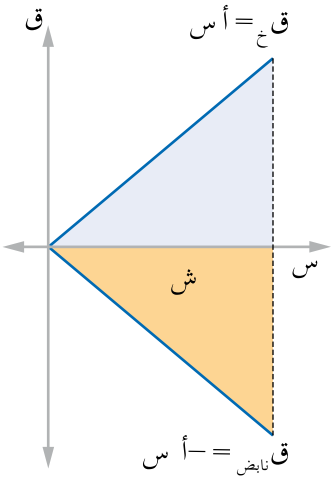
حيث، أ : ثابت المرونة للنابض، ويقاس بوحدة نيوتن/ متر، $ق_{نابض}$:قوة المرونة في النابض.

س: مقدار الاستطالة في النابض عن طوله الأصيل. وتعرف هذه العلاقة بقانون هوك، الذي ينص على أن: **قوة المرونة في نابض تتناسب طرديًّا مع الاستطالة.**

إذا أثرت قوة خارجية نحو اليسار في جسم يتصل بنابض مثبت بشكل أفقي من أحد طرفيه فحركته إزاحة س باتجاه اليسار بسرعة ثابتة كما في الشكل (٤-٩/أ) فإنّ شغل هذه القوة يكون موجبًا، في هذه الأثناء كان النابض يؤثر بقوة على الجسم باتجاه اليمين، ما يعني أن النابض بذل شغلاً سالبًا كما في الشكل (٤-٩/ب).



(أ) نابض تؤثر فيه قوة.



(ب) التمثيل البياني للعلاقة (ق - س)

الشكل (٤-٩): شغل قوة النابض والقوة الخارجية.

وبحساب المساحة تحت منحنى ($ق_{خ}$ - الإزاحة) نجد أن شغل القوة الخارجية يعطى بالعلاقة الآتية:

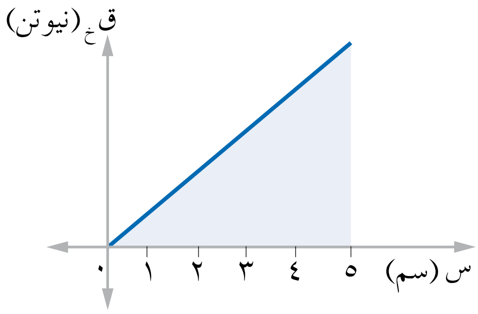
$$ش_{خارجي} = \frac{١}{٢} أ (س)^{٢}$$

وعند حساب المساحة المحصورة بين منحنى ($ق_{نابض}$ - الإزاحة) ومحور السينات، نجد أن شغل قوة المرونة في النابض يعطى بالعلاقة الآتية:

$$ش_{نابض} = - \frac{١}{٢} أ (س)^{٢} \quad .... (٤-٤)$$

مثال (٤-٤)

نابض ثابت المرونة له ١٢٠٠ نيوتن/ م، مثبت على أرض أفقية ملساء، أثرت فيه قوه خارجية أفقية، انظر الشكل (٤-١٠)، احسب الشغل الذي بذله النابض.



الشكل (٤-١٠): مثال (٤-٤) شغل القوة الخارجية المؤثرة في النابض.

الحلّ:

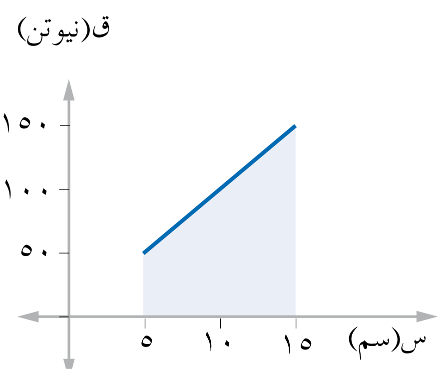
يمثل الشكل العلاقة بين القوة الخارجية المتغيرة المؤثرة في النابض والإزاحة التي حدثت للنابض مبتدئًا من الصفر ومن الشكل فإن مقدار الاستطالة هو ٥ سم ومن العلاقة (٤-٤):

$$ش_{نابض} = -\frac{١}{٢} أ (س)^{٢}$$

$$ش_{نابض} = -\frac{١}{٢} \times ١٢٠٠ \times (٥ \times ١٠^{-٢})^{٢} = -١,٥ \text{ جول.}$$

مثال (٤-٥)

يمثل الشكل (٤-١١) العلاقة بين قوة خارجية متغيرة أثرت في نابض ثابت المرونة له ١٠٠٠ نيوتن/م، فاستطال. احسب شغل القوة الخارجية فقط للإزاحة المقطوعة بين ٥سم إلى ١٥سم .



الشكل (٤-١١): مثال (٤-٥).

الحلّ:

بما أن القوة متغيرة فإن المعادلة (٤-٤) لا تصلح في هذه الحالة، لأن الإزاحة لم تبدأ من الصفر ويحسب الشغل من حساب المساحة تحت منحنى (القوة - الإزاحة):

الشغل = المساحة تحت المنحنى (مساحة شبه المنحرف)

$$\text{الشغل} = \frac{١}{٢} \text{ مجموع القاعدتين} \times \text{الارتفاع}$$

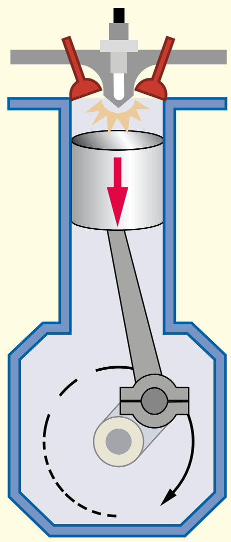
$$\text{الشغل} = \frac{١}{٢} \times (٥٠+١٥٠) \times ٠,١ = ١٠ \text{ جول}$$

سـؤال

كم يكون شغل قوة النابض؟

تـوسـع

من الأمثلة على شغل القوة المتغيرة ما يحدث في محرك السيارة داخل أسطوانات المحرك في شوط الانفجار(الاشتعال)، وانضغاط الغاز المحصور الناتج عن الاحتراق، إذ يضغط الغاز على جدران الأسطوانة والمكبس في جميع الاتجاهات فيتحرك المكبس للأسفل، كما في الشكل (٤-١٢)، فيتغيّر حجم الغاز؛ أي أن الغاز يبذل شغلاً على المكبس، ليتحول بعد ذلك إلى طاقة حركية للسيارة.



الشكل (٤-١٢): آلة الاحتراق الداخلي.

مراجعة (٤-١)

١ ماذا نقصد بقولنا إن شغل قوة معينة يساوي ٤ جول؟

٢ وضّح متى يكون الشغل سالبًا، ومتى يكون موجبًا.

٣ فسّر ما يأتي:

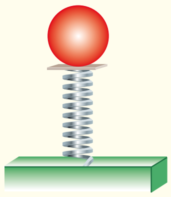
- قوة جذب الأرض لقمر صناعي لا تبذل عليه شغلاً.
- نابضان، علق رأسيًا في كل منهما ثقل، فاستطال الأول ثلاثة أمثال استطالة الثاني. ما النسبة بين ثابت مرونة النابض الأول إلى الثاني إذا كان الثقلان متساويين في كتلتيهما؟

الطاقة والقدرة

Energy and Power

نشاط تمهيدي

• ضع نابضًا بشكل رأسي، ثم أثّر بكرة زجاجية في النابض إلى أسفل كما في الشكل (٤-١٣)، اترك الكرة، ماذا يحدث؟ ناقش تغيرات الطاقة.



الشكل (٤-١٣)، نشاط تمهيدي.

درست سابقًا، إن للطاقة أشكالًا عدة، منها الطاقة الحرارية والطاقة الكيميائية والطاقة الكامنة (الوضع) والطاقة الحركية.

(٤-٢-١) الطاقة الحركية

هي الطاقة التي تمتلكها الأجسام المتحركة بسبب حركتها، وتعطى بالعلاقة:

$$\text{ط}_{\text{ح}} = \frac{1}{2}\,\text{ك}\,\text{ع}^{2} \quad \text{.......} \quad (٤-٥)$$

ووحدتها (جول)، حيث ع سرعة الجسم المتحرك بوحدة (م/ث)، وك: كتلة الجسم بوحدة (كغ)، وحيث إن الطاقة الحركية تتناسب طرديًا مع كتلة الجسم، ومربع سرعته، فكلما زاد أحدهما زادت الطاقة الحركية للجسم.

(٤-٢-٢) الطاقة الكامنة

الطاقة الكامنة (طاقة الوضع) تأخذ صورًا عدّة، باختلاف القوى المسببة لها، فمنها: طاقة كامنة ناشئة عن الجاذبية الأرضية، وطاقة كامنة ناشئة عن قوة المرونة، وطاقة كامنة ناشئة عن قوة كهربائية وأخرى مغناطيسية. تعرف **الطاقة الكامنة أنها الطاقة التي يمتلكها النظام بسبب وضعه أو حالته.**

وستقتصر دراستنا في هذا الفصل على شكلين منها هما:

الطاقة الكامنة الناشئة عن الجاذبية الأرضية، والطاقة الكامنة المرونية في النابض.

فكرة

تصمّم بعض الألعاب التي تعمل بالطاقة المرونية بطريقة تُخزّن فيها الطاقة على صورة طاقة كامنة مرونية، تتحول إلى طاقة حركية.

الشكل (٤-١٤): فكرة.

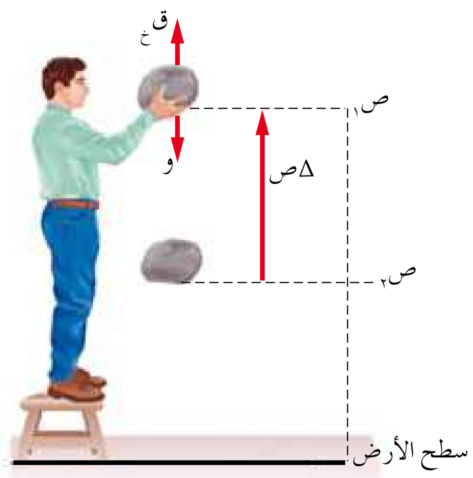
١ الطاقة الكامنة الناشئة عن الجاذبية

لرفع جسم كتلته ك من الموقع ص_1 إلى الموقع ص_2، بسرعة ثابتة، كما يبين الشكل (٤-١٥) فإنّه يلزم التأثير فيه بقوة تساوي وزنه؛ أي أنّنا نبذل عليه شغلاً خارجيًا، يعطى بالعلاقة:

$$\text{ش}_{\text{خ}} = \vec{\text{ق}}_{\text{خ}} \cdot \Delta\vec{\text{ص}} \quad \text{.......} \quad (٤-٦)$$

(حيث يكون اتجاه القوة الخارجية باتجاه الإزاحة)، و Δص: الإزاحة والتي تمثل الفرق بين

الموقعين، وتقاس (ص) نسبة إلى نقطة إسناد، والتي قد تكون سطح الأرض أو أي نقطة أخرى. يخزّن هذا الشغل في النظام على شكل **تغير في الطاقة الكامنة (الوضع)** ($\Delta ط_{و}$) الناشئة عن الجاذبية الأرضية، تعطى بالعلاقة:



$ش_{خ} = \Delta ط_{و}$ ، أي أن:

$\Delta ط_{و} = ك\ جـ\ \Delta ص$

$\Delta ط_{و} = ك\ جـ\ ص_{٢} - ك\ جـ\ ص_{١}$

$= ط_{و٢} - ط_{و١}$

في أثناء ذلك تكون قوة الجاذبية الأرضية قد بذلت على الجسم شغلاً، يعطى بالعلاقة:

$ش_{جاذبية} = - و \Delta ص$

الشكل (٤-١٥): العلاقة بين الشغل وطاقة الوضع.

(لاحظ الإشارة السالبة، حيث إنّ الزاوية بين اتجاه الوزن واتجاه الإزاحة تساوي ١٨٠° بمعنى أن اتجاه الوزن يعاكس اتجاه الإزاحة).

$ش_{جاذبية} = - \Delta ط_{و}$ .... (٤-٧)

ماذا تعني الإشارة السالبة في هذه العلاقة؟

مثال (٤-٦)

سقط جسم كتلته ٦ كغم من وضع السكون من ارتفاع ٤ م فوق سطح الأرض. بإهمال القوى المعيقة، جد:

١ الطاقة الكامنة للجسم، عندما يصبح على ارتفاع ١ م من سطح الأرض، على فرض أن الطاقة الكامنة صفر عند سطح الأرض.

٢ الشغل الذي تبذله قوة الجاذبية الأرضية على الجسم بين الموقعين.

الحلّ:

نلاحظ هنا أننا اتخذنا سطح الأرض نقطة مرجعية أو نقطة إسناد، $ص_{١} = ٤$م ، $ص_{٢} = ١$م

١ $ط_{و٢} = ك\ جـ\ ص_{٢} = ٦ \times ٩,٨ \times ١ = ٥٨,٨$ جول.

٢ $ش_{جاذبية} = - \Delta ط_{و} = - (ط_{و٢} - ط_{و١})$

$= - ((٦ \times ٩,٨ \times ١) - (٦ \times ٩,٨ \times ٤)) = ١٧٦,٤$ جول، لاحظ أنّ شغل الجاذبية موجب. ما الذي يعنيه ذلك؟

٢ الطاقة الكامنة المرونية

الشكل (٤-١٦): القوس.

هي الطاقة التي تخزن في جسم بسبب مرونته، كالطاقة التي تخزن في نابض عند شدِّه أو ضغطه أو في نظام (القوس-السهم) كما في الشكل (٤-١٦). ويُعدّ ضرب وتر آلة موسيقية، وشدّ شريط مطاطي أمثلة أخرى على الطاقة الكامنة المرونيّة، وفي هذه الأنظمة تُخزّن الطاقة عند حدوث تغيّر في شكل الجسم أو في أبعاده.

اذكر أمثلة أخرى من الواقع اليومي على طاقة كامنة مرونيّة.

تُعدّ دراسة النابض من أكثر الأمثلة شيوعًا لدراسة الطاقة الكامنة المرونية؛ فعند شدّ النابض أو ضغطه نؤثّر فيه بقوة خارجية، تُحدث فيه استطالة أي زيادة في طوله الأصلي (س) ويُمثل مقدار الزيادة في طوله الإزاحة التي يحققها النابض، ويكون اتجاه الإزاحة باتجاه القوة الخارجية، وهذا الشغل يُخزّن في النابض على شكل طاقة كامنة مرونية تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$ط_{\text{مرونية}} = \frac{١}{٢} \text{ أ } (\text{س})^{٢} \quad .... \quad (٤-٨)$$

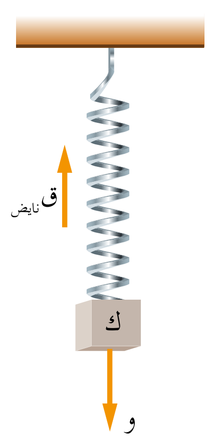
مثال (٤-٧)

نابض ثابت المرونة له ٢٩٤ نيوتن/ م، مثبت رأسيًّا في سقف غرفة، انظر الشكل (٤-١٧)، علّق به جسم كتلته ٢,٤ كغ، ثم ترك الجسم حرًّا فاستطال النابض. جد:

١ مقدار استطالة النابض.

٢ الشغل الذي يبذله النابض، في أثناء استطالته.

٣ الشغل الذي تبذله قوة الجاذبية (وزن الجسم) في شد النابض.



الشكل (٤-١٧): مثال (٤-٧).

الحلّ:

١ لاحظ أن الحركة بالاتجاه الرأسي بعد استطالة النابض فإنه يتزن عند الموقع (ص)؛ بحيث تتحقق العلاقة:

$$\text{و} = \text{ق}_{\text{نابض}} = \text{أ ص}$$

$$\text{ك جـ} = \text{أ ص}$$

$$\text{ص} = \frac{\text{ك جـ}}{\text{أ}} = \frac{(٩,٨ \times ٢,٤)}{٢٩٤} = ٠,٠٨ \text{ م.}$$

٢ شغل النابض :

$$ش_{نابض} = -\Delta ط_{مرونية} = -\frac{١}{٢} أ (ص)^{٢}$$

$$ش_{نابض} = -\frac{١}{٢} \times ٢٩٤ \times (٠,٠٨)^{٢} = -٠,٩٤ \text{ جول.}$$

٣ شغل قوة الجاذبية (الوزن):

$$ش_{جاذبية} = و ص جتا \theta ، \text{ حيث } \theta = صفر$$

$$= ٢٣,٥ \times ٠,٠٨ \times ١ = ١,٨٨ \text{ جول}$$

نلاحظ أن شغل الجاذبية مثلا شغل النابض، كيف تفسر ذلك؟

(٤-٢-٣) مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية)

توصلنا إلى أنّ الشغل المبذول على الجسم قد يغيّر من طاقته الكامنة، فهل ثمّة علاقة بين الشغل والطاقة الحركية؟ للتوصل إلى العلاقة بين الشغل والطاقة الحركية، نفترض جسمًا كتلته ك يتحرك بسرعة $ع_{١}$ باتجاه محور السينات الموجب، كما في الشكل (٤-١٨)، أثرت فيه قوة محصلة ثابتة ق، فغيّرت سرعته إلى $ع_{٢}$ بالاتجاه نفسه، وتحرك إزاحة مقدارها س. بتطبيق معادلات الحركة في خط مستقيم، نجد أنّ:

$$ع_{٢}^{٢} = ع_{١}^{٢} + ٢ ت س$$

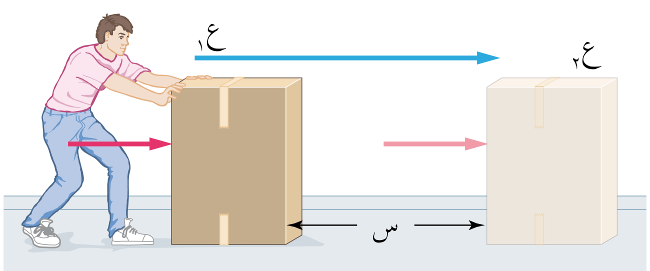
بضرب طرفي المعادلة في $\frac{١}{٢}$ ك

$$\frac{١}{٢} ك ع_{٢}^{٢} = \frac{١}{٢} ك ع_{١}^{٢} + ك ت س$$

ومنها نجد أن:

$$ك ت س = \frac{١}{٢} ك ع_{٢}^{٢} - \frac{١}{٢} ك ع_{١}^{٢}$$

$$\vec{ق} \cdot \vec{س} = \frac{١}{٢} ك ع_{٢}^{٢} - \frac{١}{٢} ك ع_{١}^{٢}$$



الشكل (٤-١٨): جسم يتحرك في خط مستقيم تحت تأثير قوة محصلة.

وحيث أن $\frac{١}{٢}$ ك $ع^{٢}$ هو الطاقة الحركية للكتلة ك.

أي أنّ:

$$ش = ط_{ح٢} - ط_{ح١}$$

$$ش = \Delta ط_{ح} \quad \text{.. (٤-٩)}$$

وتعرف هذه النتيجة **بمبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية)**، وتنص على أنّ: **شغل القوة المحصلة (الشغل الكلي) (net work) لجسم يتحرك بين نقطتين يساوي التغير في طاقته الحركية.**

مثال (٤-٨)

جسم كتلته $\frac{١}{٢}$ كغ يتحرك بسرعة ٨م/ث، أثرت فيه قوة محصلة مسافة ٢م، فأصبحت سرعته ١٢م/ث في الاتجاه الابتدائي نفسه. احسب:

١ طاقة حركة الجسم الابتدائية والنهائية.

٢ الشغل الكلي المبذول على الجسم.

٣ مقدار القوة المحصلة المؤثرة في الجسم.

الحلّ:

ك = $\frac{١}{٢}$ كغ، السرعة الابتدائية = ٨م/ ث، السرعة النهائية = ١٢م/ ث.

١ طاقة الحركة الابتدائية:

$$ط_{ح١} = \frac{١}{٢} ك ع_{١}^{٢}$$

$$= \frac{١}{٢} \times \frac{١}{٢} \times ٨^{٢} = ١٦ \text{ جول.}$$

طاقة الحركة النهائية:

$$ط_{ح٢} = \frac{١}{٢} ك ع_{٢}^{٢}$$

$$= \frac{١}{٢} \times \frac{١}{٢} \times ١٤٤ = ٣٦ \text{ جول.}$$

٢ الشغل الكلي: $ش_{كلي} = \Delta ط_{ح} = ط_{ح٢} - ط_{ح١}$

$$= ٣٦ - ١٦ = ٢٠ \text{ جول.}$$

٣ القوة المحصلة المؤثرة:

$$ش_{كلي} = ح \; س \; جتا \; \theta$$

$$٢٠ = ح \times ٢ \times ١$$

$$ح = ١٠ \text{ نيوتن.}$$

(٤-٢-٤) القدرة

في كثير من السباقات الرياضية، كالجري والسباحة وركوب الدراجات، يقيّم أداء المتسابقين اعتمادًا على الزمن المستغرق للوصول إلى خط النهاية، ويكون الفائز هو من ينجز المهمة في أقل زمن، عندها نقول إن قدرة المتسابق الفائز تفوق قدرات الآخرين. **تعرف القدرة** (Power) **بأنها الشغل المبذول في وحدة الزمن.** ويُعطى متوسط القدرة بالعلاقة:

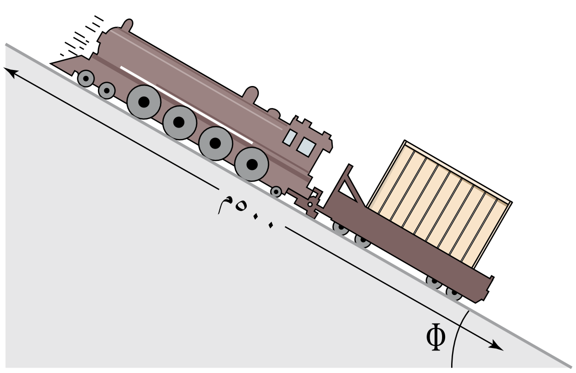
$$\text{متوسط القدرة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{الزمن}} \qquad \text{(٤-١٠)}$$

وحدة قياس القدرة هي جول/ ثانية، وتعرف باسم واط.

وللقدرة وحدة قياس أخرى تسمى الحصان (Horsepower) وتساوي ٧٤٦ واط.

مثال (٤-٩)

تصعد قاطرة كتلتها ٦٠ طنًّا مرتفعًا طوله ٥٠٠ مترًا، يميل عن الأفق بزاوية مقدارها ٣٠°، بسرعة ثابتة، في ٥ دقائق، كما في الشكل (٤-١٩). بإهمال قوى الاحتكاك، جد قدرة محرك القاطرة بوحدة الحصان.



الشكل (٤-١٩): مثال (٤-٩).

الحلّ:

(١ طن = ١٠٠٠ كغ)

$\sum$ ق = صفر (لأن السرعة ثابتة)

$ق_{محرك}$ = و جا Φ ، (حيث Φ : زاوية ميل المنحدر)

$= ٦٠ \times ١٠^{٣} \times ٩,٨ \times \frac{١}{٢}$

$= ٢,٩٤ \times ١٠^{٥}$ نيوتن.

$ش_{محرك}$ = $ق_{محرك}$ س جتا θ، (حيث θ: الزاوية بين متجهي القوة والإزاحة وتساوي صفرًا)

$= ٢,٩٤ \times ١٠^{٥} \times ٥٠٠ \times ١$

$= ١,٤٧ \times ١٠^{٨}$ جول.

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{الزمن}} = \frac{١,٤٧ \times ١٠^{٨}}{(٥ \times ٦٠)} = ٤,٩ \times ١٠^{٥} \text{ واط.}$$

$$= \frac{٤,٩ \times ١٠^{٥}}{٧٤٦} = ٦٥٧ \text{ حصان.}$$

توسع

تُلزم تعليمات الأمن والسلامة عمال البناء بوضع قبّعات واقية لحماية الرأس في حالة سقوطهم، أو عند سقوط أجسام عليهم من ارتفاعات كبيرة، كما في بناء الأبراج، حيث تختزن الأجسام الساقطة طاقة كامنة كبيرة، تتحول إلى طاقة حركية ، فتكون سرعة الجسم كبيرة جدًّا. تصمم القبعة من الخارج بصورة مرنة وقوية لمنع الأجسام الحادة أو الصلبة من الوصول إلى الرأس، ومزودة من الداخل بأحزمة لينة تلامس الرأس حتى لا يصل إليه تأثير الصدمة. انظر الشكل (٤ – ٢٠).

الشكل (٤-٢٠): قبعة واقية للرأس.

مراجعة (٤-٢)

❶ وضح المقصود بكل من: الطاقة الكامنة (جاذبية)، الطاقة الكامنة (مرونية)، الطاقة الحركية، ثم حدّد الكميات التي تعتمد عليها كل منها.

❷ أثبت أنّ وحدة قياس الشغل هي وحدة قياس الطاقة نفسها.

❸ بيّن تحولات الطاقة لجسم ساقط سقوطًا حرًّا؟

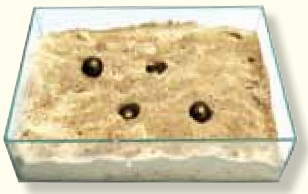
❹ **فكر**: قارن بين تغيرات الطاقتين الحركية والكامنة لجسمين؛ الأول يتحرك نحو الأعلى بسرعة ثابتة، والثاني يتحرك نحو الأعلى تحت تأثير الجاذبية، وما القوى المؤثرة في كل منهما؟

حفظ الطاقة الميكانيكية

Conservation of Mechanical Energy

نشاط تمهيدي

• ضع كمية من الرمل في صحن، كما في الشكل (٤–٢١) وأسقط فيه من ارتفاعات مختلفة كرات متماثلة الكتل، ثم فسر ما يحدث، ثم أسقط كرات مختلفة الكتل من الارتفاع نفسه، ثمّ فسّر ما يحدث.



الشكل (٤–٢١)، نشاط تمهيدي.

يُعرف مجموع الطاقة الكامنة والطاقة الحركية بالطاقة الميكانيكية، وفي الدرس السابق عرفت أن الشغل المبذول على جسم يغير من طاقته الحركية وطاقته الكامنة، داخل نظام الأرض والجسم، إذ إن الجسم يكتسب طاقة حركية حينما يخسر طاقته الكامنة أو العكس. إن الطاقة الميكانيكية داخل النظام (الأرض – الجسم) تبقى ثابتة المقدار لا تزيد ولا تنقص، ويقال عن مثل هذا النظام إنه معزول، وإن الطاقة الميكانيكية محفوظة. إذا رمزنا للمقدار ($\text{ط}_{\text{ح}} + \text{ط}_{\text{و}}$) بالرمز $\text{ط}_{\text{م}}$، فإن:

$\text{ط}_{\text{م}} = \text{ط}_{\text{ح}} + \text{ط}_{\text{و}}$ = مقدارًا ثابتًا

$\Delta\,\text{ط}_{\text{م}} = \Delta\,\text{ط}_{\text{ح}} + \Delta\,\text{ط}_{\text{و}} =$ صفر .... (٤–١١)

تُعد الأنظمة الميكانيكية محافظة في حال عزلها عن القوى الخارجية، مثل قوة الاحتكاك أو مقاومة الهواء. وبذلك يمكن تعريف النظام المحافظ بأنه **النظام الذي تكون فيه القوى المحركة للأجسام قوى محافظة بحيث تحافظ على مجموع الطاقة الميكانيكية فيه ثابتًا**، أي أنّ التغيّر في الطاقة الميكانيكية يساوي صفرًا. ومن خصائص القوة المحافظة المؤثرة في جسم ما:

١ شغلها لا يعتمد على المسار الذي تسلكه لنقل الجسم من نقطة إلى أخرى بل يعتمد على نقطة البداية والنهاية.

٢ شغلها عبر مسار مغلق يساوي صفرًا، أي أن:

$(\text{ش}_{\text{قوة محافظة}})_{\text{مسار مغلق}} = \Delta\,\text{ط}_{\text{ح}} + \Delta\,\text{ط}_{\text{و}}$ ، وبما أنّ $\Delta\,\text{ط}_{\text{ح}} + \Delta\,\text{ط}_{\text{و}} = \Delta\,\text{ط}_{\text{م}} =$ صفر

$\therefore (\text{ش}_{\text{قوة محافظة}})_{\text{مسار مغلق}} =$ صفر

وكلّ نظام يحتوي على قوى خارجية يُسمى نظامًا غير محافظ؛ لأن جزءًا من الطاقة الميكانيكية للنظام يتحول إلى أشكال أخرى للطاقة، وتسمى القوة الخارجية قوة غير محافظة، ويكون شغلها مساويًا لمقدار النقص في الطاقة الميكانيكية للنظام أي أن:

$\text{ش}_{\text{خارجي}} = \Delta\,\text{ط}_{\text{م}} = \Delta\,\text{ط}_{\text{ح}} + \Delta\,\text{ط}_{\text{و}}$

وبذلك تكون قوة الاحتكاك ومقاومة الهواء قوى غير محافظة؛ لأنها تعمل على تحويل جزء من الطاقة الميكانيكية في النظام إلى طاقة حرارية.

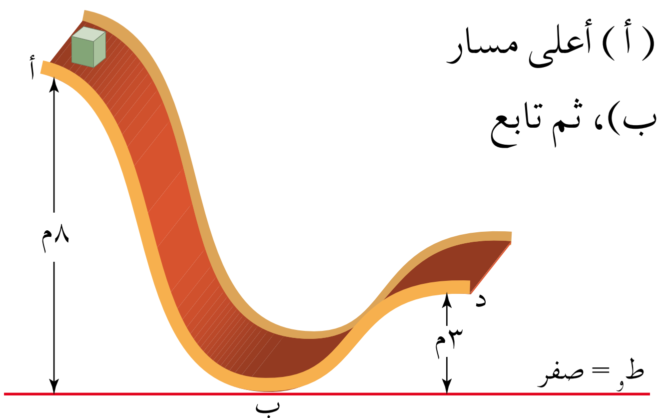
يبيّن الشكل (٤–٢٢) بعضًا من تحولات الطاقة الميكانيكية، ادرس الأنظمة في الشكل (٤–٢٢) جيدًا، ثم حاول وصف تحولات الطاقة في كل نظام.

أ: وتر مهتز   ب: القفز بالزانة   جـ: القوس   د: الترامبولين

الشكل (٤–٢٢): تحولات الطاقة الميكانيكية.

مثال (٤–١٠)

انزلق جسم كتلته ٢ كغ من السكون من النقطة (أ) أعلى مسار أملس، انظر الشكل (٤–٢٣)، فوصل النقطة (ب)، ثم تابع انزلاقه إلى النقطة (د). احسب:



الشكل (٤–٢٣): مثال (٤–١٠).

١ طاقة الجسم الكامنة عند النقطة أ.

٢ طاقة الجسم الحركية عند النقطة ب.

٣ سرعة الجسم لحظة مروره بالنقطة د.

٤ الشغل الذي بذلته الجاذبية بين النقطتين (ب، د).

الحلّ:

على اعتبار أن المستوى الأفقي المار بالنقطة ب هو المستوى المرجعي لطاقة الوضع.

١ $\text{ط}_{\text{و أ}}$ = ك جـ $\text{ص}_{\text{أ}}$

= ٢ × ٩٫٨ × ٨ = ١٥٦٫٨ جول.

٢ بما أن النظام محافظ نطبق العلاقة (٤–١١)، فإنّ:

$\Delta$$\text{ط}_{\text{ح}}$ = $-\Delta$$\text{ط}_{\text{و}}$ ، ومنها:

$(ط_{ح} + ط_{و})_{أ} \quad = \quad (ط_{ح} + ط_{و})_{ب}$

$صفر + ١٥٦,٨ \quad = \quad ط_{ح ب} + صفر$

$ط_{ح ب} \quad = \quad ١٥٦,٨$ جول.

٣ $(ط_{ح} + ط_{و})_{ب} = (ط_{ح} + ط_{و})_{د}$

$١٥٦,٨ + صفر = \frac{١}{٢} ك ع_{د}^{٢} + ك جـ ص_{د}$

$١٥٦,٨ = \frac{١}{٢} \times ٢ ع_{د}^{٢} + ٢ \times ٩,٨ \times ٣$

$١٥٦,٨ - ٥٨,٨ = ع_{د}^{٢}$

$٩٨ = ع_{د}^{٢} \longrightarrow ع_{د} = ٩,٩$ م/ ث.

٤ شغل الجاذبية بين النقطتين (ب، د).

$ش_{جاذبية} = - \Delta ط_{و} = ط_{و ب} - ط_{و د}$

$= ٠ - ك جـ ص_{د}$

$= -٢ \times ٩,٨ \times ٣ = -٥٨,٨$ جول.

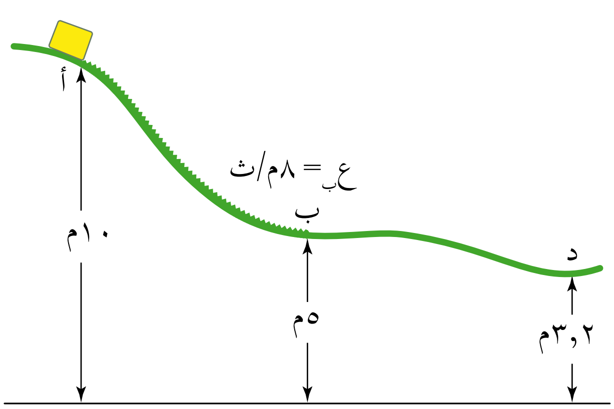
مثال (٤-١١)

تحرّك جسم كتلته ٢كغ من السكون من النقطة (أ) على الجزء الخشن (أ– ب) من المسار الموضح في الشكل (٤–٢٤)، فوصل (ب) بسرعة ٨ م/ ث، ثم تابع حركته على الجزء الأملس (ب– د) من المسار. معتمدًا على الارتفاعات الظاهرة على الشكل، وإذا كان طول المسار الخشن ٦م. احسب:

١ شغل قوة الاحتكاك عبر المسار الخشن.

٢ شغل الجاذبية على الجسم عبر المسار كله من أ إلى د.

٣ الشغل الكلي المنجز على الجسم.



شكل (٤–٢٤): مثال (٤–١١).

الحلّ:

١ شغل قوة الاحتكاك:

$ش_{احتكاك} = \Delta ط_{م}$

$ش_{احتكاك} = (ط_{ح} + ط_{و})_{ب} - (ط_{ح} + ط_{و})_{أ}$

$\text{ش}_{\text{احتكاك}} = (\frac{1}{2}\ \text{ك ع}_{\text{ب}}^{2} + \text{ك جـ ص}_{\text{ب}}) - (\frac{1}{2}\ \text{ك ع}_{\text{أ}}^{2} + \text{ك جـ ص}_{\text{أ}})$

$\text{ش}_{\text{احتكاك}} = (\frac{1}{2} \times ٢ \times ٦٤ + ٢ \times ٩,٨ \times ٥) - (\text{صفر} + ٢ \times ٩,٨ \times ١٠)$

$= ١٦٢ - ١٩٦$

$\text{ش}_{\text{احتكاك}} = -٣٤$ جول.

❷ شغل الجاذبية عبر المسار كلّه:

$\text{ش}_{\text{جاذبية}} = -\Delta\text{ط}_{\text{و}} = \text{ط}_{\text{و (أ)}} - \text{ط}_{\text{و (د)}}$

$\text{ش}_{\text{جاذبية}} = \text{ك جـ} (\text{ص}_{\text{أ}} - \text{ص}_{\text{د}})$

$\text{ش}_{\text{جاذبية}} = ٢ \times ٩,٨ \ (١٠ - ٣,٢)$

$\text{ش}_{\text{جاذبية}} = ١٣٣,٣$ جول.

❸ الشغل الكلي المنجز على الجسم:

$\text{ش}_{\text{كلي}} = \text{ش}_{\text{جاذبية}} + \text{ش}_{\text{احتكاك}}$

$= ١٣٣,٣ - ٣٤$

$= ٩٩,٣$ جول.

سؤال

احسب الشغل الكلي المنجز على الجسم في المثال السابق بطريقة أخرى.

مثال (٤-١٢)

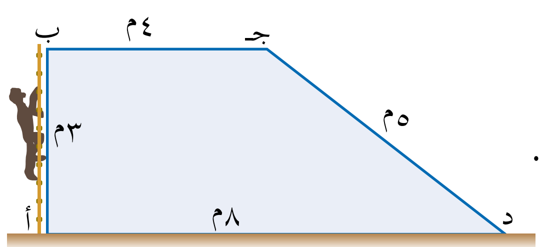
يصعد قرد كتلته ٣٠ كغ سلّمًا رأسيًّا إلى الأعلى، ثمّ يتحرك أفقيًّا على المسار المبين في الشكل (٤-٢٥)، ثم ينزلق على الجزء المائل من المسار، ويعود إلى نقطة البداية مرة أخرى. معتمدًا على الكميات المبينة على الشكل، احسب الشغل الذي بذلته الجاذبية على جسم القرد ابتداءً من حركته من (أ) وعودته إليها.

الحلّ:

- $\text{ش}_{\text{أب}} = \text{ق ص جتا}\ \theta$ ، $\text{ق} = \text{و} = \text{ك جـ}$

  $= ٣٠ \times ٩,٨ \times ٣ \times \text{جتا}\ ١٨٠° = -٨٨٢$ جول.

- $\text{ش}_{\text{بجـ}} = \text{ق س جتا}\ \theta$



شكل (٤-٢٥): مثال (٤-١٢).

= ٣٠ ×٩,٨ × ٤ × جتا ٩٠° = ٠ جول.

■ ش$_{\text{جـ د}}$ = ق س جتا θ

= ٣٠ ×٩,٨ × ٥ × ($\frac{٣}{٥}$) = ٨٨٢ جول.

■ ش$_{\text{د أ}}$ = ق س جتا θ

= ٣٠ ×٩,٨ × ٨ × جتا ٩٠° = ٠ جول.

ش$_{\text{كلي}}$ = ش$_{\text{أب}}$ + ش$_{\text{بجـ}}$ + ش$_{\text{جـد}}$ + ش$_{\text{دأ}}$ = −٨٨٢ + ٠ + ٠ + ٨٨٢ = ٠ جول.

نلاحظ أنّ الشغل الكلي الذي تبذله قوة محافظة على جسم عبر مسار مغلق يساوي صفرًا.

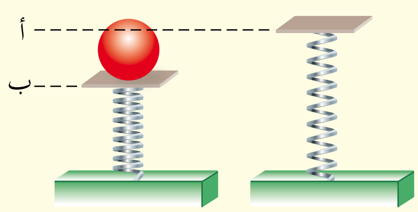
توسع

عند دراسة نظام (الأرض– الجسم) بمعزل عن تأثير القوى الخارجية، مثل قوة الاحتكاك أو مقاومة الهواء، فإن الطاقة الميكانيكية للجسم تبقى ثابتةً، ويوصف النظام بأنه محافظ. وكذلك الحال بالنسبة إلى نظام (جسم – نابض) فهو أيضًا محافظ. ماذا لو درسنا حركة جسم في النظامين معًا؛ جسم يتحرك رأسيًّا في مجال الجاذبية الأرضية وهو متصل بنابض ثُبِّتَ رأسيًّا فوق سطح أفقي، مع استبعاد القوى غير المحافظة.

سيتكون لدينا نظام محافظ (الأرض – النابض – الجسم)، الشكل (٤–٢٦) وسوف يكون النظام محافظًا أيضًا، فعندما يوضع جسم فوق نابض، ويهتز بشكل رأسي، فيتحرك الجسم مسافة رأسية من النقطة أ إلى النقطة ب، فإن الطاقة الميكانيكية الكلية للنظام تبقى ثابتة بمعزل عن القوى غير المحافظة؛ أي أنّ:

ط$_{\text{م أ}}$ = ط$_{\text{م ب}}$

ط$_{\text{ح (أ)}}$ + ط$_{\text{و جاذبية (أ)}}$ + ط$_{\text{و مرونية (أ)}}$ = ط$_{\text{و(ب)}}$ + ط$_{\text{و جاذبية (ب)}}$ + ط$_{\text{و مرونية (ب)}}$



الشكل (٤–٢٦): نظام (الأرض– الجسم – النابض).

تنطبق على هذا النظام الصفات جميعها التي درسناها سابقًا، فالقوى المحركة للأجسام فيه تكون قوى محافظة، ويبقى مجموع الطاقة الميكانيكية فيه ثابتًا، أي أنّ التغيّر في الطاقة الميكانيكية يساوي صفرًا، ويكون فيه مجموع الشغل الكلي الذي تبذله القوة المحصلة لتحريك جسم عبر مسار مغلق داخل النظام يساوي صفرًا.

مراجعة (٤–٣)

١ اذكر مثالاً تكون فيه الطاقة الحركية مصدرًا للشغل.

٢ ماذا تسمى القوة التي لا تبذل شغلاً على جسم يتحرك في مسار مغلق؟ وما سبب هذه التسمية؟

المشروع الرابع: قياس كفاءة مضخة ماء

فكرةُ المشروعِ:

تعرّف القدرة بأنها الشغل المبذول في وحدة الزمن، وتختلف قدرة الآلة في إنجازها للشغل عن قدرتها في استهلاكها للطاقة، ويعود هذا الاختلاف إلى كفاءة الآلة، وقد مر معك سابقًا أنه لا توجد آلة ذات كفاءة مثالية. تقوم فكرة المشروع على تشغيل مضخة كهربائية لضخ الماء كتلك المبينة في الشكل (٤-٢٧)، وقياس كفاءتها. كما أنّه يمكن تشغيل المضخة نفسها باستخدام الطاقة الشمسية.

الشكل (٤-٢٧): الأدوات اللازمة لإنجاز المشروع.

الفرضيةُ:

صغ فرضية مناسبة تتعلق بما يهدف إليه المشروع، على أن تكون ذات علاقة بالطريقة المستخدمة لقياس القدرة وقياس الكفاءة، كما أنّه يمكن استخدام بعض العلاقات الرياضية المتعلقة بالشغل والطاقة الميكانيكية والعلاقة بينهما، ثم يُصمّم الفريق الطريقة المناسبة لاختبار تلك الفرضية.

يمكن أن تكون الفرضية حول اختلاف قدرة المضخة في حال عملها بالكهرباء، أو بالطاقة الشمسية. ويمكن أن تصوغ فرضية أخرى تتوقع فيها مقدار كفاءة المضخة.

الخطّةُ:

بناء على المعلومات التي جمعتها، ومن معادلات الطاقة الميكانيكية التي درستها، صمم المشروع المناسب الذي يتضمن توصيل خرطوم صغير بالمضخة، وتوفير مصدر للماء، وخزان يكون على ارتفاع مناسب، وصمم طريقة التوصيل الكهربائي للمضخة، والمصدر المناسب، يمكن أيضًا تضمين الخلايا الشمسية ضمن المشروع.

الإجراءاتُ:

١. ضع تصميمًا للمشروع يتضمن توصيلات الكهرباء، وتوصيلات خراطيم الماء، ومصادر الكهرباء، واختيار المضخة المناسبة، وتحديد الارتفاع المناسب لضخ الماء إليه.
٢. نفذ التصميم الذي وضعته، واختبرْه.
٣. يسجل أحد أفراد المجموعة الملاحظات، في أثناء التنفيذ، لإجراء التعديلات اللازمة.
٤. يمكنك الحصول على مضخة مناسبة من أماكن بيع قطع السيارات، وهي تعمل على جهد ١٢ فولت وتضخ الماء اللازم لغسل الزجاج الأمامي، ثم عليك إجراء التوصيلات الكهربائية الضرورية، ويكون المصدر، محولًا خافضًا يُعطي ١٢ فولت، أو مجموعة خلايا شمسية توفّر فرق الجهد نفسه.
٥. ستحتاج إلى أسلاك لتوصيل المضخة بالمصدر الكهربائي، وخراطيم خاصة لنقل الماء، وحوض لتجميع الماء الذي يُضَخّ، وساعة لقياس الزمن.

مناقشة النتائج

- اجمع المعلومات، وَدَوّن النتائج، ثم استخدم العلاقات الرياضية الخاصة بحساب القدرة الناتجة، والقدرة المبذولة، والكفاءة، ثم ناقش النتائج التي توصلت إليها مع أفراد المجموعة.
- تقديم عرض مناسب للمجموعات الأخرى، يوضح به فكرة قياس قدرة المضخة، وفرص نجاح النموذج، والمعيقات التي اعترضت العمل.

١ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي: (افترض جـ = ١٠م/ث^{٢})

١ إذا قذف جسم كتلته ٠,٥ كغ رأسيًّا إلى أعلى بسرعة ابتدائية مقدارها ٢٠ م/ ث، فإن الطاقة الحركية للجسم وهو على ارتفاع ٢ م بوحدة جول تساوي:

أ ١٠٠ ب ٩٠ جـ ٢٠ د ١٠

٢ تعدّ قوة جذب الأرض للأجسام من القوى المحافظة، وذلك لأنها:

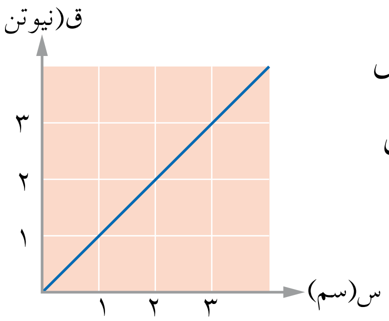
أ تحافظ على اتجاهها نحو مركز الأرض دائمًا. ب شغلها لا يعتمد على المسار الذي يتحركه الجسم.

جـ تُكسب الجسم المتحرك تسارعًا ثابتًا. د شغلها موجب القيمة دائمًا.

٣ يوضح الشكل (٤-٢٨) العلاقة البيانية بين القوة المؤثرة في نابض مرن (ق) بوحدة نيوتن، والاستطالة (س) بوحدة سم. عندما يستطيل النابض ٣سم فإنّ طاقة الوضع التي يختزنها بوحدة الجول تساوي:

أ ١×١٠$^{-٣}$ ب ١٥×١٠$^{-٣}$

جـ ٤٥×١٠$^{-٣}$ د ٩٠×١٠$^{-٣}$



الشكل (٤-٢٨): السؤال الأول، الفرع الثالث.

٤ جسم كتلته ٥ كغ، سقط من السكون من ارتفاع ١٢ م عن سطح الأرض سقوطًا حرًّا. في اللحظة التي تكون فيها طاقة حركته ٢٠٠ جول، تكون طاقة وضعه بوحدة الجول تساوي:

أ ١٠٠ ب ٢٠٠ جـ ٣٠٠ د ٤٠٠

٥ رافعة ترفع جسم كتلته ٦٠ كغ، إلى ارتفاع ١ م عن سطح الأرض، في نصف دقيقة. قدرة الرافعة بوحدة الواط تساوي:

أ ٦٠٠ ب ٦٠ جـ ٣٠ د ٢٠

٦ إذا زيدت سرعة جسم إلى مثلي قيمتها فإن طاقة حركته تصبح:

أ ربع ما كانت عليه. ب نصف ما كانت عليه.

جـ مثلي ما كانت عليه. د أربعة أمثال ما كانت عليه.

٧ اذا أطلقت قذيفة بشكل مائل عن الأفق فإنها تمتلك عند أقصى ارتفاع لها:

أ أكبر طاقة حركة، وأصغر طاقة وضع ب أكبر طاقة حركة، وأكبر طاقة وضع

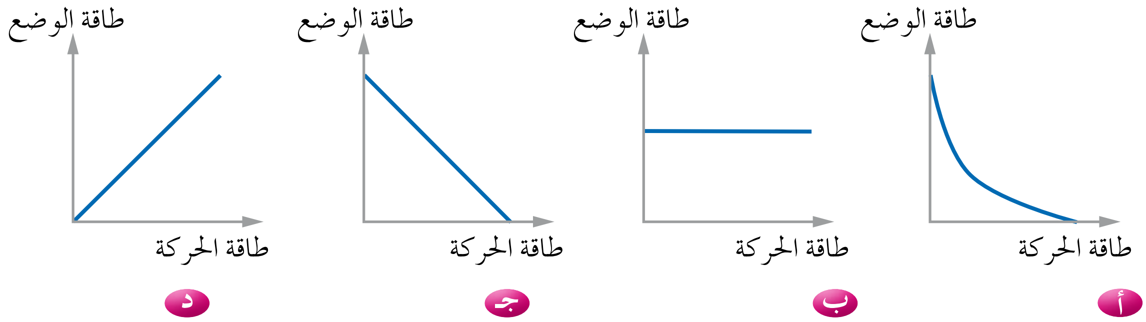
ج أصغر طاقة حركة، وأكبر طاقة وضع   د أصغر طاقة حركة، وأصغر طاقة وضع

٨ عندما تزداد استطالة نابض مرن إلى مثلي قيمتها، فإن طاقة الوضع المرونية المختزنة فيه:

أ تقل إلى الربع .   ب تقل إلى النصف.

ج تزداد إلى مثلي قيمتها.   د تزداد إلى أربعة أمثال قيمتها.

٩ الخط البياني الذي يمثل العلاقة بين تغير طاقة الوضع وتغير طاقة الحركة لجسم يسقط سقوطًا حرًّا في مجال الجاذبية الأرضية هو:



٢ ١ علل ما يأتي:

أ يعدو لاعب الزانة سريعًا قبل أن يغرز الزانة في الأرض.

ب قوة الاحتكاك قوة غير محافظة .

٢ ماذا نقصد بقولنا إنّ قدرة آلة تساوي ١٠٠٠ واط؟

٣ وضح المقصود بما يأتي: القوة المحافظة، الطاقة الميكانيكية، الطاقة الكامنة.

٣ احسب الشغل الذي تبذله قوة مقدارها ١٠٠ نيوتن لتحريك جسم مسافة ٥ م في الحالات الآتية:

أ إذا أثرت القوة بزاوية ٣٧° مع اتجاه الإزاحة   ج إذا كانت القوة بعكس اتجاه الإزاحة.

ب إذا كانت القوة عمودية على اتجاه الإزاحة.   د إذا كانت القوة باتجاه الإزاحة.

٤ سحب رجل جذع نخلة كتلته ٢٠ كغ على طريق أفقية خشنة مسافة ١٠م بسرعة ثابتة بوساطة حبل في زمن ٣ دقائق. فإذا كان معامل الاحتكاك ٠,٤ ، فاحسب:

أ الشغل الذي يبذله الرجل.   ب قدرة الرجل.

٥ أطلقت رصاصة أفقيًا نحو هدف خشبي ثابت فوصلته بسرعة ٤٠٠ م/ث، ثم خرجت منه بسرعة ١٠٠ م/ث، فإذا كان سمك الهدف الخشبي ١٠ سم، وكتلة الرصاصة ٥٠ غ. فاحسب:

أ التغير في طاقة حركة الرصاصة. ب الشغل الضائع في أثناء اختراق الرصاصة للهدف.

جـ متوسط مقاومة الهدف للرصاصة.

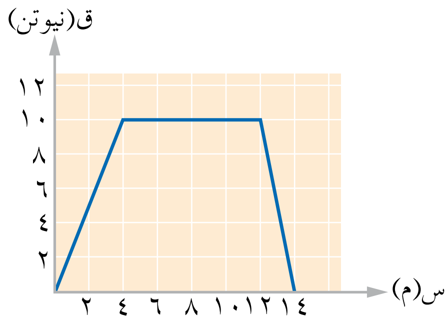
٦ وضع جسم كتلته ٢ كغ أمام نابض ثابت مرونته ٤٠٠٠ نيوتن/ م، مثبت على سطح أفقي أملس ومضغوط مسافة ١٠سم، عند إفلات النابض. احسب:

أ الشغل المبذول من النابض. ب أقصى سرعة يكتسبها الجسم.

٧ أثرت قوة أفقية (ق) في جسم، بحيث يتغير مقدارها مع الإزاحة المقطوعة (س) كما في الشكل (٤-٢٩). احسب:

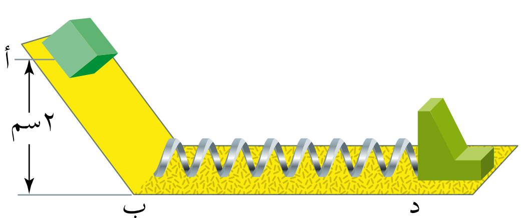
أ الشغل الذي تنجزه القوة إذا تحرك الجسم أفقيًا من س = ٠ إلى س = ١٢ م.

ب قدرة القوة إذا علمت أن الإزاحة الكلية للجسم استغرقت زمنًا قدره نصف دقيقة.



الشكل (٤-٢٩): السؤال السابع.

٨ ينزلق جسم كتلته ١٠ كغ من السكون من أعلى سطح أملس، كما في الشكل (٤-٣٠)، ثم يتابع سيره إلى أن يصطدم بنابض مثبت أفقيًا ثابت المرونة له ٢٢٥٠ نيوتن/ م، فيضغطه مسافة ٣سم ويتوقف الجسم. إذا كان السطح خشنًا في الجزء (ب د) فقط. فاحسب معامل احتكاك السطح الخشن.



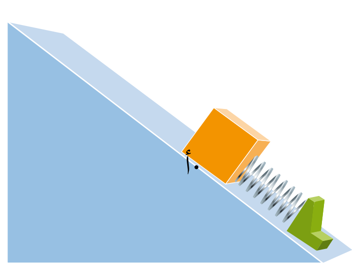
الشكل (٤-٣٠): السؤال الثامن.

٩ نابض ثابت المرونة له ١٠٠٠نيوتن/ م مثبت أسفل سطح مائل أملس، ضُغطَ بوساطة جسم كتلته ١ كغ مسافة ٨ سم، ثم تُرِكَ الجسم والنابض. جد:

أ الطاقة المختزنة في النابض قبل إفلات الجسم.

ب سرعة الجسم لحظة إفلاته من النابض.

جـ أقصى ارتفاع عن النقطة (أ) يصل إليه الجسم على السطح المائل قبل أن يتوقف.



الشكل(٤-٣١): السؤال التاسع.

الفصل الدراسي الثاني

الفصل الخامس

الاتزان السكوني والعزم

Static Equilibrium and Torque

في هذا الفصل

(٥–١): اتزان نقطة مادية.

(٥–٢): اتزان الجسم الجاسئ.

الأهمية

للاتزان الميكانيكي والعزم أهمية بالغة في حياتنا اليومية، مثل الآلات البسيطة كالرافعة والمفك، إضافة إلى تصميم التحف المعمارية الفريدة من ناطحات سحاب مائلة وجسور معلقة.

تسمى مدينة جرش الأثرية بمدينة الألف عمود ، حيث يبلغ طول شارع الأعمدة في مدينة جرش ٨٠٠م وتَحُفُّهُ من الجانبين أعمدة ضخمة منتصبة في مواقعها ومحتفظة بقواعدها وتيجانها المزخرفة ببراعة لافتة، وتدل هندسة العمارة في هذا الشارع على التقدم المعماري المذهل لإنسان ذلك العصر.

فكر:

- كيف تمكن الرومان القدماء من تصميم مثل هذه الأعمدة الضخمة المزخرفة بحيث تبقى ثابتة ولا تنهار.

بدأ الاهتمام بدراسة الاتزان الميكانيكي وشروطه منذ القدم، حيث أخذ قدماء مصر والرومان واليونان هذه الشروط بالحسبان عند تصميم الأهرام والقصور والقلاع والتحف المعمارية الضخمة، وقد استخدموا الروافع التي تعمل وفق مبدأ الاتزان الميكانيكي في رفع الحجارة الضخمة المستخدمة في البناء، وحديثًا لا تزال الدول تتسابق في تصميم التحف المعمارية الفريدة من جسور مائلة ومبان ضخمة لا يستطيع المهندسون المعماريون تصميمها من غير الرجوع إلى مفهوم الاتزان وشروطه، وعزم القوة.

بعد دراستك هذا الفصل يتوقع منك أن:

- توضح المقصود بمفهومي عزم القوة، والازدواج، وتعبر عنهما رياضيًا، مستخدمًا خاصية الضرب التقاطعي للمتجهات.
- توظف مفهوم العزم في تفسير بعض التطبيقات العملية، مثل: صنبور الماء، ومقود السيارة، والمفك.
- تذكر شرطي اتزان الجسم الجاسئ، وتميزه من اتزان النقطة المادية.
- تطبق العلاقات الخاصة بعزم القوة والازدواج والاتزان في حل مسائل حسابية.
- تتحقق عمليًا من شروط اتزان نقطة مادية تؤثر فيها قوى عدة مستوية ومتلاقية.
- تتوصل عمليًا إلى العوامل المؤثرة في عزم القوة.
- تتوصل عمليًا لشرطي الاتزان الميكانيكي لجسم ما.
- تبحث في بعض التطبيقات التكنولوجية الحديثة لمفهوم العزم.

٥–١ اتزان نقطة مادية

EQUILIBRIUM OF POINT MASS

نشاط تمهيدي

• انظر إلى الشكل (٥–١) ولاحظ استقرار نقطة في حالة اتزان سكوني.

لعلك تلاحظ في حياتك اليومية أجسامًا أو نقاطًا مادية تؤثر فيها قوى عدة، ومع ذلك فإنها تكون ساكنة في حالة اتزان كما في الشكل (٥–١) فمتى يحدث ذلك؟ وما الشروط اللازمة لتحقيق هذه الحالة؟ لتتعرف مفهوم اتزان نقطة مادية واقعة تحت تأثير قوى مستوية عدة نفذ النشاط (٥–١).

الشكل (٥–١): اتزان نقطة.

نشاط (٥–١) **شرط اتزان نقطة مادية**

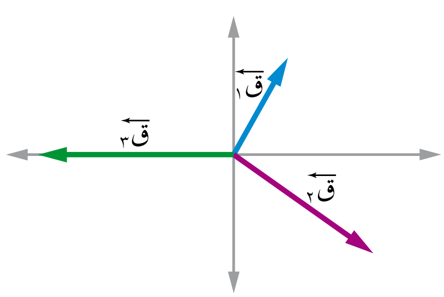
هدف النشاط: استنتاج شرط اتزان نقطة مادية.

الأدوات: طاولة القوى، بكرات، خيوط خفيفة وقوية، أثقال مختلفة، مسطرة، منقلة.

خطوات تنفيذ النشاط:

١. ثبت طاولة القوى في وضع أفقي تمامًا.
٢. اربط أطراف الخيوط الثلاثة في الحلقة المعدنية، وثبت خطافًا في الطرف الحر لكل خيط.
٣. علق كتلتين في الخطافين الأول والثاني ثم ضع الحلقة بحيث يكون المسمار في مركزها.
٤. علق كتلة مناسبة في الخطاف الثالث حتى تتوازن القوى الثلاثة بحيث تكون الحلقة غير ملامسة للمسمار كما في الشكل (٥–٢).
٥. مثل القوى الثلاث مقدارًا واتجاهًا على ورقة رسم بياني كما في الشكل (٥–٣).
٦. جد القوة المحصلة بطريقة الرسم التي تعلمتها في فصل المتجهات. ماذا تستنتج؟

الشكل (٥–٢): النشاط (٥–١).



الشكل (٥–٣): النشاط (٥–١).

تلاحظ أن الجسم النقطي يكون في حالة الاتزان عندما تكون القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا.

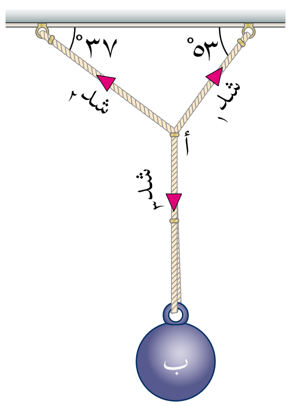
وهذا ما يعبر عنه بالعلاقة الرياضية:

$\sum \vec{ق} =$ صفر .... (٥-١)

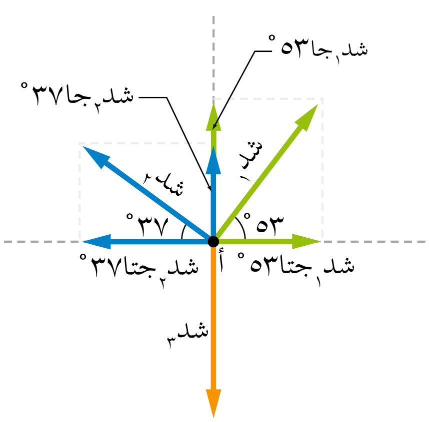
ويمكن تصنيف اتزان نقطة مادية إلى: اتزان سكوني، وفيه تكون القوة المحصلة المؤثرة في الجسم تساوي صفرًا، والجسم في حالة سكون (سرعته = صفرًا)، واتزان ديناميكي، وفيه تكون القوة المحصلة المؤثرة في الجسم تساوي صفرًا، والجسم في حالة حركة بسرعة ثابتة.

مثال (٥-١)

تتزن نقطة ربط الحبال الثلاثة حينما تكون كتلة الثقل المعلق (١كغ) والزوايا التي تصنعها الحبال مع السقف، كما هي مبينة في الشكل (٥-٤/أ). جد قوة الشد في كل حبل.



الشكل (٥-٤-أ): المثال (٥-١).



الشكل (٥-٤-ب): المثال (٥-١).

الحلّ:

بما أن الجسم ساكن فإنه متزن، فإننا نحلل قوتي الشد في الحبلين شد١، شد٢ إلى مركبتيهما السينية والصادية، كما في الشكل (٥-٤/ب)، ثم نطبق المعادلة (٥-١) على المركبات السينية والصادية للقوى المؤثرة في نقطة الربط(أ)، والقوى المؤثرة في الكتلة (ب).

ومن تطبيق المعادلة (٥-١) على المركبات السينية للقوى المؤثرة في (أ) نجد أن:

شد١ جتا ٥٣° − شد٢ جتا ٣٧° = صفر

شد١ × ٠,٦ = شد٢ × ٠,٨

أي أن شد١ = $\frac{٤}{٣}$ شد٢ .... معادلة (١)

أما عند تطبيق المعادلة (٥-١) على المركبات الصادية للقوى المؤثرة في (أ) نجد أن:

شد١ جا ٥٣° + شد٢ جا ٣٧° − شد٣ = صفر

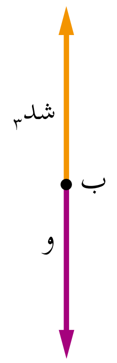
$٠,٨$ شد$_١$ + $٠,٦$ شد$_٢$ − شد$_٣$ = صفر .... معادلة (٢)

ثم نطبق المعادلة (٥−١) على القوى المؤثرة في (ب) فنجد أن:

شد$_٣$ = و

= ك جـ

= ١ × ٩,٨ = ٩,٨ نيوتن .... معادلة (٣)



الشكل (٥−٤−جـ): المثال (٥−١).

ثم بتعويض قيم شد$_١$ و شد$_٣$ من المعادلات (١) و (٢)

في المعادلة (٣) نجد أن:

$٠,٨$ ($\frac{٤}{٣}$ شد$_٢$) + $٠,٦$ شد$_٢$ = $٩,٨$

$١,١$ شد$_٢$ + $٠,٦$ شد$_٢$ = $٩,٨$

$١,٧$ شد$_٢$ = $٩,٨$

شد$_٢$ = $٥,٩$ نيوتن

وبما أن شد$_١$ = $\frac{٤}{٣}$ شد$_٢$

فإن شد$_١$ = $٧,٨$ نيوتن.

توسع

تجربة مليكان (Millikan)

استخدم الفيزيائي مليكان مبدأ الاتزان الميكانيكي لنقطة مادية لحساب شحنة الإلكترون، حيث وضع مليكان قطرة زيت مشحونة تحت تأثير قوة كهربائية تعاكس قوة الجاذبية الأرضية، وعندما اتزنت قطرة الزيت تحت تأثير وزنها (إلى أسفل) والقوتين الكهربائية والطفو (إلى أعلى)، وبمعرفة حجم القطرة وكثافتها، حسب مقدار شحنة الإلكترون.

مراجعة (٥−١)

١ ماذا نعني بقولنا إن نقطة مادية في حالة اتزان ميكانيكي؟

٢ هل يمكن لنقطة مادية أن تتزن تحت تأثير قوة خارجية وحيدة؟ وضح إجابتك.

٥–٢ اتزان الجسم الجاسئ

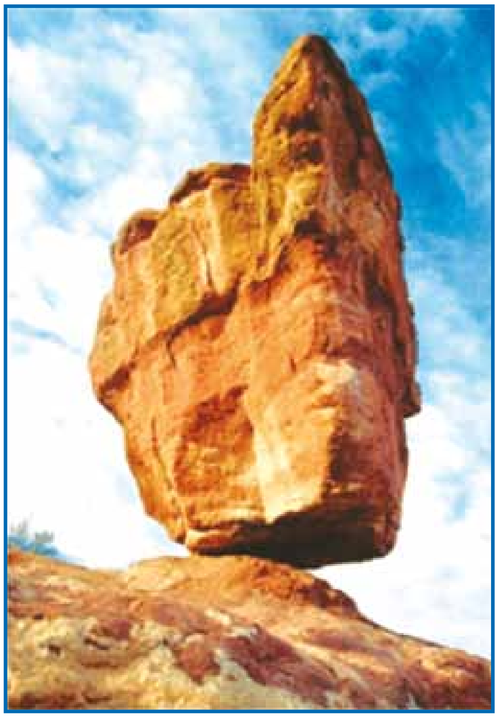
EQUILIBRIUM OF A RIGID BODY

نشاط تمهيدي

• انظر إلى الشكلين (٥–٥/أ) و (٥–٥/ب) ولاحظ حالة الاتزان السكوني للأجسام في الحالتين.

تعلمت في الدرس السابق شرط الاتزان السكوني للنقطة المادية، ولكننا في واقعنا العملي نتعامل مع أجسام مادية لها أبعاد كما في الشكلين (٥–٥/أ) و(٥–٥/ب). فما شروط اتزان هذه الأجسام؟ وبماذا تختلف هذه الأجسام عن النقاط المادية؟

الشكل (٥–٥/أ): نظام مكون من شوكة وملعقة في حالة اتزان ميكانيكي.



الشكل (٥–٥/ب): صخرة في حالة اتزان ميكانيكي.

(٥–٢–١) مركز الكتلة

تسمى الأجسام في الشكلين (٥–٥/أ) و (٥–٥/ب) أجسامًا جاسئة، فما هي الأجسام الجاسئة؟ وبماذا تختلف عن غيرها من الأجسام؟ **الجسم الجاسئ** (Rigid body) هو الجسم الذي تبقى الأبعاد بين أجزائه ثابتة عندما تؤثر فيه قوى خارجية فيظل شكله ثابتًا لا يتغير. وسنقتصر في هذا الفصل على دراسة الاتزان السكوني للأجسام الجاسئة، وقد وجد أن كل جسم يمتلك نقطة فريدة تسمى **مركز الكتلة**، وهي النقطة التي يمكن اعتبار أن كل كتلة الجسم متركزة فيها، فإذا علق الجسم منها على نحو حر فإنه لن يدور. نستنتج مما سبق أنه إذا كانت محصلة القوى الخارجية المؤثرة في الجسم الجاسئ عند مركز كتلته تساوي صفرًا فإن هذا الجسم سيكون متزنًا **اتزانًا انتقاليًا**. ولكن كيف يمكننا إيجاد مركز الكتلة للجسم الجاسئ عمليًا؟ للإجابة عن هذا السؤال نفذ النشاطين (٥–٢) و (٥–٣).

فكرة

لا يشترط أن يقع مركز الكتلة للجسم في نقطة مادية فيه، بل قد يقع في نقطة خارجه، مثل مركز الكتلة لحلقة معدنية، فهو يقع في مركزها حيث الفراغ.

نشاط (٥-٢) **إيجاد مركز الكتلة لجسم منتظم الشكل**

هدف النشاط: إيجاد مركز كتلة جسم منتظم الشكل عمليًّا.

الأدوات: مسطرة، خيط.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ علق المسطرة بوساطة الخيط من نقاط مختلفة حتى تصل إلى حالة الاتزان (بحيث تستقر المسطرة بوضع أفقي).

٢ لاحظ تدريج المسطرة في نقطة التعليق التي وصلت عندها لمرحلة الاتزان.

نشاط (٥-٣) **إيجاد مركز كتلة صفيحة غير منتظمة الشكل**

هدف النشاط: إيجاد مركز كتلة صفيحة غير منتظمة الشكل عمليًا.

الأدوات: قطعة من الكرتون (الورق المقوى)، وخيط، وخطاف.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ قص قطعة الورق المقوى على شكل خريطة الأردن، واعمل عند حافتها عددًا من الثقوب المتباعدة (ثلاثة ثقوب على الأقل).

٢ اربط الصفيحة من أحد الثقوب بالخيط، وعلقها رأسيًّا من الطرف الحر للخيط.

٣ عند سكون الصفيحة، ارسم خطًا رأسيًّا على الصفيحة على استقامة الخيط؛ لاحظ الشكل (٥-٦).

٤ أعد تعليق الصفيحة من ثقب ثانٍ، ثم من ثقب ثالث، وكرر رسم خط كما في الخطوة السابقة.

٥ لاحظ نقطة تقاطع الخطوط الثلاثة على الصفيحة.

تمثل نقطة تقاطع الخطوط مركز كتلة الصفيحة.

أي مدينة من مدن الأردن هي الأقرب إلى مركز كتلة الخريطة؟

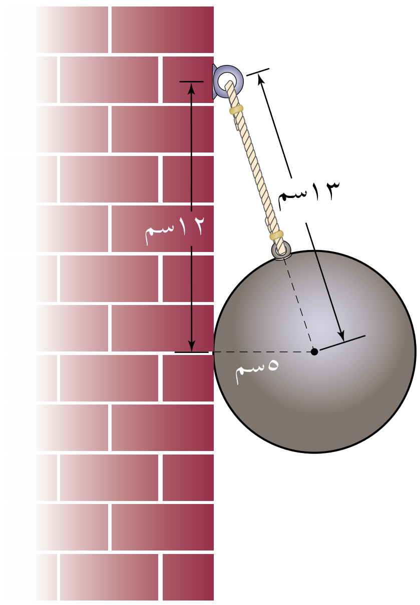
الشكل (٥-٦): النشاط (٥-٣).

نلاحظ من النشاطين (٥-٢) و (٥-٣) بأن مركز الكتلة للأجسام المتناظرة والمتماثلة هو مركزها الهندسي، وبوجه عام فإن مركز الكتلة للأجسام غير المتناظرة وغير المتماثلة يقع عند نقطة أقرب إلى الجزء الأكبر من كتلة الجسم.

مثال (٥-٢)

علقت كرة نصف قطرها (٥سم). تزن (٦٠ نيوتن) بحبل طوله (٨سم) من نقطة على سطحها بجدار رأسي أملس، فاتزنت كما في الشكل (٥-٧/أ)، احسب:

1. قوة الشد في الخيط.
2. القوة العمودية التي يؤثر بها الجدار في الكرة.



الشكل (٥-٧/أ): المثال (٥-٢).

الحلّ:

بما أن الكرة تتزن تحت تأثير القوى الثلاث المؤثرة فيها، وهي وزنها وقوة الشد في الحبل والقوة العمودية التي يؤثر بها الجدار على الكرة، وهي عبارة عن ثلاث قوى مستوية ومتلاقية في مركز كتلتها كما في الشكل (٥-٧/ب)، فإننا نستطيع أن نطبق المعادلة (٥-١) على المركبات السينية والصادية لهذه القوى الثلاث:

1. ومن تطبيق المعادلة (٥-١) على المركبات السينية للقوى بعد تحليل قوة الشد نجد أن:

ق⊥ − شد جتا β = صفر

ق⊥ − شد $\left(\frac{٥}{١٣}\right)$ = صفر

ق⊥ = $\frac{٥}{١٣}$ شد .... (١)

ومن تطبيق المعادلة (٥-١) على المركبات الصادية للقوى نجد أن:

شد جاβ − و = صفر

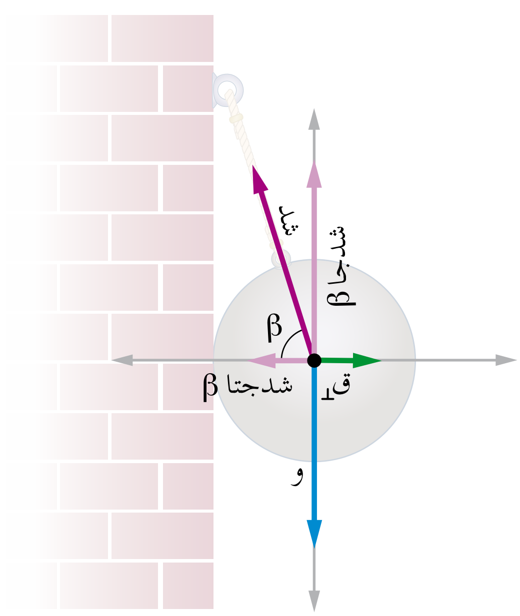
شد $\frac{١٢}{١٣}$ − ٦٠ = صفر

ومنه فإن:

شد = $\frac{١٣}{١٢}$ × ٦٠ =٦٥ نيوتن.

2. بتعويض قيمة شد في المعادلة (١) نجد أن:

ق⊥ = $\frac{٥}{١٣}$ ×٦٥ = ٢٥ نيوتن.



الشكل (٥-٧/ب): المثال (٥-٢).

فكر: لماذا لا يستطيع الشخص القاعد بالطريقة الموضحة في الشكل (٥-٨) أن ينهض على قدميه من غير أن يحني ظهره إلى الأمام أو يرجع قدميه إلى الخلف، أو يستند بيديه إلى الكرسي؟

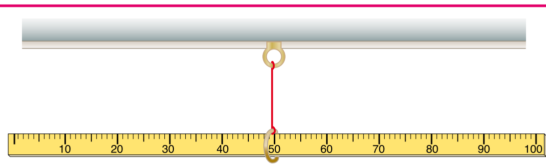
الشكل (٥-٨): فكر.

(٥-٢-٢) عزم القوة

توصلت في ما سبق إلى شرط اتزان النقطة المادية والجسم الجاسئ عندما تكون القوى المؤثرة فيهما متلاقية عند مركز الكتلة، ماذا لو كانت القوى المؤثرة غير متلاقية عند مركز الكتلة؟ ماذا سيحدث للجسم؟ كي تتمكن من الإجابة عن السؤالين السابقين تأمل الشكل (٥-٩)، وتذكر الحركة الدورانية لمفك البراغي ومقبض الباب عند التأثير فيها بقوة، ثم نفذ النشاط (٥-٤):

الشكل (٥-٩): الحركة الدورانية لمفتاح البراغي.

نشاط (٥-٤) عزم القوة



الشكل (٥-١٠): النشاط (٥-٤).

هدف النشاط: استقصاء الأثر الدوراني للقوة.

الأدوات: مسطرة، خيط.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ علق المسطرة من منتصفها كما في الشكل (٥-١٠).

٢ ارسم مخطط الجسم الحر للمسطرة.

٣ أثّر بأصبعك في طرف المسطرة بقوة للأعلى تارة وللأسفل تارة أخرى،ثم لاحظ حركتها.

٤ كرر الخطوة السابقة بجعل اتجاه القوة للأمام أو للخلف وبشكل أفقي، ثم لاحظ حركتها.

٥ أثّر في طرفي المسطرة بقوتين أحداهما للأعلى والأخرى للأسفل، ثم لاحظ اتجاه دوران المسطرة.

هل كانت المسطرة المعلقة متزنة في الخطوة (١)؟ ما القوى المؤثرة فيها؟ ماذا تسمى نقطة التعليق للمسطرة؟ ما نوع حركة المسطرة في الخطوتين (٣) و(٤)؟ ماذا تستنتج؟

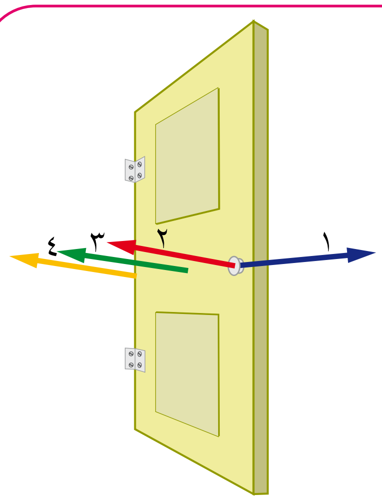
من النشاط السابق نستنتج أن **ثمة أثرًا دورانيًا للقوة التي تؤثر في جسم قابل للدوران حول محور ما، ويسمى هذا الأثر عزم القوة** (Torque). ما العوامل التي يعتمد عليها عزم القوة؟ هذا ما ستتعلمه في النشاط (٥-٥):

نشاط (٥-٥) العوامل التي يعتمد عليها عزم القوة

هدف النشاط: استقصاء العوامل التي يعتمد عليها عزم القوة

خطوات تنفيذ النشاط:

تأمل الشكل (٥-١١)، ثم حاول فتح باب غرفة الصف عن طريق التأثير فيه بقوى بمقادير مختلفة وفي أماكن مختلفة حسب النقاط المبينة في الشكل، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٥-١١): النشاط (٥-٥).

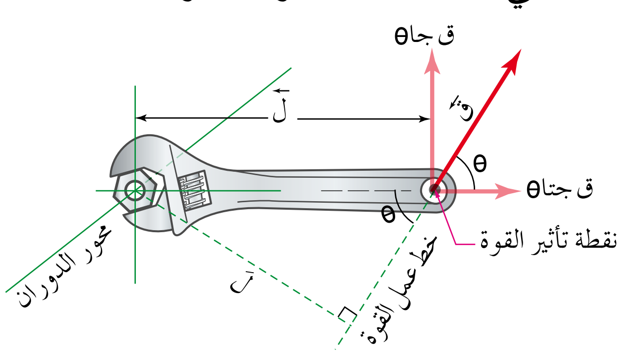
١ قارن بين القوة اللازمة لفتح الباب في الحالتين (٣) و(٤). أيهما أسهل؟
٢ قارن بين القوة اللازمة لفتح الباب في الحالتين (٢) و(٣). أيهما أسهل؟
٣ في أي الحالات كانت عملية فتح الباب أكثر سهولة؟
٤ في أي الحالات لم تنجح بفتح الباب مهما كان مقدار القوة المؤثرة؟

استنتج العوامل التي يعتمد عليها عزم القوة.

تلاحظ أن الأثر الدوراني للقوة يعتمد على مقدار القوة المؤثرة، فيتناسب معه طرديًا ويتناسب طرديًا كذلك مع البعد العمودي بين خط عمل القوة ومحور الدوران، وتلاحظ أن مركبة القوة العمودية على الخط الواصل من نقطة تأثير القوة ومحور الدوران هي التي تمتلك أثرًا دورانيًا فقط، وبذلك نمثل مقدار عزم القوة رياضيًا بالعلاقة:

$ع_{ق}$ = ل ق جا θ .... (٥-٢)

حيث ($ع_{ق}$) عزم القوة، و(ق) مقدار القوة المؤثرة في الجسم، و (ل) البعد بين نقطة تأثير القوة ومحور الدوران، و(θ) الزاوية المحصورة بين رأسي المتجهين (ق) و(ل) أو ذيليهما كما في الشكل (٥-١٢)، ويسمى المقدار (ل جا θ) الممثل ب (لَ) في الشكل (٥-١٢) ذراع القوة، وهو الذي يمثل البعد العمودي بين خط عمل القوة ومحور الدوران، ومن دراستك للضرب التقاطعي في فصل المتجهات توصلت



الشكل (٥-١٢): عزم القوة.

إلى أن المعادلة (٥-٢) تمثل مقدار متجه عزم القوة، ويمكن التعبير عنه رياضيًّا بالعلاقة:

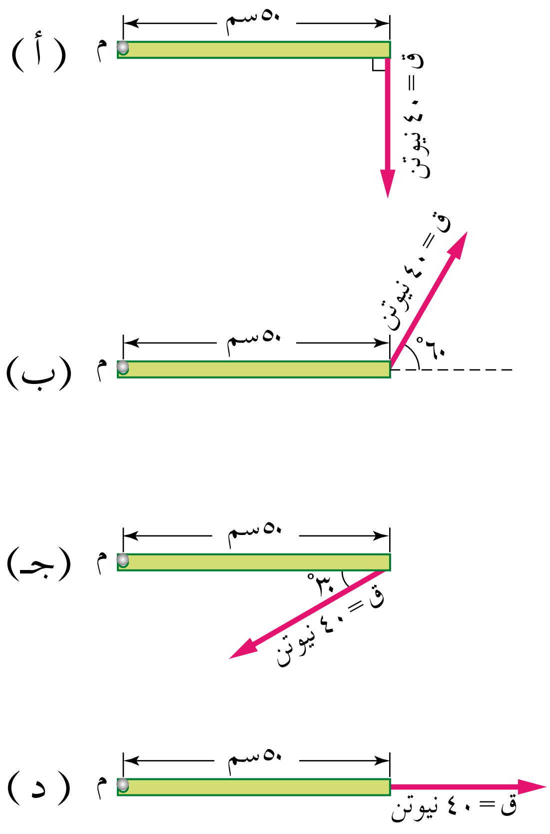
$$\vec{ع}_{ق} = \vec{ل} \times \vec{ق} \quad .... (٣-٥)$$

ومن المعادلة (٥-٢) يتضح أن وحدة قياس العزم هي (نيوتن .م) أما اتجاه العزم فيحدد باستخدام قاعدة اليد اليمنى التي تعلمتها في الفصل الأول، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه (ل) الذي يكون ذيله عند محور الدوران، ويمتد باتجاه نقطة تأثير القوة، وتشير بقية الأصابع إلى اتجاه (ق)، فيكون اتجاه العزم عموديًّا على راحة اليد اليمنى إلى الخارج.

وقد اصطلح على أن يكون عزم القوة موجبًا، عندما يؤدي إلى إحداث حركة دورانية للجسم عكس اتجاه عقارب الساعة، وأن يكون عزم القوة سالبًا، عندما يؤدي إلى إحداث حركة دورانية مع اتجاه عقارب الساعة (وذلك عند النظر إلى المجموعة من الأعلى).

مثال (٥-٣)

يبين الشكل (٥-١٣) قضيبًا قابلاً للدوران حول المحور (م) العمودي على مستوى الصفحة، احسب مقدار عزم القوة واتجاهه حول المحور (م) في كل حالة من الحالات الموضحة في الشكل:



الشكل (٥-١٣): المثال (٥-٣).

الحلّ:

بما أن القضيب قابل للدوران حول المحور م فإننا نطبق العلاقة (٥-٢) على القضيب فنجد:

أ- عزم القوة= ٠,٥ × ٤٠ × جا ٢٧٠°

عزم القوة = -٢٠ نيوتن . متر ويعمل على تدوير الجسم باتجاه عقارب الساعة.

ب-عزم القوة = ٠,٥ × ٤٠ × جا ٦٠°

عزم القوة = +١٧,٣٢ نيوتن . متر

ويعمل على تدوير الجسم عكس اتجاه عقارب الساعة.

جـ-عزم القوة = ٠,٥ × ٤٠ × جا ٢١٠°

عزم القوة =-١٠ نيوتن. متر

ويعمل على تدوير القضيب باتجاه عقارب الساعة.

د – عزم القوة = ٥,٠ × ٤٠ × جا صفر

عزم القوة = صفر

أي أنه لا يوجد أثر دوراني للقوة على القضيب ومن ثم لا يدور القضيب.

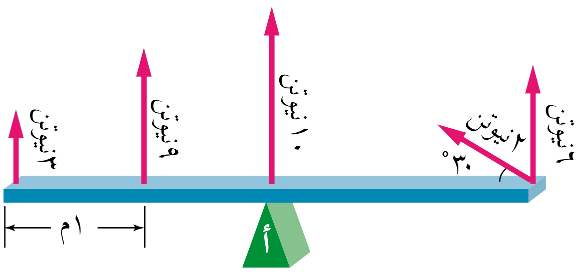
(٥-٢-٣) العزم الناتج عن تأثير أكثر من قوة

ماذا لو تأثر الجسم الجاسيء بعدة قوى غير متلاقية كما في الخطوتين (٤، ٥) من النشاط (٥-٤)؟ أي القوى مسؤولة عن الأثر الدوراني للمسطرة؟ كيف يمكننا زيادة سرعة دوران المسطرة، أو تغيير اتجاه دورانها؟ إن العزم الكلي المؤثر في جسم حول محور ما هو إلّا المجموع الاتجاهي لعزوم القوى حول المحور نفسه، ويمكن التعبير عن ذلك رياضيًّا بالمعادلة الآتية:

$$\sum \vec{\text{ع}}_{\text{ق}} = \vec{\text{ع}}_{\text{ق}١} + \vec{\text{ع}}_{\text{ق}٢} + \vec{\text{ع}}_{\text{ق}٣} + \ldots\ldots \qquad (٥-٤)$$

مثال (٥-٤)

قضيب طوله (٤م)، قابل للدوران حول نقطة الارتكاز (أ) عند منتصفه، وتؤثر فيه القوى المبينة في الشكل (٥-١٤)، احسب العزم المحصل لتلك القوى حول النقطة (أ).



الشكل (٥-١٤): المثال (٥-٤).

الحلّ:

لاحظ أن عزم القوة (١٠ نيوتن) يساوي صفرًا؛ لأنها تؤثر في نقطة الارتكاز، وأن للقوتين (٩، ٣ نيوتن) أثرًا دورانيًّا باتجاه عقارب الساعة، وأن للقوتين (٢، ٦ نيوتن) أثرًا دورانيًّا بعكس اتجاه عقارب الساعة.

المجموع الجبري للعزوم باتجاه عقارب الساعة:

$\sum \text{ع}_{\text{ق}}$ = (−٣×٢) + (−٩×١) = −١٥ نيوتن.م

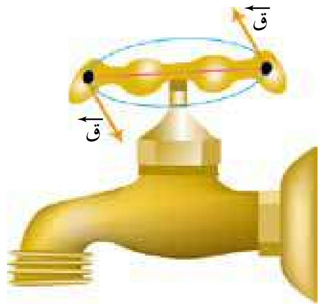
المجموع الجبري للعزوم بعكس اتجاه عقارب الساعة:

$\sum \text{ع}_{\text{ق}}$ = (٦×٢) + (٢×٢× جا ١٥٠) = +١٤ نيوتن.م

وهكذا، فإن العزم المحصل في القضيب:

$\sum \text{ع}_{\text{ق}}$ = −١ نيوتن.م باتجاه عقارب الساعة.

ويسمى العزم الناتج عن تأثر الجسم بقوتين متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه وخطا عملهما غير منطبقين **عزم الازدواج**، بحيث يؤدي إلى دوران الجسم كما في الشكل (٥–١٥)، **أما هذان الزوجان من القوى فيسمى(الازدواج).**



الشكل (٥–١٥): الحركة الدورانية الناجمة عن الازدواج.

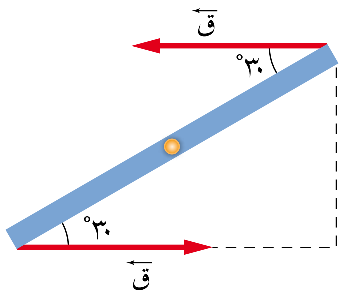
ولحساب عزم الازدواج، فإننا نطبق العلاقة (٥–٤) على هذين الزوجين من القوى فنحصل على:

عـزم الازدواج = ق لَ .... (٥–٥)

حيث تمثل (ق) مقدار إحدى القوتين بالنيوتن، و(لَ) البعد العمودي بين خطي عملهما بالمتر.

مثال (٥–٥)

يبين الشكل (٥–١٦) قضيبًا منتظمًا طوله (١٠٠سم) قابلًا للدوران حول محور عمودي على محور القضيب يمر في منتصفه، تؤثر فيه قوتان قيمة كل منهما (١٠ نيوتن)، وتميل كل منهما بزاوية (٣٠°) عن محور القضيب، احسب عزم الازدواج المؤثر في القضيب.



الشكل (٥–١٦): المثال (٥–٧).

الحلّ:

يتضح من الشكل (٥–١٦) أن القوتين المؤثرتين في القضيب تشكلان ازدواجًا يمكننا حساب عزمه من العلاقة (٥–٥) كالآتي:

عزم الازدواج = إحدى القوتين × البعد العمودي بينهما

عزم الازدواج = ١٠ × ١ × جا ٣٠ = ١٠ × ١ × ٠,٥ = +٥ نيوتن . م

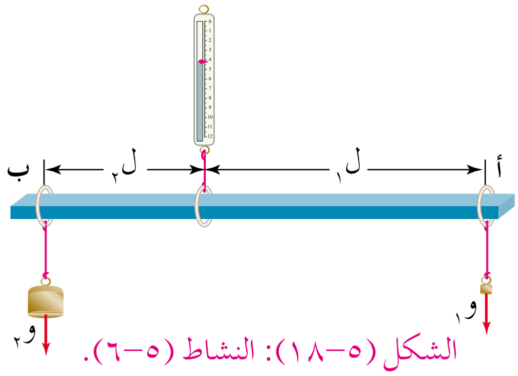
ويعمل هذا الازدواج على تدوير القضيب بعكس اتجاه عقارب الساعة.

(٥–٢–٤) الاتزان السكوني

متى يصل الجسم الجاسئ إلى حالة الاتزان السكوني؟ للإجابة عن هذا السؤال انظر إلى الميزان ذي الكفتين المبين في الشكل (٥–١٧)، وحاول أن تستنتج شرطي الاتزان السكوني للجسم الجاسئ، ثم نفذ النشاط (٥–٦).


الشكل (٥–١٧): الميزان ذو الكفتين.

نشاط (٥-٦) الإتزان السكوني للجسم الجاسئ



الشكل (٥-١٨): النشاط (٥-٦).

هدف النشاط: استقصاء شرطي الاتزان السكوني للجسم الجاسئ عمليًّا.

الأدوات: مسطرة خشبية بطول ١٠٠سم، ميزان نابضي، كتل مختلفة

خطوات تنفيذ النشاط:

١ علق المسطرة من منتصفها بوساطة ميزان نابضي كما في الشكل (٥-١٨).

٢ علق ثقلاً ($و_١$) في طرف المسطرة (أ).

٣ علق ثقلاً آخر ($و_٢$) في الجهة الأخرى للمسطرة (ب)، وعلى بعد يجعل المسطرة متزنة أفقيًّا.

٤ قس $ل_١$ و $ل_٢$.

٥ قس قراءة الميزان النابضي.

٦ كرر الخطوات السابقة بتغيير الأثقال ونقطة تعليق الميزان في كل حالة، سجل نتائجك في الجدول (٥-١).

الجدول (٥-١): النشاط (٥-٦)

رقم المحاولة	$و_١$	$ل_١$	$و_١×ل_١$	$و_٢$	$ل_٢$	$و_٢×ل_٢$	قراءة الميزان النابضي	$و_١$ +$و_٢$+ وزن المسطرة
١								
٢								
٣								

لا بد من أنك لاحظت من النشاط (٥-٦) أن المسطرة اتزنت عندما كانت ($ل_١$ × $و_١$) = ($ل_٢$ × $و_٢$)، وهذا يعني أن مجموع العزوم حول المحور المار بمنتصف المسطرة يساوي صفرًا، وأن قراءة الميزان النابضي في كل حالة كانت تساوي ($و_١$ + $و_٢$ + وزن المسطرة)، وهذا يعني أن محصلة القوى المؤثرة في المسطرة تساوي صفرًا. ومما سبق نستنتج بأن شرطي الاتزان السكوني للجسم الجاسئ الواقع تحت تأثير قوى عدة هما:

١ مجموع العزوم حول أي محور دوران يجب أن يساوي صفرًا ($\sum$ $عـ_ق$ = صفر) .... (٥-٦)، ويسمى الاتزان الدوراني.

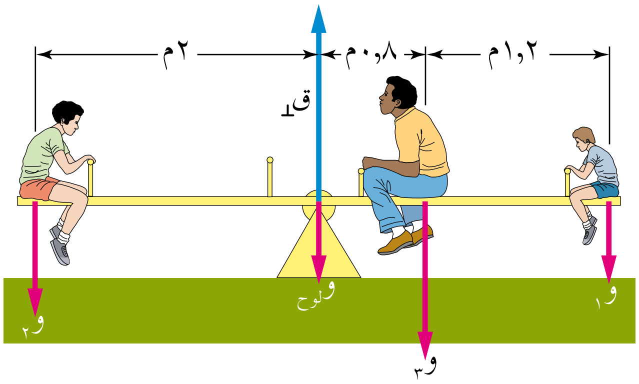
٢ القوة المحصلة المؤثرة في الجسم يجب أن تساوي صفرًا ($\sum$ ق = صفر) .... (٥-١)، ويسمى الاتزان الانتقالي.

مثال (٥-٦)

لوح خشبي منتظم وزنه ٣٠٠ نيوتن، وطوله ٤ متر، يرتكز من منتصفه على دعامة، يقعد عليه ثلاثة أطفال كما في الشكل (٥-١٩).بما يجعل المجموعة متزنة. إذا علمت أن وزن الطفلين الأول والثاني على الترتيب (٣٠٠، ٦٠٠) نيوتن فاحسب:

١ وزن الطفل الثالث.

٢ قوة التلامس العمودية عند نقطة الارتكاز.



الشكل (٥-١٩): المثال (٥-٦).

الحلّ:

من تحليل المسألة نجد أن اللوح يتأثر بخمس قوى هي: أوزان الأطفال الثلاثة على الترتيب (و$_1$، و$_2$، و$_3$)، وكذلك وزن اللوح الذي يؤثر في منتصفه؛ لأنه منتظم (و$_{لوح}$)، و القوة العمودية التي تؤثر بها الدعامة في اللوح (ق$_\perp$)، وبما أن اللوح متزن فإننا نستطيع أن نطبق العلاقة (٥-٦) على اللوح لنحصل على:

− (ل$_1$ × و$_1$) + (ل$_2$ × و$_2$) − (ل$_3$×و$_3$) + (و$_{لوح}$ × ل$_{لوح}$) + (ق$_\perp$ × ل$_\perp$) = صفر

(−٣٠٠ × ٢) + (٦٠٠ × ٢) + (−٠,٨ × و$_3$) + (٣٠٠ × صفر) + (ق$_\perp$ × صفر) = صفر

−٦٠٠ + ١٢٠٠ − ٠,٨و$_3$ = صفر

و$_3$ = ٧٥٠ نيوتن.

ومن تطبيق العلاقة (٥-١) على اللوح نجد أن:

ق$_\perp$ = ٣٠٠ + ٦٠٠ + ٧٥٠ + ٣٠٠ = ١٩٥٠ نيوتن.

توسع

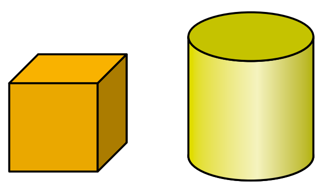
في دورة الألعاب الأولمبية التي أقيمت في المكسيك عام (١٩٦٨م)، أثار اللاعب ديك فسبوري (Dick Fosbury) دهشة العالم، في رياضة الوثب العالي، وحقق رقمًا قياسيًّا جديدًا (٢,٢٤ م)، وذلك لابتكاره طريقة جديدة بالوثب، بأن يقفز جاعلاً ظهره في مقابلة الحاجز كما في الشكل (٥-٢٠)

الشكل (٥-٢٠): قفزة ديك فسبوري.

بدلًا من بطنه كما كان يقفز الآخرون. في الدورات اللاحقة اتبع اللاعبون جميعهم طريقة فوسبوري في القفز. اجتهد الباحثون في اكتشاف التفسير العلمي لهذه القفزة المبتكرة، فوجدوا أن الأمر متعلق بمركز الكتلة. ابحث عن التفسير الفيزيائي وراء نجاح هذه الطريقة المبتكرة في رياضة الوثب العالي.

مراجعة (٥-٢)

١ ميز بين شرط الاتزان الانتقالي لنقطة مادية وللجسم الجاسئ.



الشكل (٥-٢١): السؤال (٣).

٢ عند المنعطفات والطرق المائلة يكون سائق الشاحنة أكثر حذرًا من سائق السيارة الصغيرة خوفًا من انقلابها. فسر ذلك.

٣ حدد مركز الكتلة للأجسام الصلبة في الشكل (٥-٢١).

٤ يريد طالب أن يعبر بابًا دوارًا ساكنًا، وضح كيف وأين يدفع الباب ليولد دورانًا بأقل مقدار من القوة المؤثرة.

٥ قد يقع الجسم تحت تأثير قوى محصلتها تساوي صفرًا، لكنه يكون غير متزن. فسر إجابتك؟

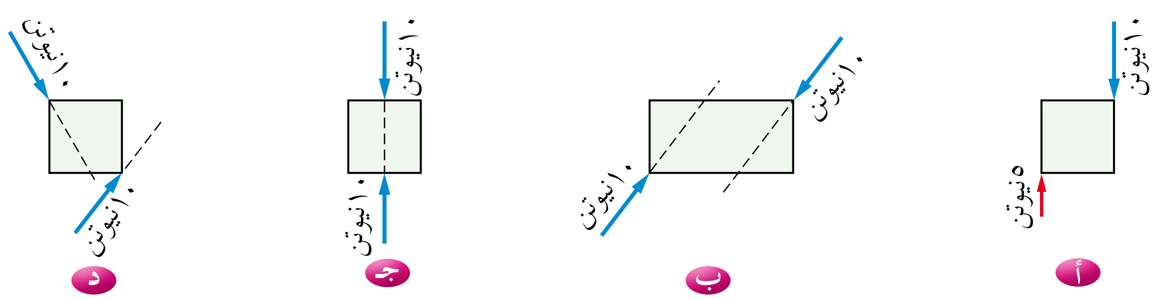
٦ أعط مثالاً لجسم في الحالات الآتية:

أ متزن انتقاليًّا ولكنه غير متزن دورانيًّا.

ب متزن دورانيًّا ولكنه غير متزن انتقاليًّا.

٧ ماذا نعني بقولنا إن عزم الازدواج المؤثر في جسم ما يساوي (-٥ نيوتن.م).

٨ في الشكل (٥-٢٢) أي من أزواج القوى الآتية تمثل ازدواجًا مع بيان السبب؟



الشكل (٥-٢٢): السؤال (٨).

٩ هل يكون الجسم الواقع تحت تأثير ازدواج في حالة اتزان ميكانيكي؟ فسر إجابتك.

١٠ هل عزم الازدواج كمية قياسية أم كمية متجهة؟ فسر إجابتك.

الشكل (٥-٢٣): سقالة البناء.

المشروع الخامس: التحقق من تثبيت سقالة البناء بشكل آمن.

فكرة المشروع

في الشكل (٥-٢٣) يستعمل عامل البناء السقالة لإكمال أعمال البناء وصيانة المباني العالية، ولكي يثبت السقالة بشكل آمن يجب أن تخضع لاتزان انتقالي واتزان دوراني. ما القوى المؤثرة في السقالة؟ وكيف يمكن تحقيق شرطي الاتزان الانتقالي والدوراني عند تثبيت السقالة؟

الفرضية:

عند تثبيت السقالة تؤثر فيها مجموعة من القوى، وحتى تحقق شرطي الاتزان الانتقالي والدوراني معًا يجب أن تكون محصلة القوى ومحصلة عزوم القوى المؤثرة في السقالة مساوية للصفر.

ضع مجموعة من الفرضيات حول القوى المؤثرة في السقالة، ونقطة تأثير كل منها حتى تحقق شرطي الاتزان الانتقالي والدوراني للسقالة.

الخطة:

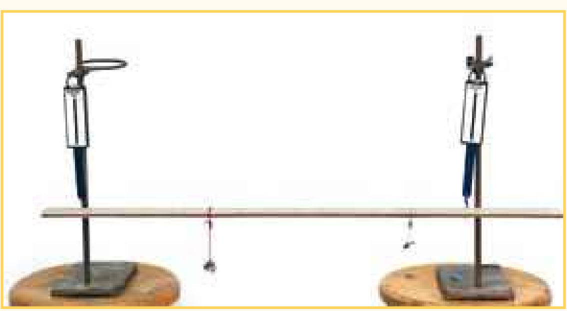
لتتمكن من اختبار فرضياتك حول شرطي الاتزان الانتقالي والدوراني للسقالة، عليك تنفيذ النشاط الآتي، ويمكنك الاستعانة بمهندس معماري، وبمواقع الإنترنت ذات العلاقة بالموضوع.

الأدوات:

مسطرة مترية، ميزانان نابضيان بتدرج ٥ نيوتن، حاملان حلقيان رأسيان،كتلة تعليق ٥٠٠ غ، كتلة تعليق ٢٠٠ غ، ملزمتان قابلتان للحركة.

الإجراءات:

سنفترض أن الميزان الأيسر هو نقطة الدوران المحورية في هذا النشاط، حيث يقاس ذراع القوة من هذه النقطة.



الشكل (٥-٢٤): أدوات المشروع.

١. ضع الحاملين الحلقيين على المسطرة، وعلى بعد ٨٠ سم من بعضهما، كما في الشكل (٥- ٢٤).
٢. ثبت كلتا الملزمتين على حامل حلقي.
٣. تأكد من معايرة الميزانين النابضين قبل البدء باستخدامهما.
٤. علق كلا الميزانين بملزمة قابلة للحركة ومثبتة على حامل.
٥. ثبت المسطرة المترية باستخدام الخطافين في نهاية النابضين، على أن يكون النابض الأيسر عند العلامة ١٠ سم، والأيمن عند ٩٠سم.
٦. سجل قيمة القوة في جدول البيانات (٥-٢) في ضوء قراءة الميزانين النابضين.
٧. علق الكتلة ٥٠٠ غ على المسطرة المترية عند العلامة ٣٠ سم، حيث تكون على بعد ٢٠ سم من الميزان الأيسر.
٨. سجل قيمة القوة في جدول البيانات (٥-٢) في ضوء قراءة الميزانين النابضين.
٩. علق الكتلة ٢٠٠ غ على المسطرة المترية عند العلامة ٧٠ سم، حيث تكون على بعد ٦٠ سم من الميزان الأيسر.

١٠ سجل قيمة القوة في جدول البيانات (٥–٢) في ضوء قراءة الميزانين النابضين.

١١ احسب كتلة المسطرة المترية.

١٢ استخدم النقطة التي علق عندها الميزان الأيسر بوصفها نقطة دوران محوري، وحدد القوى التي تسبب دوران السقالة باتجاه عقارب الساعة، والقوى التي تسبب دورانها بعكس اتجاه عقارب الساعة.

١٣ احسب العزم الناتج عن القوى جميعها المؤثرة في السقالة، وسجله في الجدول (٥–٣).

الجدول (٥–٢)

الأجسام المضافة	المسافة من الميزان الأيسر (م)	قراءة الميزان الأيسر (نيوتن)	قراءة الميزان الأيمن (نيوتن)
المسطرة	٠,٤		
كتلة ٢٠٠ غ	٠,٢		
كتلة ٥٠٠ غ	٠,٦		

الجدول (٥–٣)

الأجسام المضافة والميزان النابضي الأيمن	القوة (نيوتن)	ذراع القوة (متر)	عزم القوة (نيوتن.متر)
المسطرة			
كتلة ٢٠٠ غ			
كتلة ٥٠٠ غ			
الميزان الأيمن			

مناقشة:

تناقش المجموعات إجابات الأسئلة الآتية:

- ما هي العوامل التي تؤثر في اتزان السقالة؟
- هل يؤثر ارتفاع السقالة عن سطح الأرض في اتزانها؟
- ما مصادر الخطأ في التجربة؟
- ما الاقتراحات الممكنة لتحسين التجربة وتقليل مصادر الخطأ؟
- ماذا تتوقع أن يحدث للسقالة لو غير عامل البناء موقعه عليها بشكل عشوائي؟

النتائج:

مستفيدًا من نتائج النشاط الذي أجريته، والمعلومات التي حصلت عليها من المهندس المعماري ومواقع الإنترنت، قدم تقريرًا، تبين فيه:

- فوائد السقالات.
- متطلبات الأمن والسلامة لاستخدام السقالة وفكها وتركيبها.
- آلات بسيطة أخرى يمكن الاستعانة بها في أعمال البناء.

١ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

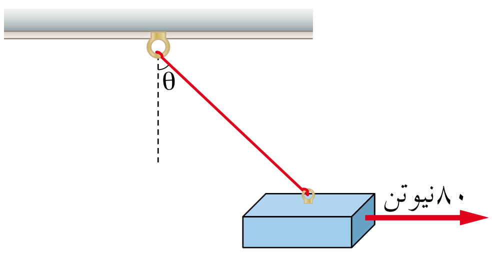
١ يقاس عزم القوة بوحدة:

أ نيوتن.متر ب نيوتن/متر جـ نيوتن.م٢ د نيوتن/م٢

٢ صندوق يزن (٦٠) نيوتن معلق بواسطة حبل، تؤثر فيه قوة أفقية مقدارها (٨٠) نيوتن فيتزن كما في الشكل (٥-٢٥). مقدار الزاوية θ الموضحة في الشكل يساوي:

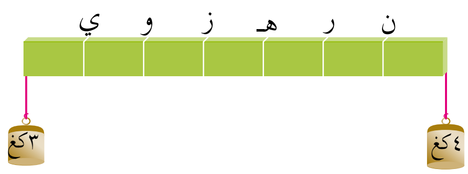
أ ٣٧° ب ٥٣°

جـ ٤٥° د ٦٠°



الشكل (٥-٢٥): السؤال الأول الفقرة (٢).

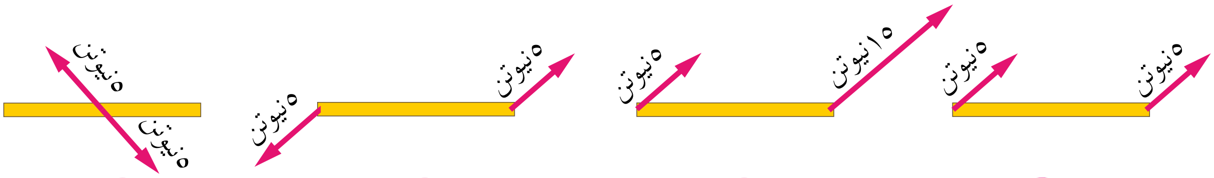
٣ عُلِّق ثقلان كتلتاهما على التوالي (٤،٣) كغ بطرفي قضيب مهمل الكتلة طوله ل. إذا قُسِّمَ القضيب إلى سبعة أجزاء متساوية كما في الشكل (٥-٢٦)، فإن القضيب يستقر متزنًا عند تعليقه من النقطة:



الشكل (٥- ٢٦): السؤال الأول الفقرة (٣).

أ ز ب هـ جـ ر د ن

٤ أي الأشكال الآتية تمثل ازدواجًا:



أ ب جـ د

٥ يستخدم طفل مفتاحًا كي يفك برغيًّا في دراجته الهوائية، ويحتاج إلى بذل عزم مقداره (١٠ نيوتن.م). إذا علمت أن أقصى قوة يستطيع الطفل أن يؤثر بها عموديًّا في المفتاح تساوي (٥٠ نيوتن)، فإن طول المفتاح الذي يجب أن يستخدمه الطفل يساوي (بالمتر):

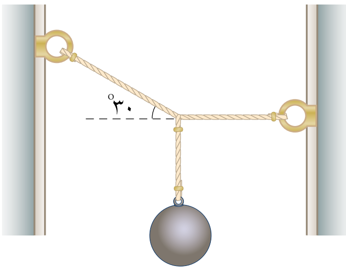
أ ٠,١ ب ٠,٢ جـ ٠,٥ د ٥

٢ وضح المقصود بكل من المصطلحات الآتية: الاتزان السكوني، مركز الكتلة، عزم القوة، الازدواج.

٣ وضح بتجربة عملية كيف يمكنك إيجاد مركز كتلة لصفيحة مثلثة الشكل.

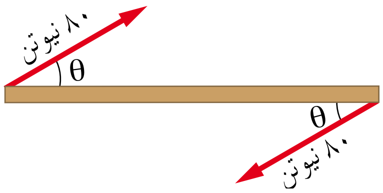
❹ يمثل الشكل (٥–٢٧) ثقلًا متزنًا.

احسب قوة الشد في الحبلين علمًا بأن وزن الثقل يساوي (١٠ نيوتن).



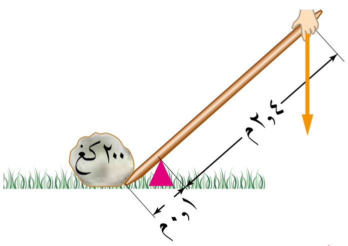
الشكل (٥–٢٧): السؤال الرابع.

❺ قوتان متوازيتان قيمة كل منهما ٨٠ نيوتن، تؤثران عند طرفي قضيب كما في الشكل (٥–٢٨)، فإذا كان طول القضيب ٢م، والعزم الكلي المؤثر= ٨٠ نيوتن.م، فجد الزاوية θ التي يصنعها خط عمل كل من القوتين مع القضيب.



الشكل (٥–٢٨): السؤال الخامس.

❻ يحاول عامل بناء رفع كتلة صخرية باستخدام العتلة، كما في الشكل (٥–٢٩). ما مقدار القوة التي يجب أن يؤثر فيها العامل في العتلة كي يستطيع رفع الصخرة؟

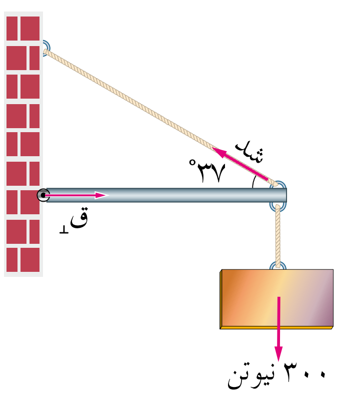


الشكل (٥–٢٩): السؤال السادس.

❼ لوح أفقي مهمل الكتلة طوله (٦ أمتار) مثبت في جدار بناية، وطرفه السائب مربوط بحبل إلى الجدار، ويصنع زاوية ٣٧° كما في الشكل (٥–٣٠).إذا علق في طرفه السائب ثقل وزنه (٣٠٠) نيوتن، فجد ما يأتي:

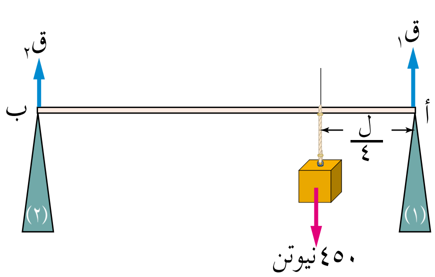
أ) قوة الشد في الحبل.

ب) القوة العمودية التي يؤثر بها الجدار في اللوح.



الشكل (٥–٣٠): السؤال السابع.

❽ يمثل الشكل (٥–٣١) قضيبًا منتظمًا طوله (ل) ووزنه (٢٠٠) نيوتن. إذا عُلّق ثقل وزنه (٤٥٠) نيوتن على بعد ($\frac{ل}{٤}$) من الطرف (أ) فاتزن. احسب مقدار القوة التي تؤثر بها كل من الدعامتين (١، ٢) في القضيب.



الشكل (٥–٣١): السؤال الثامن.

الوحدة الأولى: الميكانيكا

الفصل السادس

الزخم الخطي والتصادمات

Linear Momentum and Collisions

في هذا الفصل

الأهمية

يُعطي مفهوم الزخم انطباعًا عن حركة الأجسام؛ فالشاحنة تمتلك زخمًا أكبر بكثير ممّا تمتلكه سيارة صغيرة لها السرعة نفسها؛ لذا، يصعب إيقاف الشاحنة، وتلزم قوّة كبيرة لإيقافها أكبر من تلك التي تلزم لإيقاف السيارة.

لعبة البلياردو إحدى الألعاب الفردية ذات المهارة العالية التي تعتمد في أساسها على قوانين الفيزياء خصوصًا التصادم وحفظ الطاقة والزخم، حيث يقوم اللاعب بضرب كرة ساكنة بعَصًا في يده؛ ما يغير من زخمها، ومن ثم تتحرك الكرة لتصطدم بكرة أخرى أو مجموعة كرات ساكنة؛ ما يغير كذلك من زخمها الخطي .

فكّر

- علامَ تعتمد دقة التصويب للاعب؟ وما نوع التصادم الذي يحدث؟

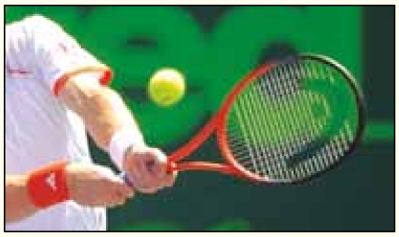
درست في فصول سابقة وصف الحركة والمفاهيم المتعلّقة بها؛ كالموقع والسرعة والتسارع، ودرست أيضًا مسببات الحركة، وتعرّفت أثر القوة في الأجسام، وما تبذله عليها من شغل. في هذا الفصل سوف تدرس كميتين فيزيائيتين متجهتين، هما: الزّخم والدفع، وستتعرّف على العلاقة بين الكميتين، وبعض التطبيقات العملية لهما.

بعد دراستك هذا الفصل يتوقع منك أن:

- توضح المقصود بالزخم الخطّي والدّفع، وتذكر وحدات قياس كلّ منهما.
- تتوصل إلى قانون نيوتن الثاني بدلالة المعدّل الزمني للتغيّر في الزخم الخطّي.
- تتوصل إلى قانون حفظ الزخم الخطّي في الأنظمة المعزولة.
- تفسر ظواهر ومشاهدات حياتية اعتمادًا على قانون حفظ الزخم الخطّي، مثل ارتداد البندقية، دوران رشاش الماء.
- توضح المقصود بالتصادم في بعد واحد والتصادم في بعدين.
- تستقصي أنواع التصادمات من حيث حفظ الطاقة الحركية، وتميّز بينها.
- تطبق العلاقات الخاصة بالزخم الخطّي، والدفع، والتصادم في حلّ مسائل حسابية.
- تجري أنشطة وتجارب عملية للتحقق من قانون حفظ الزخم الخطّي.
- تبين أهميّة التطبيقات التكنولوجية الحديثة المتعلقة بالزخم الخطّي والدفع، مثل الوسادة الهوائية في السيارة، وبعض الألعاب والأدوات الرياضية.

نشاط تمهيدي

- صف ماذا يحدث لكل من الكرة والخيوط المضرب عندما تضرب كرة التنس.



الشكل (٦–١): كرة التنس الأرضي.

(٦-١-١) الزّخم الخطّي

عندما يقف متزلجان على أرضية جليدية ويدفع أحدهما الآخر بقوة وحسب القانون الثالث في الحركة لنيوتن فإن المتزلج الثاني يدفع الأول بقوة مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه، لكن ما مقدار السرعة التي ينطلق بها كل من المتزلجين؟ في هذه الحالة وفي حالات أخرى مشابهة ليس من السهل التوصل إلى الحل باستخدام قوانين الحركة أو قانون حفظ الطاقة التي درستها سابقًا، بل تحتاج إلى قوانين أخرى وهي قوانين الزخم الخطّي.

يوصف الزخم الخطّي بأنّه كمية الحركة للجسم المتحرك في خط مستقيم، ويرمز له بالرمز ($\vec{خ}$)، فإذا رميت كرة التنس وكرة الطاولة بالسرعة نفسها، فإنّك ستزوّد الكرة ذات الكتلة الأكبر بزخم أكبر؛ فالزخم يتناسب طرديًا مع الكتلة. هل يعني ذلك أنّ الرصاصة لا تمتلك زخمًا كبيرًا، لأنّ كتلتها صغيرة؟ إن زخم الرصاصة كبير، لأنها تنطلق بسرعة عالية جدًّا؛ فالزخم يعتمد أيضًا على السرعة، ويتناسب معها طرديًا.

نستنتج من هذه المشاهدات أن الزخم الخطّي Linear Momentum كمية فيزيائية متجهة ناتجة عن حاصل ضرب الكتلة في متجه السرعة، واتجاه الزخم الخطّي هو اتجاه السرعة. ويحسب من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\vec{خ} = ك\ \vec{ع} \qquad (٦-١)$$

حيث (ك) كتلة الجسم،($\vec{ع}$) سرعته، ويُقاس الزخم بوحدة كغ م/ث.

مثال (٦-١)

ركل لاعبٌ كرةَ قدم كتلتها ٤٤٠ غ باتجاه المرمى الذي يقع إلى جهة الشرق، إذا علمت أنّ الكرة تحركت لحظة ركلها بسرعة ٢٥ م/ث، فجد الزخم الخطّي للكرة.

الحلّ:

$\vec{خ} = ك\ \vec{ع}$

$خ = ك\ ع$

$\vec{خ} = \frac{٤٤٠}{١٠٠٠} \times ٢٥ = ١١$ كغ م/ث، شرقًا.

(٦-١-٢) الدفع


الشكل (٦-٢): زمن التلامس.

تأمّل الشّكل (٦-٢) الذي يبين تلامس الكرة مع خيوط المضرب في مدة زمنية قصيرة، لعلّك تلاحظ تشوّهًا في شكل الكرة، وفي خيوط المضرب. حين يضرب اللاعب الكرة بقوة كبيرة ليزوّدها بزخم كبير باتجاه محدّد، فتوجد مدّة زمنية Δز يحدث فيها التلامس بين الكرة والمضرب؛ أي أنّ قوّة المضرب تؤثّر في الكرة مدّة من الزّمن فتدفعها. إنّ الدّفع (Impulse) كمية فيزيائية متجهة تتناسب طرديًا مع مقدار القوّة، ومع زمن تأثيرها.

ويكون اتجاه الدّفع باتجاه القوّة، ويُرمز له بالرمز ($\vec{د}$)، ويحسب الدّفع من العلاقة الرياضية الآتية:

$\vec{د} = \vec{ق}\ \Delta ز$ .... (٦-٢)

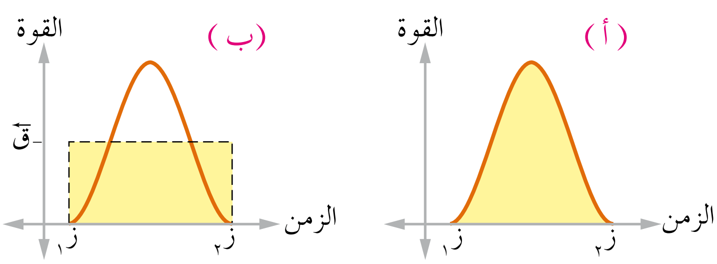
ويُقاس الدفع بوحدة (نيوتن. ث).

فكرة

تكون بندقية الصيد الشكل (٦-٣) ذات ماسورة (سبطانة) طويلة؛ وذلك لزيادة زمن دفع الغاز للرصاصة؛ ما يزيد في سرعتها.


الشكل (٦-٣): بندقية الصيد.

يمكن تمثيل العلاقة بين القوّة المؤثّرة في الكرة وزمن تأثيرها بيانيًا كما في الشكل (٦-٤/أ). ونظرًا إلى صعوبة تحديد مقدار القوة اللحظية المتغيرة عند كل لحظة، فإنّنا نلجأ لإيجاد متوسط القوة التي أثرت في الكرة في زمن Δ ز، كما في الشكل (٦-٤/ب)، وبذلك يمكن أن نستنتج أنّ مقدار الدفع يساوي المساحة تحت منحنى (القوة - الزمن).



الشكل (٦-٤): القوة اللحظية، والقوة المتوسطة.

مثال (٦-٢)

ركل لاعب كرة قدم بقوة ٤٠ نيوتن غربًا، وكان زمن تلامس قدمه مع الكرة ٠,١ ث. جد دفع قدم اللاعب على الكرة.

الحلّ:

$\vec{د} = \vec{ق}\ \Delta$ ز

د = ق Δ ز

= ٤٠ × ٠,١ = ٤ نيوتن. ث، غربًا، إذ إنّ اتجاه الدفع هو اتجاه القوة.

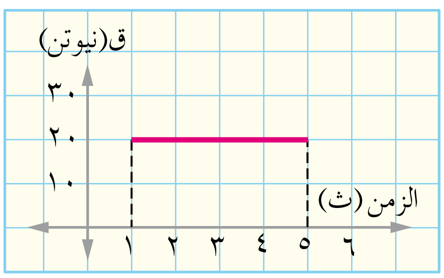
مثال (٦-٣)

يوضّح الشكل (٦-٥) التمثيل البياني لمنحنى (القوة - الزمن). جد مقدار الدفع الذي تحدثه القوة في الفترة الزمنية: ز = ١ ث إلى ز = ٥ ث.

الحلّ:

مقدار الدفع = المساحة تحت المنحنى للفترة المطلوبة.

د = مساحة المستطيل = ٢٠ × ٤ = ٨٠ نيوتن. ث.



الشكل (٦-٥): مثال (٦-٣).

سؤال

معتمدًا على العلاقتين الرياضيتين (٦-١)، (٦-٢) استنتج علاقة بين وحدتي قياس الدفع والزخم الخطّي.

(٦-١-٣) مبرهنة الزخم الخطّي- الدفع

حين يتحرّك جسم كتلته ك بسرعة متجهة ثابتة $\vec{ع}_1$، وتؤثّر فيه قوة ثابتة $\vec{ق}$ مدّة من الزمن مقدارها Δز، فإنها تكسبه تسارعًا يزيد من سرعته لتصبح $\vec{ع}_2$. باستخدام معادلات الحركة، نجد أنّ:

$\vec{ع}_2 = \vec{ع}_1 + \vec{ت}\Delta$ز .... بضرب طرفي المعادلة في المقدار: ك

ك $\vec{ع}_2$ = ك $\vec{ع}_1$ + ك $\vec{ت}\Delta$ز

ك $\vec{ع}_2$ - ك $\vec{ع}_1$ = ك $\vec{ت}\ \Delta$ ز

= $\vec{ق}\ \Delta$ ز

$\vec{خ}_2 - \vec{خ}_1 = \vec{د}$ ، أي إنّ:

$\vec{د} = \Delta\ \vec{خ}$ .... (٦-٣)

بذلك نستنتج أنّه عندما تؤثّر قوة في جسم وتكسبه دفعًا، فإنّ هذا الدفع يُمَثّل ما تُحدثه القوة من تغيّر في الزخم الخطّي لذلك الجسم.

واعتمادًا على العلاقة (٦–٣) التي تربط بين الدفع والزخم الخطّي، فإنّه بالإمكان التعبير عن القانون الثاني لنيوتن، كما يأتي:

$\overleftarrow{د} = \Delta \overleftarrow{خ}$ وبقسمة طرفي المعادلة على Δز نجد أنّ:

$\frac{د}{\Delta ز} = \frac{\Delta خ}{\Delta ز}$ وبتعويض قيمة د من المعادلة (٦–٢) في المعادلة السابقة نجد أنّ:

$$\overleftarrow{ق} = \frac{\Delta \overleftarrow{خ}}{\Delta ز} \quad \text{.......... (٦–٤)}$$

تمثّل العلاقة الرياضية (٦–٤) **الصيغة العامة لقانون نيوتن الثاني في الحركة**، الذي ينصّ على أنّه إذا أثّرت قوّة في جسم وتغيّر زخمه الخطّي، فإنّ المعدل الزمني للتغيّر في الزخم الخطي يكون مساويًا لتلك القوة. وتُعدّ هذه الصيغة عامة؛ لأنّه يمكن تطبيقها في حال ثبات كتلة الجسم المتحرّك أو تغيّرها.

(٦–١–٤) حفظ الزخم الخطّي

عرفنا في الدرس السابق أنّ الدفع الذي تُحدثه قوة في جسم يساوي التغيّر في زخمه الخطّيّ. وعند الحديث عن نظام يتكوّن من أكثر من جسم، وحين يكون هذا النظام محافظًا ومعزولاً؛ أي لا تؤثّر في مكوناته قوىً خارجية، فإنّ محصلة القوى الداخلية تساوي صفرًا، مهما كانت القوى الداخلية المتبادلة بين مكونات النظام. من العلاقة الرياضية (٦–٤) بالضرب التبادلي ينتج:

ق Δ ز = Δخ ، وحيث إنّ: ق = صفرًا، فإنّ:

Δخ = صفرًا

$خ_٢ - خ_١$ = صفرًا

$$خ_١ = خ_٢ \quad \text{.......... (٦–٥)}$$

تُعرف هذه العلاقة الرياضية بقانون حفظ الزخم الخطّي الذي ينص على أنّه: **يبقى الزخم الخطّي محفوظًا للنظام المعزول** (حيث أن $\sum ق_{خارجية}$ = صفر لأي نظام معزول)؛ أي أنّه عند حدوث تصادم بين مكونات النظام، فإنّ مجموع الزخم قبل التصادم يساوي مجموع الزخم بعد التصادم. للتوصل عمليًّا إلى حفظ الزخم الخطّي لنظام ما، نفّذ النشاط الآتي:

نشاط (٦-١) حفظ الزخم الخطّي

هدف النشاط: التوصل عمليًّا إلى قانون حفظ الزخم الخطّي.

الأدوات: كرات زجاجية صغيرة متماثلة، مستوى مائل، مجرى.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ ثبّت المجرى بشكل أفقيّ، ثمّ ضع المستوى المائل أمامه.

٢ صُفّ ست كرات زجاجية داخل المجرى بشكل أفقي.

٣ ضع كرة زجاجية مماثلة على ارتفاع مناسب على المستوى المائل، واتركها تتدحرج.

٤ أعد الكرات الست مكانها، ثم ضع الكرة فوق المستوى المائل على ارتفاع أكبر، واتركها.

٥ أعد الخطوتين ٣، ٤، لكن دحرج كرتين متماثلتين في كل مرّة، ثم ثلاث كرات.

أجب عن الأسئلة الآتية:

١ ما العلاقة بين عدد الكرات التي دخلت النظام والكرات التي غادرته في كلّ مرّة؟

٢ ما العلاقة بين مجموع الكتل التي دخلت النظام ومجموع الكتل التي غادرته في كلّ مرّة؟

٣ ماذا تتوقع أن يحدث لو دحرجت كرة واحد كتلتها تساوي كتلة كرتين؟ هل سيتحقق قانون حفظ الزخم الخطّي في هذه الحالة؟

تلاحظ أنّه حين تركت كرة واحدة تتدحرج خرجت من الطرف الآخر كرة واحدة فقط، مهما كانت سرعتها، وعندما تركت كرتين خرجت من النظام كرتان، وزيادة السرعة لا تزيد من عدد الكرات المغادرة للنظام. إنّ ما نفّذته في هذا النشاط، هو تطبيق عملي يؤكّد بقاء الزخم الكلي للنظام محفوظًا.

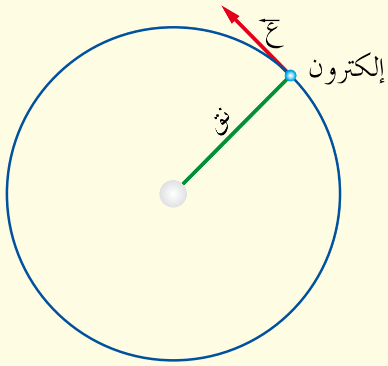
توسع

يوجد كمية فيزيائية متجهة لها علاقة بالزخم الخطي للأجسام، هي الزخم الزاوي Angular Momentum.
فالجسم المتحرك حركة دائرية يمتلك زخمًا زاويًّا، يحدّد مقداره واتجاهه بمعرفة الزخم الخطّي للجسم، وتحديد مركز الدوران، وبعد الجسم عن هذا المركز بالعلاقة الرياضية الآتية:

متجه الزخم الزاوي = $\overleftarrow{ف} \times \overleftarrow{خ}$

حيث ($\overleftarrow{خ}$) متجه الزخم الخطّي،($\overleftarrow{ف}$) متجه موقع الجسم، ويحدّد اتجاه الزخم الزاوي وفق خصائص ضرب المتجهات.

والأجسام التي تمتلك زخمًا زاويًا، قد تكون كبيرة مثل الأرض عند دورانها حول الشمس، أو صغيرة كالإلكترون عند دورانه حول نواة الذرة، لاحظ الشكل المجاور، فإذا أردنا حساب مقدار الزخم الزاوي لإلكترون يدور حول النواة في مدار نصف قطره (نق) فإننا سنتوصل إلى العلاقة الرياضيّة الآتية:



$خ_{زاوي}$ = نق ك ع جا ٩٠

$خ_{زاوي}$ = ك ع نق

مراجعة (٦-١)

١ عندما يُلقى إليك بحقيبة ثقيلة، فإنّك عند التقاطها تخفض يديك معها إلى الأسفل. فسّر سبب ذلك.

٢ لماذا يُنصح سائقو الشاحنات عند السير على طرق منحدرة، بالقيادة ببطء من بداية المنحدر، وعدم الاعتماد على الكوابح وحدها؟

٣ هل يتغيّر زخم المركبات الزراعية التي تسير بسرعة ثابتة في أثناء حصادها للمحصول وتخزينه داخلها؟ ولماذا؟

٤ في مسابقات رياضة الوثب الطويل تُغطّى أرضية مكان هبوط اللاعب بطبقة من الرمل ليسقط عليها. فسر ذلك؟

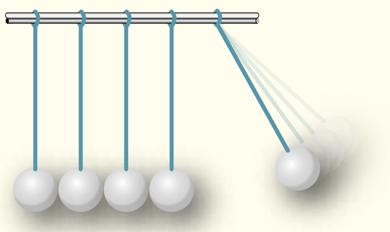
٥ إذا كانت طاقة حركة جسم ما تساوي صفرًا، فكم يكون زخمه؟

٦ شخص يقف على أرضية لزجة، فإذا رمى هذا الشخص كتابًا إلى الأمام وبشكل أفقي، فصف حركته بعد الرمي.

٦-٢ التصادمات
Collisions

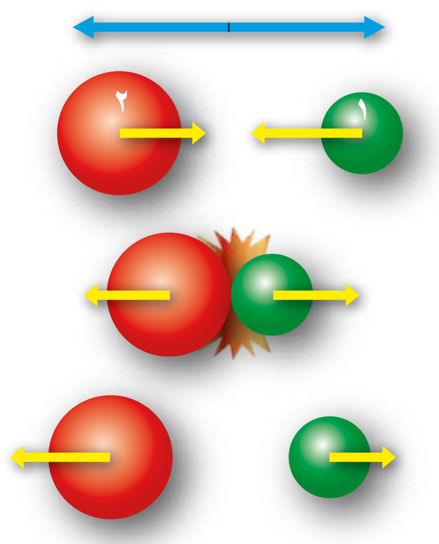
نشاط تمهيدي

• في نظام الكرات المبين في الشكل (٦-٦) اسحب كرة واحدة نحو اليمين، واتركها، وراقب ما يحدث، ثمّ اسحب كرتين معًا واتركهما، ثمّ راقب ما يحدث.



الشكل (٦-٦): نشاط تمهيدي.

عندما تتصادم الأجسام، فإنّها تتبادل الدفع في ما بينها، ويتغير زخمها. وقد يكون التصادم في بعد واحد، أو في بعدين أو في ثلاثة أبعاد؛ فحين تكون حركة الجسمين قبل التصادم على خطّ مستقيم، ويتصادمان رأسًا برأس (Head on collision)، تبقى حركتهما بعد التصادم على الخطّ نفسه، ويُقال إنّ **التصادم حدث في بعد واحد**، لكن عندما تكون حركة الجسمين بعد التصادم باتجاهين مختلفين، فنقول عندها إنّ ما حدث هو **تصادم في بعدين**. في النظام المعزول عن الوسط المحيط المكوّن من جسمين أو أكثر، يبقى مجموع الزخم الكلي للنظام ثابتًا قبل التصادم وبعده. فعند اصطدام الكرتين $ك_{١}$، $ك_{٢}$، كما في الشكل (٦-٧)، ثمّ تباعدهما على الخطّ نفسه باتجاهين متعاكسين، ولأن هذا النظام معزول عن تأثير أيّة قوّة خارجية، فإنّ الكرتين ستؤثّران في بعضهما لحظة التصادم بقوّتين متساويتين مقدارًا ومتعاكستين اتجاهًا؛ أي أنّ:



الشكل (٦-٧): التصادم الخطّي.

$$\vec{ق}_{١٢} = -\vec{ق}_{٢١}$$

(حيث $ق_{١٢}$: القوة التي يؤثر بها الجسم الثاني في الأول، $ق_{٢١}$: القوة التي يؤثر بها الجسم الأول في الثاني).

وحيث إنّ التصادم تطلّب تلامس الكرتين مدّة من الزمن مقدارها Δز، فإنّنا نضرب طرفي المعادلة في Δز لتصبح المعادلة

$\vec{ق}_{١٢} \times \Delta ز = -\vec{ق}_{٢١} \times \Delta ز$ ، ومن المعادلة (٦-٢) نجد أنّ:

$$\vec{د}_{١٢} = -\vec{د}_{٢١}$$

(حيث $\text{د}_{١٢}$: دفع الجسم الثاني في الأول، $\text{د}_{٢١}$: دفع الجسم الأول في الثاني).

أي أنّ الدفع المتبادل الذي تؤثّر فيه كل من الكرتين في الأخرى هو نفسه لكل من الكرتين، بمعنى أن الدفع الذي تؤثر فيه الكرة (١) في الكرة (٢) = الدفع الذي تؤثر فيه الكرة (٢) في الكرة (١).

ومن المعادلة (٦-٣) نجد أنّ:

$$\Delta \overleftarrow{\text{خ}}_{١} = -\Delta \overleftarrow{\text{خ}}_{٢}$$

$$\text{ك}_{١}\,\text{عَ}_{١} - \text{ك}_{١}\,\text{ع}_{١} = \text{ك}_{٢}\,\text{ع}_{٢} - \text{ك}_{٢}\,\text{عَ}_{٢}\ ،$$

حيث ع: السرعة قبل التصادم، عَ السرعة بعد التصادم، وبإعادة ترتيب الحدود نجد أنّ:

$$\text{ك}_{١}\,\overleftarrow{\text{ع}}_{١} + \text{ك}_{٢}\,\overleftarrow{\text{ع}}_{٢} = \text{ك}_{١}\,\overleftarrow{\text{عَ}}_{١} + \text{ك}_{٢}\,\overleftarrow{\text{عَ}}_{٢}$$

$$\Sigma\, \overleftarrow{\text{خ}}_{\text{قبل التصادم}} = \Sigma\, \overleftarrow{\text{خ}}_{\text{بعد التصادم}} \quad \text{......... (٦-٦)}$$

تمثّل هذه العلاقة الرياضية مبدأ حفظ الزخم الخطّي في حالة تصادم جسمين ضمن نظام معزول (القوى الخارجية تساوي صفرًا)، الذي ينصّ على أنّ: **المجموع الكلّي للزخم الخطّي للأجسام المتصادمة قبل التصادم مباشرة يساوي المجموع الكلي للزخم الخطّي لها بعد التصادم مباشرة**، لكن ماذا عن الطاقة الحركية للنظام، هل تكون محفوظة هي الأخرى قبل التصادم وبعده؟ إنّ الطاقة الحركية ليست محفوظة في التصادمات جميعها؛ إذ تُصنّف التصادمات حسب حفظ الطاقة الحركية إلى تصادمات مرنة (Elastic Collision) تحفظ فيها الطاقة الحركية، وتصادمات غير مرنة (Inelastic Collision) لا تحفظ فيها الطاقة الحركية.

(٦-٢-١) التصادم المرن

في التصادمات المرنة تكون الطاقة الحركية للنظام محفوظة كما في تصادم كرات من العاج أو الزجاج أو الفولاذ؛ ويمكن التعبير رياضيًّا عن حفظ الطاقة الحركية للنظام قبل التصادم المرن وبعده، على الصورة الآتية:

$$\Sigma\, \text{ط}_{\text{ح قبل}} = \Sigma\, \text{ط}_{\text{ح بعد}}$$

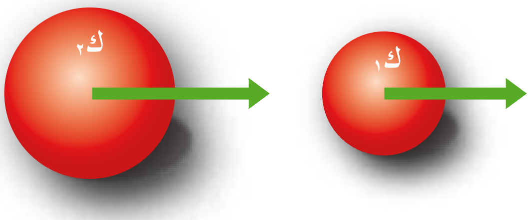
$$\frac{١}{٢}\text{ك}_{١}\,\text{ع}_{١}^{٢} + \frac{١}{٢}\text{ك}_{٢}\,\text{ع}_{٢}^{٢} = \frac{١}{٢}\text{ك}_{١}\,\text{عَ}_{١}^{٢} + \frac{١}{٢}\text{ك}_{٢}\,\text{عَ}_{٢}^{٢} \quad \text{......... (٦-٧)}$$

$$\Sigma\, \overleftarrow{\text{خ}}_{\text{قبل}} = \Sigma\, \overleftarrow{\text{خ}}_{\text{بعد}}$$

$$\text{ك}_{١}\,\overleftarrow{\text{ع}}_{١} + \text{ك}_{٢}\,\overleftarrow{\text{ع}}_{٢} = \text{ك}_{١}\,\overleftarrow{\text{عَ}}_{١} + \text{ك}_{٢}\,\overleftarrow{\text{عَ}}_{٢}$$

مثال (٦-٤)

كرة كتلتها ٢كغ تتحرك نحو اليمين بسرعة ٤م/ث، لحقت بها كرة أخرى كتلتها ٥كغم تتحرك بسرعة ٦م/ث، كما في الشكل (٦-٨)، فتصادمتا، واستمرت الكرة الثانية متحركة نحو اليمين بسرعة ٥,٢م/ث. جد سرعة الكرة الأولى بُعَيْد لحظة التصادم مباشرة.



الشكل (٦-٨): مثال (٦-٤).

الحلّ:

$ك_{١}$ = ٢كغ، $ع_{١}$ = ٤م/ث، $ك_{٢}$ = ٥ كغ، $ع_{٢}$ = ٦م/ث، $\acute{ع}_{٢}$ = ٥,٢م/ث.

من مبدأ حفظ الزخم الخطي $\sum خ_{\text{قبل}} = \sum خ_{\text{بعد}}$

$$\vec{خ}_{١} + \vec{خ}_{٢} = \vec{\acute{خ}}_{١} + \vec{\acute{خ}}_{٢}$$

$$ك_{١}\,\vec{ع}_{١} + ك_{٢}\,\vec{ع}_{٢} = ك_{١}\,\vec{\acute{ع}}_{١} + ك_{٢}\,\vec{\acute{ع}}_{٢}$$

$$(٢\times٤) + (٥\times٦) = (٢\times\acute{ع}_{١}) + (٥\times ٥,٢)$$

$$٣٨ = ٢\,\acute{ع}_{١} + ٢٦$$

$\acute{ع}_{١}$ = ٦م/ث باتجاه اليمين. هل هذا التصادم مرن؟

مثال (٦-٥)

تحرّكت كرة كتلتها ٢ كغ بسرعة ٩م/ث شرقًا، فتصادمت مع أخرى ساكنة كتلتها ٤ كغ. فإذا كان التصادم مرنًا، وفي بعد واحد. فجد سرعة الكرتين بعد التصادم مباشرة.

الحلّ:

$ك_{١}$ =٢كغ، $ع_{١}$ =٩م/ث، $ك_{٢}$ =٤كغ، $ع_{٢}$ = صفر.

بتطبيق قانون حفظ الزخم في بعد واحد:

$$\vec{خ}_{١} + \vec{خ}_{٢} = \vec{\acute{خ}}_{١} + \vec{\acute{خ}}_{٢}$$

$$ك_{١}\,\vec{ع}_{١} + ك_{٢}\,\vec{ع}_{٢} = ك_{١}\,\vec{\acute{ع}}_{١} + ك_{٢}\,\vec{\acute{ع}}_{٢}$$

$$٢\times٩ + ٠ = ٢\,\vec{\acute{ع}}_{١} + ٤\,\vec{\acute{ع}}_{٢}$$

$$١٨ = ٢\,\vec{\acute{ع}}_{١} + ٤\,\vec{\acute{ع}}_{٢}$$

$\text{عَ}_{١} = ٩ - ٢\,\text{عَ}_{٢}$ .... (١)

بتطبيق قانون حفظ الطاقة الحركية:

$$\frac{١}{٢}\,\text{ك}_{١}\,\text{ع}_{١}^{٢} + \frac{١}{٢}\,\text{ك}_{٢}\,\text{ع}_{٢}^{٢} = \frac{١}{٢}\,\text{ك}_{١}\,\text{عَ}_{١}^{٢} + \frac{١}{٢}\,\text{ك}_{٢}\,\text{عَ}_{٢}^{٢}$$

$$\frac{١}{٢} \times ٢ \times ٨١ + \text{صفر} = \frac{١}{٢} \times ٢\,\text{عَ}_{١}^{٢} + \frac{١}{٢} \times ٤\,\text{عَ}_{٢}^{٢}$$

$٨١ = \text{عَ}_{١}^{٢} + ٢\,\text{عَ}_{٢}^{٢}$ .... (٢)

بتعويض معادلة (١) في معادلة (٢)، نجد أنّ:

$$٨١ = (٩ - ٢\,\text{عَ}_{٢})^{٢} + ٢\,\text{عَ}_{٢}^{٢}$$

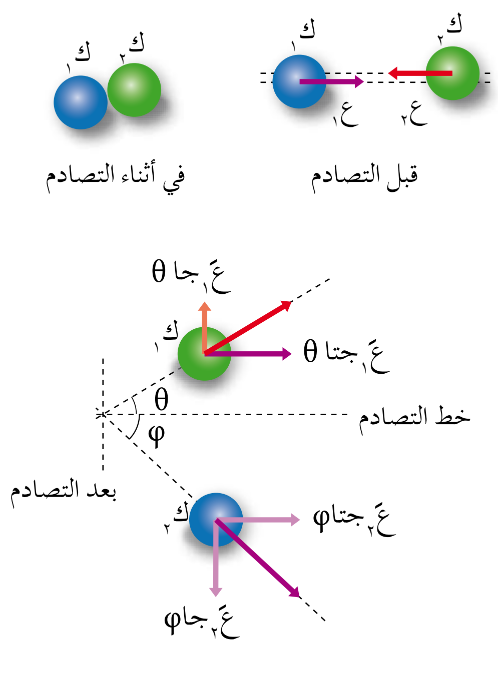
$$٦\,\text{عَ}_{٢}\,(\text{عَ}_{٢} - ٦) = \text{صفر}$$

ومنها نجد أنّ:

$\text{عَ}_{٢} = ٦$م/ث، $\text{عَ}_{١} = -٣$م/ث (والإشارة السالبة تدل على أن الكرة الصغرى ارتدت نحو الغرب).

يوجد حل رياضي ثان للمعادلة الأخيرة هو: $\text{عَ}_{٢} = $ صفر م/ ث. فسّر لماذا تُعدّ هذه القيمة الرياضية غير مقبولة فيزيائيًا بالرغم من أنها تحقق معادلتي حفظ الزخم وحفظ الطاقة الحركية.

لاحظت في الأمثلة السابقة تطبيق العلاقة (٦-٦) الخاصة بحفظ الزخم في بعد واحد، لكن كيف تُطَبّق عندما يكون التصادم في بعدين؟ يبيّن الشكل (٦-٩) حالة تصادم في بعدين بين كرتين كتلتيهما: $\text{ك}_{١}$ ، $\text{ك}_{٢}$ تتحركان نحو بعضهما على خطّين مستقيمين متوازيين بسرعتين $\text{ع}_{١}$، $\text{ع}_{٢}$، وبعد التصادم تتحرك الكرة الأولى بسرعة $\text{عَ}_{١}$ باتجاه يصنع زاوية θ مع خط التصادم إلى أعلى، بينما تتحرك الثانية بسرعة $\text{عَ}_{٢}$ باتجاه يصنع زاوية φ مع خط التصادم إلى أسفل، وكون الزخم كمية متجهة، فإنّه يمكن تحليل متجهات الزخم والسرعة بعد التصادم إلى مركبتين متعامدتين.



الشكل (٦-٩): التصادم في بعدين.

تُحلل سرعة الكرة الأولى بعد التصادم إلى المركبتين:

$$\text{عَ}_{١س} = \text{عَ}_{١}\,\text{جتا}\,\theta،\quad \text{عَ}_{١ص} = \text{عَ}_{١}\,\text{جا}\,\theta$$

وتُحلل سرعة الكرة الثانية بعد التصادم إلى المركبتين:

$\acute{ع}_{٢س} = \acute{ع}_{٢}$ جتا φ ، $\acute{ع}_{٢ص} = \acute{ع}_{٢}$ جا φ

وبذلك يكون زخم النظام على محور السينات محفوظًا، على الصورة:

ك$_١$ع$_١$ − ك$_٢$ع$_٢$ = ك$_١\acute{ع}_١$ جتا θ + ك$_٢\acute{ع}_٢$ جتا φ .... (٦−٨)

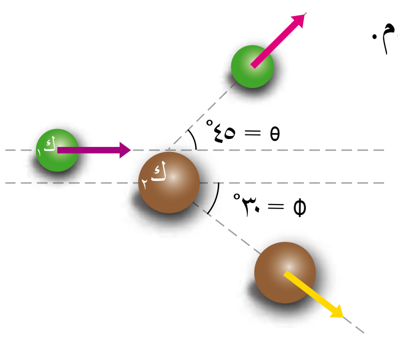
ويكون زخم النظام على محور الصادات محفوظًا، على الصورة:

صفر = ك$_١\acute{ع}_١$ جاθ − ك$_٢\acute{ع}_٢$ جا φ .... (٦−٩)

بحلّ المعادلتين (٦−٨)، و(٦−٩) نتوصل لحساب السرعتين: $\acute{ع}_١$، $\acute{ع}_٢$ بعد التصادم مباشرةً.

مثال (٦−٦)

كرة كتلتها ١كغ تتحرّك يمينًا بسرعة ٦م/ث في خط مستقيم نحو كرة ساكنة كتلتها ٢كغ، وبعد التصادم تحركت الكرتان كما في الشكل (٦−١٠). جد سرعة الكرتين بعد التصادم.



الشكل (٦−١٠): مثال (٦−٦).

الحلّ:

ك$_١$ = ١كغ، ك$_٢$ = ٢كغ، ع$_١$ = ٦م/ث، ع$_٢$ = صفر.

نطبق مبدأ حفظ الزخم الخطي على محور السينات:

ك$_١$ع$_١$ + ك$_٢$ع$_٢$ = ك$_١\acute{ع}_١$ جتا θ + ك$_٢\acute{ع}_٢$ جتا φ

(١×٦) + (٢×٠) = ١×$\acute{ع}_١$ جتا٤٥ + ٢×$\acute{ع}_٢$ جتا ٣٠

٦= ٠,٧١ $\acute{ع}_١$ + ١,٧٣ $\acute{ع}_٢$ .... (١)

نطبق مبدأ حفظ الزخم الخطي على محور الصادات:

صفر = ك$_١\acute{ع}_١$ جا θ − ك$_٢\acute{ع}_٢$ جا φ

صفر = ١×$\acute{ع}_١$ جا٤٥ − ٢×$\acute{ع}_٢$ جا ٣٠

صفر = ٠,٧١ $\acute{ع}_١$ − $\acute{ع}_٢$ .... (٢)

بحل المعادلتين ١، ٢ نجد أنّ:

$\acute{ع}_١$ = ٣,١م/ث، $\acute{ع}_٢$ = ٢,٢م/ث.

سـؤال

تحقّق في ما إذا كان هذا التصادم مرنًا، أم أنه يوجد نقص في مجموع الطاقة الحركية.

(٦-٢-٢) التصادم غير المرن

حين تخترق رصاصة قطعة خشبية، وحين تسقط كرة في حوض من الطين، أو تتصادم سيارتان وتلتحمان معًا، فإن الطاقة الحركية في هذه الحالات لا تكون محفوظة، ويسمى التصادم **تصادمًا غير مرن**، فإذا التحم الجسمان بعد التصادم، فإنّ هذا النوع من التصادم يدعى **عديم المرونة**، ويكون الزخم الخطي محفوظًا، أي أنّ:

$$ك_١ \overleftarrow{ع}_١ + ك_٢ \overleftarrow{ع}_٢ = (ك_١ + ك_٢) \overleftarrow{ع}' \quad \text{.......... (٦-١٠)}$$

إذ يتحرك الجسمان بعد التصادم بسرعة واحدة عَ. ومّما يجدر ذكره أنّ عدم حفظ الطاقة الحركية لا يعني فناءها، بل إنّ جزءًا منها تحوّل إلى شكل آخر من أشكال الطاقة؛ قد تكون طاقة حرارية أو صوتية أو ضوئية أو ميكانيكية.

مثال (٦-٧)

سيارة كتلتها ٥٠٠ كغ تسير بسرعة ٣٦ كم/ س باتجاه الغرب، تصادمت رأسًا برأس مع شاحنة كتلتها ١٥٠٠ كغ، وتسير بسرعة ٧٢ كم/ س باتجاه الشرق، فالتحمتا معًا. جد ما يأتي:

١ السرعة المشتركة لهما بعد الإلتحام.

٢ التغيّر في طاقة حركة كلّ منهما.

الحلّ:

$ك_١ = ٥٠٠$ كغ، $ك_٢ = ١٥٠٠$ كغ، $ع_١ = -٣٦$ كم/س $= -١٠$ م/ث، $ع_٢ = ٧٢$ كم/س $= ٢٠$ م/ث.

١ وحيث إنّ التصادم رأسًا برأس، فهو في بعد واحد؛ لذا تُطَبّق العلاقة (٦-١٠):

$$ك_١ ع_١ + ك_٢ ع_٢ = (ك_١ + ك_٢) عَ$$

$$-٥٠٠ \times ١٠ + ١٥٠٠ \times ٢٠ = (٥٠٠ + ١٥٠٠) عَ_{\text{مشتركة}}$$

$عَ = ١٢,٥$ م/ث نحو الشرق.

٢ التغيّر في الطاقة الحركية:

$$\Delta ط_{\text{ح سيارة}} = \frac{١}{٢} ك_١ عَ^٢ - \frac{١}{٢} ك_١ ع_١^٢$$

$$= \frac{١}{٢} \times ٥٠٠ (١٥٦,٢٥ - ١٠٠)$$

$= ١٤٠٦٢,٥$ جول، تعني الإشارة الموجبة أنّ السيارة الصغيرة اكتسبت طاقة حركية جراء التصادم.

$$\Delta ط_{\text{ح شاحنة}} = \frac{١}{٢} ك_{٢} عَ_{٢}^{٢} - \frac{١}{٢} ك_{٢} ع_{٢}^{٢}$$

$$= \frac{١}{٢} \times ١٥٠٠ (١٥٦,٢٥ - ٤٠٠)$$

= − ١٨٢٨١٢,٥ جول، تعني الإشارة السالبة أنّ الشاحنة خسرت جزءًا من طاقتها الحركية جراء التصادم.

سؤال

فسّر عدم تساوي التغيّر في الطاقة الحركية لكلّ من السيارة والشاحنة.

توسع

ينطبق مبدأ حفظ الزخم في حالات لا يحدث فيها اتصال مادي مباشر بين الأجسام المتصادمة، فقد يقترب جرم فضائي صغير من آخر كبير؛ كما يحدث لمذنّب عند اقترابه من الشمس، فيتأثّر بقوة الجذب الكتلي لها، وينحرف عن مساره نحو الشمس مغيرًا بذلك اتجاه سرعته. يعدّ هذا الأمر من أشكال التصادم؛ ويمكن تطبيق معادلات حفظ الزخم الخطي عليه.

يحدث أمر مشابه عند مرور جسيمات ذريّة بالقرب من أخرى كبيرة، كما حدث في تجربة رذرفورد؛ فقد استخدم رذرفورد هذه الفكرة لدراسة طبيعة الذرة وتركيبها بقذف صفيحة رقيقة من الذهب بجسيم ألفا، فوجد أنّ القذيفة تنحرف عن مسارها بزوايا كبيرة؛ ما دلّ على أنها اقتربت من جسم ثقيل شحنته مشابهة لجسيم ألفا، وتنافرت معه بقوة كهربائية، وقد وضع نموذجه للذرة، بعد دراسته هذا النوع من التصادمات.

مراجعة (٦-٢)

١ عندما تصطدم شاحنة كبيرة بسيارة صغيرة فأيّ منهما تتأثر بقوة أكبر؟ وأيّهما تتأثر بدفع أكبر؟ وأيّهما يحدث لها تغيّر أكبر في الزخم؟

٢ بيّن ما يحدث عندما تصطدم كرتان متماثلتان إحداهما ساكنة والأخرى متحركة، تصادمًا مرنًا.

٣ ما أهمية القفازات السميكة لحارس المرمى عندما يلتقط كرة مسدّدة نحوه بسرعة كبيرة؟

٤ فكر: عندما تسقط كرة على أرض صلبة فإن زخمها الخطي يكون إلى الأسفل، وعندما ترتد إلى الأعلى يصبح زخمها إلى الأعلى. هل تعتقد أن الزخم غير محفوظ؟ هل يتعارض ذلك مع قانون حفظ الزخم؟

نشاط تمهيدي

• يبيّن الشكل (٦–١١) جهاز البندول القذفي، بعد التصادم يرتفع البندول فيحرّك المؤشر إلى زاوية معينة. حاول أن تتعرّف على أجزائه، وكيفية عمله.

الشكل (٦–١١): البندول القذفي.

(٦–٣–١) البندول القذفي

يُعدّ البندول القذفي (Ballistic pendulum) أداة لقياس سرعة المقذوفات السريعة كالرصاصة، يستخدمه رجال الشرطة في تحقيقاتهم؛ لتحديد اتجاه حركة الرصاصة وسرعتها، وتحديد الموقع الذي أُطلقت منه الرصاصة.

يتركب البندول القذفي من قطعة خشبية كبيرة معلقة بحبلين خفيفين كما في الشكل (٦–١١). عندما تنطلق الرصاصة بسرعة معينة فإنّها تصطدم بقطعة الخشب وتستقر بداخلها، فترتفع المجموعة (الرصاصة والخشبة) مسافة رأسيّة معينة، يمكن منها معرفة سرعة الرصاصة.

فكرة

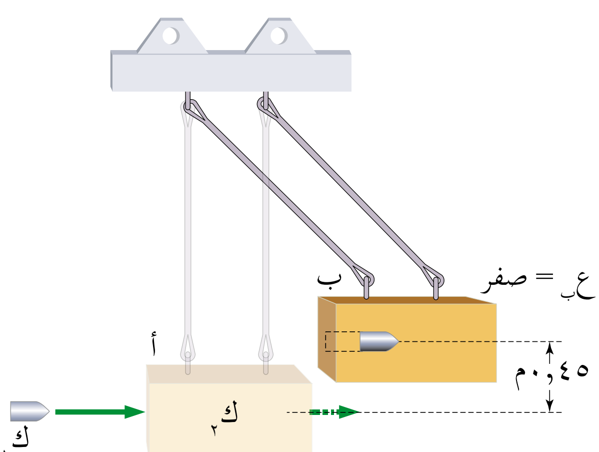
تصنع مقدمة السيارات بحيث تكون طويلة؛ ما يزيد زمن التصادم لتمتص الصدمة، فيقل تأثير القوة على الركاب كما في الشكل (٦–١٢).

الشكل (٦–١٢): فكرة.

مثال (٦–٨)

رصاصة كتلتها ٠,٠٢ كغ تتحرك بسرعة أفقية مقدارها ع$_{١}$، نحو قطعة خشبية ساكنة كتلتها ٠,٩٨ كغ معلقة بحبلين فتصطدم بها وتستقر داخلها، وترتفعان معًا إلى الأعلى مسافة ٠,٤٥م، كما في الشكل (٦–١٣). احسب:

سرعة الرصاصة قبل التحامها مع قطعة الخشب.



الشكل (٦–١٣): مثال (٦–٨).

الحلّ:

ك$_{١}$ = ٠,٠٢ كغ، ع$_{١}$ = ؟

ك$_{٢}$ = ٠,٩٨ كغ، ع$_{٢}$ = صفر.

نطبق قانون حفظ الزخم

ك$_{١}$ع$_{١}$ + ك$_{٢}$ع$_{٢}$ = (ك$_{١}$ +ك$_{٢}$) عَ

$$٠,٠٢ \times ع_{١} + \text{صفر} = (٠,٠٢ + ٠,٩٨)\, عَ$$

حيث عَ: سرعة المجموعة الابتدائية

$$عَ = ٠,٠٢ \times ع_{١} \quad \text{.......................} \quad (١)$$

ثم نطبق قانون حفظ الطاقة الميكانيكية

$$ط_{م أ} = ط_{م ب}$$

$$ط_{ح أ} + ط_{و أ} = ط_{ح ب} + ط_{و ب}$$

$$\frac{١}{٢} (ك_{١} + ك_{٢})\, عَ^{٢} + \text{صفر} = \text{صفر} + (ك_{١} + ك_{٢})\, جـ\, ف$$

$$\frac{١}{٢} \times ١ \times عَ^{٢} = ١ \times ٩,٨ \times ٠,٤٥$$

$$عَ^{٢} = ٨,٨٢ \quad \longrightarrow \quad عَ = ٢,٩٧ \text{م/ث}$$

بالتعويض في معادلة (١) نجد أنّ:

$$ع_{١} = ١٤٨,٥ \text{م/ث}.$$

(٦-٣-٢) حركة القذيفة والمدفع

عند إطلاق قذيفة من مدفع يتحول البارود إلى غازات ساخنة عالية الضغط، فتنطلق القذيفة إلى الأمام، في حين يرتد المدفع إلى الخلف، ويكون دفع المدفع على القذيفة مساويًا لدفع القذيفة على المدفع مقدارًا، ومضادًّا له في الاتجاه، وبافتراض أن نظام (المدفع – القذيفة) معزول ومحافظ، فإن الزخم الخطي محفوظ لهذا النظام، ولكون القذيفة والمدفع قبل الإطلاق كانا في حالة سكون، فإنّ الزخم قبل الإطلاق يساوي صفرًا، وبتطبيق قانون حفظ الزخم الخطّي:

$$\sum \overleftarrow{خ}_{\text{قبل}} = \sum \overleftarrow{خ}_{\text{بعد}}$$

$$\text{صفر} = ك_{\text{مدفع}}\, \overleftarrow{عَ}_{\text{مدفع}} + ك_{\text{قذيفة}}\, \overleftarrow{عَ}_{\text{قذيفة}}$$

ومنها نجد أنّ:

$$ك_{\text{مدفع}}\, \overleftarrow{عَ}_{\text{مدفع}} = -ك_{\text{قذيفة}}\, \overleftarrow{عَ}_{\text{قذيفة}} \quad \text{.......................} \quad (٦-١١)$$

وهذا ما نشاهده في الواقع، إذ إنّ اتجاهي حركة القذيفة والمدفع يكونان متعاكسين، وهذا أيضًا ما يدركه الجنديّ عند الرماية؛ إذ يشعر بارتداد جسمه إلى الخلف لحظة اندفاع الرصاصة إلى الأمام.

مثال (٦-٩)

أطلقت قذيفة كتلتها ٦٠ كغ بسرعة ٥٠٠ م/ث من مدفع ساكن كتلته ٢٠٠٠ كغ. جد السرعة التي يتحرك بها المدفع بُعَيدَ إطلاق القذيفة.

الحلّ:

$$\sum خ_{قبل} = \sum خ_{بعد}$$

$$صفر = ك_{مدفع}\,عَ_{مدفع} + ك_{قذيفة}\,عَ_{قذيفة}$$

$$صفر = ٢٠٠٠\,عَ_{مدفع} + ٦٠ \times ٥٠٠$$

منها نجد أنّ: $عَ_{مدفع} = -١٥$ م/ث،

سـؤال

ماذا تعني الإشارة السالبة؟

تـوسـع

تُعدّ حركة الصاروخ مثالاً آخر على حفظ الزخم الخطي، إذ إنه عند اشتعال الوقود تنتج غازات ساخنة، تندفع نحو الخلف بسرعة كبيرة جدًّا؛ ما يدفع الصاروخ بقوّة نحو الأمام. إنّ عملية اشتعال الوقود السريعة تُكسب الصاروخ دفعًا يغيّر زخمه الخطّي، فينطلق بسرعة تتزايد باستمرار. لتطبيق قانون حفظ الزخم الخطّي على النظام المكوّن من الصاروخ والغازات المنطلقة، يجب تحديد الكميات الآتية: التغيّر في سرعة الغاز المنبعث، والتغيّر في سرعة الصاروخ، وكذلك كتلة الغاز المنبعث في وحدة الزمن، والتغيّر في كتلة الصاروخ.

مراجعة (٦-٣)

١ لماذا يجب أن تكون كتلة المدفع أكبر بكثير من كتلة القذيفة؟

٢ ينصح بابتعاد الجندي عن المدفع لحظة إطلاق القذيفة . علل ذلك.

٣ لديك قارب في حالة سكون بالقرب من الشاطئ، ويحاول أربعة أشخاص القفز منه نحو الشاطئ، من غير أن يتعرضوا للبلل. لعلك تلاحظ أن الشخص الذي سيقفز أولاً لن يتعرض للبلل، في حين أن الذين يقفزون بعده عليهم القفز مسافة أكبر كي يصلوا إلى الشاطئ. ما سبب ذلك بالرغم من أن القارب كان في حالة سكون؟

٤ علل؛ ليس من الحكمة أن تبقي قدميك مستقيمتين عند القفز من مكان عال.

المشروع السادس: حافظة البيض.

■ فكرةُ المشروعِ

إجراء تجربة يتمكن الطالب بها من معرفة السمك المناسب للحافظة لحماية البيضة من الكسر عند سقوطها من ارتفاعات مختلفة.

■ الفرضيةُ

يكتسب الجسم المتحرك زخمًا، فإذا أثرت قوة لإيقاف الجسم يكون مقدار التغير في الزخم مساويًّا لمقدار دفع القوة، أي أن:

Δ زخم = ق Δ ز

ك $ع_٢$ – ك $ع_١$ = ق Δ ز   حيث ك: كتلة البيضة،

فإذا توقف الجسم تكون $ع_٢$ = صفر

– ك $ع_١$ = ق Δ ز

■ الخطّةُ

اعتمادًا على معرفة المسافة التي يسيرها جسم حتى يتوقف، ومعرفة السرعة الابتدائية، يمكن حساب تسارع الجسم والزمن اللازم لتوقفه.

■ الأدوات

تحتاج إلى (١٠) قطع إسفنج سُمْك كل منها (١) سم، بيض المائدة، كيس شفاف، مقياس متري

■ الإجراءات

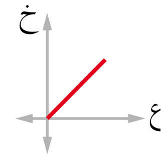
1. ضع البيضة داخل الكيس الشفاف.
2. رتب قطع الإسفنج العشر فوق بعضها.
3. أسقط البيضة من نقطة ترتفع ١م عن السطح العلوي لقطع الإسفنج.
4. سوف تلاحظ أن البيضة لم تنكسر.
5. أزل قطعة من قطع الإسفنج.
6. كرر الخطوات السابقة حتى تنكسر البيضة.
7. ما هو أقل سُمْك للإسفنج تمكن من حفظ البيضة من الكسر؟
8. يمكن أن تَعدّ هذا السُّمْك هو المسافة اللازمة لإيقاف البيضة.

■ مناقشة النتائج

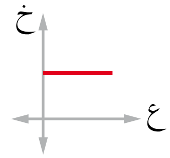
- احسب تسارع البيضة والزمن اللازم لتوقفها باستخدام معادلات الحركة.
- احسب القوة اللازمة لإيقاف البيضة. ماذا تعني الإشارة السالبة للقوة؟
- غير ارتفاع السقوط إلى ٢م، وكرر الإجراءات، وسجل النتائج. ناقش الفروقات في هذه الحالة مع الحالة الأولى (١ م).

١ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

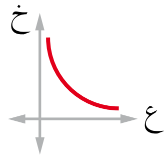
١ الخط البياني الذي يوضح العلاقة بين سرعة الجسم و زخمه هو:



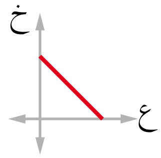
أ



ب



جـ

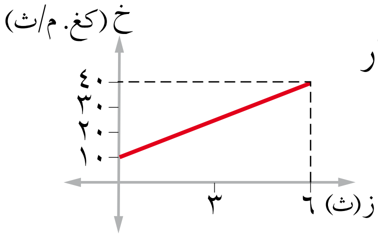


د

٢ اعتماداً على المنحنى البياني الموضح في الشكل (٦-١٤)، فإنّ مقدار القوة المؤثرة بوحدة (النيوتن) في الفترة الزمنية الكلية يساوي:

أ ١٠ ب ٤٠

جـ ٥ د ٦٠



الشكل (٦-١٤): السؤال الأول، الفرع الثاني.

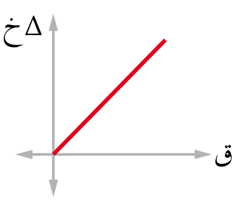
٣ ميل المنحنى البياني الموضح في الشكل (٦-١٥) يمثل:

أ مقدار التغيّر في السرعة.

ب زمن تأثير القوة على الجسم.

جـ كتلة الجسم.

د تسارع الجاذبية الأرضية.



الشكل (٦-١٥): السؤال الأول، الفرع الثالث.

٤ عند دفع جسم بقوة مقدارها ١٠ نيوتن لمدة ٠,٥ ث فإنّ التغيّر في زخمه الخطّي بوحدة كغ م/ ث يساوي:

أ ٢٠ ب ٥ جـ ٢,٥ د ٠,٢

٥ إذا أثرت قوة في جسم كتلته ٤ كغ، فأحدثت تغيّرًا في سرعته بمقدار ٥ م/ث، فإن مقدار الدفع الذي سببته القوة بوحدة نيوتن .ث يساوي:

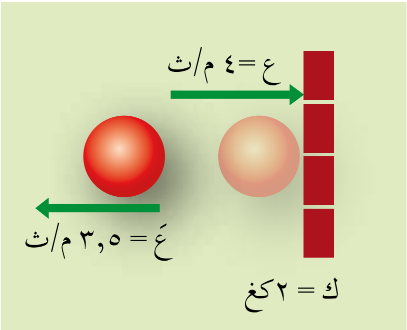
أ ٢٠ ب ٤٠ جـ ٥٠ د ٨٠

٦ إذا سقطت كرة صغيرة من الصلب كتلتها (ك) على سطح أفقي أملس فارتدت إلى الأعلى بمقدار السرعة (ع) التي اصطدمت بها نفسها، فإن مقدار التغيّر في الزخم الخطّي يساوي:

أ صفر ب $\frac{١}{٢}$ ك ع جـ ك ع د ٢ك ع

٧ اعتمادًا على الشكل (٦-١٦)، التغيّر في زخم الكرة بوحدة نيوتن. م يساوي:

أ ١ ب -١ جـ ١٥ د -١٥



الشكل (٦-١٦): السؤال الأول، الفرع السابع.

٨ إذا انطلقت رصاصة كتلتها ١٠٠غم من فوهة بندقية كتلتها ٥كغ بسرعة ١٠٠م/ث، فإن سرعة ارتداد البندقية بوحدة م/ث تساوي:

أ ١ ب -١ جـ ٢ د -٢

٩ إذا سقطت كرة كتلتها ٠,٢كغ سقوطًا حرًّا من ارتفاع (٥م) باتجاه سطح مستوٍ، لترتد لارتفاع (٤م)، فإنّ الدفع الذي تؤثر به الكرة في الأرض بوحدة نيوتن .ث يساوي:

أ ٣,٨٧ ب ٠,٠٤ جـ ٠,٢ د ٤

٢ أ علل كلاًّ مما يأتي:

١. إذا تركت كرة مطاطية تسقط سقوطًا حرًّا على أرض الملعب، فإنّها لا ترتد إلى الارتفاع الذي سقطت منه.

٢. يحدث نقص في طاقة الحركة الكلية لجسمين في التصادم غير المرن.

ب اذكر العوامل التي يتوقف عليها كلٍ من الزخم الخطّي والدفع.

جـ ماذا نقصد بقولنا إن زخم جسم ٨ كغ م / ث ؟

٣ تؤثر قوة في جسم كتلته ٤كغ، يتحرك بسرعة ٥م/ث لمدة زمنية مقدارها ١٠ ثواني، فتصبح سرعته ٨ م/ث. احسب:

أ التغيّر في الزخم الخطّي للجسم. ب الدفع الذي تلقاه الجسم.

جـ مقدار متوسط القوة المؤثرة فيه.

٤ شقيقتان كتلة الكبرى ٦٠كغ، وكتلة الصغرى ٥٠كغ، تقفان على أرض صالة التزلج الجليدية، دفعت الشقيقة الصغرى شقيقتها الكبرى:

أ صف حركة كل منهما. ب ما سرعة حركة الشقيقة الصغرى إذا كانت سرعة الكبرى ٠,٤ م/ث؟

جـ ما المسافة التي تقطعها كل منهما في ثانيتين بعد الدفع؟

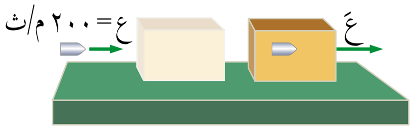
٥ يتحرك جسم كتلته ٥ كغ باتجاه محور الصادات الموجب بسرعة ٢ م/ث،تصادم مع جسم آخر يسير على الخط نفسه كتلته ٣ كغ، يتحرك بسرعة ٦م/ث باتجاه محور الصادات السالب.

١ إذا التصق الجسمان ليكونا جسمًا واحدًا فأجب عما يأتي:

أ ماذا يسمى هذا النوع من التصادم؟ ب جد السرعة المشتركة بعد التصادم مقدارًا واتجاهًا.

جـ جد الطاقة الحركية الضائعة نتيجة التصادم.

٢ إذا لم يلتحم الجسمان بعد التصادم، وكان التصادم مرنًا، فاحسب سرعة كل منهما بعد التصادم مباشرة مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (٦–١٧): السؤال السادس.

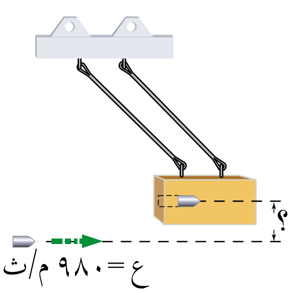
٦ أُطْلقت رصاصة كتلتها ١٠٠ غم بسرعة ٢٠٠م/ث على لوح سميك من الخشب كتلته ٤,٥ كغ ساكن على سطح أفقي أملس كما في الشكل (٦–١٧)، إذا استقرت الرصاصة داخل لوح الخشب وتحركت المجموعة، فاحسب:

أ السرعة التي تحركت بها المجموعة بعد التصادم مباشرة. ب طاقة الحركة الضائعة نتيجة التصادم.

٧ يتحرك جسم كتلته ٣ كغ باتجاه الشمال وبسرعة ٩م/ث، ويتقابل مع جسم آخر كتلته ٥ كغ، يسير بسرعة ٣م /ث باتجاه الشرق، فتصادم الجسمان وكوّنا جسمًا واحدًا. جد:

أ مقدار السرعة التي سيتحرك بها الجسمان، واتجاهها بعد التصادم مباشرة.

ب التغيّر في الطاقة الحركية للمجموعة نتيجة التصادم.



الشكل (٦–١٨): السؤال الثامن.

٨ رصاصة كتلتها ٥٠ غم تتحرك أفقيًّا بسرعة ٩٨٠م/ث، وتصطدم بقطعة خشبية ساكنة كتلتها ٩,٩٥ كغ ومعلقة رأسيًّا كما في الشكل (٦–١٨)، فإذا استقرت الرصاصة داخل قطعة الخشب فجد:

أ سرعة القطعة بعد التصادم مباشرة. ب المسافة الرأسية التي ترتفعها القطعة.

٩ جسم كتلته ٤ كغ يتحرك بسرعة أفقية ثابتة ٥٠ م/ث نحو جدار رأسي ثابت، فيصطدم به، ويرتد عنه مباشرة بعد أن يفقد ٢٠٪ من طاقته الحركية، إذا كان زمن التلامس بين الجسم والجدار ٠,٠١ ثانية، فجد القوة التي أثر بها الجدار في الجسم. إذا وضع حاجز لين ملامس للجدار، وزاد زمن التلامس إلى ضعفي ما كان عليه، فكم تصبح قوة التلامس بين الجدار والجسم؟

١٠ أثبت أن الطاقة الحركية لجسم كتلته ك وزخمه الخطّي خ تعطى بالعلاقة:

$$ط_{حركية} = \frac{خ^{٢}}{٢ك}$$

الوحدة الأولى: الميكانيكا

الفصل السابع

الموائع المتحركة

Fluids In Motion

في هذا الفصل

الأهمية

ترتبط حركة الموائع بكثير من المشاهدات اليومية في حياتنا، مثل جريان الماء والسوائل الأخرى في الأنابيب، وأهمية زيوت المحركات ومواصفاتها، وطيران الطائرات، وكذلك جريان الدم داخل أجسامنا.

تُجرى اختبارات (النفق) الهوائي على نموذج سيارة، لمساعدة مهندسي التصميم على التنبؤ بالسلوك الحقيقي لحركة الهواء في أثناء انطلاق السيارة بسرعات مختلفة، ويحدث في النفق الهوائي جريان مضبوط وموجّه للهواء نحو النموذج، وتستخدم الأبخرة لإظهار خطوط جريان الهواء بوضوح، ويستخدم هذا الاختبار للتوصل إلى تصميم من أجل تقليل مقاومة الهواء للسيارة في أثناء الحركة.

فكّر

- ما أهمية التقليل من مقاومة الهواء للسيارة؟ كيف يستدل على ذلك من خطوط جريان الأبخرة في النفق الهوائي؟

الموائع من حولنا

تحيط الموائع (السوائل والغازات) بنا في كل مكان، وتتعلق دراسة حركتها بحياتنا اليومية بشكل أساس، فبها تفسر عملية التنفس وجريان الدم، ويتضح مبدأ عمل المراوح الهوائية، ومضخات المياه، وأجهزة قياس ضغط الدم وغيرها من التطبيقات. سبق أن تعرّفت أن المائع هو وصف المادة غير الصلبة (الحالتان السائلة والغازية)، حيث يمكن لذرات المادة الجريان بسهولة من مكان إلى آخر. تندرج دراسة السلوك الفيزيائي للموائع ضمن فرع من ميكانيكا المواد يسمى ميكانيكا الموائع (Fluid Mechanics)، وسوف تتعرّف في هذا الفصل وصف الكميات الفيزيائية الخاصة بالموائع، مثل: السرعة، الضغط، الكثافة، معدل التدفق، واللزوجة.

بعد دراستك هذا الفصل يتوقع منك أن:

- توضح المقصود بالمائع المثالي.
- تستقصي عمليًّا خصائص المائع المثالي، وتعبر عنها رياضيًّا.
- تشتق معادلة الاستمرارية في المائع المثالي، وتعبر عنها رياضيًّا.
- تتوصل إلى معادلة برنولي في المائع المثالي، وتعبر عنها رياضيًّا.
- توضح المقصود باللزوجة.
- تتعرف العوامل المؤثرة في اللزوجة.
- تطبق العلاقات الرياضية الخاصة بحركة الموائع في حل مسائل حسابية.
- تتعرف بعض التطبيقات العملية لمعادلة برنولي (مقياس فنتوري، طيران الطائرة، والمرذاذ).
- توظف معادلة الاستمرارية ومعادلة برنولي واللزوجة في تفسير مواقف وظواهر حياتية، مثل صنبور الماء، وانسداد الأوعية الدموية.
- تقارن عمليًّا بين لزوجة موائع مختلفة.

٧–١ المائع الحقيقي والمائع المثالي

Real and Ideal Fluid

نشاط تمهيدي

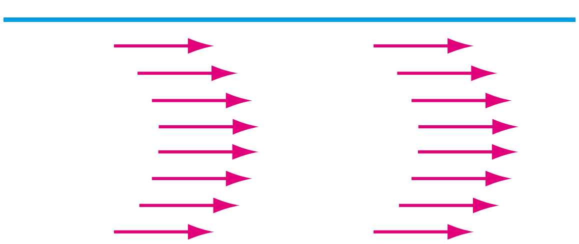
- انظر الشكل (٧–١)، وقارن بين جريان الزيت في الصورتين.

الشكل (٧–١): النشاط التمهيدي.

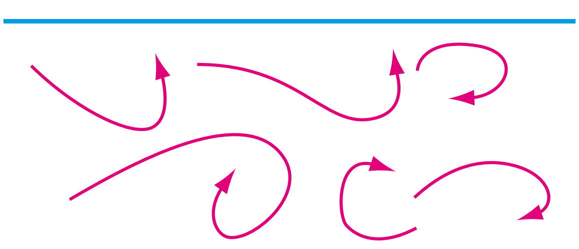
المائع (سائل أو غاز) هو تجمع من جزيئات في حالة حركة عشوائية تؤثر بعضها في بعض بقوى تماسك ضعيفة، كما تؤثر بقوى أخرى في جدران الوعاء الذي يحويها. ولقد اقتصرت دراستك للموائع سابقًا على الموائع الساكنة، وفي هذا الفصل سنركز اهتمامنا على الموائع في حالة الحركة.

يبين الشكل (٧–١) طريقتين في تفريغ الزيت؛ الأولى يفرغ فيها بسرعة من غير السماح للهواء بدخول الزجاجة، وفي الثانية زجاجة خاصة بزيت الزيتون تنظم دخول الهواء وخروج الزيت في آنٍ معًا، فينصب الزيت بانسياب ولطف. كيف يوصف جريان الزيت في الحالتين؟

عندما يتحرك المائع، فإن انسيابه يوصف بأنه منتظم steady أو طبقي laminar ؛ إذ ينساب كل جزيء من المائع في مسار منتظم بحيث لا تتقاطع المسارات المختلفة لجزيئات مختلفة كما في الشكل (٧–٢/أ) وعليه فإن سرعة المائع عند أي نقطة تبقى ثابتة مع مرور الزمن، في حين أنه عند تجاوز سرعة معينة تسمى السرعة الحدية يصبح جريان المائع غير منتظم nonsteady أو دوّامي turbulent وهو جريان يمتاز بمناطق دوامية صغيرة كما في الشكل (٧–٢/ب). إن حركة المائع الحقيقي معقدة وغير مفهومة بصورة كاملة إلا أننا نتخذ بعض الفرضيّات لتبسيط حركة المائع، وإن كثيرًا من مميزات المائع الحقيقي في حالة الحركة يمكن فهمها بدراسة **نموذج المائع المثالي**، وهو نموذج وضعه العلماء، لتسهيل دراسة المائع الحقيقي المتحرك باستخدام أربعة افتراضات هي:



الشكل (٧–٢/أ): الجريان المنتظم.



الشكل (٧–٢/ب): الجريان غير المنتظم.

أولاً: المائع غير لزج Nonviscus fluid؛ في هذا الفرض يمكن إهمال قوى الاحتكاك الداخلية

(اللّزوجة) بين طبقات المائع، أي أن المائع لا يعاني قوى احتكاك (قوى لزوجة) في أثناء جريانه.

ثانيًا: جريان منتظم Steady flow؛ في الجريان المنتظم، نفترض أن سرعة المائع عند أي نقطة في المائع تبقى ثابتة مع الزمن، في حين تتغير سرعة المائع عند النقطة الواحدة مع مرور الزمن في الجريان غير المنتظم.

ثالثًا: لا انضغاطيّ Incomprasable؛ في هذا الفرض، يمكن اعتبار أن كثافة المائع تبقى ثابتة مع مرور الزمن.

رابعًا: غير دوّامي Irrotational؛ أي أن جزئيات المائع لا تتحرك حركة دورانية حول أي نقطة، وترتبط خاصية عدم الدوران في المائع؛ بكونه عديم اللزوجة، ولا انضغاطي.

ويُختبر الجريان الدوّامي بوضع عجلة خفيفة قابلة للدوران في مجرى المائع، فإذا أخذت بالدوران فالجريان دوّامي. وتعدّ حركة دقائق الهواء في الأعاصير أمثلة على الحركة الدوّامية؛ حيث تظهر الدوّامات بوضوح كما في الشكل (٧-٣).

الشكل (٧-٣): إعصار يظهر الحركة الدوامية للهواء.

ولتعرّف خصائص المائع المتحرك يمكنك إجراء النشاط (٧-١).

نشاط (٧-١) خصائص المائع المتحرك

هدف النشاط: استقصاء خصائص المائع المتحرك عمليًا.

الأدوات: مجموعة محاقن طبية، ماء، زيت، خرطوم ماء شفاف، ثلاثة ألوان مائية، أكواب زجاجية، أكواب بلاستيكية، صنبور ماء، حجر صغير، عدس مجروش، دبوس.

خطوات تنفيذ النشاط:

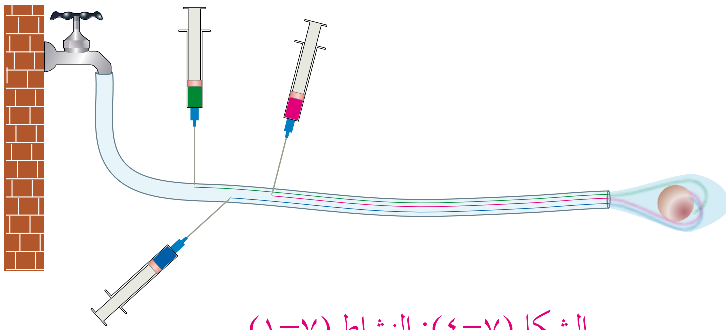
الجزء الأول

١ حضّر ثلاثة أكواب من الماء الملون بألوان مختلفة.

٢ اسحب حجمًا مناسبًا من الماء الملون باستخدام المحقن الطبي، وكرر ذلك لبقية الألوان.

٣ صل الخرطوم بصنبور الماء، وثبته على المنضدة بشكل مستقيم، بحيث يكون طرفه الحر في الحوض.

٤ افتح صنبور الماء باعتدال بحيث تكون سرعة الماء في الخرطوم بطيئة، تسهل ملاحظتها. ثمّ دوّن ملاحظاتك حول طبيعة جريان الماء داخل الخرطوم وعند نهايته.



الشكل(٧–٤): النشاط (٧–١).

٥ اغرس إبرة المحقن الطبي في الخرطوم على عمق مناسب، واحقن اللون برفق، ثم لاحظ مجرى اللون داخل الخرطوم.

٦ اغرس باقي إبر المحاقن الطبية على أبعاد مناسبة، كما في الشكل(٧–٤)، وكرر ما قمت به في الخطوة السابقة، ماذا تلاحظ على الألوان في أثناء جريانها في الخرطوم، وعند خروجها من الطرف الحر؟

٧ ضع حجرًا صغيرًا عند الطرف الحر للخرطوم، ثم لاحظ التغير في مجرى الماء خارج الخرطوم.

- ماذا نسمي الجريان قبل وضع الحجر، وبعده؟ ما أبرز خصائص الجريان التي لاحظتها؟
- عبِّر عن ذلك برسم تخطيطي، واعرضه للمناقشة.

الجزء الثاني

١ ضع كمية قليلة من الماء في محقن، وضع كمية مماثلة من الزيت في محقن آخر، واترك الهواء يملأ المحقن الثالث.

٢ أزل الإبرة من أطراف المحاقن الثلاثة، وسد أطرافها جيدًا باستخدام اللاصق.

٣ حاول ضغط الموائع الثلاثة برفق.

- ماذا يحدث لحجم كل من الموائع الثلاثة؟ أي خاصية من خواص المائع يمكنك استنتاجها؟

الجزء الثالث

١ افصل الخرطوم عن الصنبور وضع فيه كمية قليلة من العدس المجروش، ثم أعد وصله بالصنبور، وضع عند طرفه الحر كوبًا زجاجيًّا شفافًا.

٢ افتح الصنبور، ولاحظ حركة حبيبات العدس في أثناء جريانها داخل الخرطوم، وبعد خروجها إلى الكوب الزجاجي.

- ما الذي تلاحظه حول طبيعة حركة حبيبات العدس؟ ماذا يعني ذلك؟

الجزء الرابع

١ اثقب كوبين بلاستيكيين ثقبًا صغيرًا قرب القاعدة باستخدام دبّوس، ثمّ ضعهما في وعاء فارغ.

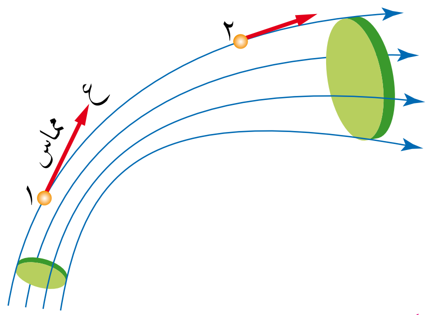
٢ ضع كمية مناسبة من الزيت في أحد الكوبين، وضع كمية مماثلة من الماء في الكوب الثاني.

٣ قس المدة الزمنية التي يحتاجها كل من الكوبين لإفراغ محتواه.

- ما الخاصية التي يمكنك استنتاجها؟

نستنتج من النشاط (٧–١) الخصائص الأساسية التي تصف سلوك المائع المتحرك، ونتوصل إلى مفهوم **خط الجريان**، وهو المسار الذي تتبعه دقائق المائع عند جريانها، ويمكن تحديد اتجاه سرعة جريان الدقيقة الواحدة من المائع عند نقطة معينة برسم المماس لخط الجريان عند تلك النقطة، كما في الشكل (٧–٥). ويُسمى الأنبوب الذي يحدث فيه الجريان **أنبوب الجريان**.

وقد يكون أنبوب الجريان محصورًا بجدار كما في خرطوم الماء، أو غير محصور بجدار عندما يكون مفتوحًا، كما في أنبوب جريان تيار الهواء الداخل من النافذة باتجاه الباب، ولتعرّف خصائص خطوط الجريان، تأمل الشكل (٧–٥)، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٧–٥): خطوط الجريان واتجاه السرعة.

- هل تتساوى كثافة خطوط الجريان عبر أنبوب الجريان؟ على ماذا يدلّ ذلك؟
- ماذا يحدث لمقدار سرعة جريان الدقائق واتجاهها بين نقطة وأخرى في أثناء جريانها في الأنبوب؟
- هل تتقاطع خطوط الجريان؟ ماذا يعني تقاطعها؟
- ما الذي يمثله اتجاه المماس لخط الجريان؟

توسع

الميوعة الفائقة (Superfluidity) هي خاصية انعدام اللزوجة بين طبقات المائع ولهذه الخاصية الكثير من التطبيقات العلمية، ومنها استخدام الهيدروجين الفائق الميوعة في تبريد القمر الصناعي (Infrared Astronomical Satellite IRAS)، الذي أطلق إلى الفضاء عام ١٩٨٣ لجمع معلومات كونية، واستخدمت المواد فائقة الميوعة لإلغاء الاحتكاك في جهاز الجايروسكوب (Gyroscopes) الشكل (٧–٦)، وهو جهاز مكون من قرص قابل للدوران حول محور، يستخدم لمعرفة تأثيرات الجاذبية في مناطق مختلفة على سطح الأرض وفي الفضاء.

ابحث مع زملائك عن استخدامات أخرى للمواد فائقة الميوعة.


الشكل(٧–٦): تركيب الجايروسكوب.

مراجعة (٧–١)

١ اذكر أنواع الجريان في الموائع.

٢ اذكر افتراضات المائع المثالي.

٣ ارسم خطوط الجريان لمائع مثالي، وبين كيف يحدد اتجاه السرعة عند النقاط المختلفة.

٧-٢ معادلة الاستمرارية
Continuity Equation

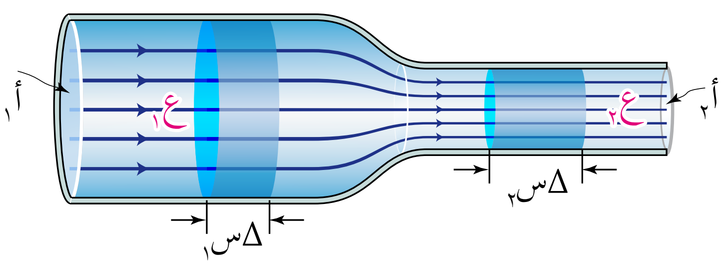
نشاط تمهيدي

- الشكل (٧-٧) لاحظ زيادة سرعة الماء عند تصغير فوهة الخرطوم.

الشكل (٧-٧): النشاط التمهيدي.

عندما تقوم بريّ المزروعات في حديقة المدرسة، أو بتنظيف فناء منزلك باستخدام خرطوم الماء، فإنك إذا أردت إيصال الماء لمسافة أبعد، تقوم بالضغط على فوهة الخرطوم، كما في الشكل (٧-٧). فهل سألت كيف تزداد سرعة اندفاع الماء، كي يصل مسافة أبعد بهذه الطريقة؟

لعلك لاحظت من المشاهدة العملية أن سرعة المائع المتحرك تعتمد على مساحة مقطع أنبوب الجريان، فكلما صغُرت مساحة مقطع أنبوب الجريان زادت سرعة المائع، ويمكن استخدام هذه النتيجة في التوصل إلى ما يُسمى **معادلة الاستمرارية**، فعندما يجري مائع مثالي كثافته ث في أنبوب متغير مساحة المقطع، كما في الشكل (٧-٨)، حيث تمثل $أ_{١}$ مساحة المقطع الأيسر، وتمثل $ع_{١}$ سرعة المائع فيه، وتمثّل $أ_{٢}$ مساحة المقطع الأيمن، $ع_{٢}$ سرعة المائع فيه، ولأنّ المائع مثالي فإن كثافته تكون ثابتة، وباستخدام قانون حفظ المادة (الكتلة)،



الشكل (٧-٨): مائع مثالي متدفق في أنبوب متغير مساحة المقطع.

فإن كتلة المائع التي تعبر المقطع $أ_{١}$ بسرعة $ع_{١}$ في زمن مقداره Δز، تساوي كتلة المائع التي تعبر المقطع $أ_{٢}$ بسرعة $ع_{٢}$ في الزمن نفسه؛ أي أنّ:

$ك_{١} = ك_{٢}$، وبما أن الكتلة = الكثافة × الحجم.

$$ك_{١} = ث \times ح_{١} = ث \times أ_{١} \times \Delta س_{١}$$

$$ك_{٢} = ث \times ح_{٢} = ث \times أ_{٢} \times \Delta س_{٢}$$ ، حيث ث : كثافة المائع، أ : مساحة مقطع الأنبوب

Δس: المسافة التي يقطعها المائع في الفترة Δز

فإن: $$ث \times أ_{١} \times \Delta س_{١} = ث \times أ_{٢} \times \Delta س_{٢}$$

بقسمة طرفي المعادلة على Δ ز، نحصل على:

$$\frac{ث \times أ_1 \times \Delta س_1}{\Delta ز} = \frac{ث \times أ_2 \times \Delta س_2}{\Delta ز}$$

$\frac{أ_1 \times \Delta س_1}{\Delta ز} = \frac{أ_2 \times \Delta س_2}{\Delta ز}$ ، وحيث أن: $\frac{\Delta س}{\Delta ز} = ع$، فإن:

$$أ_1 ع_1 = أ_2 ع_2 \quad \text{......} \quad (٧-١)$$

تُسمى المعادلة (٧-١) معادلة الاستمرارية، وتنص على أن **حاصل ضرب مساحة مقطع أنبوب الجريان في سرعة عبور المائع منه يساوي مقدارًا ثابتًا، أي أن: أ ع = ثابت**

فكرة

يتكون جهاز الدوران في جسم الإنسان من شرايين وأوردة وشعيرات دموية تختلف في مساحة مقاطعها؛ ما يجعل سرعة جريان الدم فيها متغيرةً.

سـؤال

ما وحدة قياس المقدار (أ ع) ؟

فكر: كيف تتغير معادلة الاستمرارية إذا أصبح المائع انضغاطيًّا؟

بالعودة إلى العلاقة الرياضية: $\frac{أ_1 \times \Delta س_1}{\Delta ز} = \frac{أ_2 \times \Delta س_2}{\Delta ز}$ ، وتعويض $أ\Delta س = ح$ ، فإن:

$\frac{ح_1}{\Delta ز} = \frac{ح_2}{\Delta ز}$ ، يُعرف المقدار $\frac{ح}{\Delta ز}$ بمعدل التدفق الحجمي، ويرمز له بالرمز Φ، **وهو مقدار حجم المائع الذي يعبر مساحة مقطع المجرى في وحدة الزمن.**

$$\Phi = \text{معدل التدفق الحجمي} = \frac{ح}{\Delta ز} \quad \text{......} \quad (٧-٢)$$

بالاستعانة بالعلاقتين الرياضيين (٧-١) و (٧-٢) نجد أن: $أ ع = \frac{ح}{\Delta ز} = \Phi$

سـؤال

ما وحدة قياس معدل التدفق الحجمي؟

فكر: الشكل المجاور (٧-٩) يظهر أنبوب جريان الماء المنساب من صنبور نحو الأسفل. فسّر التغير في مساحة مقطع الأنبوب.

الشكل (٧-٩): تيار ماء ساقط من صنبور.

مثال (٧-١)

أنبوب مساحة مقطعه ٢٠ سم^{٢}، متصل بأنبوب آخر مساحة مقطعه ٦ سم^{٢}، ويتصل الأنبوب الثاني بصنبور ماء يندفع الماء منه بسرعة ٤٠ سم/ ث، ومساحة مقطع الصنبور تساوي مساحة مقطع الأنبوب الثاني. احسب:

١ سرعة جريان الماء في الأنبوب الأول.

٢ معدّل التدفق في كلا الأنبوبين.

٣ حجم الماء المتدفق في دقيقة.

الحلّ:

١ باستخدام معادلة الاستمرارية

$$أ_{١} ع_{١} = أ_{٢} ع_{٢}$$

$$٢٠ \times ع_{١} = ٦ \times ٤٠ \quad ، \quad ع_{١} = ١٢ \text{ سم/ ث}$$

٢ معدل التدفق متساوٍ في كلا الأنبوبين (معادلة الاستمرارية)، بتطبيق المعادلة:

معدل التدفق $= أ_{١} ع_{١}$، نجد أن:

معدل التدفق $= ٢٠ \times ١٠^{-٤} \times ١٢ \times ١٠^{-٢}$

$= ٢,٤ \times ١٠^{-٤}$ م^{٣}/ ث.

٣ حجم الماء المتدفق في دقيقة = معدل التدفق × الزمن

$= ٢,٤ \times ١٠^{-٤} \times ٦٠$

$= ١,٤٤ \times ١٠^{-٢}$ م^{٣}.

مثال (٧-٢)

يتدفق الدم في جسم الإنسان عبر الشرايين والأوردة التي تتفرع بدورها إلى شعيرات دموية ذات مساحات مختلفة، فإذا علمت أن الدم يجري بسرعة ٠,٠٦ م/ث في شريان مساحة مقطعه ٠,٤ سم^{٢}. فاحسب:

١ معدل تدفق الدم في الشريان.

٢ إذا تفرع هذا الشريان إلى ٨٠ شعيرة دموية مساحة مقطع كل منها ٠,٠٣ سم^{٢}، فكم تصبح سرعة الدم في الشعيرة على اعتبار أن كثافة الدم ثابتة؟

٣ احسب كتلة الدم المتدفقة من شعيرة واحدة في ١٠ ثوانٍ، إذا كانت كثافة الدم الطبيعي= ١٠٦٠كغ/م^{٣}

الحلّ:

١ معدل التدفق في الشريان = $\text{أ}_{١} \times \text{ع}_{١} = ٠,٤ \times ١٠^{-٤} \times ٠,٠٦ = ٢,٤ \times ١٠^{-٦}$ م^{٣}/ث.

٢ من مبدأ حفظ الكتلة، فإن:

التدفق في الشريان = مجموع التدفق في الشعيرات، أي أن: $\text{أ}_{١}\,\text{ع}_{١} = \text{ن}\,\text{أ}_{٢}\,\text{ع}_{٢}$

حيث ن عدد الشعيرات التي يتفرع إليها الشريان.

$$٢,٤ \times ١٠^{-٦} = ٨٠ \times ٠,٠٣ \times ١٠^{-٤} \times \text{ع}_{٢}$$

$\text{ع}_{٢} = ٠,٠١$ م/ث. كيف تفسر انخفاض سرعة الدم في الشعيرة على الرغم من أن مساحة مقطعها أقل من مساحة مقطع الشريان؟

٣ ك = ث×ح، حيث ح = معدل التدفق في الشعيرة الواحدة × Δز

$$\text{ك} = ١٠٦٠ \times \left(\frac{٢,٤ \times ١٠^{-٦}}{٨٠}\right) \times ١٠ = ٣,١٨ \times ١٠^{-٤} \text{ كغ.}$$

توسع

تصلب الشرايين (Arteriosclerosis) هو أحد الأمراض التي تصيب الأوعية الدموية (الشرايين والأوردة) في جهاز الدوران، وينتج عن تجمع المواد الدهنية والكولسترول الزائدة على حاجة الإنسان وتراكمها على جدران الأوعية، مكونة طبقة صلبة كما في الشكل (٧-١٠)، ومسببة تضيّق الأوعية. وفقًا لمعادلة الاستمرارية، فإن هذا التضيّق يؤدي إلى تغير سرعة تدفق الدم في الشريان. ابحث عن الآثار الصحية السلبية التي يسببها مرض تصلب الشرايين، ودور التدخين في حدوثه.

الشكل (٧-١٠): مرض تصلب الشرايين.

مراجعة (٧-٢)

١ وضح المقصود بمعادلة الاستمرارية، معدل التدفق.

٢ اذكر العوامل المؤثرة في معدل تدفق المائع من مقطع أنبوب الجريان.

٣ لماذا تكون فوهة الخرطوم المستخدم في إطفاء الحريق أضيق بكثير من الخرطوم نفسه؟

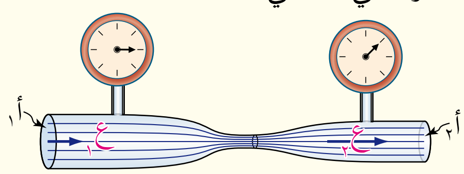
٧-٣ معادلة برنولي
Bernoulli's equation

فكرة

تنتقل الموائع في الطبيعة من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض، ولتغيير اتجاه حركتها يمكن الاستعانة بالمضخات (كما في مضخة المياه في المنزل).

نشاط تمهيدي

- تأمل الشكل (٧-١١)، ثم فسّر سبب اختلاف القراءة في مقياسي الضغط.

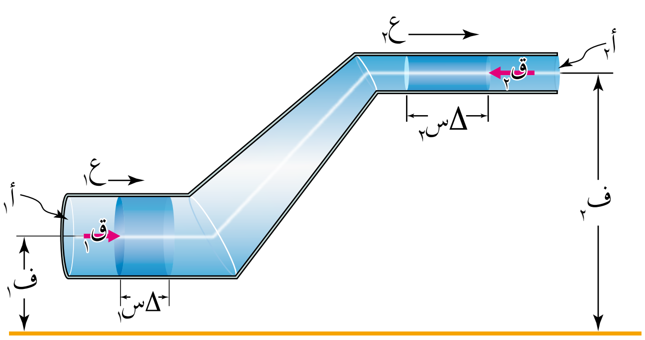


الشكل (٧-١١): النشاط التمهيدي.

بينت معادلة الاستمرارية أن سرعة المائع المتحرك في أنبوب الجريان تتغير مع تغيّر مساحة المقطع الذي يجري المائع خلاله. هل توجد متغيرات أخرى تؤثر في سرعة جريان المائع؟ هذا ما قام بدراسته العالم برنولي.

في الشكل (٧-١١) يتحرك المائع في أنبوب تتغير فيه مساحة المقطع، ومثبت بشكل أفقي. تبين معادلة الاستمرارية أن السرعة ع_2 في المقطع أ_2 أكبر من السرعة ع_1 في المقطع أ_1، أي أنّ المائع يتسارع عند عبوره المقطع الأضيق، وهذا يعني حسب القانون الثاني لنيوتن أن ثمة قوة محصلة أحدثت هذا التسارع. ما منشأ هذه القوة؟ وفقًا لتفسير برنولي؛ فإنّ زيادة سرعة المائع يرافقها نقصان في ضغطه، ويبين ذلك مقياس الضغط في الشكل (٧-١١)، أي يوجد فرق في ضغط المائع بين المقطعين أ_1 وأ_2، ما يُفسّر نشوء القوة المسببة للتسارع. (تذكّر: الضغط= ق/أ، ووحدة قياس الضغط هي نيوتن/م^2 = باسكال).

ماذا يحدث لكل من ضغط المائع وسرعته عندما يرتفع أحد طرفي أنبوب الجريان عن طرفه الآخر، كما في الأنابيب التي توصل المياه إلى سطوح المنازل؟ كي نتوصل إلى علاقة رياضية تربط بين ضغط المائع وسرعته وارتفاع أنبوب الجريان عن سطح الأرض، (يعد سطح الأرض هنا مستوى إسناد)، سوف ندرس الشكل (٧-١٢).



الشكل (٧-١٢): أنبوب متغير الارتفاع والقطر.

يتدفق المائع من المقطع أ_1 إلى المقطع أ_2، وتؤثر فيه القوتان (ق_1 و ق_2) بالاتجاه الموضح في الشكل، يتحرك المائع إزاحة $\Delta \text{س}_1$ في مدة زمنية Δز، تحت تأثير القوة ق_1، التي تدفعه نحو اليمين،

وتبذل هذه القوة شغلاً يعطى بالعلاقة:

$$ش_1 = ق_1 \Delta س_1 \text{ جتا}\,0 \quad، \text{ وحيث إن: } ق_1 = ض_1 أ_1 \quad، \text{ فإنه:}$$

$$ش_1 = ض_1 أ_1 \Delta س_1 = ض_1 \Delta ح_1$$

وبالطريقة نفسها، القوة $ق_2$ (المعاكسة لاتجاه حركة المائع) تبذل شغلاً على المائع في المقطع $أ_2$ يعطى بالعلاقة: $ش_2 = ق_2 \Delta س_2 \text{ جتا}\,180$

$$= -ض_2 أ_2 \Delta س_2 = -ض_2 \Delta ح_2$$

وبما أن المائع مثالي؛ فإن معدل التدفق يكون ثابتًا، أي أن $\Delta ح_1 = \Delta ح_2 = \Delta ح$ ، وبذلك يكون الشغل المبذول من هاتين القوتين على المائع هو:

$$ش = ش_1 + ش_2 = ض_1 \Delta ح - ض_2 \Delta ح = \Delta ح(ض_1 - ض_2)$$

وبتطبيق مبرهنة (الشغل – الطاقة)، $ش = \Delta ط_ح + \Delta ط_و$ ، فإن:

$\Delta ح(ض_1 - ض_2) = (\frac{1}{2} ك ع_2^2 - \frac{1}{2} ك ع_1^2) + (ك جـ ف_2 - ك جـ ف_1)$، بقسمة المعادلة على $\Delta ح$ وبإعادة ترتيب حدود المعادلة.

$ض_1 + \frac{ك}{\Delta ح} جـ ف_1 + \frac{ك}{2\Delta ح} ع_1^2 = ض_2 + \frac{ك}{\Delta ح} جـ ف_2 + \frac{ك}{2\Delta ح} ع_2^2$ ، وبتعويض $ك = ث \times ح$ فإن

$$ض_1 + ث جـ ف_1 + \frac{1}{2} ث ع_1^2 = ض_2 + ث جـ ف_2 + \frac{1}{2} ث ع_2^2 \quad .... (٧-٣)$$

من المعادلة السابقة، يكون مجموع الضغط والطاقة الميكانيكية لوحدة الحجوم، عند المقطع الأول مساويًا لمجموع الضغط والطاقة الميكانيكية لوحدة الحجوم عند المقطع الثاني، وبما أنّ النظام محافظ؛ فإن هذا المقدار يكون ثابتًا عند أي مقطع آخر على طول أنبوب الجريان، أي أن:

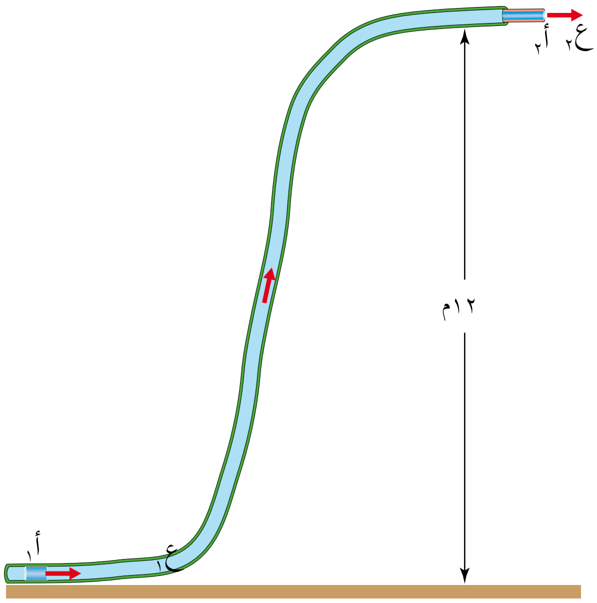
$$ض + ث جـ ف + \frac{1}{2} ث ع^2 = \text{مقدارًا ثابتًا} \quad .... (٧-٤)$$

تُعرف المعادلة (٧-٤) بمعادلة برنولي، وتوصف بالنص الآتي: **"مجموع الضغط والطاقة الميكانيكية لوحدة الحجوم يساوي مقدارًا ثابتًا عند أي مقطع على طول مجرى المائع المثالي".**

فكر:

- بيّن أن وحدة كل من المقدار (ث جـ ف) والمقدار ($\frac{1}{2}$ ث $ع^2$) هي ذاتها وحدة قياس الضغط (باسكال).
- اكتب معادلة برنولي عندما يكون الأنبوب مثبتًا بشكل أفقي، ثم اكتبها إذا كان المائع ساكنًا.

مثال (٧-٣)



الشكل (٧-١٣): مثال (٧-٣).

خرطوم ماء موضوع أفقيًّا على سطح الأرض مساحة مقطعه أ$_{١}$ = ٤سم^{٢}، ثُبّت في طرفه أنبوب رفيع مساحة مقطعه أ$_{٢}$ = ٢سم^{٢}. إذا كانت سرعة تدفق الماء عند المقطع الأول ع$_{١}$ = ٥م/ث، وبفرض أن الماء مائع مثالي، ث$_{\text{ماء}}$ = ١٠^{٣} كغ/ م^{٣}، فاحسب:

١ سرعة الماء عند الطرف الحر للأنبوب.

٢ الفرق في ضغط الماء بين المقطعين أ$_{١}$، أ$_{٢}$.

٣ كم سيصبح فرق الضغط لو استخدم الخرطوم لملء خزان يرتفع ١٢م عن الأرض، كما في الشكل (٧-١٣)، مع بقاء سرعة الماء كما في الوضع الأفقي؟

الحلّ:

١ أ$_{١}$ × ع$_{١}$ = أ$_{٢}$ × ع$_{٢}$

٤×١٠$^{-٤}$ × ٥ = ٢ × ١٠$^{-٤}$ × ع$_{٢}$ ، ع$_{٢}$ = ١٠م/ ث

٢ باستخدام معادلة (٧-٣) نجد:

ض$_{١}$ − ض$_{٢}$ = ث جـ (ف$_{٢}$ − ف$_{١}$) + $\frac{١}{٢}$ ث (ع$_{٢}^{٢}$ − ع$_{١}^{٢}$)

ض$_{١}$ − ض$_{٢}$ = ١٠^{٣} × ٩,٨(٠) + $\frac{١}{٢}$ × ١٠^{٣} × (١٠^{٢} − ٥^{٢})،

ض$_{١}$ − ض$_{٢}$ = ٣,٧٥ × ١٠^{٤} باسكال = ٠,٣٧٥ ضغط جوي

٣ باستخدام معادلة (٧-٣) نجد:

ض$_{١}$ − ض$_{٢}$ = ث جـ (ف$_{٢}$ − ف$_{١}$) + $\frac{١}{٢}$ ث (ع$_{٢}^{٢}$ − ع$_{١}^{٢}$)

ض$_{١}$ − ض$_{٢}$ = ١٠^{٣} × ٩,٨(١٢−٠) + $\frac{١}{٢}$ × ١٠^{٣} × (١٠^{٢} − ٥^{٢})،

ض$_{١}$ − ض$_{٢}$ = ١,٥٥١ × ١٠^{٥} باسكال = ١,٥٥١ ضغط جوي. (١ ضغط جوي = ١٠^{٥} باسكال).

فكر: في استخدامنا اليومي لضخ الماء من بئر إلى سطح الأرض، قد نتمكن من ملء خزان ما في نصف ساعة، لكن إذا أردنا ملء خزان مماثل فوق سطح بناية، باستخدام المضخة نفسها، فإنه يلزمنا زمن أطول. فسر ذلك معتمدًا على معادلة برنولي (٧-٤).

توسع

تضخ عضلة القلب الدم بقوّة إلى أجزاء الجسم جميعها، فيتحرك من القلب ليعود إليه مرة أُخرى في دورة كاملة، ويكون معدل ضغط الدم عند القلب في الإنسان الطبيعي نحو (١٣,٣ كيلو باسكال). إذا كان الإنسان مستلقيًا، فإن ضغط الدم يكون متساويًا عند جميع أجزاء الجسم، لأنها تكون على ارتفاع واحد من الأرض تقريبًا، ويتحرك الدم داخل الجسم وفق معادلة الاستمرارية، مغيرًا سرعته حسب تغيّر مساحات مقاطع الشرايين والأوردة والشعيرات الدموية، لكن في وضع الوقوف سيختلف ضغط الدم في الأعضاء السفلية للجسم عنه عند القلب، فما القوة التي تدفع الدم من تلك الأعضاء إلى القلب بعكس اتجاه قوة الجاذبية الأرضية؟

مراجعة (٧-٣)

١ اذكر نص معادلة برنولي.

٢ من دراستك لمعادلة برنولي، فسر المشاهدتين الآتيتين:

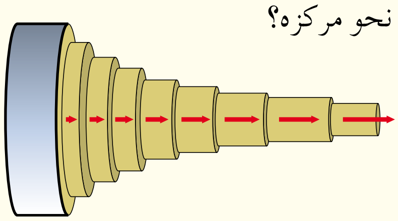
- قد يتعرض قاربا سباق للتصادم عند اقترابهما من بعضهما إلى حد معين.
- يعمد العاملون في المستودعات الكبيرة ذات الأسقف المعدنية (الزينكو) إلى فتح الأبواب وبعض النوافذ، عند هبوب رياح شديدة.

٣ اكتب معادلة برنولي للمائع المثالي في أثناء جريانه.

٧-٤ اللزوجة Viscosity

نشاط تمهيدي

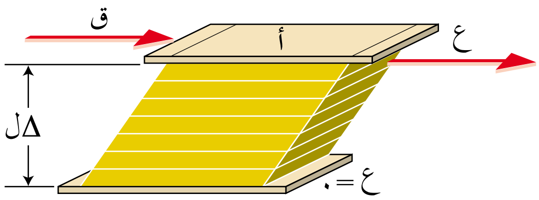
• يوضح الشكل (٧-١٤) حركة سائل الصمغ في أنبوب جريان، فسر لماذا تزداد سرعة المائع بالابتعاد عن جدران الأنبوب نحو مركزه؟



الشكل (٧-١٤): الجريان الطبقي للمائع.

عند دراسة حركة مائع ثقيل القوام، كالعسل أو الجلسرين، محصور بين شريحتين زجاجيتين وتثبيت الشريحة السفلية، والتأثير بقوة أفقية مماسيّة في الشريحة العلوية باتجاه اليمين، تلاحظ صعوبة في تحريكها. لماذا؟

تخيل أن السائل يتكون من طبقات أفقية بعضها فوق بعض، انظر الشكل (٧-١٥)، ونتيجة لقوى الاحتكاك بين تلك الطبقات، تجد أن سرعتها تختلف من طبقة إلى أخرى؛ فهي تقل في الأسفل، بينما في الطبقات العليا نجدها تقترب من سرعة الشريحة العلوية، يُعرف هذا النوع من الجريان **بالجريان الطبقي**. وهو يحدث نتيجة لخاصية في المائع تعرف باللزوجة، **فاللزوجة هي مقياس ممانعة طبقات المائع للجريان، وقوة اللزوجة هي المقاومة التي تؤثر بها كل طبقة من طبقات المائع المتحرك في الطبقة المجاورة لها.**



الشكل (٧-١٥): طبقات مائع عالي اللزوجة.

تختلف الموائع عن بعض في لزوجتها، ويُعبّر عن لزوجة المائع **بمعامل اللزوجة** η، فإذا أردنا تحريك كمية من الزيت في أنبوب جريان بسرعة معينة ع، فإننا نحتاج إلى قوة أكبر من التي نحتاج إليها لتحريك الكمية ذاتها من الماء وبالسرعة نفسها. ما الذي يعنيه ذلك؟

فكرة

تعتمد شدة الانفجارات البركانية على لزوجة مادة البركان، وكلما زادت نسبة السيليكا في المواد البركانية زادت لزوجتها.

هناك طرائق عمليّة عدّة لإيجاد معامل لزوجة المائع منها:

١ **طريقة نيوتن:** وضع نيوتن طبقة من المائع بين شريحتين رقيقتين، ثبّت السفلية، ثم أثّر بقوة مماسية في الشريحة العلوية، كما في الشكل (٧-١٥)، وتوصل عمليًا إلى أن القوة المماسية اللازمة لتحريك طبقات المائع، تتناسب طرديًا مع كلٍ من سرعة جريان المائع (ع)، ومساحة التلامس(أ)، وعكسيًا مع البعد عن السطح الثابت(Δل)، وتوصل إلى ثابت التناسب الذي

يعتمد على نوع المائع، ويسمى معامل اللزوجة .

$$ق = \eta \frac{ع\, أ}{\Delta ل} \quad \text{.......... (٧-٥)}$$

٢ **طريقة ستوكس**: وتكون بدراسة حركة كرة نصف قطرها(نق)، تُسْقَط في المائع المراد قياس لزوجته، بحيث تتحرك هذه الكرة إلى الأسفل بسرعة حدية تعتمد على قوة اللزوجة. وقد وجد ستوكس عمليًّا أن قوة اللزوجة تحسب بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ق_{لزوجة} = ٦\, \pi\, \eta\, نق_{الكرة}\, ع_{الحدية} \quad \text{.......... (٧-٦)}$$

والسرعة الحدية، هي سرعة الكرة الساقطة عندما تكون محصلة القوى المؤثرة فيها مساوية للصفر. (قوة الجاذبية للأسفل، وقوّتا اللزوجة والطفو للأعلى).

ويمكن حساب معامل اللزوجة من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\eta = \frac{٢}{٩} \frac{جـ\, نق^{٢}}{ع} (ث_{الكرة} - ثَ_{المائع}) \quad \text{.......... (٧-٧)}$$

سـؤال

أثبت أن وحدة قياس معامل اللزوجة هي (باسكال. ث).

أمّا في مجالات الطب والهندسة الميكانيكية، فتستخدم وحدة صغيرة تسمّى بواز Poise، حيث إنّ كل ١٠ بواز تساوي ١ باسكال. ث.

تختلف لزوجة السائل باختلاف درجة حرارته، حيث تقلّ اللزوجة بارتفاع درجة حرارة السائل، ويعود سبب ذلك إلى أنّ قوة اللزوجة في الموائع (مقاومة الجريان) تنشأ عن قوى تماسك جزيئاته معًا؛ ففي السوائل تزداد الطاقة الحركية للجزيئات بارتفاع درجة الحرارة، فيتباعد بعضها عن بعض، وتقل قوى التماسك بينها، ومن ثم تقل اللزوجة. هل يمكن تعميم هذه النتيجة على الغازات التي تعدّ موائعَ؟ ادرس الجدول (٧-١) الذي يبين قيم معامل اللزوجة لبعض السوائل والغازات عند درجات حرارة مختلفة، ثم أجب عن الأسئلة التي تليه.

الجدول (٧-١) معامل اللزوجة لبعض الموائع عند درجات حرارة مختلفة بوحدة ملي باسكال.ث.

درجة الحرارة °س	الماء	زيت الخروع	غاز الهيدروجين	الهواء
٢٠	١,٠٠١	٠,٩٨٦	٠,٨٧٥	١,٨٤
٤٠	٠,٦٥٦	٠,٢٣١	٠,٩١٥	١,٩٣
٦٠	٠,٤٦٩	٠,٠٨٠	٠,٩٥٥	٢,٠٠

- كيف تتغير لزوجة الماء عند رفع درجة حرارته؟ لماذا؟
- كيف تتغير لزوجة الهواء عند رفع درجة حرارته؟ لماذا؟
- علل: لا يُستخدم زيت الخروع في محرك السيارة.

لعلك لاحظت أن قيم معامل اللزوجة للغازات الواردة في الجدول تزداد عند ارتفاع درجة حرارتها، ويعود سبب ذلك إلى أنّ لزوجة الغازات تنشأ عن تصادم جزيئاتها معًا؛ ما يعيق تدفقها عبر أنبوب الجريان (هذا يقابل قوة الاحتكاك بين طبقات السائل في أثناء جريانها)، وزيادة درجة حرارة الغاز تزيد من الطاقة الحركية لجزيئاته، فتزداد فرصة تصادم جزيئات الغاز بعضها مع بعض، وهذا يعني زيادة مقاومة جزيئات الغاز للحركة، وزيادة اللزوجة؛ أي أنّ لزوجة الموائع بشكل عام تعتمد على: نوع المائع، ودرجة حرارة المائع، والحالة الفيزيائية للمائع.

توسع

بما أن طريقتي نيوتن وستوكس قد تكونان غير عمليتين في بعض الحالات، فقد أصبح متاحًا استخدام جهاز قياس لزوجة الموائع (Viscometer) المبين في الشكل (٧-١٦)، وهو جهاز حديث يوضع فيه المائع المراد معرفة معامل لزوجته، وبعمليات آلية تتم داخل الجهاز تُحدّد قيمة معامل اللزوجة، وتظهر النتيجة الرقمية على شاشة الجهاز.

الشكل (٧-١٦): جهاز قياس لزوجة المائع.

مراجعة (٧-٤)

١ وضح المقصود بكل من لزوجة المائع، والسرعة الحدية.

٢ فسّر العبارات الآتية:
- تقل لزوجة السوائل، بينما ترتفع لزوجة الغازات بارتفاع درجة الحرارة.
- من الضروري تبديل زيت محرك السيارة كلما قطعت السيارة مسافة محدّدة.

٣ ما العوامل التي تعتمد عليها قوة اللزوجة في مائع؟

٤ اذكر بعض الطرائق والأجهزة المستخدمة لقياس لزوجة المائع؟

٥ فكر: يزداد معدل استهلاك السيارة للوقود عند القيادة بسرعات كبيرة، إذ إن مقاومة الهواء للسيارة تزيد بزيادة سرعتها؛ فمقاومة الهواء تتناسب طرديًا مع السرعة المنخفضة للسيارة، بينما تتناسب طرديًا مع مربع السرعة العالية. فسّر ذلك، مبينًا علاقته باللزوجة.

(٧–٥–١) طيران الطائرة

"صقور الأردن الملكية" هو اسم الفريق الوطني الذي يمثل الأردن في العروض الجوية، ويضم خمس طائرات صغيرة من طراز (Extra EA 300). هل تحلم بأن تكون عضوًا ضمن هذا الفريق بعد إكمال دراستك؟ إذن عليك دراسة الطيران أولًا، ومعرفة كيف تحلق الطائرة في السماء.

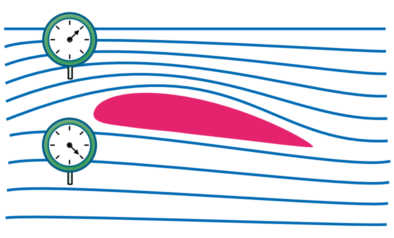
نشاط تمهيدي

- تأمل الشكل (٧–١٧) الذي يبين مشاركة فريق صقور الأردن الملكية في العروض الجوية العالمية، ثم ضع فرضيات تفسر بها كيف تطير الطائرة.

الشكل (٧–١٧) يبين مشاركة فريق صقور الأردن الملكية في العروض الجوية العالمية.

ما القوى التي تؤثر في الطائرة فتمكنها من التحليق إلى الأعلى والاندفاع إلى الأمام؟ وما الوظيفة التي تؤديها أجنحة الطائرة وبعض الأجزاء الأخرى لاستمرار تحليقها؟

لتتمكن من تعرّف منشأ القوة التي تساعد الطائرة على الطيران، ادرس الشكل (٧–١٨) الذي يوضح مقطعًا عرضيًّا لجناح طائرة، وخطوط جريان الهواء حوله، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٧–١٨): مقطع عرضي في جناح طائرة، وخطوط الجريان.

- كيف تختلف خطوط جريان الهواء على سطحي جناح الطائرة؟
- ما العلاقة بين كثافة خطوط الجريان وسرعة الهواء عند سطحي جناح الطائرة؟ وما أثر ذلك في فرق الضغط بين سطحي الجناح العلوي والسفلي؟
- ما التأثير الذي يحدثه فرق الضغط هذا على الجناح؟
- فسر منشأ قوة الرفع المؤثرة في الطائرة؟

لعلك استنتجت أن الشكل الانسيابي لجناح الطائرة، وتحدب السطح العلوي بشكل أكبر من السطح السفلي يعمل على جريان الهواء فوق الجناح بسرعة أكبر ممّا هي أسفله، ووفقًا لمعادلة برنولي (**كلما زادت سرعة المائع قلّ ضغطه**)، فإن ضغط الهواء فوق الجناح يكون أقل من الضغط أسفله، وفرق الضغط يؤدي إلى نشوء قوة عمودية على اتجاه الحركة الأفقية للطائرة، أي للأعلى، تُسمى **قوة الرفع**، تؤثر في جناح الطائرة. إذا كان فرق الضغط Δ ض، ومجموع مساحة الأجنحة أ ، فإن قوة الرفع تحسب بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ق}_{\text{رفع}} = \Delta \text{ض}\ \text{أ} \quad \text{.......} \quad (٧-٧)$$

حيث يحسب فرق الضغط من معادلة برنولي. ليست قوة الرفع إلى أعلى هي القوة الوحيدة التي تؤثر في الطائرة، إذ تلاحظ من الشكل (٧-١٩) أن الطائرة تتأثر بعدة قوى عمودية على اتجاه حركتها هي: وزنها للأسفل، وقوتا الرفع والطفو للأعلى، وقوتان موازيتان لاتجاه حركتها هما: قوة دفع المحرك نحو الأمام، وقوة مقاومة الهواء نحو الخلف. عندما تكون الطائرة متزنة أفقيًّا (أي تسير بسرعة أفقية ثابتة)، فإنّ: $\text{ق}_{\text{محرك}} = \text{ق}_{\text{مقاومة الهواء}}$ ولزيادة السرعة الأفقية يزيد الطيار من قوة دفع المحرك، كما في السيارة، وللتحليق بالطائرة على ارتفاع ثابت، يعمل الطيار على جعل: $\text{ق}_{\text{رفع}} + \text{ق}_{\text{طفو}} = \text{ق}_{\text{وزن}}$ ولزيادة ارتفاع الطائرة يزيد الطيّار من قوة الرفع، بزيادة فرق الضغط فوق الجناح وأسفله، بطرائق عدة تعتمد على تصميم الطائرة منها: زيادة السرعة الأفقية للطائرة، أو استخدام الجُنيحات الصغيرة لتغيير مساحة الجناح وشكله.

الشكل (٧-١٩): القوى المؤثرة في الطائرة.

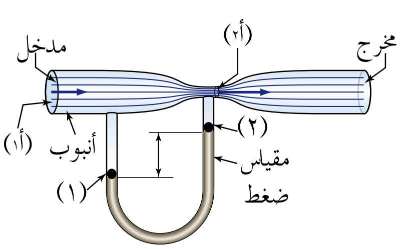
(٧-٥-٢) مقياس فنتوري

إن ضبط معدل تدفق المائع وسرعته مهمان جدًّا في كثير من التطبيقات العملية على الموائع المتحركة، ففي مجال الطب يحتاج الأطباء لقياس معدل تدفق الدم من عضلة القلب، ويستخدم مصممو شبكات نقل النفط وأنابيب الغاز والمياه مقياس فينتوري لضبط معدل تدفق هذه الموائع عبر الأنابيب، لتحديد الكميات المطلوب نقلها، ومعرفة ضغطها ودرجة حرارتها وسرعة نقلها.

تعتمد عمليات قياس معدل تدفق المائع في أنابيب النقل على استخدام وصلة ضيقة (مقياس فينتوري) بأشكال مختلفة كما في الشكل (٧-٢٠) توضع في مجرى المائع، وتكون مساحة مقطعها أصغر من مساحة مقطع أنبوب النقل، فتتغير سرعة جريان المائع ويتغير ضغطه، ويستخدم مقياس فنتوري لقياس فرق الضغط بين المقطعين؛ إذ يعدّ من أكثر الأجهزة انتشارًا للقيام بتلك المهمة.

(أ): وصلة ضيقة توضع في مجرى المائع.

(ب): قياس فرق الضغط.



(جـ): طريقة عمل مقياس فنتوري.

الشكل (٧-٢٠): مقياس فنتوري.

ولتتمكن من تعرف مبدأ عمل مقياس فنتوري، ادرس الشكل (٧-٢٠/جـ) الذي يمثل رسمًا توضيحيًّا لأنبوب فنتوري (الأنبوب الأفقي)، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

- صف شكل أنبوب فنتوري.
- ماذا يحدث لسرعة المائع وضغطه عندما يتدفق من المقطع الأيسر إلى الاختناق في الشكل؟
- كيف تفسر ارتفاع مستوى الماء الملون في أنبوب حرف U في الشكل؟
- كيف يمكنك حساب فرق الضغط بين النقطتين ١ و٢ في أنبوب فنتوري؟

مثال (٧-٤)

استُخدم أنبوب فنتوري لقياس معدل تدفق الكيروسين في أثناء نقله عبر أنبوب مساحة مقطعه ٠,٣م^{٢} إلى محطة وقود، فكانت قراءة البارومتر عند مدخل المقياس ٤ × ١٠^{٤} باسكال، وعند المقطع الضيق ١ × ١٠^{٤} باسكال، إذا علمت أن مساحة مقطع مدخل المقياس ١×١٠$^{-٢}$م^{٢}، ومساحة المقطع الضيق ٢,٥×١٠$^{-٣}$م^{٢}، وكثافة الكيروسين ٨٢٠ كغ/م^{٣}، فاحسب:

١ سرعة تدفق الكيروسين في الأنبوب.

٢ حجم كمية الكيروسن المتدفق في خزان محطة الوقود في ٢٠ دقيقة.

الحلّ:

١ لحساب سرعة تدفق الكيروسين في أنبوب الجريان، نحسب أولاً سرعته (ع$_{١}$) عند دخوله مقياس فينتوري، وبتطبيق معادلة الاستمرارية على مقياس فينتوري:

$$أ_{١}ع_{١} = أ_{٢}ع_{٢}$$

$$١٠٠ \times ١٠^{-٤} ع_{١} = ٢٥ \times ١٠^{-٤} ع_{٢}$$

$$ع_{٢} = ٤ ع_{١}$$

وباستخدام معادلة برنولي عند المقطعين ١ و٢:

$$ض_{١} - ض_{٢} = \frac{١}{٢} ث (ع_{٢}^{٢} - ع_{١}^{٢})$$

$$٤\times١٠^{٤} - ١\times١٠^{٤} = \frac{١}{٢} \times ٨٢٠ \times ((٤ع_{١})^{٢} - ع_{١}^{٢})،\ ع_{١} = ٢,٢م/ث$$

وبتطبيق معادلة الاستمرارية مرة أخرى على الكيروسين عند انتقاله من أنبوب الجريان إلى مقياس فينتوري:

$(أ ع)_{\text{أنبوب الجريان}} = (أ ع)_{\text{مدخل مقياس فينتوري}}$

٠,٣ × ع = ١٠٠ × ١٠$^{-٤}$ × ٢,٢

ع = ٠,٠٧٣ م/ث

٢ معدل التدفق = $\frac{ح}{ز}$ = أ ع

ح = أ ع ز = ٠,٣ × ٠,٠٧٣ × (٢٠×٦٠) = ٢٦,٣ م^{٣}.

توسع

من الصعب استخدام مقياس فنتوري المعتمد على حساب فرق الضغط لسائل موجود في أنبوب على شكل حرف U، لذا فإن المقياس المستخدم حاليًّا يستعاض فيه عن أنبوب حرف U، بجهاز قياس الضغط؛ البارومتر الفلزي أو البارومتر الرقمي، كما في الشكل (٧-٢١)؛ وذلك لسهولة نقله واختزال الحسابات. ويستخدم مقياس فنتوري أيضًا بتقنية الأمواج فوق الصوتية المبين في الشكل (٧-٢٢)، حيث تستخدم تقنيات صوتية في قياس معدل التدفق، وهذه التقنية تعتمد على قياس المدة الزمنية اللازمة لتقدم موجة صوتية بين مجسين إلكترونيين يشكلان معًا عداد التدفق.

الشكل (٧-٢١): مقياس فينتوري الفلزي والرقمي.

الشكل (٧-٢٢): مقياس فينتوري بتقنية الأمواج فوق الصوتية.

مراجعة (٧-٥)

١ بين كيف يساعد الشكل الانسيابي للجناح على نشوء قوة الرفع عليه.

٢ ما الهدف من وجود الاختناق في مجرى المائع عند تصميم مقياس فنتوري؟

٣ اذكر بعض التطبيقات العملية على مقياس فينتوري.

٤ فكّر: يختلف منشأ قوة الرفع في الطائرات العمودية كما في الشكل (٧-٢٣) عنه في الطائرات ذات الأجنحة، وضح كيف تنشأ قوة الرفع في هذا النوع من الطائرات.

الشكل (٧-٢٣): السؤال الرابع.

المشروع السابع: فحص جودة الزيوت المعدنية المستخدمة في السيارة

الشكل (٧–٢٤): تفريغ زيت المحرك.

- **فكرة المشروع:** يبين الشكل (٧–٢٤) قيام الفني المختص في محطة صيانة السيارات بتفريغ زيت محرك السيارة المستخدم. ما مواصفات زيت المحرك الجيد؟ وما أسباب تبديله بين حين وآخر؟
- **الفرضية:** بعد قطع السيارة مسافة معينة، تؤخذ إلى محطة الصيانة، ليبدل الفني زيت المحرك، فيفرغ الزيت القديم، ويضيف بدلاً منه زيتًا جديدًا للمحرك.

ضع مجموعة من الفرضيات التي تبين أسباب استخدام الزيت في محرك السيارة، والمواصفات الجيدة لزيت المحرك، وأسباب استبداله.

- **الخطة:** لتتمكن من اختبار فرضياتك حول أسباب استبدال زيت المحرك بعد مدة من استخدامه، عليك تنفيذ النشاط الآتي، ويمكنك الاستعانة بفني السيارات، وبمواقع الإنترنت ذات العلاقة بالموضوع.
- **الأدوات:** زيت محرك جديد، وآخر قديم، عبوتا مياه بلاستيكيتان فارغتان سعة كل منهما ٠,٥ لتر، ساعتا توقيت، كرات زجاجية صغيرة الحجم، علبتان فلزيتان فارغتان، لهب بنسن، كأس زجاجي مدرج، ميزان حرارة، مطرقة، مسمار.
- **الإجراءات:**

الجزء الأول

١. خذ عبوتين فارغتين واملأ إحداهما بالزيت الجديد والأخرى بزيت قديم بالكمية نفسها.
٢. استخدم المسطرة لقياس ارتفاع الزيت في كل عبوة.
٣. ضع في كل عبوة كرة زجاجية صغيرة، ثم أغلق العبوتين بإحكام.
٤. أمسك العبوتين، واقلبهما ببطء، وَلْيَقِسْ اثنان من أفراد المجموعة الزمن اللازم لوصول الكرة الزجاجية إلى قاع كل من العبوتين.
٥. كرر المحاولة عدة مرات وسجل الزمن اللازم لوصول الكرة الزجاجية إلى قاع العبوة في كل محاولة في الجدول (٧–٢)، ثم جد السرعة المتوسطة لحركة الكرة.

الجدول (٧–٢)

	$ز_١$	$ز_٢$	$ز_٣$	متوسط الزمن $\bar{ز}$	السرعة المتوسطة للكرة
زيت جديد					
زيت قديم					

- ماذا تستنتج عن لزوجة كل من عينتي الزيت؟

الجزء الثاني

١ خذ العلبتين الفلزيتين، واثقب قاع كل منهما ثُقبًا. (استخدم مسمار صغير ومطرقة).

٢ ضع كمية من زيت المحرك الجديد في كأس زجاجية أُحْكِم إغلاقها، ثم ضع الكأس الزجاجية تحت أشعة الشمس عدة أيام، ثم ضع كمية من هذا الزيت في إحدى العلب المثقوبة، وضع كمية مماثلة لها من الزيت الجديد بدرجة حرارة الغرفة، في العلبة الثانية، وضعها جميعًا في حوض كبير.

٣ قِس الزمن اللازم لإفراغ الزيت من كل من العلبتين.

٤ تخلص من مخلفات النشاط بطريقة لا تسبب تلوثًا للبيئة.

- ما أثر درجة الحرارة في لزوجة زيت المحرك؟

■ **مناقشة:** تناقش المجموعات إجابات الأسئلة الآتية:

- هل كانت سرعة الكرة الزجاجية المتحركة في عينتي الزيت (الجديد والقديم) متساوية؟
- أيهما أكثر لزوجة، زيت المحرك القديم أم الجديد؟.
- هل توجد علاقة بين لزوجة زيت المحرك والحرارة التي يتعرض لها عند حركة السيارة؟
- ماذا تتوقع أن يحدث للمحرك في حال استخدامه من غير تبديل الزيت؟

■ **النتائج:** مستفيدًا من نتائج النشاط الذي أجريته، والمعلومات التي حصلت عليها من فني السيارات ومواقع الإنترنت، قدم تقريرًا، تبين فيه:

- فوائد زيت المحرك للمحركات عامّة.
- مواصفات زيت المحرك الجيد.
- أضرار عدم استبدال الزيت المستخدم مدة طويلة.
- استبدال زيوت المحرك القديمة من غير إلحاق الأذى بالبيئة.

١ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي :

١ من خصائص المائع المثالي أنه:

أ انضغاطي ب عالي اللزوجة ج تكثر فيه الدوامات د منتظم الجريان.

٢ وحدة قياس معدل التدفق الحجمي هي:

أ م^{٢}.ث. ب م^{٢}/ ث. ج م^{٣}/ ث. د م^{٣} . ث.

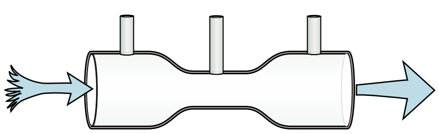
٣ عند وجود اختناق في أنبوب جريان أفقي، كما في الشكل (٧-٢٥)، فإن:

أ الضغط عند الاختناق أقل منه عند باقي الأنبوب.

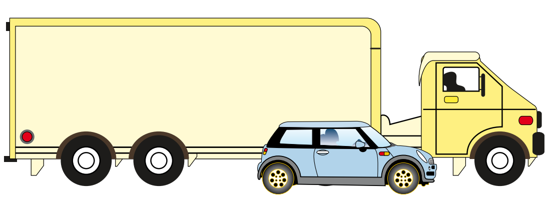
ب الضغط عند الاختناق مساوٍ للضغط عند باقي الأنبوب.

ج سرعة الجريان عند الاختناق أقل منها عند باقي الأنبوب.

د سرعة الجريان عند الاختناق مساوية لها عند باقي الأنبوب.


الشكل (٧-٢٥): أنبوب جريان أفقي.

٤ يمكن تفسير انجذاب سيارة صغيرة نحو شاحنة كبيرة عند محاولة تجاوزها على الطريق، كما في الشكل (٧-٢٦)، استنادًا إلى:


الشكل (٧-٢٦): السؤال الأول الفرع (٤).

أ ازدياد القوة بينهما عن خارجهما. ب نقصان الضغط بينهما عن خارجهما.

ج زيادة الضغط بينهما عن خارجهما. د نقصان سرعة الهواء بينهما عن خارجهما.

٥ رفع درجة حرارة الغازات يعمل على زيادة اللزوجة بسبب:

أ زيادة قوى التماسك بين الجزيئات. ب زيادة عدد التصادمات بين الجزيئات.

ج نقصان المسافة بين الجزيئات. د نقص عدد التصادمات بين الجزيئات.

٦ من وحدات قياس معامل اللزوجة:

أ نيوتن/ (م^{٢}.ث). ب (نيوتن.ث)/ م. ج (نيوتن.م^{٢})/ ث. د (نيوتن.ث)/ م^{٢}.

٧ نستنتج من قانون ستوكس أنّ قوة اللزوجة المؤثرة في كرة تسقط في مائع تتناسب:

أ طرديًّا مع قطر الكرة، ومعامل اللزوجة، والسرعة الحدية.

ب طرديًّا مع قطر الكرة، ومعامل اللزوجة، وعكسيًّا مع السرعة الحدية.

ج طرديًّا مع قطر الكرة والسرعة الحدية، وعكسيًّا مع معامل اللزوجة.

د عكسيًّا مع قطر الكرة، ومعامل اللزوجة، والسرعة الحدية.

٢ وضح المقصود بكل مما يأتي: المائع المثالي، الجريان المنتظم، اللزوجة، قوة الرفع.

٣ إذا كان متوسط مساحة مقطع الشريان الأورطي في الإنسان البالغ يساوي (٦,٥ مم^{٢})، وسرعة تدفق الدم فيه (١٠ سم/ث)، فاحسب:

أ معدل تدفق الدم من الشريان.

ب إذا تفرع هذا الشريان إلى ٥٠ شعيرة، مساحة كل منها ٠,٠١ سم^{٢}، فكم تبلغ سرعة الدم في الشعيرة الواحدة؟

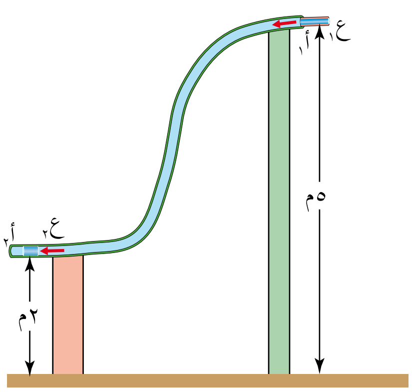
٤ فسر علميًّا ما يأتي:

أ يساعد الشكل الانسيابي لجناح الطائرة، على رفعها حينما تتحرك بسرعة مناسبة على مدرج المطار.

ب يُخشى من سقوط الشخص الذي يقف بالقرب من خط سكة الحديد حينما يمر قطار بسرعة كبيرة أمامه.

ج يكون تصريف الغازات الناجمة عن احتراق الوقود في مدفأة البواري المنزلية أفضل في الأيام التي تهب فيها الرياح.

٥ خرطوم مياه، مساحة مقطعه غير منتظمة، كما في الشكل (٧–٢٧)، إذا كانت مساحة مقطع طرفه الأول ٠,١ م^{٢}، ويرتفع ٥م عن سطح الأرض، ومساحة مقطع طرفه الثاني ٠,٢ م^{٢}، ويرتفع ٢م عن سطح الأرض، وكانت سرعة المياه عند طرفه الأول ١م/ث، وضغطه ٢,٥ × ١٠^{٥} باسكال، فاحسب سرعة الماء وضغطه عند الطرف الثاني للخرطوم.



الشكل (٧–٢٧): السؤال الخامس.

٦ ينزلق لوحان أفقيّان فوق بعضهما، ويحصران بينهما طبقة من سائل سمكها ٠,٤ سم ولزوجته ٠,٩٩ باسكال .ث، إذا علمت أن مساحة اللوح العلوي ٥٠ سم^{٢}، فاحسب القوة الأفقية اللازمة لتحريكه بسرعة حدية (ثابتة) مقدارها ٢ سم/ث بالنسبة إلى اللوح السفلي .

٧ استخدم طالب طريقة ستوكس لإيجاد معامل اللزوجة لأحد أنواع الزيوت، فأسقط كرة فلزية نصف قطرها ٢مم في زيت كثافته ٠,٩٤ غ/سم^{٣} ، وراقب الكرة حتى أصبحت سرعتها ثابته تقريبًا، ثمَّ قاس المسافة التي تقطعها الكرة في ٥ ثوان ، فكانت ٢٠سم، احسب معامل لزوجة الزيت، علمًا بأن كثافة الكرة الفلزية (٧,٨ غ/ سم^{٣}).

٨ استُخْدِمَ مقياس فينتوري لحساب معدل تدفق زيت كثافته ٨٠٠كغ/م^{٣} في أنبوب نقل، فإذا كانت مساحة مقطع مدخل الأنبوب (٠,٤ سم^{٢})، ومساحة المقطع الضيق(٠,١ سم^{٢})، وفرق الضغط بين المقطعين ٣٠٠٠ باسكال، فاحسب:

أ سرعة تدفق الزيت عند دخوله مقياس فينتوري.

ب معدل تدفق الزيت في أنبوب النقل.

٩ طائرة ركاب صغيرة، تطير بشكل أفقي وبسرعة ثابتة، إذا كانت سرعة الهواء فوق جناح الطائرة ٤٠م/ث، وسرعته تحت الجناح ١٠م/ث، وكانت مساحة الجناح الواحد ٤٠م^{٢}، وث$_{\text{هواء}}$ = ١,٣كغ/م^{٣}، فاحسب قوة الرفع على الطائرة.

١٠ مسدس مائي يتكون من مكبس أسطواني نصف قطره الداخلي ١سم، يدفع الماء عبر أنبوب ليخرج من فتحة ضيقة نصف قطرها ١ملم، تقع الفتحة في مستوى يرتفع رأسيًّا عن المكبس ٣سم، كما في الشكل (٧-٢٨). إذا أطلق الماء أفقيًّا من المسدس من نقطة ترتفع عن الأرض ٠,٨ م، فوصل مسافة أفقية ٤ م، على فرض أن الضغط الجوي ١×١٠^{٥} باسكال، وبإهمال قوى الاحتكاك، فجد ما يأتي:


الشكل (٧-٢٨): مسدس الماء.

أ الزمن اللازم حتى يصل الماء إلى الأرض.

ب السرعة الأفقية التي يغادر بها الماء فتحة المسدس.

جـ السرعة التي يتحرك بها المكبس.

د مقدار الضغط عند الفوهة.

هـ مقدار ضغط المكبس.

و متوسط القوة التي يؤثر بها الزناد في المكبس.

الفصل الثامن

الحركة التذبذبية
Oscillatory Motion

في هذا الفصل

(٨–١): الحركة التوافقية البسيطة.

(٨–٢): البندول البسيط.

الأهمية

إن حركة الأرجوحة، وحركة الكواكب حول الشمس، وكذلك حركة القمر حول الأرض، وحتى حركة جزيئات المادة الصلبة التي لا نراها، جميعها تعد أشكالاً للحركة الدورية. وداخل أجسامنا توجد أشكال للحركة الدورية كالتنفس والنبض.

بندول فوكو Foucault Pendulum ، اخترع هذا البندول في تجربة لإثبات دوران الأرض، وسمي على اسم الفيزيائي الفرنسي ليون فوكو، حيث علق فوكو قذيفة مدفع كتلتها ٢٨ كغ في سلك طوله ٦٧ مترًا وثبت في أسفل الثقل قلمًا ليرسم مسار البندول على طبقة من الرمل تحت الثقل، وعندما أطلق البندول تحرك بحيث كان المستوى الذي يتذبذب فيه البندول غير ثابت، بل يدور مع عقارب الساعة، الأمر الذى يشير إلى دوران الأرض تحت البندول .

ابحث

- عن العوامل التي يعتمد عليها الزمن اللازم لكي يصنع المستوى الذي يتذبذب فيه البندول دورة كاملة، وعن العوامل التي يعتمد عليها اتجاه الدوران.

الأشياء تهتز من حولنا

درست في الفصول السابقة نمطين من أنماط حركة الأجسام هما الحركة الانتقالية والحركة الدائرية، وستدرس في هذا الفصل الحركة التذبذبية (الاهتزازية)، فما خصائص هذه الحركة؟ وما المعادلات التي تحكمها؟ وكيف استطاع الإنسان توظيف معرفته بهذه الحركة توظيفًا إيجابيًّا؟ هذه الأسئلة ستتمكن من الإجابة عنها، بعد دراستك هذا الفصل.

بعد دراستك هذا الفصل يتوقع منك أن:

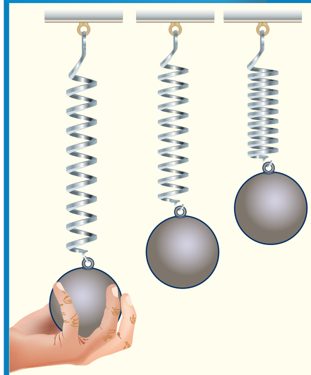
- توضح المقصود بالحركة التذبذبية، والمفاهيم المرتبطة بخصائص هذه الحركة.
- توضح خصائص الحركة التوافقية البسيطة.
- توضح العلاقة بين القوة المعيدة والإزاحة في الحركة التوافقية البسيطة.
- تحلل أشكال بيانية للحركات التوافقية البسيطة وتمثلها.
- تستنتج العلاقة بين الزمن الدوري لحركة البندول، وطول البندول.
- تطبق العلاقات للحركة التوافقية البسيطة في حل مسائل حسابية.
- تجري أنشطة عملية لدراسة مفاهيم الحركة التوافقية البسيطة؛ كالقوة المعيدة، واتساع الاهتزازة، والزمن الدوري باستخدام النابض أو البندول.

٨–١ الحركة التوافقية البسيطة

Simple Harmonic Motion

نشاط تمهيدي

• علّق كتلة بنابض واتركها حتى تستقر، ثم اسحبها من موضع سكونها نحو الأسفل، ثم اتركها وراقب حركتها، كما في الشكل (٨–١).



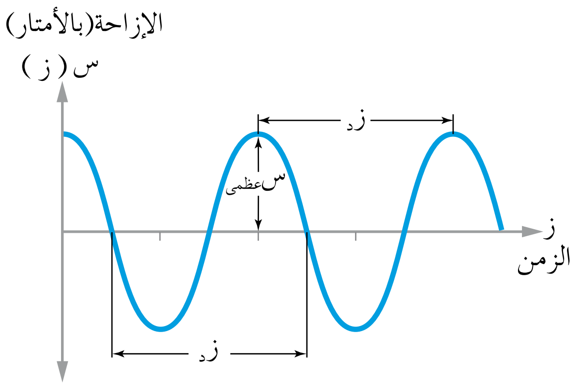
الشكل (٨–١): حركة كتلة معلقة بنابض.

درست سابقًا أن الحركة التي تكرر نفسها تسمى الحركة الدورية، فلعلك لاحظت من النشاط التمهيدي أن الكتلة المعلقة بالنابض تكرر حركتها على المسار نفسه ذهابًا وإيابًا في فترات زمنية متساوية بحيث تتوافق كل حركة لاحقة مع تلك السابقة، **وتحدث هذه الحركة بفعل القوة المعيدة في النابض**، فتعيد الكتلة إلى موضع اتزانها، تسمى هذه الحركة (**الحركة التوافقية البسيطة**) **وهي تصف أية حركة دورية ناتجة عن قوة معيدة تتناسب طرديًّا مع الإزاحة**، وتحسب القوة المعيدة من قانون هوك الذي يعبّر عنه بالعلاقة الرياضية:

$ق_{معيدة} = -أ \Delta س$ .... (٨–١)

حيث Δس هي الإزاحة عن موضع الاتزان، أ ثابت القوة أو ثابت المرونة.

ويمكن تمثيل تغير الإزاحة بالنسبة إلى الزمن في هذه الحركة في الشكل (٨–٢)، وتسمى أقصى إزاحة عن موضع الاتزان يصل إليها الجسم حيث يسكن عندها لحظيًّا **سعة الاهتزازة**، ويرمز لها بالرمز $س_{عظمى}$، والزمن الذي يستغرقه الجسم حتى يكمل دورة (اهتزازة) واحدة يسمى **الزمن الدوري**، ويرمز له بالرمز $ز_{د}$.



الشكل(٨–٢) : تمثيل حركة كتلة مربوطة بنابض بيانيًّا (الحركة التوافقية البسيطة).

وتكون الحركة **توافقية بسيطة** إذا حافظ النظام على طاقته الميكانيكية، فالطاقة الميكانيكية للنظام التوافقي البسيط كمية ثابتة مع مرور الزمن أي أن: $\Delta ط_{ح} + \Delta ط_{و} =$ صفرًا

وعليه فإن سعة الاهتزازة ثابتة مع الزمن؛ لذا فإن جميع الحركات الاهتزازية التي تفتقر لهذا الشرط هي غير بسيطة. تُحسب إزاحة الجسم المتحرك حركة توافقية بسيطة عند أي نقطة بالعلاقة:

$$س(ز) = س_{عظمى} \text{ جتا } (\omega \text{ ز} + \phi) \quad \text{.......} (٨-٢)$$

نلاحظ من المعادلة (٨-٢) أن الحركة التوافقية البسيطة تمثل باقتران جيبي يعتمد على الزمن.

ولفهم المعنى الفيزيائي للقيم في المعادلة (٨-٢) نفترض أن جسمًا يتحرك حركة دائرية منتظمة على محيط دائرة، ويقطعُ متجهُ موقِعهِ زاويةً مقدارها θ ، في زمن ز، **فإنّ سرعته الزاوية** ω (Angular Velocity) تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\omega = \frac{\theta}{ز} \quad \text{.......} (٨-٣)$$

حيث تقاس الزاوية θ بوحدة راديان، والسرعة الزاوية ω بوحدة راديان/ث، وتُسمى الزاوية ϕ، **ثابت الطور**، وهي الزاوية التي تبدأ عندها الحركة، وتُسمى الزاوية $(\theta + \phi)$ **زاوية الطور**، وهي الزاوية التي تحدد موقع الجسم عند أية لحظة زمنية على محيط الدائرة.

وإذا زدنا الزمن في المعادلة (٨-٢) بمقدار $٢\pi/\omega$ فإن الاقتران يصبح كما يأتي:

$$س = س_{عظمى} \text{ جتا } \{\omega\,(ز + ٢\pi/\omega) + \phi\}$$

$$= س_{عظمى} \text{ جتا } (\omega \text{ ز} + ٢\pi + \phi)$$

وباستخدام المتطابقة الرياضية: جتا ص = جتا $(٢\pi + ص)$ (تحقق من هذه المتطابقة)، فإن:

$$س = س_{عظمى} \text{ جتا}(\omega \text{ ز} + \phi)$$

تلاحظ أن الاقتران يكرر نفسه بعد زمن $٢\pi/\omega$ أي أن $٢\pi/\omega$ هو الزمن الدوري $ز_د$

$$ز_د = \frac{٢\pi}{\omega} \quad \text{.......} (٨-٤)$$

ويعرف **التردد** (Frequency) بأنه عدد الاهتزازات في الثانية الواحدة؛ أي أن:

$$\text{التردد، } (ت_د) = \frac{\text{عدد الاهتزازات التي ينجزها الجسم}}{\text{الزمن اللازم}}$$ ، ويقاس التردد بوحدة اهتزازة/ث

وتسمى هيرتز؛ أي أن التردد

$$ت_د = \frac{١}{ز_{دوري}} \quad \text{.......} (٨-٥)$$

ومن تعريف الزمن الدوري (Periodic Time) نتوصل إلى التردد الذي يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$ت_د = \frac{\omega}{٢\pi} \quad \text{.......} (٨-٦)$$

وعند حل معادلة الحركة لكتلة ك معلقة بطرف نابض، وتتحرك حركة توافقية بسيطة، وُجد أنّ

الزمن الدوري لتلك الكتلة يعطى بالعلاقة الآتية:

$$ز_د = ٢\pi \left(\frac{ك}{أ}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{.......................} \quad (٨-٧)$$

والتردد بالعلاقة:

$$ت_د = \frac{١}{٢\pi} \left(\frac{أ}{ك}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{.......................} \quad (٨-٨)$$

مثال (٨-١)

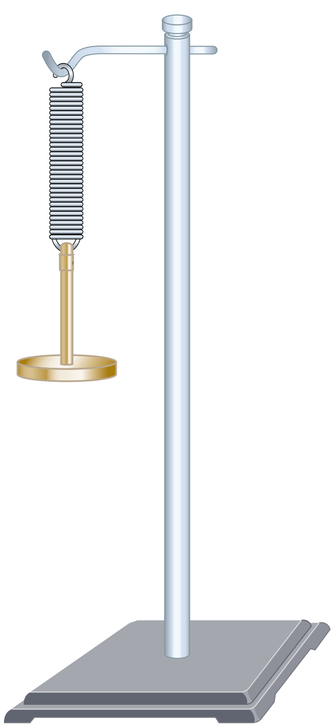
عُلّق جسم كتلته ك رأسيًّا بنابض كما في الشكل (٨-٣) ثابت مرونته ٦٢ نيوتن/ م، وبعد أن استقر الجسم سُحب إلى أسفل مسافة صغيرة، ثم تُرك يتحرك حركة توافقية بسيطة، فكان تردد الحركة ٢,٥ هيرتز، احسب:

١ الزمن الدوري للحركة.

٢ كتلة الجسم المهتز.

٣ مقدار القوة المعيدة في النابض عند موضع الاتزان الجديد.

٤ مقدار قوة النابض المؤثرة في الجسم عند موضع الاتزان الجديد.



الشكل (٨-٣): مثال (٨-١).

الحلّ:

١ $ز_{دوري} = \frac{١}{ت_د} = \frac{١}{٢,٥} = ٠,٤$ ث

٢ $ز_{دوري} = ٢\pi \left(\frac{ك}{أ}\right)^{\frac{1}{2}}$

$٠,٤ = ٢ \times ٣,١٤ \times \left(\frac{ك}{٦٢}\right)^{\frac{1}{2}}$ ، ك = ٠,٢٥ كغ

٣ (ق$_{معيدة}$) عند موضع الاتزان = صفر لأن

Δس = صفر

٤ عند موضع الاتزان $\sum$ ق = ق − و = صفر ← ق = و

ق = ك جـ

= ٠,٢٥ × ٩,٨ = ٢,٤٥ نيوتن، (اتجاهها نحو الأعلى).

مثال (٨-٢)

يتحرك جسم حركة توافقية بسيطة، تُعطى إزاحته بالعلاقة:

$$س(ز) = ٠,١٥ \ جتا \left(\frac{\pi}{٢} ز + \frac{\pi}{٦}\right)$$

حيث س بوحدة المتر. جد ما يأتي:

١ سعة الذبذبة، وثابت الطور.

٢ تردد الحركة.

٣ الزمن الدوري.

٤ زاوية الطور بعد مرور ثانيتين على بدء الحركة.

٥ إزاحة الجسم بعد مرور ٤ ث من بدء الحركة.

الحلّ:

تُعوَّض π = ٣,١٤ عند حساب التردد والزمن الدوري، بينما تُعوض $\pi = ١٨٠°$ عند حساب الزوايا.

بالمقارنة بالمعادلة (٨-٢) نستخرج من المعادلة القيم الآتية:

$(س_{عظمى} = ٠,١٥م)$، $(\omega = \frac{\pi}{٢}) = (\phi = \frac{\pi}{٦})$.

١ سعة الذبذبة = ٠,١٥ م، ثابت الطور $\phi = \frac{\pi}{٦} = ٣٠°$.

٢ التردد= $\frac{\omega}{٢\pi}$ = ٠,٢٥ هيرتز.

٣ $ز_{الدوري} = \frac{١}{التردد}$ = ٤ ثانية.

٤ زاوية الطور بعد مرور ٢ ث = $\frac{\pi}{٢} \times ٢ + \frac{\pi}{٦} = \frac{٧\pi}{٦} = ٢١٠°$.

٥ س (ز=٤ ث) = ٠,١٥ جتا $\left(\frac{\pi}{٢} \times ٤ + \frac{\pi}{٦}\right)$

س (ز=٤ ث) = ٠,١٣ م.

توسع

كثير من الأجهزة والآلات التي نستخدمها في حياتنا العملية تُظهر علاقة بين الحركة التوافقية البسيطة والحركة الدورانية، حيث يصمّم نظام يحوّل الحركة التوافقية البسيطة إلى حركة دورانية منتظمة تعمل على تحريك جسم حول محور. وعلى سبيل المثال، تتحول حركة المكابس في محرك السيارة من اهتزازية إلى حركة دورانية لعجلات السيارة، ويحدث مثل ذلك في القاطرة البخارية، وفي آلة الخياطة المعتمدة على حركة القدم. انظر الشكل (٨-٤). فهل ثمّة علاقة بين الحركتين؛ التوافقية البسيطة والدورانية؟

الشكل (٨-٤): آلات تَحَوُّل الحركة التوافقية البسيطة إلى حركة دورانية.

مراجعة (٨-١)

١ اذكر أمثلة على أجسام تتحرك حركة اهتزازية.

٢ اذكر الشروط الواجب توافرها لتكون حركة الجسم توافقية بسيطة.

٣ ما المقصود بكل من: الزمن الدوري، التردد، ثابت الطور، زاوية الطور؟

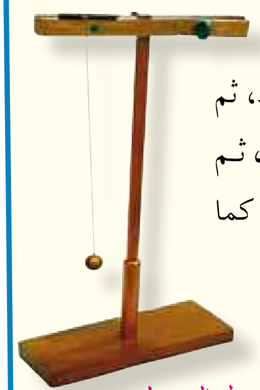
٤ ما العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري لجسم معلق بنابض يتحرك حركة توافقية بسيطة؟

٥ اكتب علاقة تغير الإزاحة مع الزمن للحركة التوافقية البسيطة، ووضح دلالة الرموز فيها.

٦ مثل بيانيًّا العلاقة بين المركبة الأفقية لإزاحة الجسم المتحرك على محيط مسار دائري مع الزاوية التي يمسحها متجه الموقع، عندما تكون ϕ = ٠.

- فكر: ماذا تتوقع أن يحدث للمنحنى الذي حصلت عليه في السؤال السابق، لو أثرت في النظام قوة خارجية معيقة للحركة (مثل قوة الاحتكاك). ارسم منحنى تقريبيًّا لتغيرات الإزاحة مع الزمن لمثل هذه الحالة.
- تدور الأرض حول الشمس في فترات زمنية متساوية، هل يمكن وصف حركة الأرض حول الشمس بأنها حركة توافقية بسيطة؟ لماذا؟

نشاط تمهيدي



- اربط كرة فلزية بخيط، ثم علقها بحامل رأسي، ثم حركها حركة تذبذبية كما في الشكل (٨-٥).

الشكل (٨-٥): البندول البسيط.

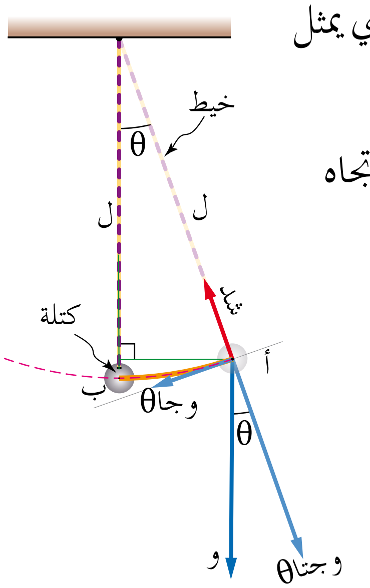
فكرة

رقّاص الساعة الشكل (٨-٦) هو بندول يتحرك حركة توافقية بسيطة، وظيفته ضبط دقّة الساعة. يضبط بحيث يصل موقع اتزانه مرّة كل ثانية وتُضبط الساعة بتغيير طول ذراع البندول.

الشكل (٨-٦): فكرة.

لقد تبين لك أن حركة الكتلة المتصلة بنابض هي حركة توافقية بسيطة، فهل يوجد نموذج آخر لحركة اهتزازية يمكن وصفها بأنها حركة توافقية بسيطة؟.

يبين الشكل (٨-٥) البندول البسيط، وهو كتلة معلقة رأسيًا بخيط، وعند سحب الكتلة جانبًا إزاحة صغيرة جدًّا، ثم إفلاتها تأخذ بالاهتزاز ذهابًا وإيابًا حول موضع اتزانها. هل يمكن وصف حركة البندول هذه بأنّها حركة توافقية بسيطة؟ للإجابة عن هذا السؤال، لا بدّ من التحقق من وجود قوة معيدة تتناسب طرديًا مع الإزاحة، وللتحقق من ذلك، تأمل الشكل (٨-٧) الذي يمثل مخطط الجسم الحرّ للبندول عندما تكون الكرة مزاحة نحو اليمين.



الشكل (٨-٧) مخطط الجسم الحر للبندول البسيط.

برسم محورين أحدهما مماس للحركة، والثاني عمودي عليها باتجاه الخيط، ثم تحليل القوى المؤثرة في الكرة، نجد أن:

$\sum$ ق$_{\perp}$ = شد − و جتاθ = صفر

حيث لا توجد حركة للكتلة على المحور العمودي (باتجاه الخيط).

$\sum$ ق$_{//}$ = − و جا θ، وهي القوة المعيدة للكرة من الموقع أ إلى موضع الاتزان ب باتجاه المماس.

ق$_{\text{معيدة}}$ = −و جا θ، فإذا كانت θ صغيرة ومقيسه بوحدة **راديان**، فإن:

جا θ $\cong$ θ (تأكد من صحة العلاقة باستخدام الآلة الحاسبة)

وبما أن θ = $\frac{\text{طول القوس}}{\text{ل}}$ ، وطول القوس يساوي تقريبًا الإزاحة الأفقية س عن موضع الاتزان.

إذن $\theta \cong \frac{س}{ل} =$ جا θ

$$ق_{معيدة} = -\frac{(ك\ جـ\ س)}{ل}$$

$$ق_{معيدة} = -\frac{(ك\ جـ)}{ل}\ س \quad .... (٨-٩)$$

وبما أنّ: ك، ل، جـ جميعها ثوابت؛ فإنّ **القوة المعيدة تتناسب طرديًا مع مقدار الإزاحة س، ومن هنا نجد أن شرط الحركة التوافقية البسيطة قد تحقق في حركة البندول عند زوايا الاهتزاز الصغيرة.**

ولإيجاد الزمن الدوري لهذه الحركة، نقارن القوة المعيدة في البندول مع القوة المعيدة في نظام (كتلة–نابض) كما يأتي:

$$ق_{معيدة} = -أ\ س \qquad ق_{معيدة} = -\left(\frac{ك\ جـ}{ل}\right) س$$

فنجد أن المقدار الثابت ($\frac{ك\ جـ}{ل}$) في حركة البندول يقابل ثابت المرونة (أ) في حالة النابض.

وباستخدام العلاقة (٨–٧)، فإن الزمن الدوري للبندول البسيط يكون:

$$ز_{الدوري} \text{ للبندول البسيط} = ٢\pi \left(\frac{ك}{ك\ جـ/ل}\right)^{\frac{١}{٢}}$$

$$ز_{الدوري} \text{ للبندول البسيط} = ٢\pi \left(\frac{ل}{جـ}\right)^{\frac{١}{٢}} \quad .... (٨-١٠)$$

سؤال

ما العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري للبندول؟

نشاط (٨-١) حساب تسارع السقوط الحر

هدف النشاط: استخدام البندول البسيط لحساب تسارع السقوط الحر.

الأدوات: خيط متين، حامل للتعليق، كرات فلزية مختلفة الكتل، ساعة توقيت.

الإجراءات:

١ خذ جزءًا من الخيط لا يقل طوله عن ١م، واربط به كرة فلزية، ثم علقها على الحامل.

٢ اسحب الكرة جانبًا مسافة أفقية (٥سم) واتركها تهتز.

٣ باستخدام ساعة التوقيت يقيس اثنين من أفراد المجموعة الزمن اللازم للكرة حتى تكمل ١٠ اهتزازات.

٤ كرر الخطوة السابقة ثلاث مرات، وسجل الزمن كل مرة في الجدول (٨–١)، ثم جد قيمة متوسط الزمن اللازم لإتمام ١٠ اهتزازات، وزمن الاهتزازة الواحدة (الزمن الدوري)، ثم احسب مربع الزمن الدوري، ودَوّن ذلك كله في الجدول.

٥ غير طول الخيط مرات عدة كما في الجدول (٨–١)، وكرر الخطوات السابقة.

الجدول (٨–١): حساب تسارع السقوط الحر

طول الخيط ل(متر)	$ز_١$ (ث)	$ز_٢$ (ث)	$ز_٣$ (ث)	متوسط الزمن $\bar{ز}$ (ث) لعشرة اهتزازات	متوسط الزمن الدوري $\bar{ز}_{الدوري}$ (ث)	$\bar{ز}^{٢}_{الدوري}$
١,٥						
١,٢						
٠,٩						
٠,٦						

٦ ارسم العلاقة البيانية بين $ز^{٢}_{الدوري}$ على المحور الرأسي، ل على المحور الأفقي، ثم جد الميل.

٧ استخدم العلاقة: $ز^{٢}_{الدوري للبندول} = ٤\pi^{٢} (\frac{ل}{جـ})$ وميل الخط البياني لحساب قيمة جـ.

مثال (٨–٣)

اقترح العالم Christian Huygens (١٦٢٩–١٦٩٥)، وحدة معيارية لقياس الطول تعتمد على فكرة البندول البسيط، وهي طول البندول الذي له زمن دوري (١ ث)، ما مقدار هذه الوحدة بالمتر؟

الحلّ:

$$ز_{الدوري} للبندول = ٢\pi (\frac{ل}{جـ})^{\frac{١}{٢}}$$

$$١ = ٢ \times ٣,١٤ (\frac{ل}{٩,٨})^{\frac{١}{٢}}$$

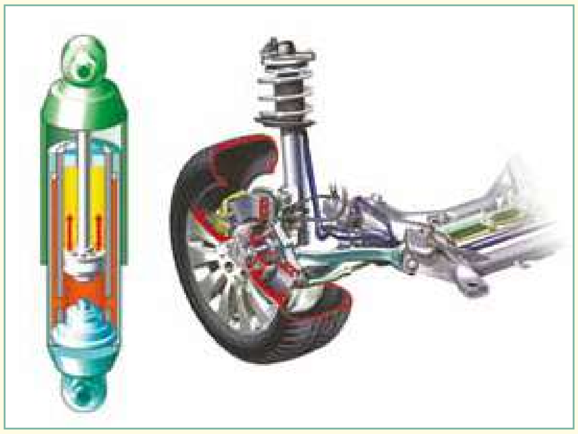
ل = ٠,٢٤٨م ، أي أن هذه الوحدة المقترحة تعادل ربع متر تقريبًا.

توسع

تؤثر قوة الاحتكاك في الأنظمة الميكانيكية المهتزة جميعها، فتعمل على إنقاص الطاقة الميكانيكية في النظام مع مرور الوقت؛ ما يؤدي إلى خمود الحركة الاهتزازية، وتناقص تدريجي في سعة الاهتزازة، وتسمى الاهتزازات في هذه الحالة اهتزازات متخامدة.

يعدّ نظام ماص الصدمات Shock Absorber في المركبات من أفضل الأمثلة على الاهتزازات المتخامدة؛ إذ ترتبط العجلة مع السيارة عن طريق نابض حلزوني قوي، بداخله ماص الصدمات، وعند مرور العجلة فوق مطبات الطريق، فإن السيارة تتذبذب للأعلى والأسفل بفضل النابض، فيعمل ماص الصدمات على تقليص سعة الاهتزازت إلى الصفر، وتعود السيارة إلى حركتها الطبيعية.

يتكون ماص الصدمات الهيدروليكي من أسطوانة صلبة ومكبس يتحرك داخلها، والأسطوانة مملوءة بالزيت، ينتقل الزيت على طرفي المكبس فيشكل انتقاله قوة معيقة تعمل على إخماد الاهتزازات. انظر الشكل (٨-٨). ما أثر لزوجة الزيت المستخدم في اخماد الاهتزازات.



الشكل (٨-٨): ماص الصدمات.

مراجعة (٨-٢)

١ ما المقصود بكل من: الزمن الدوري، التردد للبندول؟

٢ ما العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري لجسم معلق بخيط ويتحرك حركة توافقية بسيطة؟

٣ فسر لماذا لا يمكن وصف البندول بأنه يتحرك حركة توافقية بسيطة عندما تكون إزاحته كبيرة نسبة إلى طوله، أي في حال الزوايا الكبيرة.

٤ فكر: افترض أنك رائد فضاء، وقمت بإجراء نشاط البندول (٨-١) على سطح القمر، كيف ستتغير نتائج التجربة؟ ماذا سيحدث للزمن الدوري للبندول؟ وكيف تستفيد من هذا النشاط في حساب تسارع السقوط الحر على سطح القمر؟

المشروع الثامن: تمثيل حركة جسم معلق بنابض

فكرة المشروع

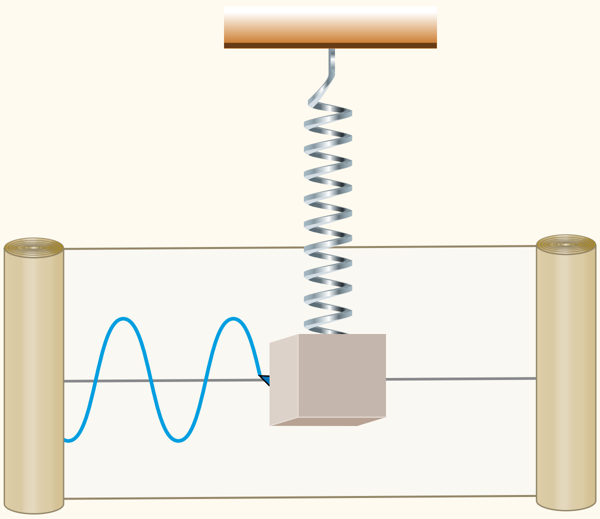
- دراسة تغير الإزاحة التي تحققها الكتلة المعلقة بنابض عن موضع السكون.

الأدوات

نابض، لفة ورق، قلم رصاص، كتل مناسبة، لاصق ورقي.

الإجراءات:

1. علق النابض على حامل كما في الشكل (٨-٩).
2. ثبت قلم رصاص قصير على الكتلة المستخدمة بواسطة لاصق ورقي.
3. ثبت اللفة الورقية بشكل رأسي خلف النابض كما في الشكل (٨-٩)
4. علق الكتلة (٥كغ) في النابض، واتركها لتهتز بشكل رأسي، بحيث يمكن للقلم رسم شكل الحركة على الشريط الورقي.
5. اسحب الشريط الورقي بسرعة ثابتة.
6. غير الكتلة المستخدمة، وغير الشريط الورقي، وكرر الخطوات السابقة.
7. استخدم الشكل الناتج في الشريط الورقي الناتج من الخطوتين(٤ و٥).



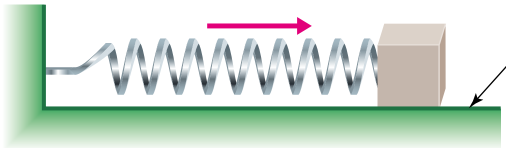
الشكل (٨-٩): تمثيل حركة جسم معلق بنابض.

مناقشة النتائج:

- ما أقصى إزاحة تحققها كل من الكتلتين عند موضع اتزانها؟
- حدد على الشكل النقطة التي تكون الكتلة عندها قد أنهت دورة كاملة (من نقطة أقصى إزاحة وإليها).
- علام تعتمد أقصى إزاحة للكتلة المعلقة بالنابض؟

١ اختر الإجابة الصحيحة في كلٍّ مما يأتي:

أجب عن الفقرات (١–٢) بالاعتماد على الشكل (٨–١٠).



الشكل (٨–١٠): كتلة تهتز توافقيًا مثبتة بنابض.

١ أي من المقادير الآتية لا يؤثر في الزمن الدوري لنظام (الكتلة–النابض):

أ مقدار الكتلة.
ب ثابت مرونة النابض.
جـ اتساع الذبذبة.
د قساوة النابض.

٢ إذا ضُغط النابض نحو اليسار باستخدام كتلة ٢ كغ، وكان ثابت مرونة النابض (٢) نيوتن.م، فإن الزمن الدوري للحركة الاهتزازية الناتجة، يساوي تقريبًا:

أ ٢ ث
ب ٠,١ ث
جـ ٢٠ ث
د ٦,٢٨ ث

أجب عن الفقرات (٣–٥) بالاعتماد على الشكل(٨–٧)، الذي يمثل بندولاً بسيطًا.

٣ القوة المعيدة في البندول هي:

أ وزن الكرة.
ب مركبة الوزن: و جتا θ.
جـ الشد في الخيط.
د مركبة الوزن: و جا θ.

٤ إذا أتم البندول اثنتي عشرة اهتزازة في دقيقتين، فإن تردد حركته بوحدة هيرتز يساوي:

أ ٦
ب ١,٢
جـ ٠,١٢
د ٠,١

٥ إذا كان طول خيط البندول ٢م، فإن عدد الذبذبات التي يكملها البندول في ٥ دقائق هو:

أ ١٠٦
ب ٢٣٩
جـ ٣
د ٢١,٦

٢ رُبط جسم كتلته ١ كغ بطرف نابض مُعلق رأسيًّا ، وتُرك ليهتز، فإذا كانت إزاحة النظام بالنسبة إلى الزمن تُعطى بالعلاقة الآتية:

س = (٠,٢٥ م) جتا ($\frac{\pi}{٨}$ ز) ، فجد:

أ مقدار القوة المؤثرة في النابض عند موضع اتزانه.

ب سعة الاهتزازة.

جـ التردد والزمن الدوري للحركة.

د إزاحة النظام بعد مرور ثانية واحدة من بدء الحركة.

٣ يتحرك جسم حركة توافقية بسيطة بتردد ٢٠ هيرتز، إذا كانت أقصى إزاحة له تساوي ٠,١م، وثابت الطور يساوي π/٤. فأجب عمّا يأتي:

أ اكتب الاقتران الذي يصف حركة الجسم.

ب جد إزاحة الجسم بعد مرور ثانيتين من بداية حركته.

٤ بندول الثانية: هو بندول زمنه الدوري يساوي ثانيتين، فهو يعبُرُ موضع اتزانه مرة واحدة في الثانية، فإذا كان طول هذا البندول عند البحر الميت يساوي ٠,٩٩٤٧ م، وطوله في مدينة عجلون يساوي ٠,٩٩٤٢ م. فجد:

أ النسبة بين تسارع السقوط الحر في المكانين.

ب كم يلزم أن يكون طول هذا البندول على سطح كوكب المريخ، إذا علمت أن تسارع السقوط الحرّ على المريخ يساوي ٣,٧ م/ ث٢.

الفصل التاسع

الحركة الموجية

Wave Motion

في هذا الفصل

(٩–١): مميزات الحركة الموجية.

(٩–٢): بعض خصائص الموجات.

الأهمية

لدراسة الحركة الموجية أهمية بالغة في حياتنا اليومية، يوجد الكثير من الأجهزة والأدوات التي تستند في عملها إلى خصائص الموجات وسلوكها مثل: الرادار، والميكروويف، وأجهزة البث الإذاعي، وشبكات الاتصالات، والسونار، وغير ذلك الكثير.

تمتلك موجات البحر طاقة حركية هائلة في بعض الأحيان، وهذا ما يفسر لجوء العديد من دول العالم لاستغلال هذه الطاقة في تشغيل محطات توليد الطاقة الكهربائية، وتحلية مياه البحر، وغيرها من التطبيقات العملية والتكنولوجية.

فكّر

- كيف يمكن الاستفادة من الطاقة التي تحملها الموجات في البحار في توليد الكهرباء.

لقد درست في فصل الشغل والطاقة أن الشغل وسيلة لتحويل الطاقة من شكل إلى آخر، وسوف تدرس في هذا الفصل وسيلة أخرى لنقل الطاقة، هي الموجات. وتعد الموجات المنتشرة على سطح الماء من أبسط الموجات التي يمكن مشاهدتها أو تصورها، فعندما نُسْقط حجرًا صغيرًا في بركة ماء راكد تصدر موجة على شكل دائرة مركزها مكان سقوط الحجر على سطح الماء بحيث تبدأ بالاتساع مع الزمن، وتوجد أيضًا موجات الحبل التي تتولد عندما يهتز أحد طرفيه أو كليهما، وكذلك الموجات الصادرة عن الآلات الموسيقية، وموجات الزلازل، وموجات الضوء (الموجات الكهرمغناطيسية) وغيرها الكثير من الأمثلة في حياتنا، ففي جميع الحالات نجد مصدرًا للموجة، كالحجر الذي يسقط على سطح الماء أو يد الشخص الذي يهز حبلاً أو يضرب على وتر آلة موسيقية، وما إلى ذلك، فما الموجات؟ وكيف تنشأ؟ وكيف تعمل على نقل الطاقة؟ وما أهميتها في حياتنا؟

بعدَ دراستِكَ هذا الفصل، يُتوقّعُ منكَ أنْ:

- تفسر انتشار الموجات الميكانيكية في الأوساط المختلفة.
- توضح المقصود بخصائص الموجات مثل: الانعكاس والانكسار والحيود والتداخل.
- تشرح مع التمثيل بالرسم مبدأ التراكب الخطي للموجات.
- ترسم أنماط التداخل البناء والتداخل الهدام وتحللها.
- توضح المقصود بظاهرة دوبلر، وتطبيقاتها التكنولوجية.
- تجري تجارب عملية لتعرّف خصائص الموجات باستخدام كلّ من النابض وحوض الموجات.
- توظف خصائص الموجات الميكانيكية (التداخل والحيود) للتوصل إلى الطبيعة الموجية للضوء.
- توظف خصائص الموجات في تفسير ظواهر حياتية، وتطبيقات يومية.

٩–١ مميزات الحركة الموجية

Characteristics Of Waves Motion

نشاط تمهيدي

• انظر إلى الطائر في الشكل (٩–١) ولاحظ موجات الماء الناشئة عندما يحرك الطائر قدميه في البركة.

الشكل (٩–١): موجات الماء.

فكرة

يمكن توضيح مفهوم الانتشار الموجي عن طريق وضع قطع الدومينو على هيئة صف بحيث تكون المسافات بينها متساوية كما بالشكل (٩–٢). فعند دفع أول قطعة تنتقل الطاقة إلى القطعة الثانية ثم الثالثة وهكذا، ولكن لا تترك قطع الدومينو مواضعها بالصف.

الشكل (٩–٢): فكرة.

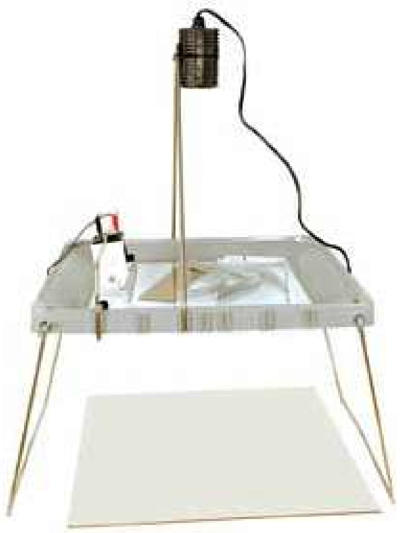
نسمع كثيرًا عن الموجات الصوتية، والموجات الزلزالية، وموجات التسونامي والميكرويف، فما الموجة؟ وكيف تنشأ؟ وكيف يحدث الانتشار الموجي؟ وما مميزات الموجات؟ لتعرف ذلك نفذ النشاط (٩–١).

نشاط (٩-١) تكوين موجات الماء باستخدام حوض الموجات

هدف النشاط: التوصل إلى مفهوم الموجة ومميزاتها.

الأدوات: حوض الموجات بكامل معداته، ماء، ورقة بيضاء.

خطوات تنفيذ النشاط:



الشكل (٩–٣): النشاط (٩–١).

١ ضع ورقة كبيرة أسفل الحوض.

٢ اسكب ماء في الحوض إلى ارتفاع (٢ سم) تقريبًا، كما في الشكل (٩–٣).

٣ علق الكرة بطرف المحرك على أن تلامس الماء، ثم أغلق الدارة الكهربائية للمحرك، ولاحظ الشكل المتكون.

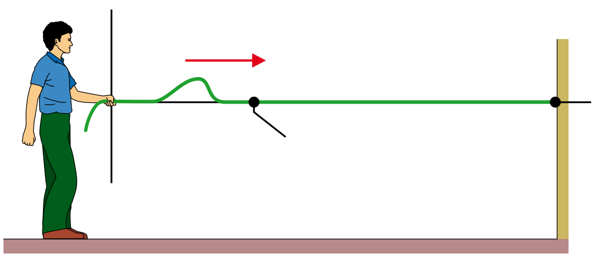
٤ ضع قطعة فلين صغيرة على سطح الماء، ولاحظ حركتها.

٥ خذ المسطرة، وحركها مرة واحدة في الماء حركة عمودية على سطحه في أحد جوانب الحوض، ولاحظ الشكل المتكون.

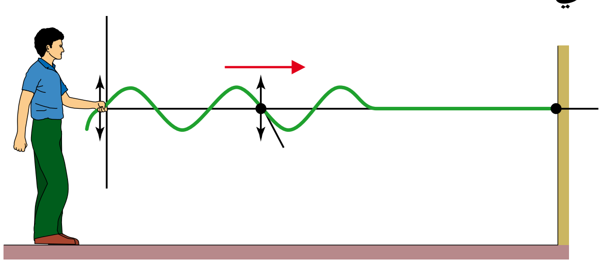
٦ كرر الخطوة السابقة بتحريك المسطرة باستمرار. ماذا تلاحظ؟

لاحظت من النشاط السابق أن الاضطراب أو الاهتزاز في سطح الماء يولد حركة تنتقل فيه، وتكرر هذه الحركة نفسها عند كل نقطة من نقاطه، وأن الذي يحدث نتيجة هذا الاضطراب هو نقل للطاقة الحركية عبر جزيئات الوسط، وليس نقل لجزيئات الوسط نفسه، وهذا ما يسمى بالموجة الميكانيكية، **فالموجة الميكانيكية اضطراب ينتشر في وسط معين يعمل على نقل الطاقة.**

ولعلك تسأل كيف تنتشر الموجات؟ وكيف يحدث الانتشار الموجي؟ لكي تتعرف ذلك انظر إلى الشكل (٩-٤/أ) الذي يوضح كيف تنشأ الموجات الميكانيكية في حبل، وكيف تنتقل خلاله. لاحظ أن جزيئات الحبل المرتبطة باليد تتأثر بقوة تدفعها نحو الأعلى، وهكذا ينتقل تأثير هذه القوة من جزء إلى جزء آخر يليه في الحبل، وفي هذه الأثناء تعود اليد إلى وضعها الأول فتبدأ الأجزاء القريبة بالعودة، وينتقل هذا التحرك إلى أسفل مرة أخرى من جزء إلى آخر عبر الحبل، وهكذا يكون كل جزء قد وصل ذروته إلى الأعلى. ولو كررنا هذه العملية في طرف الحبل كما في الشكل (٩-٤/ب)، أي لو كان لدينا مصدر يولد حركة اهتزازية، فإن ما نشاهده هو سلسلة مستمرة متلاحقة من الموجات تعرف بالانتشار الموجي.



الشكل (٩-٤/أ): إرسال موجة في الحبل.



الشكل (٩-٤/ب): إرسال موجات متتالية في الحبل.

الفيزياء والمجتمع: في صبيحة يوم ١١ تموز من سنة ١٩٢٧م ضرب زلزال كبير كلًّا من الأردن وفلسطين وسوريا ولبنان، حيث كان مركز الزلزال في غور الأردن في منطقة داميا على بعد ٢٥كم شرق نابلس التي كانت أكثر المدن تأثرًا بهذا الزلزال تليها مدينة السلط، ونتج عنه تدمير ٣٠٠ منزل في البلدة القديمة من نابلس، وعلى أثره سميت هذه السنة في تراثنا بسنة الهزة، والشكل (٩-٥) يظهر بعضًا من آثار الدمار التي تركها الزلزال.

الشكل (٩-٥): الدمار الناشئ عن زلزال ١٩٢٧.

فكر: في ضوء ما تعلمته عن الموجات والانتشار الموجي هل تستطيع أن تفسر كيف وقع الدمار في منطقة تبعد هذه المسافة الكبيرة عن مركز الزلزال؟

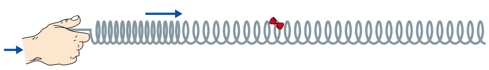
(٩-١-١) نوعا الموجات الميكانيكية

يمكن تقسيم الموجات الميكانيكية من حيث اتجاه اهتزاز جزيئات الوسط بالنسبة إلى اتجاه انتشار الموجة إلى نوعين: موجات طولية وموجات مستعرضة، ولكي تتعرّف هذين النوعين من الموجات نفذ النشاط الآتي:

نشاط (٩-٢) **نوعا الموجات الميكانيكية**

هدف النشاط: التمييز بين الموجات الطولية والموجات المستعرضة المتولدة في نابض.

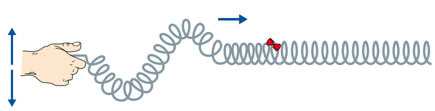
الأدوات: نابض طوله (٤ م) تقريبًا.



الشكل (٩-٦/ أ): الموجات الطولية في نابض.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ ثبّت أحد طرفي النابض بحاجز ثابت، ثم اجعله منبسطًا فوق أرض الغرفة، واربط شريطًا ملونًا في منتصفه.



الشكل (٩-٦/ ب): الموجات المستعرضة في نابض.

٢ اسحب الطرف الحرّ للنابض نحوك، ثمّ ادفعه بعيدًا عنك مرات متتالية كما في الشكل (٩-٦/ أ). ماذا تلاحظ؟

٣ ثبت طرف النابض على ارتفاع مناسب عن سطح الأرض، ثم حرك الطرف الحرّ للنابض إلى أعلى وإلى أسفل مرات متتالية، كما في الشكل (٩-٦/ ب). ماذا تلاحظ؟

بعد تنفيذك الخطوات السابقة، صف اتجاه انتشار الموجة خلال حلقات النابض، واتجاه اهتزاز جزيئات الوسط (الشريط الملون) في الخطوتين الثانية والثالثة.

لاحظت في الجزء الأول من النشاط أن حلقات النابض لم تعد على أبعاد متساوية، بل تراها تبدو متراصة في مناطق على شكل **تضاغط** (Compression)، ومتباعدة في مناطق أخرى على شكل **تخلخل** (Rarefaction). وأن الاضطراب ينتقل من الطرف القريب إلى الطرف البعيد، وأن حركة حلقات النابض تأتي على امتداد طوله. وفي الجزء الثاني من النشاط انتشرت حركة موجية في النابض تكونت من **قمة** (Crest) **وقاع** (Trough) من الطرف الحر إلى الطرف المربوط، وكان الشريط الملون المثبت على الحبل يعلو ويهبط رأسيًّا من غير أن ينتقل من مكانه؛ أي أن جزيئات الوسط (الشريط) تحركت حركة اهتزازية عمودية على اتجاه انتشار الموجة.

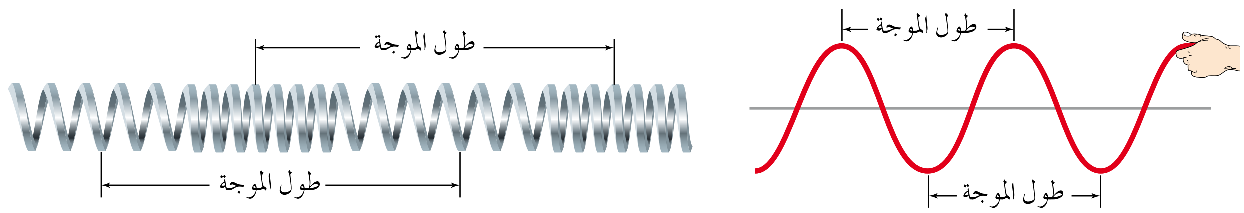
من النشاط السابق نستنتج أنه يوجد نوعان من الموجات الميكانيكية هما:

- **موجات طولية** (Longitudinal Waves): وفيها تتحرك جزيئات الوسط الناقل باتجاه موازٍ لاتجاه انتقال الموجات، لاحظ الشكل (٩-٦/ أ)، ومن الأمثلة عليها موجات الصوت.
- **موجات مستعرضة** (Transverse Wave): وفيها تتحرك جزيئات الوسط الناقل باتجاه عمودي على اتجاه انتقال الموجات، لاحظ الشكل (٩-٦/ ب)، ومن الأمثلة عليها موجات الماء وموجات الحبل.

(٩-١-٢) مميزات الموجات

نتوصل من النشاط (٩-١) إلى أن للموجات المتكونة في الحوض بشكل خاص وللموجات عمومًا مجموعة من المميزات، هي:

١ **الطول الموجي** (Wavelength): **هو المسافة بين مركزي أي تضاغطين متتاليين أو مركزي تخلخلين متتاليين في الموجات الطولية، أو المسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتاليين في الموجات المستعرضة،** ويرمز له بالرمز (λ)، ويقاس بوحدة المتر (م)، لاحظ الشكل (٩-٧).



الشكل (٩-٧): الطول الموجي للموجات المستعرضة والطولية.

٢ **التردد** (Frequency): **هو عدد الاهتزازات التي يكملها الجسم المهتز في الثانية الواحدة،** ويرمز له بالرمز ($ت_د$) ويقاس بوحدة الهيرتز (Hz).

٣ **الزمن الدوري** (Periodic Time): **هو الزمن اللازم حتى تعيد الموجة نفسها،** ويرمز له بالرمز ($ز_{دوري}$) ويقاس بوحدة الثانية (ث)، ويعبّر عن ارتباط التردد بالزمن الدوري بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ت_د = \frac{١}{ز_{دوري}} \quad \text{.......................} \quad (٩-١)$$

٤ **سرعة انتشار الموجة** (Velocity): وهي تختلف من وسط لآخر، وتعبر سرعة الموجة عن المعدل الزمني للتغير في المسافة التي تقطعها الموجة، هذا ويمكن التوصل للعلاقة الرياضية بين سرعة الموجة وترددها وطولها الموجي بالاعتماد على تعريف التردد، حيث إن عدد الموجات (ن) التي تعبر نقطة محددة في زمن معين (ز) يساوي:

$ن = ت_د \times ز$ .... (٩–٢)

أما المسافة التي تقطعها هذه الموجات في هذا الزمن فتعطى بالعلاقة:

المسافة المقطوعة في زمن (ز) = عدد الموجات × طول موجة واحدة

$ف = ن \times \lambda$ .... (٩–٣)

وبتعويض عدد الموجات (ن) من المعادلة (٩–٢) في المعادلة (٩–٣) نحصل على:

$$ف = ت_د \times ز \times \lambda$$

$$\text{السرعة الموجية} = \frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}} = \frac{\lambda \times ت_د \times ز}{ز}$$

$ع = ت_د \times \lambda$ .... (٩–٤)

والمعادلة (٩–٤) علاقة عامة في الفيزياء للموجات جميعها مهما كان نوعها ومصدرها.

مثال (٩–١)

احسب الطول الموجي لموجة صوتية في الهواء عند درجة (صفر)°س، إذا كان تردد المصدر (٤٤٠) هيرتز، علمًا بأن سرعة الصوت في الهواء عند (صفر)°س= ٣٣٠م/ث.

الحلّ:

بتطبيق المعادلة (٩–٤) نجد أن : $\lambda = \frac{ع}{ت_د} = \frac{٣٣٠}{٤٤٠}$

ومنه فإن : λ = ٠,٧٥م.

تأثير دوبلر Doppler Effect: عندما تمرّ بك سيارة شرطة أو إسعاف بسرعة مصدرة صوت إنذار، فإنّك تسمع صوتها بصورتين مختلفتين، وتميّز إن كانت السيارة مقتربة منك أم مبتعدة عنك، وذلك من اختلاف درجة الصوت الذي يكون حادًّا أكثر حين تكون مقتربة، فما سبب هذا الاختلاف؟ وكيف يسمع سائق السيارة نفسها ذلك الصوت؟

إنّ الاختلاف في درجة الصوت الذي يسمعه مراقب واقف على الأرض ناتج عن اختلاف تردد الصوت الذي يختلف باختلاف سرعة المصدر واتجاه حركة المصدر بالنسبة إلى المراقب، في حين أنّ التردد الذي يسمعه سائق السيارة يكون ثابتًا بالنسبة إلى مصدر الصوت، فيسمع صوتها كما نسمعه نحن وهي واقفة. وتُعرف هذه الظاهرة بتأثير دوبلر، وهو: **تغيّر في تردد الموجات المنتشرة نتيجة حركة مصدر الموجات بالنسبة إلى المراقب،** فحين يكون المصدر مقتربًا من المراقب يقلّ الطول الموجي نتيجة انضغاط

الموجات وتقاربها، فيزداد ترددها، أي تزداد درجة الصوت، لكن إذا كان المصدر مبتعدًا عن المراقب، تتباعد الموجات فيزداد الطول الموجي، ويقل التردد. انظر الشكل (٩-٨). وتعتمد ظاهرة دوبلر على سرعة مصدر الموجات بالنسبة إلى المراقب، أو سرعة المراقب بالنسبة إلى المصدر.

الشكل(٩-٨): تأثير دوبلر.

توسع

الموجات فوق الصوتية (Ultrasound) موجات ميكانيكية طولية قصيرة الطول الموجي يزيد ترددها على (٢٠٠٠٠ هيرتز)، ولا تستطيع الأذن البشرية سماعها، إلا أن بعض الحيوانات تسمعها (مثل الكلاب والخيول والطيور)، وطبيعتها مماثلة لطبيعة موجات الصوت في أنها تحتاج إلى وسط مادي لانتشارها، وإذا سقطت على سطح لين فإنها تُمْتَصّ، ويعمل الهواء على امتصاص الموجات فوق الصوتية في حين أن السوائل تمررها، وهذه الخصائص وغيرها جعلت للموجات فوق الصوتية تطبيقات واسعة في الطب والصناعة وشتى مجالات الحياة. ابحث في مصادر المعرفة المختلفة، لتتوصل إلى المزيد من المعلومات حول خصائص هذه الموجات وتطبيقاتها التكنولوجية المختلفة.

مراجعة (٩-١)

١ وضح المقصود بكل من: التردد، الزمن الدوري، الطول الموجي.

٢ قارن بين الموجات الطولية والموجات المستعرضة من حيث اتجاه اهتزاز جزيئات الوسط بالنسبة إلى اتجاه انتشارها.

٣ قارب سريع يولد موجات على سطح الماء، ويسحب أنبوبًا عائمًا. صف حركة الأنبوب عندما تمرّ به الموجات المتولدة خلف القارب.

٤ فكّر: لو وضعت مصدرًا للموجات الصوتية (سيارة أطفال مثلاً) داخل كيس، وربطته بخيط، ثم أمسكت الطرف الحر للخيط وحركت يدك حركة دائرية في المستوى الأفقي كما في الشكل (٩-٩)، فصف كيف تتوقع أن يسمع زملاؤك من حولك الصوت. فسر إجابتك.

الشكل (٩-٩) : فكّر.

٩–٢ بعض خصائص الموجات

Waves Properties

فكرة

يعد الرادار أحد أهم الأجهزة التي تستخدم للتعرف على بعد الأجسام الساكنة والمتحركة من طائرات وسفن وتضاريس أو ارتفاعها أو اتجاه سرعتها، وذلك بالاستناد إلى واحدة من خصائص الموجات وهي الانعكاس.

نشاط تمهيدي

• تأمل الشكل (٩–١٠)، ثمّ حاول أن توضح ما يحدث لموجات البحر عند وصولها إلى الشاطئ.

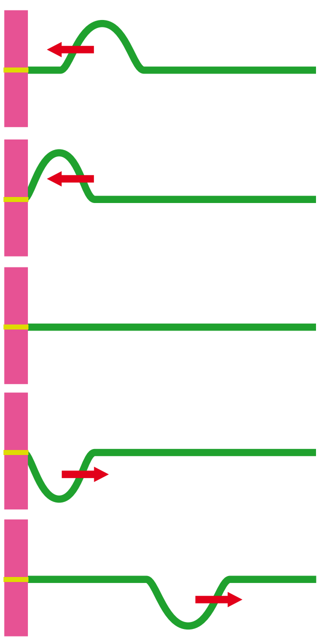
الشكل (٩–١٠): نشاط تمهيدي.

تعرّفت في الدرس السابق مميزات عامة للموجات مثل: التردّد والطول الموجيّ والسرعة الّتي تختلف باختلاف الوسط الذي تنتشر فيه الموجة، ولكن ماذا يحدث لهذه المميزات عندما تصطدم الموجة بحاجز، أو عندما تنتقل من وسط إلى آخر؟ هل سيؤثّر شكل الحاجز في الموجة فيغيّر من مميزاتها؟ للإجابة عن ذلك لابد من أن نتعرف على بعض خصائص الموجات.

(٩–٢–١) انعكاس الموجات

درست سابقًا الصوت، وتعرّفت انتقال موجاته وانعكاسها عن الحواجز، فهل تنعكس جميع الموجات بالكيفية نفسها التي تنعكس بها الموجات الصوتية؟ لكي تتوصّل إلى مفهوم انعكاس الموجة، والتغيرات التي تطرأ على مميزاتها عند الانعكاس، تأمّل الشكل (٩–١١)، الذي يبيّن انتقال موجة باتجاه اليسار في حبل مثبّت من أحد طرفيه، وارتدادها نحو اليمين، ثمّ أجب عن الأسئلة الآتية:

- ما اتجاه إزاحة جزيئات الحبل في الموجة الساقطة، وفي الموجة المنعكسة؟
- ما علاقة اتجاه حركة الموجة باتجاه حركة جزيئات الحبل عند سقوط الموجة وانعكاسها؟



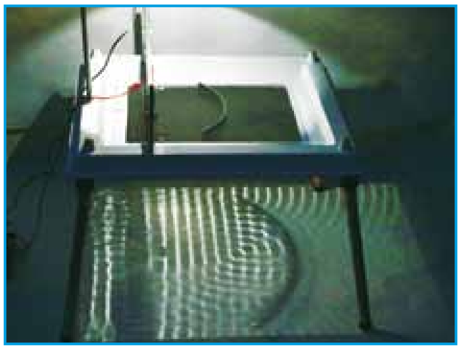
الشكل (٩–١١): انعكاس موجة في الحبل.

جرّب إجراء النشاط المبين في الشكل (٩–١١).

لعلّك توصلت من الشكل السابق إلى مفهوم **انعكاس الموجات** الذي يعرّف بأنّه: **ارتداد الموجات عند اصطدامها بحاجز، بحيث تتحرك باتجاه معاكس لاتجاهها السابق**، وبشكل عام تصبح القمة قاعًا والقاع يصبح

قمةً في الموجات المستعرضة، وينعكس التضاغط لتخلخل والتخلخل لتضاغط في الموجات الطولية.

إنّ ما لاحظته في الحبل هو انعكاس للموجات في بعد واحد؛ حيث يُحَدّد اتجاه انتشار الموجة الساقطة، واتجاه ارتدادها في بعد واحد، إلا أنّ الانعكاس يحدث في بعدين أيضًا، ويمكن مشاهدة ذلك عند انعكاس موجات الماء على سطح بركة أو مسبح أو في حوض الموجات، كما في الشكل (٩-١٢) الذي يوضّح الانعكاس في مستوى.



الشكل (٩-١٢): انعكاس موجات الماء.

(٩-٢-٢) انكسار الموجات

عند إهمال التخامد في الحركة الموجية، فإنّ الموجات تنتقل في الوسط الواحد حين يكون متجانسًا بسرعة ثابتة، فإذا انتقلت إلى وسط آخر، فإن سرعتها تتغيّر كما في الشكل (٩-١٣). لدراسة سلوك الموجات عند انتقالها بين وسطين مختلفين، نفذّ النشاط الآتي:

الشكل (٩-١٣): انكسار موجات الماء.

نشاط (٩-٣) انكسار الموجات

هدف النشاط: استقصاء التغيرات التي تطرأ على مميزات الموجة عند انتقالها بين وسطين مختلفين.

الأدوات: حوض الموجات، لوح زجاجي.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ ضع الماء في حوض الموجات إلى عمق (٢سم) تقريبًا، ثم ضع لوحًا زجاجيًّا سميكًا (١سم تقريبًا) في الحوض، بحيث تكون حافته موازية لطول المسطرة المولدة للموجات المستقيمة، ثم أغلق الدارة الكهربائية حتى تحصل على موجات مستقيمة في الحوض، كما في الشكل (٩-١٣).

٢ غير موضع لوح الزجاج في الحوض بحيث تصنع حافته زاوية حادّة مع المسطرة المولدة للموجات المستقيمة، ثم أغلق الدارة الكهربائية حتى تحصل على موجات مستقيمة في الحوض.

بعد تنفيذ النشاط أجب عن الأسئلة الآتية:

- ماذا يحدث للموجات المتقدمة في الخطوة الأولى؟

- هل يبقى اتجاه حركة الموجات فوق لوح الزجاج كما كان عليه قبل وصولها إليه في الخطوة الثانية؟
- هل المسافات بين مقدمات الموجات (الطول الموجي) فوق اللوح الزجاجي تساوي مثيلاتها قبل الوصول إلى اللوح في الخطوتين الأولى والثانية؟ وهل تتغير سرعة الموجات عند عبورها فوق اللوح الزجاجي؟

نتوصل إلى أنّ سرعة الموجات المائية تتغير عند عبورها من وسط عميق إلى آخر أقل عمقًا، ويبقى التردد ثابتًا، ومن ثم قد يتغير اتجاه حركتها، وهو ما يعرف **بانكسار الموجات** (Waves Refraction) ، وهي ظاهرة عامة تشمل أنواع الموجات جميعها.

وقد تمّ التوصّل تجريبيًّا إلى أنّ النسبة بين الطول الموجي للموجتين الساقطة والمنكسرة تساوي مقدارًا ثابتًا:

$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ = مقدار ثابت، وحيث إنّ: $(\lambda = \frac{ع}{ت_د})$، فإنّ:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{ع_1 ت_{د2}}{ع_2 ت_{د1}}$$

وبما أن تردد المصدر ثابت: $ت_{د1} = ت_{د2}$، فإنّ:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{ع_1}{ع_2} \quad \text{......} \quad (٩-٥)$$

ما يعني أنّ سرعة الموجة تتغيّر بنسبة ثابتة عند انكسارها لحظة عبورها بين وسطين مختلفين غير أن سرعتها في الوسط الواحد تبقى ثابتة.

مثال (٩-٢)

تنتشر موجات مائية مستوية طولها (٦سم) بسرعة (٤٢سم/ث) في حوض الموجات المائية، وحين تغير عمق ماء الحوض أصبح طولها الموجي (٨سم)، جد:

١ سرعة الموجات في الجزء الثاني من الحوض.

١ تردد الموجات في كل من جزأي الحوض.

الحلّ:

- من العلاقة: $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{ع_1}{ع_2}$

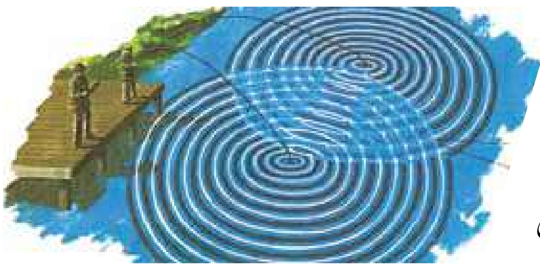
$$\frac{٦}{٨} = \frac{٤٢}{ع_2}$$

ومنه فإن $ع_{٢} = ٥٦$ سم/ث.

■ من العلاقة: $ت_{د١} = \frac{ع_{١}}{\lambda_{١}}$

فإن $ت_{د١} = \frac{٤٢}{٦} = ٧$ هيرتز وهي نفسها $ت_{د٢}$ ؛ لأن تردد المصدر لم يتغير.

(٩-٢-٣) تداخل الموجات



الشكل (٩-١٤): تداخل الموجات.

يمكنك أحيانًا سماع صوت شخص يتكلم بوضوح على الرغم من أن صوته قد تقاطع مع أصوات أخرى، انظر إلى الشكل (٩-١٤)، ولاحظ الأثر الناجم عن تلاقي موجات الماء لكل من صنارتي الصيد في البحيرة.

ما الذي يحدث عند تلاقي موجتين أو أكثر من النوع نفسه في وسط واحد؟ وما الأثر الناجم عن هذا التلاقي؟ وكيف تكمل كل موجة مسارها بعد التلاقي؟ هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها عند تنفيذ النشاطين (٩-٤) و (٩-٥).

نشاط (٩-٤) تداخل الموجات

هدف النشاط: التحقق من حدوث التداخل، وملاحظة ما يحدث عند التقاء موجتين متقابلتين.

الأدوات: نابض طوله (٥ م) تقريبًا.

خطوات تنفيذ النشاط:

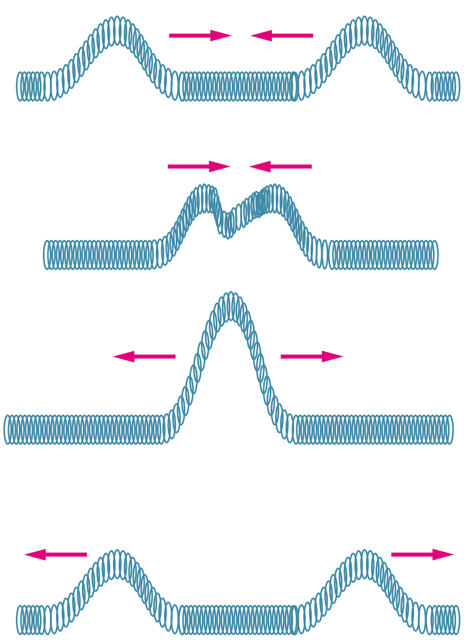
١ أمسك طرف النابض وهو منبسط على أرض الغرفة، بحيث يمسك زميل لك طرفه الآخر.

٢ هُزا طرفي النابض مرة واحدة للأعلى ثم للأسفل.

٣ راقب ما يحدث للموجتين المتحركتين عند اقترابهما، ثم عند ابتعادهما.

٤ ما شكل الموجة المتكونة عند الالتقاء؟

٥ هل تغير شكلهما بعد انفصالهما؟ لاحظ الشكل (٩-١٥).



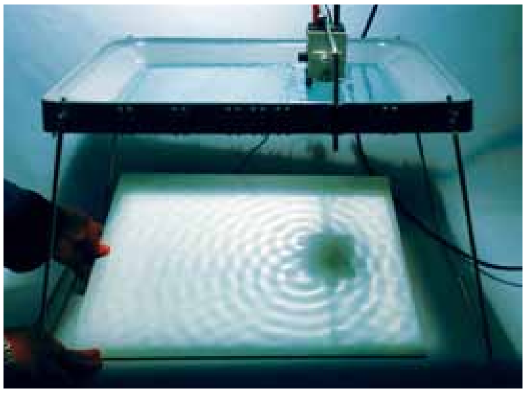
الشكل (٩-١٥): تداخل الموجات في النابضين.

نشاط (٩-٥) تداخل الموجات

هدف النشاط: التحقق من حدوث التداخل في حوض الموجات، وملاحظة ما يحدث عند التقاء موجتين.

الأدوات: حوض الموجات، ماء.

خطوات تنفيذ النشاط:

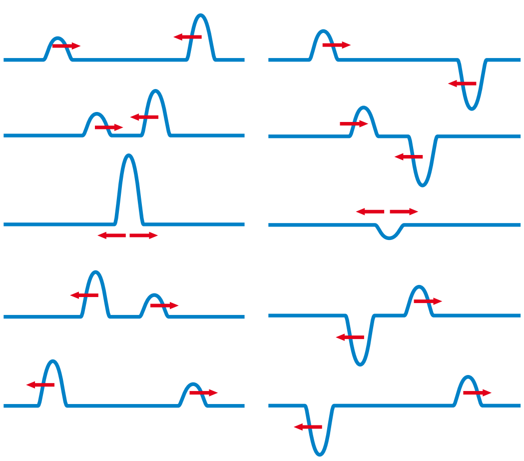


الشكل (٩-١٦): تداخل موجات الماء.

١ اجعل الكرتين المتصلتين بالمحرك الكهربائي تلامسان سطح الماء، ثم أغلق دارة المحرك الكهربائي حتى تبدأ الكرتان بالحركة.

٢ راقب المنطقة التي تلتقي فيها الموجات الدائرية، ولاحظ شكلها في منطقة التلاقي.

٣ راقب هذه الموجات بعيدًا عن منطقة الالتقاء، هل يختلف شكلها عن شكل الموجات الأصلية؟ لاحظ الشكل (٩-١٦).



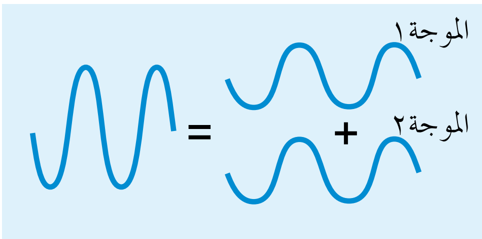
الشكل (٩-١٧): مبدأ التراكب الخطي.

لاحظت من النشاطين السابقين أن اتساع الموجة في منطقة التلاقي يختلف عن اتساع أي منهما، وكذلك تكمل كل موجة مسارها من غير أن تتأثر بالأخرى بعد منطقة التلاقي، وهذا ما يسمى بمبدأ التراكب الخطي الذي يوضحه الشكل (٩-١٧)، وبوجه عام يسمى الأثر الناجم عن التقاء مجموعة من الموجات من نوع واحد في وقت واحد **التداخل** (Interference)، ويظهر التداخل عادة بنمطين:

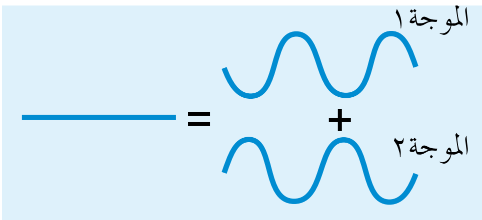
- التداخل البناء Constructive Interference وفيه تدعم الموجات بعضها بعضًا وتقوى، فتزداد السعة كما في الشكل (٩-١٨/ أ).
- التداخل الهدام Destructive Interference وفيه تُضعِف الموجات بعضها بعضًا، فتقل السعة كما في الشكل (٩-١٨/ ب).

وثمة شروط لا بد من توافرها لحدوث كل من نمطي التداخل، ولتتوصل إليها انظر الشكل (٩-١٨)، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

- في أي النمطين تلتقي القمم معًا وتلتقي القيعان معًا؟
- في أي النمطين تلتقي قمة إحدى الموجتين مع قاع الموجة الأخرى؟



أ – تداخل بنّاء.



ب– تداخل هدّام.

الشكل (٩–١٨): تداخل الموجات.

نتوصل إلى أن التداخل يكون بنّاءً إذا التقت قمم الموجات معًا، أو قيعانها معًا، ويحدث هذا عندما تسير الموجتان معًا أو تتقدم إحداهما على الأخرى بطول موجي واحد (λ)، أو طولين موجيين (٢λ) أو ثلاثة... وبوجه عام بعدد صحيح من الأطوال الموجية ($ن \lambda$) حيث ن = ٠، ١، ٢، ٣، ... كما في الشكل (٩–١٨/أ)، ويكون التداخل هدّامًا إذا التقت قمة إحدى الموجتين مع قاع الموجة الأخرى، كما في الشكل (٩–١٨/ب)؛ أي كانت إحداهما تسبق الأخرى بنصف طول موجي $(\frac{\lambda}{٢})$ أو مضاعفاته الصحيحة الفردية $(\frac{ن\lambda}{٢})$ حيث ن عدد فردي.

فكر: في قاعة المحاضرات؛ توجد بعض الأماكن يكون فيها صوت المحاضر أعلى من الصوت الفعلي، بينما توجد أماكن أخرى يكون الصوت فيها أضعف. فسّر ذلك.

(٩–٢–٤) حيود الموجات

الشكل (٩–١٩): حيود موجات الماء.

تعرفت إلى بعض خصائص الموجات وسلوكها؛ فيوجد موجات الحبل والنابض، وموجات الصوت، وموجات الماء وغيرها، تنتشر هذه الموجات في كلّ مكان حولنا، فينعكس بعضها وينكسر البعض الآخر، وقد تتداخل فتزداد سعتها أو تقلّ. لكن ماذا يحدث للموجة عند عبورها حافة حاجز؟ أو عند عبورها شقًّا ضيقًا، كما في الشكل (٩–١٩)؟

لعلّك تلاحظ أنّ الموجة تنحني عند عبورها الحاجز، وتُعرّف ظاهرة **حيود الموجات** (Waves Diffraction) **بأنّها عملية انحناء الموجات عند اجتيازها حافة حاجز أو مرورها عبر فتحة ضيّقة**، ولكي تتعرف هذه الظاهرة نفذ النشاط الآتي:

نشاط (٩-٦) **حيود الموجات**

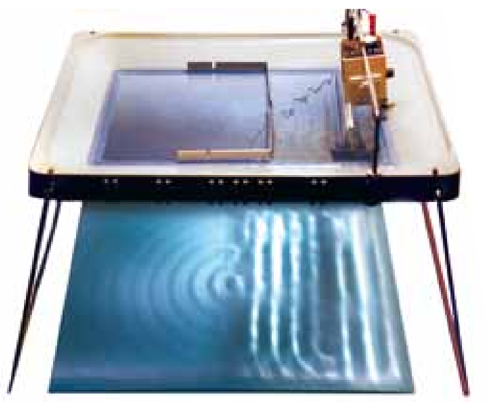
هدف النشاط: التحقّق من حيود الموجات عمليًّا، وأثر اتساع الفتحة التي تنفذ الموجات خلالها على حيودها.

الأدوات: حوض الموجات، مسطرتين فلزيتين.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ جهز حوض الموجات للحصول على موجات مستوية كما في الشكل (٩-٢٠).

٢ ضع المسطرتين الفلزيتين على استقامة واحدة بحيث تحصل على فتحة ضيقة بينهما، ثمّ راقب الموجة عند عبورها من الفتحة.

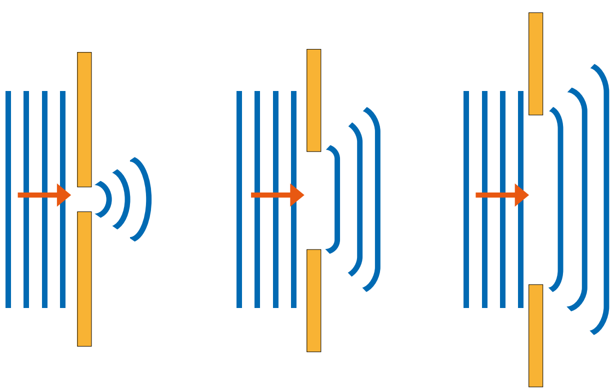


الشكل (٩-٢٠): نشاط (٩-٦).

٣ غيّر اتساع الفتحة زيادة ونقصانًا، ولاحظ ما يحدث لشكل الموجة التي تعبر من الفتحة.

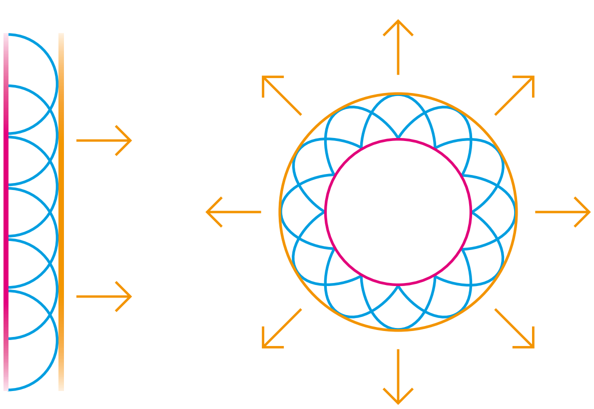
ما العلاقة بين شكل الحيود الناتج واتساع الفتحة التي تعبر منها الموجات؟

نتوصل من النشاط السابق إلى أنّ شكل الموجة الناتجة من الحيود يعتمد على اتساع الفتحة التي تعبر من خلالها، حيث يزداد حيود الموجات كلما قلّ اتساع الفتحة. وقد وُجد عمليًّا أن ظاهرة الحيود تكون أكثر وضوحًا عندما يكون اتساع الفتحة قريبًا من الطول الموجي، كما يظهر في الشكل (٩-٢١).



الشكل (٩-٢١): الحيود وعلاقته باتساع الفتحة.

تمكن العالم الدنماركي كرستيان هيجنز Christian Huygens من تفسير ظاهرة حيود الموجات، حيث افترض أنّ كلّ نقطة من النقاط المشكلة لمقدمة الموجة الرئيسة تعمل كمصدر نقطي لموجة ثانوية، وأنّ الغلاف الذي يجمع جبهات الموجات الثانوية يُشكل مقدمة موجة جديدة (Wave Front)، كما يُظهر الشكل (٩-٢٢)،

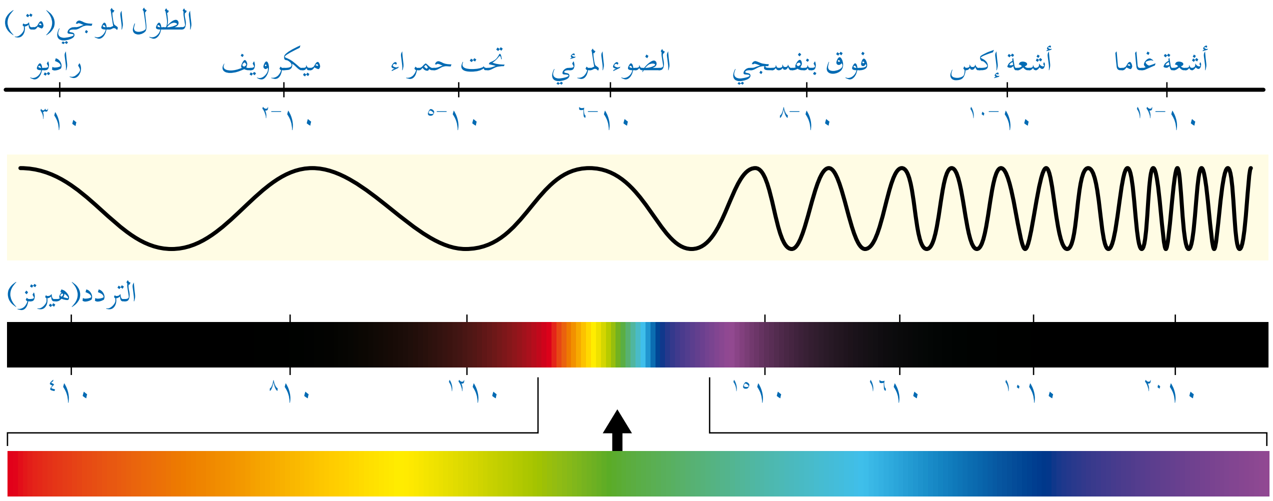


الشكل (٩-٢٢): مبدأ هيجنز.

وهذا ما يُعرف حاليًّا بمبدأ هيجنز (Huygens Principle)؛ ففي ظاهرة الحيود تعبر مقدمة الموجة من الفتحة، وهنا تُعدُّ الفتحة مصدرًا لموجة ثانوية تنتشر أمام الفتحة على شكل دوائر متحدة المركز، مركزها الفتحة نفسها.

(٩-٢-٥) الموجات الكهرمغناطيسية

تعرفت في الدرس السابق إلى أن الموجات الميكانيكة اضطراب في الأوساط المادية ينقل الطاقة خلالها، وستتعرف في هذا الدرس نوعًا آخر من **الموجات التي لا تحتاج لوسط مادي تنتقل خلاله فهي تنتقل في الفراغ، إضافة لقدرتها على الانتقال في الأوساط المادية، هي الموجات الكهرمغناطيسية** (Electromagnetic Waves) التي تتكون من مجالين متعامدين أحدهما كهربائي والثاني مغناطيسي يتذبذبان عموديًّا على اتجاه انتشارها؛ أي أنّ الموجات الكهرمغناطيسة مستعرضة، ويشكل مجموع هذه الموجات معًا ما يُعرف بالطيف الكهرمغناطيسي، بجزأيه المرئي وغير المرئي، كما يبين الشكل (٩-٢٣).

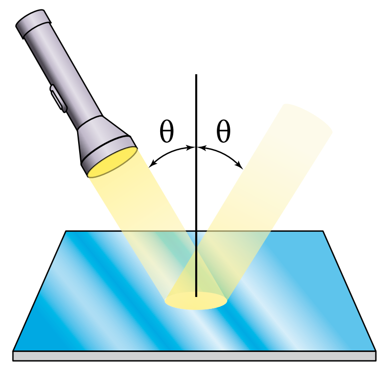


الشكل (٩-٢٣): الطيف الكهرمغناطيسي.

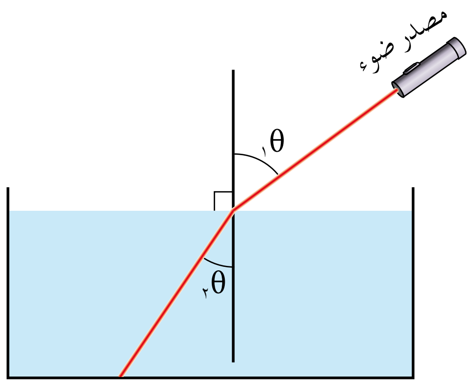
من الشكل (٩-٢٣) يمكنك الاستنتاج أن هذه الموجات تختلف في التردد والطول الموجي، بينما تتفق بسرعتها في الوسط نفسه، وتبلغ سرعتها في الفراغ (٣×١٠^{٨})م/ث، وتعدّ موجات الضوء المرئي التي تتراوح أطوالها الموجية من (٣٩٠ إلى ٧٦٠نم) من أشهر موجات الطيف الكهرمغناطيسية، وأكثرها أهمية في حياتنا. ولعلك تذكر ما تعلمته في الصف العاشر، من أن الضوء شكل من أشكال الطاقة يمكّننا من رؤية الأجسام حولنا، وأن الضوء يسير في خطوط مستقيمة، وينتشر بسرعات ثابتة في الأوساط المتجانسة، وأنّ الأشعة الضوئية تتميز بمبدأ الاستقلالية.

ولا تختلف موجات الضوء، وباقي موجات الطيف الكهرمغناطيسي عن الموجات الميكانيكية

في خصائصها، فموجات الضوء تنعكس وتنكسر وتتداخل وتحيد عن مسارها، وانعكاس موجات الضوء (Reflection of Light waves)، هو ارتداد شعاع الضوء عند سقوطه على سطح عاكس بحيث تعود إلى الوسط نفسه، كما في الشكل (٩-٢٤). وانكسار موجات الضوء (Reflection of Light waves)، هو تغير سرعة الضوء عندما ينتقل من وسط إلى آخر وانحرافه عن مساره، كما في الشكل (٩-٢٥). اذكر نص قانوني الانعكاس، وقانوني الانكسار.



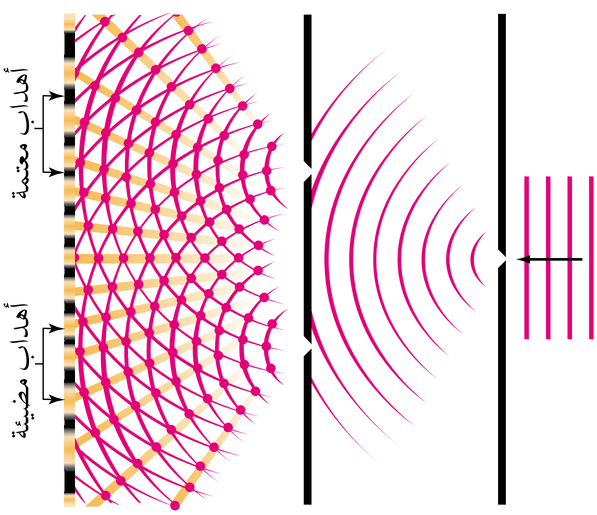
الشكل (٩-٢٤): انعكاس موجات الضوء.



الشكل (٩-٢٥): انكسار موجات الضوء.

(٩-٢-٦) تداخل موجات الضوء وحيودها

من السهولة ملاحظة ظاهرتي التداخل والحيود في موجات سطح الماء وفي موجات الحبل، لكن يصعب ذلك بالنسبة إلى موجات الضوء، بسبب قصر طولها الموجي؛ إذ لا بد من توافر شروط لحدوث ذلك، ففي عام ١٨٠١م تمكن الفيزيائي توماس ينغ من إجراء تجربة استطاع أن يحصل فيها على نمطي التداخل البنّاء والهدّام عند مرور الضوء من شقين دقيقين متجاورين، كما يظهر في الشكل (٩-٢٦).

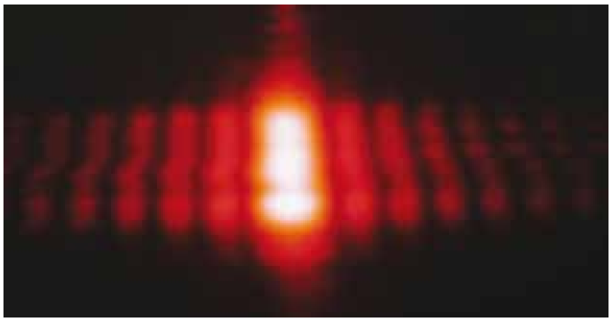


الشكل (٩-٢٦): تداخل موجات الضوء في تجربة ينغ.

ويوجد العديد من الظواهر التي نشاهدها في حياتنا اليومية يظهر فيها حيود موجات الضوء، مثل: ملاحظة مرور الأشعة الضوئية عبر أهداب العين شبه المغلقة، وكذلك مرور موجات الضوء بين أصبعين من أصابع اليد عند تقريبهما من بعضهما، حيث تشاهد أهدابًا مضيئة وأهدابًا معتمة.

ولحدوث ظاهرة الحيود في موجات الضوء، ورؤيتها كما في الشكل (٩–٢٧)، فإنّه يجب أن يكون عرض الشق الذي يمر خلاله الضوء في حدود (٣٨٠ – ٧٦٠) نم. لماذا؟

فكر: عند دراسة ظاهرة الحيود، نجد أنّها تكون واضحة في موجات الصوت بشكل كبير، حيث يمكنك سماع الأصوات من خلف الحواجز التي تحوي فتحات، لكن لا يمكننا ملاحظة حيود موجات الضوء بوضوح. فسّر ذلك.



الشكل (٩–٢٧): حيود موجات الضوء.

وبما أن الضوء يسلك السلوك نفسه الذي تسلكه بقية الموجات من انعكاس وانكسار وتداخل وحيود فيمكننا التعامل مع الضوء بوصفه موجات، وتطبيق كافة المميزات والخصائص التي نوقشت في هذا الفصل على الضوء.

فكر: يستخدم فرن الميكرويف الشكل (٩–٨/أ) موجات الميكرويف لتسخين الطعام، وأشعة الميكرويف هي موجات راديو قصيرة يبلغ ترددها (٢٥٠٠) ميجا هيرتز، حيث تمتلك هذه الموجات طاقة عالية تجعلها تُمْتَصّ بوساطة الماء والمواد الدهنية والسكرية بحيث تكتسب جزيئات هذه المواد طاقة تجعلها تتذبذب بدرجة كبيرة، وبالتالي تصطدم مع بعضها فتنتج حرارة التسخين اللازمة لطهي الطعام، إلا أن المواد البلاستيكية والزجاجية التي يغلف بها الطعام تكون غير قادرة على امتصاص هذه الموجات، هذا ويصمم فرن الميكرويف بحيث يكون له نافذة من الزجاج تمكّن من مشاهدة ما بداخله، لكن يوضع خلف الزجاج شبك فلزي، انظر الشكل (٩–٢٨/ب). ما أهمية ذلك بالنسبة إلى موجات الضوء والموجات القصيرة (الميكرويف)؟

الشكل (٩–٢٨/ أ): فرن الميكرويف.

الشكل (٩–٢٨/ ب): الشبك الفلزي.

توسع

حتى مطلع القرن العشرين ساد اعتقاد بأن مجرة درب التبانة تشكل الكون كله، وأن ما نشاهده في السماء جميعه يقع ضمن حدود هذه المجرة، إلى أن أثبت العالم إدوين هابل (Edwin Hubble) أن مجرة درب التبانة ما هي إلا واحدة من ملايين المجرات التي يعج بها الكون، والتي تقع جميعها خارج مجرة درب التبانة، وعند تحليل الضوء الوارد من بعض النجوم والمجرات لوحظ أن طيفها ينزاح غالبًا نحو اللون الأحمر، تحت تأثير ظاهرة دوبلر؛ أي أنّ تردد ضوئها يقلّ، وبقياس تأثير دوبلر تبين أن الغالبية العظمى من تلك المجرات تتحرك مبتعدةً عن مجرتنا بسرعات كبيرة جدًّا، وبذلك ظهرت نظرية توسع الكون التي تصف المجرات بأنها تتباعد عن بعضها بسرعات عظيمة؛ أي أنّ الكون في حالة تمدّد مستمر، وبمعرفة معدّل هذا التمدّد وتحديد الزمن الذي كانت فيه المجرات جميعها في مكان واحد، فقد أمكن تقدير عمر الكون بنحو ١٤ مليار سنة.

مراجعة (٩-٢)

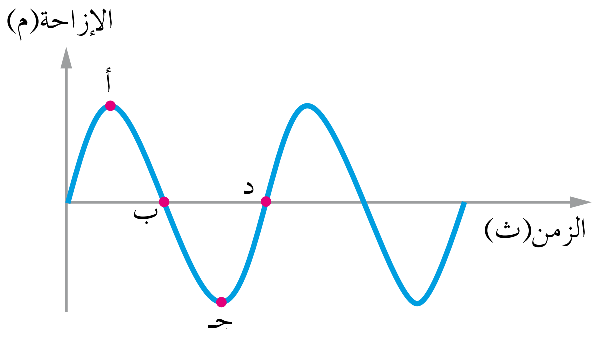
١ وضح المقصود بكل من المفاهيم الآتية: الانعكاس، الانكسار، التداخل، الحيود.

٢ اذكر نوعي التداخل وبيّن شرط حدوث كلّ منهما.

٣ بيّن ماذا يحدث لموجة مستعرضة طولها الموجي ٣٠سم عند مرورها من فتحة في حاجز، إذا كان اتساع الفتحة: ٢متر، ٥٠سم، ٢سم.

٤ عدّد مكونات الطيف الكهرمغناطيسي.

٥ يبين الشكل (٩-٢٩) موجة ميكانيكية مستعرضة تنتشر باتجاه محور السينات الموجب، حدد اتجاه السرعة اللحظية لدقائق الوسط عند كل من النقاط: أ، ب، جـ، د.



الشكل (٩-٢٩): السؤال الخامس

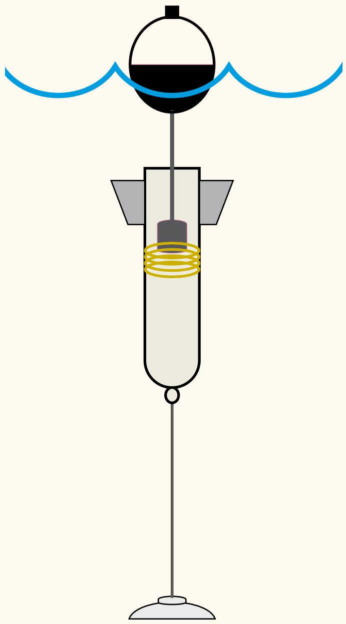
المشروع التاسع: المهمة: الطاقة المتجددة

■ فكرةُ المشروعِ:

يواجه العالم في العصر الحديث مشكلات عدّة، أهمها شح مصادر الطاقة؛ لذا اتجه العلماء للإفادة من مصادر الطاقة المتجددة، كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الأمواج، وفي الأردن أُسست الجمعية الأردنية للطاقة المتجددة عام ٢٠٠٨م، حيث تعمل الجمعية على نقل المعرفة والتكنولوجيا في مجال الطاقة المتجددة ،وتوظيفها في الأردن.

في هذا المشروع ستصمم جهازًا يحول طاقة الأمواج في البحار إلى طاقة كهربائية، ثم ستنفذ العمل وتجربه، للتأكد من سلامة الفكرة وتطبيقها بصورة تنسجم مع الأفكار النظرية لتحولات الطاقة.

ستجد بعد إنهاء دراستك أن هذا المشروع نموذج لمشروعات مستقبلية سوف تعمل أنت وزملاؤك جنبًا إلى جنب لتصميمها وتنفيذها، ثم متابعة العمل لتطوير مثل تلك المشروعات.



الشكل (٩-٣٠): جهاز تحويل طاقة موجات البحار.

■ الفرضيةُ:

ضعْ فرضيةً تصف صورة الطاقة التي تحملها موجات البحر، ثم كيفيّة تحولها إلى شكل آخر من الطاقة يمكن نقله وتخزينه والإفادة منه، وتتضمن طريقة تحويل الطاقة، والتصور المتوقع عن كفاءة الجهاز.

■ الخطّةُ:

يجبُ اتفاقُ أعضاءِ المجموعةِ على الفرضيةِ، ثمّ وضع أعضاءِ المجموعةِ التصميمَ المناسب لتنفيذ النموذج، وتصاميمَ أخرى بديلة في حين تعثر الإنجاز.

■ الأدواتُ:

دلو ماء، كرة بلاستيكية، أسلاك نحاسية، مغناطيس، عبوة عصير بلاستيكية، كتلة من الحديد تستخدم كمرساة، غلفانومتر، وأسلاك توصيل، وما يلزم من أدوات أخرى تتفق مع الخطة والتصميم، ثم يضعون جدولًا زمنيًا لتنفيذ إجراءات العمل واختباره وتقويمه.

■ الإجراءاتُ:

١. اصنع الجزء المتحرك من الجهاز بتثبيت الكرة البلاستيكية في طرف ساق نحاسية، وتثبيت مغناطيس قوي في الطرف الثاني للساق، كما في الشكل (٩-٣٠).
٢. اصنع الجزء الثابت من عبوة العصير بعد إزالة قاعدتها، ولف سلك نحاسي رفيع على محيطها على صورة ملف دائري، ثم ثبّت العبوة من فوهتها بتوصيلها مع المرساة بساق نحاسية أو حديدية.
٣. املأ الدلو بالماء، ثمّ ضع المرساة فيه لتعلوها عبوة العصير، وهي مثبتة بصورة رأسية وفوهتها إلى الأسفل.
٤. ضع الجزء المتحرك في الماء، بحيث تطفو الكرة على السطح، ويتخذ المغناطيس وضعًا رأسيًّا داخل عبوة العصير.
٥. صل طرفي الملف مع جهاز غلفانومتر، للكشف عن التيار المتولد.
٦. حرّك جسم وهو ملامس للماء، ولاحظ تولّد موجات في سطح الماء، ثم ارصد النتيجة.

■ مناقشة النتائج:

- هل كُشِفَ عن الطاقة الكهربائية المتولدة بسهولة؟ وهل يمكن أن تكون هذه الطريقة عملية؟
- ما التعديلات المقترحة حتى تكون قيمة التيار الكهربائي المتولد مفيدة من الناحية العملية؟
- ما المناطق التي ينصح بإنشاء مثل هذه المحطات فيها في الأردن؟
- ابحث عن مشاريع عملية أنشئت في بلدان أخرى، وعن مدى إسهامها في إنتاج الكهرباء في تلك البلدان.

١ اختر الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ تختلف الموجة الساقطة عن الموجة المنعكسة من حيث:

أ التردد　　ب الطول الموجي　　ج السرعة　　د اتجاه الانتشار

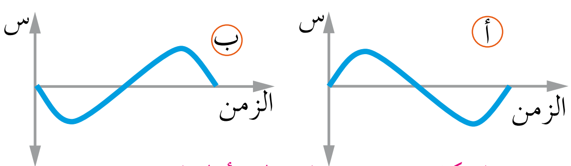
٢ إذا انتقلت موجات صوتية طولها الموجي (λ) من وسط سرعة انتشارها فيه (ع) إلى وسط آخر سرعة انتشارها فيه (٤ ع)، فإن طول موجة الصوت في الوسط الثاني يساوي:

أ λ　　ب ٢ λ　　ج ٣ λ　　د ٤ λ

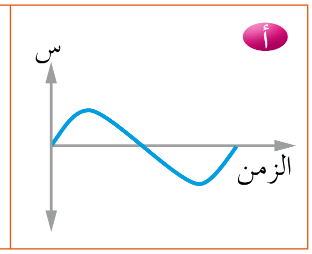
٣ يسمى تغير اتجاه الموجة بسبب تغير سرعتها عند نفاذها من وسط إلى آخر مختلف عنه:

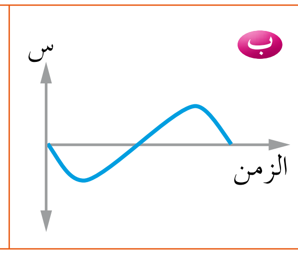
أ انعكاس　　ب انكسار　　ج تداخل　　د حيود

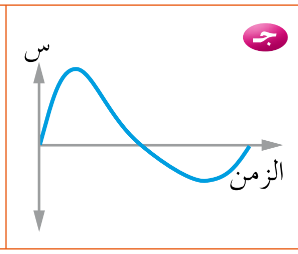
٤ يمكن تمثيل المحصلة الناتجة من تداخل الموجتين في الشكل (٩-٣١) بالشكل:

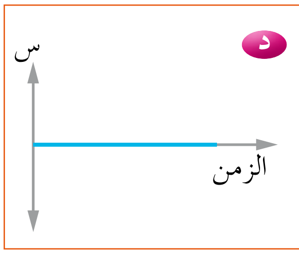


الشكل (٩-٣١): السؤال الأول الفقرة (٤).

أ


ب


ج


د


٥ عندما تمر موجة من ثقب معين أو قرب حافة حادة فإن السلوك الذي تسلكه يسمى:

أ انعكاسًا　　ب انكسارًا　　ج تداخلاً　　د حيودًا

٦ تنتشر موجة بين وسطين مختلفين، فإذا كانت النسبة بين سرعة انتشارها في الوسط الأول إلى الثاني ($ع_{١}/ع_{٢}$) تساوي (٣/٥)، فإن النسبة بين ترددها في الوسط الأول إلى الثاني ($ت_{١}/ت_{٢}$):

أ ٣/٥　　ب ٥/٣　　ج ١/١　　د ١/٢

٧ تنتشر موجة بين وسطين مختلفين، فإذا كان الطول الموجي لها في الوسط الأول (٦سم) وفي الوسط الثاني (٤سم)، فإن النسبة بين سرعة انتشارها بين الوسطين الأول والثاني ($ع_{١}/ع_{٢}$):

أ ٢/٣　　ب ٣/٢　　ج ٤/٣　　د ٣/٤

٨ يحدث تداخل هدّام بين موجتين، إذا كانت إحداهما تسبق الأخرى بمسافة تساوي:

أ $\frac{\lambda}{٤}$ ب $\frac{\lambda}{٢}$ جـ λ د ٢λ

٢ وضح المقصود بكل من المصطلحات الآتية: الموجة الكهرمغناطيسية، مبدأ هيجنز، ظاهرة دوبلر، حيود موجات الضوء.

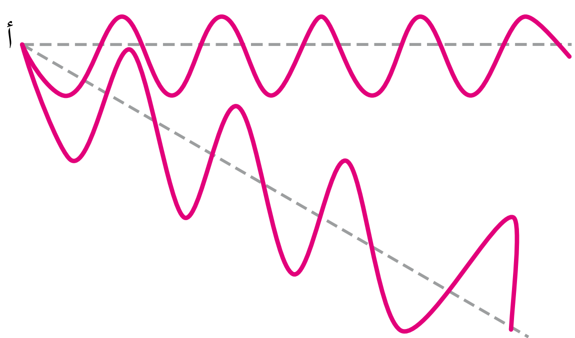
٣ فسر ما يأتي:

أ موجات الصوت لا تنتقل في الفراغ. ب موجات الماء مستعرضة.

٤ وضح بتجربة عملية كيف تنقل الموجة المستعرضة الطاقة من غير انتقال مادة الوسط.

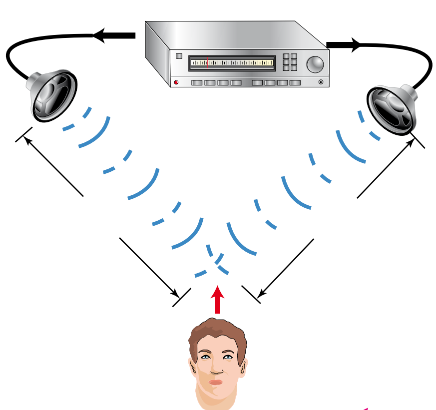
٥ يبث الساتل العربي عرب سات موجاته على تردد يتراوح بين (٣ إلى ٥) غيغا هيرتز، احسب أقصر وأطول طول موجي للإشارات التي يبثها الساتل، علمًا بأن سرعة الموجات الكهرمغناطيسية في الهواء تساوي (٣×١٠^{٨})م/ ث.

٦ في الشكل (٩–٣٢): تصل موجتان إلى النقطة أ في اللحظة نفسها، فإذا علمت أن المصدرين لهما التردد نفسه، فما نوع التداخل الناتج عن التقائهما عند النقطة أ؟



الشكل (٩–٣٢): السؤال ٦.

٧ سمّاعتان تطلقان نغمة موسيقية ذات تردد متطابق كما في الشكل (٩–٣٣)، فإذا كان المستمع جالسًا على مسافة متساوية من السماعتين. فكيف يصل الصوت إليه؟



الشكل (٩– ٣٣): السؤال السابع.

مسرد المصطلحات العلمية

المصطلح	باللغة الإنجليزية	التعريف
اتساع الحركة التذبذبية	Amplitude of osculation motion	هو أكبر إزاحة للجسم المهتز عن موضع اتزانه.
الإزاحة	Displacement	كمية متجهة تعبر عن التغير في موقع الجسم عند انتقاله بين نقطتين بأقصر مسار بينهما.
الازدواج	Couple	قوتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا، وتؤثران في نقطتين مختلفتين، وتولدان عزمين متساويين باتجاه واحد.
انعكاس الموجات	Reflection of waves	ارتداد الموجة بعد اصطدامها بحاجز ما.
انكسار الموجات	Refraction of waves	انحراف الموجة عن مسارها الأصيل نتيجة تغير سرعتها عند انتقالها من وسط مادي إلى آخر.
التردد	Frequency	عدد الدورات الكاملة التي يتمها الجسم خلال ثانية واحدة.
تداخل الموجات	Interference of waves	الأثر الناجم عن التقاء مجموعة من الموجات من نوع واحد وفي وقت واحد.
التسارع اللحظي	Instantaneous Acceleration	التسارع المتوسط في مدة زمنية قصيرة جدًّا تؤول إلى الصفر.
التسارع المتوسط	Average Acceleration	المعدل الزمني للتغير بالسرعة.
التسارع المركزي	Centripetal acceleration	تسارع الجسم الذي يتحرك حركة دائرية منتظمة، ويكون اتجاهه نحو مركز الدائرة.
تصادم مرن	elastic collision	التصادم الذي تُحْفَظ فيه الطاقة الحركية والزخم للنظام.
تصادم عديم المرونة	Perfectly inelastic collision	التصادم الذي تلتحم فيه الأجسام المتصادمة، ويفقد في النظام طاقة حركية كبيرة.
تصادم غير مرن	inelastic collision	التصادم الذي يكون فيه ضياع للطاقة الحركية لكن من غير التحام الأجسام بعد التصادم.
الجريان الطبقي	Laminar flow	تحرّك السائل على شكل انزلاق طبقات، طبقة فوق الأخرى بسرعات مختلفة.
الحركة الاهتزازية	Oscillatory motion	حركة الجسم حول موضع سكونه ذهابًا وإيابًا بشكل دوري.
الحركة التوافقية البسيطة	Simple harmonic motion	الحركة الاهتزازية التي يتناسب فيها تسارع الجسم المهتز طرديًّا مع الإزاحة الحاصلة له حول موضع سكونه وبعكس اتجاهها.
حيود الموجات	Diffraction of waves	انحناء الموجات حول حافة حاجز أو بعد عبورها فتحة صغيرة.
الدفع	Impulse	الكمية الناتجة عن حاصل ضرب متوسط قوة التصادم في زمن تأثيرها في الجسم.
الذبذبة الكاملة	Cycle (full oscillation)	حركة الجسم عندما يمر بنقطة معينة في مسار حركته مرتين متتاليتين في الاتجاه نفسه.
الزخم الخطي	Linear momentum	الكمية المتجهة الناتجة عن حاصل ضرب كتلة الجسم في متجه السرعة.
الزمن الدوري	Periodic Time	الزمن الذي يلزم لكي يتم الجسم المهتز دورة كاملة (الذبذبة الكاملة).
السرعة الحدية	Terminal velocity	السرعة النهائية الثابتة التي يتحرك بها الجسم داخل المائع، وتكون عندها محصلة القوى المؤثرة فيه تساوي صفرًا.
السرعة اللحظية	Instantaneous velocity	السرعة المتوسطة في فترة زمنية قصيرة جدًّا تؤول إلى الصفر.
السقوط الحر	Free falling	حركة الأجسام في مجال الجاذبية الأرضية بإهمال مقاومة الهواء.
السرعة المتوسطة المتجهة	Average velocity	الإزاحة التي يحققها الجسم خلال فترة من الزمن.
السرعة المتوسطة القياسية	Average speed	المسافة التي يحققها الجسم خلال فترة من الزمن.

الشغل	Work	الكمية الناتجة عن الضرب القياسي لمتجهي القوة والإزاحة.
الضرب الاتجاهي (التقاطعي)	vector product	كمية متجهة تنتج عن ضرب متجه بآخر، وتكون متعامدة على المستوى الذي يقع فيه المتجهان.
الضرب القياسي (النقطي)	Scalar product	كمية قياسية تنتج عن ضرب متجه بآخر.
الطول الموجي	Wavelength	المسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتاليين في الموجة المستعرضة، وكذلك هو المسافة بين تضاغطين متتاليين أو تخلخلين متتاليين في الموجة الطولية، أو المسافة بين أي نقطتين متماثلتين في الطور ومتتاليتين على الموجة.
العزم	Torque	مقدرة القوة على إحداث حركة دورانية للجسم حول محور ثابت.
القدرة المتوسطة	Average power	المعدل الزمني للشغل المنجز، أو المعدل الزمني للطاقة المنقولة.
القدرة اللحظية	Instantaneous power	القدرة المتوسطة لآلة معينة حينما يؤول الزمن إلى الصفر.
القصور الذاتي	Inertia	الممانعة الطبيعية التي تبديها الأجسام لتغيير حالتها الحركية.
قوة اللزوجة	Viscosity force	المقاومة التي تؤثر بها كل طبقة من طبقات المائع المتحرك في الطبقة المجاورة لها.
القوة المركزية	Centripetal force	القوة المسببة للتسارع المركزي، ويكون اتجاه تأثيرها دائمًا نحو المركز.
كمية قياسية	Scalar quantity	الكمية التي تقاس بالمقدار فقط.
كمية متجهة	Vector quantity	الكمية التي تقاس بالمقدار والاتجاه معًا.
المائع	Fluid	كل مادة تمتلك خاصية التشكل، ويشمل السوائل والغازات.
المائع المثالي	Ideal fluid	المائع الافتراضي الذي يمتاز بأنه عديم اللزوجة ولا انضغاطي وجريانه منتظم وغير دوراني.
مبدأ برنولي	Bernoulli's principle	يقل ضغط المائع المثالي كلما زادت سرعته.
مبدأ التراكب الخطي	Principle of linear superposition	عندما تلتقي الموجات معًا فإنّ الإزاحة الكلية الناتجة هي المجموع الاتجاهي لإزاحات الموجات المختلفة عند نقطة الالتقاء وبعد فترة الالتقاء، تعبر كل موجة وحدها من غير أن تتأثر بهذا الالتقاء.
مبدأ هيجنز	Huygens' principle	إن جميع النقاط على مقدمة الموجة يمكن اعتبارها مصادر جديدة لأمواج ثانوية تصدر منها مويجات ثانوية كروية، وأن السطح المماسي لهذه المويجات الثانوية يشكل جبهة الموجة الجديدة.
متجه الموقع	Position vector	هو كمية متجهة تعبر عن موقع الجسم (النقطة) بالنسبة إلى نقطة الإسناد.
المسافة	Distance	كمية قياسية تمثل طول المسار الفعلي لحركة الجسم.
الموجة الطولية	Longitudinal wave	الموجة التي تتحرك فيها دقائق الوسط الناقل باتجاه موازٍ لاتجاه انتقال الموجة.
الموجة المستعرضة	Transverse wave	الموجة التي تتحرك فيها دقائق الوسط الناقل باتجاه يتعامد مع اتجاه انتقال الموجة.
النظام غير المحافظ	Non Conservative system	النظام الذي تكون فيه القوى غير محافظة، وفيه تُستنزف الطاقة الحركية للجسم على شكل طاقة حرارية ضائعة؛ أي أن الطاقة الحركية فيه غير محفوظة.
النظام المحافظ	Conservative system	النظام الذي تكون فيه القوى محافظة، ويكون شغلها عبر المسار المغلق يساوي صفرًا؛ أي أن الطاقة الحركية فيه محفوظة.

جداول الاقترانات المثلثيّة

الزاوية (درجة)	الجيب	جيب التمام	الظل
صفر	٠,٠٠٠	١,٠٠٠	٠,٠٠٠
١	٠,٠١٨	١,٠٠٠	٠,٠١٨
٢	٠,٠٣٥	٠,٩٩٩	٠,٠٣٥
٣	٠,٠٥٢	٠,٩٩٩	٠,٠٥٢
٤	٠,٠٧٠	٠,٩٩٨	٠,٠٧٠
٥	٠,٠٨٧	٠,٩٩٦	٠,٠٨٨
٦	٠,١٠٥	٠,٩٩٥	٠,١٠٥
٧	٠,١٢٢	٠,٩٩٣	٠,١٢٣
٨	٠,١٣٩	٠,٩٩٠	٠,١٤١
٩	٠,١٥٦	٠,٩٨٩	٠,١٥٨
١٠	٠,١٧٤	٠,٩٨٥	٠,١٧٦
١١	٠,١٩١	٠,٩٨٢	٠,١٩٤
١٢	٠,٢٠٨	٠,٩٧٨	٠,٢١٣
١٣	٠,٢٢٥	٠,٩٧٤	٠,٢٣١
١٤	٠,٢٤٢	٠,٩٧٠	٠,٢٤٩
١٥	٠,٢٥٩	٠,٩٦٦	٠,٢٦٨
١٦	٠,٢٧٦	٠,٩٦١	٠,٢٨٧
١٧	٠,٢٩٢	٠,٩٥٦	٠,٣٠٦
١٨	٠,٣٠٩	٠,٩٥١	٠,٣٢٥
١٩	٠,٣٢٦	٠,٩٤٦	٠,٣٤٤
٢٠	٠,٣٤٢	٠,٩٤٠	٠,٣٦٤
٢١	٠,٣٥٨	٠,٩٣٤	٠,٣٨٤
٢٢	٠,٣٧٥	٠,٩٢٧	٠,٤٠٤
٢٣	٠,٣٩١	٠,٩٢١	٠,٤٢٥
٢٤	٠,٤٠٧	٠,٩١٤	٠,٤٤٥
٢٥	٠,٤٢٣	٠,٩٠٦	٠,٤٦٦
٢٦	٠,٤٣٨	٠,٨٩٩	٠,٤٨٨
٢٧	٠,٤٥٤	٠,٨٩١	٠,٥١٠
٢٨	٠,٤٧٠	٠,٨٨٣	٠,٥٣١
٢٩	٠,٤٨٥	٠,٨٧٥	٠,٥٥٤
٣٠	٠,٥٠٠	٠,٨٦٦	٠,٥٧٧
٣١	٠,٥١٥	٠,٨٥٧	٠,٦٠٤
٣٢	٠,٥٣٠	٠,٨٤٨	٠,٦٢٥
٣٣	٠,٥٤٥	٠,٨٣٩	٠,٦٥٠
٣٤	٠,٥٥٩	٠,٨٢٩	٠,٦٧٥
٣٥	٠,٥٧٤	٠,٨١٩	٠,٧٠٠
٣٦	٠,٥٨٨	٠,٨٠٩	٠,٧٢٧
٣٧	٠,٦٠٢	٠,٧٩٩	٠,٧٥٤
٣٨	٠,٦١٦	٠,٧٨٨	٠,٧٨١
٣٩	٠,٦٢٩	٠,٧٧٧	٠,٨١٠
٤٠	٠,٦٤٣	٠,٧٦٦	٠,٨٣٩
٤١	٠,٦٥٦	٠,٧٥٥	٠,٨٦٩
٤٢	٠,٦٦٩	٠,٧٣٤	٠,٩٠٠
٤٣	٠,٦٨٢	٠,٧٣١	٠,٩٣٢
٤٤	٠,٦٩٥	٠,٧١٩	٠,٩٦٦
٤٥	٠,٧٠٧	٠,٧٠٧	١,٠٠٠
٤٦	٠,٧١٩	٠,٦٩٥	١,٠٣٦
٤٧	٠,٧٣١	٠,٦٨٢	١,٠٧٢
٤٨	٠,٧٤٣	٠,٦٦٩	١,١١٠
٤٩	٠,٧٥٦	٠,٦٥٦	١,١٥٠
٥٠	٠,٧٦٦	٠,٦٤٣	١,١٩٢
٥١	٠,٧٧٧	٠,٦٢٩	١,٢٣٥
٥٢	٠,٧٨٨	٠,٦١٦	١,٢٨٠
٥٣	٠,٧٩٩	٠,٦٠٢	١,٣٢٧
٥٤	٠,٨٠٩	٠,٥٨٨	١,٣٧٦
٥٥	٠,٨١٩	٠,٥٧٤	١,٤٢٨
٥٦	٠,٨٢٩	٠,٥٥٩	١,٤٨٣
٥٧	٠,٨٣٩	٠,٥٤٥	١,٥٤٠
٥٨	٠,٨٤٨	٠,٥٣٠	١,٦٠٠
٥٩	٠,٨٥٧	٠,٥١٥	١,٦٦٤
٦٠	٠,٨٦٦	٠,٥٠٠	١,٧٣٢
٦١	٠,٨٧٥	٠,٤٨٥	١,٨٠٤
٦٢	٠,٨٨٣	٠,٤٧٠	١,٨٨٠
٦٣	٠,٨٩١	٠,٤٥٤	١,٩٦٣
٦٤	٠,٨٩٩	٠,٤٣٨	٢,٠٥٠
٦٥	٠,٩٠٦	٠,٤٢٣	٢,١٤٥
٦٦	٠,٩١٤	٠,٤٠٧	٢,٢٤٦
٦٧	٠,٩٢١	٠,٣٩١	٢,٣٥٦
٦٨	٠,٩٢٧	٠,٣٧٥	٢,٤٧٥
٦٩	٠,٩٣٥	٠,٣٨٤	٢,٦٠٥
٧٠	٠,٩٤٠	٠,٣٤٢	٢,٧٤٨
٧١	٠,٩٤٦	٠,٣٢٦	٢,٩٠٤
٧٢	٠,٩٥١	٠,٣٠٩	٣,٠٧٨
٧٣	٠,٩٥٦	٠,٢٩٢	٣,٢٧١
٧٤	٠,٩٦١	٠,٢٧٦	٣,٤٨٧
٧٥	٠,٩٦٦	٠,٢٥٩	٣,٧٣٢
٧٦	٠,٩٧٠	٠,٢٤٢	٤,٠١١
٧٧	٠,٩٧٤	٠,٢٢٥	٤,٣٣١
٧٨	٠,٩٧٨	٠,٢٠٨	٤,٧٠٥
٧٩	٠,٩٨٢	٠,١٩١	٥,١٤٥
٨٠	٠,٩٨٥	٠,١٧٤	٥,٦٧١
٨١	٠,٩٨٨	٠,١٥٦	٦,٣١٤
٨٢	٠,٩٩٠	٠,١٣٩	٧,١١٥
٨٣	٠,٩٩٣	٠,١٢٢	٨,١٤٤
٨٤	٠,٩٩٥	٠,١٠٥	٩,٥١٤
٨٥	٠,٩٩٦	٠,٠٨٧	١١,٤٣
٨٦	٠,٩٩٨	٠,٠٧٠	١٤,٣٠
٨٧	٠,٩٩٨	٠,٠٥٢	١٩,٠٨
٨٨	٠,٩٩٩	٠,٠٣٥	٢٨,٦٤
٨٩	١,٠٠٠	٠,٠١٨	٥٧,٢٩
٩٠	١,٠٠٠	٠,٠٠٠	∞

قائمة المراجع

أولًا: المراجع العربية

١ –هشام غصيب، **أصول الميكانيكا الموجية**، الجمعية العلمية الملكية، عمان، ١٩٨٣م.

٢ –معروف الحاج وزملاؤه، **الفيزياء العامة**، دار الفكر، عمان، ١٩٩٠م.

٣ –نبيل اللحام وآخرون، **مقدمة في علم الميكانيكا لطلبة العلوم والهندسة**، جامعة اليرموك ١٩٨٦م.

٤ –كينيث. فورد، **الفيزياء الكلاسيكية والحديثة**، ثلاث مجلدات ترجمة: همام غصيب وعيسى شاهين، وعمر الشيخ، ومحمود الكوفحي وعبد الجواد أبو الهيجاء، مجمع اللغة العربية الأردني، عمان، ١٩٨٧م.

٥ –عيسى أبو سليم ومحمد خريسات، **زلزال١٩٢٧م في مدينة السلط دراسة وثائقية** ، المجلة الأردنية للتاريخ والآثار، المجلّد ٢، العدد ٣ ، ٢٠٠٨ م

ثانيا: المراجع الأجنبية

1- Serway, & Peichner, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, 5th ed.,Sounders College Publishing, 2000.

2- Halliday, David,& others, **Fundamentals of Physics,** 10th ed.,John wiley & sons, Inc 2014.

3- J.Kane, **Physics, 3rd edition,** Wiley and Sons, Inc, 1988

4- R.Serway , **College Physics** 10th edition, Cengage Learning, 2014

5- R.Serway and J. **Faughn, Physics**, Houghton Mifflin Harcourt company, 2012

6- D.Giancoli. **Physics**, 6th ed, Peason Education Limited, 2014

7- H.Young and R. Freedman, **University Physics,with modern Physics,** 12th ed , Pearson, 2008

تَمَّ بِحَمْدِ اللهِ تَعالى