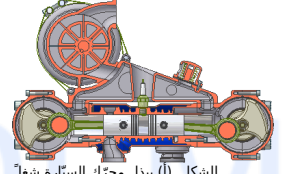


الطاقة الميكانيكية

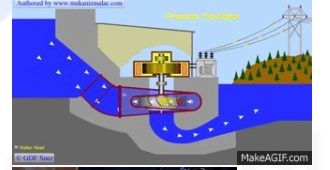
Work and Energy الشغل والطاقة

تعرّف في الدرس السابق أنّه عندما تؤثر قوة خارجية في جسم، وتحركه إزاحة معينة؛ فإنها تبدل شغلاً عليه. وأنسأله: ماذا يحدث لهذا الشغل المبذول على الجسم؟ يؤدي هذا الشغل إلى تغيير طاقة الجسم، أنظر بأنها مقدرة الجسم على بذل Energy إلى الشكل المجاور وتعرف الطاقة حسب النظام الدولي (J) شغل، وهي كمية قياسية تُقاس بوجوده الجول للوحدات. فالرياح لها طاقة حركية تُمكنها من بذل شغل على شفرات المراوح عندما تصطدم بها، وبناء على ما سبق، يُمكنني تعريف الشغل بأنه إحدى طرائق نقل الطاقة بين الأجسام، للطاقة أشكال متعددة تنحصر في نوعين رئيسيين، هما:

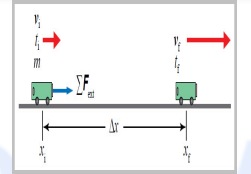
- الطاقة الحركية.
- الطاقة الكامنة (الوضع).



الشكل (1) يبدل محرك السيارة شغلً عليها يُغيّر طاقتها الحركية عندما تتسارع على طريق أفقي .



الشكل (17): للمطرقة طاقة حركية تُمكنها من بذل شغل على المسامير، ودفعه في اللوح الخشبي.



الشكل (18): الشغل الكلي المبذول على العربة يساوي التغيّر في طاقتها الحركية .

Kinetic Energy الطاقة الحركية

يمكن توليد الطاقة الكهربائية بالاستفادة من حركة الرياح؛ حيث تبدل الرياح شغلاً على المراوح (التوربينات) فتحركها؛ أي إنّ للرياح طاقة. الأخط أن الأجسام المتحركة قد تُحدث تغييراً في الأجسام التي تصطدم بها، أنظر إلى الشكل . (KE) ورمزها Kinetic energy تُسمى الطاقة المرتبطة بحركة جسم الطاقة الحركية وتعتمد على كل من:

- (m) - كتلة الجسم
- (v) مقدار سرعته .

$$KE = 1/2 mv^2$$

تناسب الطاقة الحركية لجسم طردياً مع كل من: كتلته ومربع سرعته. أقل منها لشاحنة (v) فمتل، الطاقة الحركية لسيارة متحركة بسرعة مقدارها متحركة بالسرعة نفسها؛ لأن كتلة الشاحنة أكبر. تُسمى الطاقة الحركية طاقة حركية خطية، إذ إنّها ناتجة عن الحركة الخطية للجسم. أما عند حركة الجسم حركة دورانية حول محور دوران؛ فإنّه يمتلك طاقة حركية دورانية. والشكل المجاور يوضح المراوح تتحرك حركة دورانية .

Work - Kinetic Energy Theorem (مبرهنة الشغل - الطاقة الحركية)

عندما تؤثر قوة محضلة في جسم وتُغيّر مقدار سرعته (تُغيّر طاقته الحركية)؛ فإنها تكون قد بذلت عليه شغلاً. يمكن إثبات ذلك عملياً، وإثباته رياضياً أنظر تتحرك بسرعة متجهة ابتدائية (m) إلى الشكل (18) ، الذي يوضح عربة كتلتها قد أثرت في العربة عندما (ΣF_{net}) أفترض أنّ قوة محضلة أفقية خارجية (v₁) تحت تأثير هذه القوة، (d = Δx) بحيث قطعت إزاحة (x₁) كانت عند الموقع (x₁) في نهاية الإزاحة عند الموقع (v₂) وأصبحت سرعتها المتجهة النهائية في اتجاه القوة (a) استناداً إلى القانون الثاني لنيوتن، تتحرك العربة بتسارع المحضلة نفسه، حيث:

$$\Sigma F_{ext} = ma$$

ويُعطى شغل القوة المحضلة الخارجية (الشغل الكلي) خلال هذه الإزاحة بالعلاقة:

$$W_{Total} = \Sigma F_{ext} \cdot \Delta x = \Sigma F_{ext} \Delta x \cos 0^\circ = ma\Delta x$$

وبإعادة ترتيب حدود معادلة الحركة بتسارع ثابت الآتية:

$$vf^2 = vi^2 + 2a\Delta x$$

أنتوّل إلى معادلة حساب التسارع الآتية:

$$a = (vf^2 - vi^2) / 2\Delta x$$

من هذه المعادلة في معادلة حساب (a) ويتعويض قيمة التسارع

الشغل السابقة؛ أحصل على ما يأتي:

$$W_{Total} = \Sigma F_{ext} \Delta x = m (vf^2 - vi^2 / 2) \Delta x \quad W_{Total} = \Sigma F_{ext} \Delta x = 1/2 m vf^2 - 1/2 m vi^2 = KE_f - KE_i$$

تمثل الطرف الأيسر من المعادلة الشغل الذي بذلته القوة المحضلة على العربة، أما الطرف الأيمن منها فيُمثل التغيّر في الطاقة الحركية للعربة، أي إنّ:

$$W_{Total} = \Delta KE$$

(تسمى هذه العلاقة (مبرهنة الشغل - الطاقة الحركية

Work - kinetic energy theorem .

وتنص على أنّ:

« الشغل الكلي المبذول على جسم يساوي التغيّر في طاقته الحركية . »

استنتج من مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية) أنّ مقدار سرعة الجسم يزداد عندما يكون الشغل الكلي المبذول عليه موجّباً؛ حيث الطاقة الحركية النهائية أكبر من الطاقة الحركية الابتدائية. وأنّ مقدار سرعة الجسم يتناقص عندما يكون الشغل الكلي المبذول عليه سالباً؛ حيث الطاقة الحركية النهائية أقل من الطاقة الحركية الابتدائية



مثال محلول ؟

نحو الشرق على طريق أفقي بسرعة (kg تتحرك سيارته كتلتها (8 × 102) ضغط سائقها على دواسه الوقودكي يتجاوز سيارته أخرى، (m/s) مقدارها (15) m) بعد قطعها إزاحة مقدارها (2 × 102) m/s) بحيث أصبح مقدار سرعة السيارة (25) من لحظة ضغطه على الدواسه. أنظر إلى الشكل (19)، أحسب مقدار ما يأتي:

أ. الطاقة الحركية الابتدائية للسيارة،
ب. التغير في الطاقة الحركية للسيارة خلال فترة الضغط على دواسه الوقود،
ج. الشغل الكلي المبدول على السيارة خلال هذه الإزاحة،
د. القوة المحصلة الخارجية المؤثرة في السيارة.

الحل

أ. أحسب الطاقة الحركية الابتدائية للسيارة؛ باستعمال معادلة الطاقة الحركية، كما يأتي :

$$KE_i = \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2} \times 8 \times 102 \times (15)^2 = 9 \times 10^4 \text{ J}$$

ب. أحسب التغير في الطاقة الحركية للسيارة، كما يأتي :

$$\Delta KE = KE_f - KE_i = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2} \times 8 \times 102 \times [(25)^2 - (15)^2] = 4 \times 102 \times [400] = 1.6 \times 105 \text{ J}$$

ج. السيارة تتحرك على طريق أفقي، وشغل القوة المحصلة غير مقدار سرعتها؛

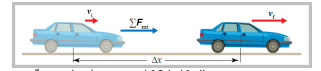
لذا، فإن الشغل الكلي الذي بذته القوة المحصلة الخارجية على السيارة يساوي

(التغير في طاقتها الحركية، حسب ميرهنه (الشغل - الطاقة الحركية

$$W_{Total} = \Delta KE = 1.6 \times 105 \text{ J}$$

د. أستعمل ميرهنه (الشغل - الطاقة الحركية

$$W_{Total} = \Delta KE = 1.6 \times 105 \text{ J} \quad W_{Total} = \sum F_{ext} \Delta x = \Delta KE = \Delta KE = \Delta KE \Delta x = (1.6 \times 105) (2 \times 102) = 8 \times 102 \text{ N}$$



الشكل (19): قوة محصلة خارجية تؤثر في سيارة تتحرك نحو اليمين إزاحة مقدارها

نمرين
تتحرك بسرعة (kg استعمل المتغيرات: سيارته مخصصة للسير على الرمال كتلتها (600) في مسار أفقي، أنظر إلى الشكل (20)، أثرت فيها قوة محصلة خارجية (m/s) مقدارها (28) أحسب مقدار: (m/s²) عملت على تباطؤها بمقدار (1.6) s لعنته زمنية مقدارها (5) الطاقة الحركية النهائية للسيارة،
ب. التغير في الطاقة الحركية للسيارة خلال فترة تأثير القوة المحصلة الخارجية،
ج. شغل القوة المحصلة الخارجية المبدول على السيارة، خلال فترة تأثير هذه القوة



الشكل (20) سيارته مخصصة للسير على الرمال

Potential Energy (الطاقة الكامنة) (طاقة الوضع

هي طاقة مختزنة في نظام مكون من جسيمين أو أكثر تأخذ أشكالاً مختلفة؛ فقد تكون:

- **طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية:** نتيجة موقع جسم بالنسبة إلى سطح الأرض.
- **طاقة وضع كهربائية:** نتيجة موقع جسم مشحون بالنسبة إلى جسم آخر مشحون.
- **طاقة وضع مرونية:** نتيجة تغير شكل الجسم؛ مثل الأجسام المرنة كالناض.
- **طاقة كيميائية:** نتيجة تخزينها في الروابط الكيميائية داخل المادة نفسها. وغيرها...

وستلقى الضوء هنا على طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية. ونشير هنا إلى أنه عند دراسة حركة نظام مكونين جسم الأرض؛ فإننا اختصاراً نذكر طاقة وضع الجسم بدل (طاقة وضع نظام الجسم - الأرض

Gravitational Potential Energy (طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية

يوضح الشكل (21) نظاماً يتكون من الأرض وكتاب الفيزياء. عندما أوثرت بقوة خارجية (F_{ext}) (y_i) ورفعه رأسياً إلى أعلى بسرعة ثابتة من الموقع الابتدائي (m) في الكتاب كتلته (F_{ext})

فإنني أبدأ شغل على الكتاب، يُعطى، (Δy) بحيث يقطع إزاحة (y_f) إلى الموقع النهائي

بالمعادلة الآتية :

$$W_F = F_{ext} \Delta y \cos \theta = mg(y_f - y_i) = mgy_f - mgy_i$$

إذ مقدار القوة الخارجية المؤثرة في الكتاب يساوي مقدار وزنه؛ لأنه رُفع بسرعة متجهة ثابتة.

وختزن شغل هذه القوة على شكل طاقة وضع في نظام (الكتاب - الأرض). وفي حال سقوط

الكتاب؛ تتحول هذه الطاقة المختزنة إلى طاقة حركية، تمكنه من إنجاز شغل.

بأنها: **Gravitational potential energy**، تُعرف **طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية**

الطاقة المختزنة في نظام (جسم - الأرض) نتيجة موقع الجسم في مجال الجاذبية، ويرمزها PE

$$PE = mgy$$

الأحاط أنه كي أحسب طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لجسم عند موقع معين، يلزمني

وهو مستوى مرجعي، **Reference level** عن مستوى الإسناد (y) تحديداً ارتفاعه الرأسي

اختياري، أفترض أنّ طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لأج جسم عنده تساوي صفراً،

وأختاره بحيث يُسهّل حل المسألة، وعادة أختار سطح الأرض مستوى إسناد، أنظر إلى

الشكل (22). وباقتراض أنّ تسارع السقوط الحر ثابت تقريباً قرب سطح الأرض؛ فإن

طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لجسم معين تعتمد فقط على ارتفاعه الرأسي

عن سطح الأرض (مستوى الإسناد). أما التغير في طاقة وضع هذا الجسم عند حركته

بين موقعين في مجال الجاذبية؛ فيعتمد فقط على التغير في الارتفاع الرأسي بين

بناءً على ما سبق، يمكنني إعادة كتابة معادلة شغل (Δy) الموقعين الابتدائي والنهائي

: القوة الخارجية بدلالة التغير في طاقة الوضع عند حركة جسم بسرعة ثابتة كما يأتي

$$W_F = \Delta PE = mgy$$

إذ يعمل شغل القوة الخارجية على تغيير طاقة الوضع للجسم.

Work Done by The Force of Gravity (الشغل الذي تبذله قوة الجاذبية

إلى (y_f) يُبين الشكل (23)، **ملترقيتين** لرفع التفل نفسه من الموقع الابتدائي

(y_i). **الأولى:** رفعه رأسياً إلى أعلى بسرعة متجهة ثابتة، كما هو موضح في الشكل (23 أ).

الثانية: دفعه إلى أعلى مستوى مائل أملس بين الموقعين الرأسيين نفسيهما

بسرعة متجهة ثابتة، كما هو موضح في الشكل (23 ب). إن الشغل المبدول

على التفل يساوي التغير في طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية، وبما إنّ التغير

في طاقة الوضع في الحالتين هو نفسه؛ لذا، يلزمني بدل مقدار الشغل نفسه

على التفل في الحالتين .

أستنتج ممّا سبق،

أنّ الشغل المبدول على جسم عند تحريكه بين موقعين في مجال الجاذبية،

يعتمد فقط على التغير في الارتفاع الرأسي بين الموقعين، ولا يعتمد على

المسار الذي يسلكه الجسم بينهما. يُحسب الشغل المبدول لنقل جسم

بين موقعين مختلفين في الارتفاع في مجال الجاذبية من دون تغيير طاقته

الحركية؛ بمعرفة التغير في طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية؛ لأنه أسهل

بكثير من حساب استعمال معادلة الشغل، وبخاصة عند حركة الجسم في

مسارات متعرجة. من أجل ذلك، أنظر إلى الشكل (24) الذي يُبين رفع صندوق

إلى أعلى بطريقتين:

الأولى عبر مسار متعرج (الدرج).

الثانية عبر رفعه رأسياً إلى أعلى بحبل.

إنّ الشغل المبدول في الحالتين هو نفسه؛ لذا، أجد علاقة لحساب الشغل

بدلالة التغير في طاقة وضع الصندوق كما يأتي:

لرفع الصندوق رأسياً إلى أعلى بسرعة ثابتة بحبل، يلزمني التأثير فيه بقوة

شد (قوة خارجية) إلى أعلى، تساوي وزنه في المقدار وتعاكسه في الاتجاه،

إذ يُعطى مقدار شغل القوة الخارجية عليه بالعلاقة

$$W_F = \Delta PE$$

إنّ التغير في طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية في أثناء حركة الصندوق

رأسياً نحو الأعلى يُعطى بالمعادلة

$$\Delta PE = PE_f - PE_i \quad mg(y_f - y_i) = mgy$$

لذا، (Δy > 0) عموماً، عند حركة جسم رأسياً إلى أعلى تكون إزاحته موجبة

أما شغل قوة الجاذبية (ΔPE > 0) يكون التغير في طاقة وضعه موجباً أيضاً؛

لأنّ اتجاه إزاحة (Wg = -mgy) عليه خلال الإزاحة نفسها فيكون سالباً؛

الجسم (إلى أعلى) يكون معاكساً لاتجاه تأثير قوة (إلى أسفل).

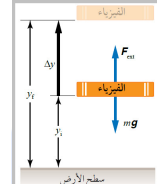
(ΔPE < 0)؛ لذا، يكون (Δy < 0) وإذا تحرك الجسم رأسياً إلى أسفل فستكون

أما شغل قوة الجاذبية عليه خلال الإزاحة نفسها فيكون موجباً؛

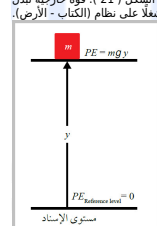
$$W_g = mgy$$

لأنّ قوة الجاذبية والإزاحة في الاتجاه نفسه. أي إنّ شغل قوة الجاذبية يساوي

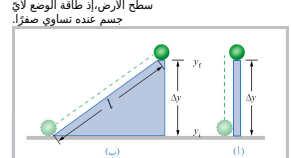
$$W_g = -\Delta PE$$



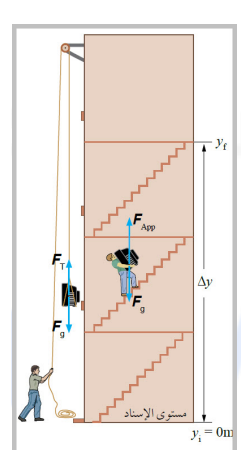
الشكل (21): قوة خارجية تبذل شغلاً على نظام (الكتاب - الأرض).



الشكل (22): مستوى الإسناد هو سطح الأرض؛ إذ طاقة الوضع لأج جسم عنده تساوي صفراً.



الشكل (23): طاقة الوضع المختزنة في الكرة في الطريقتين متساوية .



الشكل (24): التغير في طاقة وضع (y_f) و (y_i) الصندوق بين الموقعين لا يعتمد على المسار الذي يسلكه الجسم بينهما .

مثال محلول؟

ورفعته رأسياً إلى أعلى ، (k في الشكل (24) ، إذا كانت كتلة الصندوق (10)
عنه، فأحسب مقدار ما يأتي (m بسرعة ثابتة من سطح الأرض إلى ارتفاع 9)
(m/s²) :
أ . طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية للصندوق عند أقصى ارتفاع عن سطح الأرض.
ب. الشغل الذي بذلته قوة الشد لرفع الصندوق إلى أقصى ارتفاع.
ج. التغير في طاقة وضع الصندوق عند رفعه من سطح الأرض إلى أقصى ارتفاع.
د . الشغل الذي بذلته قوة الجاذبية في أثناء رفع الصندوق إلى أعلى.

الحل

أختار سطح الأرض مستوى إسناد لطاقة الوضع.

أ . أحسب طاقة الوضع النهائية للصندوق؛ باستعمال معادلة طاقة الوضع

الناشئة عن الجاذبية، كما يأتي

$$PE_f = mg y_f = 9 \times 10 \times 10 = 9 \times 10^2 \text{ J}$$

ب. الصندوق يتحرك إلى أعلى بسرعة ثابتة، فتكون القوة المحصلة المؤثرة فيه في

الاتجاه الرأسي صفراً.

أطبق القانون الثاني لنيوتن في الاتجاه الرأسي لحساب مقدار قوة الشد كما يأتي

$$\Sigma F_y = m a_y = 0 \text{ FT} - F_g = 0 \text{ FT} = F_g = mg = 10 \times 10 = 102 \text{ N}$$

ثم أحسب الشغل الذي بذلته قوة الشد على الصندوق، كما يأتي

$$WF = FT \times \Delta y \times \cos \theta = 9 \times 10^2 \times \cos 0^\circ = 9 \times 10^2 \text{ J} = \Delta PE$$

ج. شغل القوة الخارجية (قوة الشد) على الصندوق يساوي التغير في

طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية، إذ إن طاقته الحركية لم تتغير في أثناء

رفعه .

$$WF = \Delta PE = 9 \times 10^2 \text{ J}$$

د . رفعت الصندوق بسرعة ثابتة، وحسب مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية)؛

فإن الشغل الكلي المبذول على الصندوق يساوي التغير في طاقته الحركية،

وهو هنا يساوي صفراً :

$$W_{Total} = \Delta KE = 0 \text{ WF} + W_g = 0 \text{ Wg} = - \Delta PE = -9 \times 10^2 \text{ J}$$

تمرين

800 cm) سقط من السكون من ارتفاع (250) ، (واستنح : إصيص أهرار كتله (

عن سطح الأرض. أحسب مقدار ما يأتي:

(m/s²) :
أ . طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية عند أقصى ارتفاع عن سطح الأرض.

ب. التغير في طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية عند سقوطه.

ج. شغل قوة الجاذبية المبذول على الإصيص

Mechanical Energy

(PE) أو طاقة وضع (KE) عرف أن حسباً يمكن أن يكون له طاقة حركية

أو كلاهما. يُسمى مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع: **الطاقة الميكانيكية**

(Mechanical energy (ME)

وتعبر عنها بالمعادلة الآتية:

$$ME = KE + PE$$

في الشكل المقابل المتحرك، الأخط أثناء هبوط السيارة للأسفل تزداد

باللون الأزرق، (PE) باللون الأحمر وتقل طاقة الوضع (KE) الطاقة الحركية

(ME) ومجموع طاقة الوضع وضع والطاقة الحركية يساوي الطاقة الميكانيكية

باللون الأخضر وهي كما لاحظت ذات مقدار ثابت.

Conservation of Mechanical Energy

عندما تتحرك كرة قريباً من سطح الأرض، يكون مجموع الطاقة الحركية وطاقة

الوضع الناشئة عن

الجاذبية لنظام (الكرة - الأرض) محفوظاً عند إهمال مقاومة الهواء، ويساوي

مقداراً ثابتاً، حيث

$$ME = KE + PE = \text{constant}$$

وتغير ارتفاع الكرة عن سطح الأرض، تتحول طاقة الوضع إلى طاقة حركية عند

حركتها إلى أسفل (نحو الأرض)، أو تتحول الطاقة الحركية إلى طاقة وضع عند

حركتها إلى أعلى، بينما تبقى الطاقة الميكانيكية ثابتة ما دامت الكرة تتحرك تحت

تأثير قوة الجاذبية فقط. ومن الأمثلة الأخرى على

حفظ الطاقة الميكانيكية، حركة جسيم مشحون في مجال كهربي.

القوى المحافطة والقوى غير المحافطة

Conservative and Nonconservative Forces

تُصنّف القوى إلى قوى محافظة وقوى غير محافظة، وللقوة المحافطة خصيتان،

هما:

1. شغلها المبذول على جسم لتحريكه بين أيّ موقعين، لا يعتمد على المسار الذي

يسلكه الجسم بينهما.

2. شغلها المبذول على جسم لتحريكه عبر مسار مغلق يساوي صفراً.

عندما تعيق قوة محافظة حركة جسم تزداد طاقة وضعه، أما عندما تحرك

القوة المحافطة الجسم فتقل طاقة وضعه. وتعدّ قوة الجاذبية والقوة

المرونية والقوة الكهربائية أمثلة على القوى المحافطة، وتعدّ أيّ قوة لم

تُحقق خصيتي القوى المحافطة السابقتين قوة غير محافظة، إذ يعتمد

شغلها على المسار، وعندما تؤثر قوى غير محافظة في نظام وتبدل شغل

عليه؛ فإنها تعمل على تغيير طاقته الميكانيكية. ويوضح الشكل (25) اعتماد

شغل القوة غير المحافظة على المسار؛ والشغل الذي تبذله قوة الاحتكاك

على سطح الطاولة (B) و (A) الحركي في أثناء حركة الكتاب بين الموقعين

الأفقى الخشن، يكون أكبر عبر المسار المنحني؛ لأنه أطول من المسار المستقيم؛

لذا، لا تُعدّ قوة الاحتكاك قوة محافظة، وخلافاً للقوى المحافطة فإن شغل قوة

الاحتكاك لا يُختزن، بل يتحول جزء كبير منه إلى طاقة حرارية. وتعدّ **قوة الاحتكاك**

الحركي وقوة الشدّ أمثلة على القوى غير المحافظة.

للتوصل إلى علاقة رياضية لحفظ الطاقة الميكانيكية؛ أدرس حركة جسم تحت تأثير

قوة محافظة فقط. ويوضح الشكل (26) نظاماً يتكوّن من كرة والأرض، إذ تسقط

الكرة سقوطاً حرّاً تحت تأثير قوة الجاذبية فقط عند إهمال مقاومة الهواء،

بالنسبة (y_i) وسأدرس شغل قوة الجاذبية على الكرة، أمسك الكرة على ارتفاع

إلى سطح الأرض، فتكون الطاقة الميكانيكية للكرة عند أقصى ارتفاع فقط طاقة

وضع ناشئة عن الجاذبية، حيث الطاقة الحركية الابتدائية لها صفر؛ لأنها ساكنة.

بعد إفلات الكرة تسقط إلى أسفل، فتزداد طاقتها الحركية، بينما تقل طاقة وضعها،

تكون قوة (y_f) وعند وصول الكرة إلى الموقع النهائي

الجاذبية قد بذلت عليها شغلاً يُعطى بالعلاقة

$$W_g = -\Delta PE \dots\dots\dots 1$$

إنّ قوة الجاذبية قوة محافظة، وهي تساوي القوة المحصلة المؤثرة في الكرة في

أثناء سقوطها، وتطبيق مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية) على الكرة، أتوصل إلى

أنّ الشغل الكلي المبذول على الكرة في أثناء سقوطها يساوي التغير في

طاقاتها الحركية :

$$W_{Total} = W_g = \Delta KE \dots\dots\dots 2$$

وبمساواة المعادلتين (1) و (2) السابقتين، أحصل عل

$$\Delta KE = -\Delta PE \Rightarrow \Delta KE + \Delta PE = 0$$

وبما أن الطاقة الميكانيكية تعطى بالعلاقة

$$ME = KE + PE$$

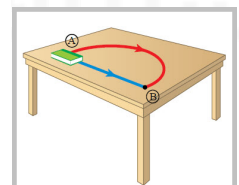
لذا، فإنّ

$$\Delta ME = 0 \Rightarrow ME_f - ME_i = 0 \Rightarrow ME_f = ME_i$$

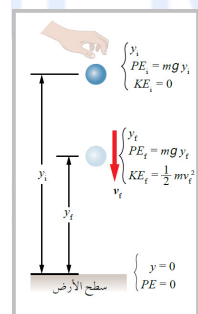
نصف العلاقة السابقة **حفظ الطاقة الميكانيكية**

Conservation of mechanical energy

في ظل وجود قوى محافظة فقط تبدل شغلاً، إذ تبقى الطاقة الميكانيكية للنظام ثابتة



الشكل (25) : يعتمد شغل القوة غير المحافظة على المسار.



الشكل (26) : إسقاط كرة بالنسبة إلى (y) من الموقع سطح الأرض .



مثال محلول ؟

رأسياً إلى أعلى عن سطح الأرض بسرعة (وذف لاعب كرة كتلتها (300 أنظر إلى الشكل (27). افترض أنه لا يوجد قوى احتكاك، (m/s مقدارها (20 فأحسب مقدار ما يأتي للكرة عند وصولها، (m/s²) وتنازع السقوط الحر (10 إلى أقصى ارتفاع:
 أ . طاقتها الميكانيكية،
 ب. التغير في طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية،
 ج. أقصى ارتفاع تصله عن سطح الأرض،
 د . التغير في طاقتها الحركية،
 هـ. الشغل الذي بذلته قوة الجاذبية عليها.

الحل

أختار سطح الأرض مستوى إسناد لطاقة الوضع. بإهمال مقاومة الهواء تؤثر قوة الجاذبية فقط في الكرة؛ لذا، فإن الطاقة الميكانيكية محفوظة، أنظر إلى الشكل (27).

أ . الطاقة الميكانيكية محفوظة؛ لا يوجد قوى غير محافظة تبذل شغلاً، والطاقة الميكانيكية للكرة لحظة قذفها طاقة حركية فقط، حيث طاقة وضعها صفر؛ لأنها تقع على مستوى الإسناد لطاقة الوضع. أما طاقتها الميكانيكية عند أقصى فهي طاقة وضع فقط، حيث مقدار سرعتها صفر عند هذا الموقع. (y_i) ارتفاع : أستعمل معادلة حفظ الطاقة الميكانيكية كما يأتي

$$ME_f = ME_i = KE_i + PE_i = 12 \text{ mv}^2 + 0 = 12 \times 0.3 \times (20)^2 = 60 \text{ J}$$

فقط (KE_f=0): طاقتها الميكانيكية عند أقصى ارتفاع طاقة وضع (حيث ME_f = KE_f + PE_f = 0 + 60 = 60J)

أحسب التغير في طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية للكرة عند وصولها إلى أقصى ارتفاع، كما يأتي :

$$\Delta PE = PE_f - PE_i = 60 - 0 = 60 \text{ J}$$

: باستعمال التغير في طاقة وضعها (h) ج. أحسب أقصى ارتفاع تصله الكرة كما يأتي :

$$\Delta PE = PE_f - PE_i = 60 = mg\Delta y = mg(y_f - y_i) = 60 = 0.3 \times 10 \times (y_f - 0) \Rightarrow y_f = 20 \text{ m} = h$$

د. لا يوجد قوة غير محافظة تبذل شغلاً على الكرة؛ لذا، فإن التغير في طاقتها الحركية، يساوي سالب التغير في طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية :

$$\Delta KE + \Delta PE = 0 \Rightarrow \Delta KE = -\Delta PE = -60 \text{ J}$$

إذ تتناقص طاقتها الحركية (تناقص السرعة) في أثناء ارتفاعها.

هـ. الشغل الذي تبذله قوة الجاذبية على الكرة في أثناء ارتفاعها إلى أعلى، يساوي سالب التغير في طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية، ويساوي التغير في طاقتها الحركية :

$$W_g = \Delta KE = -\Delta PE = -60 \text{ J}$$

تعرين

رأسياً إلى (m/s أحسب: في المثال السابق، إذا قُذفت الكرة نفسها بسرعة (15 أعلى عن سطح الأرض؛ فأحسب مقدار ما يأتي علقاً بأن تسارع السقوط الحر وبإهمال قوى الاحتكاك: (m/s²) (10 أ . الطاقة الحركية الابتدائية للكرة،

ب. طاقة الوضع التي اكتسبتها الكرة، عند وصولها إلى أقصى ارتفاع عن سطح الأرض،
 ج. سرعة الكرة لحظة عودتها إلى المستوى نفسه الذي قُذفت منه

شغل القوى غير المحافظة

Work Done by Nonconservative Forces (W_{nc})

لتحريك كتاب على سطح أفقي خشبي، يلزمنا التأثير فيه بقوة بشكل مستمر للمحافظة على حركته؛ إذ تعمل قوة الاحتكاك الحركي بين سطح الكتاب وسطح الطاولة، على تحويل جزء كبير من الطاقة الحركية للكتاب إلى طاقة حرارية ترفع درجة حرارة السطحين المتلامسين؛ لذا، يلزمنا بذل شغل على الكتاب؛ لتعويض الطاقة المبدولة في التغلب على قوة الاحتكاك. عند تأثير قوة غير محافظة في جسم وبذلها شغل عليه؛ فإن طاقته الميكانيكية تصبح غير محفوظة، ويُعتبر عن شغل القوى غير المحافظة بالعلاقة الآتية :

$$W_{nc} = \Delta ME$$

الشغل الذي تبذله القوى غير المحافظة، فمثل، يُعبّر عن شغل قوة (W_{nc}) حيث بالعلاقة الآتية: (W_f) الاحتكاك

$$W_f = \Delta ME = -fkd$$

طول المسار الذي يتحركه الجسم تحت تأثير قوة الاحتكاك الحركي (d) حيث



مثال محلول ؟

ذهبت جلا وصديقتها شري إلى مدينة الألعاب، حيث ركبنا لعبة الأفعوانية (m/s وعندما كانت لعبة الأفعوانية تتحرك بسرعة مقدارها (2) Roller-coaster) بحيث كان (m) هيبطت فجأة غير مسار منحدر خشبي طوله (50) (A) عند الموقع (45) ومقدار سرعة العربة (m) التغير في الارتفاع الرأسي غير هذا المسار المنحدر (24) أنظر إلى الشكل (29). إذا علمت أنّ كتلة (B) عند نهاية المسار الموقع (m/s) : فأحسب (m/s²) وتنازع السقوط الحر (10) (kg) عربة الأفعوانية مع ركبها (3 (B)) مقدار ما يأتي عند حركة عربة الأفعوانية من الموقع (A) إلى (B) :
 أ . التغير في طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية،
 ب. التغير في طاقتها الحركية،
 ج. التغير في طاقتها الميكانيكية،
 د . الشغل الذي بذلته قوة الاحتكاك الحركي على العربة، في أثناء حركتها على هذا المسار.
 هـ. قوة الاحتكاك الحركي المؤثرة في العربة، في أثناء حركتها على هذا المسار

الحل

مستوى إسناد لطاقة (B) أختار أدنى مستوى لحركة الأفعوانية -وهو الموقع الوضع. تؤثر في الأفعوانية قوة غير محافظة (قوة الاحتكاك الحركي) تبذل شغلاً عليها؛ لذا، الطاقة الميكانيكية غير محفوظة.

أ . أحسب التغير في طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لعربة الأفعوانية، بافتراض (y_f) الموقع النهائي (B) وموقعها عند (y_i) الموقع الابتدائي (A) موقعها عند كما يأتي

$$\Delta PE = PE_f - PE_i = mg(y_f - y_i) = 3 \times 102 \times 10 \times (0 - 45) = -1.35 \times 10^5 \text{ J}$$

نشير الإشارة السالبة إلى حدوث نقصان في طاقة الوضع.
 ب. أحسب التغير في الطاقة الحركية لعربة الأفعوانية، كما يأتي :

$$\Delta KE = KE_f - KE_i = 12 \text{ m}(v_f^2 - v_i^2) = 12 \times 3 \times 102 \times [(24)^2 - (2)^2] = 8.58 \times 10^4 \text{ J}$$

التغير في الطاقة الحركية موجب، إذ تزداد الطاقة الحركية للعربة في أثناء هبوطها إلى أسفل المنحدر.

ج. أحسب التغير في الطاقة الميكانيكية كما يأتي :

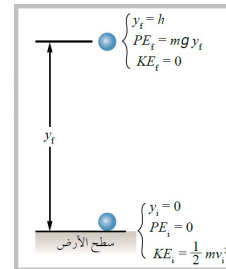
$$\Delta ME = \Delta KE + \Delta PE = 8.58 \times 10^4 + (-1.35 \times 10^5) = -4.92 \times 10^4 \text{ J}$$

ألاحظ أنّ الطاقة الميكانيكية غير محفوظة؛ لوجود قوة الاحتكاك. :د. أستعمل العلاقة الآتية لحساب شغل قوة الاحتكاك الحركي وهي قوة غير محافظة

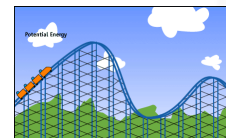
$$W_{nc} = \Delta ME \Rightarrow W_f = \Delta ME = -4.92 \times 10^4 \text{ J}$$

هـ. أحسب مقدار قوة الاحتكاك الحركي، كما يأتي

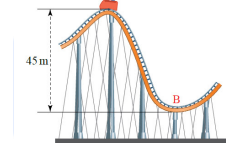
$$W_f = \Delta ME = -fkd \Rightarrow -4.92 \times 10^4 = -fk \times 50 \Rightarrow fk = 9.84 \times 10^2 \text{ N}$$



الشكل (27) : قذف كرة رأسياً إلى أعلى



الشكل (29) : حركة عربة الأفعوانية عبر مسار منحدر خشبي.

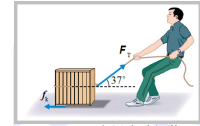




منال محلول

من السكون على أرضية أفقية خشنة (kg) بسحب عمر صندوقاً كتلته (60 بحل يصنع زاوية (37°) على الأفقي، إزاحة مقدارها (N) بقوة شدّ مقدارها (200 أنظر إلى (m/s)، جهة اليمين، إذ كانت سرعة الصندوق في نهاية الإزاحة (5) (m) (N) الشكل (30) . إذا كان مقدار قوة الاحتكاك الحركي المؤثرة في الصندوق (100 ، $\cos 37^\circ = 0.8$ ، والحبل مهملة الكتلة وغير قابل للاسئطالة، و فاحسب مقدار ما يأتي:

أ. شغل قوة الاحتكاك الحركي.
ب. التغيّر في الطاقة الميكانيكية للصندوق.
ج. شغل قوة الشدّ.



الشكل (30) : سحب صندوق على أرضية أفقية خشنة .

الحل

أختار سطح الأرض مستوي إسناد لطاقة الوضع. تؤثّر في الصندوق قوى

غير محافظة تبدل شغلّ عليه وهي:

قوة الاحتكاك الحركي وقوة الشدّ؛ لذا الطاقة الميكانيكية غير محفوظة.

أ. تؤثّر قوة الاحتكاك الحركي بعكس اتجاه إزاحة الصندوق، وأحسب شغلها كما يأتي:

$$W_f = f_k d \cos 180^\circ = f_k d (-1) = -f_k d = -100 \times 50 = -5000 \text{ J} = -5 \times 10^3 \text{ J}$$

ب. طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لا تتغيّر؛ لأنّ الحركة على مسار أفقي؛

وتكون التغيّر في ($\Delta PE = 0$)

الطاقة الميكانيكية نتيجة تغيّر طاقتي الحركة فقط، وأحسب التغير كما يأتي:

$$\Delta ME = \Delta KE + \Delta PE = 12 \text{ m} (v_f^2 - v_i^2) + 0 = 12 \times 60 \times [(5)^2 - (0)^2] = 7.5 \times 10^2 \text{ J}$$

الأحظ أنّ الطاقة الميكانيكية غير محفوظة؛ فقد ازدادت.

ج. تبدل قوة الشدّ شغلّ على الصندوق، وأحسب شغلها بالمعادلة الآتية:

$$W_{nc} = \Delta ME - W_f = 7.5 \times 10^2 - (-5 \times 10^3) = 5.75 \times 10^3 \text{ J}$$

استثنيّة جزء من شغلّ قوة الشدّ للتغلب على قوة الاحتكاك الحركي،

والجزء الآخر منه أكسب الصندوق طاقة حركية .

تمرين

عن قمة منحدر (A) أسنّج: ينزل طفل بدءاً من السكون من الموقع

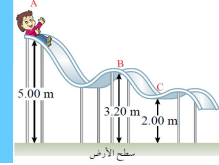
(kg)، أمّلس، كما هو موضّح في الشكل. إذا علمت أنّ كتلة الطفل (25

؛ فاحسب مقدار ما يأتي: (m/s²) وتسارع السقوط الحر (10

(B) . أ. سرعة الطفل عند الموقع

(C) . ب. الطاقة الحركية للطفل عند الموقع

(C) إلى الموقع (A) . ج. شغلّ قوة الجاذبية المبدول على الطفل في أثناء انزلاقه من الموقع



<https://bit.ly/3xfgzFO>