تبدأ هذه الطائرة بالإقلاع. وهي تتسارع وتزداد سرعتها باضطراد كبير. ولكي يتم ذلك؛ يجب التأثير فيها بقوة حسب قانون نيوتن $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$. فما الذي تؤثر فيه هذه القوة؟ يؤثر محركا الطائرة النفاثان بقوة عظيمة في الغازات فيدفعانها باتجاه مؤخرة الطائرة (ويرمز إلى هذه القوة بـ $\vec{\mathbf{F}}_{GP}$). وحسب قانون نيوتن الثالث،فإن هذه الغازات المدفوعة للخلف تؤثر بقوة مساوية ومعاكسة بالاتجاه في الطائرة (باتجاه مقدمتها).و"ردود الفعل " هذه هي القوة المؤثرة في الطائرة. وينتج تسارع الطائرة نحو الأمام عن الغازات، ويرمز إليها بـ $\vec{\mathbf{F}}_{PG}$.

الفصل 4

علم التحريك (الدّيناميكا): قوانين نيوتن في الحركة

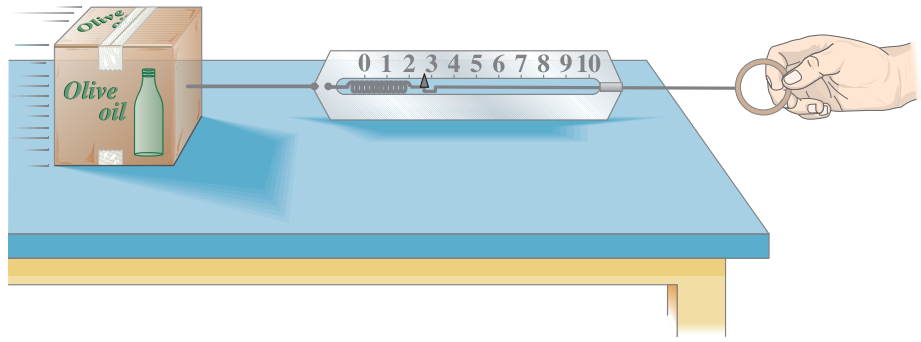
الشكل 4-1 قوة أثرت في عربة مشتريات – في هذه الحالة - بواسطة طفلة.

لقد تناولنا كيفية وصف الحركة بدلالة السرعة المتجهة والتسارع. أما الآن، فسوف نتعامل مع السؤال الآتي: لماذا تتحرك الأجسام بالطريقة التي تتحرك بها: ما الذي يدفع جسما ساكنا إلى البدء بالحركة؟ وما السبب وراء تسارع أو تباطؤ جسم ما؟ وما الأمور المرتبطة بحركة الجسم الدائرية؟ نستطيع أن نجزم بضرورة وجود قوة للإجابة عن كلّ تساؤل تمّ طرحه في هذا السياق. وسوف ندرس في هذا الفصل العلاقة بين القوة والحركة، وهو ما يسمى بموضوع **علم التحريك**.

وسوف نبدأ بأفكار مبدئية عن ماهية القوة، ثم نناقش قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة. ومن ثمَّ نتناول عدة أشكال للقوى، ومن ضمنها قوة الاحتكاك، وقوة جذب الأرض للأجسام. ثم نطبّق بعد ذلك قوانين نيوتن على مسائل واقعية.

1-4 القـوّة

بداية، سوف نتعامل مع القوة على أنها ما يعمل على دفع جسم ما أو سحبه، فعندما تدفع سيارة معطلة، أو حتى عربة مشتريات (الشكل 4 - 1)، فأنت تؤثر في السيارة أو العربة بقوة. وكذلك في الأمثلة التالية: عندما يرفع ماتور مصعدا، أو تدق مطرقة مسمارا، أو يكنس الهواء أوراق الأشجار، فهناك قوة ما تمّ التأثير بها. ونحن نقول بأنّ جسما ما قد وقع أرضا بسبب *جذب الأرض له*.



الشكل 4 - 2 ميزان نابض يستخدم لقياس القوة.

يحتاج الجسم إلى قوة ما كي يبدأ بالحركة من وضع السكون؛ أي أنّ القوة ضرورية للجسم كي يتسارع من السرعة المتجهة الصفرية إلى سرعة متجهة لا تساوي الصفر. أما الجسم المتحرك، فيحتاج أيضا إلى قوة كي تغير من حالته (سرعته المتجهة) سواء قيمةً أو اتجاها.

إنّ إحدى الطرائق المستخدمة لقياس قيمة (أو شدة) القوة تتم بواسطة المقياس الزنبركي (الشكل 4 - 2). عادة ما يتمّ استخدام هذا المقياس النابض لإيجاد وزن الجسم، ونعني هنا بالوزن قوة جذب الأرض المؤثرة في الجسم (البند 4 - 6). ويمكن استخدام هذا المقياس (بعد معايرته) لقياس أنواع أخرى من القوى، مثل قوة السّحب. كما في (الشكل 4-2).

قياس القوة

هناك تأثير مختلف للقوة المؤثرة في عدة اتجاهات، وبكل وضوح فإنّ للقوة اتجاهًا، كما أنّ لها قيمة بالطبع.

ويعتمد تأثير القوة على اتجاه تأثيرها. وبالطبع، فإننا نتعامل مع القوة كمتجه؛ أي أنّ لها اتجاهًا كما أنّ لها قيمة. وهي بذلك تتبع قوانين جمع المتجهات كما تمت مناقشتها في الفصل الثالث. وعليه، نستطيع أن نمثل أيّ قوة بسهم على المخطط البيانيّ، كما عملنا مع السرعة المتجهة، بحيث يدل اتجاه السهم على اتجاه قوة الدفع أو السّحب. أما طول السّهم فيكون متناسبا مع قيمة القوة المؤثرة.

2-4 قانون نيوتن الأول في الحركة

ما العلاقة بين القوة والحركة؟ اعتقد أرسطو (Aristotle 384 – 322 ق م) بأنّ القوة ضرورية لإبقاء الجسم متحركًا على سطح أفقي. فَعَدَّ الحالة الطبيعية للجسم حالة السكون، وأنّ الجسم بحاجة إلى قوة تؤثر فيه لإبقائه متحركا. وكذلك جادل بأنّ سرعة الجسم ستزداد كلما ازدادت القوة المؤثرة فيه.

أرسطو

مقابل

جاليليو

واختلف معه جاليلو (Galilio) بعد حوالي 2000 عام؛ فجادل بأنّ الوضع الطبيعيّ للجسم هو بقاؤه متحركا، وبسرعة متجهة ثابتة، أو بقاؤه ثابتا في موضعه.

ولكي نفهم فكرة جاليليو، فسنعتمد على الملاحظات التالية الناتجة من جسم يتحرك على سطح أفقي: يتطلّب الأمر قوة مناسبة معينة للمحافظة على سرعة ثابتة للجسم عند دفعه على سطح أفقيّ خشن، كما يتطلّب الأمر قوة ذات قيمة أقلّ من سابقتها للمحافظة على السّرعة السابقة نفسها على سطح أفقيّ أملس.

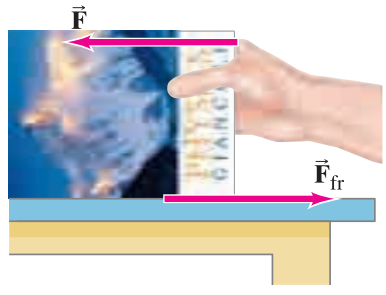
إضافة إلى أنّ وضع طبقة من أيّ مادة ملينة أو من الزيت بين الجسم وسطح الطاولة يؤدي إلى الاستغناء عن أيّ قوة إضافية لتحريك الجسم.

ولاحظ تناقص قيمة القوة المؤثرة عند كلّ حركة لاحقة. أما الخطوة التالية، فسنتخيل أنّ الجسم لن يخضع لأيّ احتكاك نهائيا على سطح الطاولة؛ أي كأنّ سطح الطاولة مدهون بمادة زيتية مثالية . وما أن يتحرك الجسم فوقها، فإنه سيستمر بالحركة فوق سطحها بسرعة ثابتة دون أن يتأثر بأيّ قوة احتكاك. وكمثال على هذا الوضع، خذ كرة حديدية تتدحرج على سطح أفقي صلب، أو قرصا يتحرك على طاولة هوائية بحيث تعمل طبقة الهواء الرقيقة على سطح الطاولة على تقليل الاحتكاك إلى درجة العدم.

كانت هذه عبقرية جاليليو التي جاءت بفكرة انعدام الاحتكاك التي ساعدت على فهم أوسع وأعمق وأدق للعالم الحقيقي من حولنا. وهذه المثالية هي التي قادته إلى استنتاجه المشهور؛ وهو أنّ الجسم المتحرك سيستمر في حركته بسرعة ثابتة في خطّ مستقيم مالم تؤثر فيه قوة. وأنّ الجسم سيبدأ بالتباطؤ عندما تؤثر فيه قوة فقط. وعليه، فسّر جاليليو الاحتكاك على أنه قوة مثل قوتي الدفع والسّحب الاعتياديتين.

الاحتكاك كقوة

يتطلب الأمر قوة من يدك لدفع جسم فوق سطح طاولة، ليسير بسرعة ثابتة بعد التغلب على قوة الاحتكاك (الشكل 4 - 3). فعندما يتحرك الجسم على سطح الطاولة بسرعة ثابتة، تكون قوة الدفع قد عادلت بالمقدار قوة الاحتكاك. ولكن بما أنّ القوتين متعاكستان في الاتجاه، فإنّ محصلة القوى على الجسم (الجمع الاتجاهي للقوتين) ستساوي صفرا. ويُعدّ هذا متوافقًا مع وجهة نظر جاليليو، لجسم يتحرك بسرعة ثابتة دون أن يتأثر بأيّ قوة محصلة



الشكل 4 - 3 تمثل $\vec{F}$ القوة التي يؤثر فيهاالشّخص، في حين تمثّل $\vec{F}_{fr}$ قوة الاحتكاك.

قانون نيوتن الأول في الحركة

بناءً على هذا الأساس الذي وضعه جاليليو، بنى إسحق نيوتن (الشكل 4-4) نظريته العظيمة عن الحركة. وتم تلخيص تحليل نيوتن للحركة في «قوانين الحركة الثلاثة» المشهورة. في عمله العظيم: «المبادئ» (*Principia*) التي نشرت في عام 1687). اعترف نيوتن وأقرّ بعرفانه لجاليليو. وفي الحقيقة، يقترب **قانون نيوتن الأول في الحركة** إلى حدّ كبيرٍ من استنتاجات جاليلو. الذي يعطى كالتالي:

يبقى الجسم على حاله ساكنا، أو يتحرك بسرعة منتظمة في خطّ مستقيم، مالم تؤثر فيه قوة خارجية.

القصور الذاتي

ويعرّف ميل الجسم للبقاء على حالة من السكون أو الحركة المنتظمة في خطّ مستقيم بالقصور الذاتي.

الشكل 4-4
إسحق نيوتن (1642 - 1727)

أطر القصور المرجعية

المثال المفاهيمي 4-1 قانون نيوتن الأول

إن وقوف حافلة مدرسية على نحوٍ مفاجئ يؤدي إلى انزلاق الحقائب المدرسية على أرض الحافلة نحو الأمام. فما القوة المسؤولة عن حركة الحقائب هذه؟

الإجابة: ليس هناك أيّ "قوة" مسؤولة عن هذه الحركة. فقد استمرت الحقائب على حالة الحركة، محافظة على سرعتها (وربما تعمل قوة الاحتكاك على إبطائها)، عندما تناقصت سرعة الحافلة.

أطر القصور المرجعية

نستطيع أن نصرّح بالعبارة التالية من غير تحفظ: من غير الممكن تطبيق قانون نيوتن الأول في الأطر المرجعية جميعها. وعلى سبيل المثال، لو كان الإطار المرجعي ثابتًا داخل سيارة تتسارع، فهناك احتمال أن يبدأ الكوب المثبت على رفّ السّيارة الأمامي بالتحرك باتجاه السائق (علما بأنّ الكوب سيبقى ثابتًا في موضعه طوال فترة تحرك السّيارة بسرعة ثابتة). وقد يبدأ الكوب بالتسارع باتجاه السّائق على الرّغم من عدم تأثره بأيّ قوة في ذلك الاتجاه، إضافة إلى عدم تأثره بأيّ جسم آخر. وبالمثل، ففي الإطار المرجعي للحافلة، كما في (المثال 4-2)، لم تكن هناك أيّ قوة تدفع حقائب الظهر إلى الأمام.

وعليه، فإنّ قانون نيوتن الأول غير صالح، ولا يمكن تطبيقه خلال الأطر المرجعية المتسارعة. وتُسمّى الأطر المرجعية التي لا ينطبق قانون نيوتن الأول عليها بالأطر المرجعية القصورية (للدلالة على إمكانية تطبيق قانون القصور الذاتي خلالها). ونستطيع الافتراض في معظم الأوقات بأنّ الأطر المرجعية الثابتة على الأرض هي أطر قصورية. (علماً بأنّ هذا الكلام غير دقيق تمامًا بسبب دوران الأرض، ومع هذا فهو قريب جدًّا من الحقيقة). ويُعدّ أيّ إطار مرجعي يتحرك بسرعة ثابتة (مثل السيارة أو الطائرة) مقارنة بإطار قصري إطارًا مرجعيًّا قصريًّا. وتُسمّى الأطر المرجعية المتسارعة التي لا نستطيع تطبيق قانون القصور الذاتي من خلالها بالأطر المرجعية اللاقصورية. وللإجابة عن التساؤل حول كيفية أو طريقة التأكد من قصورية إطار مرجعي ما من عدمه؛ نلجأ إلى قانون نيوتن الأول، ونفحص مدى تحقّقه. وعليه، فإنّ قانون نيوتن الأول سيكون له دور رئيس في تعريفنا بأطر القصور المرجعية.

3-4 الكتلة

يرسّخ قانون نيوتن الثاني، الذي سنتعرض له في البند التالي مبدأ الكتلة. حيث استخدم نيوتن كلمة كتلة كمرادف لكمية المادة. وتُعدّ هذه المبادرة بالتسمية غير دقيقة؛ لأنّ مبدأ "كمية المادة" هو نفسه غير معرف بدقة. ولكي نكون أكثر دقة، نستطيع القول بأنّ الكتلة هي مقياس مدى قصور جسم ما. وكلّما ازدادت الكتلة، ازدادت قيمة القوة اللازمة التي تعطي جسم ما تسارعًا معينًا. وأنه من الصعوبة بمكان أن تدفع جسمًا ما ليبدأ حركته من السكون، أو لإيقافه وهو متحرك، أو لتغيّر من سرعته الجانبية بعيدًا عن مساره في خطٍّ مستقيم. وتمتلك الشاحنة قصورًا ذاتيًّا أعلى بكثير ممّا تمتلكه كرة (القاعدة) البيسبول التي تتحرك بالسرعة نفسها. وعليه، فإنّ الشاحنة ستتطلب قوة أعلى بكثير لتتغير سرعتها بمعدل تغير سرعة الكرة نفسه. أي أنّ الشاحنة تمتلك كتلة أكبر. لذا، يجب أن نعرف وحدة جديدة لنتمكن من التعامل مع الكتلة ككمية يمكن قياسها. وبالرجوع إلى الوحدات الدولية، فإنّ وحدة الكتلة هي **الكيلوغرام** (kg) كما تمت مناقشتها في (البند 1-5) من الفصل الأول.

الكتلة كقصور ذاتي

تنويه

الفرق بين الكتلة والوزن

وغالباً ما يتم الخلط بين كلّ من الكتلة والوزن. لذا، فإنّ التمييز بينهما مهم. فالكتلة هي خاصية للجسم نفسه (وهي قياس لقصوره أو "لكمية مادته"). أما على الجانب الآخر، فالوزن هو قوة سحب الجاذبية المؤثرة في الجسم. ولكي نرى الفرق بينهما، سنفترض أننا سنأخذ جسما ما إلى القمر. وهنا سنجد أنّ وزن الجسم على القمر يعادل سدس وزنه فقط على الأرض؛ وذلك لصغر مقدار جاذبية القمر. ومع هذا تبقى كتلة الجسم على القمر كما هي على الأرض لعدم تغير مقدار ما تحتويه من مادة على القمر مقارنة بما تحتويه على الأرض. وعليه، فإنه سيمتلك مقدار القصور نفسه أيضاً (بعدم وجود الاحتكاك) وهذا ما يفرض درجة الصعوبة نفسها في دفعه لبدء الحركة أو التوقف عن الحركة، سواء أكان على القمر أم على الأرض. (سنتكلم أكثر عن الوزن في البند 4-6).

4-4 قانون نيوتن الثاني في الحركة

يخبرنا قانون نيوتن الأول في الحركة أنّ الجسم الساكن يبقى ساكنا، والجسم المتحرك يبقى متحركا بسرعة ثابتة في خطّ مستقيم ما لم تؤثر فيه محصلة قوى خارجية تغير من حالته . ويصبح السؤال الآن هو: ماذا سيحدث لهذا الجسم إذا أثرت فيه محصلة قوى خارجية؟ أدرك نيوتن أنّ إجابة هذا التساؤل هو تغير سرعة الجسم (الشكل 4 - 5). وأنّ تأثر الجسم بمحصلة قوى قد يعمل على زيادة سرعته. وأما إذا كانت هناك محصلة قوى تؤثر في الاتجاه المعاكس، فإنها ستعمل على تقليل سرعة الجسم. وإذا أثرت القوة في الجسم المتحرك في الاتجاه الجانبي، فستعمل هذه القوة على تغيير السرعة المتجهة (وربما ستعمل على تغيير قيمتها أيضا). وبما أنّ التغير في السرعة المتجهة هو التسارع (البند 4-2)، فإننا نستطيع القول *بأنّ محصلة القوى ستسبب تسارعا*.

الشكل 4 - 5 تتسارع الزلاجة بسبب تأثرها بقوة دفع الفريق.

ما العلاقة بين التسارع والقوة بالتحديد؟ تقترح تجارب الحياة اليومية الإجابة عن هذا التساؤل. ولنأخذ بالحسبان القوة الضرورية لدفع عربة عند غياب الاحتكاك. (أما عندما يكون الاحتكاك غير مهملٍ، فخذ بالحسبان محصلة قوى تعادل القوة المؤثرة مطروحًا منها قيمة قوة الاحتكاك) . وعندما تدفع العربة بقوة خفيفة وثابتة لفترة زمنية معينة، ستبدأ العربة بالتسارع من السكون إلى سرعة ما، ولنقل إلى 3 km/h. والآن، إذا دفعت العربة بضعف القوة السابقة، فستصل العربة إلى السرعة السابقة 3 km/h خلال نصف الوقت الذي احتاجت إليه سابقا. أي أنّ التسارع سيصبح ضعف ما كان عليه في الحالة السابقة. والآن، إذا رفعت مقدار القوة المؤثرة إلى ثلاثة أضعاف ما كانت عليه في المرة الأولى، فسيرتفع مقدار التسارع إلى ثلاثة أضعاف الحالة الأولى، وهكذا دواليك. أي أنّ تسارع الجسم يتناسب طردياً * مع قيمة القوة المحصلة المؤثرة. ومع هذا، فإنّ التسارع لا يزال معتمدًا على كتلة الجسم أيضا. وستشعر بالفرق في التسارع الناتج عندما تدفع عربة مشتريات فارغة مقارنة بدفعك العربة نفسها وهي مليئة بالأغراض، وبقوة الدفع السابقة نفسها؛ حيث إن العربة في الحالة الثانية ستتحرك بتسارع أقلّ أو بتباطؤ أعلى. وكلما ازدادت الكتلة، قلّ التسارع للقوة المؤثرة نفسها. وتصبح المعادلة الرياضية كما جادل نيوتن بأنّ تسارع الجسم يتناسب عكسيًّا مع كتلته. ولقد وُجد أنّ هذه العلاقات صحيحة على نحو عام. ويمكن تلخيصها كالتالي :

يتناسب تسارع الجسم طرديًّا مع محصلة القوة المؤثرة فيه، وعكسيًّا مع كتلته، وينطبق اتجاه التسارع مع اتجاه محصلة القوى المؤثرة في الجسم.
وهذا هو قانون نيوتن الثاني في الحركة.

قانون نيوتن الثاني في الحركة

* تظهر مراجعة التناسبية في الفهرس في آخر الكتاب

يمكن كتابة قانون نيوتن الثاني كمعادلة:

$$\vec{\mathbf{a}} = \frac{\Sigma \vec{\mathbf{F}}}{m}$$

القوة المحصلة

حيث تمثل $\vec{\mathbf{a}}$ التسارع، والكتلة m، أما محصلة القوى على الجسم فهي في حين يعني الرمز $\sum$ (سيجما باليونانية) "مجموع"، وتعني $\vec{\mathbf{F}}$ القوة. وعليه، فإن $\Sigma\vec{\mathbf{F}}$ تعني المجموع المتجه للقوى المؤثرة جميعها في الجسم، والتي نعرفها **بمحصلة القوى**. ونعيد ترتيب هذه المعادلة للحصول على العبارة المشهورة لقانون نيوتن الثاني:

قانون نيوتن الثاني في الحركة

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}. \qquad \textbf{(1-4)}$$

تعريف القوة

ويربط قانون نيوتن الثاني وصف الحركة بمسبباتها؛ أي بالقوة. وهو أحد أهم العلاقات الأساسية والجوهرية في الفيزياء. ونستطيع صياغة تعريف أكثر دقة بناءً على قانون نيوتن الثاني للقوة على أنه الفعل *القادر على تسريع الجسم*.

إنّ قوة $\vec{\mathbf{F}}$ كلّها كمية متجهة لها مقدار واتجاه. وأنّ (المعادلة 4-1) هي معادلة متجهة صالحة في أيّ إطار قصوري مرجعي. وعليه، يمكن كتابتها على شكل مركبات خاضعة للإحداثيات الديكارتية كالتالي :

$$\Sigma F_x = ma_x, \qquad \Sigma F_y = ma_y, \qquad \Sigma F_z = ma_z$$

وإذا تمت الحركة على امتداد خط ما (أو في بعد واحد)، فنستطيع عندها التخلّص من الرمز السّفليّ، ونكتب ببساطة $\Sigma F = ma$.

وحدة القوة : النيوتن

وعند استخدام الوحدات الدولية مثل الكيلوغرام للكتلة، نجد أنّ وحدة القوة هي **النيوتن** (N). أي أنّ 1 N هو مقدار القوة الضرورية لإكساب كتلة مقدارها 1 kg تسارعًا مقداره $1\ \text{m/s}^2$. أي أنّ $1\ \text{N} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2$.

أمّا في نظام الوحدات السغثية cgs (سم، جم، ث)، فإنّ وحدة الكتلة هي الجرام (g) كما ذكر سابقًا*. ووحدة القوة هي الداين (*dyne*)، التي تم تعريفها على أنها القوة الضرورية لمنح كتلة مقدارها 1g تسارعًا مقداره $1\ \text{cm/s}^2$. وعليه، فإنّ $1\ \text{dyne}=1\ \text{g.cm/s}^2$. ويمكن بسهولة إثبات أنّ $1\ \text{dyne}=10^{-5}\ \text{N}$.

وحسب النظام البريطاني، فإنّ وحدة القوة هي *الباوند* (وباختصار lb) حيث إن $1\ \text{lb} = 4.4822\text{N} \approx 4.45\ \text{N}$. ووحدة الكتلة هي *السلغ* (*slug*) وتم تعريفها على أنها الكتلة التي ستتسارع بمقدار $1\ \text{ft/s}^2$ نتيجة تأثرها بقوة مقدارها 1 lb. لذا، فإنّ $1\ \text{lb}=1\ \text{slug.ft/s}^2$. ويلخص الجدول 4-1 الوحدات في الأنظمة المختلفة.

وتجدر الإشارة هنا إلى أهمية استخدام نظام واحد للوحدات خلال حلّ أيّ مسألة، علمًا بأنّه يفضّل استخدام نظام الوحدات الدولي. وإذا أُعطيت القوة بالنيوتن والكتلة بالغرامات، فيجب عندها تحويل وحدة الكتلة إلى الكيلوغرام قبل أيّ محاولة لحلّ السّؤال من أجل الحصول على التسارع. وعلى سبيل المثال، فإذا علمت بأنّ القوة 2.0 N تؤثر في امتداد المحور السّيني، وأنّ الكتلة 500 g، فيجب تحويل وحدة الكتلة إلى 0.50 kg. وعليه، فإنّ وحدة التسارع ستعطى بدلالة m/s^2 من قانون نيوتن الثاني (حيث إن $1\ \text{N} = 1\ \text{kg.m/s}^2$):

$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m} = \frac{2.0\ \text{N}}{0.50\ \text{kg}} = \frac{2.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{0.50\ \text{kg}} = 4.0\ \text{m/s}^2$$

الجدول 4 - 1
وحدات الكتلة والقوة

النظام	الكتلة	القوة
SI	الكيلوجرام (kg)	نيوتن (N) $(=\text{kg}\cdot\text{m/s}^2)$
cgs	الجرام (g)	داين $(=\text{g}\cdot\text{cm/s}^2)$
البريطاني	السلج (slug)	باوند (lb)

معامل التحويل : $1\ \text{dyne} = 10^{-5}\ \text{N}$; $1\ \text{lb} \approx 4.45\ \text{N}$.

المثال 2-4 **قدّر** القوة اللازمة لتسريع سيارة سباق

قدّر القوة اللازمة لتسريع: (أ) سيارة كتلتها 1000-g إلى $\frac{1}{2}g$. (ب) تفاحة كتلتها 200-g بالمعدل السابق ذاته.

النهج: نستطيع استخدام قانون نيوتن الثاني لإيجاد محصلة القوى اللازمة لكلّ جسم: حيث إننا نعرف الكتلتين والتسارع. وبما أنّ هذا مقدار تقريبيّ (حيث إنّ $\frac{1}{2}$ لا يُعدّ مقدارًا دقيقًا) فسنقربه إلى رقم مميز واحد.

حل المسألة

استخدم مجموعة وحدات متوائمة

* كن حذرًا ولا تخلط بين g مختصر الغرام و g تسارع الجاذبية الأرضية. ولاحظ أنّ عجلة الجاذبية الأرضية إما أن تكتب مائلة أو غامقة للدلالة على أنها متجه).

الحـلّ: (أ) إن تسارع السيارة هو : $a = \frac{1}{2}g = \frac{1}{2}(9.8\,\text{m/s}^2) \approx 5\,\text{m/s}^2$. ونستخدم قانون نيوتن الثاني للحصول على محصلة القوة الضرورية لهذا التسارع :

$$\Sigma F = ma \approx (1000\,\text{kg})(5\,\text{m/s}^2) = 5000\,\text{N}$$

(وإذا كنت معتادًا على الوحدات البريطانية، ولتحصل على فكرة عمّا تعني 5000-N؛ اقسم قيمة هذه القوة على 4.45 N/lb لتحصل على قوة تعادل 1000 lb تقريبا).

(ب) ولنجد القوة المؤثرة في التفاحة، فإنّ كتلتها $m = 200\,\text{g} = 0.200\,\text{kg}$. وعليه:

$$\Sigma F = ma \approx (0.200\,\text{kg})(5\,\text{m/s}^2) = 1\,\text{N}$$

المثال 4-3 القوة اللازمة لإيقاف السيارة:

ما متوسط محصلة القوة اللازمة لإيقاف سيارة كتلتها 1500-kg تماما من سرعة مقدارها 100 km/h خلال مسافة قدرها 55 m؟

النهج: نستطيع استخدام قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$، لتحديد القوة بمعرفة كلٍّ من كتلة السيارة وتسارعها. وحيث إننا أعطينا الكتلة، فيجب علينا أن نحسب التسارع a. نفترض أنّ التسارع ثابت كي نتمكن من استخدام معادلات الحركة. (المعادلات 2 - 11). لحساب التسارع.

الشكل **6-4** المثال 4 - 3

الحـلّ: نفترض أنّ الحركة على امتداد المحور السيني الموجب (الشكل 6-4). لقد أُعطينا السرعة الابتدائية $v_0 = 100\,\text{km/h} = 28\,\text{m/s}$ (البند 1 - 6). والسرعة النهائية $v = 0$. والمسافة المقطوعة $x - x_0 = 55\,\text{m}$. من (المعادلة 2 - 11 جـ). نحصل على:

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

لذا:

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2(x - x_0)} = \frac{0 - (28\,\text{m/s})^2}{2(55\,\text{m})} = -7.1\,\text{m/s}^2$$

وعليه، فإنّ محصلة القوة الضرورية هي:

$$\Sigma F = ma = (1500\,\text{kg})(-7.1\,\text{m/s}^2) = -1.1 \times 10^4\,\text{N}$$

وتعني الإشارة السالبة هنا أنّ اتجاه تأثير القوة هو بعكس اتجاه السرعة الابتدائية .

ملحوظة: عندما نفترض أنّ التسارع ثابت هنا بالرغم من عدم ضرورة أن يكون هذا صحيحاً، فإننا نقيس تسارعًا متوسطًا لنحصل على محصلة قوى متوسطة (والعكس صحيح)

يُعدّ قانون نيوتن الثاني قابلاً للتطبيق تمامًا مثل قانون نيوتن الأول خلال الأطر المرجعية القصورية فقط (البند 4 - 2). وعلى سبيل المثال، ففي الإطار المرجعي اللاقصوري لسيارة تتسارع، سيبدأ الكوب المثبت على الرّف الأمامي للسيارة بالانزلاق من موضعه والتسارع بالرغم من أن محصلة القوى عليه تساوي صفرًا. وعليه، فإنّ $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$ لن تعمل في هذا الإطار المرجعي المتسارع ولا يجوز تطبيقها هنا.

5-4 قانون نيوتن الثالث في الحركة

القوة المؤثرة في جسم ما والناتجة من تأثير جسم آخر.

يصف قانون نيوتن الثاني في الحركة كيفية تأثير القوى في الحركة من حيث المقدار. ويخطر ببالنا أنّ نتساءل الآن: من أين تأتي هذه القوى؟ تؤكد الملاحظات أنّ القوة المؤثرة في أيّ جسم ناتجة من تأثير جسم آخر. والأمثلة على ذلك كثيرة، ومن ضمنها الحصان الذي يجر العربة، والشخص الذي يدفع عربة المشتريات، والمطرقة التي تدفع مسمارًا، والمغناطيس الذي يجذب ملقط الورق. وفي هذه الأمثلة السابقة جميعها هناك جسم يؤثر بقوة ما في جسم آخر. وبالنظر إلى مثال من هذه الأمثلة السابقة نجد أنّ القوة التي تأثر بها المسمار هي نتيجة تأثير المطرقة.

كان نيوتن متيقنا أنه لا يمكن رؤية الأمور من جانب واحد فقط. فالمطرقة التي تؤثر في المسمار بقوة كما في (الشكل 4 - 7) لابدّ لها وأن تتأثر بالمثل بقوة من المسمار بدلالة التناقص السريع لسرعة المطرقة حتى تصل إلى وضع السكون نتيجة لتلامسهما. إذ من غير الممكن للمطرقة أن تقف بهذه الصورة لولا وجود قوة شديدة تسبب ذلك. وعندها أعلن نيوتن ضرورة معاملة الجسمين بالتساوي.

أي: **مثلما تؤثّر المطرقة بقوة في المسمار، سيؤثر المسمار بقوة في المطرقة. وهذا فحوى قانون نيوتن الثالث في الحركة وأساسه.**

كلما أثر جسم بقوة في جسم آخر، أثر الجسم الآخر بقوة مساوية مقدارًا ومعاكسةً اتجاهًا في الجسم الأول.

وعادةً ما تتم صياغة هذا القانون على النحو التالي: **"لكلّ فعل ردّ فعل مساوٍ له بالمقدار ومعاكس له بالاتجاه"**. وهذا صحيح تماماً. ولكي نبتعد عن أيّ احتمال للفهم الخطأ؛ علينا تذكر أنّ قوة "الفعل" وقوة "ردّ الفعل" تؤثران في جسمين مختلفين.

الشكل 4-8 إذا دفعت بيدك حافة مكتب (يظهر متجه القوة باللون الأحمر) فإنّ المكتب سيدفع يدك في الاتجاه الآخر (تظهر هذه القوة بلون آخر، بنفسجي لكي نتذكر أنّ هذه القوة تؤثر في جسم آخر).

وكدليل على صحة قانون نيوتن الثالث؛ انظر إلى يدك عندما تدفع حافة مكتب (الشكل4-8). ستجد أنّ شكل يدك قد تغير لوهلة، وهو دليل واضح على أنّ هناك قوّةً ما تؤثّر فيها. وسترى العلامة التي تركها المكتب وهو يضغط على يدك كردّة فعل. وتستطيع أيضا أن تشعر بتأثير قوة المكتب في يدك كذلك؛ إنّها مؤلمة!

وكلما دفعت المكتب بقوة أكبر، كانت قوة دفع المكتب على يدك أكبر أيضًا. (ستشعر بالقوى المؤثرة فيك فقط عندما تؤثر بقوة في الجسم الآخر، وستشعر بأنّ الجسم الآخر يدفعك كنتيجة لفعلك "دفعك" أنت).

وكمثال آخر نستعرض فيه قانون نيوتن الثالث، سننظر إلى المتزلجة على الجليد في (الشكل 4-9). إنّ مقدار الاحتكاك بين زلاجتيها والجليد يكاد يكون معدوما، ممّا سيجعلها تتحرك بحرية بعد تأثرها بأيّ قوة.

فعندما تدفع الحائط باتجاه، فإنّ الحائط سيدفعها في الاتجاه الآخر لتبدأ بالتحرك نحو ذاك الاتجاه. كما أنّ القوة التي تؤثر في الحائط لن تجعلها تبدأ بالحركة؛ لأنّ هذه القوة لا تؤثر فيها، بل في الحائط. وهناك شيء آخر يجب أن يؤثر فيها بقوة لكي تبدأ هي بالحركة، ولا يمكن لهذه القوة إلا أن تكون قد نجمت عن الحائط. وهذه القوة التي سيؤثر فيها الحائط على المتزلجة وبحسب قانون نيوتن الثالث ستكافئ بالمقدار وتعاكس بالاتجاه القوة التي أثرت بها في الحائط.

عندما يقذف شخص ما صندوقًا من قارب ساكن، يبدأ القارب بالتحرك، في الاتجاه المعاكس. وبهذا يكون الشّخص قد أثّر بقوة ما في الصندوق. في حين أثر الصندوق بقوة مماثلة بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه في الشخص، وهي القوّة ذاتها التي ستعمل على دفع الشخص (والقارب أيضًا) إلى الخلف قليلاً.

ويمكن تفسير الدّفع الصاروخيّ أيضًا باستخدام قانون نيوتن الثالث (الشكل 4 - 10). ومن المفاهيم العامة غير الصحيحة أنّ تسارع الصّواريخ ما هو إلا نتيجة لاندفاع الغازات من مؤخرة محركاتها لتعمل على دفع الأرض أو الغلاف الجوي في الاتجاه الآخر. وهذا بالطبع غير صحيح. وما يحدث فعلاً هو أنّ محركات الصواريخ تؤثر بقوة شديدة في الغازات فتطردها بعيدة عنها، وتؤثر هذه الغازات بالمقابل بقوة شديدة مكافئة ومعاكسة بالاتجاه في الصّواريخ. وهذه القوة الأخيرة هي المسؤولة عن دفع الصواريخ إلى الأمام – وهي القوة الناتجة من دفع الغازات للصواريخ. وعليه، فإنّ مركبة الفضاء يتم توجيهها في الفضاء الخارجي عن طريق تشغيل محركاتها الصاروخية بعكس اتجاه التسارع المراد اتباعه. وعندما يدفع الصاروخ الغازات في اتجاه ما، تدفع الغازات الصاروخ إلى الخلف بالاتجاه المعاكس.

قانون نيوتن الثالث في الحركة

تنويه

الفعل وردّ الفعل يؤثران في أجسام مختلفة.

الشكل 4 - 7 تدق مطرقة مسمارًا. تؤثر المطرقة في المسمار بقوة، ويؤثر المسمار في المطرقة بقوة مماثلة للخلف. وتعمل القوة الأخيرة على تباطؤ المطرقة مؤدية بها إلى السكون.

الشكل 4 - 9 مثال على قانون نيوتن الثالث في الحركة : عندما تدفع المتزلجة على الجليد الحائط، يدفعها الحائط إلى الخلف وهذه هي القوة التي تكسبها التسارع لتبتعد.

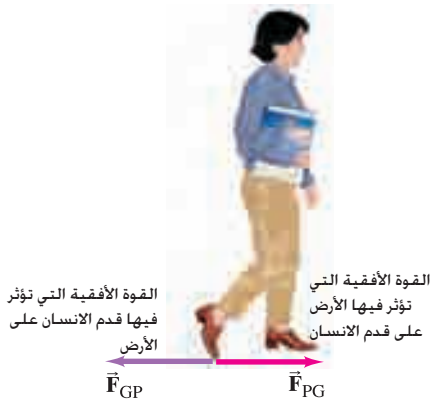
تسارع صاروخ

الشكل 4 - 10 مثال آخر على قانون نيوتن الثالث: إطلاق صاروخ يدفع محرك الصاروخ الغازات إلى الأسفل، وتؤثر الغازات في الصاروخ بقوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه، فتعمل على تسريعه إلى الأعلى. (لا يتسارع الصاروخ كنتيجة لدفع الغازات المنطلقة منه إلى الأرض).

وخذ طريقة سيرنا مثالًا على ذلك: يبدأ الشخص بالمشي عندما يدفع بقدميه الأرض إلى الخلف. لتؤثر الأرض بعد ذلك في الشخص بقوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه، فتدفعه إلى الأمام (الشكل 4 - 11) وهذه هي القوة المؤثرة في الشخص التي تحركه إلى الأمام. (وإذا كنت تشكك في هذا، فجرّب أن تمشي على نحو طبيعي على سطح أملس تمامًا من غير أيّ احتكاك مثل سطح الثلج الزلق والأملس). وبصورة مماثلة تمامًا، فإنّ الطّائر يطير إلى الأمام عندما يؤثر بقوة إلى الخلف في الهواء ليؤثر الهواء في أجنحته بقوة إلى الأمام، فتعمل على دفعه.

كيف يمكن أن تمشي؟

الشكل 4 - 11 نستطيع أن نمشي إلى الأمام؛ لأنه عندما تدفع إحدى القدمين الأرض نحو الخلف، تدفع الأرض القدم إلى الأمام، وتظهر الصورة القوتين المؤثرتين في جسمين مختلفين.



المثال المفاهيمي 4-4

ما الذي يؤثر بقوة في السيارة؟ ما الذي يجعل السيارة تتحرك إلى الأمام؟

الإجابة: من الإجابات العامة هو أنّ محرك السيارة هو الذي يحركها إلى الأمام. ولكن الحل الصحيح ليس بهذه البساطة؛ حيث إنّ محرك السيارة يعمل على دوران عجلاتها. ولكن لو أنّ هذه العجلات كانت تدور على طبقة من الثلج المصقول أو على أرض مغطاة بالوحل، فستبدأ بالدوران في موضعها. وعليه فإنّ هناك حاجة واضحة إلى الاحتكاك. تدفع العجلات الطريق إلى الخلف على الأرض الصلبة ليدفعها الطريق إلى الأمام بسبب الاحتكاك. وحسب قانون نيوتن الثالث، تدفع الطريق العجلات في الاتجاه المعاكس لتحرك السيارة إلى الأمام.

وغالبا ما نميل إلى ربط القوى المؤثرة بالأجسام النشطة فقط، مثل الإنسان والحيوان والآلات، أو الأجسام المتحركة مثل المطرقة. وليس من السهولة أن نتخيل جسمًا ساكنًا، كالحائط، أو المكتب، أو حائط حلبة التزلج، يؤثر في الأجسام الأخرى بأيّ قوة (الشكل 4 - 9). والتفسير الوحيد هو أنه مهما كانت المادة صلبة، فهي ستظهر درجة من اللّيونة إلى حدّ ما. ومثال على ذلك الرباط المطاطي المستطال المؤثر في قطعة من الورق ليجعلها تتسارع في فضاء الغرفة. وأما المواد الأخرى، فقد تكون غير قادرة على الاستطالة الظاهرة مثل الرباط المطاطي، ولكنها في الوقت نفسه ستنضغط أو تتمدد إذا ما تأثرت بقوة ما. ومثلما يؤثر الرباط المطاطي المستطال بقوة، يُؤثر كلّ من المواد الأخرى، الحائط، والمكتب، ومصدّ السيارة نتيجة انضغاطها (أو تمدّدها).

تستطيع الأجسام الساكنة التأثير بقوة (بسبب ليونتها)

ونستطيع من هذه الأمثلة السابقة المذكورة أعلاه رؤية مدى أهمية أن نتذكر ما الجسم الذي تأثر بالقوة؟ وما الجسم الذي سبب أو أثر بهذه القوة؟ ويظهر مدى تأثير القوة في حركة جسم ما فقط عندما تؤثر فيه.

حل المسألة

يجب أن يكون واضحاً ما الجسم الذي سيتأثر بها، وما الجسم الذي يُسببها.

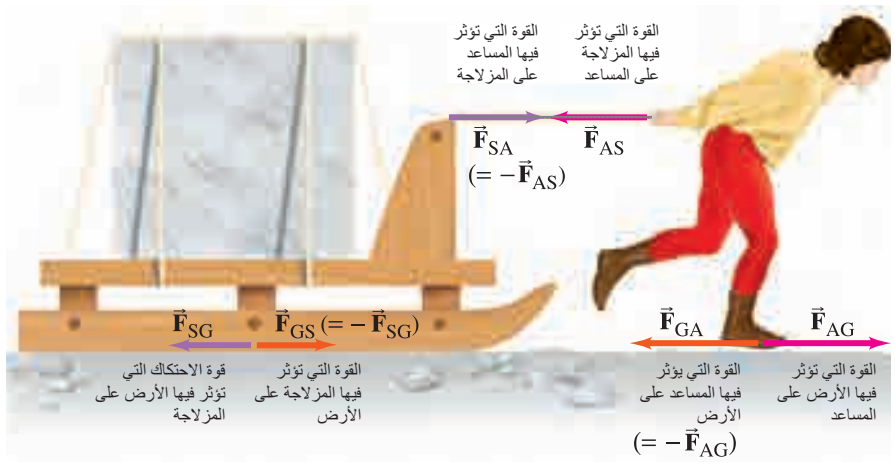
تنطبق $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ على جميع القوى المؤثرة في جسم ما.

أي أنّ القوة لن تؤثر في حركة أيّ جسم ما لم تكن مؤثرة فيه. ولكي نتفادى أيّ التباس؛ يجب أن نحدّد ما إذا كان الجسم يؤثر بقوة ما، أو أنه يتأثر بهذه القوة. أو أنّ الجسم يؤثر بقوة في جسم آخر، أم أن الجسم الآخر يؤثر فيه بقوة. ولذلك يُعدّ من الأفضل استخدام الرموز السفلية للتفريق بين الحالتين السابقتين. وعلى سبيل المثال، فإنّ القوة التي تؤثر بها الأرض (Ground) في الشخص(Person) خلال حركته كما في (الشكل 4 - 11) يمكن أن تعطى بـ $\vec{F}_{PG}$.أما القوة التي يؤثر بها الشخص في الأرض فهي $\vec{F}_{GP}$. وعند تطبيق قانون نيوتن الثالث فإنّ لكلٍّ من $\vec{F}_{PG}$ و $\vec{F}_{GP}$ القيمة نفسها، وأما إشارة السالب فهي للتذكير باتجاه القوتين المتعاكسين.

قانون نيوتن الثالث في الحركة

$$\vec{F}_{GP} = -\vec{F}_{PG} \quad (2\text{-}4)$$

لاحظ أنّ القوتين الظاهرتين في (الشكل 4 - 11) تؤثران في جسمين مختلفين. وعليه، فقد تم استخدام ألوان مختلفة للدلالة على هاتين القوتين. وهاتان القوتان لن تظهرا معًا أبدًا في حدّ جمع القوى حسب قانون نيوتن الثاني $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$. لماذا؟ السبب ببساطة أنهما تؤثران في جسمين مختلفين ∴ تمثل $\vec{a}$ تسارع أحدهما فقط. لذا، فإنّ $\Sigma\vec{F}$ يجب أن تضم القوى المؤثرة في هذا الجسم المتسارع فقط.



الشكل 4 - 12 (المثال 4 - 5) يظهر القوى الأفقية فقط. اختار مصطفى ذو السبعين عاما مكعبا رائعا من الرخام لمنحوتته التالية. ويظهر في الصورة مساعده وهو يجر الرخام خارج المحجر. وتظهر الأسهم الدالة على القوى المؤثرة في المساعد باللون الأحمر (الأحمر الفاتح). أما الأسهم الدالة على القوى المؤثرة في الزلاجة، فتظهر باللون الأرجواني. ولون الأسهم الدالة على القوة المؤثرة في الأرض برتقالي. وأعطيت قوى الفعل وردّ الفعل المتساوية بالمقدار والمتعاكسة بالاتجاه الرموز السفلية نفسها، ولكن بطريقة معكوسة (مثل $\vec{F}_{GA}$ و $\vec{F}_{AG}$) وتم تمييزها بألوان مختلفة لأنها تؤثر في أجسام مختلفة.

المثال المفاهيمي 4-5 إيضاح القانون الثالث

تم تكليف مساعد مصطفى بمهمة إزاحة مكعب الرخام باستخدام الزلاجة (الشكل4-12). ولكن المساعد قال لمديره وهو في حيرة من أمره :"كلما أقوم بالتأثير في الزلاجة بقوة إلى الأمام، تؤثر الزلاجة فيَّ بقوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه إلى الخلف. وعليه، فكيف لي أن أحرّكها من موضعها؟ ومهما حاولت أن أضاعف من قيمة القوة التي أؤثر بها فستكون قيمة ردّ الفعل مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه لتكون محصلة القوى الكلية مساوية للصفر. لذا، لن أستطيع تحريكها أبدا. "هل تُعدّ هذه الحالة من الجهل خطيرة. وضح إجابتك؟

الحل: نعم؛ بالرغم من أنّ الفعل وردّ الفعل متساويان بالمقدار ومتعاكسان بالاتجاه، فإنّ المساعد نسي أنهما يؤثران في جسمين مختلفين. فالقوة الدافعة إلى الأمام (الفعل) هي التي يؤثر بها المساعد في الزلاجة (الشكل4 - 12) أمّا القوة الدافعة إلى الخلف (رد الفعل) فهي التي تؤثر بها الزلاجة في المساعد. ولكي نحدّد ما إذا كان المساعد سيتحرك أم لا؛ علينا أن نحدّد القوى المؤثرة في المساعد فقط، ومن ثَمَّ نطبق $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ حيث $\Sigma\vec{F}$ هي محصلة القوى على المساعد وتمثل $\vec{a}$ تسارع المساعد. أما m فهي كتلة المساعد أيضاً. وهناك قوتان تؤثران في حركة المساعد إلى الأمام، كما هو موضح بالأسهم ذات اللون الأحمر الفاتح (الشكلان 4 - 12 و 4 - 15) وهما: (1) القوة الأفقية $\vec{F}_{AG}$. المؤثرة في المساعد بواسطة الأرض (كلما دفع الأرض بشدة إلى الخلف، دفعته الأرض بشدة إلى الأمام – حسب قانون نيوتن الثالث) : (2) القوة $\vec{F}_{AS}$ التي تؤثر بها الزلاجة في المساعد والعاملة على سحبه إلى الخلف. انظر (الشكل 4 - 13). وإذا دفع الأرض بشدة كافية، فستصبح القوة المؤثرة فيها بواسطة الأرض $\vec{F}_{AG}$ أكبر من قوة سحب الزلاجة له إلى الخلف $\vec{F}_{AS}$. وعليه، سيبدأ المساعد بالتسارع إلى الأمام (قانون نيوتن الثاني). وبالمقابل، ستتسارع الزلاجة إلى الأمام عندما تصبح القوة المؤثرة فيها من المساعد أكبر من قوة الاحتكاك المؤثر فيها إلى الخلف بواسطة الأرض (أي أنه عندما تكون $\vec{F}_{SA}$ أكبر من قيمة $\vec{F}_{SG}$ في الشكل 4 - 12).

حل المسألة

دراسة قانوني نيوتن الثاني والثالث.

الشكل 4 - 13 المثال 4 - 5. القوى الأفقية على المساعد

إنّ استخدام رمزين سفليين لتوضيح قانون نيوتن الثالث هو شيء ليس ذا قيمة، وعادة لن يتم استخدامهما بهذه الصورة. ولكن إذا كان لديك أيّ التباس حول أيّ قوة معطاة، فلك حرية استخدام الرمزين السّفليين، لتفرق بين الجسم الذي يتأثر بالقوة من الجسم الذي يؤثر بقوة. وعادة ما نستخدم رمزًا سفليًّا واحدًا لنشير به إلى القوة التي تؤثر في الجسم المعني.

التمرين أ: تصطدم شاحنة ذات كتلة هائلة وجهًا لوجه مع سيارة سباق صغيرة . (أ) أيّ من السيارتين ستشعر أكثر بقوة التصادم الهائلة؟ (ب) أيهما سيتأثر بأعلى تسارع؟ (جـ) أيّ قانون من قوانين نيوتن مفيد أكثر في الوصول إلى الإجابة الصحيحة؟

6-4 الوزن - قوة الجاذبية والقوة العمودية

كما رأينا في الفصل الثاني، ادعى جاليلو أنّ الأجسام القريبة من سطح الأرض التي تسقط باتجاه سطح الأرض جميعها تسقط بالتسارع $\vec{g}$ نفسه عندما يتم إهمال مقاومة الهواء. وتسمى القوة التي تسبب هذا التسارع *قوة الجاذبية الأرضية أو قوة الجاذبية*. و ما الذي يؤثر بقوة الجاذبية؟

إنها الأرض، كما سنناقش في الفصل الخامس، التي تعمل *رأسيًّا نحو الأسفل باتجاه مركز الأرض. دعنا نطبق قانون نيوتن الثاني على جسم ما كتلته m يسقط بتأثير الجاذبية، ونستخدم $\vec{\mathbf{g}}$ بدلالة $\vec{\mathbf{a}}$ للدلالة على التسارع الناتج من الجاذبية نحو الأسفل. وعليه، يمكن كتابة قوة الجاذبية المؤثرة في جسم ما $\vec{\mathbf{F}}_G$ كالتالي:

الوزن = قوة الجاذبية

$$\vec{\mathbf{F}}_G = m\vec{\mathbf{g}} \qquad \textbf{(3 - 4)}$$

واتجاه هذه القوة إلى الأسفل باتجاه مركز الأرض. عادة تدعى قيمة قوة الجاذبية المؤثرة في جسم ما بالوزن.

وباستخدام الوحدات الدولية**، $g = 9.80\ \text{m/s}^2 = 9.80\ \text{N/kg}$. فإنّ وزن كتلة مقدارها $1.00\ \text{kg}$ على الأرض هو $1.00\ \text{kg} \times 9.80\ \text{m/s}^2 = 9.80\ \text{N}$. وسنهتم بأوزان الأجسام على سطح الأرض على نحو عام، مع ملاحظة أنّ هذه الأوزان تختلف فوق سطح القمر والكواكب الأخرى، أو في الفضاء مقارنة بتلك التي قرب سطح الأرض. وعلى سبيل المثال، فإنّ تسارع الجاذبية قرب سطح القمر يعادل سدس التسارع بالقرب من سطح الأرض، وأنّ كتلة تعادل kg-1.0 ستزن 1.7 N فقط. وبالرغم من أننا لن نستخدم الوحدات البريطانية، فإنه ولأسباب عملية نجد أنّ كتلة مقدارها 1 kg تزن حوالي 2.2 1b. (وعلى سطح القمر، فإنّ 1 kg يزن حوالي 0.4 1b).

تنويه

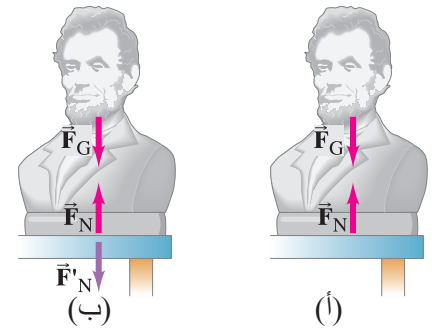
الكتلة مقابل الوزن

ويظهر تأثير قوة الجاذبية في الجسم خلال سقوطه. ونعلم أيضًا أنّ تأثير الجاذبية في الأجسام لا يختفي عندما تكون ساكنة قرب سطح الأرض. وسنحصل على وزن أيّ كتلة ساكنة قرب سطح الأرض باستخدام الميزان الزنبركيّ. وسنجد القوة المؤثرة نفسها في الأجسام والمعطاة في (المعادلة 4-3). ويصبح السؤال الآن : لِمَ لا يتحرك الجسم إذن ؟ ومن قانون نيوتن الثاني الذي ينصّ على أنّ محصلة القوى على الجسم الساكن تساوي صفرا نكتشف ضرورة وجود قوة أخرى تؤثر في الجسم الساكن لتعادل تأثير قوة الجاذبية عليه.

قوة تلامس

ولجسم ساكن على طاولة، فإنّ هذه القوة الأخرى ما هي إلا القوة العمودية التي يؤثر بها سطح الطاولة في الجسم إلى الأعلى، انظر (الشكل 4 - 14 أ). وينضغط سطح الطاولة قليلاً أسفل الجسم، ولكن نظرًا لليونته، فإنه يدفع الجسم إلى الأعلى كما هو موضح. وتسمى القوةُ التي تؤثر بها الطاولة نتيجة لظهورها عند تلامس جسمين قوةَ التلامس (وتُعدّ قوة يدك التي تدفع العربة قوة تلامس أيضًا) وعندما تؤثر قوة التلامس عموديًّا على سطح التلامس، تسمى القوةَ العمودية ("العمودية" تعني رأسية في هذه الحالة). وعليه، يرمز إليها بـ $\vec{\mathbf{F}}_N$ في (الشكل 4 - 14أ).

قوة عمودية



الشكل 4 - 14 (أ) محصلة القوى المؤثرة في جسم ساكن تساوي صفرًا حسب قانون نيوتن الثاني. ولهذا، فإنّ قوة الجاذبية $(\vec{\mathbf{F}}_G)$ المؤثرة إلى الأسفل في الجسم يجب أن تعادل بقوة إلى الأعلى (القوة العمودية $\vec{\mathbf{F}}_N$) تؤثر بها الطاولة في هذه الحالة. (ب) $(\vec{\mathbf{F}}'_N)$ القوة التي تتأثر بها الطاولة بواسطة التمثال وهي ردّ الفعل للقوة $\vec{\mathbf{F}}_N$ حسب قانون نيوتن الثالث. تظهر $(\vec{\mathbf{F}}'_N)$ بلون مختلف لتذكرنا بأنها تؤثر في جسم مختلف). ولا يظهر في الشكل ردّ الفعل للقوة $\vec{\mathbf{F}}_G$

وتظهر في (الشكل 4 - 14أ) قوتان تؤثر كلتاهما في التمثال الذي يبقى ساكنًا؛ حيث إن محصلة القوتين المتجهة يجب أن تساوي صفرا (قانون نيوتن الثاني). وعليه، فإنّ $\vec{\mathbf{F}}_G$ و $\vec{\mathbf{F}}_N$ يجب أن تتساوى قيمتاهما وتتعاكسان في الاتجاه. ولكن لا تُعدّ هاتان القوتان المتساويتان في المقدار والمتعاكستان في الاتجاه هما ما تحدث عنهما نيوتن في قانونه الثالث. وأنّ قوة الفعل وردّ الفعل في قانون نيوتن الثالث تؤثران في جسمين مختلفين، في حين تؤثر القوتان الظاهرتان في (الشكل 4 - 14أ) في الجسم نفسه. ونستطيع أن نسأل لكلّ قوة ظاهرة في (الشكل 4 - 14أ):"ما قوة ردّ الفعل؟" والقوة $\vec{\mathbf{F}}_N$ المؤثرة في التمثال إلى الأعلى هي ناتجة من الطاولة. وردّ الفعل لهذه القوة هي القوة التي يؤثر بها التمثال في الطاولة إلى الأسفل. وهي موضحة في (الشكل 4 - 14 ب). وقد أعطي لها الرمز $\vec{\mathbf{F}}'_N$. وهذه $\vec{\mathbf{F}}'_N$ القوة التي يؤثر بها التمثال في الطاولة هي ردّ الفعل على $\vec{\mathbf{F}}_N$ حسب قانون نيوتن الثالث. أمّا الآن، $\vec{\mathbf{F}}_G$ فما قوة ردّ الفعل على القوة الأخرى المؤثرة في التمثال؛ أي ردّ الفعل على قوة الجاذبية التي تؤثر بها الأرض فيه؟ فهل تستطيع أن تخمن ذلك؟ سنرى في الفصل الخامس أنّ ردّ الفعل هو أيضا قوة جاذبية يؤثر بها التمثال في الأرض.

تنويه

لا يُعدّ الوزن والقوة العامودية زوجاً من الفعل ورد الفعل

* تم ربط مبدأ "الرأسي" بالجاذبية. ويُعدّ أفضل تعريف رأسي هو اتجاه سقوط الأجسام. وعلى الوجه الآخر، فإن السطح "الأفقي" هو السطح الذي لن يبدأ جسم كروي بالتدحرج فوقه : أي أن الجاذبية لن يكون لها أي تأثير. والأفقي عمودي على الرأسي.

** بما أن $1\ \text{N} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2$ (البند 4 - 4)، $1\ \text{m/s}^2 = 1\ \text{N/kg}$.

المثال 4-6 الوزن والقوة العمودية وصندوق:

أهداك صديقك صندوقًا كتلته 10.0 kg وفي داخله هدية سرّيّة. الصندوق ساكن على سطح طاولة أملس (مهمل الاحتكاك) أفقي (الشكل 4 - 15 أ). (أ) حدّد وزن الصندوق والقوة العمودية المؤثرة فيه بواسطة الطاولة. (ب) حدّد القوة العمودية التي يؤثر بها سطح الطاولة في الصندوق بعد أن يدفع صديقك الصندوق بقوة 40.0 N إلى الأسفل كما في (الشكل 4 - 15 ب). (جـ) ما القوة العمودية المؤثرة في الصندوق من سطح الطاولة إذا سحب صديقك الصندوق إلى الأعلى بقوة 40.0 N (الشكل 4 - 15 جـ)؟

النهج: الصندوق ساكن على الطاولة. وعليه، فإنّ محصلة القوى على الصندوق في كلّ حالة تساوي صفرًا (قانون نيوتن الثاني). ويعادل وزن الصندوق mg في الحالات الثلاث جميعها.

الحـلّ: (أ) إنّ وزن الصندوق هو $mg = (10.0\,\text{kg})(9.80\,\text{m/s}^2) = 98.0\,\text{N}$ وتؤثر هذه القوة إلى الأسفل. وأما القوة الأخرى الوحيدة المؤثرة في الصندوق فهي القوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق إلى الأعلى، كما هو موضح في (الشكل 4 - 15 أ). ونختار الاتجاه إلى أعلى على أنه الاتجاه الصّادي الموجب. لذا، فإنّ محصلة القوى ΣF_y على الصندوق هي $\Sigma F_y = F_\text{N} - mg$. وبما أنّ الصندوق ساكن، فإنّ محصلة القوى المؤثرة فيه يجب أن تعادل صفرا (قانون نيوتن الثاني، $\Sigma F_y = ma_y$ و $a_y = 0$). وعليه فإنّ

$$\Sigma F_y = F_\text{N} - mg = 0,$$

ونحصل في هذه الحالة على

$$F_\text{N} = mg$$

وتصبح القوة العمودية على الصندوق، التي تؤثر بها الطاولة 98.0 N إلى الأعلى وتعادل قيمتها وزن الصندوق.

(ب) بما أنّ الصديق يضغط على الصندوق بقوة 40.0 N إلى الأسفل، فإنّ الصندوق سيتأثر الآن بثلاث قوى بدلاً من اثنتين كما هو موضح في (الشكل 4 - 15 ب). ولا يزال وزن الصندوق $mg = 98.0\,\text{N}$. ومحصلة القوة عليه هي $\Sigma F_y = F_\text{N} - mg - 40.0\,\text{N}$ وتعادل الصفر؛ لأنّ الصندوق لا يزال ساكنًا. وعليه، بما أنّ $a = 0$ فإنّ قانون نيوتن الثاني سيعطي:

$$\Sigma F_y = F_\text{N} - mg - 40.0\,\text{N} = 0$$

ونحلّ هذه المعادلة لإيجاد القوة العمودية :

$$F_\text{N} = mg + 40.0\,\text{N} = 98.0\,\text{N} + 40.0\,\text{N} = 138.0\,\text{N}$$

وهي أكبر من تلك في (أ). وستدفع الطاولة بقوة أكبر في الاتجاه المعاكس عندما يؤثر شخص في الصندوق إلى الأسفل؛ أي أنّ القوة العمودية ليست دائما معادلة للوزن.

(جـ) ما يزال وزن الجسم يساوي 98.0N ويؤثر إلى الأسفل. وتؤثر كلّ من القوة العمودية والقوة التي يؤثر بها صديقك في الصندوق إلى الأعلى (الاتجاه الموجب) كما هو موضح في (الشكل 4 - 15 جـ). ولكن الصندوق لا يتحرك من موضعه؛ حيث إن قوة صديقك المؤثرة إلى الأعلى أقلّ من الوزن. وعليه، فإنّ محصلة القوى على الصندوق ستعود إلى الصفر مرة أخرى حسب قانون نيوتن الثاني؛ لأنّ $a = 0$:

$$\Sigma F_y = F_\text{N} - mg - 40.0\,\text{N} = 0$$

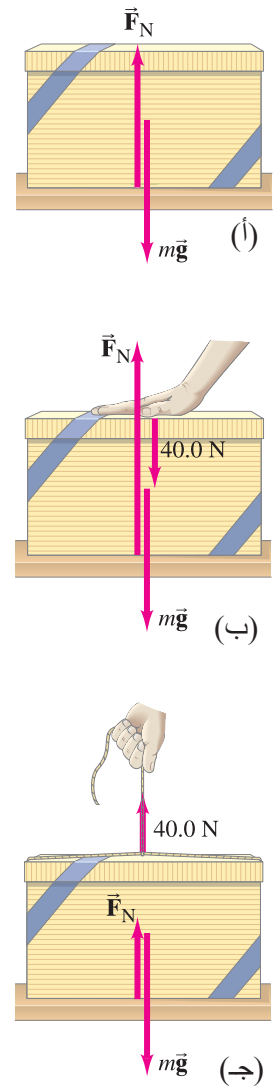
و عليه

$$F_\text{N} = mg - 40.0\,\text{N} = 98.0\,\text{N} - 40.0\,\text{N} = 58.0\,\text{N}$$

أي أنّ الطاولة لا تدفع إلى الأعلى بقوة ضد الوزن الكامل للصندوق، بسبب قوة السحب التي يؤثر بها الصديق إلى الأعلى.

ملحوظة: لا يتغير وزن الصندوق $(= mg)$ سواء دفع الصديق الصندوق أم سحبه. والقوة الوحيدة التي ستتأثر هي القوة العمودية.

تذكر أنّ القوة العمودية هي مرنة في الأصل (تنثني الطاولة قليلاً في (الشكل 4 - 15) أسفل وزن الصندوق). والقوة العمودية في (المثال 4 - 6) هي رأسية وعمودية على سطح الطاولة الأفقي. ومع هذا، فإنّ القوة العمودية ليست رأسية دائمًا؛ فعندما تدفع حائطًا عموديّا على سبيل المثال، فإنّ الحائط يدفعك في الاتجاه المعاكس بقوة عمودية في الاتجاه الأفقي. وبالنسبة إلى جسم موضوع على سطح يميل بزاوية ما عن الأفقي، مثل المتزلج أو سيارة فوق تلّة، فإنّ القوة العمودية تؤثر عموديّا في السّطح؛ أي أنّها لا تكون رأسيّة.



الشكل 4 - 15 (المثال 4 - 6) (أ) يركد صندوق هدايا ساكنا كتلته 10-kg على طاولة. (ب) يضغط شخص إلى الأسفل على الصندوق بقوة 40.0N. (جـ) يسحب شخص الصندوق إلى الأعلى بقوة 40.0N. يظهر تأثير القوى جميعها على امتداد خطّ واحد، علماً بأنها أزيحت جانبا خلال رسمها لتسهيل تمييزها عن بعضها بعضًا. وتم إظهار القوى المؤثرة في الصندوق فقط.

تنويه !

ليس من الضروري أن تتساوى القوة العمودية مع الوزن.

تنويه !

ليس من الضروري أن تكون القوة العمودية $\vec{F}_\text{N}$ رأسية.

المثال 4-7 تسريع صندوق

ماذا يحدث لو أنّ شخصًا سحب الصندوق إلى الأعلى في (المثال 4 - 6 جـ) بقوة تعادل وزن الصندوق أو أكبر منه. وعلى سبيل المثال $F_P = 100.0\,N$ بدلاً من 40.0N الظاهر في (الشكل 4 - 15 جـ)؟

النهج: نستطيع أن نبدأ الحلّ تماما، كما في (المثال 4 - 6). ولكن كن مستعدا لمفاجأة .

الحـــــلّ: إنّ القوى المحصلة على الصندوق هي:

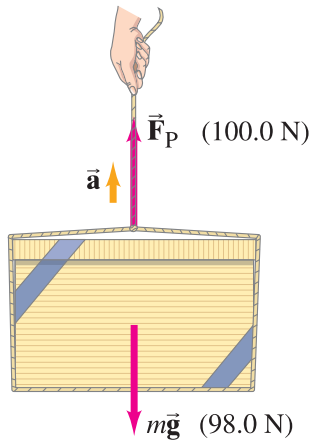
$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= F_N - mg + F_P \\ &= F_N - 98.0\,N + 100.0\,N\end{aligned}$$

وإذا عمدنا إلى مساواة المعادلة السابقة بالصفر (على اعتقاد أنّ التسارع يساوي صفرًا) فسنحصل على $F_N = -2.0\,N$. وهذا كلام غير منطقي؛ لأنّ الإشارة السالبة توحي بأنّ اتجاه F_N إلى الأسفل، ومن الطبيعي ألا تستطيع الطاولة سحب الصندوق إلى هذا الاتجاه (إلا إذا كان الصندوق مصمغًا في الطاولة). وأقلّ مقدار ممكن لـ F_N هو الصفر وهو ما يبدو في هذه الحالة. إنّ حقيقة ما سيحدث للصندوق هو أنه سيتسارع إلى الأعلى؛ لأنّ محصلة القوى عليه في هذا الاتجاه لا تساوي صفرا. ومحصلة القوة على الصندوق (بعد وضع القوة العمودية $F_N = 0$) هي:

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= F_P - mg = 100.0\,N - 98.0\,N \\ &= 2.0\,N\end{aligned}$$

إلى الأعلى. انظر (الشكل 4 - 16). عند تطبيق قانون نيوتن الثاني، سنرى أنّ الصندوق سيبدأ بالتسارع إلى الأعلى:

$$\begin{aligned}a_y &= \frac{\Sigma F_y}{m} = \frac{2.0\,N}{10.0\,kg} \\ &= 0.20\,m/s^2\end{aligned}$$



الشكل 4 - 16 (المثال 4-7).
يتسارع الصندوق إلى الأعلى لأنّ $F_P > mg$.

مثال إضافيّ:

المثال 4-8 الوزن الظاهريّ الضائع

تهبط امرأة كتلتها 65-kg في مصعد يتسارع بهدوء إلى الأسفل بمعدل 0.20 g، وهي تقف على ميزان قراءاته بدلالة kg. (أ) ما وزن المرأة؟ وما قراءة الميزان؟ (ب) ما قراءة الميزان عندما يهبط المصعد بسرعة ثابتة تساوي 2.0 m/s؟

النهج: يظهر (الشكل 4 – 17) القوة المؤثرة جميعها في المرأة (وفقط تلك القوى المؤثرة فيها) . واتجاه التسارع إلى الأسفل، وهو الاتجاه الذي سنتخذه موجبا.

الحل: (أ) من قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$

$$mg - F_N = m\,(0.20g).$$

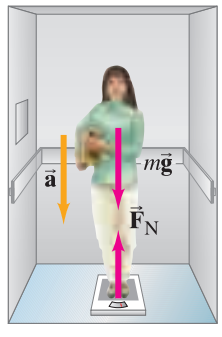
ونحلّ المعادلة لإيجاد F_N :

$$F_N = mg - 0.20mg = 0.80mg,$$

وهي تؤثّر إلى الأعلى. والقوة العمودية $\vec{F}_N$ هي القوة التي يؤثر بها الميزان في الشخص، وهي مساوية للقوة التي تؤثر بها في الميزان، ومعاكسة لها: $F'_N = 0.80mg$ إلى الأسفل ولا يزال وزنها (قوة الجاذبية عليها) ثابتا: $mg = (65\,kg)(9.8\,m/s^2) = 640\,N$ ولكن الميزان يؤثر بقوة تساوي 0.80 mg وستظهر عليه قراءة مقدارها $0.80m = 52\,kg$.

(ب) والآن، لا يوجد تسارع؛ حيث $a = 0$، ووفق قانون نيوتن الثاني، فإنّ $mg - F_N = 0$ و $F_N = mg$. وسيقرأ الميزان الكتلة الحقيقية وهي $65kg$.

ملحوظة: مع أنّ قراءة الميزان في (أ) هي 52 kg (ككتلة ظاهرية)، إلاّ أنّ الكتلة الحقيقية لا تتغير نتيجة التسارع وتبقى 65 kg.

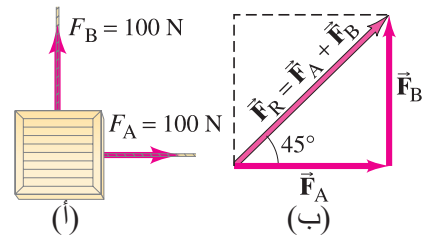


الشكل 4 - 17 (المثال 4 - 8).

7-4 حلّ المسائل باستخدام قوانين نيوتن
مخططات الجسم الحرّ

يخبرنا قانون نيوتن الثالث بأنّ تسارع جسم ما يتناسب طرديا مع محصلة القوى المؤثرة فيه. والقوة المحصلة كما تم ذكرها سابقًا هي الجمع المتجه للقوى المؤثرة جميعها في الجسم. وبالفعل، أظهرت التجارب العديدة بأنّ القوى تجمع مع بعضها بعضًا كمتجهات تخضع بالتمام للقوانين التي تم تطويرها في الفصل الثالث. فعلى سبيل المثال، في (الشكل 4 - 18)، تظهر قوتان متساويتان بالمقدار (كلّ منهما 100 N) تؤثران في جسم، وتصنعان زاوية مقدارها 90° بالنسبة إلى بعضها بعضًا. ومن البديهي أن نرى الجسم يبدأ بالتحرك بزاوية 45°. وهذا نتيجة تطبيق قوانين جمع المتجهات. وبالرجوع إلى نظرية فيثاغورس، فإنّ قيمة محصلة القوى هي:

$$F_R = \sqrt{(100\,\text{N})^2 + (100\,\text{N})^2} = 141\,\text{N}$$



الشكل 4 - 18 (أ) تؤثر قوتان؛ ($\vec{F}_A$)-و ($\vec{F}_B$) - ناتجتان من عاملين A وB في صندوق شحن. (ب) محصلة ($\vec{F}_A$)و ($\vec{F}_B$) - هي ($\vec{F}_R$).

المثال 4-9 جمع متجهات القوة.

احسب مجموع القوتين المؤثرتين في القارب بواسطة العاملين A و B كما في (الشكل 4-19 أ).

النهج: نجمع متجهات القوة كأيّ متجهات أخرى كما تم عرضها في الفصل الثالث. والخطوة الأولى هي اختيار نظام إحداثي xy كما في (الشكل 4 – 19 أ). ومن ثَمَّ تحليل المتجهات إلى مركباتها.

الحلّ: يظهر متجها القوة وقد تم تحليلهما إلى مركبتيهما في (الشكل 4 – 19 ب). ونجمع القوى باستخدام طريقة المركبات. فمركبات ($\vec{F}_A$) هي:

$$F_{Ax} = F_A \cos 45.0° = (40.0\,\text{N})(0.707) = 28.3\,\text{N},$$
$$F_{Ay} = F_A \sin 45.0° = (40.0\,\text{N})(0.707) = 28.3\,\text{N}.$$

ومركبات $\vec{F}_B$ هي

$$F_{Bx} = +F_B \cos 37.0° = +(30.0\,\text{N})(0.799) = +24.0\,\text{N},$$
$$F_{By} = -F_B \sin 37.0° = -(30.0\,\text{N})(0.602) = -18.1\,\text{N}.$$

و F_{By} سالبة؛ لأنها تشير إلى الاتجاه السالب للمحور الصادي. ومركبات محصلة القوى هي (انظر الشكل 4 - 19 جـ):

$$F_{Rx} = F_{Ax} + F_{Bx} = 28.3\,\text{N} + 24.0\,\text{N} = 52.3\,\text{N},$$
$$F_{Ry} = F_{Ay} + F_{By} = 28.3\,\text{N} - 18.1\,\text{N} = 10.2\,\text{N}.$$

ولإيجاد قيمة محصلة القوى، نستخدم نظرية فيثاغورس:

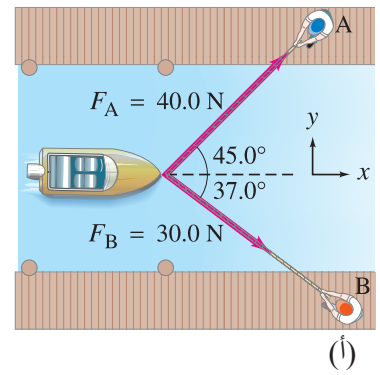
$$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2} = \sqrt{(52.3)^2 + (10.2)^2}\,\text{N} = 53.3\,\text{N}.$$

ويبقى السؤال الوحيد عن الزاوية التي تصنعها محصلة القوى $\vec{F}_R$ مع اتجاه المحور السيني.

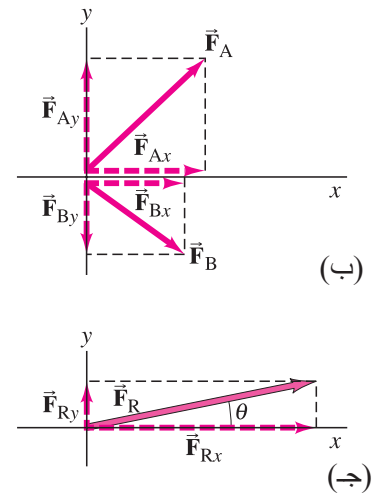
ونستخدم:

$$\tan\theta = \frac{F_{Ry}}{F_{Rx}} = \frac{10.2\,\text{N}}{52.3\,\text{N}} = 0.195$$

وعليه، فإنّ $\tan^{-1}(0.195) = 11.0°$. وبذلك تكون قيمة محصلة القوى المؤثرة في القارب 53.3 N وتؤثر بزاوية 11.0° فوق المحور السيني.



الشكل 4–19 (المثال 4 - 9): متجها قوة يؤثران في قارب

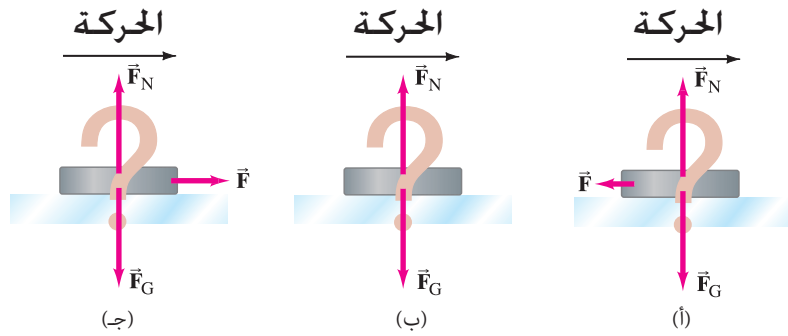


حل المسألة

مخطط جسم- حرّ

تعريف كلّ قوة

وعند حلّ مسائل تضم قوانين نيوتن، فمن الأهمية رسم مخطط يظهر القوى المؤثرة جميعها في كلّ جسم على حدة. ويسمّى هذا المخططُ **مخطّطَ الجسم الحرّ أو مخطّطَ القوى**: اختر جسمًا واحدًا، ومن ثم ارسم سهمًا للدلالة عل كلّ قوة تؤثر فيه. ومثل القوى المؤثرة في الجسم جميعها. ولا تظهر القوة التي يؤثر فيها الجسم المعني في الأجسام الأخرى. وللمساعدة في التعرف وتحديد القوى المؤثرة في الجسم المعني جميعها؛ اسأل نفسك: ما الأجسام الأخرى التي يمكن أن تؤثر فيه. وإذا كانت المسألة تضمّ أكثر من جسم، فإنك ستكون بحاجة إلى مخطط جسم حرّ لكلّ جسم على حدة.



الشكل 4 - 20 (المثال 4 - 10).
أيّ مخطـط من مخططات الجسـم الحـر لقـرص الهـوكي المنزلـق على سـطح أملس هو الصحيح؟

المثال المفاهيمي 4-10 **قرص الهوكي**

ينزلق قرص الهوكي بسرعة ثابتة على سطح ثلجيّ أفقيّ أملس مهمل الاحتكاك. أيّ من المخططات في (الشّكل 4 – 20) يُعدّ مخطط الجسم – الحرّ الصحيح للقرص؟ وما إجابتك عندما يبدأ القرص بالإبطاء؟

الحل: هل اخترت (أ)؟ إذا كانت إجابتك نعم، فهل تستطيع إجابة السؤال: ما الذي يؤثر بالقوة الأفقية $\vec{F}$ في القرص؟ وإذا كانت الإجابة بأنّها القوة الضرورية للإبقاء على الحركة، فاسأل نفسك: ما الذي يؤثر في هذه القوة؟ وتذكر بضرورة وجود جسم آخر ليؤثر بقوة ما ولا يوجد أيّ احتمال لذلك هنا. وعليه، فإنّ (أ) إجابة خطأ. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّ القوة $\vec{F}$ في (الشكل 4 – 20أ) ستسبّب تسارعًا حسب قانون نيوتن الثاني. لذا، فإنّ الإجابة الصحيحة هي (ب) طالما لا يوجد هناك أيّ احتكاك. ولا توجد محصلة قوة تؤثر في القرص وينزلق القرص بسرعة ثابتة فوق السّطح الثلجيّ.

وعلى أرض الواقع، فإنّ أيّ سطح ثلجيّ أملس مهما كان يؤثر بقوة احتكاك مهما صغرت. ولهذا، فإنّ (جـ) هي الإجابة الصحيحة. وتشير قوة الاحتكاك هذه المتناهية في الصغر إلى عكس اتجاه الحركة لتتناقص سرعة القرص ببطء شديد.

ونعرض الآن ملخصًا مختصرًا لطريقة حلّ المسائل المتعلقة بقوانين نيوتن.

طريقة حل المسائل	قوانين نيوتن ومخططات الأجسام الحرة
1. ارسم مخططًا للحالة. **2.** ادرس كل جسم على حدة، ثمّ ارسم **مخطط جسم – حر** لهذا الجسم على حدة مظهراً القوى جميعها المؤثرة في الجسم متضمنًا القوى المجهولة جميعها التي يجب أن تحددها. ولا تظهر أي قوة يؤثر بها هذا الجسم في الأجسام الأخرى. ارسم سهمًا لكل قوة بدقة متناهية ليعكس قيمتها واتجاهها. وارمز لكل قوة بدلالة مصدر هذه القوة، سواء كانت الجاذبية أو الشخص أو الاحتكاك، وهكذا دواليك. وإذا كان النظام يتكون من عدة أجسام، فارسم مخطط جسم – حر لكل منهم على حدة، موضحاً القوى المؤثرة جميعها في كل جسم (القوى المؤثرة فيها فقط). ويجب أن تكون واضحًا لكل قوة: ما القوة التي تؤثر في أي جسم؟ وما الجسم الذي يؤثر في هذه القوة؟	ويمكن ضم القوى التي تؤثر في جسم ما في المعادلة $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ لذلك الجسم. **3.** يتضمن قانون نيوتن الثاني متجهات، وعليه فمن الضروري تحليل هذه المتجهات إلى مركباتها، **واختيار** المحاور السينية والصادية بأفضل طريقة لتسهيل العمليات الحسابية. وعلى سبيل المثال، غالباً ما يتم اختصار الوقت عند اختيار أحد المحاور باتجاه التسارع. **4. طبق قانون نيوتن الثاني** لكل جسم على حدة في الاتجاهين السيني والصادي. أي اربط المركبة السينية لمحصلة القوة بمركبة التسارع في الاتجاه السيني حسب المعادلة التالية $\Sigma F_x = ma_x$، واكمل الحل بالنسبة إلى المركبة الصادية بالمثل تمامًا. **5. حل** المعادلة أو المعادلات لإيجاد المجاهيل.

وعليك عدم التعامل مع هذه التعليمات لحلّ المسائل على أنها وصفة سحرية. ولكنها ملخّص للأمور الواجب عملها لدفعك إلى التفكير في الاتجاه الصحيح لحلّ السؤال.

وضع سهم قوة على المخططات

وعندما نهتم بالحركة الانتقالية، نرسم القوى المؤثرة في الجسم المعني جميعها وكأنها تؤثر في مركز الجسم؛ أي أننا نتعامل مع الجسم وكأنه نقطي. وهذا الاعتبار لن يكون صحيحًا إذا كان السؤال يحتوي على حركة دورانية أو على اتزان سكونيّ؛ لأنه في هاتين الحالتين يكون موضع تأثير القوة مهمًا جدّا كما سنرى في الفصلين الثّامن والتّاسع.

وسنفترض في الأمثلة التالية أنّ السّطوح جميعها ملساء لدرجة يمكن عندها إهمال أيّ احتكاك. (تمّ مناقشة الاحتكاك والأمثلة المحتوية عليه في البند 4 – 8).

المثال 4-11 سحب صندوق العجائب

افرض أنّ زميلتك طلبت إليك أن تفحص الصندوق (كتلته = 10.0-kg) الذي حصلت عليه (المثال 4 –6 الشكل 4 – 15) لتخمين ما في داخله. فأجبتها: "لا مانع لديّ. اسحبي الصندوق باتجاهك". لتسحب الصندوق باتجاهها بواسطة الحبل المثبت فيه. كما هو مبين في (الشكل4 – 21 أ) فوق سطح الطاولة الأملس. إذا كانت قوة السحب المؤثرة في الصندوق $F_P = 40.0\ N$ ، وكان خط عملها يميل بزاوية $30.0°$ كما هو موضح. فاحسب: (أ) تسارع الصندوق. (ب) قيمة القوة العمودية F_N التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق. وأهمل الاحتكاك.

النهج: سنتبع تعليمات حلّ المسائل كما وردت في الصفحة السابقة

الحلّ:

1. ارسم مخططًا سريعًا: الحالة موضحة في (الشكل 4 – 21 أ) وهي تظهر الصندوق والقوة المؤثرة فيه من الشّخص F_P.

2. مخطط الجسم الحرّ: يظهر (الشكل 4 – 21 ب) مخطط الجسم الحرّ للصندوق. ولرسمه بطريقة صحيحة؛ تم إظهار القوى المؤثرة جميعها في الصندوق. وهي القوى المؤثرة فيه فعليًا فقط. وهي قوة الجاذبية $m\vec{g}$ ، والقوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة $\vec{F}_N$ ، والقوة التي يؤثر بها الشخص $\vec{F}_P$ ، وبما أننا مهتمّون بالحركة الانتقالية فقط. فسنظهر القوى الثلاث وكأنها تؤثر في نقطة واحدة. كما في (الشكل 4 - 21 جـ).

3. اختيار المحاور وتحليل المتجهات: بما أننا نتوقع أن تكون الحركة أفقية. فسنعمل على اختيار المحور السّينيّ أفقيًا والمحور الصّادي عموديًا.

وعليه. فإنّ مركبات قوة السحب (40.0 N) هي :

$$F_{Px} = (40.0\ N)(\cos 30.0°) = (40.0\ N)(0.866) = 34.6\ N,$$
$$F_{Py} = (40.0\ N)(\sin 30.0°) = (40.0\ N)(0.500) = 20.0\ N.$$

أما مركبات القوى $\vec{F}_N$ و $m\vec{g}$ في الاتجاه السّينيّ الأفقيّ فتساوي صفرًا. لذا. فإنّ المركبة الأفقية لمحصلة القوة هي F_{Px}.

4. (أ) **طبّق قانون نيوتن الثاني** لتحدّد المركبة السّينية (باتجاه x) للتسارع:

$$F_{Px} = ma_x$$

5. (أ) **حلّ:**

$$a_x = \frac{F_{Px}}{m} = \frac{(34.6\ N)}{(10.0\ kg)} = 3.46\ m/s^2$$

ولهذا. فإنّ تسارع الصندوق هو $3.46\ m/s^2$ إلى اليمين.

(ب) والآن. سنحاول إيجاد F_N .

4. (ب) **طبّق قانون نيوتن الثاني** في الاتجاه الصّاديّ (y) مع اعتبار الموجب إلى الأعلى:

$$\Sigma F_y = ma_y$$
$$F_N - mg + F_{Py} = ma_y$$

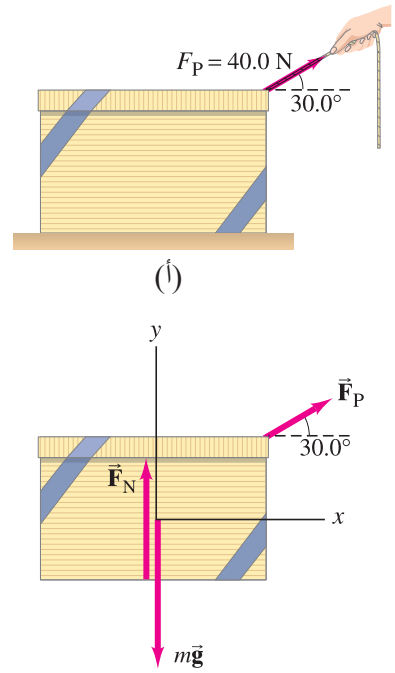
5. (ب) **حلّ:** نحسب الوزن $mg = (10.0\ kg)(9.80\ m/s^2) = 98.0\ N$ ومن الخطوة الثالثة أعلاه: $F_{Py} = 20.0\ N$. وبما أنّ $F_{Py} < mg$ ، فإنّ الصندوق لن يتحرك رأسيًا. لذلك $a_y = 0$. وعليه

$$F_N - 98.0\ N + 20.0\ N = 0$$

أي:

$$F_N = 78.0\ N$$

ملحوظة : بما أنّ F_N أقلّ من الوزن. فإنّ الطاولة لن تدفع الصندوق الكلّيّ إلى الأعلى؛ بسبب تأثير سحب الشّخص للصندوق إلى الأعلى.



الشكل 4 - 21 (أ) سحب الصندوق، (المثال 4 - 11). (ب) مخطط الجسم - الحرّ للصّندوق. (جـ) مخطط الجسم - الحرّ، مفترضا أنّ القوى جميعها تؤثر في نقطة واحدة (للحركة الانتقالية فقط وهو ما نتعامل معه الآن).

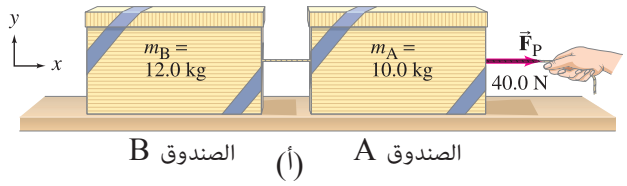
الشّدّ في حبل مطاوع

عندما يسحب حبل مطاوع جسما ما. يقال بأنّ هذا الحبل خاضع **للشّدّ**. وأنّ القوة التي يؤثر بها الحبل في الجسم هي الشّدّ F_T. وعندما يكون الحبل مهمل الكتلة. فإنّ القوة التي يؤثر بها قرب أحد طرفيه تنتقل بلا أيّ اضمحلال إلى الأجزاء المجاورة للحبل جميعها وعلى امتداده حتى طرفه الآخر. لماذا؟ لأنّ $\Sigma\vec{F} = m\vec{a} = 0$ للحبل إذا كانت كتلته تساوي الصفر (أو مهملة) بغض النظر عمّا هي $\vec{a}$.

وعليه. فإنّ القوى التي تسحب الحبل من أقصى طرفيه ستلغي بعضها بعضًا (F_T و $-F_T$). لاحظ أنّ الحبال المطاوعة قادرة على السّحب فقط. وهي لا تستطيع أن تدفع بسبب انحنائها.

حل المسألة

تستطيع الحبال أن تسحب لا أن تدفع، يظهر الشّدّ على امتداد الحبل.

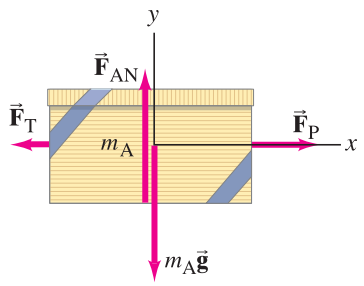


الشكل 4 - 22 (المثال 4 - 12). (أ) رُبِطَ الصّندوقان A و B أفقيًا بواسطة حبل. ويسحب شخص الصندوق A أفقيًا بقوة $F_P = 40.0\,N$. (ب) مخطط الجسم الحرّ للصندوق A. (جـ) مخطط الجسم الحرّ للصندوق B.

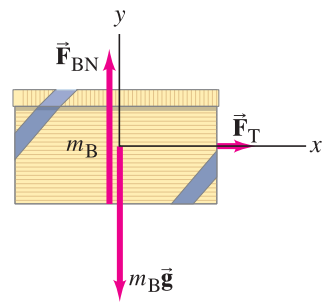
يتعلق المثال التالي بصندوقين تم ربطهما بحبل. ونستطيع أن نشير إليهما كنظام. فالنظام هنا هو أيّ مجموعة مكونة من جسم أو عدة أجسام نختارها للدراسة.

المثال 4-12

صندوقان يرتبطان بحبل: رُبط الصندوقان A و B بحبل خفيف الوزن، ووضعا على طاولة ملساء (عديمة الاحتكاك). وكانت كتلتا الصّندوقين 12.0 kg و 10.0 kg على الترتيب. تم التأثير في الصندوق ذي الكتلة 10.0-kg بقوة أفقية F_P مقدارها 40.0 N، كما هو موضح في (الشكل 4 – 22 أ). أوجد: (أ) تسارع كلّ من الصندوقين. (ب) الشّدّ في الحبل الذي يربط الصّندوقين.



(ب)



(جـ)

النهج: سنسرّع النهج لأنّنا لن نذكر خطوات الحلّ بالتفصيل كما فعلنا في الأمثلة السابقة وبما أنّ النظام يتكون من صندوقين (أي جسمين). فإنّنا بحاجةٍ إلى رسم مخطط جسم – حرّ لكلّ منهما على حدة. ولرسمهما بالصورة الصحيحة: يجب أن نحدد القوى المؤثرة في كلّ منهما، ثم نطبق قانون نيوتن الثاني لكلّ جسم منفرد. يؤثر الشخص بقوة F_P في الصندوق A، في حين يؤثر الصندوق A بقوة F_T في حبل الربط. ويؤثر حبل الربط بقوة معاكسة ومساوية بالقيمة لـ F_T في الصندوق A (قانون نيوتن الثالث). يوضح (الشكل 4 – 22 ب) هاتين القوتين الأفقيتين المؤثرتين في الصندوق A، بالإضافة إلى قوة الجاذبية $m_A\vec{g}$ إلى الأسفل والقوة العمودية $\vec{F}_{AN}$ التي تؤثر بها الطاولة إلى الأعلى. سوف نهمل كتلة الحبل لأنّه خفيف. وعليه، فإنّ الشّدّ عند نهايتي الحبل متساو. ويؤثر الحبل بقوة F_T في الصندوق B. يظهر (الشكل 4 – 22 جـ) القوتين المؤثّرتين في الصندوق B وهما $\vec{F}_T$ و $m_B\vec{g}$، والقوة العمودية $\vec{F}_{BN}$. وبما أنّ الحركة أفقية، فسنختار الاتجاه السّينيّ (x) إلى اليمين.

الحل: (أ) نطبق $\Sigma F_x = ma_x$ للصندوق A:

$$\Sigma F_x = F_P - F_T = m_A a_A \qquad [\text{الصّندوق A}]$$

ونكتب للصندوق B حيث المركبة الأفقية الوحيدة هي F_T:

$$\Sigma F_x = F_T = m_B a_B \qquad [\text{الصّندوق B}]$$

وبما أنّ الصندوقين متصلان ببعضهما بعضًا، فإنهما سيتسارعان بالمعدل a نفسه طالما بقي الحبل مشدودًا بينهما. وعليه، فإنّ $a_A = a_B = a$. ونستطيع الآن أن نعوض في المعادلتين السابقتين بدلالة الكتلة $m_A = 10.0\,kg$ والكتلة $m_B = 12.0\,kg$. ومن ثم نجمعهما للتخلّص من أحد المجهولين (F_T) للحصول على:

$$(m_A + m_B)a = F_P - F_T + F_T = F_P$$

أو

$$a = \frac{F_P}{m_A + m_B} = \frac{40.0\,N}{22.0\,kg} = 1.82\,m/s^2$$

وهذا هو المطلوب.

حل المسألة
تحليل بديل

حلّ بديل: كان بالإمكان الوصول إلى النتيجة السابقة نفسها لو أخذنا من البداية نظامًا واحدًا يتكون من الكتلة $m_A + m_B$ التي تؤثر فيها محصلة قوة أفقية F_P. (إنّ قوى الشد F_T تعدّ قوى داخلية للنظام، وعند جمعها ستلغي بعضها بعضًا كي يكون إسهامُها في محصلة القوى المؤثرة في النظام الكليّ صفرًا).

(ب) ومن المعادلة أعلاه للصندوق B $(F_T = m_B a_B)$ فإنّ الشّدّ في الحبل هو

$$F_T = m_B a = (12.0\,kg)(1.82\,m/s^2) = 21.8\,N$$

تنويه !
استخدم لأيّ جسم القوى المؤثرة فيه فقط حسب المعادلة $\Sigma F = ma$

وعليه، فإنّ F_T أقل من $(= 40.0\,N)F_P$ كما كان متوقعًا؛ لأنّ F_T تعمل على تسريع m_B فقط.

ملحوظة: قد يتبادر إلى الذهن للوهلة الأولى أنّ القوة F_P التي يؤثر بها الشخص، تؤثر في الصندوقين A و B. ولكن هذا الافتراض غير صحيح؛ حيث تؤثر F_P في الصندوق A فقط. وهي تؤثر في الصندوق B من خلال الشّدّ في الحبل F_T الذي يؤثر في الصندوق B ويسارعه.

أمثلة إضافية:

سنقدم الآن أمثلة أخرى محلولة لمساعدتك في التمرن على حل مسائل غاية في التنوع.

المثال 4-13 المصعد والوزن المضاد (آلة آتوود).

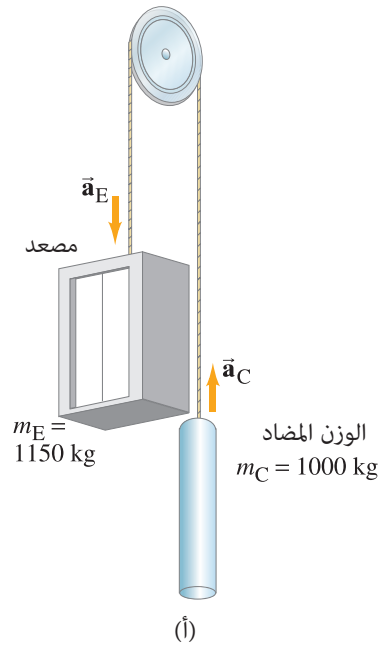
يوضح (الشكل 4 – 23 أ) نظاماً معلقاً بواسطة حبل يمر فوق بكرة ويتكون من جسمين، ويشار إليه أحياناً بآلة آتوود. خذ بنظر الاعتبار مصعدًا حقيقيًا (m_E) والوزن المضاد له (m_C). ومن أجل التخفيف من الشغل اللازم بذله بواسطة المحرك لرفع المصعد وإنزاله بأمان، فقد تم جعل الكتلتين متساويتين (m_E و m_C). وعادة نهمل المحرك عند التعامل مع هذا النظام. إضافة إلى افتراضنا بأنّ كتلة الحبل مهملة، وكذلك إهمال أي احتكاك ناتج من البكرة أيضاً. وتُعدّ هذه الافتراضات كافية للتأكيد على أن الشد F_T في الحبل له القيمة نفسها على جانبي البكرة.دع كتلة الوزن المضاد $m_C = 1000\ \text{kg}$. وافرض أن كتلة المصعد وهو فارغ تعادل 850 kg. أما كتلته وهو يحمل أربعة ركاب فهي $m_E = 1150\ \text{kg}$. واحسب عندما تكون: $m_E = 1150\ \text{kg}$:
(أ) تسارع المصعد. (ب) الشد في الحبل.

النهج: سنحتاج هنا أيضا إلى تطبيق قانون نيوتن الثاني لكل جسم على حدة؛ حيث يتكون النظام من جسمين(كتلتين). وتؤثر قوتان في كل جسم هما: قوة الجاذبية إلى الأسفل والشد في الحبل إلى الأعلى ($\vec{\mathbf{F}}_T$). ويظهر (الشكلان 4 –23 ب و جـ) مخططي جسم حر للمصعد (m_E) والوزن المضاد ($m_C g$). وسيتسارع المصعد الأثقل بينهما إلى الأسفل، في حين سيتسارع الوزن المضاد إلى الأعلى. وسيتساوى تسارعهما بالمقدار (نفترض عدم تمدد الحبل). ونحسب الوزن المضاد:
$m_C g = (1000\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 9800\ \text{N}$ وعليه، فإن F_T ستكون أكبر من 9800 N (لكي تتمكن m_C من التسارع إلى الأعلى). أما بالنسبة إلى المصعد:
$m_E g = (1150\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 11{,}300\ \text{N}$. التي يجب أن تكون أكبر من F_T لكي تتسارع m_E إلى الأسفل؛ فـــإن حساباتنا يجب أن تعطي F_T بين القيمتين 9800 N و 11,300 N.

الحـــل: (أ) نطبق قانون نيوتن الثاني للحصول على F_T، وكذلك على التسارع a:
$\Sigma F = ma$ لكل جسم على حدة. ونختار الاتجاه الموجب إلى الأعلى (y) لكلا الجسمين. وعليه، فإن $a_C = a$ و $a_E = -a$ حيث تتسارع m_C إلى الأعلى، وتتسارع m_E إلى الأسفل.
وعليه
$$F_T - m_E g = m_E a_E = -m_E a$$
$$F_T - m_C g = m_C a_C = +m_C a$$
ونستطيع أن نطرح المعادلة الأولى من الثانية لنحصل على:
$$(m_E - m_C)g = (m_E + m_C)a$$
حيث a هي المجهول الوحيد، نحل المعادلة لإيجاد قيمة a
$$a = \frac{m_E - m_C}{m_E + m_C}\,g = \frac{1150\ \text{kg} - 1000\ \text{kg}}{1150\ \text{kg} + 1000\ \text{kg}}\,g = 0.070\,g = 0.68\ \text{m/s}^2$$
ويتسارع المصعد (m_E) إلى الأسفل (ويتسارع الوزن المضاد m_C إلى الأعلى) بمعدل:
$$a = 0.070g = 0.68\ \text{m/s}^2$$
(ب) يمكن الحصول على الشد في الحبل F_T باستخدام إحدى المعادلتين $\Sigma F = ma$، وبالتعويض عن قيمة $a = 0.070g = 0.68\ \text{m/s}^2$.
$$F_T = m_E g - m_E a = m_E(g - a)$$
$$= 1150\ \text{kg}\,(9.80\ \text{m/s}^2 - 0.68\ \text{m/s}^2) = 10{,}500\ \text{N},$$
$$F_T = m_C g + m_C a = m_C(g + a)$$
$$= 1000\ \text{kg}\,(9.80\ \text{m/s}^2 + 0.68\ \text{m/s}^2) = 10{,}500\ \text{N},$$
وهي متطابقة. وكما توقعنا، فإن الإجابة تقع بين 9800 N و 11,300 N.

ملحوظة: نستطيع التأكد من المعادلة g لتسارع a في هذا المثال، ونعوض: $m_E = m_C$ فنحصل على تسارع $a = 0$ كما هو متوقع. وكذلك إذا كانت إحدى الكتلتين تساوي صفرا (ولنضع $m_C = 0$، فإن الكتلة الأخرى $(m_E \neq 0)$ ستتسارع بمقدار يمكن التنبؤ به من المعادلة؛ أي بمعدل $a = g$ كما هو متوقع أيضاً.

تطبيق الفيزياء
المصعد (كآلة آتوود)



الشكل 4 -23 (المثال 4 - 13) (أ) آلة آتوود ممثلة بنظام المصعد والوزن المضاد. (ب) و (جـ) مخططات جسم-حر للجسمين.

حل المسألة

تأكد من نتائجك باختبارها في حالات يمكن التنبؤ بحلولها وإجاباتها بسهولة.

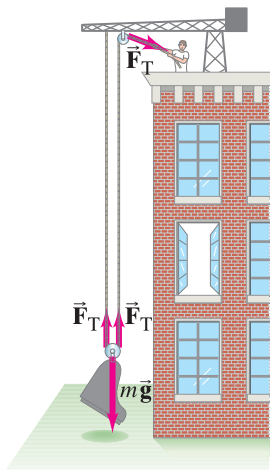
المثال المفاهيمي 4-14

فوائد البكرة. يحاول عامل نقل رفع آلة البيانو (بهدوء) إلى شقة في الطابق الثاني (الشكل 4 – 24). ويستخدم لإنجاز هذا حبلاً يلف حول بكرتين كما هو موضح. ما القوى التي يجب أن يؤثر فيها على الحبل ليرفع بيانو وزنه 2000 N بهدوء؟

الإجابة: يمكن اعتبار قيمة قوة الشد F_T خلال الحبل متساوية عند أي نقطة على امتداد الحبل في حالة إهمال كتلة الحبل. ولاحظ أولاً القوى المؤثرة في البكرة السفلية بالقرب من البيانو؛ حيث يسحب وزن البيانو البكرة إلى الأسفل خلال الحبل القصير. أما الشد في الحبل الملتف حول البكرة فيسحب إلى الأعلى مرتين: مرة خلال كل جانب من جانبي البكرة. ونطبق قانون نيوتن الثاني على ثنائي البيانو – البكرة (وكتلته m):

$$2F_T - mg = ma$$

ولرفع البيانو بسرعة ثابتة (نضع $a = 0$ في هذه المعادلة) وعليه. نحتاج إلى شد في الحبل. ويكون السحب المؤثر في الحبل $F_T = mg/2$. ويستطيع عامل النقل أن يؤثر بقوة تعادل نصف وزن البيانو. ونقول إن البكرة وفرت فائدة **ميكانيكية مضاعفة**؛ لأن عدم وجود البكرة يرغم عامل النقل على أن يؤثر بضعف القوة السابقة.



الشكل 4 - 24 (المثال 4 - 14)

المثال 4-15 إخراج السيارة من الوحل.

لإخراج سيارتها العالقة في الوحل؛ ربطت طالبة دراسات عليا في الفيزياء مصد سيارتها بحبل متين. وربطت الطرف الآخر للحبل بجلمود صخر، كما هو مبين في(الشكل 4 – 25أ). ومن ثم سحبت الحبل من منتصفه بأقصى قوة ممكنة: $F_P \approx 300\ \text{N}$ تقديرًا. ولتبدأ السيارة بالتحرك من موضعها عندما أصبحت الزاوية التي يصنعها الحبل θ حسب تقديرها خمس درجات (انظر الشكل). ما القوة التي يؤثر بها الحبل في السيارة؟ اهمل كتلة الحبل.

النهج: لاحظ أولاً أنّ الشدّ في الحبل هو دائمًا على امتداد الحبل. حيث إنّ أيّ مركبة عمودية على الحبل ستعمل على ثني الحبل (كما هو موضّح هنا كنتيجة لتأثير $\vec{\mathbf{F}}_P$). وبكلمات أخرى: يستطيع الحبل أن يدعم قوة شد على امتداد طوله فقط. نجعل $\vec{\mathbf{F}}_{BR}$ و $\vec{\mathbf{F}}_{CR}$ القوتين المؤثرتين في الجلمود والسيارة نتيجة الشد في الحبل، كما هو موضّح في(الشكل 4–25أ). ودعنا نختار أن ننظر إلى القوى المؤثرة في جزء صغير جداً من الحبل عند الدفع. يظهر مخطط الجسم- الحر في (الشكل 4–25ب) القوة $\vec{\mathbf{F}}_P$ كما يوضح الشد في الحبل (لاحظ بأننا استخدمنا قانون نيوتن الثالث): $\vec{\mathbf{F}}_{RC} = -\vec{\mathbf{F}}_{CR}$, $\vec{\mathbf{F}}_{RB} = -\vec{\mathbf{F}}_{BR}$. ولا يزال التسارع سيعادل الصفر خصوصاً عندما تبدأ السيارة بالتحرك.

الحل: وعند التعويض في المركبة السينية (x) للمعادلة $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}} = 0$ المطبقة على الجزء الصغير من الحبل (الشكل 4 – 25 ب) نحصل على :

$$\Sigma F_x = F_{RB}\cos\theta - F_{RC}\cos\theta = 0$$

وعليه، فإن $F_{RB} = F_{RC}$. وتمثل هذه القوى مقدار الشد في الحبل، وسنرمز إليها بـ F_T. وعليه، نستطيع أن نكتب $F_T = F_{RB} = F_{RC}$. أمّا في الاتجاه الصادي(y)، فإنّ القوى المؤثّرة هي F_P ومركبات كل من F_{RB} و F_{RC} التي تشير إلى الاتجاه الصادي السالب $(-y)$ (وكلّ منها يعادل $F_T \sin\theta$). وعليه، فإنّ المركبة الصادية (y) للمعادلة: $\Sigma\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\mathbf{a}}$ هي:

$$\Sigma F_y = F_P - 2F_T\sin\theta = 0$$

ونحل المعادلة من أجل F_T بعد أن نعوض $\theta = 5°$ و $F_P \approx 300\ \text{N}$ لإيجاد F_T:

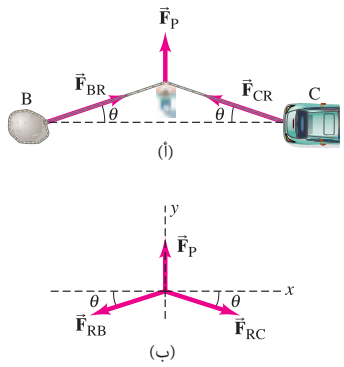
$$F_T = \frac{F_P}{2\sin\theta} \approx \frac{300\ \text{N}}{2\sin 5°} \approx 1700\ \text{N}$$

وعندما أثرت خريجة الفيزياء النبيهة بقوة 300 N في الحبل، نتجت قوة لتؤثر في السيارة بمقدار 1700 N؛ أي أنها كانت قادرة على مضاعفة جهدها بهذه الطريقة بما يقارب ستة أضعاف.

ملحوظة: لاحظ التماثل في هذه المسألة، الذي يضمن لنا أن : $F_{RB} - F_{RC}$.

ملحوظة: قارن بين (الشكلين4–25أوب). ولاحظ أننا لا نستطيع تطبيق قانون نيوتن الثاني باستخدام (الشكل4–25أ)؛ لأن متجهات القوى لا تؤثر في الجسم نفسه. ولكننا عندما نختار جزءًا صغيرًا جدًا من الحبل، ونعتبره الجسم المعني، ونطبق قانون نيوتن الثالث (وفي هذه الحالة نعتبر أن الجلمود والسيارة هما اللذان سيؤثران في الحبل بقوتين F_{RB} و F_{RC}) فسنرى عندها أن القوى جميعها تؤثر في الجسم نفسه.

كيف تخرج من الوحل



الشكل 4 - 25 (المثال 4 - 15).
(أ) إخراج السيارة من الوحل مظهرًا القوى المؤثرة في الجلمود والسيارة بواسطة الشخص. (ب) مخطط الجسم الحر : القوى على جزءٍ صغير جدًا من الحبل.

حل المسألة

استخدم أي تماثل قائم لتسهيل المسألة.

8-4 مسائل تتضمن الاحتكاك والمنحدرات

الاحتكاك

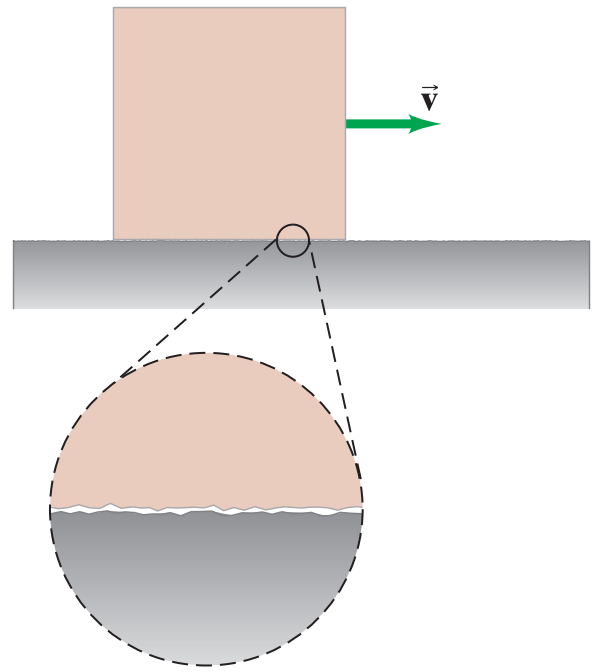
لقد أهملنا الاحتكاك حتى هذه اللحظة، علمًا بأن أخذه بنظر الاعتبار ضروري في معظم الحالات العملية. وهناك احتكاك بين أي سطحين صلبين؛ لأنه وبالرغم من ظهور السطوح على أنها ملساء تمامًا، فالحقيقة أنها خشنة، خصوصًا إذا ما نظر إليها على المقياس المجهري (الشكل 4 – 26). وعندما نحاول زلق جسم ما على سطح آخر، فإن النتوءات المجهرية ستمانع الحركة. هذا ولم يتم التوصل حتى الآن إلى فهم حقيقي كامل حول ما يحدث على المستوى المجهري. ويعتقد أن ذرات نتوء أحد السطحين تقترب كثيرًا من ذرات السطح الآخر لدرجة تجعلها قادرة على "الترابط" تحت تأثير قوى التجاذب الكهربائية ليصبح السطحان وكأنهما قد التحما مع بعضهما بعضًا. ويعدّ انزلاق جسم ما على أي سطح عادة عملًا غير مستقرٍّ بسبب الاعتقاد بتكوّن بعض الروابط وتكسرها. وعندما يتدحرج جسم كروي على سطح ما، فإنّ الاحتكاك لن يختفي تمامًا، بل تبقى له قيمة وإن كانت صغيرة جدًّا في هذه الحالة. ويطلق على هذا الاحتكاك الكروي "احتكاك التدحرج"، وهو أقل بكثير مقارنة بالاحتكاك الناتج من حركة الجسم المنزلق على السطح.

وسنركز الآن على الاحتكاك الناتج من الانزلاق، الذي يسمى **الاحتكاك الحركي** (وجاءت كلمة حركي من اليونانية).

وعندما ينزلق جسم على امتداد سطح خشن، فإن قوة الاحتكاك الحركي تؤثر بعكس اتجاه سرعة الجسم. وتعتمد قيمة قوة الاحتكاك الحركي على طبيعة السطحين المنزلقين. وقد لوحظ عملياً أن قوة الاحتكاك تتناسب طرديًّا مع القوّة العموديّة بين السطحين"تقريبًا" ، وهي عموديّة على سطح تلاقيهما المشترك (انظر الشكل 4 – 27). وفي حالاتٍ كثيرة، لا تعتمد قوة الاحتكاك بين السطوح الصلبة على مساحة سطح التلاقي الكلية؛ أي أن قوة الاحتكاك على الكتاب ستكون هي نفسها تقريبًا، سواء انزلق الكتاب على سطحه الكامل أو على جانبه، طالما أن الكتاب من كلّ جوانبه على الدرجة نفسها من النعومة. ونأخذ نموذجًا سهلًا للاحتكاك مفاده أن قوة الاحتكاك لا تعتمد على المساحة، لنكتب بعد ذلك التناسب بين قوة الاحتكاك F_{fr} والقوة العمودية F_N على شكل معادلة بعد إدخال ثابت التناسب μ_k:

$$F_{fr} = \mu_k F_N$$

ولا تُعدّ هذه العلاقة قانوناً جوهرياً، بل علاقة تجريبية بين قيمة قوة الاحتكاك F_{fr} التي تؤثر باتجاه مواز للسطحين، وقيمة القوة العمودية F_N التي تؤثر باتجاه عمودي على السطحين. وهي لا تُعدّ معادلة متجهة بسبب تعامد القوتين على بعضهما بعضًا. ويدعى الحد μ_k بمعامل الاحتكاك الحركي الذي تعتمد قيمته على طبيعة السطحين. ويعرض (الجدول 4 – 2) قيماً مقيسة لسطوح مختلفة. وهي بالطبع قيم تقريبية لاعتماد μ على مدى جفاف السطوح أو رطوبتها، ودرجة تدليكها أو حفها، ودرجة خشونتها وعلى عدة عوامل أخرى. ومع هذا، فإن μ_k لا تعتمد على سرعة الانزلاق أو مساحة التلاقي.

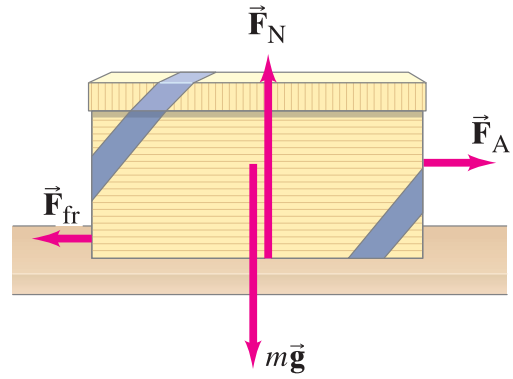


الشكل 4 - 26 جسم يتحرك إلى اليمين فوق طاولة أو فوق أرض. المتلاقيان خشنان في المقياس المجهري على أقل تقدير.

الاحتكاك الحركي

$\vec{F}_{fr} \perp \vec{F}_N$

الشكل 4 - 27 عندما يسحب جسم ما بواسطة قوة مؤثرة ($\vec{F}_A$) في سطح ما، فإن قوة الاحتكاك $\vec{F}_{fr}$ ستعاكس الحركة. وتتناسب قيمة $\vec{F}_{fr}$ طرديًا مع قيمة القوة العمودية (F_N)



الجدول 4 - 2 معاملات الاحتكاك*

السطوح	معامل الاحتكاك السكوني μ_s	معامل الاحتكاك الحركية μ_k
خشب فوق خشب	0.4	0.2
ثلج فوق ثلج	0.1	0.03
فلز فوق فلز (مزيت)	0.15	0.07
فولاذ فوق فولاذ (غير مزيت)	0.7	0.6
مطاط فوق خرسانة جافة	1.0	0.8
مطاط فوق خرسانة رطبة	0.7	0.5
مطاط فوق سطوح أخرى صلبة	1–4	1
تفلون فوق تفلون في الهواء	0.04	0.04
تفلون فوق خرسانة في الهواء	0.04	0.04
كرات تحميلية مزيتة	<0.01	<0.01
سائل أغشية المفاصل(في الأطراف البشرية)	0.01	0.01

* القيم التقريبية، وتستخدم كدليل فقط.

وما تمت مناقشته إلى الآن هو الاحتكاك الحركي الناتج من انزلاق سطح فوق آخر. وهناك أيضاً **الاحتكاك السكوني** الذي يشير إلى قوة موازية لسطحين قد تنشأ بالرغم من عدم انزلاق أي منهما على الآخر. ولنفترض أن هناك جسماً ما كالمكتب يركد ساكناً فوق أرض أفقية. وإذا لم يتم التأثير في المكتب بأي قوة أفقية، فلن يكون هناك أي احتكاك. ولكن عندما تدفع المكتب ويبقى ساكناً في موضعه، فلا بد لك أن تستنتج عندها من وجود قوة أخرى تؤثر في المكتب في الاتجاه المعاكس لتبقيه في موضعه بلا حراك (فتكون القوة المحصلة المؤثرة فيه تساوي صفرا). وهذه القوة ما هي إلا قوة الاحتكاك السكوني التي يُؤثر بها سطح الأرض في المكتب. وعندما تدفع المكتب بقوة أكبر من غير أن يتحرك من موضعه، فهو دلالة على ازدياد قيمة قوة الاحتكاك السكوني. وإذا دفعته بقوة كافية فسيبدأ المكتب بالحركة من موضعه ليبدأ عندها تأثير قوة الاحتكاك الحركي. وتكون عند تلك النقطة قد تجاوزت القيمة العظمى لقوة الاحتكاك السكوني التي تعطى كالتالي : $F_{fr}(max) = \mu_s F_N$ حيث تمثل μ_s معامل الاحتكاك السكوني (الجدول 4 – 2). وبما أنه قيمة قوة الاحتكاك السكوني تتغير من الصفر وحتى هذه القيمة العظمى، فتكتب:

احتكاك سكوني

$$F_{fr} \leq \mu_s F_N$$

وغالباً ما تلاحظ أنه من الأسهل أن تبقي جسماً ثقيلاً يستمر في الانزلاق من أن ترغمه على أن يبدأ عملية الانزلاق. وهذا يتلاءم مع كون μ_s أكبر على نحو عام من μ_k (انظر الجدول 4 – 2).

مثال 4-16 الاحتكاكان السكوني والحركي

يركد صندوق الهدايا (كتلته 10.0-kg) على سطح أرضية على نحو أفقي. افترض أن معامل الاحتكاك السكوني $\mu_k = 0.30$. حدد قوة الاحتكاك F_{fr} المؤثرة في الصندوق إذا كانت قيمة القوة الأفقية الخارجية المؤثرة فيه هي : (أ) 0. (ب) 10 N. (جـ) 20 N. (د) 38 N. (هـ) 40 N.

النهج: لا يمكن الجزم مباشرة فيما إذا كنا نتعامل مع قوة احتكاك سكوني أم مع قوة احتكاك حركي، أو أن الجسم سيبقى ثابتاً، أم أنه سيتسارع.

وعليه، فنحن بحاجة إلى رسم مخطط جسم حر، ونحدد في كل حالة ما إذا كان الجسم سيبدأ بالحركة أم لا باستخدام قانون نيوتن الثاني. وأمّا القوى التي تؤثر في الجسم فهي الجاذبية $m\vec{\mathbf{g}}$، والقوة العمودية التي تؤثر فيها الأرضية $\vec{\mathbf{F}}_N$، والقوة الأفقية المؤثرة $\vec{\mathbf{F}}_A$، وقوة الاحتكاك $\vec{\mathbf{F}}_{fr}$ كما هو موضح في (الشكل 4 – 27).

الحل: يظهر في (الشكل 4 – 27) مخطط الجسم الحر. ولا توجد حركة في الاتجاه الرأسي؛ حيث يعطي قانون نيوتن الثاني في هذا الاتجاه: $\Sigma F_y = ma_y = 0$ ويخبرنا بأنّ: $F_N - mg = 0$.

وعليه، فإن القوة العمودية هي:

$$F_N = mg = (10.0\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 98\,\text{N}$$

(أ) وبما أنه لا توجد أي قوة خارجية F_A مؤثرة في هذه الحالة الأولى، فإن الصندوق لن يتحرك من موضعه، وتكون $F_{fr} = 0$.

(ب) إن قوة الاحتكاك السكوني ستمانع أي قوة مؤثرة، وحتى قيمة عظمى تعطى حسب العلاقة التالية :

$$\mu_s F_N = (0.40)(98\,\text{N}) = 39\,\text{N}$$

وعندما تكون قيمة القوة المؤثرة هي $F_A = 10\,\text{N}$، فإن الصندوق لن يتحرك من موضعه. حيث: $\Sigma F_x = F_A - F_{fr} = 0$. وعليه $F_{fr} = 10\,\text{N}$.

(جـ) إن قوة مؤثرة قيمتها 20 N هي قوة غير كافية لتحريك الصندوق. وعليه، فستكون $F_{fr} = 20\,\text{N}$ القوة التي ستوازن القوة المؤثرة.

(د) إن القوة المؤثرة $F_A = 38\,\text{N}$ لا تزال غير كافية لتبدأ بتحريك الصندوق. وعليه فإن قوة الاحتكاك تكون قد ازدادت إلى 38 N، ويبقى الصندوق ساكناً في موضعه.

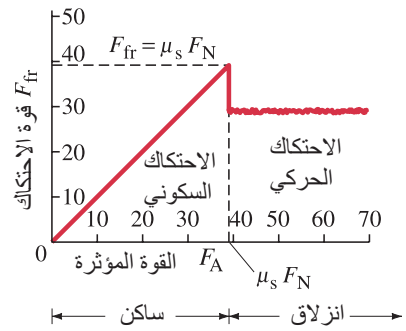
(هـ) أما قوة بمقدار 40 N، فهي كافية لبدء الحركة؛ لأنها أكبر من القيمة العظمى للاحتكاك السكوني، $\mu_s F_N = (0.40)(98\,\text{N}) = 39\,\text{N}$ وسنناقش الآن الاحتكاك الحركي الذي تعطى قيمته كالتالي:

$$F_{fr} = \mu_k F_N = (0.30)(98\,\text{N}) = 29\,\text{N}$$

ونتكلم الآن عن محصلة (أفقية) للقوى تؤثر في الصندوق، وقيمتها $F = 40\,\text{N} - 29\,\text{N} = 11\,\text{N}$ ليبدأ الصندوق بالتسارع بمعدل:

$$a_x = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{11\,\text{N}}{10\,\text{kg}} = 1.1\,\text{m/s}^2$$

وتستمر هذه الحالة وهذا التسارع طالما بقيت القوة المؤثرة 40 N. ويظهر (الشكل 4 – 28) منحنى

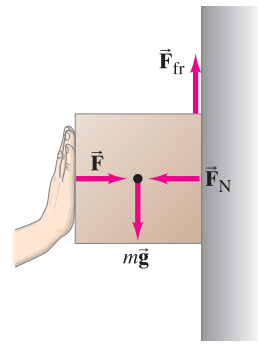


الشكل 4 - 28 (المثال 4 - 16). قيمة قوة الاحتكاك كدالة في القوة الخارجية المؤثرة في جسم ساكن بداية. وتزداد قيمة الاحتكاك السكوني خطيا لتتعادل مع الازدياد في قيمة القوة المؤثرة، إلى أن تعادل قيمة القوة المؤثرة $\mu_s F_N$. فإذا ازدادت قيمة القوة المؤثرة على هذا المقدار، فإن الجسم يبدأ بالتحرك من موضعه، لتنخفض عندها قيمة قوة الاحتكاك إلى قيمة ثابتة تقريبًا ومميزة للاحتكاك الحركي.

المثال المفاهيمي 4-17 صندوق ملامس لحائط:

تستطيع أن تدفع صندوقًا أفقيًّا وبشدّةٍ ليلامس حائطًا خشنًا (الشكل 4 – 29) وتمنعه من الانزلاق إلى الأسفل. كيف ينعكس تطبيق القوة أفقياً على منع جسم ما من التحرك رأسياً؟

الإجابة: لن يكون هذا ممكناً لو كان الحائط زلقاً؛ فنحن بحاجة إلى الاحتكاك. ومع هذا سيبدأ الصندوق بالانزلاق ما لم تكن قوة الدفع كافية؛ حيث إن القوة الأفقية المؤثرة تولد قوة عمودية ليؤثر بها الحائط في الصندوق. وعندها ستتعادل قوة الجاذبية mg والمؤثرة إلى الأسفل مع قوة الاحتكاك المؤثرة إلى الأعلى، والتي تتناسب قيمتها مع القوة العمودية. وكلما زاد الدفع زادت قيمة F_N، لتزيد معها F_{fr}. وإذا لم تدفع بقوة كافية، فإن $mg > \mu_s F_N$ وسيبدأ عندها الصندوق بالانزلاق إلى الأسفل.



الشكل 4 - 29 (المثال 4 - 17).

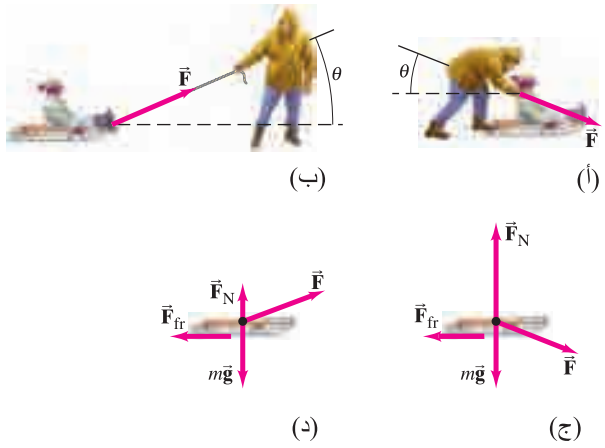
أمثلة إضافية

سنقدم الآن أمثلة أخرى محلولة لمساعدتك على حل المسائل.

المثال المفاهيمي 4-18 دفع الزلاجة أم سحبها؟

إذا أرادت أختك الصغيرة ركوب زلاجة ، فما الخيار الأفضل والأسهل لك وأنت تقف على الأرض: دفع الزلاجة أم سحبها؟ انظر (الشكلين 4 – 30 أ وب). افترض الزاوية θ نفسها في الحالتين.

الإجابة: دعنا نرسم مخططي جسم - حر للثنائي الزلاجة – الأخت، كما هو موضح في (الشكلين 4 – 30 جـ و د). يُظهر المخططان القوة التي تؤثر أنت بها $\vec{F}$ (المجهولة)، والقوة العمودية $\vec{F}_N$، وقوة الثلج، وقوة الاحتكاك $\vec{F}_{fr}$، وقوة الجاذبية $m\vec{g}$. (أ) إذا دفعتها وكانت $\theta > 0$ فستكون هناك مركبة رأسية لقوتك إلى الأسفل. وعليه، فإن القوة العمودية التي تؤثر بها الأرض إلى الأعلى (الشكل 4 – 30 جـ) ستكون أكبر من mg (حيث تمثل m كتلة الأخت بالإضافة إلى كتلة الزلاجة). (ب) أما إذا سحبتها، فسيكون هناك مركبة رأسية لقوة سحبك إلى الأعلى. وعليه، فإن القوة العمودية F_N ستصبح أقل من mg (الشكل 4 – 30 د). وبما أن قوة الاحتكاك تتناسب طردياً مع القوة العمودية، فإن F_{fr} ستكون أقل في حالة السحب. وعليه، فإنك ستحتاج إلى التأثير بقوة أقل في حالة سحبها.



الشكل 4 - 30 (المثال 4 - 18).

المثال 4-19 السحب بوجود الاحتكاك

سُحب صندوق كتلته 10.0-kg على امتداد سطح أفقي بواسطة قوة F_P مقدارها 40.0 N أثرت بزاوية 30.0°. وهذا مماثل تماما (للمثال 4 – 11) مع فارق وجود احتكاك. ونفترض أن معامل الاحتكاك الحركي 0.30. احسب التسارع.

النهج: يشبه مخطط الجسم – الحر ما تم عرضه في (الشكل 4 – 21) مع وجود قوة إضافية واحدة وهي الاحتكاك. انظر (الشكل 4 – 31).

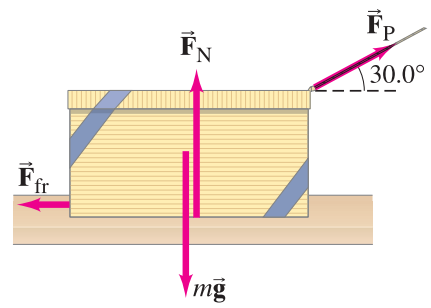
الحل: الحسابات في اتجاه (y) الرأسي كما ورد في (المثال 4 – 11) حيث رأينا أن: $F_{Py} = 20.0\,\text{N}$, $F_{Px} = 34.6\,\text{N}$ والقوة العمودية $F_N = 78.0\,\text{N}$.

ونطبق الآن قانون نيوتن الثاني في اتجاه (x) الأفقي (الموجب لليمين) مضيفين قوة الاحتكاك:

$$F_{Px} - F_{fr} = ma_x$$

ويكون الاحتكاك حركياً ما دام $F_{fr} = \mu_k F_N$ أقل من $F_{Px}\,(=34.6\,\text{N})$ ويعطى كالتالي:

$$F_{fr} = \mu_k F_N = (0.30)(78.0\,\text{N}) = 23.4\,\text{N}$$



الشكل 4 - 31 (المثال 4 - 19)

وعليه، فإن تسارع الصندوق:

$$a_x = \frac{F_{Px} - F_{fr}}{m} = \frac{34.6\,\text{N} - 23.4\,\text{N}}{10.0\,\text{kg}} = 1.1\,\text{m/s}^2$$

وفي غياب الاحتكاك، كما رأينا في (المثال 4 – 11)، فسيكون التسارع أكبر بكثيرٍ من هذا المعدل.

ملحوظة : تحتوي إجابتنا النهائية على رقمين مميزين فقط؛ لأن $(\mu_k = 0.30)$ يحتوي على رقمين فقط.

التمرين (ب) : ماذا تستنتج عندما تكون $\mu_k F_N$ أكبر من F_{Px}؟

المثال 4-20 صندوقان وبكرة

يرتبط صندوقان في (الشكل 4 – 32 أ) بواسطة حبل يمر فوق بكرة. افترض أن معامل الاحتكاك الحركي بين الصندوق A والطاولة يساوي 0.20. وعند إهمال كتلة الحبل والبكرة وأي احتكاك ناتج من البكرة، ستستطيع الافتراض بأنّ قيمة القوة المؤثرة عند أحد طرفي الحبل تساوي قيمة القوة المؤثرة عند طرفه الآخر. والآن، ما تسارع النظام a، علماً بأن قيمة تسارع الصندوق A ستعادل قيمة تسارع الصندوق B على افتراض أن الحبل لن يتمدد؟ لاحظ أنه عندما يتحرك الصندوق B إلى الأسفل، فإن الصندوق A سيتحرك إلى اليمين.

النهج: سنحتاج إلى مخطط جسم حر لكل صندوق، كما في (الشكلين 4 – 32 ب و جـ) لكي نستطيع تطبيق قانون نيوتن الثاني لكل من الجسمين على حدة. إن القوى المؤثرة في الصندوق A هي قوة السحب في الحبل F_T، وقوة الجاذبية $m_A g$، والقوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة F_N، وقوة الاحتكاك التي تؤثر بها الطاولة F_{fr}، وأما القوى على الصندوق B فهي قوة الجاذبية $m_B g$، وقوة السحب إلى الأعلى في الحبل F_T.

الحل : بما أن الصندوق A لن يتحرك رأسياً، فإن تطبيق قانون نيوتن الثاني يعطي القوة العمودية بدلالة الوزن:

$$F_N = m_A g = (5.0\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 49\,\text{N}$$

وهناك قوتان على الصندوق A في الاتجاه الأفقي (الشكل 4 – 32 ب) : F_T الشد في الحبل (ولا نعرف قيمته) وقوة الاحتكاك:

$$F_{fr} = \mu_k F_N = (0.20)(49\,\text{N}) = 9.8\,\text{N}$$

وبما أننا نرغب في إيجاد التسارع الأفقي، فسنطبق قانون نيوتن الثاني في اتجاه (x) الأفقي الذي سيصبح $\Sigma F_{Ax} = m_A a_x$ (عند أخذ الاتجاه الموجب إلى اليمين وبوضع $a_{Ax} = a$):

$$\Sigma F_{Ax} = F_T - F_{fr} = m_A a \qquad [\text{الصندوق A}]$$

والآن، لنأخذ الصندوق B بالحسبان: تسحب قوة الجاذبية $m_B g = (2.0\,\text{kg})(9.8\,\text{m/s}^2) = 19.6\,\text{N}$ إلى الأسفل ويسحب الحبل إلى الأعلى بقوة F_T. ونستطيع أن نكتب قانون نيوتن الثاني للصندوق B (على افتراض الاتجاه الموجب إلى الأسفل):

$$\Sigma F_{By} = m_B g - F_T = m_B a \qquad [\text{الصندوق B}]$$

[لاحظ أنه إذا كانت $a \neq 0$ فإن F_T لن تعادل $m_B g$]

وبحل معادلة الصندوق A لإيجاد F_T:

$$F_T = F_{fr} + m_A a$$

ونعوض هذا في معادلة الصندوق B :

$$m_B g - F_{fr} - m_A a = m_B a$$

ونحل الآن لإيجاد a مع التعويض بالقيم العددية :

$$a = \frac{m_B g - F_{fr}}{m_A + m_B} = \frac{19.6\,\text{N} - 9.8\,\text{N}}{5.0\,\text{kg} + 2.0\,\text{kg}} = 1.4\,\text{m/s}^2$$

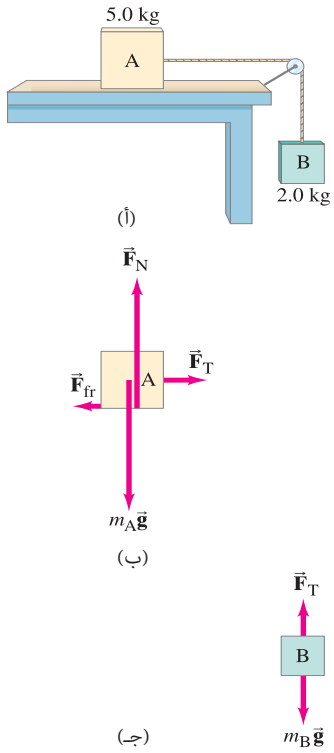
وهو تسارع الصندوق A إلى اليمين والصندوق B إلى الأسفل.

ونستطيع إذا أردنا أن نحسب F_T باستخدام المعادلة الأولى:

$$F_T = F_{fr} + m_A a = 9.8\,\text{N} + (5.0\,\text{kg})(1.4\,\text{m/s}^2) = 17\,\text{N}$$

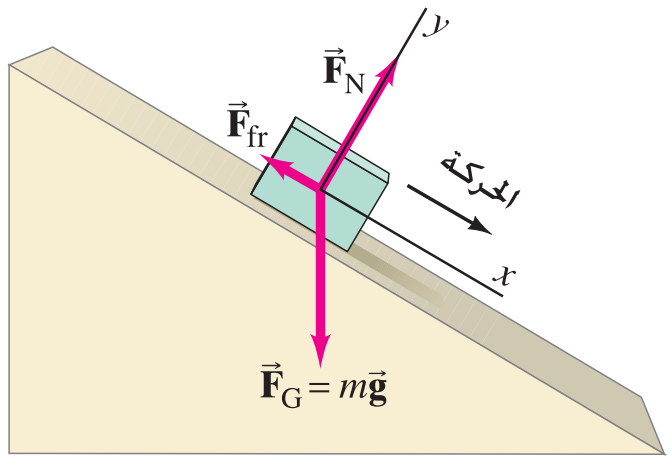
ملحوظة: لا تُعدّ حركة الصندوق B إلى الأسفل سقوطًا حرًا. وهو لا يسقط بمعدل $a = g$ لتأثره بالقوة الإضافية F_T إلى الأعلى.

الشكل **4 - 32** (المثال 4 - 20).



تنويه:

قد لا يعادل الشد في الحبل المساند للجسم الساقط وزن الجسم.



الشكل 4 - 33 القوى على جسم ينزلق إلى أسفل سطح مائل

السطوح المائلة

سوف نأخذ الآن بالاعتبار ما يحدث عندما ينزلق جسم إلى أسفل سطح مائل ما، مثل تلة أو سطح مائل. تُعدّ هذه المسائل مثيرة للاهتمام لأنّ الجاذبية هي المسؤولة في هذه الحالات عن قوة التسارع. ومع هذا، فهي لا تشير إلى الاتجاه الرأسي. ويصبح حل المسائل أسهل عند اختيار نظام إحداثي xy بحيث يكون المحور (x) السيني على امتداد السطح المائل، والمحور (y) الصادي عمودي عليه، كما هو موضح في (الشكل 4 – 33). ولاحظ أيضاً أن القوة العمودية ليست رأسية، ولكنها عمودية على السطح المائل للمستوى في (الشكل 4 – 33).

حل المسألة

يزيد الاختيار الجيد للنظام الإحداثي من سهولة العمليات الحسابية

التمرين جـ : هل قوة الجاذبية عمودية على المستوى المائل دائما؟ وهل هي رأسية دائما؟

التمرين د: هل القوة عمودية على المستوى المائل دائما؟ وهل هي رأسية دائما؟

تطبيق الفيزياء

التزلج

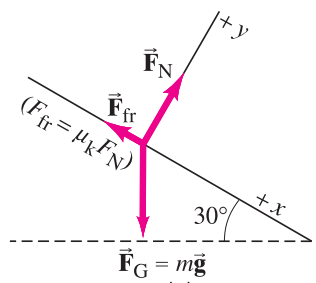
المثال 4-21 المتزلج

بدأت المتزلجة بنزول السطح المائل المائل بزاوية 30° كما في (الشكل 4 – 34). افترض أن معامل الاحتكاك الحركي هو 0.10 واحسب: (أ) تسارعها. (ب) السرعة التي ستصل إليها بعد 4.0 s.

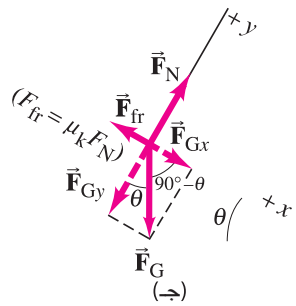
النهج: نختار المحور (x) السيني على امتداد الميل، واتجاهه الموجب يشير إلى أسفل السطح المائل في الاتجاه نفسه لحركة المتزلجة. ونختار المحور (y) الصادي عموديا على السطح، كما هو موضح.

والقوى المؤثرة في المتزلجة هي الجاذبية $\vec{F}_G = m\vec{g}$ التي تشير رأسيًّا إلى الأسفل (لا عمودياً على الميل)، والقوتان المؤثرتان في زلاجتيها بواسطة الثلج هما القوة العمودية للمنحدر الثلجي (غير الرأسية)، وقوة الاحتكاك الموازية للسطح. وتظهر هذه القوى الثلاث مؤثرة في نقطة واحدة في الشكل 4 – 34 ب الذي يمثل مخطط الجسم– الحر للمتزلجة.

(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل 4 - 34 (المثال 4 - 21). تهبط متزلجة منحدراً . وتمثل $\vec{F}_G = m\vec{g}$ قوة الجاذبية (الوزن على المتزلجة).

الحل: يكفي هنا أن نحلل متجهًا واحدًا فقط إلى مركباته. ويظهر الوزن $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{G}}$ ومركباته كخطوط متقطعة في (الشكل 4 – 34 جـ). ونستخدم θ هنا بدلاً من 30° من أجل التعميم. كما سنستخدم تعريف كل من جيب الزاوية ("الضلع المقابل") وجيب تمام الزاوية ("الضلع المجاور") للحصول على المركبات:

$$F_{\mathrm{G}x} = mg \sin\theta$$

$$F_{\mathrm{G}y} = -mg \cos\theta$$

حيث تشير $F_{\mathrm{G}y}$ إلى اتجاه y السالب.

ولحساب تسارع المتزلج إلى أسفل التلة، a_x: نطبق قانون نيوتن الثاني باتجاه x:

$$\Sigma F_x = ma_x$$

$$mg \sin\theta - \mu_{\mathrm{k}} F_{\mathrm{N}} = ma_x$$

وتمثل القوتان المركبة السينية لقوة الجاذبية (اتجاه x الموجب) وقوة الاحتكاك (اتجاه x السالب) .

ولإيجاد قيمة a_x: يجب تحديد قيمة F_{N} المجهولة. وسنرى فيما إذا كنا نستطيع الحصول على F_{N} من المركبة الصادية (y) لقانون نيوتن الثاني:

$$\Sigma F_y = ma_y$$

$$F_{\mathrm{N}} - mg \cos\theta = ma_y = 0$$

حيث وضعنا $a_y = 0$: لعدم وجود حركة في اتجاه y (العمودي على الميل). ونستطيع أن نحل لإيجاد F_{N}:

$$F_{\mathrm{N}} = mg \cos\theta$$

ونستطيع أن نعوض هذا في معادلتنا في الأعلى من أجل ma_x:

$$mg \sin\theta - \mu_{\mathrm{k}}(mg \cos\theta) = ma_x$$

ويمكن اختصار الكتلة m من الحدود جميعها للمعادلة السابقة. وبعد التعويض بقيمة $\theta = 30^\circ$ و $\mu_{\mathrm{k}} = 0.10$ يصبح:

$$\begin{aligned} a_x &= g \sin 30^\circ - \mu_k g \cos 30^\circ \\ &= 0.50g - (0.10)(0.866)g = 0.41g \end{aligned}$$

وعليه، فإن تسارع المتزلج هو 0.41 ضعف تسارع الجاذبية الأرضية. وبدلالة الأرقام فإن $a = (0.41)(9.8\ \mathrm{m/s^2}) = 4.0\ \mathrm{m/s^2}$. ومن المثير أن يتم اختصار الكتلة لنصل إلى استنتاج مفيد مدلوله أن التسارع لا يعتمد على الكتلة. وتحدث هذه الاختصارات في بعض الأوقات لتعطي استنتاجات مفيدة في حينها. وعليه، فإن استخدام المعادلات الجبرية والتعويض بالأرقام يُعدّ عملًا إيجابيًّا كبيرًا.

(ب) وبما أنّ التسارع ثابت، فإن السرعة بعد 4.0 s يمكن إيجادها باستخدام (المعادلة 2 – 11 أ) كالتالي:

$$\begin{aligned} v &= v_0 + at \\ &= 0 + (4.0\ \mathrm{m/s^2})(4.0\ \mathrm{s}) = 16\ \mathrm{m/s} \end{aligned}$$

حيث افترضنا بدء الحركة من السكون.

حل المسألة

غالبـــاً ما يكون مفيـــدا التعويض بالأرقام عند النهاية فقط.

ومن الأخطاء الشائعة أن يكون تحديد اتجاه القوة العمودية غير صحيح، وكذلك اتجاه الجاذبية الأرضية خصوصًا عندما يكون السطح مائلًا أو على السطوح المائلة. وأن القوة العمودية في (المثال 4 – 21) غير رأسية. وهي عمودية على الميل أو على السطح. وأما الجاذبية، فهي ليست عمودية على السطح المائل أو السطح المائل. ومع هذا، فهي تشير دائمًا في الاتجاه الرأسي إلى الأسفل باتجاه مركز الأرض.

تنويه:

اتجاه كل مـــن الجاذبية والقوة العمودية.

9-4 حل مسائل: طريقة حل عامة

يُعدّ حل المسائل بكفاءة جزءًا أساسيًّا من أي منهج مقرّر في الفيزياء. ويُعدّ النهج الذي تتم مناقشته هنا، الذي يوظف قوانين نيوتن، صالحًا وعلى نحو عام لتطبيقه على موضوعات كثيرة تم استعراضها والتطرق لها في هذا الكتاب.

طريقة حل المسائل بصورة عامة

1. اقرأ وأعد قراءة المسائل المكتوبة بتمعن. فمن الأخطاء الشائعة التجاوز عن كلمة أو كلمتين خلال القراءة مما يؤثر في مفهوم السؤال، ويغيّر فيه على نحو كبير.

2. ارسم صورةً دقيقةً أو مخططًا لكلّ حالة. (ربما تُعدّ هذه أهم خطوة في حلول المسائل، علما بأنها غالبا ما تهمل أو يتم التغاضي عنها). واستخدم أسهمًا لتمثل المتجهات، مثل السرعة المتجهة أو القوة، واعطِ رموزًا مناسبةً لهذه المتجهات. وعندما تتعامل مع القوى وتطبق قانون نيوتن الثاني، تأكد بأنه قد تمّ اعتبار القوى جميعها بما فيها المجهولة، وتأكد أيضا من عدم وجود أي التباس في تحديد الجسم الذي تؤثر فيه هذه القوة (وخلافًا لذلك، سينتج خطأ كبير في تحديد القوة المحصلة والمؤثرة في جسم ما). ويجب رسم **مخطط جسم – حر** منفصل لكل جسم في النظام المعني على حدة، يجب أن يضم هذا المخطط القوى المؤثرة في الجسم جميعها (وفقط على هذا الجسم). ولا تظهر أي قوة تؤثر في الأجسام الأخرى.

3. اختر نظام إحداثيات مناسب (xy) يسهل **العمليات الحسابية**، مثل جعل أحد المحاور منطبقًا على اتجاه التسارع. ويجب تحليل المتجهات إلى مركباتها على امتداد المحاور الأساسية للنظام الإحداثي. وعندما تستخدم قانون نيوتن الثاني، طبق المعادلة $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$ باستخدام المركبات السينية والصادية كلًّا على حدة. وتذكر أن مركبات القوة في الاتجاه السيني ترتبط بـ a_x فقط وكذلك بالنسبة إلى الاتجاه الصادي. وإذا كان النظام يتكون من أكثر من جسم، فيمكنك اختيار أنظمة إحداثية مختلفة ومناسبة لكلّ جسمٍ على حدة.

4. اعمل قائمة تحتوي على المتغيرات جميعها سواء أكانت معلومة أم مجهولة (التي تحاول أن تجد قيمتها) وحدد ماذا تريد لإيجاد قيمة المتغير المجهول. وسنستخدم قانون نيوتن الثاني للمسائل في الفصل الحالي. وغالبا ما يساعد في الوصول إلى الحل على نحو عام إذا تم إيجاد **علاقات** أو (**معادلات**) تربط بين المعطيات والمجاهيل. وتأكد من صحة إمكانية تطبيق المعادلة في كل حالة. وهو من الضروري جدا أن تلم بقصور أيّ معادلة أو علاقة والحدود التي من ضمنها يمكن تطبيقها. ولقد تم إعطاء أرقام للمعادلات العامة في هذا الكتاب، ومع هذا فقد تكون معادلات خاضعة لشروط خاصة تحدُّ من صلاحيتها (وإذا كانت هذه هي الحقيقة، فقد تمت إضافة عبارة على الجانب داخل أقواس للإيحاء بذلك).

5. حاول أن تصل إلى إجابة تقريبية عن السؤال لترى إمكانية حل السؤال بصورة مقبولة (وللتأكد فيما إذا كانت المعلومات المعطاة كافية للحل). استخدم البداهة، واعمل حسابات أولية – انظر "تخمين قيمة أولية" في (البند 1– 7). **تُعدّ الحسابات** الأولية والتقدير المنطقي لمدى الإجابة النهائية شيئًا مفيدًا جدًّا. وكذلك يمكن مقارنة الحسابات الأولية مع الإجابة النهائية لتحديد أخطاء الحسابات إن وجدت، مثل الخطأ في الخانة العشرية أو بالأس.

6. حل السؤال الذي قد يحتوي على معادلات جبرية و/أو حسابات رقمية. وتذكر المبدأ القائل بأنه يجب أن يكون عدد المعادلات معادِلًا عدد المجاهيل على الأقل، أي أنه إذا كان هناك ثلاثة مجاهيل على سبيل المثال فإننا بحاجة إلى ثلاث معادلات مستقلة. ومن المفضل عادة أن تتعامل مع الرموز الجبرية قبل أن تبدأ التعويض بالأرقام. ما السبب وراء ذلك؟ هناك عدة أسباب منها : (أ) لأنك بذلك تكون قد توصلت إلى حل مناسب لعائلة من المسائل المتشابهة ذات الأرقام المختلفة. و(ب) تستطيع أن تختبر إجابتك ومقارنتها مع الحالات الخاصة، والتي بالإمكان تفسيرها وفهمها بيسر (ومثال على ذلك عند $\theta = 0°$ أو $90°$). (جـ) وقد تستطيع اختصار عدد من الحدود أو تصل إلى صورة مبسطة للحل النهائي. و(د) هناك احتمال أقل لحصول خطأ خلال الحسابات. و(هـ) من المحتمل أن تكتسب فهمًا أكبر للسؤال بهذه الطريقة.

7. ابذل جهدك لكي تحافظ على **الوحدات** فتتبعها عن يمين ويسار المعادلة يساعد على التأكد من موازنة المعادلة.

8. تأكد للمرة الأخيرة من أن الإجابة النهائية **منطقية**. واستخدام التحليل في الأبعاد المختلفة كما تم شرحه في (البند 1 - 8) حيث قد يساعد ذلك على فحص مسائل عديدة أخرى.

ملخص

تعدّ قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة القوانين التقليدية الأساسية التي تصف الحركة.

وينص قانون نيوتن الأول (قانون القصور الذاتي) على أنه إذا كانت محصلة القوى المؤثرة في جسم ما مساوية للصفر، فإن الجسم سيبقى على حالته من السكون أو الحركة بسرعة ثابتة في خط مستقيم.

وينص قانون نيوتن الثاني على أن تسارع جسم ما يتناسب طرديا مع محصلة القوى الخارجية المؤثرة فيه وعكسياً مع كتلته، ويمكن التعبير عنه رياضياً كالتالي:

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a} \qquad (1-4)$$

ويُعدّ قانون نيوتن الثاني أحد أهم قوانين الفيزياء التقليدية وأكثرها جوهرية.

وينص قانون نيوتن الثالث على أنه عندما يؤثر جسم ما بقوة في جسم آخر، فإن الجسم الآخر سيؤثر دائماً في الجسم الأول بقوة تعادلها بالمقدار وتعاكسها في الاتجاه :

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA} \qquad \textbf{(2 - 4)}$$

حيث $\vec{F}_{BA}$ هي القوة التي يؤثر بها الجسم A في الجسم B.

ويسمى نزوح الجسم لممانعة التغير في حركته **بقصوره الذاتي**. وتُعدّ **الكتلة** مقياس القصور الذاتي لجسم ما.ويشير الوزن إلى مقدار قوة الجاذبية على الجسم المعني، ويعادل حاصل ضرب الكتلة في **تسارع الجاذبية الأرضية** $\vec{g}$:

$$\vec{F}_G = m\vec{g} \qquad \textbf{(3 - 4)}$$

ويمكن اعتبار متجه القوة هو الدفع أو السحب، أو حسب قانون نيوتن الثاني هو العمل القادر على توليد التسارع، أمّا محصّلة القوى فهي مجموع القوى الكلية المؤثّرة في الجسم.

ويمكن كتابة قوة الاحتكاك التي يؤثر بها كلّ جسم في الآخر عند انزلاق جسمين فوق بعضهما بعــضًا بالتقريب : $F_{fr} = \mu_k F_N$ حيث F_N القوة العمودية (القوة التي يؤثر بها كل جسم في الآخر والتي تكون عمودية على سطح تلاقي الجسمين) وأما μ_k فهو معامل الاحتكاك الحركي. ولكن إذا كانت الأجسام ساكنة بالنسبة إلى بعضها بعضًا، فإن قيمة F_{fr} ستكون كبيرة لدرجة كافية لإبقاء الأجسام ساكنة فتحقق غير المتساوية $F_{fr} < \mu_s F_N$ و يمثل μ_s معامل **الاحتكاك السكوني**.

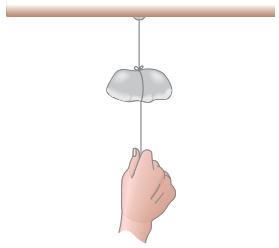
ولحل المسائل المتضمنة قوى مؤثرة في جسم ما أو أكثر، فيُعدّ من الضروري **رسم مخطط جسم حر** لكل جسم على حدة موضحًا القوى المؤثرة في الجسم المعني جميعها. ويمكن تطبيق قانون نيوتن الثاني على المركبات المتجهة لكلٍّ جسمٍ على حدة.

أسئلــة

1. لماذا يبدو الطفل في عربته وكأنه يقع إلى الخلف عندما تدفع العربة بقوة إلى الأمام؟
2. يقبع صندوق ساكناً على سطح أملس في مؤخرة شاحنة. وعندما يبدأ السائق بتحريك شاحنته من السكون لتتسارع إلى الأمام، يبدأ الصندوق بالانزلاق إلى الخلف. ناقش حركة الصندوق بدلالة معادلات نيوتن إذا تمت رؤيته من قبل (أ) فاطمة الواقفة على الأرض بجوار الشاحنة. (ب) أمين الذي يقف على ظهر الشاحنة (الشكل 4-35).

الشكل 4 - 35 السؤال 2.

3. إذا كان تسارع جسم ما يساوي الصفر، فهل لا تؤثر فيه أية قوة؟ وضح إجابتك.
4. هل يمكن لجسم ما أن يمتلك تسارعًا يساوي الصفر إذا كان متأثراً بقوة واحدة فقط؟ هل يمكن للجسم أن يمتلك سرعة مساوية للصفر؟ وضح إجابتك.
5. تسقط كرة جولف باتجاه الأرض لترتد مرتفعة عنها. (أ) هل تحتاج الكرة إلى قوة ما كي ترتد عن السطح؟ و(ب) إذا كان الحل نعم، فما الذي يؤثر بهذه القوة؟
6. إذا سار شخص إلى الخلف على طواف يطفو على سطح الماء، فلماذا يتحرك الطواف في الاتجاه المعاكس على سطح الماء؟
7. لماذا تشعر بالألم عندما تركل بقدمك مكتبًا أو حائطًا بشدة؟
8. عندما تقرر أن تقف فجأة وأنت تركض مسرعًا فيجب أن تتباطأ بسرعة. (أ) ما مصدر القوة التي ستتسبب في وقوفك؟ و(ب) قدر (مستخدماً خبرتك الخاصة) أعلى معدل تباطؤ ضروري للوقوف التام لشخص يركض مسرعًا.
9. يعلق حجر بواسطة خيط رفيع مثبت من أحد طرفيه في السقف، بينما يتدلى طرفه الآخر إلى الأسفل (الشكل 4 - 36).وإذا سحب شخص ما طرف الحبل المتدلي بشدة إلى الأسفل، فمن أي نقطة سينقطع الحبل : عند أسفل الحجر أم أعلاه؟ وماذا سيحدث لو أن الشخص سحب الحبل بلين وبحركة مستمرة؟ وضح إجاباتك؟



الشكل 4 - 36 السؤال 9.

10. تعادل قوة الجاذبية على صخرة كتلتها 2-kg ضعفي قوة الجاذبية على صخرة كتلتها 1-kg. لماذا إذن لا تسقط الصخرة الأثقل بسرعة أكبر؟
11. هل سيعطي الميزان الزمبركي عند وضعه على القمر قراءة أدق في حالة معايرته بدلالة (أ) الباوند. أم (ب) الكيلوجرام؟
12. يسحب شخص ما صندوقًا بقوة ثابتة بواسطة حبل أفقي على سطح طاولة أملس. فإذا سحب بعد ذلك الصندوق نفسه على السطح السابق نفسه بالقوة الثابتة نفسها ولكن بزاوية ما مع الأفقي (مع بقاء حركة الصندوق أفقية على سطح الطاولة)، فهل نستطيع أن نجزم بأن تسارع الصندوق: (أ) سيبقى ثابتاً. أو (ب) سيزداد. أو (جـ) سيقل؟ وضح إجابتك.
13. عندما يسقط جسم ما سقوطًا حرًّا تحت تأثير الجاذبية يكون ذلك نتيجة لتأثره بمحصلة قوى مقدارها mg ناتجة من جذب الأرض. ومع هذا، وحسب قانون نيوتن الثالث، فإن هذا الجسم سيؤثر بقوة مماثلة ومعاكسة في الأرض. فلماذا لا يؤدي هذا إلى تحرك الكرة الأرضية؟
14. قارن بين المجهود (أو القوة) اللازمة لرفع جسم كتلته 10-kg عن سطح الأرض مع تلك اللازمة على سطح القمر. وقارن بين القوة اللازمة لقذف حجر كتلته 2-kg أفقيًّا وبسرعة معينة قرب سطح كل من القمر والأرض.

15. حسب قانون نيوتن الثالث، سيسحب كل فريق في مسابقة شد الحبل (الشكل 4 - 37) بقوة مماثلة لتلك الناتجة من الفريق الآخر. ما الذي سيحدد إذن الفريق الفائز؟

الشكل 4 - 37 السؤال 15. مسابقة شد الحبل. صف القوى على كل فريق وعلى الحبل.

16. يؤثر شخص ما بقوة إلى الأعلى مقدارها 40 N ليحمل كيسًا مليئًا بالمشتريات. صف قوة رد الفعل (حسب قانون نيوتن الثالث) بدلالة: (أ) القيمة. (ب) الاتجاه (جـ) على أي جسم تؤثر. (د) الجسم الذي يسببها.

17. ما مقدار القوة التي تؤثر بها الأرض في الشخص الذي يقف عليها بثبات؟ ولماذا لا تعمل هذه القوة على رفعك عاليا في الهواء؟

18. تنتج إصابة الرقبة أحيانًا خلال حوادث المركبات عندما تضرب سيارة المصاب من الخلف بشدة وبعنف. فسر لماذا يظهر رأس المصاب وكأنه رُمي إلى الخلف في هذه الحالة. هل هذا ما يحدث فعلا؟

19. يتكئ صندوق ثقيل على سطح شاحنة مكشوفة. وعندما تتسارع الشاحنة، يبقى الصندوق في موضعه على الشاحنة، وعليه فهو سيتسارع أيضا. ما القوة التي تسبب تسارع الصندوق؟

20. تم دفع مكعب لينزلق على سطح مائل إلى الأعلى، وعندما وصل إلى أعلى نقطة ممكنة ترك لينزلق منحدرًا إلى الأسفل، ولكن تسارعه إلى الأسفل كان أقل من تسارعه إلى الأعلى. لماذا؟

21. هل ستختلف قراءة الميزان عندما تزن نفسك والميزان موضوع على سطح مائل؟ (افترض أن وظائف الميزان جميعها ستبقى سليمة حتى على السطح المائل).

مسائـل

4 - 4 إلى 4 – 6 قوانين نيوتن وقوة الجاذبية الأرضية والقوة العمودية

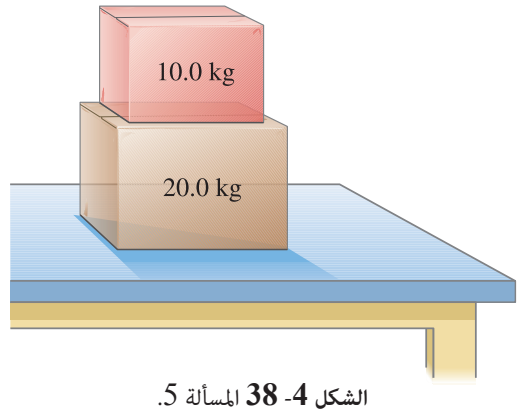
1. (I) ما القوة اللازمة لتسريع طفل على زلاجة (الكتلة الكلية = 60.0 kg) بمعدل $1.25\ m/s^2$؟

2. (I) تسرع محصلة قوة 265 N درّاجا مع دراجته بمعدل $2.30\ m/s^2$. فما كتلة الدرّاج ودراجته معاً؟

3. (I) ما مقدار الشد الواجب على الحبل لحمله عند تسريع سيارة كتلتها 960-kg أفقيًّا على سطح أملس بمعدل $1.20\ m/s^2$؟

4. (I) ما وزن رائد فضاء كتلته 76-kg (أ) على سطح الأرض. (ب) على سطح القمر ($g = 1.7\ m/s^2$). (جـ) على سطح المريخ ($g = 3.7\ m/s^2$). (د) في الفضاء الخارجي عندما يسافر بسرعة ثابتة؟

5. (II) يجلس صندوق كتلته 20.0-kg ساكنًا على طاولة. (أ) ما وزن الصندوق وقيمة القوة العمودية المؤثرة فيه؟ (ب) عند وضع صندوق آخر كتلته 10.0-kg فوق الصندوق ذي الكتلة 20.0-kg كما هو موضح في (الشكل 4-38)، حدد قيمة القوة العمودية التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق ذي الكتلة 20.0-kg، وكذلك القوة العمودية التي يؤثر بها صندوق العشرين في الصندوق الآخر ذي 10.0-kg.



الشكل 4- 38 المسألة 5.

6. (II) ما مقدار القوة الضرورية لإيقاف سيارة كتلتها 1100-kg خلال 8.0 s إذا كانت السيارة تتحرك بسرعة 95 km/h؟

7. (II) ما متوسط القوة الضرورية لتسريع رصاصة كتلتها 7.00 g من السكون وحتى خلال مسافة 125 m/s على امتداد ماسورة البندقية؟

8. (II) يخرج صياد سمكة من الماء بتسارع إلى الأعلى $2.5\ m/s^2$ بواسطة حبل صيد خفيف شدة انقطاعه تعادل 22 N. ولسوء حظ الصياد ينقطع الحبل وتهرب السمكة. ماذا تستطيع أن تستنتج بالنسبة إلى كتلة السمكة؟

9. (II) تصطدم كرة بيسبول كتلتها 0.140-kg تسير بسرعة 35.0 m/s. بقفاز اللاعب الخصم فترتد يد اللاعب إلى الخلف مسافة 11.0 cm. خلال عملية إيقاف الكرة. فما متوسط القوة التي أثرت بها الكرة في القفاز؟

10. (II) ما مقدار الشد اللازم على الحبل أن يتحمله عند استخدامه لتسريع سيارة كتلتها 1200-kg رأسيًّا إلى الأعلى بمعدل $0.80\ m/s^2$؟

11. (II) تستطيع سيارة سباق معينة قطع مسافة ربع ميل (.4) خلال 6.40 s بدءًا من السكون. على افتراض أن التسارع ثابت، ما مقدار التسارع بدلالة مضاعفات "g's" التي سيخضع لها السائق؟ إذا كانت الكتلة الكلية للسائق وسيارته تعادل 485 kg، فما القوة الأفقية التي سيؤثر بها الطريق في عجلات السيارة؟

12. (II) تم إنزال دلو كتلته 12.0-kg رأسيا إلى الأسفل بواسطة حبل يخضع لشد مقداره 163 N في لحظة ما. فما تسارع الدلو؟ هل التسارع إلى الأعلى أم إلى الأسفل؟

13. (II) تم تصميم مصعد (كتلته 4850 kg) بحيث يكون التسارع الأعظم 0.0680g. ما القوى العظمى والدنيا التي يجب أن يؤثر بها المحرك في الحبال الداعمة؟

14. (II) يحاول لص كتلته 75-kg الهروب من نافذة زنزانة في الطابق الثالث في السجن. ولسوء حظ اللص، فإن الحبل الذي صنعه من قماش غطاء السرير يتحمل فقط كتلة مقدارها 58 kg. كيف يمكن لهذا اللص استخدام "الحبل" في الهروب؟ أعط إجابة كمّيّة؟

15. (II) يقف شخص على الميزان في مصعد واقف. وعندما يبدأ المصعد بالتحرك، يقرأ الميزان فقط 0.75 من الوزن الحقيقي للشخص. احسب تسارع المصعد وحدد اتجاه التسارع.

16. (II) يتحمل حبل إسناد مصعد كتلته 2125-kg شدة عظمى مقدارها 21,750 N. ما أعظم تسارع يصله المصعد قبل أن ينقطع الحبل؟

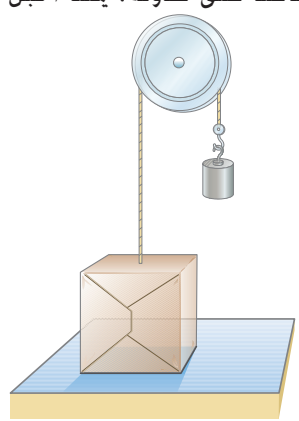
17. (II) (أ) ما تسارع مظليان (كتلتهما مع مظلتيهما تعادل 132 kg) عندما تعادل قوة مانعة الهواء إلى الأعلى ربع وزنهما؟ (ب). ما مقدار قوة مانعة الهواء على المظليين ومظلتيهما عندما يهبطان بهدوء وبسرعة ثابتة باتجاه الأرض بعد فتح المظلتين ؟ انظر (الشكل 4 - 39).

الشكل 4 - 39 المسألة 17.

18. (III)يقفز شخص من أعلى سقف منزل ارتفاعه 3.9-m. وعندما يصطدم بالأرض، يقوم بثني ركبتيه ليتباطأ جذعه خلال مسافة تقارب 0.70 m.إذا كانت كتلة جسمه (ما عدا رجليه) تعادل 42 kg. فأوجد: (أ) سرعته قبل أن تطأ قدماه الأرض. (ب) متوسط القوة المؤثرة في جذعه من قدميه خلال تباطؤه.

4 - 7 قوانين ومتجهات نيوتن.

19. (I) يركد صندوق وزنه 77.0 N ساكنًا على طاولة. يمتد الحبل المثبت بالصندوق إلى الأعلى ليمر خلال بكرة ويعلق بطرفه الآخر ثقل يتدلى من الجهة الأخرى إلى الأسفل. حدد القوة التي تؤثر بها الطاولة في الصندوق إذا كان وزن الثقل المتدلّي من طرف الحبل الآخر: (أ) 30.0 N. (ب) 60.0 N. (جـ) 90.0 N.



الشكل (4 - 40) المسألة 19.

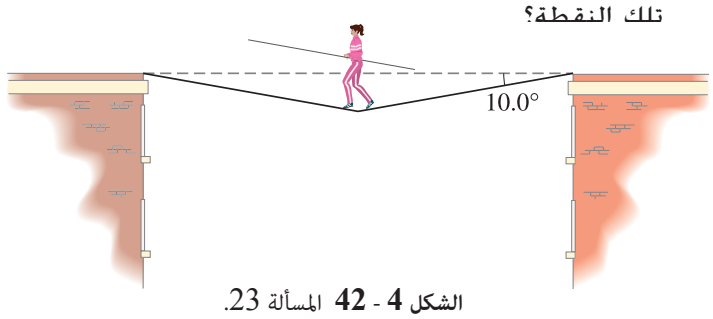
20. (I) ارسم مخطط الجسم الحر للاعب كرة سلة: (أ) قبل أن يقفز إلى الأعلى عن الأرض. (ب) وهو في الهواء. انظر (الشكل 4 - 41).

الشكل 4 - 41 المسألة 20.

21. (I) ارسم مخطط جسم حر لكرة بيسبول: (أ) لحظة اصطدامها بالمضرب. (ب) بعد مغادرتها للمضرب وخلال طيرانها مبتعدة باتجاه أرض الملعب.

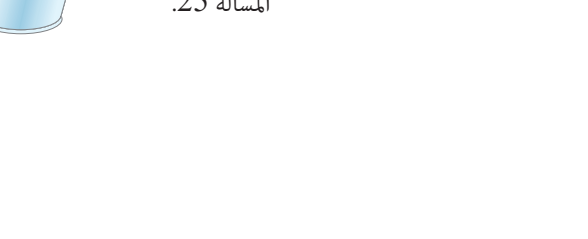
22. (I) تؤثر قوة مقدارها 650-N باتجاه الشمال الغربي. ما اتجاه تأثير قوة أخرى مقدارها 650-N إذا كانت محصلة القوى ستشير باتجاه الغرب؟ مثل إجابتك مستعينًا بمخطط متجه.

23. (II) تسير ليلى على "حبل معلق" مثبت أفقيًّا بين مبنيين يبتعدان مسافة 10.0 m أمتار عن بعضهما بعضًا. يصنع الحبل زاوية مقدارها 10.0° درجات إلى الأسفل عندما تصل ليلى إلى منتصف الحبل، كما هو موضّح في (الشكل 4 - 42). إذا كانت كتلة ليلى 50.0 kg. فما مقدار الشد في الحبل عند تلك النقطة؟



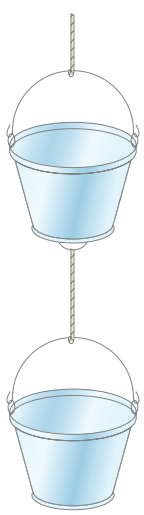
الشكل 4 - 42 المسألة 23.

24. (II) تؤثر القوتان $\vec{\mathbf{F}}_1$ و $\vec{\mathbf{F}}_2$ الظاهرتان في (الشكلين 4 – 43أ و ب) (بالنظر إلى الأسفل) على جسم كتلته 27.0-kg موجود على طاولة ملساء. إذا كانت $F_1 = 10.2\,\text{N}$ و $F_2 = 16.0\,\text{N}$. فأوجد محصلة القوة المؤثرة في الجسم وتسارعه لكل من الحالتين (أ) و (ب).



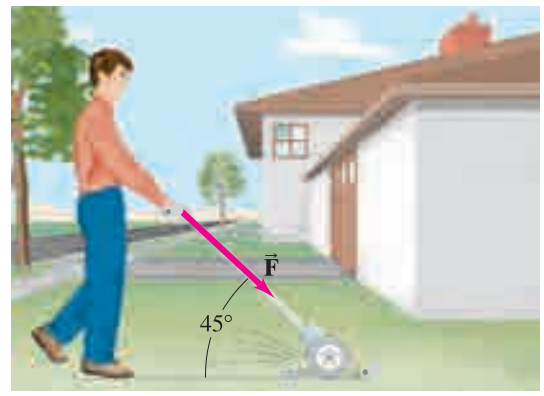
الشكل 4 - 43 المسألة 24.

25. (II) يتدلّى دلو دهان كتلته 3.2-kg معلّق بحبل مهمل الكتلة من دلو دهان آخر كتلته 3.2-kg أيضًا ومعلق بحبل آخر مهمل الكتلة أيضًا، كما في (الشكل 4 - 44).
(أ) ما مقدار الشد في الحبل عند الاتزان .
(ب) احسب الشد في كل حبل عند تسارع المجموعة إلى الأعلى بمعدل $1.60\ \text{m/s}^2$ نتيجة سحبهما إلى الأعلى بواسطة الحبل العلوي.



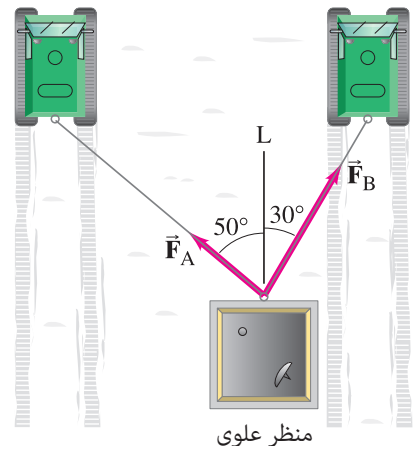
الشكل 4 - 44 المسألة 25.

26. (II) يدفع شخص ما آلة قص عشب كتلتها 14.0-kg بسرعة ثابتة وبقوة $F = 88.0\,\text{N}$ موجهة على امتداد ذراعها التي تصنع زاوية $45.0°$ مع الأفقي (الشكل 4 - 45). (أ) ارسم مخطط جسم حر مظهرًا القوى المؤثرة في الحاصدة جميعها. واحسب (ب) قوة الاحتكاك الأفقية المؤثرة فيها. ثم (جـ) القوة العمودية التي تؤثر بها الأرض رأسيا إلى الأعلى في الحاصدة. وحدد (هـ) القوة الضرورية لكي يؤثر بها شخص في حاصدة العشب ليسرعها من السكون إلى 1.5 m/s خلال 2.5 s آخذًا بعين الاعتبار قوة الاحتكاك نفسها؟



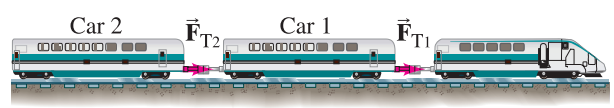
الشكل **4 - 45** المسألة 26.

27. (II) جّر كاسحتا جليد وحدةً منزلية إلى موقع جديد في قاعدة "ماكموردو" في القارة القطبية الجنوبية (أنتاركتيكا). كما هو موضح في (الشكل 4 - 46). وتوازي محصلة القوى $\vec{\mathbf{F}}_A$ و $\vec{\mathbf{F}}_B$ المؤثرة في الوحدة المنزلية بواسطة الحبال الأفقية الخط. حيث إن $F_A = 4500\,\text{N}$. أوجد F_B وقيمة $\vec{\mathbf{F}}_A + \vec{\mathbf{F}}_B$.



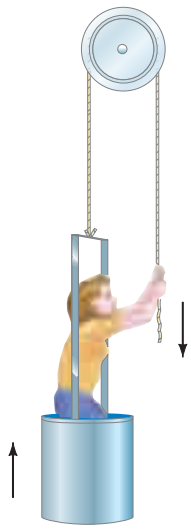
الشكل **4 - 46** المسألة 27.

28. (II) تسحب عربة قطار عربتين خلفها كتلة كل منهما تعادل كتلتها. كما في (الشكل 4 - 47). حدد نسبة الشد في الوتد بين القاطرة والمقطورة الأولى (F_{T1}) إلى الشد في الوتد بين المقطورة الأولى والثانية (F_{T2}) عندما لا يساوي تسارع القطار الصفر.



الشكل **4 - 47** المسألة 28.

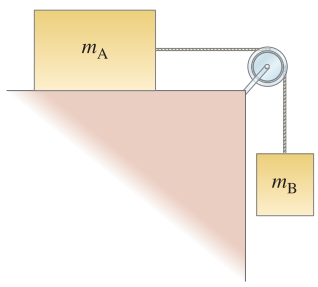
29. (II) تسحب عاملة تنظيف الشبابيك نفسها إلى الأعلى باستخدام آلة (المكونة من البكرة والدلو). كما هو موضح في (الشكل 4 - 48). (أ) ما الشدة التي يجب أن تسحب فيها إلى الأسفل لكي ترتفع ببطء وبسرعة ثابتة؟ (ب) ما مقدار تسارعها عند زيادة القوة بمقدار 15%؟ اعتبر أنّ كتلة عاملة النظافة مع الدلو تساوي 65 kg.



الشكل **4 - 48** المسألة 29.

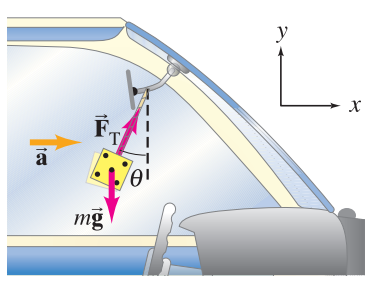
30. (II) أثر عدّاء كتلته 65-kg لحظة بدء السباق بقوة 720 N في قاعدة الانطلاق بزاوية مقدارها $22°$ بالنسبة إلى الأرض. (أ) ما تسارع العداء الأفقي؟ (ب) ما سرعة انطلاق العداء إذا استمر تأثيره في قاعدة الانطلاق مدة 0.32 s؟

31. (II) يظهر (الشكل 4 - 49) مكعبًا (كتلته m_A) على سطح أفقي أملس متصل بواسطة حبل رفيع يمرّ فوق بكرة بمكعب آخر (كتلته m_B) معلق رأسيًا. (أ) ارسم مخطط جسم-حر لكل مكعب على حدة مظهرًا قوة الجاذبية وقوة الشد المؤثرة في الحبل، وأي قوة عمودية. (ب) طبق قانون نيوتن الثاني لتحصل على معادلات تسارع النظام والشد في الحبل. اهمل احتكاك البكرة والحبل وكتلتيهما.



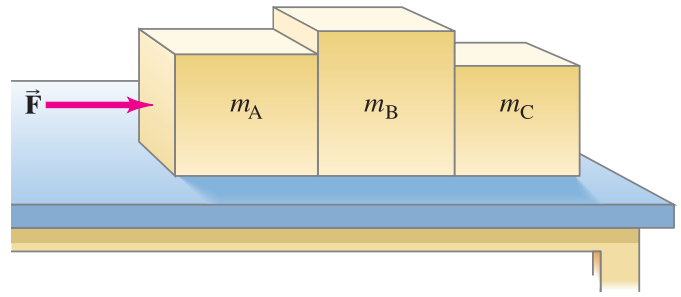
الشكل **4 - 49** المسألة 31. تجلس الكتلة m_A على سطح أفقي أملس وتتدلى m_B رأسيا.

32. (II) يُعلق زوج من النرد الأجعد بواسطة حبلٍ يتدلّى من المرآة الخلفية لسيارة. ما الزاوية التي سيصنعها الحبل مع الرأسي عندما تتسارع السيارة من السكون عند الإشارة الضوئية إلى سرعة 28 m/s خلال 6.0 s؟ انظر (الشكل 4 - 50).



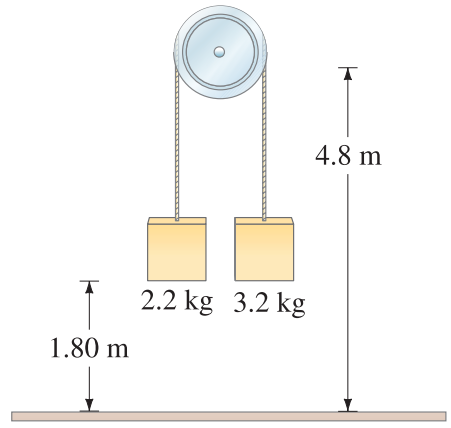
الشكل **4 - 50** المسألة 32.

33. (III) تلامس ثلاثة مكعبات بعضها بعضًا على سطح أملس أفقي، كما هو موضح في (الشكل 4 - 51). وتؤثر قوة $\vec{\mathbf{F}}$ في المكعب A (كتلته m_A). (أ) ارسم مخطط جسم حر لكلّ مكعب. وحدّد: (ب) تسارع النظام (بدلالة m_A و m_B و m_C). (جـ) القوة المحصّلة على كلّ مكعب. (د) قوة التلامس التي يؤثر بها كل مكعب في المكعب المجاور له. (هـ) إذا كانت $m_A = m_B = m_C = 12.0\,\text{kg}$ و $F = 96.0\,\text{N}$، فاعط قيمًا رقميّةً لكلٍّ من (ب) و (جـ) و (د). هل لإجابتك أي معنىً حسّيٍّ؟



الشكل **4 - 51** المسألة 33.

34. (III) ترتفع كل من الكتلتين الظاهرتين في (الشكل 4 - 52) في بداية الأمر مسافة 1.80 m فوق الأرض، وكذلك البكرة مسافة 4.8 m. ما أقصى ارتفاع ستصل إليه الكتلة الخفيفة عندما يحرر النظام؟ [تلميح : حدّد أولا تسارع الكتلة الخفيفة، ومن ثَمَّ حدّد سرعتها لحظة اصطدام الأخرى بالأرض. وتُعدّ هذه السرعة هي سرعة "الانطلاق" كمقذوف شريطة عدم اصطدامها بالكرة في تلك اللحظة].



الشكل **4 - 52** المسألة 34.

35. (III) لنفترض أن صندوقين على طاولة ملساء يرتبطان ببعضهما بعضًا بواسطة حبل ثقيل كتلته 1.0 kg. احسب تسارع كل صندوق والشد عند نهايتي الحبل مستخدمًا مخطّطي الجسم الحر الظاهرين في (الشكل 4 - 53). افترض أن $F_P = 40.0\,\text{N}$. وأهمل أيّ ارتخاء في الحبل. قارن النتائج مع (المثال 4 - 12 والشكل 4 – 22).

4 – 8 قوانين نيوتن بوجود الاحتكاك. السطوح المائلة.

36. (I) إذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين صندوق الشحن وسطح الأرض هو 0.30، فما مقدار القوة الأفقية الضرورية لتحريك الصندوق بسرعة ثابتة على الأرض؟ وما مقدار القوة الأفقية الضرورية عندما تكون μ_k مساوية للصفر؟

37. (I) نحتاج إلى قوة تساوي 48.0 N لتحريك صندوق كتلته 5.0-kg على سطح خرساني من السكون. (أ) ما معامل الاحتكاك السكوني بين الصندوق وسطح الأرض؟ (ب) إذا استمر التأثير في القوة نفسها 48.0-N سيتسارع الصندوق بمعدل $0.70\ \text{m/s}^2$. فما معامل الاحتكاك الحركي؟

38. (I) افترض أنك تقف داخل قطار يتسارع بمعدل 0.20g. ما أدنى معامل احتكاك سكوني بين أقدامك وأرض القطار يضمن عدم انزلاقك من موضعك؟

39. (I) ما أقصى تسارع تصله سيارة إذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين عجلاتها وسطح الطريق هو 0.80؟

40. (II) إنّ معامل الاحتكاك السكوني بين المطاط الصلب وسطح طريق اعتيادي هو 0.8 تقريباً. ما أقصى ميل (أكبر زاوية) منحدر تستطيع أن توقف سيارتك فوقه دون أن تنزلق؟

41. (II) ترك صندوق كتلته 15.0-kg على سطح مائل بدرجة 32° فبدأ الصندوق بالانزلاق إلى أسفل السطح المائل من السكون بتسارع $0.30\ \text{m/s}^2$. أوجد قوة الاحتكاك المعيقة لحركته ومعامل الاحتكاك الحركي.

42. (II) تستطيع سيارة أن تتباطأ بمعدل $-4.80\ \text{m/s}^2$ من غير انزلاق لتقف وقوفًا كاملًا على سطح مستوٍ. ما هو تباطؤ السيارة لو أنّ الطريق كان مائلا بزاوية 13° إلى الأعلى؟ افرض معامل الاحتكاك السكوني نفسه.

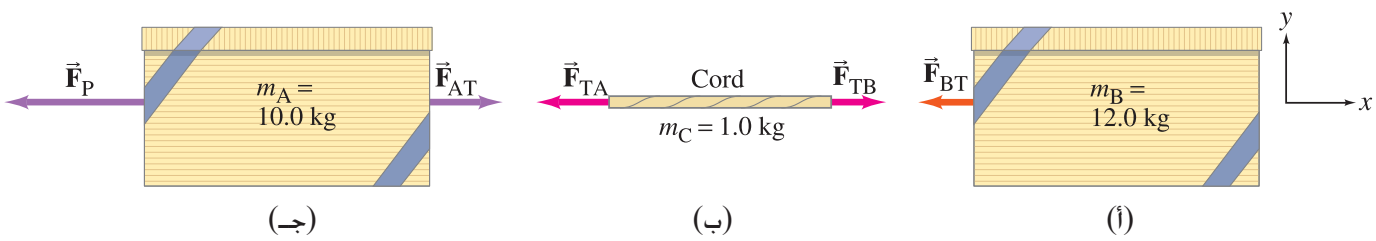
43. (II) يجلس صندوق ساكناً على سطح خشن مائل بزاوية 30°. (أ) ارسم مخطط الجسم الحر مظهرًا القوى المؤثرة في الصندوق جميعها. (ب) كيف سيبدو المخطط خلال انزلاق الصندوق إلى الأسفل على السطح. (جـ) كيف سيتغير المخطط لو أن الصندوق ينزلق إلى الأعلى بعد إعطائه سرعة أولية؟

44. (II) تمتلك عجلات سباق التسارع معامل احتكاك سكوني كبير جداً على السطح الإسفلتي. قدر قيمة معامل الاحتكاك السكوني الضروري لسباق تسارع بلا انزلاق للعجلات وبتسارع ثابت لمسافة 1.0 km خلال 12 s بدءًا من السكون.

45. (II) يعادل معامل الاحتكاك الحركي لزلاجة كتلتها 22-kg على الحلبة 0.10. ما مقدار القوة الضرورية لدفع الزلاجة أسفل سطح مائل يميل بزاوية 6.0° لتصل إلى سرعة 60 km/h عند نهاية مسار طوله 75 m؟

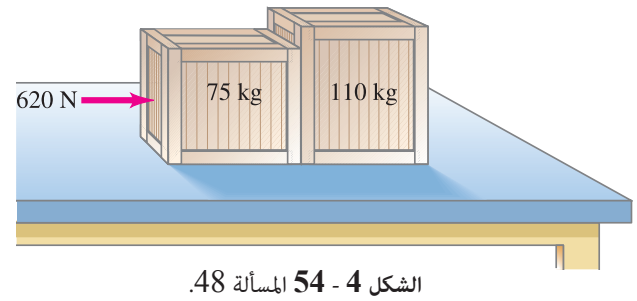
46. (II) من أجل النظام في (الشكل 4 - 32 المثال 4 - 20): ما مقدار الكتلة الضروري للصندوق A كي يمنع حدوث أي حركة؟ افرض أن $\mu_s = 0.30$

47. (II) دفع صندوق فانزلق على سطح الأرض. ما أقصى مسافة سيقطعها الصندوق، علمًا بأن معامل الاحتكاك الحركي هو 0.20 وسرعة حركته الابتدائية هي 4.0 m/s؟



الشكل **4 - 53** المسألة 35. مخطط جسم حر لصندوقين على طاولة يرتبطان ببعضهما بعضًا بواسطة حبل ثقيل مسحوب إلى اليمين، كما في (الشكل 4 - 44 أ). القوة الرأسية $\vec{\mathbf{F}}_N$ و $\vec{\mathbf{F}}_G$ غير مبينة.

48. (II) يجلس صندوقا شحن متلامسان كتلتهما 75 kg و 110 kg على سطح أملس من غير حركة (الشكل 4 - 54). وتؤثر قوة مقدارها 620-N في الصندوق ذي الكتلة 75-kg. إذا علمت أن معامل الاحتكاك الحركي يساوي 0.15، فاحسب (أ) تسارع النظام. (ب) القوة التي يُؤثر بها كل صندوق شحن في الآخر. (جـ) أعد الحل بعد استبدال موضع الصندوقين.



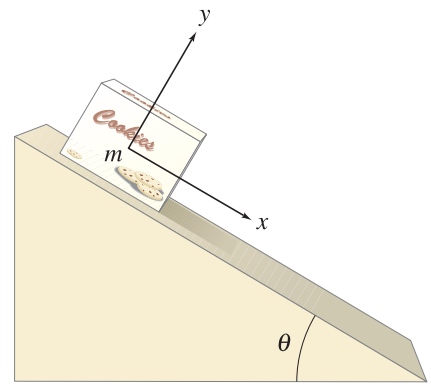
الشكل **4 - 54** المسألة 48.

49. تحمل شاحنة مسطّحة صندوقاً ثقيلًا.فإذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين أرضية الشاحنة و الصندوق 0.75، فما أكبر تباطوء للشاحنة يقوم به السائق لتجنب إنزلاق الصندوق إلى غرفة قيادة الشاحنة.

50. تتخوف من إيقاف سيارتك في أيّ يوم جليدي على طريق منزلك الذي ينحدر 12°، بينما انحدار طريق جيرانك 9.0°، وانحدار الطريق الرئيسي 6.0°.فإذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين مطاط عجلات السيارة و الجليد 0.15، فأيّ من الطرق المذكورة أكثر أماناً لوقوف سيارتك

51. (II) تنزلق طفلة إلى الأسفل على الزلاجة المائلة بزاوية 28° فتصبح سرعتها عند الأسفل تماما نصف السرعة المفترضة لو أن سطح الزلاجة أملس. احسب قيمة معامل الاحتكاك الحركي بين سطح الزلاجة والطفلة.

52. (II) تستقر علبة كرتونية، كما في (الشكل 4 - 55) على سطح يميل بزاوية $\theta = 22.0°$ مع الأفقي. (أ) إذا كان $\mu_k = 0.12$ فاحسب تسارع العلبة عندما تنزلق على السطح إلى الأسفل. (ب) إذا بدأت العلبة بالانزلاق من السكون من ارتفاع 9.30 m مقارنة بارتفاع قاعدة السطح المائل، فاحسب سرعة العلبة عندما تصل أسفل السطح المائل؟



الشكل **4 - 55** المسألة 48.

53. (II) أعطيت العلبة سرعة ابتدائية مقدارها 3.0 m/s إلى أعلى السطح المائل بزاوية 22.0° كما هو موضح في (الشكل 4 - 55). (أ) ما أبعد مسافة ستصل إليها العلبة؟ و(ب) ما الزمن المستغرق قبل أن تصل العلبة إلى نقطة البداية؟ اهمل الاحتكاك.

54. (II) تصل عربة أفعوانية إلى قمة تلة شديدة الانحدار بسرعة 6.0 km/h. ثم تبدأ بالهبوط عن التلة التي تميل بزاوية متوسطها 45° وطولها 45.0 m. قدر سرعة عربة الأفعوانية عندما تصل إلى أسفل التلة . افرض أن $\mu_k = 0.18$.

55. (II) تُرك صندوق كتلته 18.0-kg ليتسارع بمعدل $0.270\ m/s^2$ إلى أسفل سطح مائل يميل بزاوية 37.0°. أوجد قوة الاحتكاك المعيقة للحركة. وما مقدار معامل الاحتكاك الحركي؟

56. (II) تُبت صندوق صغير في موضعه مقابل حائط خشن عن طريق دفعه بقوة تميل إلى الأعلى بزاوية 28° فوق الأفقي. إذا علمت أن معاملا الاحتكاك السكوني والحركي بين الصندوق والحائط هما 0.40 و 0.30 على الترتيب، وإذا كان الصندوق سينزلق إلى الأسفل عندما تقل قيمة القوة عن 13 N، فما كتلة الصندوق؟

57. (II) تصبح أكوام الثلج على الأسطح الزلقة مقذوفات خطيرة عندما تبدأ بالذوبان. خذ بنظر الاعتبار كتلا كبيرة من الثلج عند كتف سطح مائل بدرجة 30°: (أ) ما أدنى قيمة لمعامل الاحتكاك السكوني، التي ستحول دون انزلاق الثلج إلى الأسفل. و(ب) عندما يبدأ الثلج بالذوبان تبدأ قيمة معامل الاحتكاك السكوني بالنقصان تدريجيا لينزلق الثلج عن السطح في نهاية الأمر. افترض أن المسافة بين كتله الثلج وحافة سطح المنزل هي 5.0 m وأن معامل الاحتكاك الحركي هو 0.20 واحسب سرعة انزلاق كتله الثلج عن السطح . و(جـ) ما سرعة اصطدام الثلج بالأرض إذا علمت أن السطح يرتفع مسافة 10.0 m عن سطح الأرض؟

58. (III) (أ) ما أدنى مسافة للوقوف الكامل لسيارة تسير بسرعة $v^2/2\mu_s g$ حيث يمثل μ_s معامل الاحتكاك السكوني بين العجلات والطريق و g تسارع الجاذبية. و(ب) ما المسافة التي تقطعها سيارة كتلتها 1200-kg تسير بسرعة 95 km/h إذا كان $\mu_s = 0.75$؟

59. (III) ينزلق كوب قهوة إلى الأمام على الرف الأمامي لسيارة عندما تتباطأ إلى السكون من 45 km/h خلال 3.5 s أو أقل. ولا يعود هذا الكلام صحيحا إذا استغرق تباطؤ السيارة زمنا أطول من ذلك. فما معامل الاحتكاك السكوني بين الكوب وسطح الرف الأمامي؟

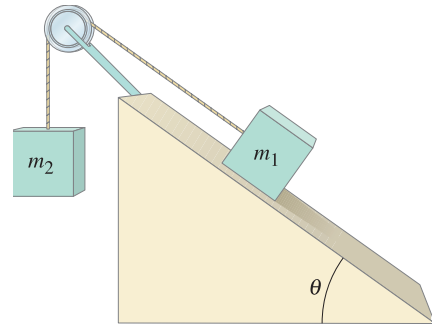
60. (III) أُعطي مكعب صغير كتلته m سرعة ابتدائية v_0 فبدأ بالانزلاق إلى أعلى سطح مائل يميل بزاوية θ عن المستوى الأفقي. إذا استمر المكعب بالانزلاق إلى الأعلى ليقطع مسافة d قبل أن يقف تماما فأوجد معادلة لمعامل الاحتكاك الحركي بين السطح المائل والمكعب.

61. (III) أسند متسلق كتلته 75-kg، كما في (الشكل 4 - 56) نفسه داخل "مدخنة" بواسطة قوى الاحتكاك المؤثرة في حذائه وظهره. إذا علمت أن معاملي الاحتكاك السكوني بين الحائط وحذائه والحائط وظهره هما 0.80 و0.60 على الترتيب فما هي أدنى قوة عمودية يجب أن يؤثر فيها؟ افترض أن الجدران رأسية وأن القوتين عظميين . وأهمل تأثير قبضة الحبل.

الشكل **4 - 56** المسألة 61.

62. (III) تتحرك الصناديق على حزام الشحن من منطقة تحميلها إلى محطة التغليف على بعد 11.0 m. ويبدأ الحزام المتحرك بالحركة من السكون وينهي تحركه بالوقوف التام. وتتم أسرع عملية نقل عندما يتسارع الحزام خلال نصف المسافة، ثم يبدأ بالتباطؤ خلال نصف المسافة الثاني. وإذا كان معامل الاحتكاك السكوني بين الحزام والصندوق هو 0.60، فما أقل زمن مستغرق لنقل الصندوق؟

63. (III) يركد مكعب (كتلته m_1) على سطح أملس ويرتبط بمكعب آخر كتلته m_2 بواسطة حبل مهمل الكتلة يمر فوق بكرة، كما هو موضح في (الشكل 4 - 57). (أ) أوجد معادلة لتسارع النظام المكون من المكعبين بدلالة m_1 و m_2 و θ و g. (ب) ما الظروف الواجب تطبيقها على الكتلتين m_1 و m_2 للتحكم في اتجاه تسارع النظام (ولتكن باتجاه m_1 إلى الأسفل) أو بالاتجاه المعاكس؟



الشكل 4 - 57.
المسألة 63 و 64.

64. (III) (أ) افترض أن معامل الاحتكاك الحركي بين m_1 والسطح في (الشكل 4-57) هو $\mu_k = 0.15$ وأنّ $m_1 = m_2 = 2.7\ \text{kg}$. وحدد قيمة تسارع m_1 و m_2 عندما تتحرك m_2 إلى الأسفل، علمًا بأن $\theta = 25°$. (ب) ما أقل قيمة لـ μ_k التي ستمنع النظام من التسارع؟

65. (III) يستطيع دراج كتلته (مع دراجته) 65 kg الانطلاق إلى أسفل تلة تميل بزاوية 6.0° بسرعة ثابتة 6.0 km/h بسبب مقاومة الهواء. ما مقدار القوة الضرورية ليتسلق الدراج عائدا بدراجته بالسرعة نفسها،وتحت تأثير مقاومة الهواء السابقة نفسها ؟

مسائـل عامة

66. يضخ قلب الثدييات بناءً على النموذج المبسط للقلب في كلِّ نبضةٍ ما مقداره 20 g من الدم المسرع من 0.25 m/s إلى 0.35 m/s خلال مدّة زمنية مقدارها 0.10 s. فما مقدار القوة التي تؤثر فيها عضلة القلب؟

67. هناك فرصة معقولة لنجاة شخص ما من حادث تصادم سيارة إذا كان التباطؤ لا يتعدى 30 ضعفًا تسارع الجاذبية الأرضية. فاحسب القوة على شخص ما كتلته 70-kg يخضع لهذا التسارع. وما المسافة التي يقطعها شخص ما إذا أرغم على الوقوف التام بالمعدل السابق نفسه من سرعة 100 km/h؟

68. (أ) إذا كان التسارع الناشئ عن زلزال هو a، ومع هذا استطاع جسم ما أن يبقى ساكنا في موضعه، فأثبت أن أقل معامل احتكاك سكوني للجسم مع الأرض هو $\mu_s = a/g$. و(ب) أنتج الزلزال الشهير (لوما بريتا) على شاطئ مدينة سان فرانسيسكو في ولاية كاليفورنيا تسارعا أرضيا يعادل $4.0\ \text{m/s}^2$ مما تسبب في إيقاف دوري البيسبول عام 1989. فهل كانت مقاعد ملعب البيسبول ستبدأ بالتحرك على السطح لو أن السطح كان مغطى بمادة ذات معامل احتكاك سكوني يعادل 0.25؟

69. تسحب سيارة كتلتها 1150-kg مقطورة كتلتها 450 kg. وتؤثر السيارة بقوة أفقية في الأرض تعادل $3.8 \times 10^3\ \text{N}$ لتبدأ بالتسارع. فما مقدار القوة التي تؤثر بها السيارة في المقطورة؟ افترض أن معامل الاحتكاك الفاعل للمقطورة هو 0.15.

70. فحص محققو الشرطة موقع حادث تصادم سيارتين فاكتشفوا أن طول أثر انزلاق إحدى السيارتين على سطح الطريق التي كانت على وشك الوقوف التام قبل التصادم مباشرة يُعادل 72-m. فإذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين العجلات وسطح الطريق هو 0.80 تقريبا، فقدّر السرعة الابتدائية للسيارة على سطح هذا الطريق المستوي.

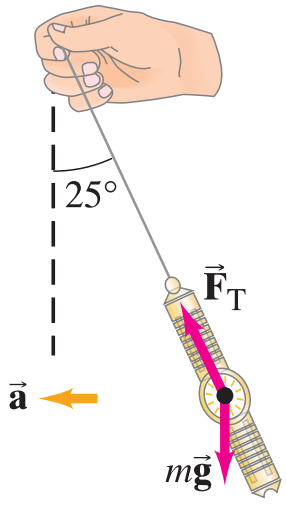
71. بدأت سيارة بالتدحرج إلى أسفل تلة تدعى 1– لكل – 4 (ويعني هذا أنه وعلى امتداد الطريق كل مسافة 4 m يختلف الارتفاع بمعدل 1m). فما سرعة السيارة عندما تصل إلى أسفل التلة بعد قطعها مسافة 55 m؟ (أ) اهمل الاحتكاك. (ب) افرض أن معامل احتكاك فاعل مقداره 0.10.

72. أسقطت حقيبة يد كتلتها 2.0-kg من أعلى برج "بيزا" المائل لتقطع مسافة 55 m قبل أن تصطدم بالأرض بسرعة 29 m/s. فما متوسط قوة مقاومة الهواء؟

73. يسير دراج بسرعة ثابتة تعادل 12 m/s ثم يدخل منطقة موحلة حيث معامل الاحتكاك الفاعل عندها يعادل 0.60. فهل سينجح الدراج في الخروج من هذه المنطقة الموحلة وطولها 11 m من غير أن يحتاج إلى الضغط على دواسات الدراجة؟ إذا كانت الإجابة نعم، فما سرعته لحظة الخروج؟

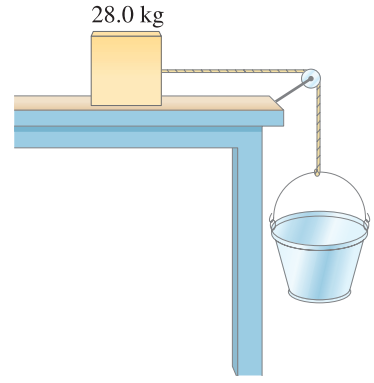
74. يقوم مهندس تصميم مدن بإعادة تصميم سفح جبلي من المدينة . ومن الاعتبارات المهمة جداً هي درجة ميل الطرق التي تمكن أضعف السيارات من صعود التلال من غير أن تتباطأ. فإذا كانت سيارة صغيرة كتلتها 1100 kg قادرة على التسارع على السطح المستوى من السكون إلى 21 m/s (75 km/s) خلال 14.0 s، فاحسب أقصى ميل ممكن للتلة باستخدام هذه البيانات.

75. ميساء، التي تحب تجارب الفيزياء، تترك ساعتها لتتدلى من حبل رفيع وهي مسافرة بالطائرة، فتلاحظ أن الحبل والساعة يصنعان زاوية 25° مع الرأسي عند إقلاع الطائرة من مطار عمان الذي يستغرق 18 s، كما في (الشكل 4 - 58). قدّر سرعة إقلاع الطائرة.



الشكل 4 - 58.
المسألة 75.

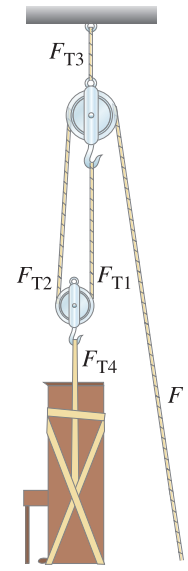
76. يرتبط مكعب كتلته 28.0-kg بدلو فارغ كتلته 1.35-kg بواسطة حبل يمر حول بكرة عديمة الاحتكاك (الشكل 4 - 59). إذا علمت أن معامل الاحتكاك السكوني بين سطح الطاولة والمكعب هو 0.450 وأن معامل الاحتكاك الحركي بين سطح الطاولة والمكعب هو 0.320 وأن رملا قد أضيف تدريجيا إلى الدلو ليكاد يبدأ النظام بالتحرك فاحسب. (أ) كتلة الرمال التي أضيفت إلى الدلو. (ب) تسارع النظام.



الشكل **4 - 59** المسألة 76.

77. عند تصميم الأسواق المركزية يؤخذ بعين الاعتبار وجود عدة طرق مائلة تربط بين أنحاء السوق المختلفة. وبما أن المتسوقين يدفعون عربات المشتريات إلى أعلى هذه الطرق المائلة، فمن الطبيعي أن لا تكون الحركة فوقها صعبة. ونتيجة الدراسة التي أعدها مهندس مختص اكتشف أن الناس لن تتذمر إذا كانت القوة الضرورية للدفع فوق السطوح المائلة لا تتعدى 20 N. فما أقصى زاوية بناء θ للمنحدرات إذا كانت العربات تتحمل 30-kg من المشتروات؟ أهمل الاحتكاك.

78. (أ) ما أقل قوة F ضرورية لرفع آلة بيانو (كتلتها M) باستخدام منظومة البكرة الموضحة في (الشكل 4 - 60)؟ (ب) حدد مقدار الشد في كل جزء من الحبل: F_{T1} و F_{T2} و F_{T3} و F_{T4}.



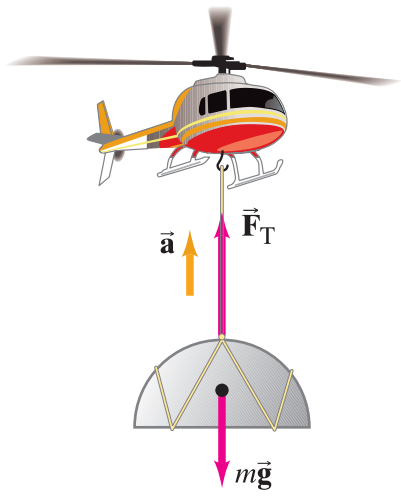
الشكل **4 - 60** المسألة 78.

79. تتسارع طائرة نفاثة بمعدل $3.5\ m/s^2$ وبزاوية $45°$ فوق الأفق. فما القوى الكلية التي يؤثر بها مقعد غرفة القيادة في طيار كتلته 75-kg؟

80. خلال عملية تصميم مقعد أمان الطفل، يأخذ المهندس بنظر الاعتبار الظروف التالية: تجلس طفلة كتلتها 12-kg في مقعد الأمان المثبت ومحكم التقييد في مقعد السيارة، (الشكل 4 - 61). وتصطدم السيارة اصطداما مباشرا بسيارة أخرى. وتتناقص سرعة السيارة من سرعة ابتدائية v_0 تعادل 45 km/h إلى الصفر خلال 0.20 s نتيجة التصادم. فقدر محصلة القوى الأفقية F التي يؤثر بها حزام أمان مقعد الطفلة فيها ليبقيها في موضعها خلال التصادم مفترضاً تباطؤًا ثابتًا. تعامل مع الطفلة وكأنها جسم نقطي واذكر أي فرضيات أخرى تم اتخاذها خلال التحليل.

الشكل **4 - 61** المسألة 80.

81. تتسارع طائرة عمودية كتلتها 7650-kg إلى الأعلى بمعدل $0.80 m/s^2$ وهي ترفع إطار كتلته 1250-kg في موقع إنشاءات. (الشكل 4 - 62). (أ) ما مقدار قوة الرفع التي يؤثر بها الهواء في مراوح الطائرة العمودية؟ (ب) ما مقدار الشد في الحبل (أهمل كتلته) الذي يربط الإطار مع الطائرة العمودية؟ (جـ) ما مقدار القوة التي يؤثر بها الحبل في الطائرة العمودية؟



الشكل **4 - 62** المسألة 81.

82. قطار إيطالي عظيم السرعة يتكون من 12 عربة كتلته 660 طنا مترياً (660,00 kg) ومع أنه يستطيع أن يؤثر بقوة أفقية عظمى تعادل 400 kN في السكة، فإنه يؤثر بقوة تعادل 150 kN في السكة عندما يصل إلى سرعته العظمى (300 km/h). فاحسب (أ) تسارعه الأعظم. (ب) قدر قيمة قوة ممانعة الهواء عند أعظم سرعة.

83. تنطلق متزلجة على الجليد كتلتها 65-kg من غير أن تبذل أي مجهود لمسافة 75 m إلى أن تتوقف. فإذا كان معامل الاحتكاك الحركي بين زلاجتيها والجليد هو $\mu_k = 0.10$، فما سرعتها الابتدائية لحظة بدء انطلاقتها؟

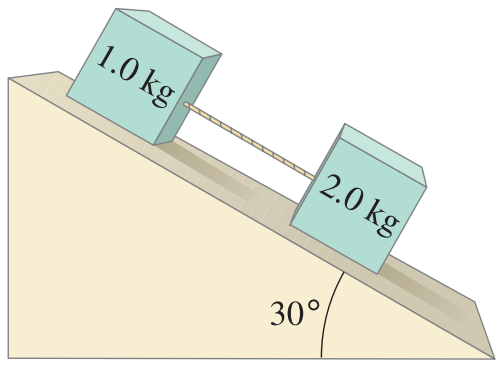
84. يستخدم متسلقا صخور، خالد وشهد، حبال أمان بأطوال متماثلة، ويُعدّ حبل شهد الأكثر مرونة، ويسميه المتسلقون بالحبل الديناميكي. أما حبل خالد فيسمى *بالحبل الستاتيكي* (الثابت)، ولا ينصح فيه خلال تسلق المحترفين لأسباب عديدة ومنها الأمان. وإذا سقطت شهد سقوطا حرا مسافة 2.0 m فسيعمل الحبل على إيقافها خلال مسافة 1.0 m (الشكل 4 - 63): (أ) قدر قيمة القوة الثابتة التي ستشعر بها شهد من الحبل مفترضا أن القوة ثابتة. (عبّر عن إجابتك بدلالة مضاعفات وزنها). (ب) إذا سقط خالد بطريقة شهد نفسها سقوطا حرا مسافة 2.0 m فسيتمدد حبله مسافة 30 cm فقط، احسب مقدار القوة التي سيؤثر بها الحبل فيه خلال إيقافه بدلالة مضاعفات وزنه. وأيّ المتسلقين سيتألم أكثر؟

الشكل 4 - 63
المسألة 84.

85. يستخدم صياد في قاربه حبل صيد مصنف بـ (اختبار 10-lb). وهذا يعني أن الحبل يستطيع أن يؤثر بقوة 45 N قبل أن ينقطع (1 lb = 4.45 N) (أ) ما أثقل سمكة يستطيع الصياد رفعها بخيطه رأسيًا من الماء إلى الأعلى بسرعة ثابتة ووضعها على قاربه؟ (ب) إذا تسارعت السمكة إلى الأعلى بمعدل $2.0\ m/s^2$، فما أثقل وزن سمكة يستطيع الصياد رفعه بخيطه ووضعه بأمان فوق قاربه. (جـ) هل من الممكن رفع سمكة سلمون مرقط كتلتها 15-lb بحبل اختبار 10-lb بأمان؟ لماذا نعم أو لماذا لا؟

86. تم السماح لمصعد في مبنى طويل بالوصول إلى سرعة عظيمة تعادل 3.5 m/s خلال نزوله. فما مقدار الشد الناتج في حبل المصعد الضروري لإيقافه خلال مسافة 2.6 m إذا كانت كتلة المصعد تعادل 1300 kg بما فيها كتل راكبيه؟

87. وضع صندوقان كتلة أحدهما $m_1 = 1.0\ kg$ ومعامل احتكاكه الحركي 0.10 وكتلة الآخر $m_2 = 2.0\ kg$ ومعامل احتكاكه الحركي 0.20 على سطح يميل بزاوية $\theta = 30°$. (أ) ما تسارع كل صندوق؟ (ب) إذا ربط الصندوقان بحبل مشدود (الشكل 4 - 64) حيث m_2 إلى الأسفل، فاحسب تسارع كل من الصندوقين؟ (جـ) احسب تسارع الصندوقين إذا تم عكس موضعيهما الابتدائيين.



الشكل 4 - 64 المسألة 87.

88. يقف شخص كتلته 75.0-kg على ميزان في مصعد. فما قراءة الميزان (بدلالة النيوتن والكيلوجرام) عندما يكون المصعد: (أ) ساكنا. (ب) صاعدا بسرعة ثابتة 3.0 m/s. (جـ) هابطًا بسرعة 3.0 m/s. (د) متسارعًا إلى الأعلى بمعدل $3.0\ m/s^2$. (هـ) متسارعًا إلى الأسفل بمعدل $3.0\ m/s^2$؟

89. يصعد ثلاثة متسلقي جبال، ربطوا أنفسهم بالحبال ببعض، حقلاً جليدياً يميل بزاوية 21.0° عن المستوى الأفقي. فإذا انزلق المتسلق الأخير ساحباً معه المتسلق الثاني، وكان المتسلق الأول قادرًا على حملهما معاً، وكانت كتلة كل متسلق 75 kg، فاحسب الشد في كلّ جزء من الحبل بين المتسلقين الثلاثة. اهمل الاحتكاك بين الجليد والمتسلقين المنزلقين.

إجابات التمارين

أ: (أ) متشابهان. (ب) سيارة السباق. (جـ) القانون الثالث للبند (أ) والقانون الثاني للبند (ب).
ب: القوة التي يؤثر بها الشخص غير كافية لإبقاء الصندوق متحركاً.
جـ: لا. ونعم.
د: نعم. ولا.