الفيزياء

الصف الحادي عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

11

فريق التأليف

موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب | خلدون سليمان المصاروه

موسى محمود جرادات | يحيى أحمد طواها

إضافة إلى جهود فريق التأليف، فقد جاء هذا الكتاب ثمرة جهود وطنية مشتركة من لجان مراجعة وتقييم علمية وتربوية ولغوية، ومجموعات مُركَّزة من المعلِّمين والمشرفين التربويين، وملاحظات مجتمعية من وسائل التواصل الاجتماعي، وإسهامات أساسية دقيقة من المجلس التنفيذي والمجلس الأعلى في المركز، ومجلس التربية والتعليم ولجانه المتخصِّصة.

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

يسر المركز الوطني لتطوير المناهج، استقبال آرائكم وملحوظاتكم على هذا الكتاب عن طريق العناوين الآتية:

06-4617304 / 8-5 | 06-4637569 | P.O.Box: 1930 Amman 1118

@nccdjor | feedback@nccd.gov.jo | www.nccd.gov.jo

قـرَّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هذا الكتـاب في مدارس المملكـة الأردنية الهاشـمية جميعها، بنـاءً على قـرار المجلس الأعلى للمركـز الوطنـي لتطويـر المناهـج في جلسـته رقـم ( )، تاريـخ م، وقـرار مجلـس التربيـة والتعليـم رقـم ( ) تاريـخ م بـدءًا من العـام الـدراسي م.

- Prepared Originally in English for the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan
- Translated to Arabic, adapted, customised and published by the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan

ISBN: 978 - 9923 - 41 - 046 - 2

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2020/8/2974)

373,19

الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج

الفيزياء: كتاب الطالب (الحادي عشر)/ المركز الوطني لتطوير المناهج.- عمان: المركز، 2020

ج1(145) ص.

ر.إ.: 2020/8/2974

الواصفات: / الفيزياء/ / العلوم الطبيعية/ / التعليم الإعدادي/ / المناهج/

يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبّر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية.

British Library Cataloguing -in- Publication Data
A catalogue record for this publication is available from the Library.

الطبعة الأولى (التجريبية)

1442 هـ – 2021 م

قائمةُ المحتوياتِ

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

انطلاقًا من إيمان المملكة الأردنية الهاشمية الراسخ بأهمية تنمية قدرات الإنسان الأردني، وتسليحه بالعلم والمعرفة؛ سعى المركز الوطني لتطوير المناهج، بالتعاون مع وزارة التربية والتعليم، إلى تحديث المناهج الدراسية وتطويرها؛ لتكون معينًا للطلبة على الارتقاء بمستواهم المعرفي، ومجاراة أقرانهم في الدول المتقدمة.

يُعَدُّ هذا الكتاب واحدًا من سلسلة كتب المباحث العلمية التي تُعْنى بتنمية المفاهيم العلمية، ومهارات التفكير وحَلِّ المشكلات، ودمج المفاهيم الحياتية والمفاهيم العابرة للمواد الدراسية، والإفادة من الخبرات الوطنية في عمليات الإعداد والتأليف وفق أفضل الطرائق المُتَّبَعة عالميًّا؛ لضمان انسجامها مع القيم الوطنية الراسخة، وتلبيتها لحاجات أبنائنا الطلبة والمعلِّمين.

وقد روعِيَ في تأليفه تقديم المعلومة العلمية الدقيقة وفق منهجية تقوم على السلاسة في العرض، والوضوح في التعبير، فضلًا عن الربط بين الموضوعات المطروحة في المراحل الدراسية السابقة واللاحقة، واعتماد منهجية التدرُّج في عرض موضوعات المادة، واستهلال وحداتها بأسئلة تُظهِر علاقة علم الفيزياء بالظواهر من حولنا؛ ما يُحفِّز الطالب على الإفادة ممّا يتعلَّمه بغرفة الصف في تفسير مشاهدات يومية وظواهر طبيعية قد تَحدُث أمامه، أو يشاهدها في التلفاز، أو يسمع عنها. وقد تضمَّنت كل وحدة نشاطًا إثرائيًّا يعتمد منحى STEAM في التعليم الذي يُستعمَل لدمج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والفن والعلوم الإنسانية والرياضيات في أنشطة الكتاب المتنوعة، وفي قضايا البحث.

ويتألَّف الكتاب من ثلاث وحدات دراسية، هي: الشغل والطاقة، والمجال الكهربائي، والجهد الكهربائي والمواسعة. وقد أُلحق به كتابٌ للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على جميع التجارب والأنشطة الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلِّم، ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سلمية. وتضمَّنَ أيضًا أسئلة تحاكي أسئلة الاختبارات الدولية؛ بُغْيَةَ تعزيز فهم الطالب لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نُقدّمُ هذه الطبعةَ منَ الكتاب، فإنّا نأمَلُ أن يُسهِمَ في تحقيق الأهداف والغايات النهائيّة المنشودة لبناء شخصيّة المتعلّم، وتنمية اتجاهات حُبّ التعلُّم ومهارات التعلُّم المستمرّ، فضلًا عن تحسين الكتاب بإضافة الجديد إلى محتواهُ، وإثراءِ أنشطته المتنوّعة، والأخذِ بملاحظات المعلّمين.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الوحدة 1

الشغل والطاقة

Work and Energy

أتأمّل الصورة

الفيزياء والطاقة

تعمل مزرعة الرياح Wind farm الموضّحة في الصورة، على تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية؛ باستعمال توربينات بكفاءة عالية. إنّ قدرة أيّ مزرعة رياح تساوي مقدار الطاقة التي تُولّدها في الثانية الواحدة، وتبلغ قدرة أكبر مزارع الرياح 20 gigawatt تقريبًا.

هل توجد شروط معيّنة للمناطق التي تُستعمل فيها مزارع رياح؟ ما قوانين الفيزياء ذات الصلة بهذه التكنولوجيا؟

الفكرة العامّة:

للشغل والطاقة أهمّية كبيرة في حياتنا؛ لإدارة عجلة الحياة، وإنجاز أنشطتنا اليومية المختلفة.

الدرس الأول: الشغل والقدرة

Work and Power

الفكرة الرئيسة: الشغل نتاج قوّة تؤثّر في الأجسام، ومفهوم الشغل فيزيائيًّا يختلف عن معناه الشائع. ويُستعمل مفهوم القدرة للمقارنة بين الآلات المختلفة في المعدّل الزمني لإنجاز الشغل نفسه.

الدرس الثاني: الطاقة الميكانيكية

Mechanical Energy

الفكرة الرئيسة: الطاقة الميكانيكية لجسم ما، تساوي مجموع طاقة وضعه وطاقته الحركية. وللطاقة الميكانيكية تطبيقات تكنولوجية في المجالات كافّة.

تجربة استهلالية

حساب الشغل

الموادّ والأدوات: ميزان نابضي، 3 أثقال مختلفة (100 g, 200 g, 300 g)، مسطرة مترية، شريط لاصق، حامل أثقال.

إرشادات السلامة: ارتداء المعطف، واستعمال النظّارات الواقية للعينين، والحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1 **أضبطُ المتغيّرات:** أُحدّد علامتين على المسطرة المترية باستعمال الشريط اللاصق، المسافة بينهما (50 cm)، وأُدوّنها في جدول البيانات للمحاولات الثلاث. ثم يُثبّت أحد أفراد مجموعتي المسطرة المترية رأسيًا على سطح الطاولة.

2 **أقيس:** أُمسك الميزان النابضيّ رأسيًّا في الهواء موازيًا للمسطرة المترية، وأُعلّق حامل الأثقال في خطافه، ثم أضع الثقل (100 g) على الحامل، بحيث يكون بجانب العلامة السفلية على المسطرة. أُدوّن قراءة الميزان في المكان المخصّص في جدول البيانات للمحاولة (1).

3 **أُلاحظ:** أرفع الثقل رأسيًّا إلى أعلى إزاحة مقدارها (50 cm) بسرعة ثابتة تقريبًا، ويُلاحظ أحد أفراد مجموعتي قراءة الميزان في أثناء ذلك. أُدوّن قراءة الميزان تحت عمود القوّة اللازمة في جدول البيانات للمحاولة (1).

4 أُكرّر الخطوتين (2 – 3) بتعليق الثقلين (200 g) و (300 g) كلّ على حدة في حامل الأثقال، وأُدوّن نتائجي في جدول البيانات.

التحليل والاستنتاج:

1. **أحسبُ** الشغل المبذول لرفع كلّ ثقل؛ بضرب مقدار القوّة اللازمة لرفعه في مقدار الإزاحة التي تحرّكها، وأُدوّنه في جدول البيانات.
2. **أُقارن:** أيّ الأثقال لزم لرفعه بذل شغل أكبر؟ أُفسّر إجابتي.
3. **أستنتج** العلاقة بين وزن الثقل ومقدار الشغل المبذول لرفعه بسرعة ثابتة.
4. **أُحلّل البيانات وأُفسّرها:** لماذا رفعتُ الثقل بسرعة ثابتة؟ أُفسّر إجابتي.

الدرس 1

الشغل والقدرة
Work and Power

الفكرة الرئيسة:

الشغل نتاج قوّة تؤثّر في الأجسام، ومفهوم الشغل فيزيائيًّا يختلف عن معناه الشائع. ويُستعمل مفهوم القدرة للمقارنة بين الآلات المختلفة في المعدّل الزمني لإنجاز الشغل نفسه.

نتاجات التعلّم:

- أُفرّق بين مفهومَي الشغل والقدرة.
- أُعرّف الشغل الذي تبذله قوّة ثابتة، والشغل الذي تبذله قوّة متغيّرة.
- أحسبُ الشغل الذي تبذله قوّة الجاذبية في تحريك جسم إزاحة ما.
- أشرحُ أهمّية استعمال مفهوم القدرة في وصف الآلات.
- أحسبُ قدرة آلة معبّرًا عنها بمعادلة.
- أُطبّق بحل مسائل على الشغل، والقدرة.

المفاهيم والمصطلحات:

الشغل Work
الجول joule
القدرة Power
الواط watt

الشغل Work

يرتبط مفهوم الشغل بتأثير قوّة في جسم وتحريكها له، ويختلف المفهوم الفيزيائيّ للشغل عن معناه الشائع؛ إذ إنّ مفهوم الشغل لدينا يتضمّن القيام بعمل عقلي أو عضلي، ولكنّ الشغل عند الفيزيائيين له معنى آخر أكثر تحديدًا. أنظرُ إلى الشكل (1)، وأُحدّد أين يبذل الشخص شغلًا.

التعريف الفيزيائي للشغل Physical Definition of Work

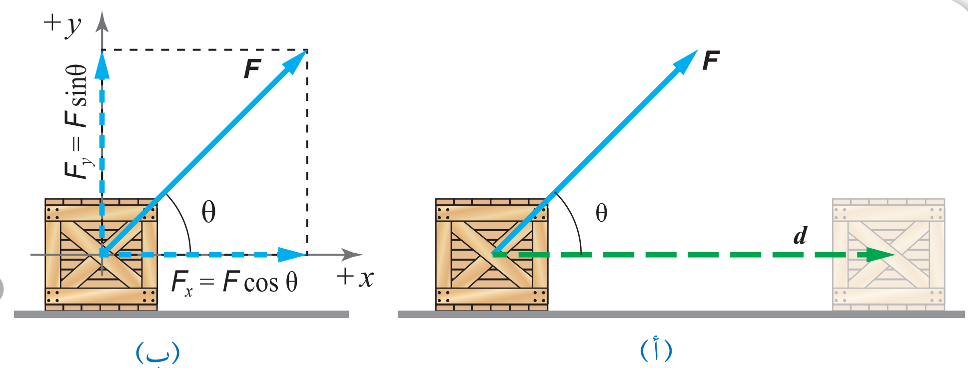
إذا أثّرت قوّة ($\boldsymbol{F}$) في جسم وأحدثت له إزاحة اتّجاهها غير متعامد مع اتّجاه القوة؛ فإنّ هذه القوّة تكون قد بذلت **شغلاً Work** على الجسم. وفي الشكل (1/ أ)، أُلاحظ أنّ الشخص الذي يحمل الصندوق لا يبذل شغلًا عليه من الناحية الفيزيائية، على الرغم من شعوره بالتعب من حمله؛ لأنّه لا يوجد إزاحة في اتّجاه القوّة الرأسية المؤثّرة في الصندوق إلى أعلى. في حين يبذل الشخص الذي يدفع السيارة في الشكل (1/ ب) شغلًا عليها؛ لوجود إزاحة في اتّجاه القوّة المؤثّرة.

إنّ القوّة المؤثّرة في جسم قد تكون ثابتة أو متغيّرة؛ لذا، سأدرس حساب شغل كلّ منهما على حدة.

الشكل (1): (أ) لا يبذل الشخص حامل الصندوق شغلًا عليه عندما يتحرّك أُفقيًّا بسرعة ثابتة، أو يكون ساكنًا. (ب) يبذل الشخص شغلًا على السيّارة؛ عندما تتحرّك في الاتّجاه نفسه لقوّته المؤثّرة فيها.

(أ)

(ب)



الشكل (2): (أ) قوّة خارجية ثابتة تصنع زاوية (θ) مع اتّجاه الإزاحة، (ب) تحليل متّجه القوّة الخارجية المؤثّرة إلى مركّبتيه.

الشغل الذي تبذله قوّة ثابتة Work Done by a Constant Force

عندما تؤثّر قوّة خارجية ثابتة $\boldsymbol{F}$ في جسم وتحرّكه إزاحة $\boldsymbol{d}$، كما هو موضّح في الشكل (2/ أ)، فإنّ شغلها يُساوي ناتج الضرب القياسي لمتّجه القوّة الثابتة المؤثّرة في متّجه الإزاحة، كما يأتي:

$$W_F = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{d}$$
$$= F d \cos\theta$$

هذه هي المعادلة العامّة لحساب الشغل، حيث (θ): الزاوية المحصورة بين اتّجاه القوّة واتّجاه الإزاحة، و($F \cos\theta$): مركّبة متّجه القوّة في اتّجاه الإزاحة التي تحرّكها الجسم تحت تأثير هذه القوّة، أنظرُ إلى الشكل (2/ ب). ويُقاس الشغل بوحدة الجول (J) joule حسب النظام الدولي للوحدات؛ تكريمًا للعالم (جيمس بريسكوت جول). ويُعرّف الجول بأنّه الشغل الذي تبذله قوّة مقدارها (1 N) عندما تؤثّر في جسم، وتحرّكه إزاحة مقدارها (1 m) في اتّجاهها.

✓ **أتحقّق:** ما الشغل؟ وما وحدة قياسه حسب النظام الدولي للوحدات؟

لحساب الشغل الذي تبذله القوّة الخارجية المؤثّرة في الصندوق الموضّح في الشكل (2)، أُحلّل متّجه القوّة المؤثّرة إلى مركّبتَيه: مركّبة أفقية موازية لاتّجاه الإزاحة ($F_x = F \cos\theta$)، ومركّبة عمودية على اتّجاه الإزاحة ($F_y = F \sin\theta$). وألاحظ أنّ إزاحة الصندوق ($\boldsymbol{d}$) في اتّجاه المحور x؛ لذا، فإنّ المركّبة الموازية لاتّجاه الإزاحة هي التي تبذل شغلًا فقط، أما المُركّبة العمودية فلا تبذل شغلًا؛ لعدم وجود إزاحة في اتّجاهها.

أُصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح الشغل الذي تبذله قوّة ثابتة، ثم أشاركه مع معلمي وزملائي في الصف.

(أ)

(ب)

الشكل (3): (أ) رجل يدفع أفقيًّا كرسيًّا متحرّكًا على طريق أفقي مستقيم. (ب) صندوق ينزلق على طريق أفقي خشن.

أفكّر: ما التفسير الفيزيائي لكلّ من الشغل الموجب والشغل السالب المبذولَين على جسم؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستعمل مصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الإنترنت للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

وبناءً على معادلة حساب الشغل العامّة؛ ألاحظ الحالات الخاصّة الآتية:

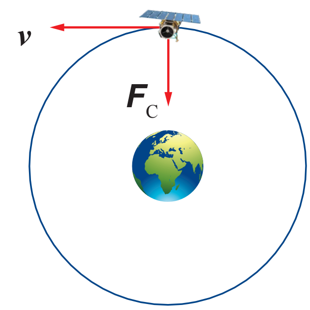
الحالة الأولى: أن تكون القوّة الخارجية المؤثّرة في جسم في الاتّجاه نفسه لإزاحته، حيث الزاوية المحصورة بين اتّجاهيهما صفر، و($\cos 0° = 1$)، وعندها تبذل القوّة شغلًا موجبًا يُعطى مقداره بالعلاقة: $W_F = Fd$. أنظرُ إلى الشكل (3/ أ) الذي يُبيّن رجلًا يدفع كرسيًّا متحرّكًا على طريق أُفقي مستقيم بقوّة أُفقية.

الحالة الثانية: أن تكون القوّة الخارجية المؤثّرة بعكس اتّجاه الإزاحة، حيث الزاوية المحصورة بين اتّجاهيهما $180°$، و($\cos 180° = -1$)، وعندها تبذل القوّة شغلاً سالبًا، يُعطى مقداره بالعلاقة: $W_F = -Fd$. ومن الأمثلة على القوى التي تبذل شغلًا سالبًا: قوّة الاحتكاك الحركي، وقوّة الجاذبية عند رفع جسم إلى أعلى.

الحالة الثالثة: أن تكون القوّة الخارجية المؤثّرة عمودية على اتّجاه الإزاحة، حيث الزاوية المحصورة بين اتّجاهيهما $90°$، و($\cos 90° = 0$)، وعندها لا تبذل القوّة شغلًا. فعندما أحمل حقيبتي وأتحرّك أُفقيًّا، فإنّني أُؤثّر فيها بقوّة رأسية إلى أعلى في أثناء حركتي أُفقيًّا؛ أي إنّ الزاوية المحصورة بين اتّجاهَيهما $90°$، إذ لا توجد إزاحة في اتّجاه القوّة نفسهِ؛ لذا، لا تبذل القوّة شغلًا على الحقيبة، $W = 0\ J$. أنظرُ إلى الشكل (4).

أتحقّق: متى يكون شغل قوّة سالبًا؟ ومتى يكون شغلها صفرًا؟

الشكل (4): لا تبذل القوّة المؤثّرة في جسم شغلًا عليه، عندما يكون اتّجاهها عموديًّا على اتّجاه إزاحته.



الشكل (5): لا تبذل القوّة المركزية (قوّة الجاذبية) شغلًا على قمر صناعيّ يتحرّك حركة دائرية منتظمة حول الأرض.

أُفكّر: عندما أدفع جدارًا أو أدفع جسمًا ثقيلًا لا أستطيع تحريكه من مكانه؛ فإنّني فيزيائيًّا لا أبذل شغلًا عليه. فلماذا أشعر بالتعب إذن؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستعمل مصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الإنترنت للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

الربط مع الفضاء

تدور بعض الأقمار الصناعية في مسارات دائرية حول الأرض، إذ تتأثّر بقوّة مركزية (قوّة التجاذب الكتلي بينها وبين الأرض) تكون عمودية على اتّجاه إزاحة القمر الصناعيّ عند كلّ موقع في مساره الدائريّ؛ لذا، لا تبذل هذه القوّة المركزية شغلًا عليه، ويبقى القمر الصناعيّ متحرّكًا بسرعة مماسّية ثابتة مقدارًا. أنظرُ إلى الشكل (5).

الشغل الذي تبذله عدّة قوى ثابتة
Work Done by Many Constant Forces

إذا أردتُ حساب شغل عدّة قوى خارجية ثابتة تؤثّر في جسم؛ فإنّني أحسبُ الشغل الذي تبذله كلّ قوّة على انفراد، ثم أحسبُ الشغل الكلّي المبذول (W_{Total}) بإيجاد ناتج الجمع الجبري لشغل القوى جميعها. كما يُمكنني حساب الشغل الكلّي المبذول بحساب شغل القوّة المحصّلة المؤثّرة في الجسم.

$$W_{\text{Total}} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$
$$= F_1 d_1 \cos\theta_1 + F_2 d_2 \cos\theta_2 + F_3 d_3 \cos\theta_3 + \dots$$
$$= \sum_{i=1}^{n} F_i d_i \cos\theta_i$$

حيث تُمثّل n عدد القوى المؤثّرة في الجسم.

إذا كان الشغل الكلّي المبذول على جسم موجبًا فإنّه يتسارع، أمّا إذا كان الشغل الكلّي المبذول على جسم سالبًا فإنّه يتباطأ. وتوضّح الأمثلة الآتية الحالات المختلفة لحساب الشغل.

الربط مع الرياضيات

يرمزُ الحرف اليوناني (Σ) للمجموع، ويُقرأ سيجما. فمثلًا، يُمكنني التعبير عن شغل أكثر من قوّة بطريقة أبسط باستعمال رمز المجموع كما يأتي:

$$W_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^{n} F_i d_i \cos\theta_i$$

وتعني أنّ الشغل الكلّي المبذول على جسم يساوي الجمع الجبري لناتج ضرب كل قوّة (F_i) في الإزاحة (d_i) التي تحرّكها الجسم تحت تأثير هذه القوّة في جيب تمام الزاوية المحصورة بين اتجاهي هذه القوّة وهذه الإزاحة ($\cos\theta_i$)، حتى الوصول إلى القوّة رقم (n).

أتحقّق: كيف أحسبُ شغل عدّة قوى خارجية ثابتة تؤثّر في جسم؟

المثال 1

دفعت شفاء مزهرية تستقر على سطح طاولة أُفقي أملس بقوّة مقدارها (10 N)، إزاحة أُفقية مقدارها (1.6 m). أحسبُ مقدار شغل القوّة في الحالتين الآتيتين:

أ . إذا كانت القوّة في اتّجاه الإزاحة نفسه.

ب. إذا كانت القوّة تصنع زاوية (37°) مع اتّجاه الإزاحة.

المعطيات:

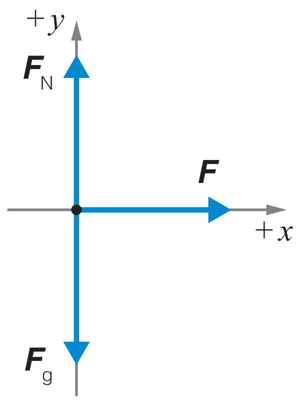
$F = 10\ \text{N},\ d = 1.6\ \text{m},\ \theta_1 = 0°,\ \theta_2 = 37°.$

المطلوب:

$W_1 = ?,\ W_2 = ?$

الحلّ:

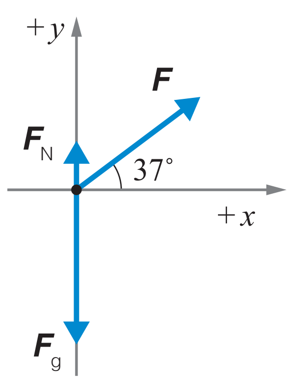
أرسمُ مخطّط الجسم الحرّ للمزهرية في الحالتين.



القوّة المؤثّرة في اتّجاه الإزاحة نفسه.

أ. أستعملُ معادلة الشغل الآتية، مع تعويض $\theta_1 = 0°$.

$$\begin{aligned} W_1 &= Fd\cos\theta_1 \\ &= 10 \times 1.6 \times \cos 0° \\ &= 16 \times 1 \\ &= 16\ \text{J} \end{aligned}$$



القوّة المؤثّرة تصنع زاوية (37°) مع اتّجاه الإزاحة.

ب. أستعملُ معادلة الشغل الآتية، مع تعويض $\theta_2 = 37°$.

$$\begin{aligned} W_2 &= Fd\cos\theta_2 \\ &= 10 \times 1.6 \times \cos 37° \\ &= 16 \times 0.8 \\ &= 12.8\ \text{J} \end{aligned}$$

أُلاحظ في هذا المثال، أنّ شفاء أثّرت بالقوّة نفسها في الحالتين، غير أنّ شغلها عندما كانت القوّة موازية لاتّجاه الإزاحة، أكبر من شغلها عندما أثّرت بزاوية خلال الإزاحة نفسها؛ لأنّ مركّبة القوّة في اتّجاه الإزاحة في الحالة الأولى كانت أكبر.

المثال 2

يساعد خالد والدته على ترتيب المنزل، وفي أثناء ذلك يرفع صندوقًا عن سطح الأرض رأسيًّا إلى أعلى بسرعة ثابتة إلى ارتفاع (1.5 m). إذا علمتُ أنّ كتلة الصندوق (5 kg)، وتسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$) تقريبًا، فأحسبُ مقدار الشغل:

أ . الذي يبذله خالد على الصندوق.

ب. الذي تبذله قوّة الجاذبية على الصندوق.

جـ. الكلّي المبذول على الصندوق.

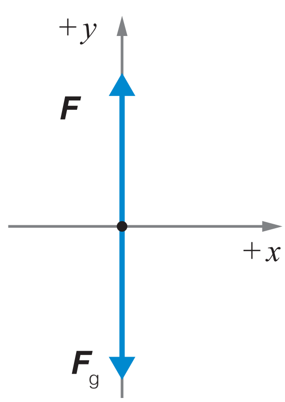
د . الذي تبذله قوّة الجاذبية على الصندوق؛ إذا سقط الصندوق من الارتفاع نفسه نحو سطح الأرض.

المعطيات:

$d = 1.5\ m,\ m = 5\ kg,\ g = 10\ m/s^2,\ a = 0$

المطلوب:

$W_F = ?,\ W_g = ?,\ W_{Total} = ?$



الحلّ:

أرسمُ مخطّط الجسم الحر للصندوق؛ لتحديد القوى المؤثّرة فيه.

أ . لحساب مقدار الشغل الذي يبذله خالد على الصندوق؛ يلزم معرفة مقدار القوّة التي يؤثّر بها في الصندوق. بما أنّ خالدًا يرفع الصندوق بسرعة ثابتة (التسارع صفر)، فتكون القوّة المحصّلة المؤثّرة فيه في الاتّجاه الرأسي تساوي صفرًا.

$$\sum F_y = ma = 0$$
$$F - F_g = 0$$
$$F = F_g = mg = 5 \times 10 = 50\ N$$

أُلاحظ أنّ مقدار القوّة اللازم تأثيرها في الصندوق يساوي مقدار وزنه.

أستعملُ معادلة الشغل الآتية، وأُلاحظ أنّ اتّجاه القوّة المؤثّرة من خالد (**F**) في اتّجاه الإزاحة نفسه؛ $\theta = 0°$.

$$W_F = F d \cos\theta$$
$$= 50 \times 1.5 \times \cos 0°$$
$$= 75\ J$$

ب. تؤثّر قوّة الجاذبية (F_g) بعكس اتّجاه الإزاحة، أي إنّ $\theta = 180^\circ$.

$$W_g = F_g\, d \cos\theta$$
$$= 50 \times 1.5 \times \cos 180^\circ$$
$$= 75 \times -1$$
$$= -75\ \text{J}$$

جـ. الشغل الكلّي المبذول على الصندوق، يساوي مجموع شغل خالد وشغل قوّة الجاذبية، وهو يساوي أيضًا شغل القوّة المحصّلة المؤثّرة في الصندوق، وهو يساوي صفرًا.

$$W_{\text{Total}} = W_F + W_g$$
$$= 75 + (-75) = 0$$

د. في أثناء سقوط الصندوق، تكون القوّة المحصّلة المؤثّرة فيه هي قوّة الجاذبية، ويكون اتّجاه الإزاحة إلى أسفل، أي إنّ $\theta = 0^\circ$. وأحسبُ شغلها كما يأتي:

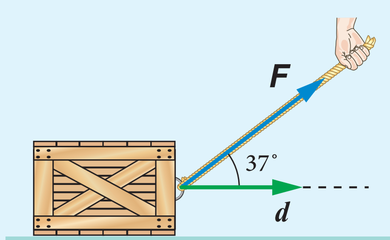
$$W_g = F_g\, d \cos\theta$$
$$= 50 \times 1.5 \times \cos 0^\circ$$
$$= 75 \times 1$$
$$= 75\ \text{J}$$

تمرين

1. **أحسبُ:** يسحب محمّد صندوقًا كتلته (20 kg) على سطح أُفقي أملس إزاحة مقدارها (5 m)، بوساطة حبل يميل على الأُفقي بزاوية مقدارها (37°)، كما هو موضّح في الشكل (6). إذا علمتُ أنّ مقدار قوّة الشد في الحبل (140 N)، فأحسبُ مقدار الشغل الذي:

أ . بذله محمّد على الصندوق.

ب. بذلته قوّة الجاذبية على الصندوق.

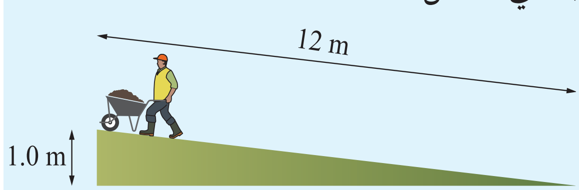


الشكل (6): سحب صندوق على سطح أُفقي أملس.

2. **أستعملُ المتغيّرات:** يدفع عامل عربة بناء وزنها مع حمولتها (440 N) إلى أعلى مستوى مائل طوله (12 m). إذا كان مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في العربة (60 N) في اتّجاه موازٍ للمستوى المائل، كما هو موضّح في الشكل (7)؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي مستعينًا بالبيانات المثبّتة في الشكل:

أ. الشغل الكلّي المبذول على العربة عند وصولها إلى نهاية المستوى المائل.

ب. الشغل الذي بذلته قوّة الجاذبية على العربة.



الشكل (7): عامل يدفع عربة إلى أعلى مستوى مائل.

الشغل الذي تبذله قوّة متغيّرة Work Done by a Varying Force

عندما تؤثّر قوّة خارجية ثابتة في جسم وتحرّكه إزاحة معيّنة في اتّجاهها؛ فإنّ مقدار شغل هذه القوّة يُحسب بضرب مقدار القوّة في مقدار الإزاحة (Fd). فمثلًا، إذا كان مقدار هذه القوّة الخارجية الثابتة (60 N)، ومقدار إزاحة الجسم التي تحرّكها في اتّجاه القوّة نفسه (5 m)؛ فإنّ مقدار شغل هذه القوّة يُحسب كما يأتي:

$$W_F = Fd\cos\theta$$
$$= 60 \times 5 \times \cos 0^\circ$$
$$= 300\ \mathrm{J}$$

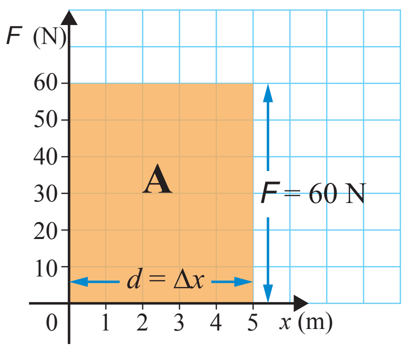
وإذا مثّلتُ العلاقة بين هذه القوّة الخارجية الثابتة والإزاحة بيانيًّا، أحصلُ على شكل مماثل للشكل (8)؛ حيث مُثّلتْ القوّة الخارجية الثابتة على المحور y، وإزاحة الجسم على المحور x، وإذا حسبتُ المساحة المحصورة بين منحنى (القوّة – الإزاحة) ومحور الإزاحة، وهي تساوي مساحة المستطيل (A) بضرب ضلع المستطيل الرأسي (مقدار القوّة الثابتة) في ضلعه الأفقي (مقدار الإزاحة)، أجد أنّها تساوي عدديًّا شغل القوّة خلال هذه الإزاحة، حيث:

$$A = Fd = 60 \times 5 = 300\ \mathrm{J} = W$$

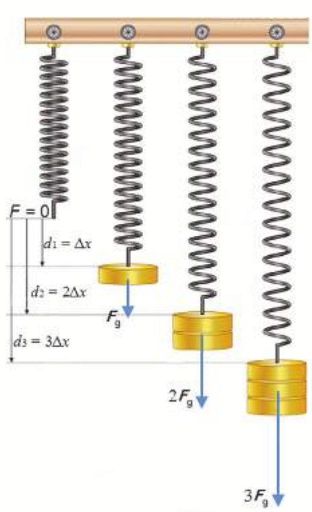
أي إنّ المساحة المحصورة بين منحنى (القوّة – الإزاحة) ومحور الإزاحة، تساوي عدديًّا الشغل الذي تبذله القوّة خلال فترة تأثيرها.

أستعملُ أيضًا هذه الطريقة البيانية في حساب الشغل؛ عندما تكون القوّة الخارجية المؤثّرة في جسم متغيّرة في أثناء إزاحته، ولا يُمكنني استعمال معادلة الشغل الذي تبذله قوّة ثابتة لحسابه؛ لأنّ القوّة متغيّرة. ومن أمثلة القوى المتغيّرة: القوّة اللازمة لشد نابض، أو قوّة المرونة في النابض؛ فعندما أشدّ نابضًا أو أضغطه ألاحظ تغيّر مقدار قوتي اللازم تأثيرها فيه باستمرار، فلزيادة استطالة النابض يلزم زيادة مقدار قوتي المؤثّرة فيه، أنظرُ إلى الشكل (9). وأحسبُ شغل القوّة المتغيّرة بحساب المساحة المحصورة بين منحنى (القوّة – الإزاحة) ومحور الإزاحة حسب شكلها الهندسي، أو بتطبيق علاقات رياضية مناسبة (حساب التكامل)، أو بتقسيم المساحة المحصورة إلى عدّة مساحات ذات أشكال هندسية منتظمة، ثم حساب مجموع هذه المساحات.

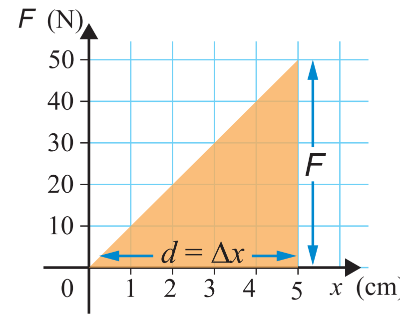
أُصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضح الشغل الذي تبذله قوة متغيرة، ثم أشاركه مع معلمي وزملائي في الصف.



الشكلُ (8): الشغل يساوي عدديًّا المساحة المحصورة بين منحنى (القوّة – الإزاحة) ومحور الإزاحة، وتساوي مساحة المستطيل المظلّل.



الشكلُ (9): يتناسب مقدار القوّة اللازم تأثيرها في نابض لزيادة استطالته، طرديًّا مع مقدار هذه الاستطالة.



الشكل (10): القوّة المؤثّرة في نابض، تتغيّر خطيًّا عند استطالة النابض.

سؤال: أحسبُ شغل القوّة المؤثّرة في النابض؛ عند استطالته إزاحة مقدارها (50 cm).

يوضّح الشكل (10) العلاقة الخطّية بين استطالة نابض والقوّة الخارجية المؤثّرة فيه. أحسبُ شغل القوّة الخارجية المؤثّرة في النابض بحساب مساحة المثلث المحصور بين منحنى (القوّة – الإزاحة) ومحور الإزاحة:

$$W = \frac{1}{2} Fd$$

✓ **أتحقّق**: كيف أحسبُ شغل قوّة متغيّرة في منحنى (القوّة – الإزاحة)؟

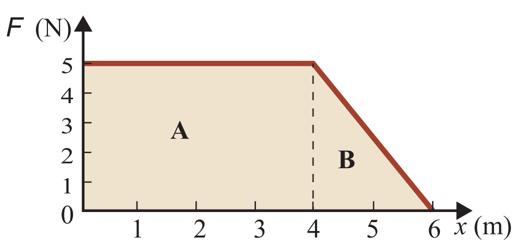
المثال 3

أثّرت قوّة محصّلة متغيّرة في جسم؛ فحرّكته إزاحة مقدارها (6 m)، كما هو موضّح في الشكل (11). أحسُب الشغل الذي بذلته القوّة المحصّلة:

أ . خلال (4 m) الأولى من بداية حركة الجسم.

ب. عند حركة الجسم من الموقع (4 m) إلى الموقع (6 m).

جـ. خلال فترة الإزاحة كاملة (الشغل الكلي).



الشكلُ (11): شغل قوّة متغيّرة.

المعطيات: منحنى (القوّة – الإزاحة).

المطلوب: $W_{(0\text{-}4)} = ?\ ,\ W_{(4\text{-}6)} = ?,\ W_{\text{Total}} = ?$.

الحلّ:

أ . الشغل الذي بذلته القوّة المحصّلة خلال (4 m) الأولى من بداية حركة الجسم يساوي المساحة A عدديًّا، ويساوي مساحة مستطيل طول قاعدته (4 m)، وارتفاعه (5 N).

$$W_{(0\text{-}4)} = A$$
$$= 4 \times 5$$
$$= 20\ J$$

ب. الشغل الذي بذلته القوّة المحصّلة عند حركة الجسم بين الموقعين (4 m) و (6 m) يساوي المساحة B عدديًّا، ويساوي مساحة مثلّث طول قاعدته (2 m) وارتفاعه (5 N).

$$W_{(4\text{-}6)} = \mathrm{B}$$

$$W = \frac{1}{2} \times (6 - 4) \times 5$$

$$W = 5\ \mathrm{J}$$

حـ. الشغل الكلّي الذي بذلته القوّة المحصّلة الخارجية المتغيّرة على الجسم يساوي عدديًّا مجموع المساحتين A و B، أو يُمكنني حساب مساحة شبه المنحرف كاملًا الذي يُكوّن المستطيل والمثلّث. مساحة شبه المنحرف تساوي نصف مجموع القاعدتين؛ مضروبًا في البعد العمودي بينهما.

$$W_{\text{Total}} = W_{(0\text{-}4)} + W_{(4\text{-}6)}$$

$$= \mathrm{A} + \mathrm{B}$$

$$= 20 + 5$$

$$= 25\ \mathrm{J}$$

أو

$$W_{(0\text{-}6)} = \frac{1}{2} \times [(6 - 0) + (4 - 0)] \times 5$$

$$= \frac{1}{2} \times (6 + 4) \times 5$$

$$= 25\ \mathrm{J}$$

تمرين

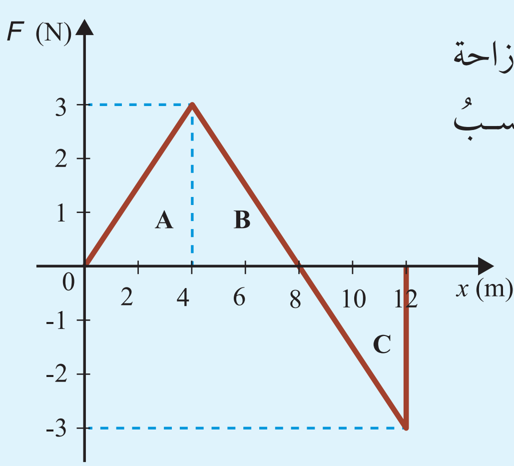
أستنتجُ: أثّرت قوّة محصّلة متغيّرة في جسم؛ فحرّكته إزاحة مقدارها (12 m)، كما هو موضّح في الشكل (12). أحسبُ الشغل الذي بذلته القوّة المحصّلة:

أ . خلال (4 m) الأولى من بداية حركة الجسم.

ب. خلال (8 m) الأولى من بداية حركة الجسم.

جـ. عند حركة الجسم من الموقع (8 m) إلى الموقع (12 m).

د . خلال الإزاحة كاملة (الشغل الكلي).



الشكل (12): منحنى (القوّة – الإزاحة) لقوّة محصلة متغيّرة تؤثّر في جسم.

الشكلُ (13): استعمال مضخّة ماء لريّ الحديقة.

القدرةُ Power

يُريد صديقي شراء مضخّة ماء؛ كي يستعملها في ري حديقته، أنظرُ إلى الشكل (13). يوجد مضختان من النوع نفسه، الأولى يُمكنها رفع (50 kg) ماء إلى ارتفاع رأسي مقداره (7 m) خلال (7.2 s)، والمضخّة الثانية يُمكنها رفع كمّية الماء نفسها للارتفاع نفسه خلال (9 s)، فأيّ المضختين أنصحه بشرائها؟ وما الكمّية الفيزيائية التي يُمكنني عن طريقها المفاضلة بين هاتين المضخّتين؟

أُلاحظ أنّ الشغل الذي تبذله المضختان في رفع الماء متساوٍ، على الرغم من اختلاف زمن إنجازه. وبالتأكيد، سأنصحه باختيار المضخّة الأولى التي تُنجز الشغل نفسه خلال زمن أقل. والكمّية الفيزيائية التي يُمكنني عن طريقها المفاضلة بين معدل بذل الشغل لآلات أو أجسام مختلفة هي **القدرة Power (P)**؛ وتُعرف بأنّها المعدّل الزمني للشغل المبذول، أي إنّها تساوي ناتج قسمة الشغل المبذول (W) على الزمن المستغرق لبذله (Δt).

ويُمكنني حساب القدرة المتوسطة ($\bar{P}$) وفقًا للمعادلة الآتية: $\bar{P} = \frac{W}{\Delta t}$.

أُلاحظ أنّ وحدة قياس القدرة هي (J/s)، وتُسمّى واط **watt (W)** حسب النظام الدولي للوحدات، وهو يساوي قدرة آلة أو جهاز تبذل شغلًا مقداره (1 J) خلال فترة زمنية مقدارها (1 s). وأقيس القدرة غالبًا بوحدة الكيلوواط (kW)؛ لأنّ الواط وحدة صغيرة لقياسها. كما أستعملُ وحدة الحصان **Horse power (hp)** لقياس القدرة، وهو يساوي (746 W)، وأُعرّفه بأنّه قدرة آلة تنجز شغلًا مقداره (746 J) خلال فترة زمنية مقدارها (1 s).

✔ **أتحقّق**: ما المقصود بالقدرة؟ وما وحدة قياسها؟

القدرة اللحظية Instantaneous Power

يجب أن تتغلّب محرّكات السيارات على قوى الاحتكاك (قوى المقاومة) التي تواجهها عند كل لحظة في أثناء حركتها؛ من أجل المحافظة على حالتها الحركية. وعندما يتحرّك جسم بسرعة ثابتة (v)؛ فيُمكن استعمال العلاقة الآتية لحساب قدرته المتوسّطة:

$$\overline{P} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F\, d \cos \theta}{\Delta t} = Fv \cos \theta$$

أي أنّ القدرة عند لحظة زمنية معينة ، وتساوي ناتج ضرب مقدار سرعة الجسم اللحظية (v) في مُركّبة القوّة في اتّجاه السرعة نفسه ($F \cos \theta$) عند تلك اللحظة. وإذا تحرّك جسم بسرعة ثابتة؛ فإنّ قدرته اللحظية تساوي قدرته المتوسطة.

أعدّ فيلمًا قصيرًا باستعمال برنامج صانع الأفلام movie maker يوضّح مفهوم القدرة، وأحرص على أن يشتمل الفيلم على مقارنة بين قدرة آلات وأجسام مختلفة، وعلى مفهوم كلّ من: القدرة المتوسطة، والقدرة اللحظية، وعلى صور لأمثلة توضيحية، ثم أشاركه معلمي وزملائي في الصف.

✓ **أتحقّق:** كيف أحسبُ قدرة محرّك سيّارة تتحرّك بسرعة متّجهة ثابتة؟

المثال 4

مضخّة ماء ترفع (50 kg) من الماء رأسيًّا بسرعة ثابتة إلى ارتفاع (7 m) خلال فترة زمنية مقدارها (7.2 s). إذا علمتُ أنّ تسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$)؛ فأحسبُ مقدار:

أ . الشغل الذي تبذله المضخّة في رفع الماء.

ب. القدرة المتوسّطة لمحرّك المضخّة في رفع الماء.

المعطيات: $m = 50$ kg, $d = 7$ m, $t = 7.2$ s, $g = 10\ m/s^2$.

المطلوب: $W = ?$, $\overline{P} = ?$.

الحلّ:

أ . لحساب الشغل الذي يبذله محرّك المضخّة في رفع الماء بسرعة ثابتة؛ يلزمني حساب مقدار أقل قوّة رأسية يجب تأثيرها في الماء. ولحسابها؛ أستعملُ القانون الثاني لنيوتن. بما أنّ الماء يُرفع بسرعة ثابتة (التسارع صفر)، فتكون القوّة المحصّلة المؤثّرة فيه في الاتّجاه الرأسي تساوي صفرًا.

$$\sum F_y = ma = 0$$

$$F - F_g = 0$$

$$F = F_g$$

$$= mg = 50 \times 10$$

$$= 500\ \text{N}$$

أُلاحظ أنّ مقدار القوّة اللازم تأثيرها في كتلة الماء يساوي مقدار وزنها.

أحسبُ الشغل بالمعادلة الآتية، وأُلاحظ أنّ اتّجاهَي القوّة والإزاحة في الاتّجاه نفسه.

$$W = F d \cos 0^\circ$$
$$= 500 \times 7 \times 1$$
$$= 3500 \text{ J}$$

ب. أحسبُ القدرة المتوسّطة لمحرّك المضخّة بالمعادلة الآتية:

$$\overline{P} = \frac{W}{t}$$
$$= \frac{3500}{7.2}$$
$$= 486 \text{ watts}$$

تمرين

1. **أحسبُ:** سيّارة كتلتها (1400 kg) تتحرّك بسرعة متّجهة ثابتة مقدارها (25 m/s) على طريق أُفقي، ومجموع قوى الاحتكاك المؤثّرة فيها يساوي (2000 N). أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . قدرة محرّك السيارة بوحدة الواط (W)، ووحدة الحصان (hp).

ب. تسارع السيّارة إذا أصبحت القوّة التي يؤثّر بها المحرك في السيارة (2280 N)، ولم يتغيّر مجموع قوى الاحتكاك.

2. **أستعملُ المتغيّرات:** رافعة يولّد محرّكها قدرة مقدارها (1200 W) لرفع ثقل كتلته (400 kg) بسرعة ثابتة إلى ارتفاع (90 m) عن سطح الأرض، خلال فترة زمنية مقدارها (5 min)، أنظرُ إلى الشكل (14). إذا علمتُ أنّ تسارع السقوط الحر (10 m/s^2)؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ . الشغل الذي يبذله محرّك الرافعة في رفع الثقل.

ب. السرعة التي يتحرّك بها الثقل.

جـ. الشغل الذي تبذله قوّة الجاذبية على الثقل في أثناء رفعه.

الشكل (14): رافعة ترفع ثقلًا رأسيًّا إلى أعلى.

الشكل (15): يُشق الطريق الذي يعبر واديًا بشكل متعرّج.

الربط مع الهندسة

عند شقّ الطرق خلال أودية سحيقة أو جبال؛ يُراعى في تصميمها أن تُشقّ بشكل متعرّج (Zig – Zags) بدلًا من شقّها بشكل مستقيم. ويوضّح الشكل (15) الطريق الملوكي الذي يشقّ وادي الموجب ويصل بين محافظتَي الكرك ومادبا، أُلاحظ شكل الطريق المتعرّج. ويكون تعرّج الطريق أكبر في جزئه الواقع في محافظة الكرك؛ حيث انحدار الوادي في هذا الجانب أكبر.

إنّ عملية شقّ الطرق بهذا الشكل المتعرّج يجعلها أقل انحدارًا، ما يُقلّل مقدار قوّة محرّك السيّارة اللازمة لصعود الجبل، وبالمقابل تزداد المسافة اللازم قطعها، فلا يتغيّر مقدار الشغل المبذول لصعود الجبل عند الحركة بسرعة ثابتة. أمّا الزمن المستغرق لصعود الجبل باستعمال الطرق المتعرّجة فيزداد، ما يُمكّنني من صعود المنحدر بقدرة أقل من تلك اللازمة لصعوده في حال الطريق المستقيم.

أُفكّر: إذا كنتُ مسؤول رحلة كشفية، وصادفني طريق يصلني إلى قمة جبل، وكان الطريق مستقيمًا؛ فما الطريقة التي أتّبعها وأفراد مجموعتي لصعود الجبل على هذه الطريق، بحيث نؤثّر بمقدار قوّة قليل ونتجنّب تعرّضنا للإجهاد والتعب؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستعملُ مصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

أبحثُ لعلم الفيزياء دور مهمّ في تصميم الطرق، وتحديد المواقع التي تحتاج إلى دعامات أو جدران استنادية (داعمة) أو جسور في أثناء شق الطريق.
أبحثُ في دور مهندسي الطرق في تصميم الطرق الجبلية والطرق التي تمرّ خلال أودية سحيقة. وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة الصفّ.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بالشغل؟ وما العوامل التي يعتمد عليها؟ وما المقصود بالقدرة؟ وما وحدة قياسها حسب النظام الدولي للوحدات؟

2. **أستنتجُ:** رفع ريّان صندوقًا من الطابق الأرضي في مدرسته إلى الطابق الأول خلال (2 min)، بينما احتاج نصر إلى (4 min) ليرفع الصندوق نفسه بين الطابقين. ما العلاقة بين مقدار الشغل الذي بذله كلّ منهما على الصندوق؟ وما العلاقة بين مقداريّ قدرتهما؟

3. **أستعملُ المتغيّرات:** يسحب قتيبة حقيبة سفره بسرعة ثابتة على أرضية أُفقية في المطار إزاحة مقدارها (200 m). إذا علمتُ أنّ قوّة السحب تساوي (40 N) باتّجاه يصنع زاوية (53°) على الأُفقي؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي:

   أ . الشغل الذي يبذله قتيبة على الحقيبة.

   ب. الشغل الذي تبذله قوّة الاحتكاك الحركي على الحقيبة.

   جـ. قدرة قتيبة على سحب الحقيبة؛ إذا استغرق (3 min) لقطع هذه الإزاحة.

4. **أستعملُ الأرقام:** يرفع محرّك كهربائي مصعدًا كتلته مع حمولته (1800 kg) بسرعة ثابتة مقدارها (1 m/s) من سطح الأرض إلى ارتفاع (80 m). إذا علمتُ أنّ قوّة احتكاك حركي ثابتة مقدارها (3000 N) تؤثّر في المصعد في أثناء رفعه؛ فأحسب مقدار ما يأتي:

   أ. الشغل الذي يبذله المحرّك على المصعد.

   ب. شغل قوّة الاحتكاك الحركي.

   جـ. القدرة المتوسّطة للمحرّك في أثناء رفعه للمصعد.

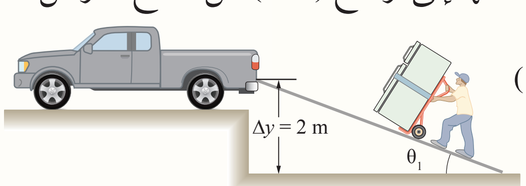
5. **أُصدِر حُكمًا:** في أثناء دراستي وزميلتي ندى هذا الدرس، قالت: «إنّ الشغل الذي تبذله قوّة الجاذبية على قمر صناعي يتحرّك حركة دائرية منتظمة حول الأرض، يزداد بزيادة كتلة القمر وسرعته المماسّية». أُناقش صحّة قول ندى.

6. **التفكير الناقد:** يوضّح الشكلان (1 - 2) أدناه، رفع الثلاجة نفسها إلى ارتفاع (2 m) عن سطح الأرض؛ باستعمال مستوى مائل أملس، وأُلاحظ أنّ ($\theta_1 > \theta_2$).

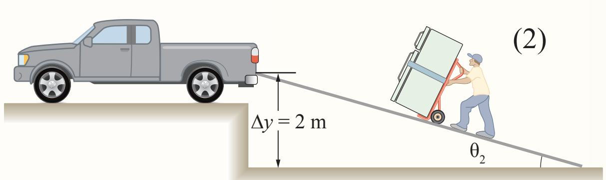
   أ. **أُقارن** بين مقدارَي الشغل المبذول من الرجل في الشكلين (1 - 2). ماذا أستنتج؟

   ب. **أُقارن** بين مقداري القوّة المؤثّرة في الثلاجة في الشكلين (1 - 2). ماذا أستنتج؟

(1)



(2)



الطاقة الميكانيكية
Mechanical Energy

الفكرة الرئيسة:
الطاقة الميكانيكية لجسم تساوي مجموع طاقة وضعه وطاقته الحركية. وللطاقة الميكانيكية تطبيقات تكنولوجية في المجالات كافّة.

نتاجات التعلّم:
- أُوضّح مفهوم كلّ من: الطاقة، الطاقة الحركية، مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية)، طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية.
- أستقصي العلاقة بين الشغل الكلّي المبذول على جسم، والتغيّر في طاقته الحركية.
- أُعبّر عن حفظ الطاقة الميكانيكية بمعادلة رياضية.
- أُعبّر عن شغل القوى المحافظة، وشغل القوى غير المحافظة بمعادلات رياضية.
- أُطبّق بحل مسائل على الطاقة الميكانيكية.

المفاهيم والمصطلحات:
الطاقة Energy
الطاقة الحركية Kinetic Energy
مبرهنة الشغل - الطاقة الحركية
Work – Kinetic Energy Theorem
طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية
Gravitational Potential Energy
الطاقة الميكانيكية
Mechanical Energy
حفظ الطاقة الميكانيكية
Conservation of Mechanical Energy

الشغل والطاقة Work and Energy

تعرّفتُ في الدرس السابق أنّه عندما تؤثّر قوّة خارجية في جسم، وتحرّكه إزاحة معيّنة؛ فإنّها تبذل شغلًا عليه. وأتساءل: ماذا يحدث لهذا الشغل المبذول على الجسم؟ يؤدي هذا الشغل إلى تغيير طاقة الجسم، أنظرُ إلى الشكل (16). وتُعرف **الطاقة Energy** بأنّها مقدرة الجسم على بذل شغل، وهي كمّية قياسية تُقاس بوحدة الجول joule (J) حسب النظام الدولي للوحدات. فالرياح لها طاقة حركية تُمكّنها من بذل شغل على شفرات المراوح عندما تصطدم بها، كما هو موضّح في صورة بداية الوحدة. وبناء على ما سبق، يُمكنني تعريف الشغل بأنّه إحدى طرائق نقل الطاقة بين الأجسام.

للطاقة أشكال متعدّدة تنحصر في نوعين رئيسين، هما: الطاقة الحركية، والطاقة الكامنة (طاقة الوضع).

✓ **أتحقّق:** ما النوعان الرئيسان للطاقة؟

الشكل (16): (أ) يبذل محرّك السيّارة شغلًا عليها يُغيّر طاقتها الحركية عندما تتسارع على طريق أُفقي. (ب) عندما أرفع الكتاب وأضعه على رفّ الكتب؛ فإنّني أبذل شغلًا عليه يُغيّر طاقته الكامنة.

الشكل (17): للمطرقة طاقة حركية تُمكّنها من بذل شغل على المسمار ودفعه في اللوح الخشبي.

الطاقة الحركية Kinetic Energy

توضّح صورة بداية الوحدة، توليد الطاقة الكهربائية بالاستفادة من حركة الرياح؛ حيث تبذل الرياح شغلًا على المراوح (التوربينات) فتحرّكها؛ أي إنّ للرياح طاقة. أُلاحظ أن الأجسام المتحرّكة قد تُحدث تغييرًا في الأجسام التي تصطدم بها، أنظرُ إلى الشكل (17). تُسمّى الطاقة المرتبطة بحركة جسم **الطاقة الحركية Kinetic energy** ورمزها (KE)، وتعتمد على كلّ من: كتلة الجسم (m) ومقدار سرعته (v)، ويُعبّر عنها بالعلاقة الآتية:

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

تتناسب الطاقة الحركية لجسم طرديًّا مع كلّ من: كتلته ومربّع سرعته. فمثلًا، الطاقة الحركية لسيّارة متحرّكة بسرعة مقدارها (v) أقلّ منها لشاحنة متحرّكة بالسرعة نفسها؛ لأنّ كتلة الشاحنة أكبر. تُسمّى الطاقة الحركية هذه طاقة حركية خطّية، إذ إنّها ناتجة عن الحركة الخطّية للجسم. أمّا عند حركة الجسم حركة دورانية حول محور دوران؛ فإنّه يمتلك طاقة حركية دورانية. وتوضّح صورة بداية الوحدة أنّ الشغل الذي تبذله الرياح على المراوح يُحرّكها حركة دورانية.

أُصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح الطاقة الحركية، ثم أشاركه مع معلمي وزملائي في الصف.

✓ **أتحقّق:** ما الطاقة الحركية؟ وعلامَ تعتمد؟

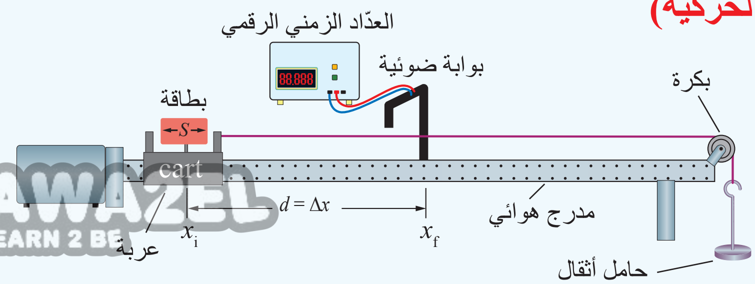
مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية) Work - Kinetic Energy Theorem

عندما تؤثّر قوّة محصّلة في جسم وتُغيّر مقدار سرعته (تُغيّر طاقته الحركية)؛ فإنّها تكون قد بذلت عليه شغلًا. ولاستقصاء العلاقة بين الشغل الكلّي المبذول على جسم والتغيّر في طاقته الحركية؛ أُنفّذ التجربة الآتية:

التجربة ١

مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية)

الموادّ والأدوات: مدرج هوائي وملحقاته، مسطرة مترية، بكرة، خيط، حامل أثقال، 10 أثقال كتلة كلّ منها (10 g)، ميزان.



إرشادات السلامة: ارتداء المعطف واستعمال النظّارات الواقية للعينين، والحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.

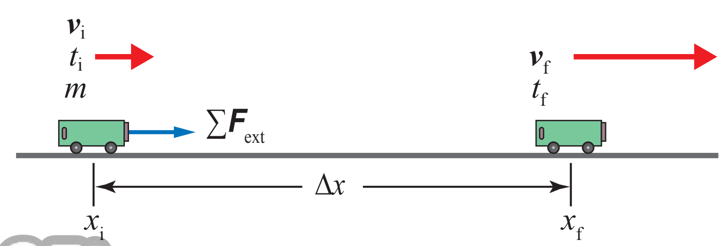
خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُثبّت المدرج الهوائي أفقيًّا على سطح الطاولة، ثمّ أُثبّت البكرة في نهايته كما في الشكل، ثم أُثبّت المسطرة المترية على سطح الطاولة، بحيث يكون صفرها عند بداية المدرج.
2. **أقيس** طول البطاقة (S) الخاصّة بالعربة ثم أُثبّتها عليها، وأدوّن طولها للمحاولات جميعها في الجدول (1).
3. **أقيس** كتلة العربة المنزلقة (m_{cart}) وأُدوّنها أعلى الجدول، ثمّ أضع العربة عند بداية المدرج عند الموقع ($x_i = 0\ \text{m}$).
4. **أقيس:** أضع أثقالًا مناسبة (50 g مثلًا) على حامل الأثقال، ثمّ أقيس كتلة الحامل وأثقاله (m_{hang}) وأُدوّنها أعلى الجدول.
5. أربط أحد طرفَي الخيط بمقدّمة العربة، ثمّ أربط طرفه الآخر بحامل الأثقال مرورًا بالبكرة، مراعيًا وصول العربة إلى نهاية المسار على المدرج قبل ملامسة حامل الأثقال أرضية الغرفة. أُثبّت حاجز الاصطدام في نهاية المسار؛ لمنع اصطدام العربة بالبكرة.
6. أُثبّت البوّابة الضوئية عند الموقع ($x_f = 40\ \text{cm}$)، ثم أصلها بالعدّاد الزمني الرقمي، ثم أصله بمصدر الطاقة الكهربائية ثمّ أُشغّله. أُدوّن بُعد البوابة الضوئية عن مقدّمة العربة ($d = x_f - x_i$) للمحاولة (1) في الجدول.
7. **أُجرّب:** أُشغّل مضخّة الهواء، ثمّ أُفلت العربة لتتحرّك من السكون، وأُلاحظ قراءة العداد الزمني الرقمي (Δt) الذي يُمثّل الزمن الذي تستغرقه البطاقة التي على العربة في عبور البوابة الضوئية. أُدوّن هذا الزمن في الجدول للمحاولة (1).
8. أُكرّر الخطوتين (6 - 7) مرّتين مع تغيير موقع البوابة الضوئية في كل مرّة، وأُدوّن في الجدول القياسات الجديدة لكلّ من: (d)، و (Δt).
9. أُكرّر التجربة مرّة أُخرى بزيادة الأثقال على الحامل.

التحليل والاستنتاج:

1. **أحسب** مقدار السرعة النهائية للعربة لكل محاولة، باستعمال العلاقة: ($v_f = \frac{S}{\Delta t}$)، ثمّ أجد مربّع هذه السرعة، وأُدوّن الحسابات في الجدول (1).
2. **أحسب** مقدار شغل القوّة المحصّلة الخارجية المؤثّرة في العربة لكل محاولة، باستعمال العلاقة: ($W_F = (\frac{m_{cart}\ m_{hang}}{m_{hang} + m_{cart}})gd$)، ثمّ أُدوّنه في الجدول (2).
3. **أحسب** مقدار التغيّر في الطاقة الحركية للعربة لكل محاولة باستعمال العلاقة: ($\Delta KE = KE_f - KE_i$)، ثمّ أُدوّنه في الجدول (2).
4. **أُقارن** بين (W_F)، و (ΔKE) لكلّ محاولة. ما العلاقة بينهما؟ هل يوجد أي اختلاف بينهما؟ أُفسّر إجابتي.
5. **أُحلّل:** هل دعّمت نتائجي التجريبية التي حصلت عليها مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية)؟ أُوضّح سبب وجود أي اختلاف بينهما.
6. **أُحلّل وأستنتج:** هل يُبذَل شغل على العربة عند ملامسة حامل الأثقال لأرضية الغرفة؟ أُوضّح إجابتي.
7. **أتوقّع** مصادر الخطأ المحتملة في التجربة.



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

أستنتجُ بعد تنفيذ التجربة السابقة أنّ شغل القوّة المحصّلة الخارجية المؤثّرة في العربة، يساوي التغيّر في طاقتها الحركية. ولإثبات ذلك رياضيًّا أنظرُ إلى الشكل (18)، الذي يوضّح عربة كتلتها (m)، تتحرّك بسرعة متجهة ابتدائية (v_i).

أفترض أنّ قوّة محصّلة أفقية خارجية ($\sum F_{ext}$) قد أثّرت في العربة عندما كانت عند الموقع (x_i) بحيث قطعت إزاحة ($d = \Delta x$) تحت تأثير هذه القوّة، وأصبحت سرعتها المتّجهة النهائية (v_f) في نهاية الإزاحة عند الموقع (x_f).

استنادًا إلى القانون الثاني لنيوتن، تتحرّك العربة بتسارع (a) في اتّجاه القوّة المحصّلة نفسه، حيث:

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

ويُعطى شغل القوّة المحصّلة الخارجية (الشغل الكلّي) خلال هذه الإزاحة بالعلاقة:

$$\begin{aligned} W_{Total} &= \sum \boldsymbol{F}_{ext} \cdot \boldsymbol{\Delta x} \\ &= \sum F_{ext}\, \Delta x \cos 0^\circ \\ &= ma\Delta x \end{aligned}$$

وبإعادة ترتيب حدود معادلة الحركة بتسارع ثابت الآتية: $v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$، أتوصّل إلى معادلة حساب التسارع الآتية: $a = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2\Delta x}$

وبتعويض قيمة التسارع (a) من هذه المعادلة في معادلة حساب الشغل السابقة؛ أحصل على ما يأتي:

$$W_{Total} = \sum F_{ext}\, \Delta x = m\Delta x \left(\frac{(v_f^2 - v_i^2)}{2\Delta x}\right)$$

$$W_{Total} = \sum F_{ext}\, \Delta x = \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2 = KE_f - KE_i$$

أفكّر: يجب ترك مسافة أمان بين كل سيّارة والسيّارة التي أمامها في أثناء حركتها. إذا تحرّكت سيّارة على طريق أُفقي بسرعة (v)؛ فإنّها تتحرّك إزاحة مقدارها (d) حتى تتوقّف بعد الضغط على مكابحها. إذا تحركت السيّارة نفسها بسرعة ($2v$)؛ فأُقدّر مقدار الإزاحة التي تتحرّكها حتى تتوقّف من لحظة الضغط على مكابحها، بافتراض ثبات مقدار قوّة الاحتكاك السكوني بين إطارات السيّارة وسطح الطريق في الحالتين.

يُمثّل الطرف الأيسر من المعادلة الشغل الذي بذلته القوّة المحصّلة على العربة، أما الطرف الأيمن منها فيُمثّل التغيّر في الطاقة الحركية للعربة، أي إنّ:

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

تُسمّى هذه العلاقة مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية) **Work – kinetic energy theorem**، وتنص على أنّ: «الشغل الكلّي المبذول على جسم يساوي التغيّر في طاقته الحركية». أستنتجُ من مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية) أنّ مقدار سرعة الجسم يزداد عندما يكون الشغل الكلّي المبذول عليه موجبًا؛ حيث الطاقة الحركية النهائية أكبر من الطاقة الحركية الابتدائية. وأنّ مقدار سرعة الجسم يتناقص عندما يكون الشغل الكلّي المبذول عليه سالبًا؛ حيث الطاقة الحركية النهائية أقل من الطاقة الحركية الابتدائية.

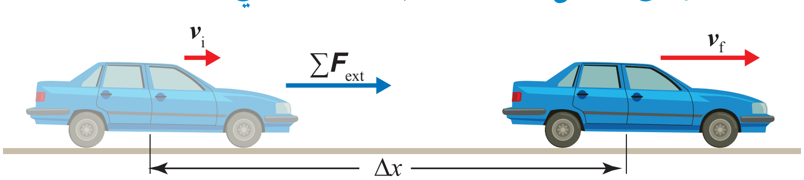
أتحقّق: علامَ تنص مبرهنة (الشغل - الطاقة الحركية)؟ متى يزداد مقدار سرعة جسم؟

أبحثُ

تُعدّ مسافة الأمان بين السيّارات عنصرًا من أهم عناصر إجراءات السلامة على الطرق؛ إذ يترتّب على المحافظة عليها تجنّب العديد من الحوادث الخطرة والمميتة. أبحثُ في أسباب وجوب ترك هذه المسافة، والعوامل التي يعتمد عليها مقدار هذه المسافة، وأُعدُّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة الصفّ.

المثال 5

تتحرّك سيّارة كتلتها $(8 \times 10^2\ kg)$ نحو الشرق على طريق أُفقي بسرعة مقدارها $(15\ m/s)$. ضغط سائقها على دوّاسة الوقود كي يتجاوز سيّارة أخرى، بحيث أصبح مقدار سرعة السيارة $(25\ m/s)$ بعد قطعها إزاحة مقدارها $(2 \times 10^2\ m)$ من لحظة ضغطه على الدواسة. أنظرُ إلى الشكل (19)، أحسبُ مقدار ما يأتي:



الشكل (19): قوّة محصّلة خارجية تؤثّر في سيّارة تتحرّك نحو اليمين إزاحة مقدارها (Δx).

أ . الطاقة الحركية الابتدائية للسيّارة.

ب. التغيّر في الطاقة الحركية للسيّارة خلال فترة الضغط على دوّاسة الوقود.

جـ. الشغل الكلّي المبذول على السيّارة خلال هذه الفترة.

د . القوّة المحصّلة الخارجية المؤثّرة في السيّارة.

المعطيات: $m = 8 \times 10^2\ kg,\ v_i = 15\ m/s,\ v_f = 25\ m/s,\ \Delta x = 2 \times 10^2\ m$.

المطلوب: $KE_i = ?,\ \Delta KE = ?,\ W_{\text{Total}} = ?,\ \sum F_{ext} = ?$.

الحلّ:

أ . أحسبُ الطاقة الحركية الابتدائية للسيّارة؛ باستعمال معادلة الطاقة الحركية، كما يأتي:

$$KE_i = \frac{1}{2} m v_i^2$$
$$= \frac{1}{2} \times 8 \times 10^2 \times (15)^2$$
$$= 9\times10^4 \text{ J}$$

ب. أحسبُ التغيّر في الطاقة الحركية للسيّارة، كما يأتي:

$$\Delta KE = KE_f - KE_i = \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2$$
$$\Delta KE = \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2)$$
$$= \frac{1}{2} \times 8 \times 10^2 \times [(25)^2 - (15)^2]$$
$$= 4 \times 10^2 \times [400]$$
$$= 1.6 \times 10^5 \text{ J}$$

جـ. السيّارة تتحرّك على طريق أُفقي، وشُغل القوّة المحصّلة غيّر مقدار سرعتها؛ لذا، فإنّ الشغل الكلّي الذي بذلته القوّة المحصّلة الخارجية على السيارة يساوي التغيّر في طاقتها الحركية، حسب مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية).

$$W_{Total} = \Delta KE$$
$$= 1.6 \times 10^5 \text{ J}$$

د. أستعملُ مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية).

$$W_{Total} = \sum F_{ext} \Delta x = \Delta KE$$
$$\sum F_{ext} = \frac{\Delta KE}{\Delta x} = \frac{(1.6 \times 10^5)}{(2 \times 10^2)} = 8 \times 10^2 \text{ N}$$

تمرين

أستعملُ المتغيّرات: سيّارة مخصّصة للسير على الرمال كتلتها (600 kg)، تتحرّك بسرعة مقدارها (28 m/s) في مسار أُفقي، أنظرُ إلى الشكل (20). أثّرت فيها قوّة محصّلة خارجية لفترة زمنية مقدارها (5 s) عملت على تباطؤها بمقدار (1.6 m/s^2). أحسبُ مقدار:

أ . الطاقة الحركية النهائية للسيّارة.

ب. التغيّر في الطاقة الحركية للسيارة خلال فترة تأثير القوّة المحصّلة الخارجية.

جـ. شغل القوّة المحصّلة الخارجية المبذول على السيّارة، خلال فترة تأثير هذه القوّة.

الشكل (20):سيّارة مخصّصة للسير على الرمال.

الطاقة الكامنة (طاقة الوضع) Potential Energy

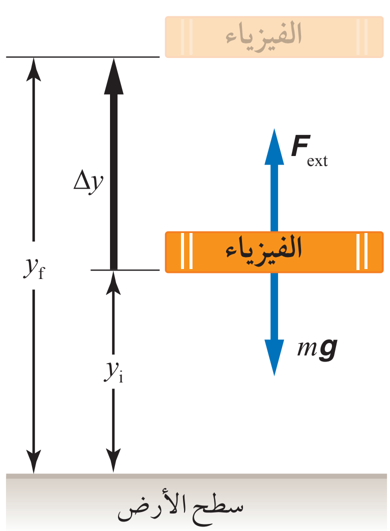
هي طاقة مختزنة في نظام مكوّن من جسمين أو أكثر تأخذ أشكالًا مختلفة؛ فقد تكون نتيجة موقع جسم بالنسبة إلى سطح الأرض (طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية)، أو نتيجة موقع جسم مشحون بالنسبة إلى جسم آخر مشحون (طاقة وضع كهربائية)، أو نتيجة تغيّر شكل الجسم؛ مثل الأجسام المرنة كالنابض (طاقة وضع مرونية)، أو نتيجة تخزينها في الروابط الكيميائية داخل المادة نفسها (طاقة كيميائية)، وغيرها... وسنلقي الضوء هنا على طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية. ونُشير هنا إلى أنّه عند دراسة حركة نظام مكوّن من جسم والأرض؛ فإنّنا اختصارًا نذكر طاقة وضع الجسم بدلًا من طاقة وضع نظام (الجسم – الأرض).

أُصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية، ثم أشاركه مع معلمي وزملائي في الصف.

طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية Gravitational Potential Energy

يوضّح الشكل (21) نظامًا يتكوّن من الأرض وكتاب الفيزياء. عندما أُؤثّر بقوّة خارجية ($\boldsymbol{F}_{ext}$) في الكتاب (كتلته m)، وأرفعه رأسيًّا إلى أعلى بسرعة ثابتة من الموقع الابتدائي (y_i) إلى الموقع النهائي (y_f)، بحيث يقطع إزاحة (Δy)، فإنّني أبذل شغلًا على الكتاب، يُعطى بالمعادلة الآتية:

$$W_F = F_{ext}\,\Delta y \cos 0^\circ$$
$$= mg\,(y_f - y_i)$$
$$= mg\,y_f - mg\,y_i$$



الشكل (21): قوّة خارجية تبذل شغلًا على نظام (الكتاب – الأرض).

إذ مقدار القوّة الخارجية المؤثّرة في الكتاب يساوي مقدار وزنه؛ لأنّه رُفع بسرعة متّجهة ثابتة. ويُختزن شغل هذه القوّة على شكل طاقة وضع في نظام (الكتاب – الأرض). وفي حال سقوط الكتاب؛ تتحوّل هذه الطاقة المختزنة إلى طاقة حركية، تُمكّنه من إنجاز شغل. تُعرف **طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية Gravitational potential energy**، بأنّها الطاقة المختزنة في نظام (جسم – الأرض) نتيجة موقع الجسم في مجال الجاذبية، ورمزها PE، يُعبّر عنها بالعلاقة:

$$PE = mgy$$

أُلاحظ أنّه كي أحسبُ طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لجسم عند موقع معيّن، يلزمني تحديد ارتفاعه الرأسي (y) عن **مستوى الإسناد** Reference level، وهو مستوى مرجعي اختياري، أفترضُ أنّ طاقة الوضع

الناشئة عن الجاذبية لأيّ جسم عنده تساوي صفرًا، وأختاره بحيث يُسهّل حل المسألة، وعادة أختار سطح الأرض مستوى إسناد، أنظرُ إلى الشكل (22).

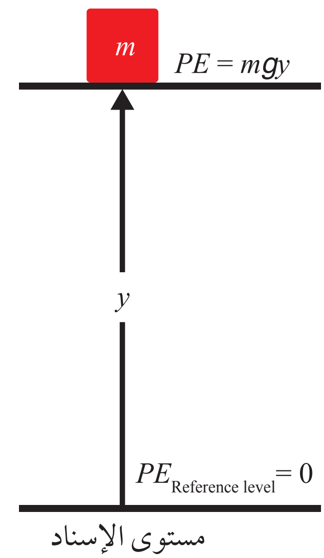
وبافتراض أنّ تسارع السقوط الحر ثابت تقريبًا قُرب سطح الأرض؛ فإنّ طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لجسم معيّن تعتمد فقط على ارتفاعه الرأسي عن سطح الأرض (مستوى الإسناد). أمّا التغيّر في طاقة وضع هذا الجسم عند حركته بين موقعين في مجال الجاذبية؛ فيعتمد فقط على التغيّر في الارتفاع الرأسي بين الموقعين الابتدائي والنهائي (Δy).

بناء على ما سبق، يُمكنني إعادة كتابة معادلة شغل القوّة الخارجية بدلالة التغيّر في طاقة الوضع عند حركة جسم بسرعة ثابتة كما يأتي:

$$W_F = \Delta PE = mg\Delta y$$

إذ يعمل شغل القوّة الخارجية على تغيير طاقة الوضع للجسم.

أتحقّق: ما المقصود بطاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية؟ ولماذا يلزمني مستوى إسناد لحسابها؟

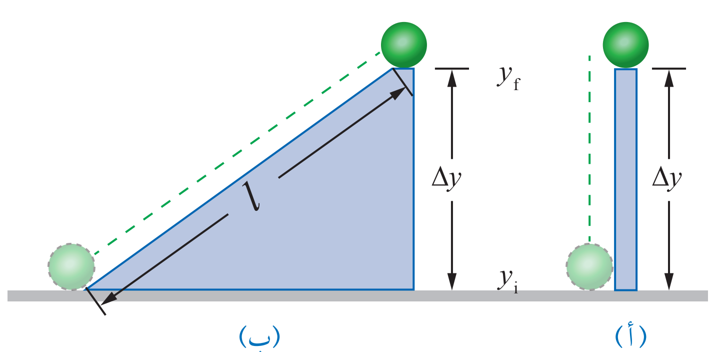


الشكل (22): مستوى الإسناد هو سطح الأرض، إذ طاقة الوضع لأيّ جسم عنده تساوي صفرًا.

سؤال: إذا اخترتُ موقع الجسم في الشكل مستوى إسناد؛ فما مقدار طاقة وضعه عندما يكون على سطح الأرض؟

الشغل الذي تبذله قوّة الجاذبية Work Done by The Force of Gravity

يُبيّن الشكل (23)، طريقتين لرفع الثقل نفسه من الموقع الابتدائي (y_i) إلى الموقع النهائي (y_f). الأولى: رفعه رأسيًّا إلى أعلى بسرعة متّجهة ثابتة، كما هو موضّح في الشكل (23/ أ)، والثانية: دفعه إلى أعلى مستوى مائل أملس بين الموقعين الرأسيين نفسيهما بسرعة متّجهة ثابتة، كما هو موضح في الشكل (23/ ب). إنّ الشغل المبذول على الثقل يساوي التغيّر في طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية، وبما إنّ التغيّر في طاقة الوضع في الحالتين هو نفسه؛ لذا، يلزمني بذل مقدار الشغل نفسه على الثقل في الحالتين.



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

أستنتجُ ممّا سبق، أنّ الشغل المبذول على جسم عند تحريكه بين موقعين في مجال الجاذبية، يعتمد فقط على التغيّر في الارتفاع الرأسي بين الموقعين، ولا يعتمد على المسار الذي يسلكه الجسم بينهما.

يُحسب الشغل المبذول لنقل جسم بين موقعين مختلفين في الارتفاع في مجال الجاذبية من دون تغيير طاقته الحركية؛ بمعرفة التغيّر في طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية؛ لأنّه أسهل بكثير من حسابه باستعمال معادلة الشغل، وبخاصّة عند حركة الجسم في مسارات متعرّجة. من أجل ذلك، أنظرُ إلى الشكل (24) الذي يُبيّن رفع صندوق إلى أعلى بطريقتين: الأولى عبر مسار متعرّج (الدرج)، والثانية: رفعه رأسيًّا إلى أعلى بحبل. إنّ الشغل المبذول في الحالتين هو نفسه؛ لذا، أجد علاقة لحساب الشغل بدلالة التغيّر في طاقة وضع الصندوق كما يأتي:

لرفع الصندوق رأسيًّا إلى أعلى بسرعة ثابتة بحبل، يلزمني التأثير فيه بقوّة شد (قوّة خارجية) إلى أعلى، تساوي وزنه في المقدار وتُعاكسه في الاتّجاه، إذ يُعطى مقدار شغل القوّة الخارجية عليه بالعلاقة $(W_F = \Delta PE)$. إنّ التغيّر في طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية في أثناء حركة الصندوق رأسيًّا يُعطى بالمعادلة:

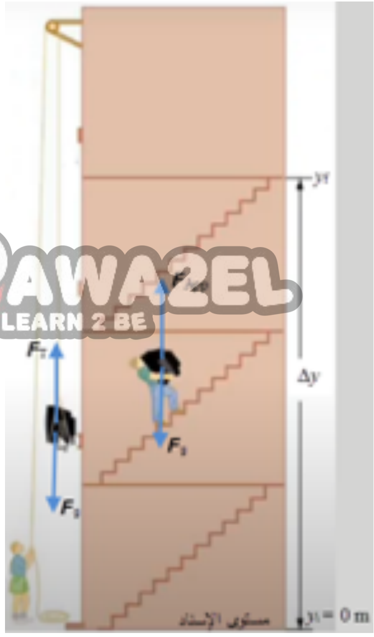
$$\Delta PE = PE_f - PE_i = mg\,(y_f - y_i) = mg\Delta y$$

عمومًا، عند حركة جسم رأسيًّا إلى أعلى تكون إزاحته موجبة $(\Delta y > 0)$؛ لذا، يكون التغيّر في طاقة وضعه موجبًا أيضًا؛ $(\Delta PE > 0)$، أمّا شغل قوّة الجاذبية عليه خلال الإزاحة نفسها فيكون سالبًا؛ $(W_g = -mg\Delta y)$؛ لأنّ اتّجاه إزاحة الجسم (إلى أعلى) يكون معاكسًا لاتّجاه تأثير قوّة الجاذبية فيه (إلى أسفل).

وإذا تحرك الجسم رأسيًّا إلى أسفل فستكون $(\Delta y < 0)$؛ لذا، يكون $(\Delta PE < 0)$، أمّا شغل قوّة الجاذبية عليه خلال الإزاحة نفسها فيكون موجبًا؛ $(W_g = mg\Delta y)$؛ لأنّ قوّة الجاذبية والإزاحة في الاتّجاه نفسه. أي إنّ شغل قوّة الجاذبية يساوي دائمًا سالب التغيّر في طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية:

$$W_g = -\Delta PE$$

أتحقّق: ما العلاقة بين شغل قوّة الجاذبية، والتغيّر في طاقة وضع الجسم الناشئة عن الجاذبية؟



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

المثال 6

في الشكل (24)، إذا كانت كتلة الصندوق (10 kg)، ورفعتُه رأسيًّا إلى أعلى بسرعة ثابتة من سطح الأرض إلى ارتفاع (9 m) عنه، فأحسبُ مقدار ما يأتي علمًا بأنّ تسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$):

أ . طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية للصندوق عند أقصى ارتفاع عن سطح الأرض.

ب. الشغل الذي بذلته قوّة الشد لرفع الصندوق إلى أقصى ارتفاع.

جـ. التغيّر في طاقة وضع الصندوق عند رفعه من سطح الارض إلى أقصى ارتفاع.

د . الشغل الذي بذلته قوّة الجاذبية في أثناء رفع الصندوق إلى أعلى.

المعطيات: $m = 10\ kg,\ y_i = 0\ m,\ y_f = 9\ m,\ g = 10\ m/s^2$.

المطلوب: $PE_f = ?,\ W_F = ?,\ \Delta PE = ?,\ W_g = ?$.

الحلّ:

أختار سطح الأرض مستوى إسناد لطاقة الوضع.

أ . أحسبُ طاقة الوضع النهائية للصندوق؛ باستعمال معادلة طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية، كما يأتي:

$$PE_f = mg\,y_f = 10 \times 10 \times 9 = 9 \times 10^2\ J$$

ب. الصندوق يتحرّك إلى أعلى بسرعة ثابتة، فتكون القوّة المحصّلة المؤثّرة فيه في الاتّجاه الرأسي صفرًا. أُطبّق القانون الثاني لنيوتن في الاتّجاه الرأسي لحساب مقدار قوّة الشد كما يأتي:

$$\sum F_y = ma_y = 0$$

$$F_T - F_g = 0$$

$$F_T = F_g = mg = 10 \times 10 = 10^2\ N$$

ثم أحسبُ الشغل الذي بذلته قوّة الشد على الصندوق، كما يأتي:

$$W_F = F_T \times \Delta y \times \cos\theta$$

$$= 10^2 \times 9 \times \cos 0^\circ$$

$$= 9 \times 10^2\ J = \Delta PE$$

جـ. شغل القوّة الخارجية (قوّة الشد) على الصندوق يساوي التغيّر في طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية، إذ إنّ طاقته الحركية لم تتغيّر في أثناء رفعه.

$$W_F = \Delta PE = 9 \times 10^2\ J$$

د . رفعتُ الصندوق بسرعة ثابتة، وحسب مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية)؛ فإنّ الشغل الكلّي المبذول على الصندوق يساوي التغيّر في طاقته الحركية، وهو هنا يساوي صفرًا:

$$W_{Total} = \Delta KE = 0$$

$$W_F + W_g = 0$$

$$W_g = -W_F = -\Delta PE$$

$$= -9 \times 10^2\ J$$

تمرين

أستنتجُ: إصّيص أزهار كتلته (800 g)، سقط من السكون من ارتفاع (250 cm) عن سطح الأرض. أحسبُ مقدار ما يأتي، علمًا بأنّ تسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$):

أ . طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية، عند أقصى ارتفاع عن سطح الأرض.

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

جـ. شغل قوّة الجاذبية المبذول على الإصّيص.

الربط مع الحياة

تُصدر مديريّتا الأمن العامّ والدفاع المدني نشرات توعوية وتحذيرات للمواطنين عند تأثّر المملكة بمنخفض جوي، وبخاصّة عندما يكون مصحوبًا برياح سرعتها كبيرة، تُحذّرهم من خطر تطاير بعض الأجسام غير المثبّتة -ألواح الزينكو مثلًا- نتيجة هذه الرياح، وتطلب إليهم تثبيتها جيّدًا. فالرياح لها طاقة حركية تُمكّنها من بذل شغل على الأجسام التي تصطدم بها. وعندما تكون سرعة الرياح كبيرة؛ فإنّها قد تُلحق أضرارًا كبيرة بهذه الأجسام وتُسبّب تطايرها، كما قد تؤدّي هذه الرياح إلى اقتلاع الأشجار والخِيَم والبيوت الزراعية البلاستيكية، كما أنّها تؤثّر سلبًا في الملاحة البحرية والجوية، أنظرُ إلى الشكل (25).

إنّ قيادة المركبات في أثناء هبوب هذه الرياح ذات السرعة الكبيرة فيها خطورة أيضًا، وبخاصّة إذا كان اتّجاه حركة الرياح عرضي على الطريق، إذ يصعب عندئذ قيادة السيارة والسيطرة عليها وتوجيهها، وقد تؤدّي هذه الرياح إلى انحراف السيارة عن الطريق وفقدان السيطرة عليها. لذا، يجب أخذ هذه التحذيرات والإرشادات في الحسبان، وتثبيت أيّ جسم قابل للتطاير جيّدًا؛ كي لا نؤذي الآخرين نتيجة تطايرها، وعدم قيادة المركبات إلّا في حالة الضرورة القصوى في مثل هذه الظروف الجوّية.

(أ)

(ب)

(جـ)

الشكل (25):

(أ) للرياح طاقة حركية تزداد بزيادة سرعتها.

(ب) قد تُمكّنها من اقتلاع الأشجار في حال كانت سرعتها كبيرة.

(جـ) وإلحاق الضرر في الأجسام التي تعترض طريقها.

أبحثُ

للرياح آثار إيجابية وأُخرى سلبية حسب سرعتها وطبيعة المنطقة التي تعصف بها. أبحثُ في بعض هذه الآثار الإيجابية والآثار السلبية غير التي ذُكرت هنا، وأُعدُّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة الصفّ.

الطاقة الميكانيكية Mechanical Energy

عرفتُ أنّ جسمًا يُمكن أن يكون له طاقة حركية (KE) أو طاقة وضع (PE) أو كلاهما. يُسمّى مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع **الطاقة الميكانيكية Mechanical energy (ME)**، ويُعبّر عنها بالمعادلة الآتية:

$$ME = KE + PE$$

حفظ الطاقة الميكانيكية Conservation of Mechanical Energy

عندما تتحرّك كرة قريبًا من سطح الأرض، يكون مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لنظام (الكرة – الأرض) محفوظًا عند إهمال مقاومة الهواء، ويساوي مقدارًا ثابتًا، حيث:

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

وبتغيّر ارتفاع الكرة عن سطح الأرض، تتحوّل طاقة الوضع إلى طاقة حركية عند حركتها إلى أسفل (نحو الأرض)، أو تتحوّل الطاقة الحركية الى طاقة وضع عند حركتها إلى أعلى، بينما تبقى الطاقة الميكانيكية ثابتة ما دامت الكرة تتحرّك تحت تاثير قوّة الجاذبية فقط. ومن الأمثلة الأُخرى على حفظ الطاقة الميكانيكية، حركة جُسيم مشحون في مجال كهربائي.

✓ **أتحقّق:** ما الطاقة الميكانيكية لجسم؟

القوى المحافظة والقوى غير المحافظة
Conservative and Nonconservative Forces

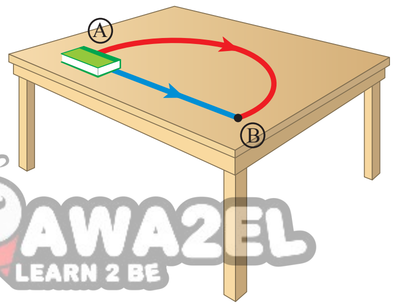
تُصنّف القوى إلى قوى محافظة وقوى غير محافظة. **وللقوّة المحافظة** خصيصتان، هما:

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 صفرًا.

وعندما تعيق قوّة محافظة حركة جسم تزداد طاقة وضعه، أما عندما تُحرّك القوّة المحافظة الجسم فتقلّ طاقة وضعه. وتُعدّ قوّة الجاذبية والقوّة المرونية والقوّة الكهربائية أمثلة على القوى المحافظة.

أعدّ فيلمًا قصيرًا باستعمال برنامج صانع الأفلام (movie maker) يوضّح الطاقة الميكانيكية وحفظها، وأحرص على أن يشتمل الفيلم على توضيح التحوّل بين طاقة الوضع وطاقة الحركة، وعلى مقارنة بين القوى المحافظة والقوى غير المحافظة، وعلى مفهوم كلّ من: حفظ الطاقة الميكانيكية، وشغل القوى المحافظة، وشغل القوى غير المحافظة، وعلى صور لأمثلة توضيحية، ثم أشاركه معلمي وزملائي في الصف.

وتُعدّ أيّ قوّة لم تُحقّق خصيصتَي القوى المحافظة السابقتين **قوّة غير محافظة**، إذ يعتمد شغلها على المسار. وعندما تؤثّر قوى غير محافظة في نظام وتبذل عليه شغلًا؛ فإنّها تعمل على تغيير طاقته الميكانيكية. ويوضّح الشكل (26) اعتماد شغل القوّة غير المحافظة على المسار؛ فالشغل الذي تبذله قوّة الاحتكاك الحركي عند تحريك الكتاب بين الموقعين (A) و (B) على سطح الطاولة الأُفقي الخشن، يكون أكبر عبر المسار المنحني؛ لأنّه أطول من المسار المستقيم؛ لذا، لا تُعدّ قوّة الاحتكاك قوّة محافظة. وخلافًا للقوى المحافظة فإنّ شغل قوّة الاحتكاك لا يُختزن، بل يتحوّل جزء كبير منه إلى طاقة حرارية. وتُعدّ قوّة الاحتكاك الحركي وقوّة الشدّ، أمثلة على القوى غير المحافظة.



الشكل (26): يعتمد شغل القوّة غير المحافظة على المسار.

للتوصّل إلى علاقة رياضية لحفظ الطاقة الميكانيكية؛ أدرس حركة جسم تحت تأثير قوّة محافظة فقط. يوضّح الشكل (27) نظامًا يتكوّن من كرة والأرض، إذ تسقط الكرة سقوطًا حرًّا تحت تأثير قوّة الجاذبية فقط عند إهمال مقاومة الهواء، وسأدرس شغل قوّة الجاذبية على الكرة.

أُمسك الكرة على ارتفاع (y_i) بالنسبة إلى سطح الأرض، فتكون الطاقة الميكانيكية للكرة عند أقصى ارتفاع فقط طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية، حيث الطاقة الحركية الابتدائية لها صفر؛ لأنّها ساكنة. بعد إفلات الكرة تسقط إلى أسفل، فتزداد طاقتها الحركية، بينما تقلّ طاقة وضعها، وعند وصول الكرة إلى الموقع النهائي (y_f) تكون قوّة الجاذبية قد بذلت عليها شغلًا يُعطى بالعلاقة:

$$W_g = -\Delta PE$$

إنّ قوّة الجاذبية قوّة محافظة، وهي تساوي القوّة المحصّلة المؤثّرة في الكرة في أثناء سقوطها، وبتطبيق مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية) على الكرة، أتوصّل إلى أنّ الشغل الكلّي المبذول على الكرة في أثناء سقوطها يساوي التغيّر في طاقتها الحركية:

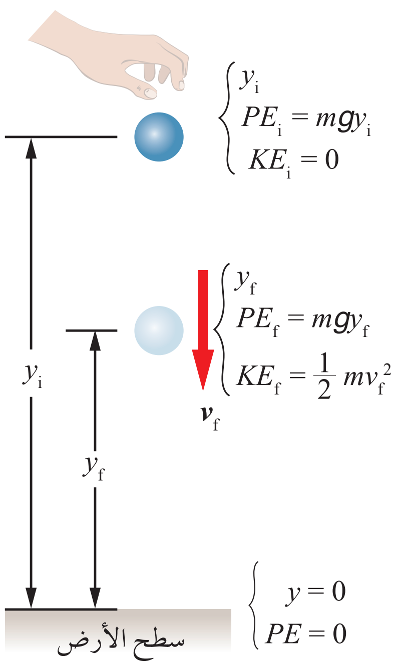
$$W_{Total} = W_g = \Delta KE$$

وبمساواة معادلتّي حساب الشغل السابقتين، أحصل على:

$$\Delta KE = -\Delta PE$$

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

وبالتعويض عن التغيّر في الطاقة الحركية والتغيّر في طاقة الوضع؛ أتوصّل إلى ما يأتي:



الشكل (27): إسقاط كرة من الموقع (y_i) بالنسبة إلى سطح الأرض.

سؤال: ما الطاقة الميكانيكية للكرة عند الموقع (y_f)؟ وما طاقتها الميكانيكية مباشرة قبل ملامستها سطح الأرض؟

$$(KE_f - KE_i) + (PE_f - PE_i) = 0$$

$$KE_i + PE_i = KE_f + PE_f$$

تُعطى الطاقة الميكانيكية بالعلاقة : $ME = KE + PE$؛ لذا، فإنّ:

$$ME_i = ME_f$$

ويكون:

$$\Delta ME = 0$$

تصف العلاقة السابقة **حفظ الطاقة الميكانيكية Conservation of mechanical energy** في ظل وجود قوى محافظة فقط تبذل شغلًا، إذ تبقى الطاقة الميكانيكية للنظام ثابتة.

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين القوى المحافظة والقوى غير المحافظة؟ ومتى تكون الطاقة الميكانيكية لنظام محفوظة؟

المثال 7

قذفت هدى كرة كتلتها (300 g) رأسيًّا إلى أعلى عن سطح الأرض بسرعة مقدارها (20 m/s)، أنظر إلى الشكل (28). أفترضُ أنّه لا يوجد قوى احتكاك، وتسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$)، فأحسبُ مقدار ما يأتي للكرة عند وصولها إلى أقصى ارتفاع:

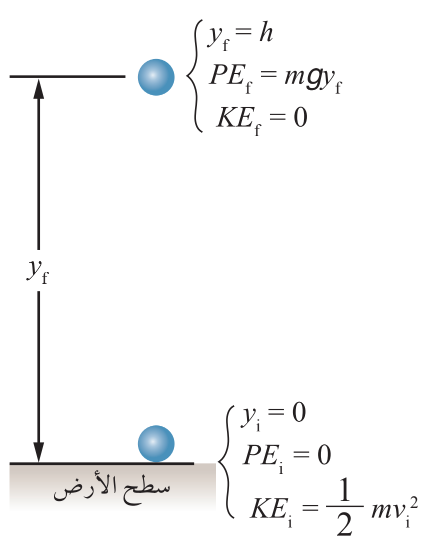
أ . طاقتها الميكانيكية.

ب. التغيّر في طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية.

جـ. أقصى ارتفاع تصله عن سطح الأرض.

د . التغيّر في طاقتها الحركية.

هـ. الشغل الذي بذلته قوّة الجاذبية عليها.



الشكل (28):قذف كرة رأسيًّا إلى أعلى.

المعطيات: $m = 300\ g = 0.3\ kg,\ v_i = 20\ m/s,\ y_i = 0\ m,\ g = 10\ m/s^2$.

المطلوب: $ME_f = ?,\ \Delta PE = ?,\ h = \Delta y = ?,\ \Delta KE = ?,\ W_g = ?$.

الحلّ:

أختار سطح الأرض مستوى إسناد لطاقة الوضع.

بإهمال مقاومة الهواء تؤثّر قوّة الجاذبية فقط في الكرة؛ لذا، فإنّ الطاقة الميكانيكية محفوظة، أنظرُ إلى الشكل (28).

أ . الطاقة الميكانيكية محفوظة؛ لا يوجد قوى غير محافظة تبذل شغلًا. والطاقة الميكانيكية للكرة لحظة

قذفها طاقة حركية فقط، حيث طاقة وضعها صفر؛ لأنّها تقع على مستوى الإسناد لطاقة الوضع. أمّا طاقتها الميكانيكية عند أقصى ارتفاع (y_f) فهي طاقة وضع فقط، حيث مقدار سرعتها صفر عند هذا الموقع.
أستعملُ معادلة حفظ الطاقة الميكانيكية كما يأتي:

$$\begin{aligned} ME_f &= ME_i \\ &= KE_i + PE_i \\ &= \frac{1}{2} m v_i^2 + 0 = \frac{1}{2} \times 0.3 \times (20)^2 \\ &= 60 \text{ J} \end{aligned}$$

ب. طاقتها الميكانيكية عند أقصى ارتفاع طاقة وضع فقط:

$$ME_f = KE_f + PE_f = PE_f = 60 \text{ J}$$

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

$$\begin{aligned} \Delta PE &= PE_f - PE_i \\ &= 60 - 0 \\ &= 60 \text{ J} \end{aligned}$$

جـ. أحسبُ أقصى ارتفاع تصله الكرة (h)؛ باستعمال التغيّر في طاقة وضعها كما يأتي:

$$\Delta PE = PE_f - PE_i$$

$$60 = mg\Delta y = mg\,(y_f - y_i)$$

$$60 = 0.3 \times 10 \times (y_f - 0)$$

$$y_f = 20 \text{ m} = h$$

د. لا يوجد قوّة غير محافظة تبذل شغلًا على الكرة؛ لذا، فإنّ التغيّر في طاقتها الحركية، يساوي سالب التغيّر في طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية:

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

إذ تتناقص طاقتها الحركية في أثناء ارتفاعها.

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

$$\begin{aligned} W_g &= \Delta KE = -\Delta PE \\ &= -60 \text{ J} \end{aligned}$$

أبحثُ

تعتمد مصادر الطاقة المتجدّدة التي يُمكن استعمالها في دولة ما، على جغرافية هذه الدولة ومناخها. فما يناسب دولة معينة قد لا يناسب أخرى.

أبحثُ في دور علم الفيزياء، في تحديد مصدر الطاقة المتجدّد الأنسب لاستعماله في منطقتي، وأُعِدُّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام طلبة الصفّ.

تمرين

أحسبُ: في المثال السابق، إذا قذفت هدى الكرة نفسها بسرعة (15 m/s) رأسيًّا إلى أعلى عن سطح الأرض؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي علمًا بأنّ تسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$)، وبإهمال قوى الاحتكاك:

أ . الطاقة الحركية الابتدائية للكرة.

ب. طاقة الوضع التي اكتسبتها الكرة، عند وصولها إلى أقصى ارتفاع عن سطح الأرض.

جـ. سرعة الكرة لحظة عودتها إلى المستوى نفسه الذي قُذِفت منه.

الربط مع الحياة

يُستفاد من تحوّل طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية إلى طاقة حركية في توليد الطاقة الكهربائية؛ لذا، عملت بعض الدول على إنشاء سدود في مجاري أنهارها الكبيرة، أنظرُ إلى الشكل (29). يحجز السد ماء النهر خلفه، ما يؤدّي إلى زيادة ارتفاع مستوى سطح الماء المحجوز خلفه (أي زيادة طاقة وضعه الناشئة عن الجاذبية). ومن ثمّ، يجري التحكّم بمعدّل تدفّق الماء المحجوز خلف السد عن طريق ممرّات خاصّة، بحيث يدير الماء المتدفّق مراوح خاصّة (توربينات) متّصلة بمولّدات كهربائية، ما يؤدّي إلى الحصول على الطاقة الكهربائية، التي تُسمّى **الطاقة الكهرومائية** Hydro power.

الشكل (29): للماء المحجوز خلف سد طاقة وضع تتحوّل إلى طاقة حركية، تُدير توربينات متّصلة بمولّدات كهربائية؛ مولّدة طاقة كهربائية.

شغل القوى غير المحافظة

Work Done by Nonconservative Forces (W_{nc})

لتحريك كتاب على سطح أُفقي خشن، يلزمني التأثير فيه بقوّة بشكل مستمر للمحافظة على حركته؛ إذ تعمل قوّة الاحتكاك الحركي بين سطح الكتاب وسطح الطاولة، على تحويل جزء كبير من الطاقة الحركية للكتاب إلى طاقة حرارية ترفع درجة حرارة السطحين المتلامسين؛ لذا، يلزمني بذل شغل على الكتاب؛ لتعويض الطاقة المبذولة في التغلب على قوّة الاحتكاك.

عند تأثير قوّة غير محافظة في جسم (وبذلها شغلًا عليه)؛ فإنّ طاقته الميكانيكية تصبح غير محفوظة، ويُعبّر عن شغل القوى غير المحافظة بالعلاقة الآتية:

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

حيث (W_{nc}) الشغل التي تبذله القوى غير المحافظة. فمثلًا، يُعبّر عن شغل قوّة الاحتكاك (W_f) بالعلاقة الآتية:

$$W_f = \Delta ME = -f_k d$$

حيث (d) طول المسار الذي تحرّكه الجسم تحت تأثير قوّة الاحتكاك الحركي.

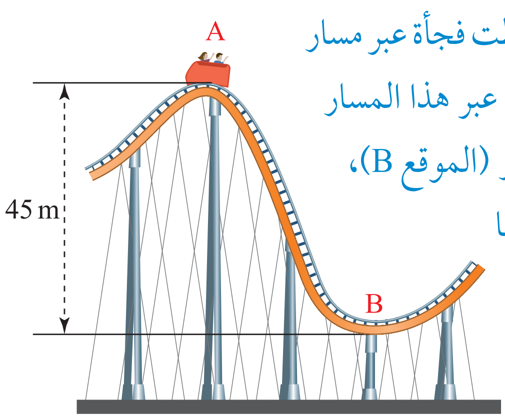
أتحقّق: للمحافظة على حركة جسم على مسار خشن، يلزم التأثير فيه بقوّة بشكل مستمر. لماذا؟

أفكّر: إذا بذلتُ شغلًا (موجبًا) على جسم ولم تتغيّر طاقته الحركية، وكذلك لم تتغيّر طاقة وضعه، فما الذي أستنتجه عن النظام الموجود فيه الجسم؟ وماذا يحدث للشغل الذي بذلته؟ أُناقش أفراد مجموعتي، وأستعملُ مصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة للتوصّل إلى إجابة عن السؤال.

المثال 8

ذهبت حلا وصديقتها سُرى إلى مدينة الألعاب، حيث ركبتا لعبة الأُفعوانية (Roller - coaster). وعندما كانت عربة الأُفعوانية تتحرّك بسرعة مقدارها (2 m/s) عند الموقع (A)، هبطت فجأة عبر مسار منحدر خشن طوله (50 m)، بحيث كان التغيّر في الارتفاع الرأسي عبر هذا المسار المنحدر (45 m)، ومقدار سرعة العربة (24 m/s) عند نهاية المسار (الموقع B)، أنظرُ إلى الشكل (30). إذا علمتُ أنّ كتلة عربة الأُفعوانية مع ركّابها (3×10^2 kg)، وتسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$)؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي عند حركة عربة الأُفعوانية من الموقع (A) إلى (B):

أ. التغيّر في طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية.



الشكلُ (30): حركة عربة الأُفعوانية عبر مسار منحدر خشن.

ب. التغيّر في طاقتها الحركية.

جـ. التغيّر في طاقتها الميكانيكية.

د . الشغل الذي بذلته قوّة الاحتكاك الحركي على العربة، في أثناء حركتها على هذا المسار.

هـ. قوّة الاحتكاك الحركي المؤثّرة في العربة، في أثناء حركتها على هذا المسار.

المعطيات: $v_i = 2$ m/s, $d = 50$ m, $\Delta y = 45$ m, $v_f = 24$ m/s, $m = 3 \times 10^2$ kg, $g = 10$ m/s^2.

المطلوب: $\Delta PE = ?,\ \Delta KE = ?,\ \Delta ME = ?,\ W_f = ?,\ f_k = ?$.

الحلّ:

أختار أدنى مستوى لحركة الأُفعوانية –وهو الموقع (B)– مستوى إسناد لطاقة الوضع.

تؤثّر في الأُفعوانية قوّة غير محافظة (قوّة الاحتكاك الحركي) تبذل شغلًا عليها؛ لذا، الطاقة الميكانيكية غير محفوظة.

أ . أحسبُ التغيّر في طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لعربة الأُفعوانية، بافتراض موقعها عند الموقع (A) الابتدائي (y_i)، وموقعها عند (B) الموقع النهائي (y_f)، كما يأتي:

$$\Delta PE = PE_f - PE_i$$
$$= mg\,(y_f - y_i) = 3 \times 10^2 \times 10 \times (0 - 45)$$
$$= -1.35 \times 10^5 \text{ J}$$

تُشير الإشارة السالبة إلى حدوث نقصان في طاقة الوضع.

ب. أحسبُ التغيّر في الطاقة الحركية لعربة الأُفعوانية، كما يأتي:

$$\Delta KE = KE_f - KE_i$$
$$= \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2 = \frac{1}{2} m(v_f^2 - v_i^2)$$
$$= \frac{1}{2} \times 3 \times 10^2 \times [(24)^2 - (2)^2]$$
$$= 8.58 \times 10^4 \text{ J}$$

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

جـ. أحسبُ التغيّر في الطاقة الميكانيكية كما يأتي:

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

أُلاحظ أنّ الطاقة الميكانيكية غير محفوظة؛ لوجود قوّة الاحتكاك.

د. أستعملُ العلاقة الآتية لحساب شغل قوّة الاحتكاك الحركي وهي قوّة غير محافظة:

$W_{nc} = \Delta ME$

$W_f = \Delta ME$

$= -4.92 \times 10^4$ J

هـ. أحسبُ مقدار قوّة الاحتكاك الحركي، كما يأتي:

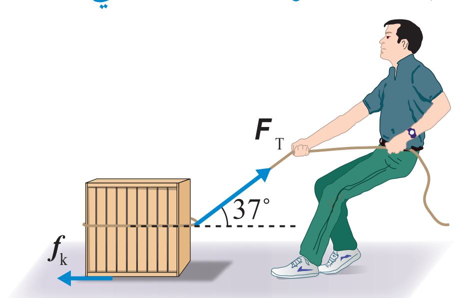
$W_f = \Delta ME = -f_k d$

$-4.92 \times 10^4 = -f_k \times 50$

$f_k = 9.84 \times 10^2$ N

المثال 9

يسحب عمر صندوقًا كتلته (60 kg) من السكون على أرضية أُفقية خشنة بقوّة شدّ مقدارها (200 N) بحبل يصنع زاوية (37°) على الأُفقي، إزاحة مقدارها (50 m) جهة اليمين، إذ كانت سرعة الصندوق في نهاية الإزاحة (5 m/s)، أنظرُ إلى الشكل (31). إذا كان مقدار قوّة الاحتكاك الحركي المؤثّرة في الصندوق (100 N)، والحبل مهمل الكتلة وغير قابل للاستطالة، و cos 37° = 0.8، فأحسبُ مقدار ما يأتي:



الشكل (31): سحب صندوق على أرضية أُفقية خشنة.

أ. شغل قوّة الاحتكاك الحركي.

ب. التغيّر في الطاقة الميكانيكية للصندوق.

جـ. شغل قوّة الشدّ.

المعطيات: $m = 60$ kg, $\theta = 37°$, $d = 50$ m, $v_i = 0$ m/s, $v_f = 5$ m/s, $F_T = 200$ N, $f_k = 100$ N, cos 37° = 0.8.

المطلوب: $W_f = ?,\ \Delta ME = ?,\ W_F = ?$.

الحلّ:

أختار سطح الأرض مستوى إسناد لطاقة الوضع.

تؤثّر في الصندوق قوى غير محافظة تبذل شغلًا عليه وهي: قوّة الاحتكاك الحركي وقوّة الشد؛ لذا، الطاقة الميكانيكية غير محفوظة.

أ . تؤثّر قوّة الاحتكاك الحركي بعكس اتّجاه إزاحة الصندوق، وأحسبُ شغلها كما يأتي:

$W_f = f_k d \cos 180°$

$= -f_k d = -100 \times 50$

$= -5000 \text{ J} = -5 \times 10^3$ J

ب. طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية لا تتغيّر؛ لأنّ الحركة على مسار أُفقي؛ ($\Delta PE = 0$). ويكون التغيّر في الطاقة الميكانيكية نتيجة تغيّر طاقة الحركة فقط، وأحسبُ التغير كما يأتي:

$$\Delta ME = \Delta KE + \Delta PE$$
$$= \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2) + 0$$
$$= \frac{1}{2} \times 60 \times [(5)^2 - (0)^2]$$
$$= 7.5 \times 10^2 \text{ J}$$

أُلاحظ أنّ الطاقة الميكانيكية غير محفوظة؛ فقد ازدادت.

جـ. تبذل قوّة الشد شغلًا على الصندوق، وأحسبُ شغلها بالمعادلة الآتية:

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

استُنفِدَ جزء من شغل قوّة الشد للتغلّب على قوّة الاحتكاك الحركي، والجزء الآخر منه أكسب الصندوق طاقة حركية.

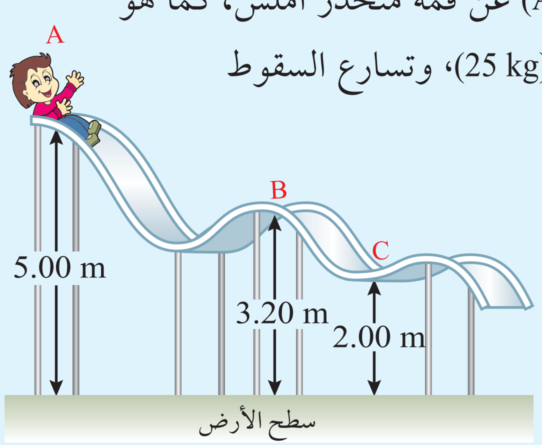
تمرين

أستنتجُ: ينزلق طفل بدءًا من السكون من الموقع (A) عن قمّة منحدر أملس، كما هو موضّح في الشكل (32). إذا علمتُ أنّ كتلة الطفل (25 kg)، وتسارع السقوط الحر (10 m/s^2)؛ فأحسب مقدار ما يأتي:

أ . سرعة الطفل عند الموقع (B).

ب. الطاقة الحركية للطفل عند الموقع (C).

جـ. شغل قوّة الجاذبية المبذول على الطفل في أثناء انزلاقه من الموقع (A) إلى الموقع (C).



الشكل (32): طفل ينزلق على منحدر أملس.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بالطاقة الميكانيكية؟ وعلامَ تنص مبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية)؟

2. **أُحلّل:** في أيّ الحالات الآتية أُطبّق حفظ الطاقة الميكانيكية؟ وفي أيّها لا أُطبّقه؟

أ. قذف كرة تنس في الهواء.

ب. رمي كرة سلة نحو السلة.

جـ. حركة سيّارة على طريق رملي.

د. انزلاق قرص فلزي على سطح جليدي أملس.

3. **أتوقّع:** هل يمكن أن تتغيّر سرعة جسم؛ إذا كان الشغل الكلّي المبذول عليه صفرًا؟

4. **أستعملُ المتغيّرات:** كرتان متماثلتان، قُذفت الأولى بسرعة مقدارها (3 m/s)، وقُذفت الثانية بسرعة مقدارها (9 m/s). أجد نسبة الطاقة الحركية للكرة الثانية إلى الطاقة الحركية للكرة الأولى. ماذا أستنتجُ؟

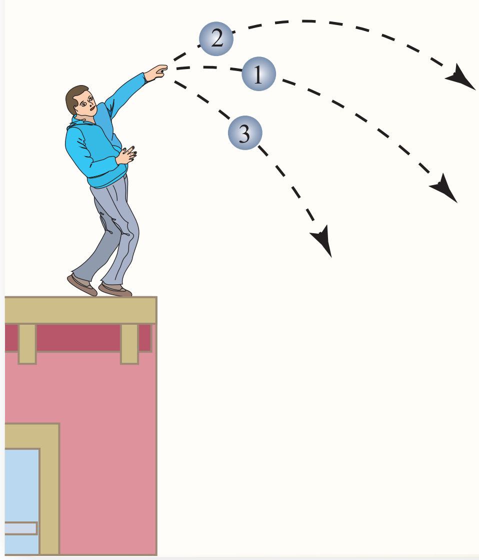
5. **أحسبُ:** إذا علمتُ أن كتلة سوسن (50 kg)، وتسارع السقوط الحر ($10\ m/s^2$)؛ فأحسبُ مقدار:

أ. طاقتها الحركية؛ عندما تركض بسرعة مقدارها (3 m/s).

ب. طاقة وضعها الناشئة عن الجاذبية؛ عندما تجلس في شرفة منزلها التي يبلغ ارتفاعها (8 m) عن سطح الأرض.

(ملحوظة: أفترض سطح الأرض مستوى إسناد).

6. **التفكير الناقد:** يرمي خالد 3 كرات متماثلة من أعلى بناية. إذا رمى الكرات الثلاث بمقدار السرعة الابتدائية نفسه، بالاتّجاهات الموضّحة في الشكل المجاور، فأُرتّب الكرات الثلاث حسب مقادير سرعاتها لحظة وصولها إلى سطح الأرض بإهمال مقاومة الهواء. أُوضّح إجابتي.



الإثراء والتوسّع

طاقة الرياح Wind power

في سياق التوجيهات الملكية السامية للحكومات المتعاقبة بتبني مشاريع الطاقة البديلة، لتخفيف حجم الفاتورة النفطية؛ بُنيت عدّة مشاريع لتوليد الطاقة الكهربائية. وتوضّح صورة بداية الوحدة إحدى مزارع الرياح في الأردن لتوليد الطاقة الكهربائية، بالاستفادة من الطاقة الحركية للرياح.

تولّد توربينات (مراوح) الرياح طاقة كهربائية عن طريق تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية باستعمال مولّدات كهربائية. فمثلاً، مزرعة رياح الطفيلة تولّد طاقة كهربائية بمعدل (117 MW) تقريبًا. فكيف أحسبُ الطاقة التي تولّدها توربينات الرياح؟

إذا كان طول إحدى شفرات التوربين (l)، فإنّها تمسح عند دورانها دائرة نصف قطرها (l)، ومساحتها ($A = \pi l^2$)، وعندما تهبّ الرياح عموديًّا على شفرات التوربين يكون حجم الهواء المار عبر المستوى الذي تُشكّله هذه الشفرات مساويًا لحجم أسطوانة، مساحة مقطعها العرضي يساوي مساحة المنطقة التي تمسحها الشفرات ($A = \pi l^2$). وبافتراض سرعة الرياح (v) تساوي طول أسطوانة الهواء في الثانية الواحدة؛ إذ المسافة التي تتحركّها جزيئات الهواء في الثانية الواحدة تساوي سرعة الرياح (m/s)؛ فإنّ حجم الهواء (V) الذي يمرّ عبر المستوى الذي تُشكّله شفرات التوربين في الثانية الواحدة يساوي ($V = Av$). يُحسب مقدار الطاقة الحركية للرياح التي تمرّ عبر هذا التوربين كل ثانية كما يأتي:

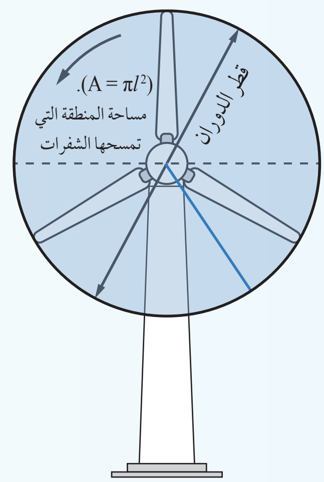
$$KE = \frac{1}{2} mv^2$$

$$= \frac{1}{2}(\rho V)v^2 = \frac{1}{2}\rho(Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

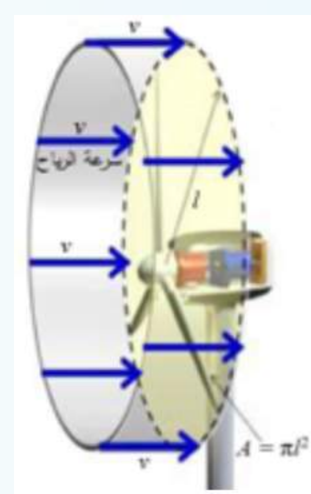
حيث ρ كثافة الهواء. ولا تُحوّل كامل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية؛ إذ يُفقد جزء من طاقتها الحركية على شكل حرارة وصوت وشغل للتغلّب على قوى الاحتكاك في التوربين، وغيرها... ويُعبّر عن مقدار الطاقة الناتجة من التوربين نسبة إلى الطاقة الداخلة إليه بمصطلح الكفاءة، وتتراوح كفاءة هذه التوربينات في تحويل الطاقة بين %(50 – 40) تقريبًا.

أبحث بالاستعانة بمصادر المعرفة المناسبة، أبحثُ عن مزرعة رياح في منطقتي أو المناطق المجاورة، وأُعدّ وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعّمًا بالصور عن مزاياها، وسلبياتها إن وجِدت، وطول شفرات توربيناتها. وأحسبُ مقدار الطاقة الحركية للرياح التي تمر عبر أحد توربيناتها كلّ ثانية، والطاقة الكهربائية الناتجة في الثانية الواحدة؛ باستعمال كثافة الهواء عند مستوى سطح البحر ($\rho = 1.2\ kg/m^3$)، وسرعة الرياح (20 m/s)، وافتراض كفاءة التوربين (50%). كما أبحثُ –بمساعدة أفراد مجموعتي– عن مصادر الطاقة المتجدّدة التي يُمكن استعمالها في منطقتي.

مزرعة رياح



تمسح شفرة المروحة عند دورانها دائرة نصف قطرها (l)، ومساحتها ($A = \pi l^2$).



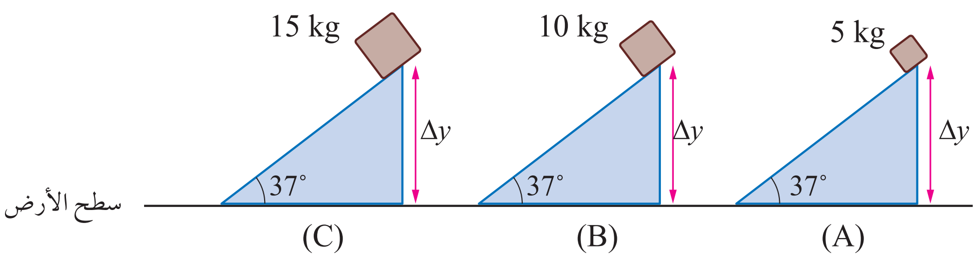
حجم الهواء المار عبر المستوى الذي تُشكّله شفرات التوربين يساوي حجم أسطوانة مساحة مقطعها العرضي (A)، وطولها في الثانية الواحدة يساوي سرعة الرياح (v).

* أينما يلزم يكون تسارع السقوط الحر ($g = 10\ m/s^2$)، ما لم يُذكر غير ذلك.

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. الشغل الذي تبذله قوّة مقدارها (1 N) عندما تؤثّر في جسم وتُحرّكه إزاحة مقدارها (1 m) في اتّجاهها، يُسمّى:
   أ . النيوتن (N). ب . الجول (J). جـ . الواط (W). د . الحصان (hp).
2. مقدرة الجسم على بذل شغل، تُسمّى:
   أ. الطاقة. ب . الشغل. جـ. القدرة. د. القوّة المحصّلة.
3. الطاقة المختزنة في جسم نتيجة موقعه بالنسبة إلى مستوى إسناد، تُسمّى:
   أ. الشغل. ب. الطاقة الحركية. جـ. القدرة. د. طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية.

توضّح الأشكال الثلاثة الآتية، انزلاق 3 صناديق مختلفة الكتل من السكون، من الارتفاع نفسه على مستويات مائلة ملساء لها الميل نفسه. أستعينُ بهذه الأشكال للإجابة عن الأسئلة (4 – 7):



4. الصندوق الذي له أكبر طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية، هو:
   أ . A. ب. B. جـ . C. د . طاقات وضعها جميعها متساوية.
5. الترتيب الصحيح للطاقة الحركية للصناديق الثلاثة لحظة وصولها إلى سطح الأرض، هو:
   أ. $KE_A > KE_B > KE_C$ ب . $KE_C > KE_B > KE_A$ جـ . $KE_B > KE_A > KE_C$
   د . طاقاتها الحركية جميعها متساوية.
6. الصندوق الذي له أكبر سرعة لحظة وصوله إلى سطح الأرض، هو:
   أ . A. ب. B. جـ. C. د. سرعاتها جميعها متساوية.
7. الصندوق الذي يصل إلى سطح الأرض أولًا، هو:
   أ . A. ب. B. جـ. C. د . تصل جميعها إلى سطح الأرض في اللحظة نفسها.
8. تكون الطاقة الميكانيكية لجسم يسقط سقوطًا حرًّا عند إهمال مقاومة الهواء:
   أ . متزايدة. ب. متناقصة. جـ. ثابتة. د. صفرًا.
9. عندما تؤثّر قوّة في جسم عموديًّا على اتّجاه إزاحته؛ فإنّ شغلها يكون:
   أ . موجبًا. ب. سالبًا. جـ. صفرًا. د. موجبًا أو سالبًا.
10. إذا كان شغل قوّة مؤثّرة في جسم بين موقعين، يعتمد على موقعه النهائي وموقعه الابتدائي، ولا يعتمد على المسار الفعلي للحركة؛ فإنّ هذه القوّة توصف بأنّها قوّة:
   أ . احتكاك. ب. محافظة. جـ. غير محافظة. د. شدّ.

11. يتحرّك جسم أُفقيًّا بسرعة ثابتة مقدارها (5 m/s) شرقًا، ويقطع إزاحة مقدارها (50 m). إنّ الشغل الكلّي المبذول على الجسم خلال هذه الإزاحة يساوي:

أ . 250 J .　　ب. الطاقة الحركية له.　　جـ. صفرًا.　　د. طاقته الميكانيكية.

12. تتحرّك سيّارة بسرعة (15 m/s) شرقًا، بحيث كانت طاقتها الحركية (9×10^4 J). إذا تحرّكت السيارة غربًا بالسرعة نفسها؛ فإنّ مقدار طاقتها الحركية يساوي:

أ . 9×10^4 J　　ب. -9×10^4 J　　جـ. 18×10^4 J　　د. 0 J

13. يركض محمد بسرعة مقدارها (3 m/s). إذا ضاعف مقدار سرعته مرّتين؛ فإنّ طاقته الحركية:

أ . تتضاعف مرّتين.　　ب . تتضاعف 4 مرّات.　　جـ . تقلّ بمقدار النصف.　　د . تقلّ بمقدار الربع.

14. يحمل عدنان صندوقًا وزنه (200 N) ويسير به أُفقيًّا بسرعة ثابتة إزاحة مقدارها (10 m). إنّ مقدار الشغل الذي يبذله عدنان على الصندوق خلال هذه الإزاحة يساوي:

أ . 0 J　　ب. 2 J　　جـ. 200 J　　د. 2000 J

15. إذا كان الشغل الكلّي المبذول على جسم يساوي صفرًا، فهذا يعني أنّ الجسم:

أ . ساكن أو متحرّك بسرعة ثابتة.　　ب . ساكن أو متحرّك بتسارع ثابت.

جـ. ساكن أو يتحرّك إلى أسفل بتسارع.　　د . ساكن أو يتحرّك إلى أعلى بتسارع.

2. أفسّر إذا كان يُبذل شغل أم لا في الحالات الآتية:

أ. تحمل هند حقيبتها، وتصعد بها إلى شقتها في الطابق الثاني.

ب. يرفع ياسر حقيبة كتبه رأسيًّا إلى أعلى عن سطح الأرض.

جـ. تسير سارة أُفقيًّا وهي تحمل حقيبة كتبها بين يديها.

د. تحاول ليلى دفع الأريكة، ولا تستطيع تحريكها من مكانها.

3. أوضّح هل يُمكن لطاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية أن تكون سالبة.

4. أُصدِر حُكمًا: في أثناء دراستي وزميلتي أسماء لمبرهنة (الشغل – الطاقة الحركية)، قالت: "إنّ الشغل الكلّي المبذول على جسم يساوي طاقته الحركية النهائية". أُناقش صحّة قول أسماء.

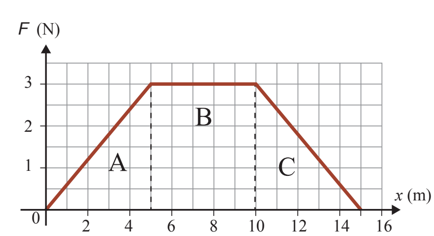
5. أُحلّل: قُذفت كرة رأسيًّا إلى أعلى من سطح الأرض. عند أيّ ارتفاع يكون مقدار سرعتها مساويًا نصف مقدار سرعتها الابتدائية؟ أُفسّر إجابتي.

6. أُفسّر البيانات: أثّرت قوّة محصّلة متغيّرة في جسم كتلته (10 kg)، فحرّكته من السكون إزاحة مقدارها (15 m)، كما هو موضّح في الشكل المجاور. أحسبُ مقدار ما يأتي:

أ. الشغل الذي بذلته القوّة المحصّلة خلال (5 m) الأولى من بداية حركة الجسم (الفترة A).

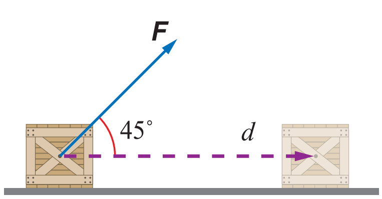
ب. سرعة الجسم في نهاية الإزاحة (10 m).

جـ. الشغل الذي بذلته القوّة المحصّلة خلال فترة الإزاحة كاملة (الشغل الكلّي).



منحنى (القوّة - الإزاحة) لقوّة محصلة متغيّرة تؤثّر في جسم.

7. **أستعملُ الأرقام: سيّارة كتلتها $(8\times10^2\ kg)$ تصعد تلًّا طوله $(5\times10^2\ m)$ بسرعة ثابتة مقدارها $(25\ m/s)$، وتؤثّر فيها قوى احتكاك $(5\times10^2\ N)$. إذا كانت زاوية ميلان التلّ على الأُفقي (15°)؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي:**
   أ. القوّة التي يؤثّر بها محرّك السيارة.
   ب. قدرة المحرّك اللازمة كي تصعد السيارة التلّ بهذه السرعة.
8. **أستعملُ الأرقام: يجرّ قارب سفينة بحبل يصنع زاوية (25°) أسفل الأُفقي بسرعة ثابتة إزاحة مقدارها $(2\times10^2\ m)$ بقوّة شدّ مقدارها $(2\times10^3\ N)$. إذا كان الحبل مهمل الكتلة وغير قابل للاستطالة؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي خلال هذه الإزاحة:**
   أ. الشغل الذي يبذله القارب على السفينة.
   ب. الشغل الذي تبذله القوى المعيقة المؤثّرة في السفينة.
9. **أحلّل: يُريد موسى رفع صندوق كتلته $(100\ kg)$ إلى ارتفاع $(1\ m)$ عن سطح الأرض. فاستخدم مستوى مائلًا طوله $(2\ m)$ يميل على الأُفقي بزاوية (30°)، ودفع الصندوق إلى أعلى المستوى المائل بقوّة موازية للمستوى بسرعة ثابتة. إذا كان مقدار قوّة الاحتكاك الحركي المؤثّرة في الصندوق $(100\ N)$؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي:**
   أ. الشغل الذي بذلته قوّة الاحتكاك على الصندوق.
   ب. الشغل الذي بذله موسى على الصندوق.
   جـ. الشغل الذي بذلته قوّة الجاذبية على الصندوق.
10. **أستعملُ الأرقام: تسحب ناديا صندوقًا كتلته $(50\ kg)$ على سطح أفقي خشن بحبل يميل على الأفقي بزاوية (45°) إزاحة مقدارها $(15\ m)$، كما هو موضّح في الشكل المجاور. إذا علمتُ أنّ مقدار قوّة الشدّ في الحبل $(200\ N)$، واكتسب الصندوق تسارعًا مقداره $(0.3\ m/s^2)$؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي:**
    أ. الشغل الذي بذلته ناديا على الصندوق.
    ب. التغيّر في الطاقة الحركية للصندوق.
    جـ. الشغل الذي بذلته قوّة الاحتكاك الحركي على الصندوق.
    د. الشغل الكلّي المبذول على الصندوق.



سحب صندوق على سطح أفقي خشن.

11. **أستنتج: مصعد كتلته مع حمولته $(2\times10^3\ kg)$، يُرفع بمحرّك كهربائي من سطح الأرض إلى ارتفاع $(60\ m)$ عن سطحها بسرعة ثابتة مقدارها $(1\ m/s)$. وتؤثّر فيه في أثناء حركته إلى أعلى قوّة احتكاك حركي ثابتة مقدارها $(2\times10^3\ N)$، أحسبُ مقدار ما يأتي:**
    أ. الشغل الذي يبذله المحرّك على المصعد.

ب .شغل قوّة الاحتكاك الحركي.

جـ .قدرة المحرّك.

د . التغيّر في الطاقة الميكانيكية للمصعد.

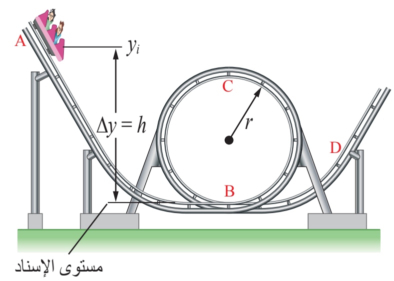
12. التفكير الناقد: يوضّح الشكل المجاور أُفعوانية كتلة عربتها $(2 \times 10^2\ kg)$ تتحرّك من السكون من تل ارتفاعه $(60\ m)$ (الموقع A) إلى أسفل التلّ على مسار مهمل الاحتكاك، وتمرّ في أثناء ذلك بمسار دائري رأسي عند الموقع (B) على شكل حلقة نصف قطرها $(20\ m)$ وتُكمل مسارها مارّة بالموقع (D). أستعينُ بالشكل المجاور لأحسب مقدار ما يأتي:

أ .سرعة عربة الأُفعوانية عند الموقع (B).

ب .سرعة عربة الأُفعوانية عند الموقع (C).

جـ .الشغل الكلّي المبذول على العربة في أثناء حركتها من الموقع (B) إلى الموقع (C).

د .الطاقة الميكانيكية لعربة الأُفعوانية عند الموقع (D).



لعبة الأُفعوانية.

13. ينزلق طفل كتلته $(40\ kg)$ بدءًا من السكون من قمة منزلق مائي أملس طوله $(1 \times 10^2\ m)$ وارتفاعه $(30\ m)$ عن سطح الأرض، أنظرُ إلى الشكل المجاور. أجيب عمّا يأتي:

أ . أحسبُ مقدار الطاقة الميكانيكية للطفل عند قمّة المنزلق.

ب. أحسبُ مقدار الطاقة الحركية الطفل عند نهاية المنزلق.

جـ. أحسبُ مقدار سرعة الطفل عند نهاية المنزلق.

د . أحسبُ مقدار شغل قوّة الجاذبية المبذول على الطفل، في أثناء انزلاقه من قمّة المنزلق إلى أسفله.

هـ. أُفسّر: هل يؤثّر طول المنزلق في سرعة الطفل عند نهايته؟ أُفسّر إجابتي.

منزلق مائي أملس.

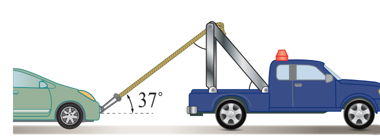
14. أستعملُ المتغيّرات: تسحب رافعة سيّارة كتلتها $(1.6 \times 10^3\ kg)$ من السكون على طريق أُفقي بقوّة شدّ مقدارها $(2 \times 10^3\ N)$ بحبل يميل على الأُفقي بزاوية (37°) إزاحة مقدارها $(5 \times 10^2\ m)$، إذ كانت سرعتها في نهاية الإزاحة $(25\ m/s)$، أنظرُ إلى الشكل المجاور. إذا علمتُ أنّ مقدار قوّة الاحتكاك الحركي المؤثّرة في السيارة $(6 \times 10^2\ N)$، والحبل مهمل الكتلة وغير قابل للاستطالة؛ فأحسبُ مقدار ما يأتي:

أ .شغل قوّة الاحتكاك الحركي.

ب. شغل قوّة الشدّ.

جـ.التغيّر في الطاقة الحركية للسيارة.

د . التغيّر في الطاقة الميكانيكية للسيارة.



رافعة تسحب سيارة على طريق أُفقي خشن.

الوحدة 2

المجال الكهربائي

Electric Field

أتأمّل الصورة

البرق والمجال الكهربائي

ربما يكون البرق الناتج عن العواصف الرعدية، من أكبر الشواهد على آثار المجال الكهربائي التي نُشاهدها في الطبيعة. تشتهر بحيرة ماراكايبو في فنزويلا بأنّها المنطقة الأكثر تعرّضًا للبرق والرعد على وجه الأرض؛ إذ تتعرّض تلك المنطقة سنويًا إلى (250) ومضة برق تقريبًا لكل كيلومتر مربّع. بالإضافة إلى رؤية البرق من سطح الأرض؛ فإنّ تأثير المجال الكهربائي الناتج عن السحب الرعدية يمتدّ عاليًا في الغلاف الجوي لدرجة أنّ الضوء الأزرق أو الأحمر الساطع الناتج عن البرق، يُمكن رؤيته أحيانًا من محطّة الفضاء الدولية، التي تدور على ارتفاع يزيد على (400 km) فوق سطح الأرض، كما تتولّد عن المجال الكهربائي القوي أشعّة جاما. ما مصدر الطاقة الضوئية والحرارية الهائلة الناتجة عن الصواعق؟

الفكرة العامّة:

تكون الأجسام متعادلة أو مشحونة كهربائيًّا، والجسم المشحون يحمل شحنة كهربائية فائضة موجبة أو سالبة، ويولّد مجالًا كهربائيًّا في المنطقة المحيطة به. يُمكنني التعبير عنه بعلاقة رياضية أو بالرسم؛ باستعمال خطوط المجال الكهربائي، ويؤثّر المجال الكهربائي بقوة في الشحنات الموجودة فيه.

الدرس الأول: قانون كولوم

Coulombs' Law

الفكرة الرئيسة: تنشأ بين الشحنات الكهربائية المتشابهة قوى تنافر وبين الشحنات المختلفة قوى تجاذب، وهي قوى تأثير عن بعد، وتتناسب القوّة الكهربائية طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنتين، وعكسيًّا مع مربّع المسافة بينهما.

الدرس الثاني: المجال الكهربائي للشحنات النقطية

Electric Field of Point Charges

الفكرة الرئيسة: المجال الكهربائي خاصّية للحيّز الذي يُحيط بشحنة كهربائية وتظهر فيه آثار القوّة الكهربائية. ويُعرّف المجال الكهربائي عند نقطة بأنّه القوّة الكهربائية لكلّ وحدة شحنة موجبة عند هذه النقطة.

الدرس الثالث: المجال الكهربائي لتوزيع متّصل من الشحنات الكهربائية

Electric Field of a Continuous Charge Distribution

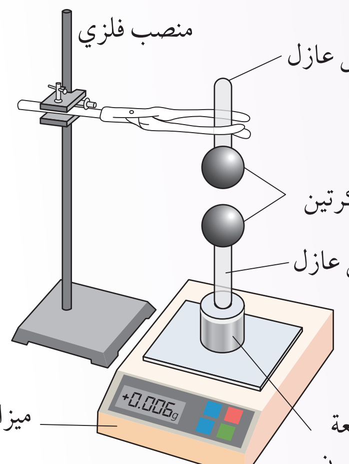
الفكرة الرئيسة: ينشأ مجال كهربائي منتظم بين صفيحتين موصلتين متقاربتين ومتوازيتين ومشحونتين بشحنتين متساويتين ومختلفتين، ويكون المجال ثابت المقدار والاتّجاه عند النقاط جميعها بين الصفيحتين، ويؤثّر في الشحنات الموجودة بينهما بقوة كهربائية ثابتة.

قياس قوّة التنافر الكهربائية بين شحنتين بطريقة عملية

الموادّ والأدوات: ميزان رقمي حسّاس، (3) كرات بولسترين (أقطارها: 5, 5, 10 cm تقريبًا)، ورق ألمنيوم، منصب فلزي، مقبض عازل عدد (2)، مولّد فان دي غراف.

إرشادات السلامة: تحذير جهد عالٍ - عدم لمس كرة مولّد فان دي غراف وهو يعمل.

خطوات العمل:



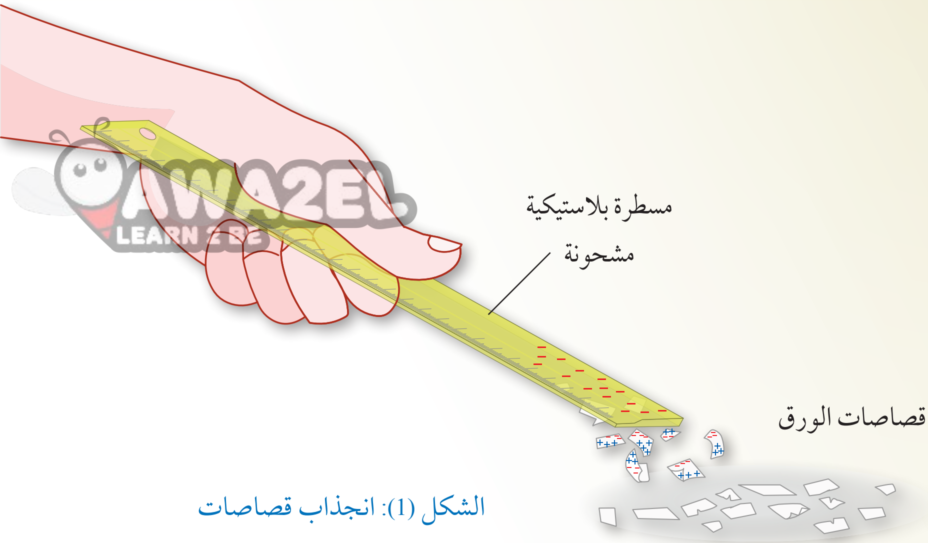
بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أغرزُ مقبضًا عازلًا في كلّ كرة بولسترين، ثمّ أُغلّف الكرة جيدًا بورق الألمنيوم (لماذا؟).
2. أُشغّل الميزان وأُثبّت إحدى الكرتين الصغيرتين ومقبضها العازل فوق الميزان باستعمال قطعة معجون، أو بأيّة طريقة مناسبة، وألاحظ قراءته بوحدة kg، ثم أضرِبُ القراءة في تسارع السقوط الحر؛ لحساب وزن الكرة والساق (W_1)، وأُدوّنه.
3. أُثبّت الكرة الصغيرة الثانية ومقبضها العازل في المنصب الفلزي، كما في الشكل.
4. أُشغّل مولّد فان دير غراف بمساعدة المعلم، وأشحن به كلًّا من الكرتين، بملامسة كرة المولّد للكرتين معًا في اللحظة نفسها.
5. أُقرّب المنصب الفلزي من الميزان الحسّاس لتُصبح كرة المنصب فوق كرة الميزان، من دون أن تتلامسا.
6. **أُلاحظ** قراءة الميزان بوحدة kg وأُدوّنها، وأضرِبُ القراءة في تسارع السقوط الحر لحساب الوزن (W_2)،علمًا بأنّ: القوّة الكهربائية = فرق الوزنين (W2 – W1).
7. أُغيّر إحدى الكرتين بالكرة الكبيرة ثمّ أُعيد شحنهما، وأُكرّر الخطوات السابقة جميعها.

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتجُ** أهمّية المقبض العازل الذي تُثبّت به كلّ كرة.
2. **أُفسّر** كيف حصلتُ على شحنتين متماثلتين على الكرتين الصغيرتين، وكيف حصلتُ على شحنتين غير متساويتين؛ عند استعمال كرة كبيرة وأُخرى صغيرة.
3. بناءً على قراءات الميزان، أُحدّد اتّجاه القوّة الكهربائية المؤثّرة في الشحنة السفلى في كل محاولة ومقدارها.
4. **أتوقّع:** كيف سيكون تأثير زيادة المسافة الرأسية بين الكرتين، أو إنقاصها؟
5. أُعلّل لماذا تُصنّف القوّة الكهربائية بأنّها قوة تأثير عن بُعد.

قانون كولوم
Coulombs' Law



الشكل (1): انجذاب قصاصات الورق إلى المسطرة.

الفكرة الرئيسة:

تنشأ بين الشحنات الكهربائية المتشابهة قوى تنافر، وبين الشحنات المختلفة قوى تجاذب؛ وهي قوى تأثير عن بعد، وتتناسب القوّة الكهربائية طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنتين، وعكسيًّا مع مربّع المسافة بينهما.

نتاجات التعلم:

- أصف العلاقة بين القوّة الكهربائية المتبادلة بين شحنتين نقطيتين، وكلّ من مقدار الشحنتين والمسافة بينهما.
- أحسبُ محصّلة القوى الكهربائية المؤثّرة في شحنة نقطية، الناتجة عن عدّة شحنات نقطية.

المفاهيم والمصطلحات:

شحنة كهربائية Electric Charge
كولوم Coulomb
شحن بالدلك Charging by Rubbing
شحن بالحثّ Charging by Induction
شحن بالتوصيل Charging by Conduction
قانون كولوم Coulomb's Law
سماحية كهربائية Electric Permittivity

الشحنات الكهربائية Electric Charges

قبل 2600 عام تقريبًا، اكتشف الفيلسوف والرياضي اليوناني طاليس أنّه إذا دلك قطعة من العنبر المطّاطي بقطعة من الفرو؛ فإنّ العنبر يُصبح لديه القدرة على جذب الريش. ويُمكنني ملاحظة التأثير نفسه عند دلك مسطرة بلاستيكية بقطعة قماش صوفي أو فرو، ثمّ تقريبها من قصاصات ورق صغيرة، كما في الشكل (1).

خلال عملية الدلك انتقلت بعض الإلكترونات من الفرو إلى المسطرة البلاستيكية؛ فأصبحت المسطرة مشحونة بشحنة كهربائية سالبة، وعند تقريب المسطرة من قصاصات الورق الملقاة على الطاولة -من دون ملامستها لها- تقفز هذه القصاصات من الطاولة إلى المسطرة. يحدث هذا لأنّ الشحنة السالبة على المسطرة تؤثّر في الورقة فيحدث استقطاب لذرّات الورقة وهو إعادة توزيع طفيف لشحنات تلك الذرّات تحت تأثير شحنة خارجية، وهذا يؤدّي إلى شحن سطح الورقة القريب من المسطرة بشحنة كهربائية موجبة، تتجاذب مع الشحنات السالبة على المسطرة البلاستيكية.

يُمكنني أيضًا ملاحظة التأثير الناتج عن تجاذب الشحنات الكهربائية على الأجسام، عندما ندلك بالونًا مطّاطيًّا منفوخًا بشعرنا أو بقطعة فرو،

الشكل (2): انجذاب تيّار الماء إلى بالون مطّاطي مشحون.

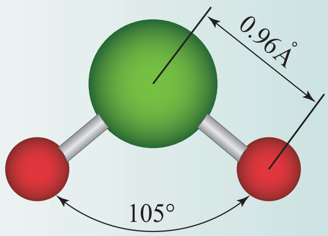
فيُشحن البالون ويُصبح سالب الشحنة عن طريق الدلك، ويمكنه جذب تيّار ماء صغير ينحدر من صنبور عند تقريبه منه، كما يُبيّن الشكل (2).

لماذا ينجذب تيّار الماء إلى البالون المشحون؟ مع أنّ جزيء الماء متعادل الشحنة، إلّا أنّ له قطبين كهربائيّين؛ أحدهما سالب تُمثّله ذرة الأكسجين، والآخر موجب تُمثّله ذرّتا الهيدروجين. وعند مرور تيّار الماء بالقرب من جسم مشحون بشحنة كهربائية سالبة مثل البالون؛ فإنّ جزيئات الماء تُعيد اصطفافها بحيث تتجه أقطابها الموجبة نحو البالون والسالبة بعيدًا عنه؛ لذا، تنجذب هذه الجزيئات إلى البالون.

طرائق الشحن الكهربائي Methods of Electric Charging

تنتج عملية الشحن الكهربائي للأجسام عن إحداث عدم توازن في توزيع الشحنات الكهربائية عليها. وتوجد (3) طرائق لإحداث عملية الشحن الكهربائي للأجسام، هي:

- **الشحن بالدلك Charging by rubbing**: عملية دلك جسم مع جسم آخر، فينتج عنها انتقال الإلكترونات من سطح أحد الجسمين إلى سطح الجسم الآخر؛ فيُصبح الجسم الفاقد للإلكترونات موجب الشحنة، ويُصبح الجسم المكتسب للإلكترونات سالب الشحنة. وهذه الطريقة مفيدة في شحن الأجسام العازلة مثل البلاستيك. وقد لاحظتُ هذه الطريقة عند شحن كلّ من المسطرة البلاستيكية والبالون المطّاطي في المثالين السابقين.



الربط مع الكيمياء

يتكوّن جزيء الماء (H_2O) من ذرّة أكسجين وذرّتَي هيدروجين ترتبط معًا بروابط تساهمية، ولا تكون هذه الذرّات الثلاث على استقامة واحدة، إذ توجد زاوية بين ذرّتَي الهيدروجين مقدارها (105°)، ما يُعطي الماء خصائص متميّزة عن المواد الأُخرى. إنّ زيادة الكثافة الإلكترونية حول ذرّة الأكسجين تجعلها قطبًا كهربائيًّا سالبًا، ونقصها حول ذرّتَي الهيدروجين تجعلهما قطبًا موجبًا لجزيء الماء.

- **الشحن بالتوصيل Charging by conduction**: عملية ملامسة جسم مشحون مع آخر متعادل؛ فيحدث انتقال للشحنات الكهربائية بين الجسمين. فإذا كان الجسم المشحون سالب الشحنة، انتقلت بعض الإلكترونات منه إلى الجسم المتعادل؛ فأصبح الجسمان سالبين. وإذا كان الجسم المشحون موجب الشحنة، انتقلت إليه بعض الإلكترونات من الجسم المتعادل؛ فأصبح الجسمان موجبين. وهذه الطريقة مفيدة في شحن الأجسام الموصلة؛ لسهولة انتقال الشحنات الكهربائية خلال الأجسام الموصلة، أو بين جسمين موصلين متلامسين، مثل ملامسة موصل كروي لمولّد فان دي غراف.

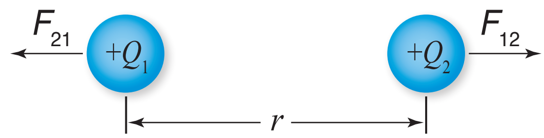
- **الشحن بالحثّ Charging by induction**: عملية شحن جسم موصل متعادل؛ عن طريق تقريب جسم مشحون (موصل أو عازل) منه من دون ملامسته، فيُعاد توزيع الشحنات على طرفَي الجسم الموصل المتعادل، بحيث تنحاز الشحنات السالبة إلى جهة محدّدة من الجسم لتُشكّل طرفًا سالبًا، تاركة الطرف الآخر موجب الشحنة، ويكون هذا التوزيع مؤقّتًا طالما بقي الجسم المؤثر قريبًا. وإذا ما فُرّغت شحنة الموصل البعيدة في الأرض؛ فإنّ شحنته تُصبح دائمة.

والشحنة الكهربائية كمّية فيزيائية، تُقاس وفق النظام الدولي للوحدات بوحدة كولوم Coulomb، ورمزه C علمًا بأنّ شحنة الإلكترون الواحد التي تساوي (-1.6×10^{-19} C)، هي أقلّ كمّية من الشحنة الكهربائية يُمكن أن توجد على انفراد، وتُسمّى **الشحنة الأساسية**. والشحنة الكهربائية توجد على شكل كمّات محدّدة من مضاعفات الشحنة الأساسية، وفقًا لمبدأ تكمية الشحنة، وتنشأ قوى التجاذب الكهربائي بين الشحنات الكهربائية المختلفة، في حين تنشأ قوى التنافر الكهربائي بين الشحنات الكهربائية المتشابهة.

✓ أتحقّق:

– أذكرُ طرائق شحن الأجسام المتعادلة بشحنة كهربائية.

– ما مقدار أقلّ كمّية من الشحنة الكهربائية يُمكن أن توجد على انفراد؟ وما الجسيمات التي تحملها؟



الشكل (3): القوّة الكهربائية الناشئة بين شحنتين كهربائيتين نقطيتين.

قانون كولوم Coulomb's Law

نشر عالم الفيزياء الفرنسي شارل كولوم سنة 1785م نتائج تجاربه على القوى الناشئة بين الشحنات الكهربائية، إذ وضّح أنّ القوّة الكهربائية (F) الناشئة بين شحنتين كهربائيتين (Q_1) و (Q_2) تعتمد على مقدار كلّ من الشحنتين، كما أنّها تتغيّر بتغيّر المسافة الفاصلة بين مركزيهما (r)، وفقًا لقانون التربيع العكسي، كما في الشكل (3).

ينصّ **قانون كولوم Coulomb's Law** على أنّ القوّة الناشئة بين شحنتين نقطيتين تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنتين، وعكسيًّا مع مربّع المسافة بينهما. ويُمثّل رياضيًّا بالعلاقة الآتية:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

يُمثّل الرمز ε_0 السماحية الكهربائية Electric Permittivity للفراغ، ومقداره يساوي: $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$، وتُعرّف **السماحية الكهربائية** للوسط بأنّها: خصيصة للمادّة العازلة للكهرباء تعبّر عن قابلية ذراتها للاستقطاب عند تعرّضها لمجال كهربائي. وبزيادة سماحية المادّة تزداد قدرتها على الاحتفاظ بكمّية أكبر من الشحنة الكهربائية.

يُمكنني التعبير عن الثوابت جميعها في العلاقة السابقة بثابت واحد أرمزُ له بالرمز k، حيث:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

وقيمة الثابت k في الفراغ تساوي $9 \times 10^9\ Nm^2/C^2$ ولا يختلف هذا المقدار عند وجود الشحنات في الهواء. ويُمكنني إعادة كتابة العلاقة الرياضية لقانون كولوم بدلالة الثابت k على الصورة الآتية:

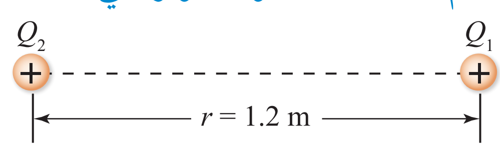
أفكّر: بناءً على العلاقة الرياضية لقانون كولوم، أُبيّن ما يحدث للقوة الكهربائية الناشئة بين شحنتين تفصلهما مسافة في الهواء؛ عندما أضع بينهما مادّة من المطاط سماحيّتها الكهربائية تساوي 3 أضعاف سماحيّة الهواء.

$$F = k\frac{Q_1Q_2}{r^2}$$

ويقتصر تطبيق قانون كولوم عندما تكون الشحنات الكهربائية نقطية، **والشحنة النقطية Point charge** هي شحنة كهربائية موجودة في نقطة. ويُمكنني التعامل مع الشحنات التي تحملها أجسام أبعادها صغيرة ومهملة بالنسبة إلى المسافات بين الأجسام نفسها على أنّها شحنات نقطية. ومثال ذلك الإلكترون والبروتون، والأيونات الموجبة والسالبة، كما أنّ الجسيمات الكروية المشحونة التي تتوزّع الشحنات عليها بشكل منتظم تُعدّ شحنات نقطية بالنسبة إلى المناطق الواقعة خارج هذه الجسيمات الكروية.

المثال 1

شحنتان نقطيتان موجبتان تقعان على محور (x) في الهواء، بحيث تفصلهما مسافة (1.2 m) كما في الشكل (4). مقدار الأولى (4×10^{-6} C) ومقدار الثانية (6×10^{-6} C). أجد مقدار القوّة المؤثّرة في الشحنة الأولى وأُحدّد اتّجاهها، ثمّ أجد مقدار القوّة المؤثّرة في الشحنة الثانية وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (4): شحنتان نقطيتان في الهواء.

المعطيات: $Q_1 = 4 \times 10^{-6}$ C, $Q_2 = 6 \times 10^{-6}$ C, $r = 1.2$ m

المطلوب: $F_{12} = ?$, $F_{21} = ?$

الحلّ:

أوّلًا: القوّة التي تؤثّر بها الشحنة (Q_2) في الشحنة (Q_1)

$$F_{21} = k\frac{Q_1Q_2}{r^2}$$

$$F_{21} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}{(1.2)^2}$$

$$F_{21} = 1.5 \times 10^{-1}\ \text{N}$$

بما أنّ الشحنتين متشابهتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تنافرًا، أي إنّ القوّة التي تتأثّر بها الشحنة الأولى تكون نحو اليمين؛ باتّجاه محور (x) الموجب.

ثانيًا: القوّة التي تؤثّر بها الشحنة (Q_1) في الشحنة (Q_2)

$$F_{12} = k\,\frac{Q_1Q_2}{r^2}$$

$$F_{12} = 9 \times 10^{9} \times \frac{4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}{(1.2)^2}$$

$$F_{12} = 1.5 \times 1^{-1}\ \text{N}$$

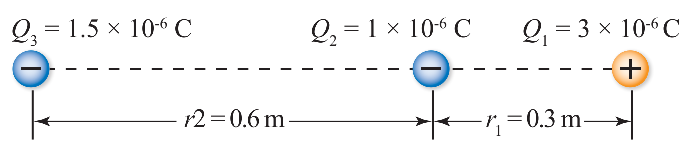
وبما أنّ الشحنتين متشابهتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تنافرًا، أي إنّ القوّة التي تتأثّر بها الشحنة الثانية تكون نحو اليسار؛ باتّجاه محور (x) السالب.

أستنتجُ أنّ القوّتين المؤثّرتين في كلا الشحنتين هما قوّتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتّجاهًا، فهما قوّتا فعل وردّ فعل حسب القانون الثالث لنيوتن، ويُمكنني وصفهما بالقوّة المتبادلة بين الشحنتين.

$$F_{21} - = F_{12}$$

المثال 2

(3) شحنات تقع جميعها على محور (x) في الهواء، يُبيّن الشكل (5) مقاديرها وأنواعها والمسافات الفاصلة بينها. أجد مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في الشحنة (Q_2)، وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (5): القوّة المحصّلة المؤثّرة في شحنة.

المعطيات: $Q_1 = 3 \times 10^{-6}\,\text{C},\ Q_2 = 1 \times 10^{-6}\,\text{C},\ Q_3 = 1.5 \times 10^{-6}\,\text{C},$
$r_1 = 0.3\ \text{m},\ r_2 = 0.6\ \text{m}$

المطلوب: $F_2 = ?$

الحلّ:

سأستعملُ الرمز F_{12} لتمثيل القوّة التي تؤثّر بها الشحنة Q_1 في الشحنة Q_2، وأستعملُ الرمز F_{32} لتمثيل القوّة التي تؤثّر بها الشحنة Q_3، في الشحنة Q_2 .

$$F_{12} = k\,\frac{Q_1Q_2}{r_1^{\,2}}$$

$$F_{12} = 9 \times 10^{9} \times \frac{3 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^{-6}}{(0.3)^2}$$

$$F_{12} = 3 \times 10^{-1}\ \text{N}$$

أُلاحظ أنّ الإشارة السالبة للشحنة الكهربائية لا تدخل في حساب مقدار القوّة الكهربائية، لكنّها مهمّة في تحديد اتّجاه القوّة الكهربائية المؤثّرة في كلّ شحنة. وبما أنّ الشحنتين Q_1, Q_2 مختلفتان في النوع؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تجاذبًا، أي إنّ القوّة F_{12} تكون باتّجاه محور (x) الموجب.

$$F_{32} = k \frac{Q_3 Q_2}{r_2^{\,2}}$$

$$F_{32} = 9 \times 10^9 \times \frac{1.5 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^{-6}}{(0.6)^2}$$

$$F_{32} = 0.375 \times 10^{-1} \text{ N}$$

وبما أنّ الشحنتين Q_3, Q_2 متشابهتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تنافرًا، أي إنّ القوّة F_{32} تكون باتّجاه محور (x) الموجب.

$$F_2 = F_{12} + F_{32}$$

$$F_2 = 0.375 \times 10^{-1} + 3 \times 10^{-1} = 3.375 \times 10^{-1} \text{ N}$$

وتكون القوّة المحصّلة التي تؤثّر في الشحنة الثانية نحو اليمين؛ أي باتّجاه محور (x) الموجب.

تمرين

في مثال (2) السابق، أجد مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في الشحنة (Q_1) وأُحدّد اتّجاهها.

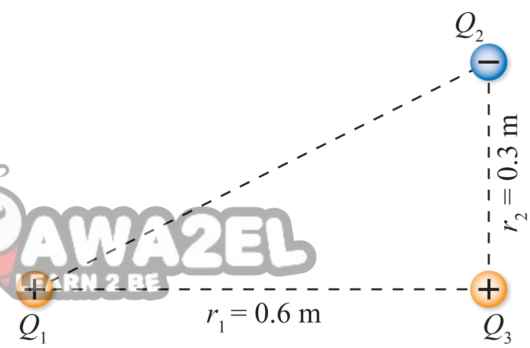
بما أنّ الشحنات التي نتعامل معها في التطبيقات الحسابية على قانون كولوم صغيرة جدًّا؛ فإنّه من الضروري استعمال البادئات المصاحبة لوحدات القياس، بحيث أُعبّر عن الشحنات الصغيرة جدًّا باستعمال بعض هذه البادئات مع وحدة الكولوم، كما يُبيّن الجدول الآتي:

الجدول (1): استعمال بادئات الوحدات في التعبير عن مقدار الشحنة.

الشحنة باستعمال البادئة	الرمز	البادئة	الشحنة بوحدة كولوم
2 mC	m	ملّي	2×10^{-3} C
5 μC	μ	ميكرو	5×10^{-6} C
2 nC	n	نانو	2×10^{-9} C
4 pC	p	بيكو	4×10^{-12} C
4 fC	f	فيمتو	4×10^{-15} C

المثال 3

(3) شحنات موضوعة في الهواء، بحيث تُشكّل معًا مثلّثًا قائم الزاوية، كما في الشكل (6). إذا علمتُ بأنّ الشحنة الأولى $(+17.1\ \mu C)$ والشحنة الثانية $(-6\ \mu C)$ والشحنة الثالثة $(+700\ nC)$؛ فأحسبُ مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في الشحنة الثالثة، وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (6): ثلاث شحنات على رؤوس مثلث.

المعطيات:

$Q_1 = +17.1 \times 10^{-6}$ C, $Q_2 = -6 \times 10^{-6}$ C, $Q_3 = +700 \times 10^{-9}$ C, $r_1 = 0.6$ m, $r_2 = 0.3$ m

المطلوب:

$F_3 = ?$

الحلّ:

$$F_{13} = k\frac{Q_1Q_3}{r_1^{\,2}}$$

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{17.1 \times 10^{-6} \times 700 \times 10^{-9}}{(0.6)^2}$$

$$F_{13} = 0.3 \text{ N}$$

وبما أنّ الشحنتين Q_3, Q_1 متشابهتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تنافرًا، أي إنّ F_{13} تؤثّر بها الشحنة الأولى في الثالثة تكون نحو اليمين؛ باتّجاه محور (x) الموجب.

$$F_{23} = \text{k}\frac{Q_2Q_3}{r_2^{\,2}}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6} \times 700 \times 10^{-9}}{(0.3)^2}$$

$$F_{23} = 0.42 \text{ N}$$

وبما أنّ الشحنتين Q_3, Q_2 مختلفتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تجاذبًا، أي إنّ F_{23} تؤثّر بها الشحنة الثانية في الثالثة تكون نحو الأعلى؛ أي باتّجاه محور (y) الموجب.

$$F_3 = \sqrt{(F_{13})^2 + (F_{23})^2}$$

$$F_3 = \sqrt{(0.3)^2 + (0.42)^2}$$

$$F_3 = \sqrt{0.09 + 0.18} = 0.52 \text{ N}$$

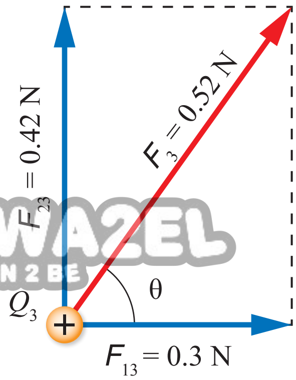
أُحدّد اتّجاه القوّة المحصّلة التي تؤثّر في الشحنة الثالثة؛ بمعرفة الزاوية المرجعية θ بين القوّة المحصّلة ومحور (x) الموجب. كما في الشكل (7).

$$\tan\theta = \frac{0.42}{0.3} = 1.4$$

$$\theta = \tan^{-1}(1.4) = 54.5^\circ$$

$$F_3 = 0.52\ \text{N}, 54.5^\circ$$

أُلاحظ أنّ الزاوية ($\theta > 45^\circ$)، أي إنّ المحصّلة أقرب إلى القوّة الأكبر.



الشكل (7): محصلة قوتين متعامدتين.

تمرين

وُضِعت في الهواء (3) شحنات موجبة ومتساوية، مقدار كلّ منها ($+1\mu C$) على رؤوس مثلّث متساوي الأضلاع طول ضلعه (30 cm). أجد مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في إحدى هذه الشحنات.

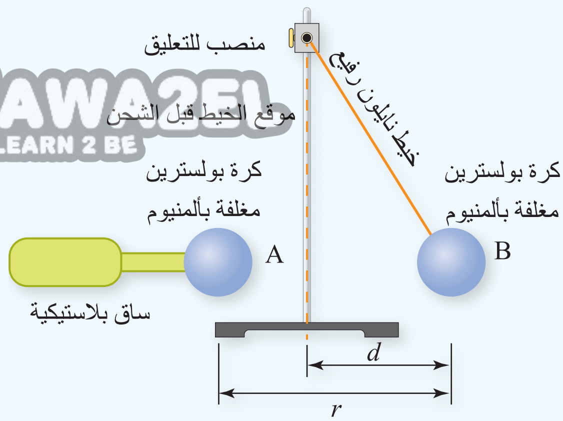
الربط مع الحياة

يحدث احتكاك بين قطع الملابس عند دورانها بسرعة عالية داخل مجفّف الغسيل؛ فتحدث عملية شحن بالدلك. وتُشحن بعض الملابس بشحنة كهربائية موجبة، وبعضها الآخر بشحنة كهربائية سالبة. تُسبّب قوى التجاذب الكهربائي التصاق الملابس معًا، وقد يصدر عنها بعض الشرر المتقطّع عند محاولة تفكيكها.

للتخلّص من هذه المشكلة؛ تُباع في الأسواق أوراق خاصّة توضع مع الملابس عند تجفيفها، تحتوي على مركّب كيميائي موجب الشحنة، تساعد على التخلّص من الشحنات السالبة التي تظهر على بعض الملابس؛ فتمنع التصاقها. ويُمكن حلّ هذه المشكلة بصناعة كرات صغيرة من ورق الألمنيوم ووضعها مع الملابس عند تجفيفها، تمنع عملية شحن الملابس.

التجربة ١

استقصاء العلاقة بين القوّة الكهربائية والبعد بين الشحنتين في قانون كولوم



الموادّ والأدوات: كرتان من البولسترين، ورق ألمنيوم، ساق بلاستيكية، خيط نايلون رفيع طوله (50cm)، مولّد فان دي غراف، منصب فلزي، طبق كرتون مدرّج بوحدة (cm).

إرشادات السلامة: تحذير جهد عالٍ - عدم لمس كرة مولّد فان دي غراف وهو يعمل.

خطوات العمل:

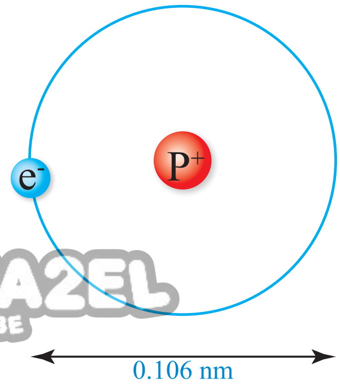
بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُغلّف كرتّي البولسترين بورق الألمنيوم، ثم أقيس كتلة الكرة (B) وأُعلّقها على المنصب باستعمال خيط النايلون، وأُثبّت الثانية في الساق البلاستيكية كما في الشكل، وأُثبّت طبق الكرتون المدرّج خلف الكرتين بشكل رأسي.
2. بمساعدة المعلم، أُشغّل مولّد فان دي غراف وأستعمله لشحن الكرتين بشحنتين متشابهتين.
3. أُقرّب الكرة (A) المتّصلة بالساق بشكل تدريجي من الكرة المعلّقة (B) وأُلاحظ ما يحدث للكرة (B).
4. أُحافظ على إبقاء مركز كلّ كرة على الخط الأفقي الواصل بينهما.
5. **أقيس** كلًّا من طول الخيط (L) والإزاحة الأُفقية التي حدثت للكرة المعلّقة (d) والمسافة الفاصلة بين الكرتين (r)، وأُدوّن النتائج في جدول خاصّ.
6. أُحرّك الكرة (A) والساق الأُفقية باتّجاه الكرة (B) المعلّقة، ثمّ أُكرّر القياسات في الخطوة السابقة.
7. **أُلاحظ** التغيّر في كلّ من (r, d)، وأُدوّن ملاحظاتي.
8. **أحسبُ** مقدار القوّة الكهربائية بمعرفة وزن الكرة وكلّ من القياسات السابقة؛ باستعمال قوانين المتّجهات والاتّزان السكوني.
9. أُكرّر التجربة (3) مرّات أُخرى مع تغيير موقع الكرة (A) في كلّ مرة، ثمّ أُدوّن القياسات.

التحليل والاستنتاج:

1. **أرسمُ** مخطّط الجسم الحر للكرة (B).
2. **أحسبُ:** بمعرفة ميل الزاوية (θ) ووزن الكرة، واعتماد العلاقة $\sin\theta = \tan\theta$ (لأنّ الزاوية صغيرة القياس)؛ أحسبُ القوّة الكهربائية.
3. **أرسمُ** العلاقة البيانية بين القوّة الكهربائية والمسافة الفاصلة بين الكرتين (r).

المثال 4



الشكل (8): ذرّة الهيدروجين.

تتكوّن ذرّات الموادّ بصورة عامّة من نوى موجبة الشحنة وإلكترونات سالبة الشحنة تدور حولها، وترتبط الإلكترونات مع النواة بقوّة تجاذب كهربائي، وتتكوّن ذرّة الهيدروجين من إلكترون واحد سالب الشحنة يدور حول نواة تتكوّن من بروتون واحد موجب الشحنة، كما في الشكل (8).

تنشأ بين الإلكترون والبروتون قوّة تجاذب كهربائية، تُشكّل قوّة مركزية تجعل الإلكترون يدور بشكل مستمر حول النواة. إذا علمتُ أنّ شحنة البروتون 1.6×10^{-19} C وشحنة الإلكترون -1.6×10^{-19} C، وقطر ذرّة الهيدروجين 0.106 nm؛ فأحسبُ مقدار القوّة المركزية المؤثّرة في الإلكترون.

المعطيات:

$$Q_e = -1.6 \times 10^{-19}\ \text{C},\quad Q_p = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C},$$

$$r = 1/2 \times 0.106 \times 10^{-9} = 0.053 \times 10^{-9}\ \text{m}$$

المطلوب:

$$F = ?$$

الحلّ:

القوّة المركزية المؤثّرة في الإلكترون تعود في أصلها إلى القوّة الكهربائية:

$$F = k\,\frac{Q_p Q_e}{r^2}$$

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1.6 \times 10^{-19}}{(0.053 \times 10^{-9})^2}$$

$$F = 8.19 \times 10^{-8}\ \text{N}$$

لاحظتُ في التجربة السابقة وفي النشاط التمهيدي أنّ القوّة الكهربائية لا تقتصر على الشحنات النقطية والجُسيمات الذرّية المشحونة، إذ إنّ الأجسام الكبيرة مثل كرة البولسترين المغلّفة برقائق فلزّية موصلة، تتبادل التأثير مع الأجسام الأُخرى المشحونة بالقوى كهربائية. وكذلك في الطبيعة، تؤثّر الغيوم بقوى كهربائية هائلة وتولّد مجالات كهربائية، سأطّلع عليها في الدرس اللاحق.

الموصلات المشحونة Charged Conductors

لاحظتُ في ما سبق، أنّ الشحنات توجد في الطبيعة على أجسام مختلفة، فقد تكون صغيرة جدًّا مثل الإلكترون، وقد تكون كرة من البولسترين مغلّفة بورق الألمنيوم. إلّا أنّه افترُض مفهوم الشحنة النقطية لتسهيل التعامل مع الأجسام المشحونة عن طريق قانون كولوم. كيف سأتعامل حسابيًّا مع أجسام كبيرة مشحونة بشحنة كهربائية، لا تُعدّ شحنات نقطية؟

سنقتصر دراستنا هنا على جسم كروي يحمل شحنة كهربائية موزّعة عليه بانتظام، مثل كرة فلزّية نصف قطرها (R) ومركزها (O) مشحونة بشحنة كهربائية مقدارها (Q_1)، تتوزّع الشحنة بسبب تنافرها على السطح الخارجي للكرة الفلزّية، كما في الشكل (9). ستؤثّر هذه الكرة بقوى كهربائية في الشحنات المجاورة لها كما لو كانت شحنة هذه الكرة (Q_1) مكثفة وموجودة جميعها في نقطة واحدة هي مركز هذه الكرة (O).

شحنة Q_1 موزعة بانتظام

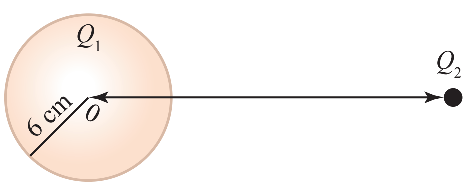
الشكل (9): كرة موصلة مشحونة.

أتحقّق:

ما الطريقة التي يُمكنني بها حساب القوّة الكهربائية التي تنشأ بين كرتين من النحاس مشحونتين بشحنتين كهربائيتين؟

المثال 5

كرة نحاسية مفرّغة نصف قطرها 6 cm شُحنت بشحنة مقدارها $4\ \mu C$ وُضِعت بالقرب منها وعلى بعد 36 cm من مركز الكرة شحنة نقطية 5 pC، كما في الشكل (10). أجد مقدار القوّة التي تؤثّر بها الكرة في الشحنة النقطية.



الشكل (10): القوّة بين كرة نحاسية وشحنة نقطية.

المعطيات: $Q_1 = 4\ \mu C = 4 \times 10^{-6}\ C,\quad Q_2 = 5\ pC = 5 \times 10^{-12}\ C,\quad r = 36\ cm = 36 \times 10^{-2}\ m$

المطلوب: $F = ?$

الحلّ:

$$F_{12} = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$F_{12} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{-12}}{(36)^2 \times 10^{-4}}$$

$$F_{12} = 1.39 \times 10^{-6}\ N$$

الربط مع العلوم الحياتية

أُشاهد النحلة تطير من زهرة إلى أُخرى؛ فرائحة الأزهار وألوانها تجذب النحل إليها كي تجمع الرحيق وحبوب اللقاح. توصّل باحثون من جامعة بريستول البريطانية إلى أنّ الأزهار تحمل شحنات كهربائية سالبة، في حين تكتسب النحلة في أثناء طيرانها بسبب حركة جناحيها شحنات كهربائية موجبة، وأنّ النحلة يُمكنها استشعار الشحنة السالبة على الأزهار، كما يُمكنها معرفة إن كان نحل آخر قد حطّ على هذه الزهرة أم لا، فزيارة كلّ نحلة للزهرة تعمل على معادلة جزء من الشحنة السالبة عليها. كما أنّ اختلاف الشحنة بين الزهرة والنحلة يجعل حبوب اللقاح تنجذب إلى جسم النحلة، فتحملها معها.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أذكرُ نص قانون كولوم، وأُمثّله بعلاقة رياضية.
2. أُوضّح الطرائق الثلاث التي تُشحن بها الأجسام المتعادلة بشحنة كهربائية.
3. **أُفسّر** سبب انجذاب قصاصات الورق من مسطرة بلاستيكية دُلكت بشعر الرأس، ثم تنافر القصاصات مع المسطرة عند تلامسهما.
4. **أستعملُ المتغيّرات:** شحنتان كهربائيتان موجبتان، مقدار كل منهما ($2\ \mu C$) تفصلهما مسافة (0.5 m). أحسبُ مقدار القوّة الكهربائية التي تؤثّر بها إحدى الشحنتين في الأُخرى.
5. **أُحلّل بيانيًّا:** أُجريت تجربة عملية لدراسة العلاقة بين قوّة التجاذب الكهربائية بين شحنتين نقطيتين والمسافة الفاصلة بينهما، ونُظّمت النتائج في الجدول الآتي. أُمثّل البيانات بالرسم البياني، ممثّلًا المسافة على محور (x) والقوّة على محور (y)، ثمّ أُمثّل العلاقة بين القوّة والمقدار ($\frac{1}{r^2}$)، ثمّ أستنتجُ ما يعنيه ميل هذه العلاقة. هل تخضع هذه النتائج لقانون كولوم بدقّة؟ أُعلّل إجابتي.

المسافة بين الشحنتين (m)	0.5	1.0	1.5	2.0
القوّة الكهربائية (N)	30×10^{-3}	7×10^{-3}	3×10^{-3}	2×10^{-3}

6. **التفكير الناقد:** عند وجود شحنتين متساويتين ومتماثلتين في الهواء تفصلهما مسافة (1 m)، أُحدّد نقطة في المنطقة التي تقع فيها الشحنتان، بحيث إذا وُضِعت فيها شحنة ثالثة تكون القوّة الكهربائية المحصّلة المؤثّرة فيها صفرًا.

◀ **الفكرة الرئيسة:**

المجال الكهربائي خاصّية للحيّز الذي يُحيط بشحنة كهربائية وتظهر فيه آثار القوّة الكهربائية. ويُعرّف المجال الكهربائي عند نقطة بأنّه القوّة الكهربائية لكلّ وحدة شحنة موجبة عند هذه النقطة.

◀ **نتاجات التعلّم:**

- أُعرّف المجال الكهربائي عند نقطة.
- أصف خطوط المجال الكهربائي المحيط بنظام من الشحنات الكهربائية؛ لتوزيعات مختلفة من الشحنات النقطية.
- أحسبُ المجال الكهربائي عند نقطة في المجال الكهربائي لشحنة نقطية.
- أحسبُ محصّلة المجال الكهربائي عند نقطة بتأثير عدّة شحنات نقطية.
- أصف التدفّق الكهربائي الذي يخترق سطحًا بمعادلة.

◀ **المفاهيم والمصطلحات:**

شحنة اختبار Test Charge
المجال الكهربائي Electric field
المجال الكهربائي عند نقطة Electric field at a point
خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines
كثافة خطوط المجال الكهربائي Density of Electric Field Lines
التدفّق الكهربائي Electric Flux

المجال الكهربائي Electric Field

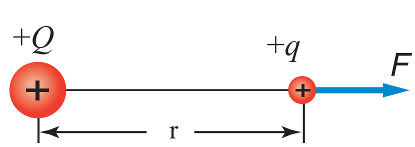
بالعودة إلى مثال البالون وتيّار الماء النازل من الصنبور في الدرس السابق، لاحظتُ أنّ القوّة الكهربائية التي أثّر بها البالون في التيّار المائي هي قوّة تأثير عن بُعد؛ أي إنّ الأثر انتقل من البالون إلى الماء من دون حصول تلامس بينهما، ومثل هذه القوى تكون صادرة عن مجالات مختلفة مثل المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي ومجال الجاذبية الأرضية، الذي يجعل لكلّ جسم وزنًا. أي إنّ البالون المشحون يوجد حوله **مجال كهربائي Electric field** وهو خاصّية للحيّز المحيط بالجسم المشحون، ويظهر في هذا الحيّز تأثير المجال على شكل قوى كهربائية تؤثّر في الأجسام المشحونة الأُخرى. والمجال الكهربائي من الكمّيات الفيزيائية المتّجهة، نُعبّر عنه بالمقدار والاتّجاه.

المجال الكهربائي لشحنة نقطية Electric Field of a Point Charge

لمعرفة المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية موجبة $(+Q)$ عند نقطة قريبة منها، نضع شحنة اختبار صغيرة $(+q)$ في هذه النقطة، كما في الشكل (11). وشحنة الاختبار **Test charge** هي شحنة كهربائية موجبة صغيرة المقدار تُستعمل للكشف عن المجال الكهربائي، ويكون مقدارها صغير جدًّا لدرجة أنّ تأثيرها في المجال الكهربائي المحيط بها يكون مهملًا. أُلاحظ أنّ شحنة الاختبار ستتأثّر بقوّة كهربائية $(\boldsymbol{F})$، يُمثّل اتّجاهها اتّجاه المجال الكهربائي عند هذه النقطة. أمّا مقدار القوّة فإنّه يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\boldsymbol{F} = k\,\frac{Qq}{r^2}$$

حيث (r) المسافة الفاصلة بين مركزي الشحنتين.



◀ الشكل (11): القوّة المؤثّرة في شحنة الاختبار.

يُعرّف **المجال الكهربائي E** الذي تولّده الشحنة $(+Q)$ عند نقطة، بأنّه القوّة الكهربائية التي تؤثّر في وحدة الشحنة الموجبة الموضوعة في تلك النقطة، علمًا بأنّ وحدة الشحنات الموجبة ليست شحنة اختبار؛ فهي تساوي (كولوم) واحدًا، وتمتلك مجالًا كهربائيًّا قويًّا.

ونُعبّر عن تعريف المجال الكهربائي بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$E = \frac{F}{q}$$

أمّا شدّة المجال، فهي كمّية تُعبّر عن مقدار المجال عند نقطة، وتتناسب عكسيًّا مع مربّع بُعد هذه النقطة عن الشحنة. وبتعويض قيمة القوّة من قانون كولوم في العلاقة السابقة، أحصل على العلاقة الآتية:

$$E = k\frac{Qq}{qr^2}$$

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

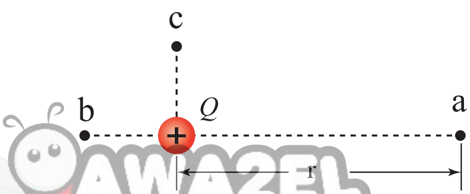
أُلاحظ من العلاقة الأخيرة أنّه يُمكنني حساب المجال عند نقطة من دون الحاجة لوضع شحنة اختبار عندها. وتُستعمل وحدة (نيوتن/ كولوم) (N/C) لقياس المجال الكهربائي حسب النظام الدولي للوحدات.

أفكّر: ما وجه الشبه بين كلّ من القوى الآتية: القوّة المتبادلة بين مغناطيسين، والقوّة المتبادلة بين شحنتين كهربائيتين، والقوّة المتبادلة بين الأرض والقمر؟

✓ **أتحقّق:** أُوضّح المقصود بكل من: المجال الكهربائي، المجال الكهربائي عند نقطة.

المثال 6

شحنة كهربائية نقطية موجبة مقدارها $(5\ \mu C)$.أُحدّد اتّجاه المجال عند النقاط (c,b,a)، ثمّ أجد مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (a) التي تبعد عن الشحنة مسافة 36 cm والمبيّنة في الشكل (12).



الشكل (12): المجال عند نقطة.

المعطيات:

$Q = 5\ \mu C = 5 \times 10^{-6}\ C,\ \ r = 36\ cm = 36 \times 10^{-2}\ m$

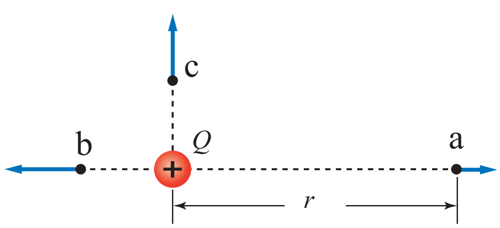
المطلوب:

اتّجاه المجال عند (c,b,a)

$E_a = ?$

الحلّ:

لتحديد اتّجاه المجال عند كل نقطة من (c,b,a) أضع عندها شحنة اختبار موجبة وأُلاحظ كيف تتحرّك، فأجد أنّ اتّجاه المجال عند (a) يكون باتّجاه محور $(+x)$، وعند النقطة (b) يكون باتّجاه محور $(-x)$، وعند النقطة (c)، يكون باتّجاه محور $(+y)$، كما في الشكل (13).



الشكل (13): اتّجاه المجال حول شحنة.

ولمعرفة مقدار المجال؛ أستعملُ العلاقة الآتية:

$$E = k\ \frac{Q}{r^2}$$

$$E = 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 10^{-6}}{(36)^2 \times 10^{-4}}$$

$$E_a = 3.47 \times 10^5\ N/C$$

تمرين

في المثال السابق، أجد مقدار القوّة الكهربائية التي يؤثّر بها المجال الكهربائي في شحنة اختبار موجبة صغيرة مقدارها (3n C)، موضوعة في النقطة (a)، ثمّ أُحدّد اتّجاه هذه القوّة.

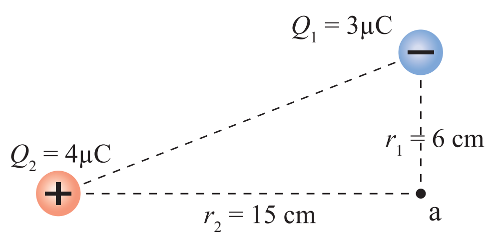
المجال الكهربائي لعدّة شحنات نقطية

Electric Field of Several Point Charges

عند وضع عدد من الشحنات الكهربائية المتشابهة أو المختلفة بشكل معيّن، تنشأ حول كلّ منها منطقة مجال كهربائي، بحيث يكون المجال الكهربائي المحصّل عند أيّ نقطة في هذه المنطقة مساويًا لمحصّلة المجالات الناتجة عن كل شحنة إذا كانت منفردة. وتُستعمل في ذلك طريقة جمع المتّجهات.

المثال 7

يوضّح الشكل (14) شحنتين نقطيتين في الهواء، الأولى سالبة والثانية موجبة. مستعينًا بالشكل؛ أجد المجال الكهربائي المحصّل عند النقطة (a) وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (14): نقطة قرب شحنتين.

المعطيات:

$$Q_1 = 3\ \mu C = 3 \times 10^{-6}\ C,\ \ Q_2 = 4\ \mu C = 4 \times 10^{-6}\ C$$

$$r_1 = 6\ cm = 6 \times 10^{-2}\ m\ ,$$

$$r_2 = 15\ cm = 15 \times 10^{-2}\ m$$

المطلوب:

$$E = ?$$

الحلّ:

مقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_1) عند النقطة (a):

$$E_1 = k\frac{Q_1}{r_1^{\ 2}} = 9\ \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-6}}{6^2 \times 10^{-4}}$$

$$E_1 = 7.5 \times 10^6\ N/C$$

تُستعمل إشارة الشحنة في تحديد اتّجاه المجال وليس حساب مقداره؛ لذا، فإنّ المجال الناتج عن الشحنة الأولى يكون باتّجاه محور ($+y$).

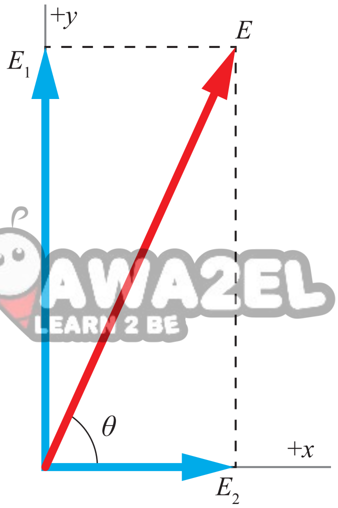
ومقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_2) عند النقطة (a):

$$E_2 = k\frac{Q_2}{r_2{}^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{15^5 \times 10^{-4}}$$

$$E_2 = 1.6 \times 10^6\ N/C$$

اتّجاه المجال الناتج عن الشحنة الثانية يكون باتّجاه محور ($+x$).

أُلاحظ أنّ الزاوية بين متّجهي المجالين (90°)، كما في الشكل (15)، وفي هذه الحالة يُحسب المجال المحصل باستعمال العلاقة:



الشكل (15): اتّجاه المجال المحصّل.

$$E = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2}$$

$$E = \sqrt{(7.5 \times 10^6)^2 + (1.6 \times 10^6)^2)} = \sqrt{56.25 \times 10^{12} + 2.56 \times 10^{12}}$$

$$E = 7.67 \times 10^6\ N/C$$

ويُحدّد اتّجاه المجال المحصّل بالزاوية المرجعية (θ) حيث:

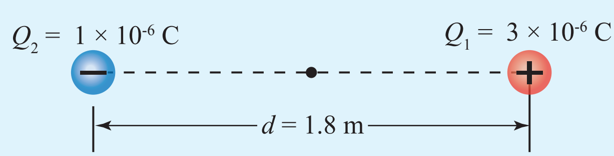
$$\tan \theta = \frac{7.5 \times 10^6}{1.6 \times 10^6} = 4.88$$

$$\theta = \tan^{-1}(4.88) = 78.4°$$

$$E = 7.67 \times 10^6\ N/C, 78.4°$$

تمرين

يوضح الشكل (16) شحنتين نقطيتين في الهواء: الأولى موجبة والثانية سالبة، تفصلهما مسافة (1.8 m). مستعينًا بالشكل؛ أجد المجال الكهربائي المحصّل عند نقطة تنصف المسافة بين الشحنتين.



الشكل (16): شحنتان نقطيتان في الهواء.

خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines

المجال الكهربائي كمّية فيزيائية متّجهة، وفي الأمثلة السابقة مثّلنا متّجه المجال عند نقطة بسهم اتّجاهه يُعبّر عن اتّجاه المجال عند تلك النقطة، ويتناسب طول السهم مع مقدار المجال. ويُمكنني تمثيل منطقة المجال الكهربائي الذي يُحيط بشحنة كهربائية مفردة أو عدد من الشحنات؛ برسم خطوط، عليها أسهم توضّح اتّجاه المجال، وتُسمّى **خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines** وهي تُمثّل مسارات شحنة اختبار موجبة تتحرّك تحت تأثير المجال الكهربائي فقط. مع التذكير بأنّ اتّجاه المجال عند أي نقطة فيه، هو اتّجاه القوّة التي يؤثّر بها المجال في شحنة الاختبار النقطية الموجبة، الموضوعة عند تلك النقطة.

يُبيّن الشكل (17) أربعة مجالات كهربائية منفصلة، مُثّلت بخطوط المجال.

أ . المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية موجبة.

ب. المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية سالبة.

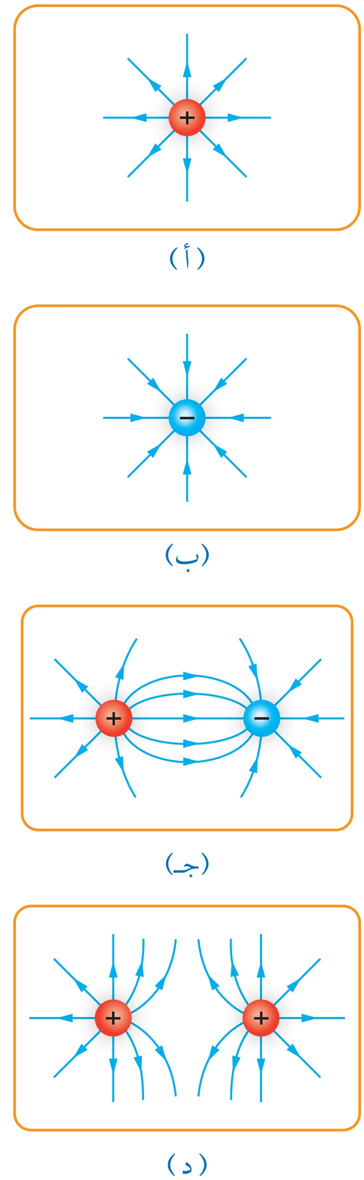
جـ. المجال الكهربائي الناشئ عن شحنتين نقطيتين متجاورتين، إحداهما موجبة والثانية سالبة.

د . المجال الكهربائي الناشئ عن شحنتين نقطيتين موجبتين متجاورتين.

أستنتجُ من الأشكال السابقة الملحوظات الآتية:

- تدلّ كثافة خطوط المجال الكهربائي التي تخترق سطحًا محدّدًا على شدّة المجال الكهربائي، ويُقصد بكثافة **خطوط المجال Density of Electric Field Lines** أنّها عدد الخطوط التي تخترق وحدة المساحة من هذا السطح بشكل عمودي عليه؛ أي إنّ شدّة المجال الكهربائي تزداد حيثما تتزاحم خطوط المجال.
- تبدأ خطوط المجال من الشحنة الموجبة وتنتهي إلى الشحنة السالبة؛ لأنّها تُمثّل مسار حركة شحنة الاختبار الموجبة داخل المجال، بسبب تنافرها مع الشحنة الموجبة وتجاذبها مع الشحنة السالبة.
- تكون خطوط المجال الكهربائي مستقيمة أو منحنية لكنّها لا تتقاطع، إذ لو تقاطع خطّان لأصبح للمجال أكثر من اتّجاه عند نقطة التقاطع، وهذا يتعارض مع مفهوم المجال عند نقطة.

✓ **أتحقّق:** بناءً على الشكل (17) والملحوظات التي استنتجتُها منه؛ أرسمُ خطوط المجال الكهربائي لشحنتين نقطيتين سالبتين ومتجاورتين.



الشكل (17): أنماط المجالات الكهربائية حول عدد من الشحنات النقطية.

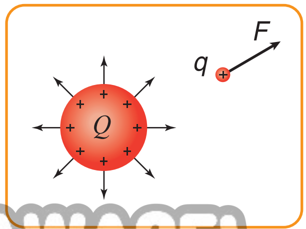
سؤال: تُسمّى المنطقة التي يكون فيها مقدار المجال المحصّل مساويًا للصفر منطقة انعدام المجال. أيّ من الأشكال (أ، ب، جـ، د) تحتوي على منطقة انعدام للمجال؟ وأين توجد داخل الشكل؟

المجال الكهربائي لكرة موصلة مشحونة

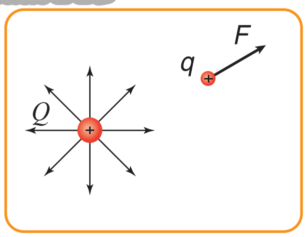
Electric Field of a Charged Conducting Sphere

يُشكّل المجال الكهربائي الذي تولّده كرة فلزية مشحونة بشحنة موجبة $(+Q)$ منطقة تُحيط بهذه الكرة. لوصف هذا المجال؛ أتتبّع مسار حركة شحنة اختبار صغيرة موجبة $(+q)$، كما يُبيّن الشكل (18/ أ)، عند وضعها في نقاط مختلفة حول الكرة المشحونة. عند رسم مسارات حركة شحنة الاختبار تحت تأثير القوّة الكهربائية المتبادلة مع الكرة الفلزية المشحونة، أستنتجُ أنّ المجال الكهربائي خارج كرة فلزية مشحونة يُماثل تمامًا المجال الكهربائي حول شحنة نقطية مساوية للشحنة الكلّية على الكرة $(+Q)$، ويكون موقعها كما لو كانت في مركز هذه الكرة، كما يُبيّن الشكل (18/ ب).

لحساب مقدار المجال عند أي نقطة خارج الكرة الموصلة المشحونة؛ تُستعمل العلاقات الخاصة بمجال الشحنات النقطية، لكنّ المجال الكهربائي داخل الكرة يساوي محصّلة متّجهات المجال الناتجة عن كلّ الشحنات على سطح الكرة، ويساوي صفرًا.



أ: كرة مشحونة.

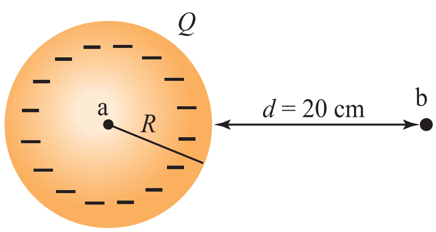


ب: شحنة نقطية.

الشكل (18):
أ: تأثير كرة مشحونة في شحنة اختبار.
ب: تأثير شحنة نقطية في شحنة اختبار.

المثال 8

يوضّح الشكل (19) كرة نحاسية نصف قطرها (10 cm)، موضوعة في الهواء ومشحونة بشحنة سالبة $(-12\ \mu C)$. مستعينًا بالشكل؛ أجد المجال الكهربائي عند كل من النقطتين (b,a).



الشكل (19): كرة موصلة مشحونة بشحنة سالبة.

المعطيات: $R = 10\ cm = 0.1\ m,\ Q = 12\ \mu C = 12 \times 10^{-6}\ C,\ \ d = 20\ cm = 0.2\ m$

المطلوب: $E_a = ?,\ \ E_b = ?$

الحلّ:

المجال عند النقطة (a) في مركز الكرة يساوي صفرًا، وكذلك عند أيّ نقطة داخل الكرة؛ لأنّه ناتج عن جمع متّجهي لمجالات الشحنات الجزئية جميعهاعلى سطح الكرة. $E_a = 0\ N/C$

المجال عند النقطة (b) على بعد (20 cm) من سطح الكرة:

$$r = R + d = 0.1 + 0.2 = 0.3\ m$$

$$E_b = k\frac{Q}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 10^{-6}}{0.3^2}$$

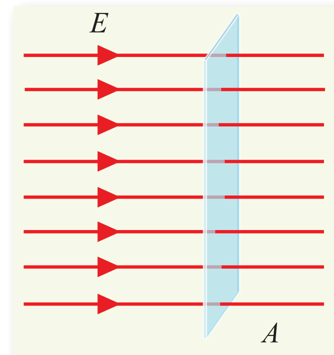
$$E_b = 12 \times 10^5\ N/C$$

اتّجاه المجال عند النقطة (b) يكون باتّجاه محور $(-x)$، وهو اتّجاه حركة شحنة الاختبار الموجبة، إذا وُضِعت عند هذه النقطة.

التدفّق الكهربائي Electric Flux

أفترضُ أنّ لديّ سائلًا يجري خلال أنبوب، ويخرج من مقطعه الذي يُشكّل سطحًا مستويًا مساحته (A)، وأنّ اتّجاه الجريان يتعامد مع هذا السطح؛ فإنّ كمّية السائل التي تنفذ من السطح في وحدة الزمن تُسمّى تدفّقًا. وفي حالة المجال الكهربائي، فإنّني أُحدّد كمّية مشابهة تُسمّى **التدفّق الكهربائي Electric flux** وهو العدد الكلّي لخطوط المجال الكهربائي التي تعبر مساحة محدّدة.

لاحظتُ عند وصف خطوط المجال الكهربائي، أنّ شدّة المجال الكهربائي تتناسب طرديًّا مع عدد خطوط المجال التي تخترق وحدة المساحة بشكل عمودي، وهذا يؤدّي إلى علاقة بين التدفّق الكهربائي وشدّة المجال الكهربائي. ولتسهيل تحديد هذه العلاقة، أفترضُ وجود سطح مستوٍ مساحته (A) عمودي على اتّجاه مجال كهربائي منتظم E (ثابت المقدار والاتّجاه) وتخترقه خطوط المجال، كما في الشكل (20).



الشكل(20): التدفّق الكهربائي.

إنّ التدفّق الكهربائي لهذا المجال يُعطى بالعلاقة الرياضية الآتية: $\phi = E\,A$، إذ يُمثّل الرمز ϕ التدفّق خلال المساحة A، ويساوي عدد خطوط المجال الكلّية التي تخترق هذه المساحة. ويُقاس التدفّق الكهربائي بوحدة Nm^2/C حسب النظام الدولي للوحدات. وتجدر الإشارة إلى أنّ المجال الكهربائي والمساحة كمّيتان متّجهتان؛ إذ يكون متّجه المساحة هو العمود المُقام على السطح باتّجاه الخارج (بالنسبة إلى السطوح المغلقة)، في حين أنّ التدفق كمّية فيزيائية قياسية. بالنظر إلى الشكل (20) أُلاحظ أنّه لو حصل دوران للسطح الذي مساحته A بحيث تصبح خطوط المجال غير عمودية على المساحة؛ فإنّ هذا سيؤدّي إلى إنقاص عدد خطوط المجال التي تخترقه؛ لذا، فإنّه في الحالة العامّة التي تكون فيها الزاوية بين متّجه المساحة واتّجاه خطوط المجال ضمن المدى $0° \leq \theta \leq 180°$؛ فإنّ التدفّق يساوي ناتج الضرب القياسي لمتّجهي المجال والمساحة ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\phi = E\,A\cos\theta$$

أستنتجُ من هذه العلاقة أنّ التدفّق الكهربائي خلال سطح يعتمد على (3) عوامل: مقدار المجال الكهربائي، ومقدار المساحة التي يُحسب التدفّق خلالها، والزاوية بين متّجهَي المساحة والمجال الكهربائي.

أفكّر: سطح أفقي اتجاه مساحته نحو الأعلى يوجد فوقه جسم مشحون بشحنة موجبة، أصف تدفّق خطوط المجال الكهربائي الذي يعبر السطح والناتج عن هذه الشحنة، ثم أُبيّن ما يحدث للتدفّق عند إضافة شحنة سالبة أسفل السطح الأفقي مع بقاء الشحنة الأولى.

المثال 9

مجال كهربائي ثابت مقداره $(3 \times 10^3\ N/C)$ تخترق بعض خطوطه سطحًا مساحته $(0.04\ m^2)$، كما في الشكل (20). إذا علمتُ أنّ خطوط المجال موازية لمتّجه المساحة؛ فأحسبُ التدفق الكهربائي.

المعطيات: $E = 3 \times 10^3\ N/C,\ A = 0.04\ m^2,\ \theta = 0$

المطلوب: $\phi = ?$

الحلّ:

$$\phi = E\,A \cos\theta$$

$$\phi = 3 \times 10^3 \times 0.04 \times \cos 0$$

$$\cos 0 = 1$$

$$\phi = 120\ Nm^2/C$$

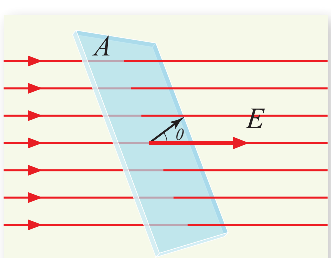
المثال 10

أحسبُ التدفّق الكهربائي خلال سطح مستطيل الشكل، أبعاد مساحته $(5\ cm, 10\ cm)$ موضوع في منطقة مجال كهربائي ثابت مقداره $(100\ N/C)$، كما في الشكل (21). علمًا بأنّ الزاوية بين متّجه المجال ومتّجه المساحة (37°).

المعطيات: $E = 100\ N/C,\quad A = 0.05 \times 0.1\ m^2,\quad \theta = 37^\circ$

المطلوب: $\phi = ?$

الحلّ:



الشكل(21): التدفّق الكهربائي.

$$A = 0.05 \times 0.1 = 0.005\ m^2$$

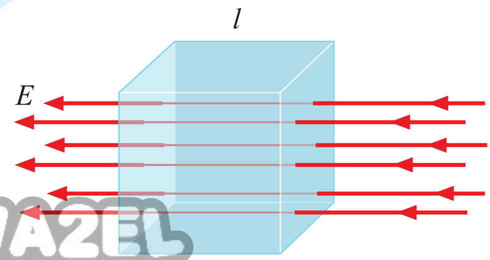
$$\phi = E\,A \cos 37$$

$$\phi = 100 \times 0.005 \times 0.8$$

$$\phi = 0.4\ Nm^2/C$$

تمرين

أحسبُ التدفّق الكهربائي الناتج عن دخول خطوط مجال كهربائي منتظم (E) لمكعّب طول ضلعه (l) بشكل عمودي على أحد أوجهه كما في الشكل (22)، وخروجها عموديًّا من الوجه المقابل.



الشكل(22): التدفّق الكهربائي خلال وجهَي مكعّب.

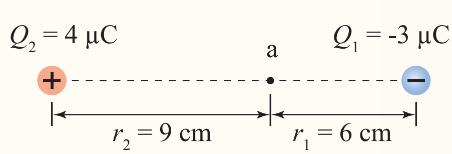
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بكلّ من: مفهوم المجال الكهربائي، المجال الكهربائي عند نقطة، شدّة المجال الكهربائي، خط المجال الكهربائي.

2. أُوضّح بالرسم خطوط المجال الكهربائي حول شحنة نقطية سالبة موضوعة بالفراغ.

3. **أُفسّر** عدم إمكانية تقاطع خطّين من خطوط المجال الكهربائي.

4. **أستعملُ المتغيّرات:** يوضّح الشكل المجاور شحنتين؛ الأولى سالبة والثانية موجبة. مستعينًا بالشكل؛ أجد المجال الكهربائي المحصّل عند النقطة a وأُحدّد اتّجاهه.



5. **التفكير الناقد:** شحنة نقطية في الهواء مقدارها ($12\ \mu C$) موجودة في مركز سطح كروي نصف قطره (0.2 m). أجد التدفّق الكهربائي خلال السطح الكروي، ثمّ أُبيّن: هل يتغيّر التدفّق بتغيّر نصف قطر السطح الكروي؟

الفكرة الرئيسة:

ينشأ مجال كهربائي منتظم بين صفيحتين موصلتين متقاربتين ومتوازيتين ومشحونتين بشحنتين متساويتين ومختلفتين، ويكون المجال ثابت المقدار والاتّجاه عند النقاط جميعها بين الصفيحتين، ويؤثّر في الشحنات الموجودة بينهما بقوة كهربائية ثابتة.

نتاجات التعلّم:

- أصف التدفّق الكهربائي الذي يخترق سطحًا بمعادلة.
- أحسبُ مقدار المجال الكهربائي لتوزيع متّصل للشحنات الكهربائية.
- أدرسُ حركة شحنة نقطية في مجال كهربائي منتظم.

المفاهيم والمصطلحات:

قانون غاوس Gauss's Law
سطح غاوس Gaussian surface
الكثافة السطحية للشحنة Surface Charge Density
المجال الكهربائي المنتظم Uniform Electric Field

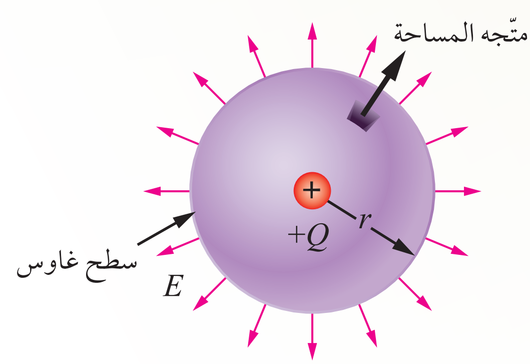
قانون غاوس Gauss's Law

بعد أقل من 50 عامًا من نشر شارل كولوم قانونه، توصّل عالم الفيزياء والرياضيات الألماني كارل غاوس إلى قانون يُكافئ قانون كولوم في وصف العلاقة بين المجال الكهربائي والشحنة، الذي عُرف باسمه (قانون غاوس)، إلّا أنّ غاوس قدّم طريقة مختلفة للتعبير عن هذه العلاقة. ينصّ **قانون غاوس Gauss's law** على أنّ التدفّق الكهربائي الكلّي عبر سطح مغلق يتناسب طرديًّا مع المجموع الجبري للشحنات الكهربائية المحتواة (Enclosed Charge) داخل هذا السطح. بما أنّ التدفّق الكهربائي خلال سطح يتناسب مع كلّ من المجال الكهربائي ومساحة السطح؛ فإنّ قانون غاوس يوضّح العلاقة بين الشحنة الكلّية والمجال الكهربائي الناتج عنها، كما هي الحال في قانون كولوم.

أفترضُ سطحًا كرويًّا وهميًّا نصف قطره (r) يُحيط بشحنة نقطية موجبة ($+Q$) موضوعة في الفراغ، كما في الشكل (23). أُلاحظ أنّ خطوط المجال الكهربائي للشحنة تتقاطع مع السطح الافتراضي الكروي، الذي يُسمّى **سطح غاوس Gaussian surface**، وتكون موازية لمتّجه المساحة الذي يكون عموديًّا على المساحة ومتّجهًا إلى الخارج (بالنسبة إلى السطوح المغلقة)، أي إنّ الزاوية بين المجال ومتّجه المساحة ($\theta = 0°$).

النقاط جميعها الواقعة على سطح غاوس الافتراضي تبعد عن الشحنة النقطية المسافة نفسها (r)، والمجال الكهربائي (E) عند أيّ من هذه النقاط يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$



الشكل (23): شحنة نقطية داخل سطح غاوس.

أمّا التدفّق الكهربائي خلال سطح غاوس؛ فيُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\phi = EA \cos \theta$$

إذ إنّ سطح غاوس يُمثّل كرة مساحة سطحها: ($A = 4\pi r^2$).

بتعويض المساحة في العلاقة السابقة أجد أنّ:

$$\phi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} 4\pi r^2 \cos \theta$$

بما أنّ اتّجاه المجال موازٍ لمتّجه المساحة، تكون الزاوية بينهما تساوي صفرًا، وبذلك فإنّ:

$$\phi = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

أستنتجُ أنّ التدفّق الكهربائي خلال سطح كروي افتراضي يُحيط بشحنة نقطية تقع في مركزه، يساوي ناتج قسمة الشحنة على السماحية الكهربائية للفراغ، وأستنتجُ أنّ التدفّق الكهربائي خلال أيّ سطح مغلق يعتمد على الشحنة المحتواة داخل السطح وعلى نوع الوسط فقط.

يُعدّ ما توصّلتُ إليه حالة خاصّة من قانون غاوس، وباستعمال (حساب التفاضل والتكامل) يُمكنني تعميم هذه النتيجة لتشمل أيّ سطح مغلق؛ سواء أكان منتظمًا أم غير منتظم، وأيّة شحنة كهربائية داخله؛ سواء أكانت نقطية أم مجموعة من الشحنات المتصلة والموزعة داخل السطح. وبهذا أكون قد توصّلتُ إلى الصورة العامة لقانون غاوس، وهي: إنّ التدفّق الكهربائي خلال أيّ سطح مغلق يساوي المجموع الجبري للشحنات الكهربائية داخل السطح؛ مقسومًا على السماحية الكهربائية للفراغ (ε_0).

✓ **أتحقّق:** يقلّ المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية كلّما ابتعدنا عن الشحنة، لكنّ التدفّق الكهربائي يبقى ثابتًا. أُثبت هذه الجملة باستعمال قانون غاوس.

أُفكّر: أصف المجال الكهربائي في الحالتين الآتيتين:

أ . خطوط المجال الكهربائي غير متوازية.

ب. خطوط المجال الكهربائي متوازية، والمسافات بينها متساوية.

المجال الكهربائي لكرة موصلة مشحونة

Electric Field of a Charged Conducting Sphere

عند شحن الأجسام الموصلة للكهرباء بشحنة كهربائية؛ فإنّ الشحنات تتباعد عن بعضها بسبب تنافرها، فتتوزّع على السطح الخارجي للجسم الموصل. عندما يكون الموصل كرة نصف قطرها (R) ومساحة سطحها الخارجي ($4\pi R^2$)، وعند شحنها بشحنة كهربائية (Q)؛ فإنّ الشحنة تتوزّع على المساحة بانتظام.

تُعرّف **الكثافة السطحية للشحنة (σ) (Surface charge density)** بأنّها: ناتج قسمة الشحنة الكلّية للجسم على مساحة سطحه. وهي بالنسبة للكرة تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}$$

لمعرفة المجال الكهربائي خارج الكرة الموصلة المشحونة، وعلى مسافة ($r > R$) من مركز الكرة، أُطبّق قانون غاوس:

$$\phi = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

أفترضُ سطح غاوس وهميًّا يُحيط بالكرة الموصلة، كما في الشكل (24)، مساحته (A). بتعويض قيمتَي الشحنة والتدفّق في قانون غاوس:

$$\phi = EA, \quad Q = \sigma(4\pi R^2)$$

أحصل على العلاقة الآتية:

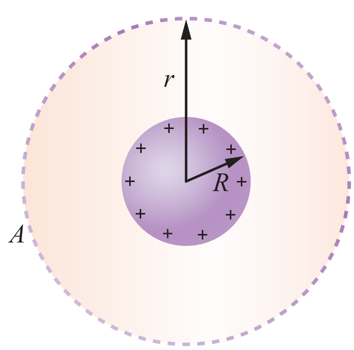
$$E(4\pi r^2) = \frac{\sigma(4\pi R^2)}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot \frac{R^2}{r^2}$$

لحساب المجال الكهربائي بالقرب من سطح الكرة الموصلة (خارج الكرة وعلى مسافة قريبة جدًّا من سطحها)، أفترضُ سطح غاوس وهميًّا يُحيط بالكرة الموصلة بشكل قريب جدًّا منها؛ أي إنّ نصف قطره يساوي نصف قطرها تقريبًا؛ ($r \cong R$). أجد أنّ:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2}$$

وبصورة عامّة؛ فإنّ المجال الكهربائي خارج الكرة الموصلة المشحونة وعلى مسافة (r) من مركزها يُعطى بالعلاقة:



الشكل (24): موصل كروي مشحون.

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

أستنتجُ أنّ المجال الكهربائي في نقطة تقع عند سطح الكرة وخارجها يُعطى بدلالة الكثافة السطحية للشحنة والسماحية الكهربائية للفراغ فقط، وأنّ النتيجة في الحالة العامة خارج الكرة تتّفق مع قانون كولوم، أي إنّ المجال الكهربائي خارج الكرة المشحونة يُماثل مجال الشحنة النقطية.

✓ **أتحقّق:** لماذا تتوزّع الشحنات على السطح الخارجي للموصل المشحون، ولا تستقر في الداخل؟

المثال 11

كرة فلزّية معزولة نصف قطرها $(0.2\ \text{m})$ موضوعة في الهواء، مشحونة بشحنة كهربائية موجبة موزّعة على سطحها بانتظام بكثافة سطحية $(3.1 \times 10^{-7}\ \text{C/m}^2)$. باستعمال قانون غاوس أحسبُ كلًّا من:

أ. المجال الكهربائي عند نقطة (a) على بعد $(0.5\ \text{m})$ من مركز الكرة الفلزّية.

ب. المجال الكهربائي عند نقطة (b) خارج سطح الكرة الموصلة وقريبة جدًّا منه.

المعطيات: $\sigma = 3.1 \times 10^{-7}\ \text{C/m}^2,\ \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{Nm}^2\ \ R = 0.2\ \text{m},\ r = 0.5\ \text{m}$

المطلوب: $E_a = ?, E_b = ?$

الحلّ:

(أ)

$$E_a = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot \frac{R^2}{r^2}$$

$$E_a = \frac{3.1 \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}} \cdot \frac{0.2^2}{0.5^2} = 3.5 \times 10^4 \times 0.16$$

$$E_a = 5.6 \times 10^3\ \text{N/C}$$

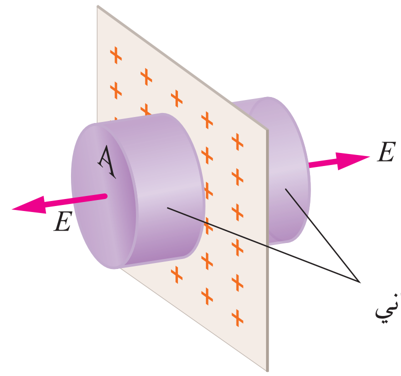
(ب)

$$E_b = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{3.1 \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}} = 3.5 \times 10^4\ \text{N/C}$$

تمرين

أحسبُ التدفّق الكهربائي خلال سطح كروي مغلق يحتوي في داخله على (3) شحنات كهربائية، هي:

$$Q_1 = -2 \times 10^{-6}\ \text{C},\ Q_2 = 4 \times 10^{-6}\ \text{C},\ Q_3 = 6 \times 10^{-6}\ \text{C}$$



الشكل(25): قشرة مستوية مشحونة.

مجال شحنة موزّعة على قشرة مستوية لا نهائية

Field of an Infinite Plane Sheet of Charge

لمعرفة المجال الكهربائي الناتج عن قشرة مستوية لا نهائية الطول والعرض، تتوزّع عليها شحنة كهربائية بكثافة سطحية منتظمة (σ) باستعمال قانون غاوس؛ أختار في البداية جزءًا من القشرة المشحونة مساحته (A)، ثم أفترضُ أنّ سطح غاوس الذي يُحيط بهذا الجزء على شكل أسطوانة مثلًا، كما في الشكل (25).

مساحة كلّ من قاعدتَي الأسطوانة (A)، أمّا سطحها الجانبي فلا تخترقه خطوط المجال الكهربائي كونها موازية للسطح الجانبي، ولا ينشأ خلاله تدفّق. وبذلك يكون التدفّق خلال قاعدتّي الأسطوانة فقط وبصورة عمودية عليهما. وبما أنّ المجال الكهربائي ينفذ من قاعدتّي الأسطوانة (A_1, A_2)؛ فإنّ التدفق الكلّي يُعطى بالعلاقة:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = EA_1 + EA_2 = E(2A)$$

لأنّ مساحتَي وجهَي الأسطوانة متساويتان $(A = A_1 = A_2)$.

بما أنّ الشحنة الكلّية المحتواة داخل سطح غاوس هي $(Q = \sigma A)$، والمجال الكهربائي ينفذ من جهتَي القشرة، فإنّه بتطبيق قانون غاوس:

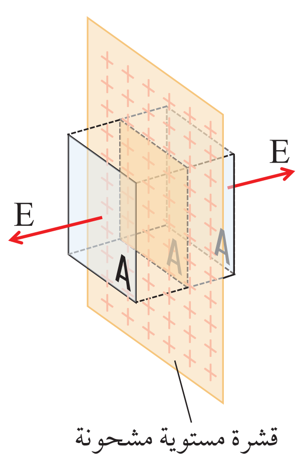
$$\phi = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$E(2A) = \frac{\sigma A}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

تُعطي العلاقة السابقة المجال الكهربائي الناتج عن القشرة المشحونة.

أُفكّر: هل يُمكنني التوصّل إلى حساب المجال الكهربائي الناتج عن قشرة مشحونة لانهائية الأبعاد؛ بافتراض سطح غاوس الوهمي كما في الشكل، على شكل مكعّب مساحة وجهه (A)، يُغلف جزءًا من الصفيحة مساحته (A)؟ أُوضّح إجابتي.



✓ **أتحقّق:** ما مقدار الزاوية بين متّجهَي المجال والمساحة، لكلّ من قاعدتَي الأسطوانة وسطحها الجانبي؟

المثال 12

قشرة رقيقة مشحونة بشحنة كهربائية سالبة موزّعة عليها بانتظام بكثافة سطحية (8×10^{-7} C/m^2). إذا كانت أبعاد القشرة كبيرة، فأجد المجال عند نقطة قريبة جدًّا من منتصف القشرة.

المعطيات:

$$\sigma = 8 \times 10^{-7}\ \text{C/m}^2,\ \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{Nm}^2$$

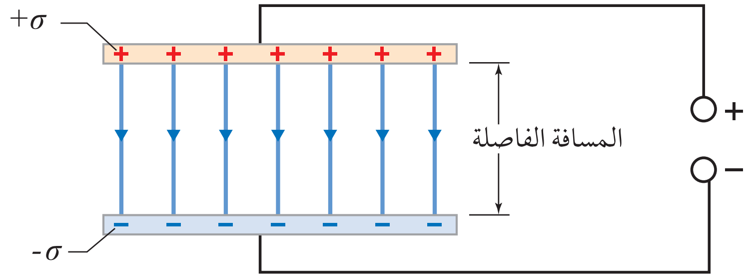
المطلوب:

$$E = ?$$

الحلّ:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{8 \times 10^{-7}}{2 \times 8.85 \times 10^{-12}}$$

$$E = 4.52 \times 10^{3}\ \text{N/C}$$



الشكل(26): المجال الكهربائي المنتظم.

المجال الكهربائي المنتظم Uniform Electric Field

عندما يكون المجال الكهربائي ثابتًا في مقداره واتّجاهه عند نقاطه جميعها؛ فإنّه يُسمّى **مجالًا كهربائيًّا منتظمًا Uniform electric field**، ويُمكنني الحصول عليه بوضع صفيحتين موصلتين متوازيتين ومتقابلتين، وتفصل بينهما مسافة قصيرة مقارنة بأبعادهما، وشحنهما بشحنتين مختلفتين في نوعيهما متساويتين في مقداريهما. وعند وضع جسم مشحون بين هاتين الصفيحتين؛ فإنّ المجال المنتظم يؤثّر فيه بقوة ثابتة المقدار والاتّجاه مهما كان موقع الجسم داخل المجال.

عند تمثيل المجال الكهربائي المنتظم عن طريق رسم خطوط المجال الكهربائي؛ فإنّها تكون متوازية والمسافات بينها متساوية وجميعها باتّجاه واحد، كما يُبيّن الشكل (26)، باستثناء المجال قرب حوافّ الصفيحتين؛ فإنّ الخطوط تكون منحنية قليلًا والمجال غير منتظم.

لحساب مقدار المجال الكهربائي المنتظم؛ أُطبّق قانون غاوس على كلا الصفيحتين كأنّها قشرة رقيقة مشحونة، فيكون المجال الناتج عن القشرة الموجبة E_1، والمجال الناتج عن القشرة السالبة E_2. فيكون المجال المحصّل في المنطقة الواقعة بين الصفيحتين مساويًا لناتج جمع المجالين، لأنّهما بالاتّجاه نفسه:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

✓ **أتحقّق:** أُوضّح المقصود بالمجال الكهربائي المنتظم، وأصف القوّة التي يؤثّر بها في جسم مشحون يوضع داخله.

مستعينًا بمصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحثُ عن تطبيقات تكنولوجية مختلفة للمجال الكهربائي المنتظم، مثل الشاشات وأجهزة التصوير الطبية والمسارعات النووية، وأعد وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعّمًا بالصور والرسومات التوضيحية لطريقة العمل.

المثال 13

صفيحتان فلزّيتان مشحونتان بشحنتين كهربائيتين إحداهما موجبة والأُخرى سالبة، موزّعة عليهما بانتظام بكثافة سطحية $(3.54 \times 10^{-7}\ C/m^2)$، إذا كانت أبعاد الصفيحتين كبيرة؛ فأجد المجال عند نقطة بين الصفيحتين.

المعطيات: $\sigma = 3.54 \times 10^{-7}\ C/m^2,\ \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$

المطلوب: $E = ?$

الحلّ:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{3.54 \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}} = 4 \times 10^{4}\ N/C$$

التجربة 2

تخطيط المجال الكهربائي المنتظم بطريقة عملية.

الموادّ والأدوات: مصدر كهربائي عالي القدرة (0–3 kV) أو مولّد فان دي غراف، طبق بتري زجاجي، قطبان كهربائيان من الألمنيوم، قِطَع بلاستيكية عازلة لتثبيت القطبين، زيت الخروع أو أيّ زيت نباتي قليل اللزوجة، بذور أعشاب صغيرة الحجم (مثل بذور البقدونس).

إرشادات السلامة: الحذر عند استعمال مولّد فان دي غراف، وعدم لمس التوصيلات الكهربائية ومصدر الجهد.

تحذير: جهد كهربائي عالٍ جدًّا يُسبّب صعقة كهربائية.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أنفذ الخطوات الآتية:

1. أضع كمّية من الزيت في الطبق الزجاجي حتى ارتفاع (0.5cm) تقريبًا، ثمّ أنثرُ فوقها كمّية قليلة من بذور الأعشاب، وأحرّك الزيت بقضيب زجاجي رفيع كي تنتشر جيدًا فوق الزيت.
2. أُثبّت القطبين الكهربائيين في العازل بحيث ينغمس طرفاهما في الزيت كما في الشكل، ثم أوصلهما بمصدر الطاقة الكهربائية أو بمولّد فان دي غراف (عند استعماله بدلًا عن مصدر الطاقة عالي الجهد).
3. بمساعدة معلمي أضبطُ مصدر الطاقة على جهد يقع بين (2,000 to 3,000 volts)، أو أُشغّل مولّد فان دي غراف (عند استعماله بدلًا عن مصدر الطاقة عالي الجهد).

4. **ألاحظ** اصطفاف البذور بترتيب يُشبه خطوط المجال الكهربائي المنتظم.
5. بمساعدة معلمي أُطفئ مصدر الطاقة، أو أوقف مولّد فان دي غراف وأُفرّغ شحنته، ثمّ أُغيّر المسافة بين القطبين داخل الزيت، وأُكرّر خطوات التجربة.

التحليل والاستنتاج

1. **أُفسّر** سبب استعمال زيت نباتي، وعدم استعمال الماء في الطبق الزجاجي.
2. **أرسمُ:** أصف شكل البذور عند توصيل الجهد، ثم أرسمُ الشكل الناتج وأكتبُ عليه ملاحظاتي.
3. **أُفسّر** سبب تأثّر بذور الأعشاب بقوى كهربائية؛ على الرغم من أنّه لم تُشحن قبل التجربة.

ملحوظة: عند تعذّر تنفيذ التجربة، يُمكنني الرجوع إلى مواقع الإنترنت لمشاهدة عرض فيديو للتجربة.

حركة جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم

Motion of a charged particle in a Uniform Electric Field

أفترض وجود أيون موجب يحمل شحنة $(+Q)$ في مجال كهربائي منتظم، تتّجه خطوطه رأسيًّا نحو الأعلى كما في الشكل (27). إنّ هذا الأيون سيتأثّر بقوّة كهربائية $(\boldsymbol{F})$ يكون اتّجاهها باتّجاه المجال (نحو الأعلى)، ويُعطى مقدار هذه القوّة بالعلاقة الرياضية الآتية:

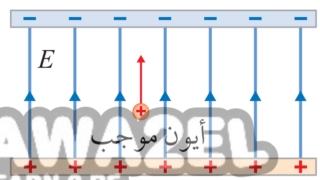
$$E = \frac{F}{Q}$$

يُمكنني وصف حركة الجسيمات المشحونة داخل مجال كهربائي منتظم ضمن (3) حالات:

الحالة الأولى: عندما يكون الجُسيم ساكنًا؛ فإنّه يتحرّك باتّجاه المجال إن كان موجب الشحنة، وعكس اتّجاه المجال إن كان سالب الشحنة، تحت تأثير القوّة الكهربائية للمجال. وبمعرفة كلّ من القوّة الكهربائية وكتلة الجُسيم المشحون يُمكنني حساب تسارعه، الذي يكون تسارعًا ثابتًا يُعطى بقانون نيوتن الثاني، كما يأتي:

$$a = \frac{F}{m}$$

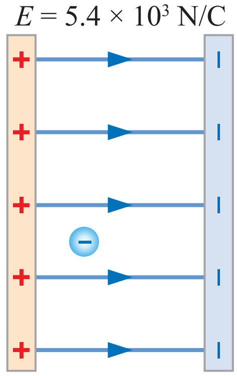
أتحقّق: أصف حركة جُسيم مشحون بشحنة سالبة عند وجوده في وضع السكون داخل مجال كهربائي منتظم.



الشكل(27): أيون موجب في مجال كهربائي منتظم.

المثال 13

جُسيم كتلته (200 mg) يحمل شحنة مقدارها $(-4 \times 10^{-6}\ C)$، وُضِع في حالة سكون داخل مجال كهربائي منتظم، كما في الشكل (28). بإهمال الجاذبية الأرضية بالنسبة إلى القوة الكهربائية، أحسبُ التسارع الذي يكتسبه الجُسيم.



الشكل(28): جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم.

المعطيات: $E = 5.4 \times 10^3\ N/C,\ Q = 4 \times 10^{-6}\ C,\ m = 2 \times 10^{-4}\ kg$

المطلوب: $a = ?$

الحلّ:

$$F = EQ = 5.4 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-6}$$

$$F = 2.16 \times 10^{-2}\ N$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2.16 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-4}} = 108\ m/s^2$$

بما أنّ شحنة الجسيم سالبة؛ فإنّ اتّجاه القوّة والتسارع يكون معاكسًا لاتّجاه المجال الكهربائي؛ أي إنّ اتّجاه التسارع باتّجاه محور ($-x$). وبما أنّ الجُسيم يتحرّك بتسارع ثابت؛ فإنّه يُمكنني وصف حركته باستعمال معادلات الحركة في بُعد واحد.

أتذكّر

معادلات الحركة في بُعد واحد:

$v_2 = v_1 + at$

$d = v_1 t + 1/2\ at^2$

$v_2^2 = v_1^2 + 2ad$

تمرين

في المثال السابق، إذا بدأ الجُسيم حركته من السكون، فأحسبُ المسافة التي يقطعها خلال زمن (0.02 ms) من حركته تحت تأثير المجال.

الحالة الثانية: عندما يكون الجُسيم متحرّكًا بسرعة ابتدائية باتّجاه موازٍ لاتّجاه خطوط المجال؛ فإنّ حركته تكون في بُعد واحد. فهو يتسارع في حالتين: إن كان موجب الشحنة وسرعته الابتدائية مع المجال، وإن كان سالب الشحنة وسرعته الابتدائية عكس المجال. ويتباطأ في حالتين: إن كان موجب الشحنة وسرعته الابتدائية عكس المجال، وإن كان سالب الشحنة وسرعته الابتدائية مع المجال.

المثال 14

جُسيم كتلته (40 mg) يحمل شحنة سالبة (-5×10^{-5} C)، دخل مجالًا كهربائيًّا منتظمًا بسرعة ابتدائية (600 m/s)، باتّجاه محور ($+x$)، إذا كان مقدار المجال الكهربائي (3.2×10^3 N/C)، واتّجاهه مع محور ($+x$)، وبإهمال تأثير الجاذبية الأرضية؛ فأحسبُ الزمن اللازم لتوقّف الجُسيم عن الحركة.

المعطيات: $E = 3.2 \times 10^3\ N/C,\quad Q = 5 \times 10^{-5}\ C,\quad m = 4 \times 10^{-5}\ kg,\quad v_1 = 600\ m/s$

المطلوب: $t = ?$

الحلّ:

$F = EQ = 3.2 \times 10^3 \times 5 \times 10^{-5}$

$F = 1.6 \times 10^{-1}\ N$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-1}}{4 \times 10^{-5}} = 4 \times 10^3\ m/s^2$$

بما أنّ الجُسيم سالب الشحنة؛ فإنّ اتّجاه القوّة المؤثّرة فيه يكون بعكس اتّجاه المجال، وكذلك يكون اتّجاه التسارع؛ أي باتّجاه ($-x$)، وهنا أستعملُ معادلات الحركة، كما يأتي:

$$v_2 = v_1 + at$$

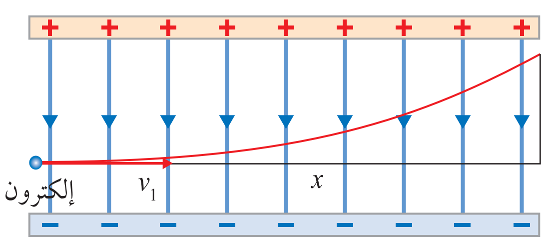
$$0 = 600 - (4\times10^3)t$$

$$t = \frac{600}{4\times10^{-5}} = 0.15\ \text{s}$$

الحالة الثالثة: عندما يكون الجُسيم متحرّكًا بسرعة ابتدائية باتّجاه عمودي على اتّجاه خطوط المجال؛ فإنّ حركته تصبح في بُعدين، مشابهة لحركة المقذوفات الأُفقية في مجال الجاذبية الأرضية. بمعرفة القوّة الكهربائية وكتلة الجُسيم المشحون يُمكنني حساب تسارعه، ثمّ استعمال معادلات الحركة لوصف حركة الجُسيم.

المثال 15

عبر إلكترون منطقة مجال كهربائي رأسي منتظم اتّجاهه نحو الأسفل، ومقداره (300 N/C)، بسرعة ابتدائية أُفقية مقدارها (3×10^6 m/s) باتّجاه محور ($+x$)؛ فانحرف الإلكترون نحو الأعلى، كما في الشكل (29).
إذا كانت الإزاحة الأُفقية للإلكترون داخل منطقة المجال ($x = 4$ cm)، وبإهمال تأثير الجاذبية الأرضية؛ فما الإزاحة الرأسية التي حدثت للإلكترون؟ كتلة الإلكترون (9.11×10^{-31} kg).



الشكل (29): مسار إلكترون في مجال كهربائي منتظم.

المعطيات: $E = 300$ N/C, $Q = 1.6\times10^{-19}$ C, $m = 9.11\times10^{-31}$ kg, $v_1 = 3\times10^6$ m/s , $x = 4$ cm

المطلوب: $y = ?$

الحلّ:

$$F = EQ = 300 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$F = 3.16 \times 10^{-17}\ \text{N}$$

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{3.16\times10^{-17}}{9.11\times10^{-31}} = 5.268\times10^{13}\ \text{m/s}^2$$

وبسبب عدم وجود تأثير لأيّ قوّة في الاتّجاه الأُفقي؛ فإنّ: $a_x = 0$

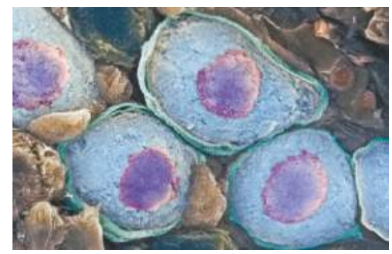
أستخرجُ زمن الحركة من المركّبة الأُفقية للسرعة والإزاحة، إذ إنّ المركّبة الأُفقية للسرعة ثابتة:

$$t = \frac{x}{v_{x1}} = \frac{4 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{6}} = 1.33 \times 10^{-8}\,\text{s}$$

$$y = v_{y1} t + \frac{1}{2} a_y t^2$$

$$y = 0 + \frac{1}{2} \times 5.268 \times 10^{13} \times (1.33 \times 10^{-8})^2 = 4.659 \times 10^{-3}\,\text{m}$$

الربط مع العلوم الحياتية



توزيع الشحنات الكهربائية داخل الخلية العصبية والسيال العصبي

تحتوي الخلية العصبية للإنسان في داخلها على أيونات بوتاسيوم موجبة الشحنة (K^+)، وجزيئات بروتين مشحونة بشحنات سالبة (Pr^-).

الخلية العصبية وقت الراحة: توجد خارج الخلية أيونات الصوديوم الموجبة، في حين توجد داخل الخلية كلّ من أيونات البوتاسيوم الموجبة وأيونات البروتين سالبة الشحنة.

نتيجة لفرق التركيز؛ تنتشر أيونات البوتاسيوم عبر غشاء الخلية إلى الخارج، فينتج عن ذلك أن يُصبح داخل الخلية مشحونًا بشحنة كهربائية سالبة، وخارج الخلية مشحونًا بشحنة كهربائية موجبة. علمًا بأنّ السائل داخل الخلية موصل للكهرباء بشكل جيّد، ما يسمح لجزيئات البروتين السالبة أن تتوزّع على المحيط الخارجي للسائل الخلوي (كما في الكرة الموصلة)؛ أي على السطح الداخلي لغشاء الخلية، الذي يُعدّ عازلًا للكهرباء، ويحدث هذا التوزيع للشحنات مهما كان شكل الخلية العصبية.

الخلية العصبية وقت التنبيه: عندما يصل المنبّه العصبي إلى مستوى معين، تفتح قنوات في الغشاء الخلوي فتدخل أيونات الصوديوم إلى الخلية بكمّيات تجعل الشحنة داخل الخلية موجبة وخارجها سالبة، ما يؤدّي إلى فتح قنوات أُخرى تسمح بدخول أيونات البوتاسيوم، فتزداد الشحنة السالبة خارج الخلية.

تعود الخلية إلى حالة الراحة نتيجة انتشار أيونات البوتاسيوم إلى الخارج وأيونات الصوديوم إلى الداخل عبر قنوات تسرّب خاصّة في الغشاء الخلوي، وينتقل هذا الانعكاس في القطبية على شكل موجة في الأعصاب لنقل الإحساس من أطراف الجسم إلى الدماغ، أو نقل الأوامر من الدماغ إلى العضلات.

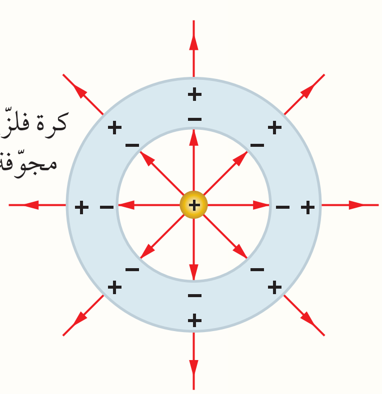
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بالمجال الكهربائي المنتظم، وكيف يمكن الحصول عليه.
2. عند وجود شحنتين في الهواء تفصلهما مسافة؛ فإنّه توجد نقطة محددة ينعدم فيها المجال الكهربائي. أُحدّد موقع هذه النقطة بالنسبة إلى الشحنتين في الحالتين الآتيتين: الشحنتان متماثلتان ومتساويتان في المقدار، الشحنتان مختلفتان وإحداهما أكبر من الأُخرى.
3. ما خصائص خطوط المجال الكهربائي التي تُعبّر عن أنّ المجال الكهربائي المنتظم يكون ثابت المقدار والاتّجاه عند النقاط جميعها في داخله.
4. أُوضّح باستعمال العلاقات الرياضية المناسبة، أنّ التدفّق الكلّي الناتج عن شحنة نقطية عبر سطح كروي لا يعتمد على مساحة السطح.
5. **أُقارن** بين حركة جُسيم مشحون بشحنة موجبة، بسرعة ابتدائية أُفقية داخل مجال كهربائي منتظم عمودي نحو الأسفل، وحركة كرة مقذوفة أفقيًّا في مجال الجاذبية الأرضية. (بإهمال كلّ من وزن الجُسيم المشحون، ومقاومة الهواء لحركة الكرة).
6. **أستعملُ المتغيّرات:** صفيحتان فلزّيتان مشحونتان بشحنتين كهربائيتين متساويتين إحداهما موجبة والأُخرى سالبة، موزّعة عليهما بانتظام بكثافة سطحية $(7.1 \times 10^{-7}\ C/m^2)$، إذا كانت أبعاد الصفيحتين كبيرة، فأجد:

أ. المجال عند نقطة بين الصفيحتين.

ب. تسارع جسيم كتلته $(5 \times 10^{-4}\ kg)$ وشحنته $(2 \times 10^{-7}\ C)$ عند وضعه بين الصفيحتين، بإهمال وزن الجسيم.

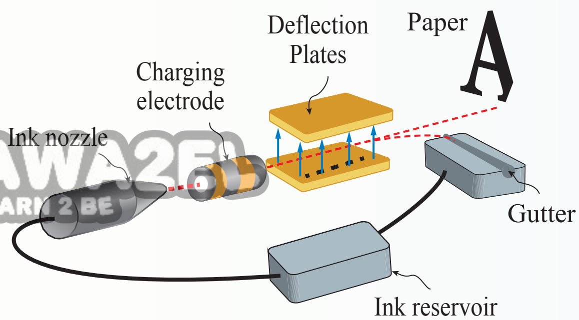
7. **أُحلّل الشكل:** وُضِعت شحنة نقطية موجبة في مركز كرة فلزّية مجوّفة ومتعادلة كهربائيًّا؛ فشحنتها بالحثّ كما في الشكل المجاور. أصف ما حدث لتوزيع الشحنات على الكرة، وأصف المجال الكهربائي داخل تجويف الكرة وخارجها.



الإثراء والتوسّع

الطابعات النافثة للحبر Ink Jet Printers

توصل الطابعات النافثة للحبر عادة مع جهاز الحاسوب؛ لطباعة النصوص والصور الملوّنة التي تُعدّ بوساطة الجهاز، وتُنفّذ عملية الطباعة عند إعطاء أمر بذلك. تُستعمل في هذا النوع من الطابعات عبوّات حبر سائل أسود اللون وعبوّات أُخرى ملوّنة بالألوان الأساسية الثلاثة؛ (الأصفر والسيان والماغنتا).

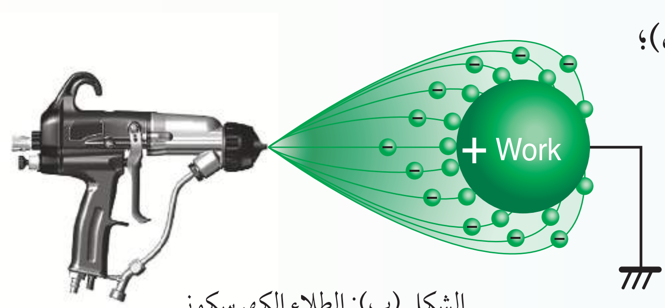


الشكل (أ): الطابعة النافثة للحبر

تحتوي الطابعة على عبوّات الحبر السائل، وبخّاخة مزوّدة بفتحة ضيقة لخروج الحبر، ومهبط كهربائي لشحن قطرات الحبر بشحنة كهربائية سالبة، ومجال كهربائي منتظم، كما في الشكل (أ). تبدأ عملية الطباعة بخروج الحبر من فتحة البخّاخة على شكل قطرات صغيرة جدًّا باتّجاه المهبط الذي تمر عن طريقه فيزوّدها بشحنة كهربائية سالبة، ثم تعبر مجالًا كهربائيًّا منتظمًا. وبما أنّ قطرات الحبر مشحونة فإنّها تتأثّر بالمجال الكهربائي، وعن طريق التحكّم الإلكتروني بمقدار المجال واتّجاهه، فإنه تُوجّه قطرات الحبر بدقّة متناهية لتُشكّل الأحرف والصور عند ملامستها الورقة.

الطلاء الكهرسكوني Electrostatic Painting

أمّا عند الطلاء الكهرسكوني المُبيّن في الشكل (ب)؛ فإنّ خروج قطرات الطلاء من المصدر يكون بفعل ضغط الهواء، وتخرج القطرات مشحونة بشحنة كهربائية مشابهة لشحنة المصدر، فتتنافر القطرات معه مبتعدة. وبما أنّ الجسم المراد طلاؤه يُشحن بشحنة كهربائية مخالفة لشحنة مصدر الطلاء؛ فإنّ قطرات الطلاء تتجاذب مع الجسم وتلتصق به، وبخاصّة في الأماكن التي يصعب الوصول إليها من دون التجاذب الكهربائي.



الشكل (ب): الطلاء الكهرسكوني.

أبحث مستعينًا بمصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحثُ عن تطبيقات أُخرى للكهرباء الساكنة، مثل تنقية عوادم المصانع من الدقائق العالقة، وآلات التصوير والنسخ، وأعد وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعّمًا بالرسومات التوضيحية لطريقة العمل وخطواته.

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. عند دلك مسطرة بلاستيكية بقطعة من القماش:
أ . تُصبح شحنة المسطرة موجبة نتيجة انتقال البروتونات إليها من القماش.
ب . تُصبح شحنة المسطرة سالبة نتيجة انتقال الإلكترونات إليها من القماش.
جـ . تُصبح شحنة المسطرة موجبة نتيجة انتقال الإلكترونات منها إلى القماش.
د . تُصبح شحنة المسطرة سالبة نتيجة انتقال البروتونات منها إلى القماش.

2. تختلف الأجسام الموصلة عن العازلة في الطريقة المناسبة لشحن كل جسم، وذلك كما يأتي:
أ . طريقتا الدلك والحثّ مناسبتان لشحن الأجسام الموصلة، وطريقة التوصيل لشحن الأجسام العازلة.
ب. طريقتا الدلك والتوصيل مناسبتان لشحن الأجسام الموصلة، وطريقة الحثّ لشحن الأجسام العازلة.
جـ. طريقتا الحثّ والتوصيل مناسبتان لشحن الأجسام الموصلة، وطريقة الدلك لشحن الأجسام العازلة.
د. طريقة التوصيل فقط مناسبة لشحن الأجسام الموصلة، وطريقتا الحثّ والدلك لشحن الأجسام العازلة.

3. أيّ الإجراءات الآتية تؤدّي إلى زيادة التدفّق الكهربائي خلال مساحة معينة؟
أ . زيادة المجال الكهربائي.
ب . إنقاص المجال الكهربائي.
جـ . تغيير الزاوية بين المجال ومتّجه المساحة من $(0°)$ إلى $(90°)$.
د . زيادة المسافة بين المساحة وموقع الشحنة المولدة للمجال.

4. كرة فلزّية نصف قطرها $(20\ cm)$، وكرة فلزّية ثانية نصف قطرها $(10\ cm)$، تحملان شحنتين متساويتين ولا تؤثّران في بعضهما. إذا كان المجال الكهربائي على بعد $(30\ cm)$ من مركز الأولى (E_1)؛ فإنّ المجال الكهربائي على البعد نفسه من مركز الكرة الثانية يُعطى بالعلاقة:
أ . $E_2 = 2\,E_1$ ب. $E_2 = \frac{1}{2}\,E_1$
جـ . $E_2 = \frac{1}{4}\,E_1$ د. $E_2 = E_1$

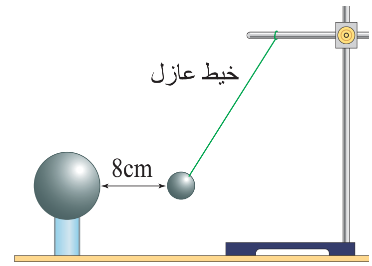
5. ماذا يحدث إذا دخل بروتون وإلكترون أُفقيًّا منطقة مجال كهربائي منتظم يتّجه نحو الأعلى؟
أ . ينحرف البروتون والإلكترون نحو الأعلى.
ب . ينحرف البروتون والإلكترون نحو الأسفل.
جـ . ينحرف البروتون نحو الأعلى والإلكترون نحو الأسفل.
د . ينحرف البروتون نحو الأسفل والإلكترون نحو الأعلى.

2. تُعدّ الكرة الأرضية موصلًا كرويًّا يحمل شحنة كهربائية سالبة، والقيمة المتوسّطة لمجالها الكهربائي تساوي (150 N/C) واتّجاه الخطوط نحو مركز الأرض. إذا علمتُ أنّ نصف قطر الأرض (6367 km)؛ فأُجيب عمّا يأتي:

أ. ما مقدار الكثافة السطحية للشحنة الكهربائية على سطح الأرض؟

ب. ما مقدار الشحنة الكلّية التي تحملها الأرض؟

3. كرة فلزّية قطرها (7 cm)، معزولة ومشحونة بشحنة كهربائية موجبة مقدارها (+8.5 μC) مثبّتة فوق عازل، كما في الشكل. وكرة خفيفة من البولسترين قطرها (3 cm) مغلّفة بغلاف فلزّي ومعلّقة بخيط عازل مشحونة بشحنة سالبة مقدارها (-9 nC) في وضع اتّزان بالقرب من الكرة الفلزّية. أحسبُ مقدار القوّة الكهربائية المتبادلة بين الكرتين.



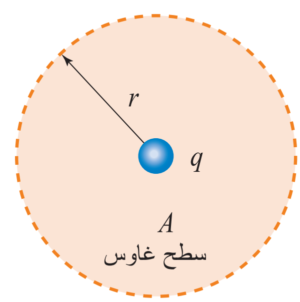
4. مجال كهربائي منتظم باتّجاه محور ($+x$)، مقداره (3×10^3 N/C). أحسبُ التدفّق الكهربائي له خلال مساحة مربّعة الشكل طول ضلعها (10 cm) في الحالتين الآتيتين:

أ. عندما يكون متّجه المساحة باتّجاه محور ($+x$).

ب. عندما يصنع متّجه المساحة زاوية (60°) مع محور ($+x$).

5. انطلق إلكترون داخل مجال كهربائي منتظم من حالة السكون من الصفيحة السالبة تحت تأثير المجال؛ فوصل إلى الصفيحة الموجبة خلال مدّة زمنية (2×10^{-8} s)، إذا كان مقدار المجال الكهربائي المنتظم يساوي (2×10^3 N/C)؛ فأجد المسافة الفاصلة بين الصفيحتين.

6. شحنة نقطية في الهواء تولّد تدفّقًا كهربائيًّا مقداره (-1×10^3 Nm²/C) خلال سطح غاوس كروي، نصف قطرة (10 cm) وتقع الشحنة في مركزه، كما في الشكل. أجد ما يأتي:

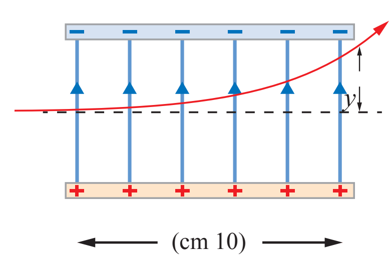


أ. مقدار الشحنة النقطية (q)، وأحدد نوعها.

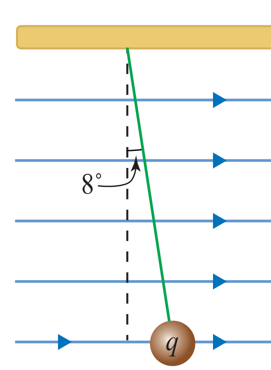
ب. إذا تضاعف نصف قطر سطح غاوس، فما مقدار التدفّق؟

7. دخل جسيم ألفا بسرعة أُفقية باتّجاه ($+x$)، مقدارها (2×10^7 m/s) مجالًا كهربائيًّا منتظمًا، تتّجه خطوطه باتّجاه محور ($+y$)، كما في الشكل.

إذا علمتُ أنّ مقدار المجال الكهربائي يساوي (3×10^3 N/C)، وأنّ المسافة الأُفقية التي قطعها الجسم داخل المجال (10 cm)؛ فأحسبُ مقدار الإزاحة الرأسية للجسيم (بإهمال تأثير الجاذبية الأرضية). كتلة جسيم ألفا (6.6×10^{-27} kg)، وشحنته (3.2×10^{-19} C).



8. كرة كتلتها (5 g) مشحونة ومعزولة، معلّقة بخيط طوله (30 cm) داخل مجال كهربائي منتظم أُفقي الاتّجاه، كما في الشكل. إذا علمتُ أنّ شحنة الكرة (1 μC) وأنّها في حالة اتزان سكوني؛ فأجدُ مقدار المجال الكهربائي، ($g = 10$ m/s²).



9. كرة موصلة قطرها (2.4 m) مشحونة بشحنة موجبة موزّعة على سطحها بانتظام، بكثافة سطحية مقدارها (80μ C/m²). أجد ما يأتي:

أ. الشحنة الكلّية للكرة.

ب. مقدار التدفّق الكلّي الذي يخرج من سطح الكرة.

الوحدة 3

الجهد الكهربائي والمواساعة

Electric Potential and Capacitance

أتأمّل الصورة

في ظل الاحتياج الواسع والدائم لتخزين الطاقة الكهربائية، أسهمت البطّاريات بدور كبير في تخزين الطاقة؛ مثل بطّاريات الليثيوم المستعملة في السيارات الكهربائية؛ ولكنّها تحتاج إلى وقت طويل نسبيًّا لشحنها، والطاقة المختزنة فيها قليلة نسبيًّا، إضافة إلى كونها أقلّ أمانًا لاحتوائها على موادّ سامّة.

يلوح في الأفق أمل جديد عن طريق تطوير الباحثين موادّ بوليميرية جديدة في المواسعات الفائقة التخزين (SuperCapacitors)؛ تُمكّنهم من تخزين طاقة كهربائية هائلة في تلك المواسعات، إضافة إلى كونها أكثر أمانًا؛ فهي تعتمد على الماء بشكل أساسي، كما تتميّز بإمكانية شحنها خلال مدّة زمنية قصيرة جدًّا مقارنة مع بطّاريات الليثيوم.

ما العوامل التي تعتمد عليها الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع؟

الفكرة العامّة:

دراسة الجهد الكهربائي وفرق الجهد وطاقة الوضع الكهربائية المختزنة؛ تساعدنا على فهم كثير من المشاهدات والظواهر، إضافة إلى تطبيقاتها العملية كما في المواسعات الكهربائية، التي تُستعمل في تخزين الطاقة الكهربائية في العديد من الأجهزة والأدوات.

الدرس الأول: الجهد الكهربائي لشحنة نقطية

Electric Potential of a Point Charge

الفكرة الرئيسة: الجهد الكهربائي عند نقطة ما والناشئ عن شحنة نقطية؛ يعتمد على كلّ من مقدار تلك الشحنة وبُعد النقطة عنها، أمّا الشغل المبذول في نقل شحنة من نقطة إلى أُخرى في مجال كهربائي؛ فيعتمد على فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين، ويُختزن على شكل طاقة وضع كهربائية.

الدرس الثاني: الجهد الكهربائي لموصل مشحون

Electric Potential of a Charged Conductor

الفكرة الرئيسة: الجهد الكهربائي داخل الموصل الكروي المشحون ثابت، بينما يتغيّر خارج الموصل بتغيّر البُعد عن مركزه، ويُعدّ سطح الموصل الكروي سطح تساوي جهد.

الدرس الثالث: المواسعة الكهربائية

Electrical Capacitance

الفكرة الرئيسة: تختلف المواسعات الكهربائية في أشكالها ومواسعاتها وطرائق توصيلها معًا؛ وتكمن أهمّيتها في قدرتها على تخزين الطاقة الكهربائية، وتُستعمل في العديد من التطبيقات العملية.

تجربة استهلالية

العلاقة بين فرق الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي

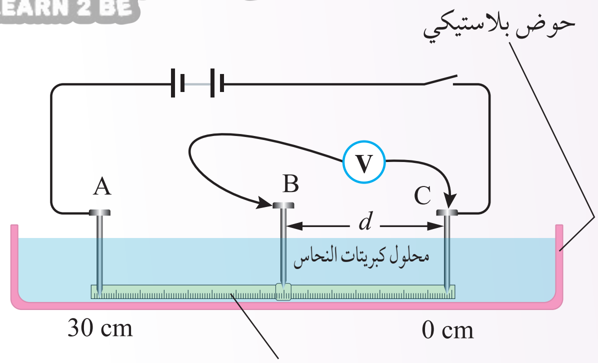
الموادّ والأدوات: مصدر طاقة (تيار مستمر DC)، فولتميتر، أسلاك توصيل، (3) لواقط فلزية، مسطرة بلاستيكية (30 cm)، حوض بلاستيكي، محلول كهرلي قليل التركيز (محلول كبريتات النحاس)، (3) مسامير.

إرشادات السلامة: الحذر في التعامل مع محلول كبريتات النحاس.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُثبّت كلًّا من المسطرة البلاستيكية أسفل الحوض، ومسمارًا عند كل طرف من طرفَي المسطرة في النقطتين (A و C)، ثمّ أسكب محلول كبريتات النحاس بحذر في الحوض بحيث تبقى قاعدة المسمارين بارزة فوق المحلول كما في الشكل.
2. أصل أجزاء الدارة الكهربائية؛ بحيث أُثبّت طرف السلك المتّصل بالقطب الموجب للفولتميتر بقاعدة مسمار عند النقطة B قابل للحركة بين النقطتين (A و C).
3. **أتوقّع** كيف تتغيّر قراءة الفولتميتر كلّما تحرّك المسمار B نحو النقطة A بعد إغلاق الدارة.
4. **ألاحظ:** أُغلقُ الدارة وأُحرّك رأس المسمار B أفقيًّا بخطّ مستقيم إلى نقطة تبعد (3 cm) عن النقطة C $(d = 3\text{ cm})$ وأُدوّن كلًّا من قراءة الفولتميتر والإزاحة d في الجدول.



مسطرة بلاستيكية طولها 30cm مثبتة في قعر الحوض

5. أُكرّر الخطوة (4) عدّة مرات؛ بزيادة الإزاحة d مقدار (3 cm) في كل مرة $(d = 6, 9, \ldots 27\text{ cm})$، وأُدوّن نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. **أرسمُ** بيانيًّا العلاقة بين الجهد الكهربائي (قراءة الفولتميتر) على محور y والإزاحة d على محور x؛ بحيث يكون الجهد بوحدة V (Volt) والإزاحة بوحدة m (meter).
2. **أحسبُ** ميل الخط $(\frac{\Delta V}{\Delta d})$ بين النقطتين $(d = 9\text{ cm})$؛ و $(d = 21\text{ cm})$؛ إذ يُمكن افتراض المجال بينهما منتظمًا، والعلاقة بين الجهد والإزاحة خطّية تقريبًا.
3. **أتنبّأ:** ما العلاقة بين ميل الخط ومقدار المجال الكهربائي؟
4. **أتوقّع** مصادر الخطأ المحتملة في التجربة.
5. **أُفسّر:** اختيار مسطرة بلاستيكية وليس فلزّية.
6. **أُحلّل:** استبعاد بداية الخط في الرسم البياني ونهايته.

الفكرة الرئيسة:

الجهد الكهربائي عند نقطة ما والناشئ عن شحنة نقطية؛ يعتمد على كلّ من مقدار تلك الشحنة وبُعد النقطة عنها، أمّا الشغل المبذول في نقل شحنة من نقطة إلى أخرى في مجال كهربائي؛ فيعتمد على فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين، ويُختزن على شكل طاقة وضع كهربائية.

نتاجات التعلّم:

- أُعرّف الجهد الكهربائي بالكلمات وبمعادلة.
- أصف كمّيًّا الجهد الكهربائي عند نقطة في المجال الكهربائي لشحنة نقطية، أو مجموعة شحنات نقطية.
- أصف كمّيًّا فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.
- أربطُ التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية بالشغل الذي يبذله المجال في تحريك الشحنة من نقطة إلى أخرى، في المجال الكهربائي (المنتظم وغير المنتظم) رياضيًّا.

المفاهيم والمصطلحات:

جهد كهربائي Electric Potential

فرق الجهد الكهربائي Electric Potential Difference

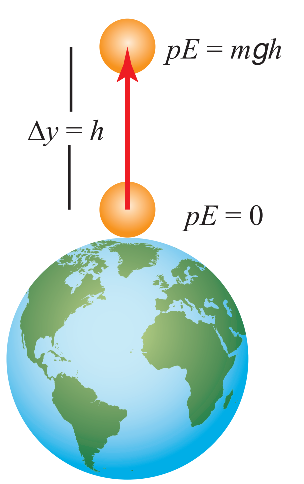
طاقة الوضع الكهربائية Electric Potential Energy

الجهد الكهربائي الناشىء عن شحنة نقطية

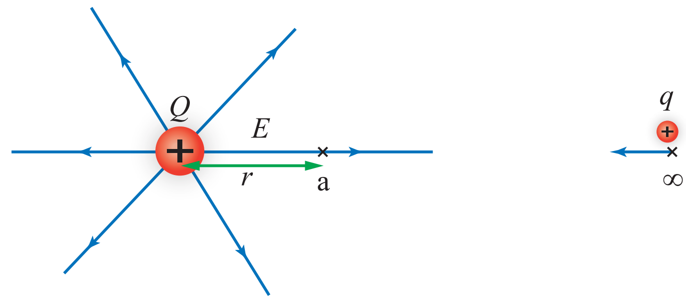
Electric Potential due to Point Charge

عند رفع جسم من سطح الأرض بسرعة ثابتة إلى ارتفاع $\Delta y = h$ فوق سطح الأرض، أُؤثّر بقوّة خارجية بعكس قوّة الجاذبية الأرضية، وشغل تلك القوّة يختزن في نظام (الجسم – الأرض) على شكل طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية الأرضية تعتمد على وزن الجسم والارتفاع (h)، أنظرُ إلى الشكل (1). بالمقابل هل يُبذل شغل لنقل شحنة كهربائية في مجال كهربائي؟ وهل يُختزن ذلك الشغل على شكل طاقة وضع كهربائية في نظام (المجال الكهربائي – الشحنة الكهربائية)؟

تعلمتُ في الوحدة السابقة أنّ شحنة كهربائية نقطية $+Q$ تولّد مجالًا كهربائيًّا حولها؛ يتناسب مقداره عكسيًّا مع مربّع البُعد عن تلك الشحنة، بحيث يُصبح صفرًا $(E = 0)$ عند نقطة اللانهاية (∞) والتي اصطُلِح على تسميتها النقطة المرجعية. فإذا أردتُ نقل شحنة اختبار نقطية موجبة $+q$ من اللانهاية بسرعة ثابتة إلى نقطة ما مثل a تبعد مسافة r عن الشحنة النقطية $+Q$



الشكل (1): شغل قوّة خارجية يُختزن على شكل طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية الأرضية.



الشكل (2): نقل شحنة اختبار q من اللانهاية، إلى نقطة داخل المجال الكهربائي لشحنة نقطية Q.

كما في الشكل (2)؛ فإنّ ذلك يتطلّب بذل شغل W للتغلّب على قوّة التنافر الكهربائية بين الشحنتين، إذ يُختزن هذا الشغل على شكل **طاقة وضع كهربائية Electric potential energy (*PE*)** في نظام (مجال الشحنة Q- الشحنة q)، التي يُمكنني تعريفها بأنّها الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية؛ لنقل شحنة اختبار موجبة $+q$ بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى نقطة في المجال الكهربائي للشحنة Q. وسنُشير في هذا الدرس إلى طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في نظام (المجال الكهربائي – الشحنة q) بطاقة الوضع الكهربائية للشحنة q عند نقطة ما في مجال كهربائي.

أُفكّر: إذا نُقِلت شحنة إختبار $+q$ بتسارع ثابت بوساطة قوة خارجية من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي، فهل يساوي شغل القوة الخارجية التغيّر في طاقة الوضع؟ أُوضّح اجابتي.

ويُعطى الشغل W الذي تبذله القوّة الخارجية في نقل شحنة اختبار صغيرة موجبة $+q$ من اللانهاية إلى النقطة a بالعلاقة:

$$W = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0}$$

وبذلك؛ فإنّ الشغل المبذول لنقل وحدة الشحنة الموجبة بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى النقطة a في مجال الشحنة Q يُعطى بالعلاقة:

$$\frac{W}{q} = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r}\,\frac{1}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r}\,\frac{Q}{r}$$

وتُمثّل هذه العلاقة **الجهد الكهربائي Electric potential (*V*)** عند نقطة ما، مثل a في المجال الكهربائي للشحنة Q، ويُعرّف بأنّه: «الشغل الذي تبذله قوّة خارجية لنقل وحدة الشحنة الموجبة بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى تلك النقطة في المجال الكهربائي». ويُعبّر عنه رياضيًّا بالعلاقة (بافتراض الوسط هواء أو فراغ):

$$V = \frac{W}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_\circ r}\,\frac{Q}{r} = k\frac{Q}{r}$$

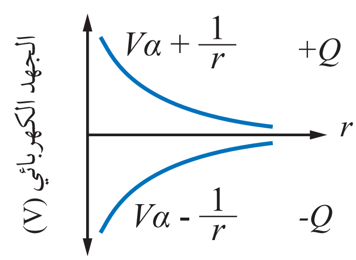
حيث V: الجهد الكهربائي عند نقطة ما.

Q: مقدار الشحنة المولّدة للمجال الكهربائي.

r: بُعد النقطة عن الشحنة المولّدة للمجال.

k: ثابت التناسب.

والجهد الكهربائي لنقطة يُعطى بالنسبة إلى نقطة مرجعية موجودة في اللانهاية جهدها يساوي صفرًا ($V_{\infty} = 0$). الجهد الكهربائي كمّية قياسية، ويُقاس بوحدة الفولت (Volt) ويُرمز له بالرمز (V) حيث 1 V = 1 N.m/C؛ لذا، يكون الجهد الكهربائي موجبًا عندما تكون الشحنة المولّدة للمجال موجبة، وسالبًا عندما تكون الشحنة المولّدة للمجال سالبة، ويُبيّن الشكل (3) التمثيل البياني للعلاقة بين الجهد الكهربائي عند نقطة وبُعد النقطة عن الشحنة في الحالتين: عندما تكون الشحنة موجبة وعندما تكون سالبة، وسالب ميل المماس عند نقطة على المنحنى يُمثّل المجال الكهربائي عند تلك النقطة.



الشكل (3): العلاقة بين الجهد الكهربائي عند نقطة، وبُعد النقطة عن الشحنة.

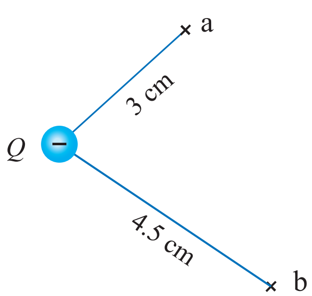
أتحقّق: ما العوامل التي يعتمد عليها الجهد الكهربائي عند نقطة ما، والناشئ عن شحنة نقطية؟

المثال 1

شحنة كهربائية $Q = -0.05\ \mu C$ موضوعة في الهواء كما في الشكل (4)، أحسبُ:

أ . الجهد الكهربائي عند النقطتين (a ,b).

ب . الفرق في الجهد الكهربائي بين النقطتين a و b ($V_a - V_b$).



الشكل (4): الفرق في الجهد الكهربائي بين نقطتين.

المعطيات: $Q = -0.05\ \mu C,\ r_a = 3\ cm,\ r_b = 4.5\ cm$

المطلوب: $V_a = ?,\ V_b = ?\ , V_a - V_b = ?$

الحلّ:

أ. الجهد الكهربائي عند a (V_a):

$$V_a = k\frac{Q}{r_a} = 9 \times 10^9 \frac{-0.05 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-2}} = -1.5 \times 10^4\ V$$

الجهد الكهربائي عند b (V_b):

$$V_b = k\frac{Q}{r_b} = 9 \times 10^9 \frac{-0.05 \times 10^{-6}}{4.5 \times 10^{-2}} = -1 \times 10^4\ V$$

ب . الفرق في الجهد ($V_a - V_b$):

$$V_a - V_b = -1.5 \times 10^4 - (-1 \times 10^4) = -5 \times 10^3\ V$$

ماذا تعني الإشارة السالبة في مقدار الفرق في الجهد ($V_a - V_b$)؟

تمرين

شحنة كهربائية موضوعة في الهواء، والجهد الكهربائي الناشيء عنها عند نقطة b تبعد مسافة (0.08 m) عن تلك الشحنة يساوي (-4.5×10^3 V). أُجيب عمّا يأتي:

أ . ما نوع الشحنة الكهربائية؟

ب. ما مقدار الشحنة الكهربائية؟ هل يقلّ الجهد أم يزداد عند النقطة b كلّما بعدت أكثر عن الشحنة؟

الجهد الكهربائي الناشيء عن عدّة شحنات نقطية

Electric Potential due to Point Charges

أفترض أنّ النقطة a تقع في مجال عدّة شحنات ($Q_1, Q_2, Q_3, \ldots$) وبما أنّ الجهد الكهربائي كمّية قياسية؛ فإنّ الجهد الكهربائي عند النقطة a يساوي المجموع الجبري لجهود تلك النقطة الناشئ عن تلك الشحنات:

$$V_a = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots$$

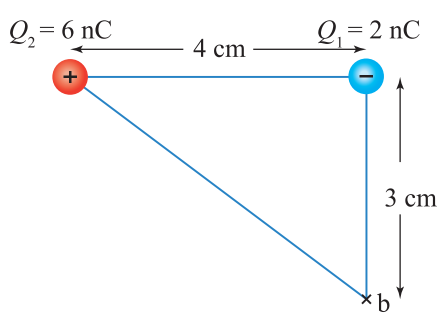
$$V_a = k\left(\frac{Q_1}{r_1} + \frac{Q_2}{r_2} + \frac{Q_3}{r_3} + \ldots\right)$$

المثال 2

شحنتان موضوعتان في الهواء كما في الشكل (5). بناءً على البيانات المُبيّنة في الشكل، أحسبُ الجهد الكهربائي:

أ . عند النقطة b.

ب . عند موقع الشحنة الأولى.



الشكل (5): الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنتين نقطيتين.

المعطيات: البيانات على الشكل.

المطلوب: $V_b = ?,\ V_1 = ?$

الحلّ: أ. جهد النقطة b الناشيء عن الشحنتين:

$$V_b = V_{b1} + V_{b2},\quad r_{b2} = \sqrt{(3^2 + 4^2)} = 5 \text{ cm}$$

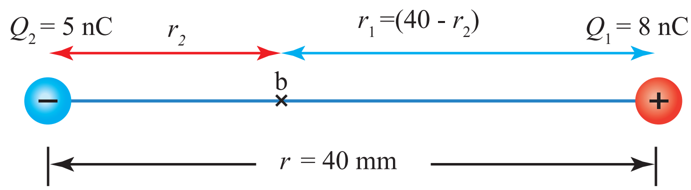
$$V_b = k\left(\frac{Q_1}{r_{b1}} + \frac{Q_2}{r_{b2}}\right) = 9 \times 10^9\left(\frac{-2 \times 10^{-9}}{3 \times 10^{-2}} + \frac{6 \times 10^{-9}}{5\times10^{-2}}\right) = 1.68 \times 10^3 \text{ V}$$

ب . الجهد عند موقع الشحنة الأولى (الناشئ عن الشحنة الثانية):

$$V_1 = k\frac{Q_2}{r_2} = 9 \times 10^9\ \frac{6 \times 10^{-9}}{4 \times 10^{-2}} = 1.35 \times 10^3 \text{ V}$$

المثال 3

شحنتان موضوعتان في الهواء (-5 nC, 8 nC) والمسافة بينهما (40 mm). أجد بعد نقطة عن الشحنة (-5 nC) تقع على الخطّ الواصل بين الشحنتين، بحيث يكون الجهد الكهربائي عندها يساوي صفرًا.



الشكل (6): جهد النقطة b بين الشحنتين يساوي صفرًا.

المعطيات: $Q_1 = 8$ nC, $Q_2 = -5$ nC, $r = 40$ mm, $V_b = 0$.

المطلوب: $r_2 = ?$

الحلّ:

أفترضُ نقطة مثل b تقع على بعد r_2 عن الشحنة الثانية، وعلى بعد r_1 عن الشحنة الأولى كما هو مُبيّن في الشكل (6)، والجهد الكهربائي عندها يساوي صفرًا. ومن ثمّ:

$$V_b = V_1 + V_2$$

$$0 = V_1 + V_2 \Rightarrow V_1 = -V_2$$

$$k\frac{Q_1}{r_1} = -k\frac{Q_2}{r_2}\ ,\quad r_1 = 40 - r_2$$

$$\frac{8}{40 - r_2} = -\frac{-5}{r_2}$$

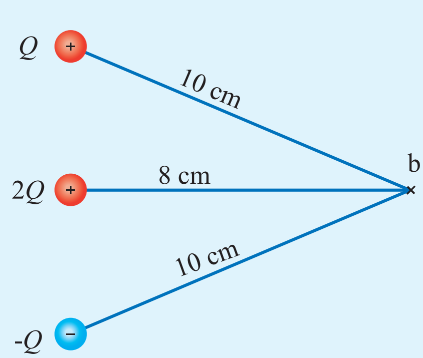
$$8\,r_2 = 5(40 - r_2) \Rightarrow 13\,r_2 = 200 \Rightarrow r_2 = 15.4 \text{ mm}$$

تمرين

(3) شحنات كهربائية $(Q, 2Q, -Q)$ موضوعة في الهواء كما في الشكل، فإذا علمتُ الجهد الكهربائي الناشيء عن الشحنة Q عند النقطة b يساوي (360 V)؛ فأحسبُ:

أ. مقدار كلّ من الشحنات الكهربائية الثلاث.

ب. الجهد الكهربائي عند النقطة b.



العلاقة بين الشغل والتغيّر في طاقة الوضع الكهربائية
Relation between Work and Electric Potential Energy

عند نقل شحنة اختبار q من نقطة إلى أخرى في مجال كهربائي، ما العلاقة التي تربط بين كلّ من الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية لنقل تلك الشحنة، وفرق الجهد الكهربائي بين النقطتين؟ وما علاقة كلّ منهما بالتغيّر في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة q؟

نقل شحنة من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي
Transfer of a Charge from Infinity to a Point in the Electric Field

الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية لنقل شحنة اختبار نقطية موجبة $+q$ بسرعة ثابتة من اللانهاية، إلى نقطة ما في المجال الكهربائي، يُختزن على شكل طاقة وضع كهربائية يُعطى بالعلاقة:

$$W = PE_f - PE_i\,(\infty)$$

وبما أنّ $PE_i\,(\infty) = 0$؛ فإنّ الجهد الكهربائي عند تلك النقطة يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$V = \frac{W}{q} = \frac{PE}{q}$$

لذا، يُمكنني إعادة تعريف الجهد الكهربائي عند نقطة على النحو الآتي: طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في وحدة الشحنة الموجبة عند تلك النقطة.

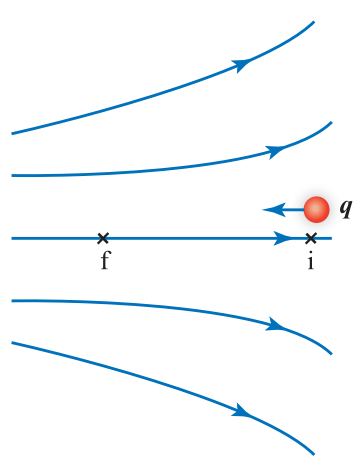
نقل شحنة من نقطة إلى أخرى في المجال الكهربائي
Transfer of a Charge from a Point to a Point in the Electric Field

عند نقل شحنة اختبار نقطية q من نقطة i إلى أُخرى f كما في الشكل (7)؛ فإنّ الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية يساوي التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة، ويُعطى بالعلاقة الآتية:

$$W = \Delta PE = PE_f - PE_i$$

أمّا **فرق الجهد الكهربائي Electric potential difference** بين النقطتين (ΔV) يساوي التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة q عند انتقالها من نقطة إلى أخرى في المجال الكهربائي مقسومًا على الشحنة q، ويُعبّر عنه بصورة رياضية على النحو الآتي:

أُصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح العلاقة بين الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية، والتغيّر في كلّ من طاقة الوضع الكهربائية والجهد الكهربائي مع أمثلة تطبيقية، ثم أُشاركه مع معلمي وزملائي في الصف.



الشكل (7): نقل شحنة اختبار من نقطة إلى أخرى في المجال الكهربائي.

سؤال: هل تقل طاقة الوضع الكهربائية للشحنة q عند نقلها من النقطة i ألى النقطة f؟

$$\Delta V = V_f - V_i = \frac{\Delta PE}{q}$$

حيث: V_i: الجهد الابتدائي عند النقطة التي نقلت منها الشحنة.

V_f: الجهد النهائي عند النقطة التي نقلت إليها الشحنة.

ومن ثمّ، فإنّ العلاقة التي تربط بين الشغل الذي تبذله قوّة خارجية، والتغيّر في طاقة الوضع وفرق الجهد عند نقل شحنة q من نقطة البداية i إلى نقطة النهاية f، تكون على الصورة الآتية:

$$W_{i \to f} = \Delta PE = PE_f - PE_i = q\Delta V = q(V_f - V_i)$$

أمّا شغل القوّة الكهربائية؛ فإنّه يساوي سالب شغل القوّة الخارجية؛ أي إنّ:

$$W_{i \to f} = -\Delta PE = -(PE_f - PE_i) = -q\Delta V = -q(V_f - V_i)$$

* نظام (المجال الكهربائي – الشحنة الكهربائية) نظام محافظ، والقوّة الكهربائية قوّة محافظة؛ فعندما تكون القوّة الكهربائية هي القوّة الوحيدة المؤثّرة في الشحنة؛ فإنّ مجموع الطاقة الميكانيكية للنظام ثابت. بمعنى: مجموع طاقة الوضع الكهربائية وطاقة الحركة يساوي مقدارًا ثابتًا، وهذا يعني أنّ المجموع الجبري للتغيّر في طاقة الحركة والتغيّر في طاقة الوضع الكهربائية يساوي صفرًا، ويُمكنني صياغة ذلك بالعلاقة:

$$(\Delta KE + \Delta PE = 0)$$

أتحقّق: أصف العلاقة التي تربط بين الشغل الذي تبذله قوّة خارجية والتغيّر في طاقة الوضع الكهربائية، عند نقل بروتون من نقطة إلى أخرى بعكس إتجاه المجال. أيّ الجهدين أكبر؟ الجهد عند النقطة التي انتقل منها البروتون أم التي انتقل إليها.

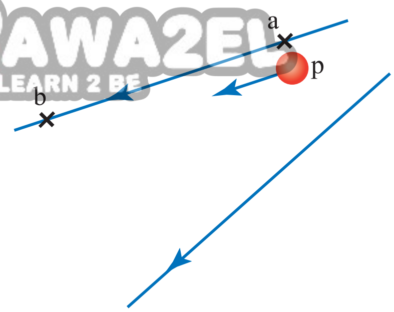
أفكّر: وُضِعت شحنة كهربائية عند نقطة في مجال كهربائي، أُفرّق بين الجهد الكهربائي وطاقة الوضع الكهربائية للشحنة الموضوعة عند تلك النقطة.

المثال 4

تحرّك بروتون من النقطة a إلى النقطة b باتجاه المجال الكهربائي كما في الشكل (8). إذا علمتُ أنّ فرق الجهد بين النقطتين $(V_b - V_a = -5\ V)$ وشحنة البروتون $1.6 \times 10^{-19}\ C$؛ فأحسبُ:

أ. شغل القوّة الكهربائية المبذول لتحريك البروتون من a إلى b.

ب. التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية للبروتون.



الشكل (8): حركة بروتون في مجال كهربائي.

المعطيات: $q_p = 1.6 \times 10^{-19}\ C,\ \ V_{ab} = -5\ V$

المطلوب: $W_{a\to b} = ?,\ \ PE_{ab} = ?$

الحلّ:

أ. $W_{a\to b} = -qV_{ab} = -1.6 \times 10^{-19} \times -5 = 8 \times 10^{-19}\ J$

ب. $W_{a\to b} = -PE_{ab} \Rightarrow PE_{ab} = -8 \times 10^{-19}\ J$

والإشارة السالبة تعني أنّ طاقة الوضع الكهربائية للبروتون، قلّت عند انتقاله من النقطة a إلى النقطة b.

المثال 5

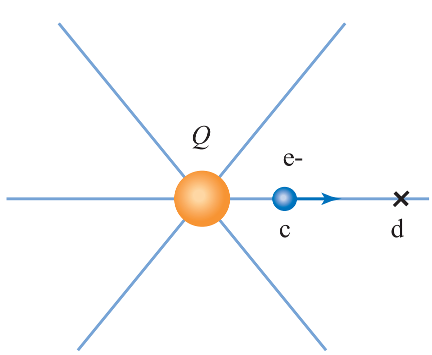
وُضِع إلكترون في وضع السكون عند النقطة c في المجال الكهربائي للشحنة Q؛ فتحرّك بفعل قوّة المجال الكهربائي للشحنة إلى النقطة d كما في الشكل (9) ليخسر من طاقة وضعه الكهربائية $3.2 \times 10^{-18}\ J$ إذا علمتُ أنّ شحنة الإلكترون $-1.6 \times 10^{-19}\ C$؛ فأُجيب عمّا يأتي:

أ . أُحدّد اتّجاه خطوط المجال الكهربائي.

ب . أحسبُ مقدار فرق الجهد بين النقطتين V_{cd}.

جـ . أيّهما أكبر، جهد النقطة c أم النقطة d؟

د . أحسبُ مقدار الشغل الذي بذلته القوّة الكهربائية في تحريك الإلكترون من النقطة c إلى النقطة d.



الشكل (9): إلكترون موضوع في مجال الشحنة Q.

المعطيات: $q_e = -1.6 \times 10^{-19}\ C,\ \ PE_{cd} = -3.2 \times 10^{-18}\ J$

المطلوب: $V_{cd} = ?,\ \ W_{c\to d} = ?$

الحلّ:

أ. بما أنّ شحنة الإلكترون سالبة؛ فإنّ حركته تكون بعكس اتّجاه المجال الكهربائي تحت تأثير القوّة الكهربائية. وبما أنّ الحركة من النقطة c إلى النقطة d بعكس اتّجاه المجال، أستنتجُ أنّ اتّجاه خطوط المجال نحو مركز الشحنة؛ ما يدلّ على أنّ الشحنة سالبة.

ب.

$$PE_{cd} = qV_{cd}$$

$$-3.2 \times 10^{-18} = -1.6 \times 10^{-19} \times V_{cd}$$

$$V_{cd} = 20\ \text{V}$$

جـ. بما أنّ V_{cd} موجب (+20) وبما أنّ $V_{cd} = V_d - V_c$ فهذا يعني أنّ V_d أكبر من V_c أو بما أنّ خط المجال يكون باتجاه تناقص الجهد؛ فإنّ جهد النقطة c أقل من جهد النقطة d. ولكن القيمة المطلقة لجهد النقطة تتناقص مع زيادة البعد عن الشحنة $|V_c| > |V_d|$

د.

$$W_{c\to d} = -qV_{cd} = -(-1.6 \times 10^{-19}) \times 20 = 3.2 \times 10^{-18}\ \text{J}$$

أو مباشرة من العلاقة:

$$W_{c\to d} = -PE_{cd} = -(-3.2 \times 10^{-18}) = 3.2 \times 10^{-18}\ \text{J}$$

الربط مع العلوم الحياتية

أسماك صاعقة تُنتج جهدًا كهربائيًّا يصل إلى 860 V

الأنقليس Eels أسماك تعيش في حوض الأمازون، عند ملامسة السطح السفلي لرأسها جسم الفريسة؛ فإنّه يتفاعل معها ويُنتج فرق جهد كهربائي يصل عند بعض الأنواع إلى 860 V على شكل صعقة كهربائية تُصيب الجهاز العصبي للفريسة بالشلل المؤقت، وهذه الميزة تستعملها تلك الأسماك وسيلة دفاع عن نفسها أيضًا.

فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم

Electric Potential Difference in a Uniform Electric Field

تعلمتُ سابقًا كيفية إيجاد فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي غير منتظم ناشئ عن شحنات نقطية، وأنّ المجال الكهربائي المنتظم ثابت مقدارًا واتّجاهًا عند النقاط جميعها. والآن، كيف يُمكنني إيجاد فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم؛ مثل المجال الكهربائي بين صفيحتين موصلتين متوازيتين مشحونتين، إحداهما شحنتها سالبة ($-Q$) والأُخرى شحنتها موجبة ($+Q$)، كما في الشكل (10)؟

عند وضع شحنة اختبار موجبة $+q$ عند نقطة ما مثل a في مجال كهربائي منتظم E كما في الشكل (10)، فإنّها تتأثر بقوّة كهربائية حسب العلاقة: $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$، والشغل الذي تبذله القوّة الكهربائية لتحريك تلك الشحنة من النقطة a إلى النقطة b، يُعطى بالعلاقة:

$$W_{a\to b} = \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{d}$$

حيث $\boldsymbol{d}$ الازاحة من النقطة a الى النقطة b. وبتعويض مقدار القوّة الكهربائية F فإنّ علاقة الشغل تؤول إلى:

$$W_{a\to b} = q\,\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{d} = qEd\cos\theta$$

وكما تعلّمتُ سابقًا؛ يرتبط شغل القوّة الكهربائية بفرق الجهد الكهربائي بالعلاقة:

$$W_{a\to b} = -qV_{ab} = -q(V_b - V_a)$$

أستنتجُ من مساواة المعادلتين السابقين للشغل أنّ:

$$V_{ab} = (V_b - V_a) = -\,\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{d}$$

أي إنّ: $V_{ab} = (V_b - V_a) = -Ed\cos\theta$

حيث E: مقدار المجال الكهربائي المنتظم.

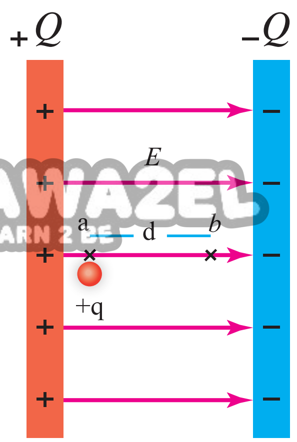
d: مقدار الإزاحة من النقطة a إلى النقطة b.

θ: الزاوية بين اتّجاه المجال $\boldsymbol{E}$ وإتجاه الإزاحة $\boldsymbol{d}$ ($0^\circ < \theta < 180^\circ$).

$(V_a - V_b)$: فرق الجهد بين النقطتين a و b.

تربط هذه العلاقة بين مقدار المجال الكهربائي المنتظم وفرق الجهد؛ بحيث يُمكنني حساب مقدار المجال الكهربائي المنتظم بين صفيحتين البُعد بينهما d وفرق الجهد بينهما ΔV على النحو الآتي:

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$



الشكل (10): مجال كهربائي منتظم بين صفيحتين موصلتين متوازيتين مشحونتين.

سؤال: ما إشارة مقدار فرق الجهد V_{ab}؟

أفكّر: ما وجه الشبه بين الشغل المبذول بوساطة القوة الكهربائية لنقل شحنة كهربائية من نقطة إلى أخرى في مجال كهربائي باتجاه عمودي على المجال، وبين الشغل المبذول بوساطة قوّة الجاذبية عند نقل ثقل ما أفقيًّا من موقع إلى آخر على سطح الأرض؟

إذ يتغيّر فرق الجهد ΔV بانتظام مع تغيّر الإزاحة d، وقد سبق وأستعملتُ هذه العلاقة عند إجرائي التجربة الاستهلالية حول العلاقة بين الجهد والمجال.

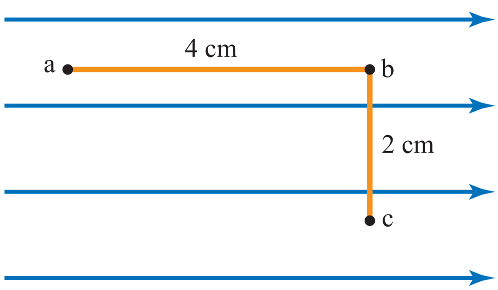
أتحقّق: ما العوامل التي يعتمد عليها فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم؟

المثال 6

مجال كهربائي منتظم مقداره 2×10^4 V/m تقع داخله (3) نقاط: (a, b, c) كما في الشكل (11)، أحسبُ:

أ . فرق الجهد الكهربائي V_{ab}، V_{bc}.

ب. الشغل المبذول من قِبَل القوّة الكهربائية؛ لنقل شحنة موجبة مقدارها 3×10^{-9} C من النقطة a إلى النقطة b.



الشكل (11): (3) نقاط في مجال منتظم.

المعطيات: $d_{b\to c} = 2$ cm, $d_{a\to b} = 4$ cm, $q = 3 \times 10^{-9}$ C, $E = 2 \times 10^4$ V/m

المطلوب: $V_{bc} = ?,\ V_{ab} = ?,\ W_{a\to b} = ?$

الحلّ:

أ.

$$V_{ab} = -Ed_{a\to b} \cos\theta = -(2 \times 10^4)(0.04) \cos 0° = -800 \text{ V}$$

$$V_{bc} = -Ed_{b\to c} \cos\theta = -(2 \times 10^4)(0.02) \cos 90° = 0$$

وهذا يعني أنّ: $V_b = V_c$

ب.

$$W_{a\to b} = -qV_{ab} = -3 \times 10^{-9} \times -800 = 2.4 \times 10^{-6} \text{ J}$$

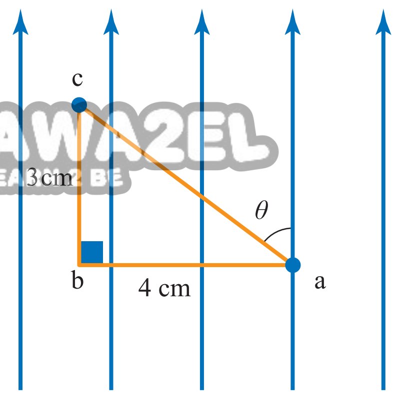
المثال 7

يُمثّل الشكل (12) مجالًا كهربائيًّا منتظمًا تقع داخله (3) نقاط (a,b,c). إذا علمتُ أنّ فرق الجهد الكهربائي بين b و c (V_{bc} = -600 V)؛ فأحسبُ:

أ. مقدار المجال الكهربائي.

ب. فرق الجهد الكهربائي (V_c - V_a).

جـ. هل تبذل القوّة الكهربائية شغلًا لنقل شحنة ما من النقطة a إلى النقطة b؟



الشكل (12): (3) نقاط في مجال منتظم.

المعطيات: $d_{a\to b} = 4$ cm, $d_{b\to c} = 3$ cm, $V_{bc} = -600$ V

المطلوب: $E = ?$, $(V_c - V_a) = ?$

الحلّ:

أ.

$$V_{bc} = -Ed_{b\to c} \cos 0^\circ$$

$$-600 = -E \times 0.03 \times 1$$

$$E = \frac{600}{0.03} = 2 \times 10^4 \text{ V/m}$$

ب . حسب فيثاغورس:

$$d_{a\to c} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ cm}$$

يُمكنني إيجاد V_{ac} عن طريق إحدى المسارين:

عن طريق المسار a→c :

$$V_{ac} = -Ed_{a\to c} \cos \theta$$

$$= -(2 \times 10^4) \times 0.05 \times \frac{3}{5} = 600 \text{ V}$$

أو عن طريق المسار a→b→c :

$$V_{ac} = V_{ab} + V_{bc} = 0 + 600 = 600 \text{ V}$$

أستنتجُ من ذلك، أنّ فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم لا يتغيّر بتغيّر المسار بين النقطتين؛ لأنّ القوّة الكهربائية قوّة محافظة شغلها لا يعتمد على المسار.

جـ . لا؛ لأنّ جهد النقطة a يساوي جهد النقطة b (V_{ab} = 0) ومن ثمّ: $W_{a\to b} = -qV_{ab} = 0$

ملفّ تسلا Tesla Coil

ملفّ تسلا جهاز اخترعه العالم الكرواتي نيكولا تسلا عام 1891 م، يولّد الملفّ جهدًا كهربائيًّا عاليًا جدًّا يُمكن أن يصل إلى مليون فولت، ويُمكن عن طريقه نقل الطاقة الكهربائية لاسلكيًّا (مثل إضاءة مصباح فلورسنت قريب منه كما في الشكل (13/ أ)). يعمل ملف تسلا على تخزين الطاقة الكهربائية على شكل طاقة وضع كهربائية، تُطلق في صورة شرارة تُشبه البرق.

يُستعمل ملفّ تسلا بوصفه ملفّ اشتعال في آلات الاحتراق الداخلي كالسيّارات، ولا يزال يُستعمل بشكل أو بآخر في بعض الأجهزة والأنظمة؛ فالراديو والتلفاز يستعملان نوعًا مصغّرًا من ملفّات تسلا، كما يُمكن استعماله في توليد الأشعة السينية والأنوار الفسفورية، بالإضافة إلى استعماله في العروض التعليمية وفي مجال الترفيه لإنشاء البرق الاصطناعي كما في الشكل (13/ ب). لكنّه يُشكّل خطورة على الأجهزة الكهربائية القريبة منه؛ لذا، يجب أخذ احتياطات الأمن والسلامة.

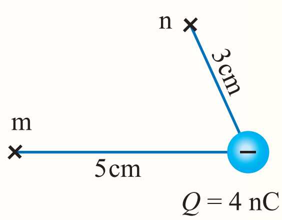
الشكل (13):

(أ) إضاءة مصابيح الفلورسنت عن بعد.

(ب) عروض ترفيهية.

مراجعة الدرس

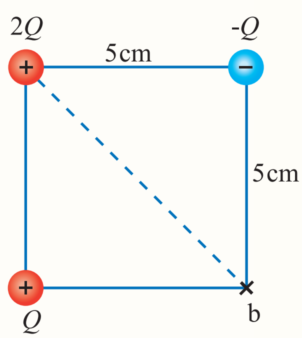
1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بكلّ من المفاهيم الآتية: جهد نقطة في مجال كهربائي، فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي.
2. **أُحلّل:** ماذا نعني بقولنا الجهد الكهربائي عند نقطة 5 فولت؟
3. التفكير الناقد: نقطتان لهما الجهد الكهربائي نفسه. هل هذا يعني أنّه لا أحتاج إلى بذل شغل لنقل شحنة من إحدى النقطتين إلى الأُخرى؟ أُوضّح إجابتي.
4. **أستعملُ المتغيّرات:** شحنة كهربائية سالبة مقدارها (4 nC) موضوعة في الهواء، والنقطة m تبعد عنها (5 cm) والنقطة n تبعد عنها (3 cm) كما في الشكل. أحسبُ:



أ . فرق الجهد بين النقطتين $(V_m - V_n)$.

ب. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائية لنقل بروتون من النقطة m إلى النقطة n؟

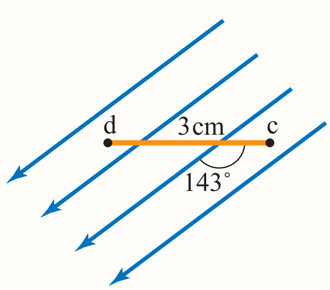
5. **أستعملُ المتغيّرات:** (3) شحنات نقطية موضوعة في الهواء، وموزّعة على رؤوس مربّع طول ضلعه (5 cm) كما في الشكل. إذا علمتُ أنّ الجهد الكهربائي عند النقطة b يساوي (400 V)؛ فأحسبُ:



أ . مقدار الشحنة Q.

ب. التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية لإلكترون عند نقله من اللانهاية إلى النقطة b.

6. **أستعملُ المتغيّرات:** قطرة زيت مشحونة اكتسبت طاقة وضع كهربائية مقدارها 1.6×10^{-16} J خلال تحرّكها مسافة (3 cm) في مجال كهربائي منتظم مقداره 2×10^{4} V/m، أحسبُ شحنة قطرة الزيت.
7. **أستعملُ المتغيّرات:** نقطتان c و d في مجال كهربائي منتظم مقداره 3×10^{3} V/m كما في الشكل، أحسبُ:



أ . فرق الجهد الكهربائي V_{cd}.

ب. الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية لنقل بروتون من النقطة d إلى النقطة c بسرعة ثابتة، علمًا بأنّ شحنة البروتون 1.6×10^{-19} C

الجهد الكهربائي لموصل مشحون
Electric Potential of a Charged Conductor

الفكرة الرئيسة:

الجهد الكهربائي داخل موصل كروي مشحون يكون ثابتًا، بينما يتغيّر خارج الموصل بتغيّر البعد عن مركزه، ويُعدّ سطح الموصل الكروي سطح تساوي جهد.

نتاجات التعلّم:

- أصف الجهد الكهربائي داخل موصل كروي مشحون وخارجه، وأُعبّر عنه بعلاقات رياضية.
- أصف سطوح تساوي الجهد الكهربائي المحيطة بموصل كروي.
- أحسبُ الجهد الكهربائي داخل موصل كروي مشحون وخارجه.

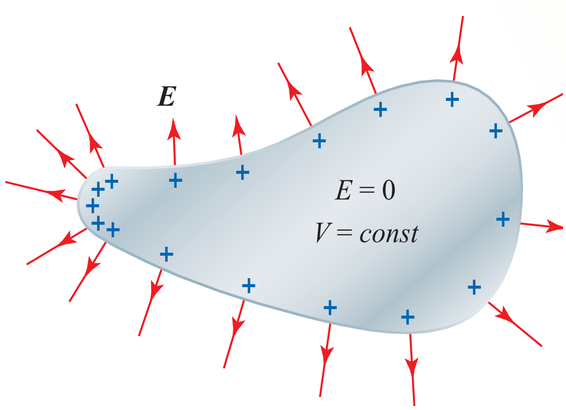
المفاهيم والمصطلحات:

سطح تساوي الجهد
Equipotential Surface

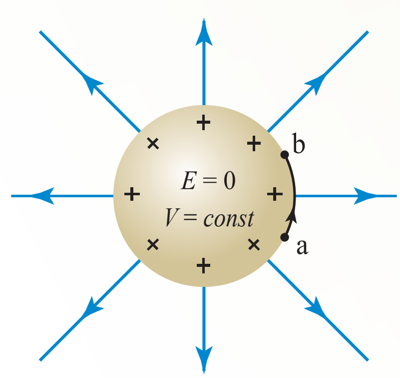
الجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون
Electric Potential of a Charged Spherical Conductor

عندما يكتسب موصل معزول شحنة كهربائية فائضة؛ فإنّ الشحنات تتباعد عن بعضها وتستقر على السطح الخارجي للموصل؛ بحيث تكون قوى التنافر بينها أقلّ ما يكون، ويختلف توزيع الشحنات حسب شكل الموصل، فإذا كان الموصل غير منتظم الشكل كما في الشكل (14)؛ فإنّ الكثافة السطحية للشحنة تكون أكبر عند الرؤوس المدببة؛ حيث تتقارب الشحنات وكذلك خطوط المجال الكهربائي، وإذا كان الموصل منتظم الشكل مثل الموصل الكروي في الشكل (15)؛ فإنّ الكثافة السطحية للشحنة تكون ثابتة؛ إذ تتوزّع الشحنات بانتظام وكذلك خطوط المجال الكهربائي.

وسندرس في هذا الدرس الجهد الكهربائي خارج موصل كروي، وعلى سطحه، وفي داخله على النحو الآتي:



الشكل (14): توزيع الشحنات وخطوط المجال الكهربائي لموصل مشحون غير منتظم الشكل.



الشكل (15): توزيع الشحنات وخطوط المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون.

الجهد الكهربائي خارج موصل كروي مشحون

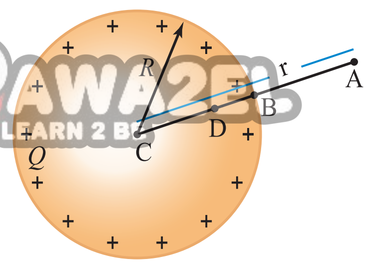
Electric Potential Outside a Charged Spherical Conductor

تعلمتُ سابقًا وعن طريق قانون غاوس، أنّ المجال الكهربائي خارج موصل كروي مشحون بشحنة Q، يُماثل تمامًا المجال الكهربائي الناشيء عن شحنة نقطية مساوية لشحنة الموصل وموضوعة في مركزه. وكذلك الحال عند حساب الجهد الكهربائي الناشيء عن موصل كروي مشحون بشحنة Q؛ فإنّنا نُعدّ الشحنة كأنّها مجمّعة في مركز الموصل.

وعليه، فإنّ جهد أيّ نقطة (مثل A) تبعد مسافة $(r > R)$ عن مركزه كما في الشكل (16) يُعطى بالعلاقة:

$$V = k\frac{Q}{r}$$

حيث r: بُعد النقطة عن مركز الموصل الكروي وتقع خارجه.



الشكل (16): الجهد الكهربائي لموصل كروي.

سؤال: أُقارن بين الجهد الكهربائي للنقاط (D, B, A).

الجهد الكهربائي على سطح موصل كروي مشحون

Potential at the Surface of a Charged Spherical Conductor

بما أنّ الشحنات مستقرّة على سطح الموصل كما في الشكلين (14 - 15)، ما يعني أنّ القوّة المحصّلة المؤثّرة في كلّ شحنة تساوي صفرًا، وبما أنّ خطوط المجال الكهربائي خارج الموصل تكون عمودية على سطح الموصل؛ فإنّ المجال الكهربائي لا يبذل شغلًا عند نقل شحنة من النقطة a إلى النقطة b على سطح الموصل في الشكل (15). وعليه، فإنّ فرق الجهد بين أي نقطتين على سطح الموصل يساوي صفرًا، ما يعني أنّ النقاط جميعها على سطح الموصل لها الجهد نفسه. وبتطبيق العلاقة:

$$V = k\frac{Q}{r}$$

على أيّ نقطة على سطح الموصل الكروي $(r = R)$؛ فإنّ الجهد الكهربائي يعطى بالعلاقة:

$$V = k\frac{Q}{R}$$

حيث V: جهد نقطة على سطح الموصل (جهد الموصل).

Q: شحنة الموصل الكروي.

R: نصف قطر الموصل.

أفكّرُ: عند نقل شحنة بين نقطتين على سطح موصل كروي مشحون؛ فإنّ التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية لتلك الشحنة يساوي صفرًا. أُفسّر ذلك.

الجهد الكهربائي داخل موصل كروي مشحون
Potential Inside a Charged Spherical Conductor

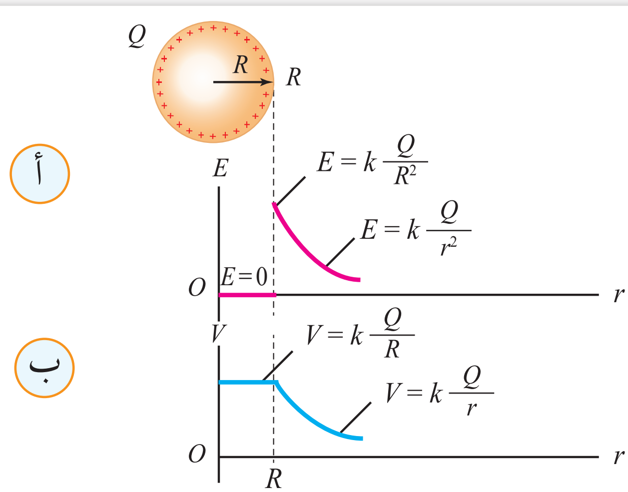
إنّ استقرار الشحنات على السطح الخارجي للموصل الكروي، يجعل المجال الكهربائي داخله يساوي صفرًا ($E = 0$)، وهذا يعني أنّ الشغل الذي يبذله المجال لنقل شحنة نقطية بين أيّ نقطتين داخل الموصل مثل (C، D) في الشكل (16)، أو من نقطة داخل الموصل مثل (D) إلى نقطة على سطحه (B) أو العكس يساوي صفرًا. وبما أنّ الشغل يُعطى بالعلاقة: $W = q\Delta V$؛ فإنّ فرق الجهد بين أيّ من تلك النقاط (مثل C، وD، وB) يساوي صفرًا، بمعنى أنّ جهد أيّ نقطة داخل الموصل أو على سطحه ($r \leq R$) ثابت، ويُعطى بالعلاقة:

$$V = k\frac{Q}{R}$$

درستُ سابقًا كيف يتغيّر المجال الكهربائي بتغيّر بُعد النقطة عن مركز موصل كروي مشحون ومعزول؛ كما في الشكل (17/ أ). فهل يتغيّر الجهد الكهربائي بالكيفية نفسها؟

يُبيّن الشكل (17/ ب) كيف يتغيّر الجهد الكهربائي بتغيّر بُعد النقطة عن مركز الموصل؛ إذ يبقى الجهد ثابتًا من مركز الموصل حتى سطحه، ثم يبدأ بالتناقص تدريجيًّا مع زيادة المسافة.

✓ **أتحقّق:** أصف تغيّرات الجهد الكهربائي الناشئ عن موصل كروي مشحون بشحنة موجبة، في أثناء الانتقال من مركز الموصل إلى اللانهاية.



الشكل (17): العلاقة بين كل من.

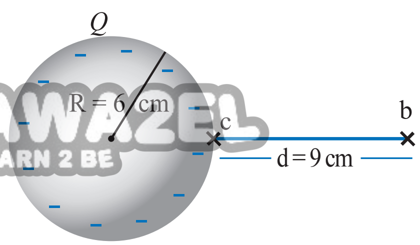
أ . المجال الكهربائي والبُعد عن مركز الموصل.

ب . الجهد الكهربائي والبُعد عن مركز الموصل.

سؤال: ما أوجه التشابه وأوجه الإختلاف بين الشكلين (/ 17 أ) و(/ 17 ب)؟

المثال 8

كرة من الألمنيوم نصف قطرها (6 cm)، موضوعة في الهواء ومشحونة بشحنة (Q = -12 μC). كما في الشكل (18). أجد الجهد الكهربائي عند كلّ من النقطتين (b,c).



الشكل (18): الجهد الناشئ عن كرة مشحونة من الألمنيوم.

المعطيات: $R = 6$ cm, $Q = -12$ μC, $d = 9$ cm

المطلوب: $V_c = ?\ ,\ V_b = ?$

الحلّ:

بعد النقطة b عن مركز الموصل:

$$r = R + d = 6 + 9 = 15 \text{ cm}$$

$$V_b = k\frac{Q}{r} = 9\times10^9\,\frac{-12\times10^{-6}}{15\times10^{-2}} = -7.2\times10^5 \text{ V}$$

$$V_c = k\frac{Q}{R} = 9\times10^9\,\frac{-12\times10^{-6}}{6\times10^{-2}} = -1.8\times10^6 \text{ V}$$

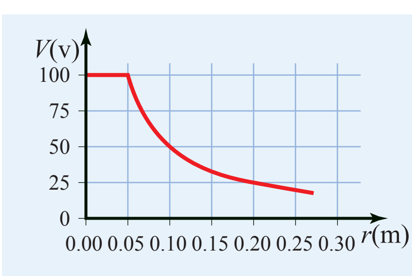
المثال 9

يُمثّل الرسم البياني في الشكل (19) العلاقة بين الجهد الكهربائي والبعد عن مركز موصل كروي مشحون. معتمدًا على الشكل أجد:

أ. نصف قطر الموصل.

ب. الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد (20 cm) عن مركز الموصل.

جـ. شحنة الموصل.



الشكل (19): العلاقة بين جهد موصل كروي والبعد عن مركزه.

الحلّ:

أ . نصف قطر الموصل: $R = 0.05$ m

ب . $V_{0.2} = 25$ V

جـ من الشكل، جهد الموصل ($V_{sph} = 100$ V)

وبتطبيق المعادلة:

$$V_{sph} = k\frac{Q}{R}$$

$$100 = 9\times10^9\,\frac{Q}{0.05} \Rightarrow Q = 5.5\times10^{-10} = 0.55 \text{ nC}$$

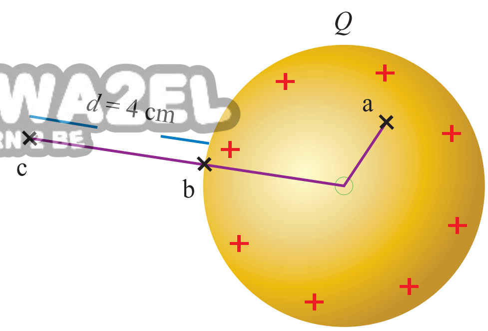
المثال 10

موصل كروي من النحاس نصف قطره (4 cm) مشحون ومعزول، موضوع في الهواء كما في الشكل (20)، إذا علمتُ أنّ جهد النقطة a يساوي (2000 V)؛ فأحسبُ:

أ . جهد الموصل الكروي.

ب. شحنة الموصل.

جـ.الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائية لنقل شحنة (-8 nC) من النقطة c إلى النقطة b.



الشكل (20): الجهد الناشئ عن موصل كروي مشحون.

المعطيات:

$V_a = 2000$ V, $d_c = 4$ cm, $q = -8$ nC, $R = 4$ cm

المطلوب:

$V_{sph} = ?,\ Q = ?,\ W_{c\to b} = ?$

الحلّ:

أ. جهد الموصل:

$$V_{sph} = V_b = V_a = 2000 \text{ V}$$

ب. شحنة الموصل:

$$V_b = k\frac{Q}{R}$$

$$2000 = 9 \times 10^9 \frac{Q}{4 \times 10^{-2}} \Rightarrow Q = 8.9 \times 10^{-9} \text{ C}$$

جـ.

$$V_c = k\frac{Q}{r} = 9 \times 10^9 \frac{8.9 \times 10^{-9}}{8 \times 10^{-2}} = 1000 \text{ V}$$

$$r = d + R = 4 + 4 = 8 \text{ cm}$$

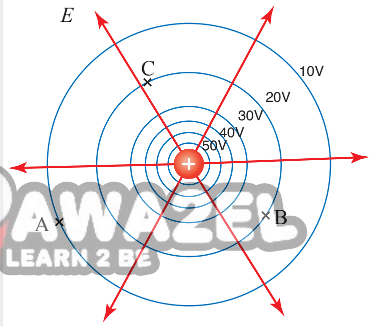
$$W_{c\to b} = -qV_{cb} = -(-8 \times 10^{-9})(2000 - 1000) = 8 \times 10^{-6} \text{ J}$$

تمرين

كرة موصلة ومشحونة نصف قطرها R وجهدها V، أجد بدلالة V جهد نقطة تبعد مسافة 4R عن مركزها.

سطوح تساوي الجهد Equipotential Surfaces

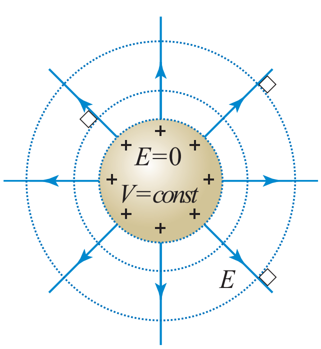
تعلمتُ سابقًا أنّ الجهد الكهربائي كمّية قياسية، مقداره عند نقطة تبعد مسافة r عن شحنة نقطية هو نفسه في الاتّجاهات جميعها، وهذا يعني أنّ كلّ النقاط الواقعة على سطح كرة متّحدة المركز مع الشحنة النقطية لها قيمة الجهد نفسه، ويعرف هذا السطح باسم **سطح تساوي الجهد Equipotential surface** وهو السطح الذي يكون الجهد الكهربائي عند نقاطه جميعها متساويًا. تُمثّل سطوح تساوي الجهد في (3) أبعاد على شكل سطوح كروية متّحدة المركز مع الشحنة، أمّا في بُعدين فتُمثّل على شكل دوائر متّحدة المركز مع الشحنة النقطية تُسمّى خطوط تساوي الجهد كما في الشكل (21).



الشكل (21): خطوط المجال الكهربائي وسطوح تساوي الجهد الكهربائي الناشئة عن شحنة نقطية.

سؤال: ما مقدار الجهد الكهربائي لكل نقطة من النقاط (A,B,C).

تكون سطوح تساوي الجهد الناشئة عن الموصل الكروي كروية الشكل، تُحيط بالموصل وتتّحد معه في المركز، كما في الشكل (22)؛ ويُعدّ سطح الموصل سطح تساوي جهد.



الشكل (22): الجهد الكهربائي لموصل كروي وسطوح تساوي الجهد حوله.

يُمثّل كل سطح تساوي جهد مقدارًا محدّدًا من الجهد الكهربائي كما هو مُبيّن في الشكل (21). ويكون فرق الجهد بين أيّ نقطتين على سطح تساوي الجهد يساوي صفرًا. ومن ثمّ، لا يلزم بذل شغل لنقل شحنة من نقطة إلى أخرى على سطح تساوي الجهد نفسه.

كما أنّ لخطوط المجال الكهربائي خصائص معينة؛ فإن لسطوح تساوي الجهد كذلك خصائص يمكن ملاحظتها من الشكلين (21 - 22)،وهي:

- سطوح تساوي الجهد التي يكون الفرق في الجهد بينها متساويًا؛ تتقارب كلّما اقتربنا من الشحنة؛ لأنّ المجال الكهربائي يزداد مقداره وتتقارب خطوطه في أثناء الاقتراب من الشحنة، كذلك تتباعد سطوح تساوي الجهد كلّما ابتعدنا عن الشحنة.
- لا تتقاطع؛ لأنها لو تقاطعت عند نقطة ما لوجدنا أكثر من قيمة للجهد الكهربائي عند تلك النقطة وهذا غير ممكن.
- تتعامد سطوح تساوي الجهد مع خطوط المجال الكهربائي.

أتحقّق: أُوضّح المقصود بسطح تساوي الجهد. ما العلاقة بين سطوح تساوي الجهد وخطوط المجال الكهربائي؟

وللتعرّف أكثر إلى سطوح تساوي الجهد، أتعاون مع أفراد مجموعتي على إجراء النشاط الآتي:

التجربة 1

رسم خطوط تساوي الجهد عمليًّا

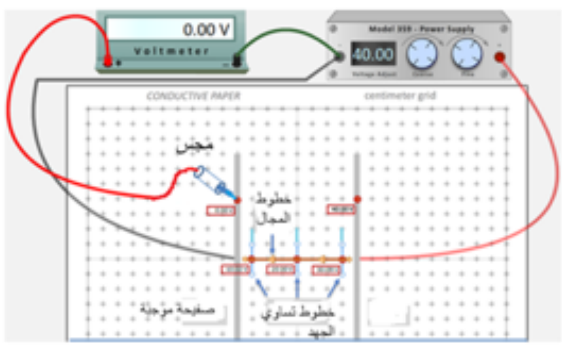
الموادّ والأدوات: لوح رسم خرائط المجال الكهربائي، ورق رسم بياني، قلم رصاص، فولتميتر رقمي، مصدر طاقة (تيّار مستمرّ DC) رقمي، كرتان فلزّيتان صغيرتان، صفيحتان فلزّيتان، أسلاك توصيل، مجسّ.

إرشادات السلامة: الحذر في التعامل مع التوصيلات الكهربائية أو تطبيق جهد كبير.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أصل الأدوات كما في الشكل من دون غلق الدارة الكهربائية إلّا بعد التأكّد منها من قِبَل المعلم.
2. **أقيس:** أُثبّت مصدر الجهد على جهد معين (40 V)، وأتأكّد من أنّ قراءة الفولتميتر تساوي صفرًا عند اتصال المجسّ بقطبه الموجب كما في الشكل، ثمّ أُحرّك المجسّ المتّصل بالقطب الموجب للفولتميتر مبتعدًا عن الصفيحة السالبة حتى يقرأ الفولتميتر جهدًا محدّدًا (10 V مثلًا)، وأُحدّد موقع تلك النقطة باستعمال ورقة الرسم البياني.
3. **أرسم:** أُحدّد مواقع (4) نقاط أخرى مساوية لجهد النقطة السابقة، ثم أرسمُ الخط المارّ بالنقاط الخمس والتي يُمثّل خطًّا من خطوط تساوي الجهد.
4. أُكرّر الخطوتين (2 - 3)عدّة مرّات؛ باستعمال قراءات أخرى للفولتميتر (20 V, 30 V).
5. أُكرّر الخطوات (2 - 4)؛ باستعمال كرة فلزّية بدلًا من إحدى الصفيحتين.



التحليل والاستنتاج:

1. **أتوقّع** قراءة الفولتميتر عند وضع المجسّ على الصفيحة السالبة، ثم أتأكّد من ذلك عمليًّا.
2. **أُفسّر:** أصف خطوط تساوي الجهد التي رسمتها، مفسّرًا إجابتي.
3. **أرسمُ** خطوط المجال الكهربائي بناءً على خطوط تساوي الجهد.
4. **أحسبُ** مقدار المجال الكهربائي بين الصفيحتين؛ باستعمال فرق الجهد والمسافة بينهما.
5. **أتنبّأ** بشكل خطوط تساوي الجهد؛ عند استعمال كرتين فلزّيتين صغيرتين بدلًا من الصفيحتين.

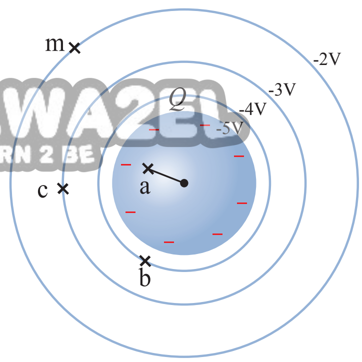
المثال 11

بناءً على الشكل (23) الذي يُمثّل سطوح تساوي الجهد لموصل كروي مشحون بشحنة سالبة، أحسبُ:

أ . فرق الجهد (V_{bc}) و (V_{ba}).

ب. الشغل الذي تبذله القوّة الخارجية؛ لنقل إلكترون بسرعة ثابتة من النقطة m إلى النقطة c.

جـ. شحنة الموصل، علمًا بأنّ نصف قطره 9 cm .



الشكل (23): سطوح تساوي الجهد حول موصل كروي مشحون.

المعطيات: البيانات على الشكل.

المطلوب: $(V_{bc}) = ?, (V_{ba}) = ?, W_{c\to m}, Q = ?$

الحلّ:

أ.

$$V_{ba} = V_a - V_b = -5 - (-4) = -1 \text{ V}$$

$$V_{bc} = V_c - V_b = (-3) - (-4) = 1 \text{ V}$$

ب.

$$W_{m\to c} = qV_{mc} = q(V_c - V_m)$$

$$W_{m\to c} = -1.6 \times 10^{-19} \times (-3-(-2))$$

$$W_{m\to c} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

جـ. جهد الموصل يساوي (V 5 –)، ولإيجاد شحنته أُطبّق العلاقة الآتية:

$$V = k\frac{Q}{R}$$

$$-5 = 9 \times 10^{9} \frac{Q}{9 \times 10^{-2}}$$

$$Q = -5 \times 10^{-11} \text{ C} = -50 \text{ pC}$$

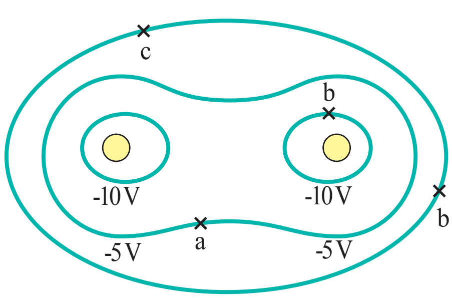
المثال 12

يُبيّن الشكل (24). سطوح تساوي الجهد لشحنتين نقطيتين متساويتين في المقدار. أجيب عمّا يأتي:

أ. ما إشارة كل من الشحنتين؟

ب. أحسبُ فرق الجهد V_{ab}.

جـ. هل يلزم شغل لنقل بروتون من النقطة c إلى النقطة d؟ أُوضّح ذلك.



الشكل (24): سطوح تساوي الجهد لشحنتين نقطيتين.

الحلّ:

أ . الشحنتان سالبتان؛ لأنّ سطح تساوي الجهد المحيط بكل شحنة جهده سالب (10V-)، كما أنّ شكل سطوح تساوي الجهد يدل على أنّ الشحنتين من النوع نفسه.

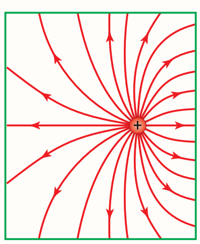
ب. $V_b = -10\ \text{V}, V_a = -5\ \text{V}$

$V_{ab} = V_b - V_a = -10 - (-5) = -5\ \text{V}$

جـ. لا يلزم شغل؛ لأنّ كلّ من النقطتين c و d تقعان على سطح تساوي الجهد نفسه. ومن ثمّ، فإنّ جهد كل منهما متساوٍ، وفرق الجهد بينهما يساوي صفرًا $V_{cd} = 0$، والشغل حسب العلاقة $W_{c\to d} = qV_{cd} = 0$.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما العوامل التي يعتمد عليها الجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون ومعزول موضوع في الهواء.

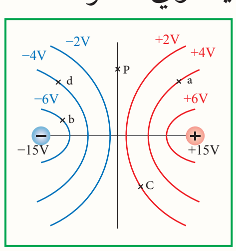


2. **أُحلّل:** يُمثّل الشكل خطوط المجال الكهربائي بين شحنة نقطية وصفيحة مشحونة، أرسم سطوح تساوي الجهد الكهربائي.

3. **أُفسّر** كلًّا ممّا يأتي:

أ . سطوح تساوي الجهد لا تتقاطع.

ب. الشغل المبذول لنقل شحنة اختبار من نقطة إلى أخرى على سطح الموصل يساوي صفرًا.



4. يُمثّل الشكل سطوح تساوي الجهد لشحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في النوع، أُجيب عمّا يأتي:

أ . أيّ النقاط جهدها يساوي صفرًا.

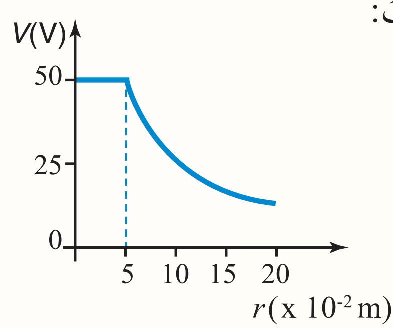
ب. ما مقدار فرق الجهد V_{ac}, V_{bd}؟

جـ. أحسبُ الشغل الذي تبذله القوّة الخارجية لنقل شحنة (5 nC) من النقطة d إلى النقطة a.

5. موصل كروي مشحون بشحنة (+4 nC) وجهده 6×10^2 V، أحسبُ:

أ. نصف قطر الموصل.

ب. جهد نقطة (p) تبعد (9 cm) عن سطح الموصل.



6. كرة من النحاس مشحونة بشحنة موجبة، مُثّلت العلاقة بين الجهد الكهربائي والبُعد عن مركز الكرة كما في الشكل، أحسبُ:

أ . الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد (4 cm) عن مركز الكرة.

ب. شحنة الكرة.

جـ. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائية لنقل شحنة (6 μC) من مركز الكرة إلى نقطة تبعد (8 cm) عن مركز الكرة.

◄الفكرة الرئيسة:

تختلف المواسعات الكهربائية في أشكالها ومقادير مواسعاتها وطرائق توصيلها معًا؛ وتكمن أهمّيتها في قدرتها على تخزين الطاقة الكهربائية، وتُستعمل في الكثير من التطبيقات العملية.

◄نتاجات التعلّم:

- أُعرّف المواسعة الكهربائية لموصل رياضيًّا وبالكلمات.
- أرسمُ رسمًا بيانيًّا يُمثّل العلاقة بين تغيّرات الجهد الكهربائي بين صفيحتَي مواسع وشحنته.
- أُوظّف الرسم البياني للعلاقة بين الجهد الكهربائي بين صفيحتَي مواسع وشحنته في حساب الطاقة المختزنة في المواسع.
- أحسبُ المواسعة الكهربائية المكافئة لمجموعة مواسعات متّصلة على التوالي أو على التوازي.
- أحسبُ كمّية الشحنة على كلّ مواسع وفرق جهده.

◄المفاهيم والمصطلحات:

المواسع Capacitor

المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين
Parallel Plate Capacitor

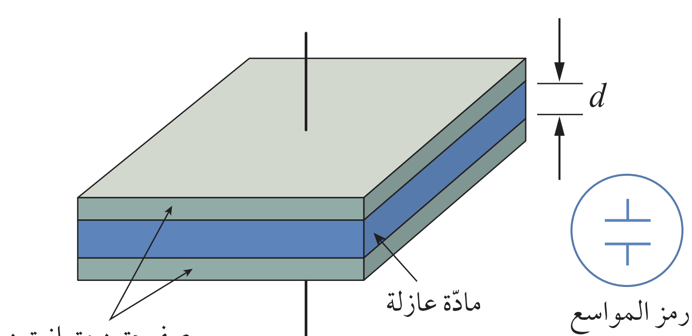
المواسعة Capacitance

المواسعة المكافئة Equivalent Capacitance

المواسع الكهربائي Electric Capacitor

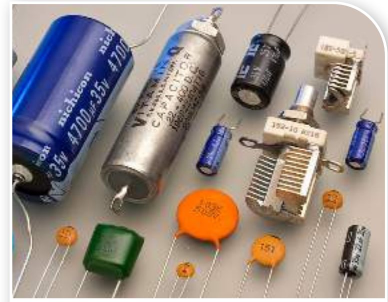
في ظل الاستعمال الواسع لمصادر الطاقة المتجدّدة بوصفها بديلًا عن الطاقة التقليدية، برزت الحاجة إلى تخزين الطاقة الكهربائية لاستعمالها عند الحاجة. وقد شكّلت بطّاريات الليثيوم قبل سنوات طفرة في تطوير آلية تخزين الطاقة الكهربائية على شكل طاقة كيميائية، سواء أكانت في وسائل النقل الكهربائية أم الأجهزة الإلكترونية المختلفة. إلّا أنّ البطّارية ليست الأداة الوحيدة لتخزين الطاقة؛ **فالمواسع Capacitor** جهاز يُستعمل لتخزين الطاقة الكهربائية كذلك، ولكلّ من المواسع والبطّارية استعمالاته الخاصّة، إلّا أنّ المواسع يتميّز عن البطارية بإمكانية شحنه وتفريغه بشكل أسرع.

معظم المواسعات المستعملة في التطبيقات العملية، تتكوّن من صفيحتين موصلتين متوازيتين تفصلهما طبقة من مادّة عازلة، ويُسمّى **المواسع ذا الصفيحتين المتوازيتين Parallel plate capacitor**، ويُرمز له بخطّين متوازيين كما في الشكل (25)، وشكل الصفيحتين يُمكن أن يكون مربّعًا أو مستطيلًا أو دائريًّا، أو على شكل أسطوانة حسب الاستعمال. أمّا المادّة العازلة فتتكوّن من مادّة مناسبة مثل البوليستر أو الميكا أو الهواء في بعض الحالات.



◄ الشكل (25): مواسع ذو صفيحتين متوازيتين ورمزه.

توجد أنواع مختلفة من المواسعات كما في الشكل (26)، تختلف في أشكالها وأحجامها حسب استعمال كلّ منها. ومعظم الأجهزة الإلكترونية تحتوي على مواسعات كما في لوحة الحاسوب المبينة في الشكل (27).



الشكل (26): أنواع مختلفة من المواسعات.

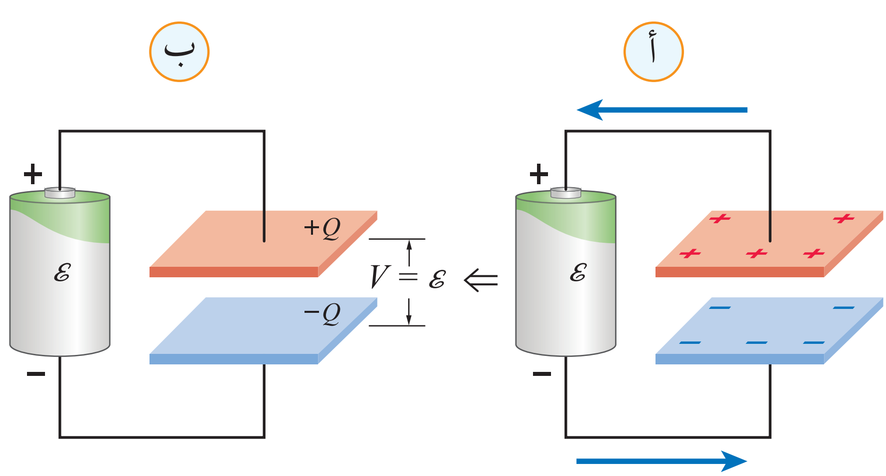
الشكل (27): لوحة حاسوب تحتوي أنواع مختلفة من المواسعات.

تخزين الشحنات Storage of Charges

عند وصل مواسع ذي صفيحتين متوازيتين مع بطّارية؛ فإنّ البطّارية تنقل الإلكترونات عبر الدارة الكهربائية من إحدى الصفيحتين إلى الصفيحة الأخرى، وبذلك تتراكم شحنة سالبة على الصفيحة الموصولة مع القطب السالب، بينما تُشحن الصفيحة الموصولة مع القطب الموجب بشحنة موجبة كما في الشكل (28/ أ)؛ إذ يزداد فرق الجهد بين صفيحتَي المواسع بزيادة تراكم الشحنات على الصفيحتين، وتستمر عملية الشحن حتى يُصبح فرق الجهد بين صفيحتَي المواسع V مساويًا لجهد البطارية (ε) كما في الشكل (28/ ب).

بما أنّ القوّة الكهربائية قوّة محافظة؛ فإنّ الشغل الذي تبذله البطارية لنقل الشحنات يُختزن في المواسع على شكل طاقة وضع كهربائية.

أتحقّق: إلى متى تستمر عملية شحن المواسع عند وصل صفيحتيه ببطّارية؟ ما شكل الطاقة المختزنة فيه؟



الشكل (28): شحن المواسع.

أ . في أثناء عملية الشحن.

ب . بعد الانتهاء من عملية الشحن.

المواسعة الكهربائية Electrical Capacitance

في أثناء شحن المواسع تزداد شحنته كما يزداد فرق الجهد بين صفيحتيه (جهد المواسع)، وعند تمثيل العلاقة بين جهد المواسع وشحنته بيانيًّا؛ بحيث يُمثّل محور $+y$ شحنة المواسع، بينما يُمثّل المحور $+x$ جهد المواسع، نجد أنّها علاقة خطّيّة تُمثّل بخطّ مستقيم يمرّ بنقطة الأصل كما في الشكل (29) وميل الخطّ المستقيم يساوي مقدارًا ثابتًا يُمثّل المواسعة الكهربائية ويُرمز لها بالرمز C:

$$C = \frac{Q}{V} = \text{الميل}$$

حيث Q: شحنة المواسع عند أيّ لحظة.

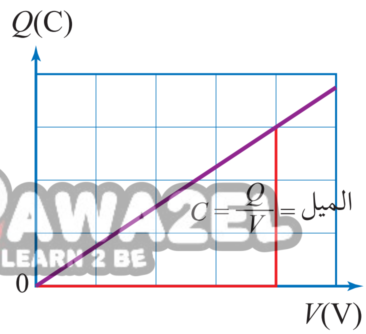
V : جهد المواسع عند تلك اللحظة.

لذا؛ تُعرّف **المواسعة الكهربائية Electrical capacitance** بأنّها الشحنة الكهربائية المختزنة لوحدة فرق الجهد الكهربائي.

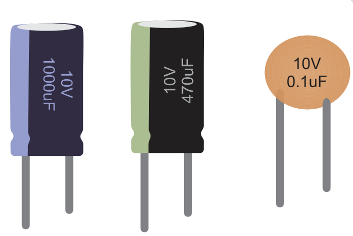
تُقاس المواسعة بوحدة الفاراد F ‏($1\ F = 1\ C/V$)، ويُعرّف **الفاراد Farad** بأنّه مواسعة مواسع يختزن شحنة كهربائية (1C) عند تطبيق فرق جهد (1V) بين صفيحتيه. والفاراد وحدة كبيرة نسبيًّا، ومعظم قِيَم المواسعات المستعملة في الدارات الإلكترونية صغيرة جدًّا؛ لذا، تُستعمل البادئات (μ, n, p). أمّا المواسعات الفائقة التخزين فتصل مواسعاتها إلى مئات الآلاف من الفاراد، فعربات التلفريك – كما في صورة بداية الوحدة – تُستعمل فيها مواسعات فائقة، تُشحن خلال ثوانٍ عند مرورها بمحطات الكهرباء، وكذلك الحال في الحافلات الكهربائية المتّصلة بشبكة الكهرباء.

قد أتساءل: هل يوجد حدّ معيّن لمقدار فرق الجهد الكهربائي الذي يُمكن تطبيقه بين صفيحتي المواسع؟ إنّ أقصى فرق جهد آمن يمكن تطبيقه على المواسع عادة ما يكون مكتوب عليه، أنظرُ إلى الشكل (30)، فإذا تجاوز الجهد القيمة المحدّدة للمواسع؛ فإنّ ذلك يؤدّى ذلك إلى تلف وانهيار العازلية الكهربائية للمادّة.

أتحقّق: ما المقصود بالمواسعة الكهربائية؟ وكيف تتناسب شحنة المواسع مع فرق الجهد بين طرفيه؟



الشكل (29): التمثيل البياني للعلاقة بين شحنة المواسع وجهده.



الشكل (30): مواسعات مختلفة الجهد والمواسعة.

سؤال: أُقارن بين المواسعة وأقصى جهد يُطبّق بأمان لكلّ من المواسعات الثلاثة.

ولقياس مواسعة مواسع بصورة عملية، يُمكنني إجراء النشاط الآتي:

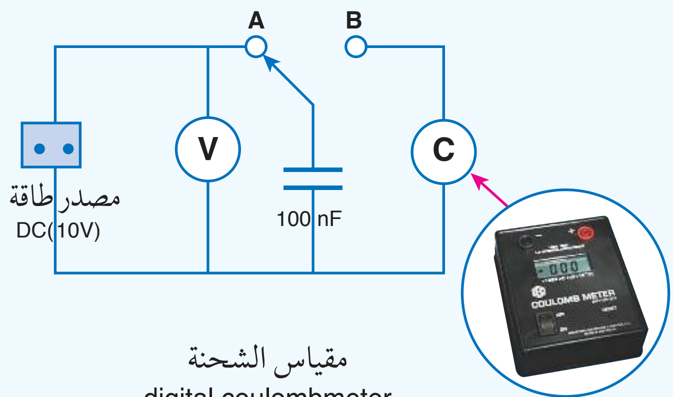
التجربة 2

قياس مواسعة مواسع عمليًّا

الموادّ والأدوات:

مصدر طاقة (تيّار مستمرّ DC)، فولتميتر، مجزّئ جهد، مواسع، مقياس الشحنة (coulomb meter) يقيس لغاية (2000 nC)، أسلاك توصيل.

إرشادات السلامة: الحذر من تطبيق جهد أعلى من الجهد المكتوب على المواسع، ومن لمس طرفَي المواسع بعد شحنه.



مقياس الشحنة
digital coulombmeter

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُركّب: أُعاير كلًّا من الفولتميتر ومقياس الشحنة، ثم أصل أجزاء الدارة الكهربائية كما في الشكل؛ باستعمال جهد محدّد (مثلًا 0.5 V) مع إبقاء الطرف الحر للمواسع غير متّصل بأيّ طرف.
2. **أقيس:** أصل الطرف الحر للمواسع مع الطرف A حتى يُشحن المواسع، ثم أُدوّن قراءة الفولتميتر في الجدول، والتي تُمثّل فرق الجهد بين طرفَي المواسع.
3. **أقيس:** أفصل الطرف الحر للمواسع مع الطرف A، ثم أصله مع الطرف B لمدّة زمنية كافية لتفريغ شحنة المواسع خلال مقياس الشحنة، ثمّ أُدوّن قراءته في الجدول والتي تُمثّل مقدار الشحنة المختزنة في المواسع.
4. أستعملُ مصدر الطاقة لتغيير قراءة الفولتميتر لعدّة قِيَم (1 V, 1.5 V, 2 V, 2.5 V, 3 V)، وأُكرّر الخطوتين الثانية والثالثة عند كل قراءة، وأُدوّن نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. أرسمُ بيانيًّا العلاقة بين جهد المواسع (قراءة الفولتميتر) بوحدة (V) على محور $+x$ وشحنته (مقياس الشحنة) بوحدة (C) على محور $+y$، ثمّ أرسمُ أفضل خطّ مستقيم يمرّ بمعظم النقاط.
2. **أحسبُ** ميل الخطّ المستقيم ($\frac{\Delta Q}{\Delta V}$). ما الكمّية الفيزيائية التي يُمثّلها الميل؟
3. **أقارن** النتيجة التي حصلت عليها للمواسعة مع مقدار المواسعة المكتوب على المواسع. ما سبب الاختلاف إن وُجد؟

المثال 13

أحسبُ مواسعة مواسع يختزن شحنة مقدارها ($6\ \mu C$) عندما يُطبّق عليه جهد مقداره ($5\ V$).

المعطيات: $Q = 6\ \mu C,\ V = 5\ V$

المطلوب: $C = ?$

الحلّ: أُطبّق العلاقة:

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$= \frac{6 \times 10^{-6}}{5} = 1.2 \times 10^{-6}\ F = 1.2\ \mu F$$

المثال 14

بناءً على البيانات المثبّتة على المواسع المُبيّن في الشكل (31)، أُجيب عمّا يأتي:

أ . أُحدّد القيمة العظمى للشحنة التي يُمكن تخزينها بأمان في المواسع.

ب. هل يُمكن تطبيق جهد مقداره ($600\ V$) بين طرفَي المواسع؟ أُوضّح إجابتي.

الشكل (31): مواسع كهربائي.

المعطيات: من الشكل $C = 22\ \mu F,\ \ V = 450\ V$

المطلوب: $Q = ?$

الحلّ:

أ . أُطبّق العلاقة:

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$Q = CV = (22 \times 10^{-6}))(450) = 9.9 \times 10^{-3}\ C$$

ب . لا؛ لأنّ أقصى جهد يتحمّله المواسع ($450\ V$) حسب ما كُتب عليه. ومن ثمّ، إذا طُبّق عليه جهد أعلى من ذلك يتلف.

تمرين

أجد جهد مواسع مواسعته ($1.2\ \mu F$) يختزن شحنة مقدارها ($10\ \mu C$).

مواسعة مواسع ذي صفيحتين متوازيين
Capacitance of Parallel Plate Capacitor

يُبيّن الشكل (32) مواسعًا ذا صفيحتين متوازيتين، مساحة كلّ منهما A وتفصلهما مسافة d والوسط الفاصل بينهما فراغ (أو هواء). عند تطبيق فرق جهد V بين صفيحتَي المواسع بوساطة بطّارية؛ فإنّ المواسع يختزن شحنة كهربائية Q فينشأ بين الصفيحتين المشحونتين مجال كهربائي منتظم E مقداره (حسب قانون غاوس):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

ولكنّ الكثافة السطحية للشحنة σ تُعطى بالعلاقة: $\sigma = \frac{Q}{A}$

ومن ثمّ، فإنّ:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$$

وبما أنّ فرق الجهد بين طرفَي المواسع V يُعطى بالعلاقة: $V = Ed$

فإنّه يُمكنني التعبير عن مواسعة المواسع على النحو الآتي:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Ed} = \frac{Q}{\frac{Q}{\varepsilon_0 A}d} = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

تُشير المعادلة السابقة إلى أنّ مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين تعتمد على:

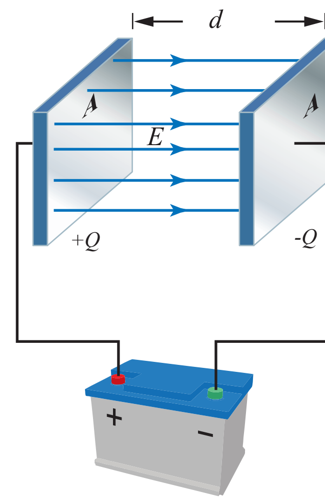
A: مساحة كلّ من صفيحتَي المواسع والعلاقة طردية.

d: المسافة بين الصفيحتين والعلاقة عكسية.

ε_0: السماحية الكهربائية للوسط الفاصل بين صفيحتَي المواسع.

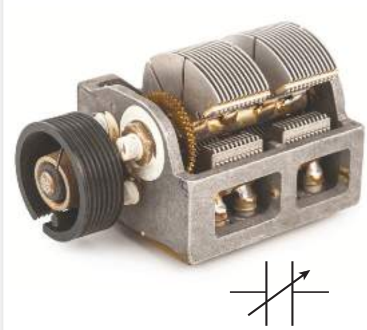
وستقتصر دراستنا على المواسع الذي تكون المادّة العازلة بين صفيحتيه الفراغ أو الهواء. توجد مواسعات متغيّرة المواسعة تحتوي على عدّة صفائح فلزّية قابلة للدوران حول محور. ومن ثمّ، يُمكنني التحكّم بمواسعة المواسع عن طريق تغيير عدد الصفائح أو مساحتها أو المسافة بينها، ويُرمز له في الدوائر الكهربائية بخطّين متوازيين عليهما سهم، أنظرُ إلى الشكل (33).

✓ **أتحقّق:** ما الطرائق التي يُمكنني بوساطتها زيادة مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين؟



الشكل (32): شحن مواسع ذي صفيحتين متوازيين.

أفكّر: هل تؤدّي زيادة جهد المواسع أو شحنته الكهربائية إلى زيادة مواسعته؟ أفسّر إجابتي.


الشكل (33): مواسع متغيّر المواسعة.

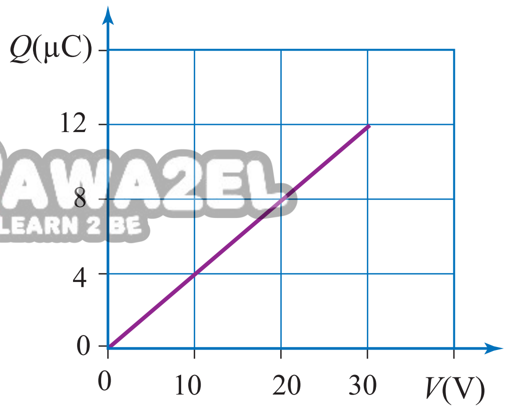
المثال 15

يُمثّل الرسم البياني في الشكل (34) العلاقة بين شحنة مواسع ذي صفيحتين متوازيتين وجهده، في أثناء عملية الشحن عند وصله مع بطّارية جهدها (40 V)، مستعيناً بالشكل أحسبُ:

أ . مواسعة المواسع.

ب. شحنة المواسع عندما يكون جهد المواسع (18 V).

جـ. شحنة المواسع بعد اكتمال عملية الشحن.



الشكل (34): التمثيل البياني للعلاقة بين شحنة المواسع وجهده.

المطلوب:

$C = ?,\quad Q = ?$

الحلّ:

أ . ميل الخط المستقيم يساوي مواسعة المواسع، أي إنّ:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{12 \times 10^{-6}}{30} = 4 \times 10^{-7}\ \text{F} = 0.4\ \mu\text{F}$$

ب. شحنة المواسع عندما يكون جهده (18 V):

$$Q = CV = (4 \times 10^{-7})(18) = 7.2 \times 10^{-6}\ \text{C} = 7.2\ \mu\text{C}$$

جـ. تكتمل عملية شحن المواسع؛ عندما يُصبح جهده مساوياً لجهد البطّارية (40 V)، عندئذ تُختزن في المواسع قيمة عظمى للشحنة تساوي:

$$Q = CV = (4 \times 10^{-7})(40) = 1.6 \times 10^{-5}\ \text{C} = 16\ \mu\text{C}$$

الربط مع الحاسوب

استعمال المواسعات في لوحة مفاتيح الحاسوب

يوضع مواسع ذو صفيحتين متوازيتين أسفل كل حرف في لوحة مفاتيح الحاسوب؛ بحيث تُثبّت إحدى صفيحتَي كل مواسع بمفتاح والصفيحة الأخرى تكون ثابتة، وعند الضغط على المفتاح يقلّ البعد بين الصفيحتين فتزداد مواسعة المواسع؛ وهذا يجعل الدارات الإلكترونية الخارجية تتعرّف إلى المفتاح الذي جرى الضغط عليه.

المثال 16

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، البعد بينهما (2 mm) ومساحة كل من صفيحتيه $(8 \times 10^{-4}\ m^2)$، يتّصل ببطّارية جهدها (50 V) أحسبُ:

أ . مواسعة المواسع.

ب. جهد المواسع (V') عندما يختزن شحنة (Q') مقدارها (100 pC).

جـ. إذا تضاعفت المسافة بين الصفيحتين مع بقاء البطّارية موصولة بالمواسع، فأحسبُ كلّ من شحنة المواسع (Q'') ومواسعته (C').

V'

المعطيات: $d = 2\ mm,\ A = 8 \times 10^{-4}\ m^2,\ Q' = 100\ pC,\ V = 50\ V$

المطلوب: $C = ?,\ V' = ?,\ Q''=?,\ C'=?$

الحلّ:

أ .

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 8 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-3}} = 3.54 \times 10^{-12}\ F = 3.54\ pF$$

ب. عندما تتغيّر شحنة المواسع (Q') تبقى مواسعته ثابتة (C) ولكنّ جهده يتغيّر (V'):

$$C = \frac{Q'}{V'}$$

$$3.54 \times 10^{-12} = \frac{100 \times 10^{-12}}{V'} \Rightarrow V' = 28.2\ V$$

جـ. عندما مضاعفة المسافة بين صفيحتَي المواسع $(d' = 4\ mm)$ تتغيّر مواسعة المواسع (C') وتتغير شحنته (Q'') بينما يبقى جهده ثابتًا ويساوي جهد البطارية $(V = 50\ V)$.

$$C' = \frac{\varepsilon_0 A}{d'} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 8 \times 10^{-4}}{2(2 \times 10^{-3})} = 1.77 \times 10^{-12}\ F = 1.77\ pF$$

$$Q'' = C'V = (1.77 \times 10^{-12})(50) = 8.85 \times 10^{-11}\ C = 88.5\ pC$$

تمرين

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مواسعته (0.04 nF) والمسافة بين صفيحتيه (0.25 cm)، شُحن حتى أصبح جهده (100 V)، أحسبُ:

أ . مساحة كلّ من صفيحتّي المواسع.

ب. شحنة المواسع.

مواسعة موصل كروي معزول
Capacitance of an Isolated Spherical Conductor

على الرغم من أنّ المواسع ذا الصفيحتين المتوازيتين، هو الأكثر استعمالًا وانتشارًا من الناحية العملية بوصفه نظامًا لتخزين الشحنة، إلّا أنّ للموصل الكروي المعزول قدرة على تخزين الشحنات أيضًا؛ وهذا يعني أنّ له مواسعة.

يوضّح الشكل (35) موصل كروي نصف قطره R معزول ومشحون بشحنة موجبة $(+Q)$ تتوزّع بانتظام على سطحه نتيجة قوى التنافر؛ لذا، يُمكنني التعامل مع ذلك الموصل الكروي على أنّه شحنة نقطية في مركزه، وجهده يُعطى بالعلاقة:

$$V = k\frac{Q}{R}$$

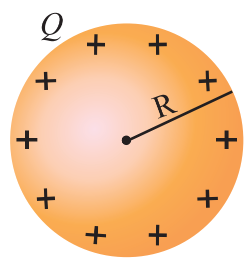
وبما أنّ مواسعة الموصل تُعطى بالعلاقة:

$$C = \frac{Q}{V}$$

فإنّ مواسعة الموصل الكروي تؤول إلى:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{k\dfrac{Q}{R}} = \frac{1}{k}R$$

تُظهر المعادلة الأخيرة أنّ مواسعة موصل كروي معزول، تتناسب طرديًّا مع نصف قطره، فكلّما ازداد نصف قطره ازدادت مواسعته.



الشكل (35): موصل كروي مشحون بشحنة موجبة.

المثال 17

أحسبُ مواسعة الكرة الأرضية بافتراضها كروية الشكل؛ علمًا بأنّ نصف قطرها (6371 km) تقريبًا.

المعطيات: $R = 6371\ \text{km}$

المطلوب: $C = ?$

الحلّ:

$$C = \frac{1}{k}R = \frac{1}{9\times10^{9}}(6.371\times10^{6}) = 708\ \mu\text{F}$$

الطاقة المختزنة في المواسع Energy Stored in a Capacitor

يُعدّ المواسع المشحون مخزن للطاقة على شكل طاقة وضع كهربائية، تُستعمل مصدرًا للطاقة في كثير من الأجهزة. كيف يُمكنني حساب مقدار تلك الطاقة؟

عند وصل طرفَي بطّارية مع صفيحتَي مواسع؛ فإنّ البطّارية تبذل شغلًا لنقل الشحنات من إحدى الصفيحتين إلى الأُخرى، إذ يزداد جهد المواسع بزيادة الشحنات عليه.

يُمثّل الرسم البياني في الشكل (36) تلك العلاقة (جهد المواسع – الشحنة المختزنة فيه) إذ التناسب طردي والعلاقة خطّية على شكل خط مستقيم ميله يساوي:

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{1}{C}$$

عند زيادة شحنة المواسع مقدار ΔQ عند متوسّط جهد مقداره V_1 في الشكل (40)؛ فإنّ ذلك يتطلّب شغلًا يساوي مساحة المستطيل: $V_1\,\Delta Q$، وكلّما ازدادت شحنة المواسع تزداد مساحة المستطيل $V_2\Delta Q$ نتيجة لزيادة الجهد، وهذا يتطلّب بذل شغل أكبر. والمساحة الكلية تحت المنحنى (المساحة المغلقة بين الخط المستقيم والمحور الأفقي) والتي تُمثّل مساحة المثلث تساوي الشغل الكلي W المبذول في شحن المواسع إلى شحنة Q وجهد V؛ أي إنّ:

$$W = \frac{1}{2}\,QV$$

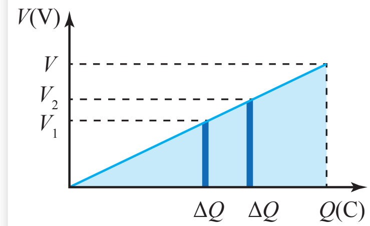
وهذا الشغل المبذول في شحن المواسع يساوي طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في المواسع:

$$PE = \frac{1}{2}\,QV$$

وبما أنّ $Q = CV$ فإنّ:

$$PE = \frac{1}{2}\,CV^2 = \frac{1}{2}\,\frac{Q^2}{C}$$

وإذا فُصِلت البطّارية عن المواسع – بعد شحنه – ووُصِل طرفا المواسع بجهاز كهربائي ضمن دارة كهربائية؛ فإنّ الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع تتحوّل إلى شكل آخر من الطاقة، إذ تنتقل الإلكترونات من صفيحة



الشكل (36): الطاقة المختزنة في المواسع.

أفكّر: عند وصل طرفي مواسع مشحون ومعزول بمصباح، ماذا يحدث لكل من الكميات الآتية للمواسع: مواسعته، جهده، شحنته، الطاقة الكهربائية المختزنة فيه؟

أبحثُ: من أهم ميّزات المواسع، أنّ شحنه وتفريغه يحدثان خلال فترات زمنية يُمكن التحكم بها عن طريق تغيير خصائص المواسع ومقاومة دارة الشحن أو التفريغ، ما يجعله مفيدًا في الدوائر الكهربائية المعتمدة على الوقت، مثل مسّاحات زجاج السيارات. مستعينًا بمصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الإنترنت، أبحثُ عن استعمالات المواسعات في هذا المجال، وأُعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام زملائي.

المواسع السالبة إلى الصفيحة الموجبة على شكل تيّار كهربائي في الدارة؛ يتلاشى بالتدريج خلال مدّة زمنية قصيرة لتصبح شحنة المواسع النهائية صفرًا، وتُسمى هذه العملية تفريغ المواسع Discharging a capacitor.

أتحقّق: ما العوامل التي تعتمد عليها الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع؟

المثال 18

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مواسعته ($10\ \mu F$) وُصِل مع بطّارية جهدها ($2\ V$) أحسبُ:

أ . الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع.

ب. شحنة المواسع.

المعطيات: $V = 2\ V$, $C = 10\ \mu F$

المطلوب: $PE = ?,\ \ Q = ?$

الحلّ:

أ .

$$PE = \frac{1}{2} CV^2$$

$$PE = \frac{1}{2} \times (10 \times 10^{-6})(2)^2 = 2 \times 10^{-7}\ J$$

ب.

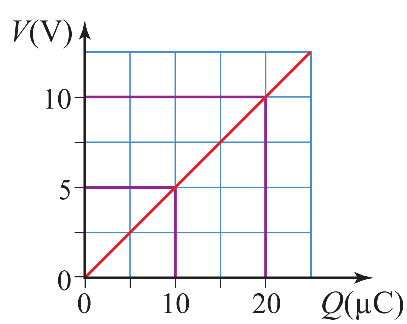
$$Q = CV = (10 \times 10^{-6})(2) = 2 \times 10^{-5}\ \ C$$

المثال 19

يُمثّل الرسم البياني في الشكل (37) العلاقة بين جهد المواسع والشحنة الكهربائية المختزنة فيه، بناءً عليه أحسبُ:

أ. مواسعة المواسع.

ب. الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع عندما يصبح جهده ($10\ V$).



الشكل (37): العلاقة بين جهد المواسع وشحنته.

المطلوب: $PE = ?,\ C = ?$

الحلّ:

أ . ميل الخط المستقيم يساوي $\frac{1}{C}$؛ أي إنّ:

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{C}$$

$$\frac{5}{10 \times 10^{-6}} = \frac{1}{C} \Rightarrow C = 2 \times 10^{-6}\ C$$

ب.

$$PE = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times (2 \times 10^{-6})\ (10)^2 = 10^{-4}\ J$$

توصيل المواسعات Combining Capacitors

أفترضُ أنّ جهازًا إلكترونيًّا يتطلّب مواسع قيمة مواسعته ($2\,\mu$F) ولا يوجد إلّا مواسعان اثنان؛ مواسعة الأول ($6\,\mu$F) والثاني ($3\,\mu$F). كيف يُمكنني وصل هذين المواسعين للحصول على المواسعة المطلوبة؟

توصل المواسعات معًا بعدّة طرائق منها طريقتان بسيطتان وشائعتان، هما التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي أو الجمع بينهما، ويُطلق على المواسعة الكلية لمجموعة مواسعات تتّصل معًا في دارة كهربائية **المواسعة المكافئة Equivalent capacitance**.

التوصيل على التوازي Parallel Combination

يُبيّن الشكل (38) 3 مواسعات (C_1, C_2, C_3) تتّصل على التوازي مع بطّارية، إذ تتّصل صفيحتا كلّ مواسع مع قطبَي البطارية نفسها؛ أي إنّ الصفائح الموجبة للمواسعات تتّصل معًا والسالبة كذلك. ومن ثمّ، تتساوى المواسعات الثلاثة في جهودها، وتكون مساوية لجهد البطارية V (قراءة الفولتميتر).

وبما أنّ $Q = CV$ فإنّ الشحنة المختزنة في كل مواسع:

$$Q_1 = C_1V, \quad Q_2 = C_2V, \quad Q_3 = C_3V$$

فإذا استُبدل مصباح بالبطارية تحدث عملية تفريغ لشحنات المواسعات الثلاثة عبر المصباح؛ لذا، فإنّ الشحنة الكلّية المختزنة في المواسعات الثلاثة Q تساوي مجموع شحنة تلك المواسعات:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

وبما أنّ $Q = CV$ فإنّ:

$$CV = C_1V + C_2V + C_3V$$

وبالقسمة على V نحصل على:

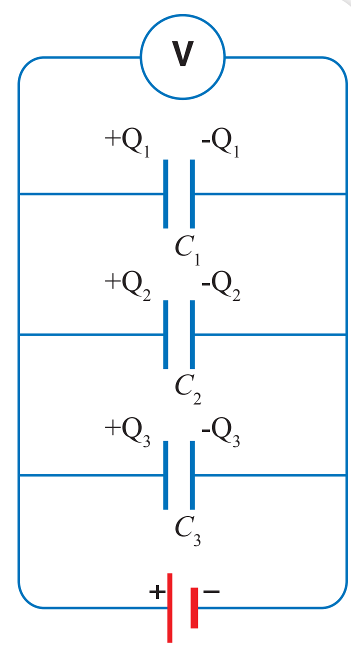
$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

حيث C: المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة المتصلة على التوازي.

وبشكل عام، فإنّ المواسعة المكافئة C لمجموعة مواسعات تتّصل معًا على التوازي تساوي المجموع الجبري لقِيَم تلك المواسعات، أي إنّ:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots$$

أعدُّ فيلمًا قصيرًا باستعمال برنامج صانع الأفلام (movie maker) يوضّح التطبيقات العملية للمواسعات واستعمالاتها في العديد من الأجهزة والدارات الكهربائية، مثل أجهزة الحاسوب والراديو والتلفاز، والأجهزة الطبية وأجهزة تكبير الصوت ووحدة الإضاءة (الفلاش) في الكاميرا وغيرها؛ لأداء مهام معيّنة مثل تخزين الطاقة وحماية الدارات الكهربائية من طفرات الجهد (ضبط الجهد) وتضخيم الإشارة، ثم أشاركه معلمي وزملائي في الصف.



الشكل (38): التوصيل على التوازي.

المثال 20

مواسعان، مواسعة الأول ($5\ \mu$F) والثاني ($10\ \mu$F) وُصِلا على التوازي مع بطّارية جهدها (30 V)، أحسبُ:

أ . المواسعة المكافئة.

ب. شحنة كلّ من المواسعين الأول والثاني.

المعطيات: $V = 30$ V, $C_1 = 5\ \mu$F, $C_2 = 10\ \mu$F

المطلوب: $Q_1 = ?,\ Q_2 = ?,\ C = ?$

الحلّ:

أ . $C = C_1 + C_2 = (5 + 10) = 15\ \mu\text{F} = 15 \times 10^{-6}$ F

ب. جهد كل من المواسعين يساوي جهد البطّارية V وبالتالي:

$$Q_1 = C_1V = (5\times10^{-6})(30) = 1.5 \times 10^{-4}$$

$$Q_2 = C_2V = (10\times10^{-6})(30) = 3 \times 10^{-4}$$

التوصيل على التوالي Series Combination

يُبيّن الشكل (39) 3 مواسعات (C_1, C_2, C_3) تتّصل معًا على التوالي مع بطّارية، إنّ صفيحة المواسع الثالث الموصولة مع القطب السالب للبطّارية تُشحن بشحنة سالبة ($-Q$)، بينما تُشحن صفيحة المواسع الأول الموصولة مع القطب الموجب للبطّارية بشحنة موجبة ($+Q$)، أمّا بقية الصفائح بينهما فتُشحن بحيث تكتسب كلّ صفيحة إمّا شحنة ($+Q$) وإمّا ($-Q$)؛ بمعنى أنّ شحنة المواسعات متساوية وتساوي الشحنة الكلّية Q. أمّا المجموع الجبري لجهود المواسعات الثلاثة فيساوي جهد البطّارية V:

$$V = V_1 + V_2 + V_2$$

وبما أنّ: $C = \frac{Q}{V}$ فإنّ المعادلة تؤول إلى:

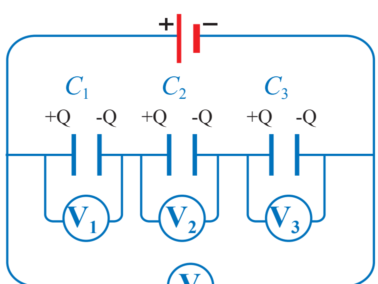
$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

وبالقسمة على Q نحصل على:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

حيث C: المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة المتّصلة على التوالي.

وبشكل عامّ؛ فإنّ المواسعة المكافئة C لمجموعة مواسعات تتّصل معًا على التوالي تُعطى بالعلاقة: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots$

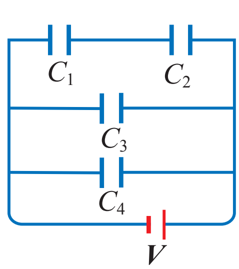


الشكل (39): التوصيل على التوالي.

أتحقّق: تتّصل مجموعة مواسعات مع بطّارية كما في الشكل، بناءً عليه أُحدّد:

أ. مواسعًا جهده يساوي جهد البطّارية.

ب. مواسعين شحنتيهما متساويتين.



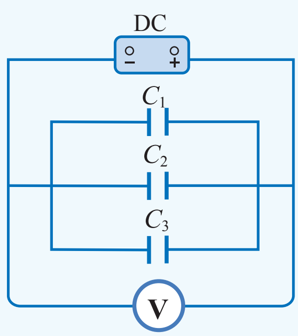
ولإيجاد المواسعة المكافئة لعدّة مواسعات تتّصل معًا على التوالي أو على التوازي بطريقة عملية، يُمكنني إجراء النشاط الآتي:

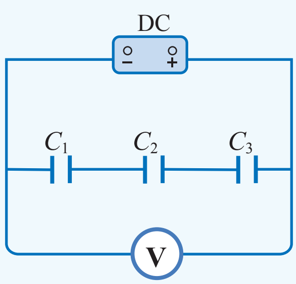
التجربة 3

المواسعة المكافئة لعدّة مواسعات تتّصل على التوالي، أو التوازي

الموادّ والأدوات:

(3) مواسعات متماثلة وجهدها صغير (مثلًا: 3μF, 10V)، مصدر طاقة (تيّار مستمرّ DC)، فولتميتر، أسلاك توصيل، لواقط فلزّية.





إرشادات السلامة: الحذر من رفع جهد المصدر إلى جهد عالٍ، ما يؤدّي إلى تلف المواسعات إضافة إلى خطورته.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

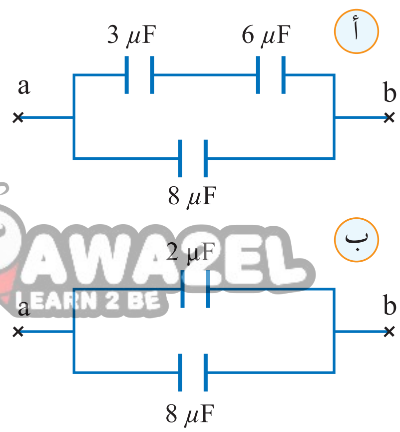
1. أتأكّد من أنّ المواسعات غير مشحونة $(V = 0)$؛ عن طريق توصيل سلك سميك بين طرفَي المواسع.
2. أصل المواسعات الثلاثة على التوازي كما في الدارة المبيّنة في الشكل، ثم أُغلق الدارة.
3. **أقيس:** أرفع جهد مصدر الطاقة حتى تُصبح قراءة الفولتيتر (جهد البطارية) أقل من الجهد المكتوب على المواسع (10 V مثلًا)، ثم أفصل الفولتمتر وأستعملُه لقياس جهد كلّ مواسع من المواسعات الثلاثة، وأُدوّن نتائجي في الجدول.
4. أفصل الدارة وأُفرّغ المواسعات من شحنتها، ثم أُعيد توصيلها على التوالي كما في الشكل وأُغلق الدارة.
5. أُكرّر الخطوة (3)، وأُدوّن نتائجي في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. **أحسبُ** شحنة كلّ مواسع باستعمال العلاقة: $C = \dfrac{Q}{V}$
2. **أُقارن** - عن طريق النتائج العملية - بين المواسعات في حالة التوصيل على التوازي والتوصيل على التوالي من حيث الشحنة والجهد. هل تتّفق النتائج العملية مع ما تعلّمتُه نظريًّا؟
3. **أحسبُ** المواسعة المكافئة المقيسة والمواسعة المكافئة المتوقّعة، وأُقارن بينهما.
4. **أتوقّع** مصادر الخطأ المحتملة في التجربة. كيف يُمكنني تجنّبها؟

المثال 21

يُمثّل الشكل (40/ أ) جزءًا من دارة كهربائية يحتوي على (3) مواسعات، أحسبُ المواسعة المكافئة للمواسعات الثلاثة.



الشكل (40): المواسعة المكافئة.

المطلوب: $C = ?$

الحلّ: المواسعان ($3\ \mu$F, $6\ \mu$F) على التوالي ومواسعتهما المكافئة $C_{3,6}$:

$$\frac{1}{C_{3,6}} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_6}$$

$$\frac{1}{C_{3,6}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{6+3}{18} = \frac{1}{2} \Rightarrow C_{3,6} = 2\ \mu\text{F}$$

لذا، يُمكنني استبدال المواسعين ($3\ \mu$F, $6\ \mu$F) بمواسع مواسعته ($2\ \mu$F) يتّصل على التوازي مع المواسع ($8\ \mu$F) كما في الشكل (42/ ب)، ومواسعتهما المكافئة C:

$$C = C_{3,6} + C_8 = 2 + 8 = 10\ \mu\text{F}$$

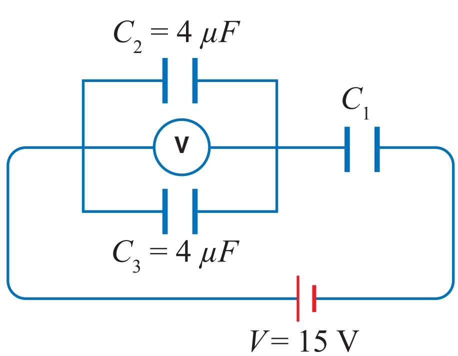
المثال 22

يُبيّن الشكل (41) 3 مواسعات تتّصل مع بطّارية جهدها (15 V)، إذا كانت قراءة الفولتيمتر (10 V)؛ فأحسبُ:

أ. جهد المواسع C_1.

ب. الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع C_2.

جـ. مواسعة المواسع C_1.



الشكل (41): المواسعة المكافئة.

المعطيات: $V = 15$ V, $V_2 = V_3 = 10$ V

المطلوب: $V_1 = ?,\ C_1 = ?,\ PE_2 = ?$

الحلّ:

أ. قراءة الفولتميتر $V_2 = V_3 = V_{23} = 10$ V

جهد المواسع C_1 (V_1): $V = V_1 + V_{23}$

$$15 = V_1 + 10 \Rightarrow V_1 = 5\ \text{V}$$

ب. الطاقة المختزنة في المواسع الثاني:

$$PE_2 = \frac{1}{2} C_2 V_2^2 = \frac{1}{2} \times (4 \times 10^{-6})(10)^2 = 2 \times 10^{-4}\ \text{J}$$

جـ. أحسبُ أولا شحنة المواسع C_1:

$$Q_{23} = C_{23}\ V_{23}$$

لكن $C_{23} = C_2 + C_3 = 4 + 4 = 8\ \mu$F ... توازي

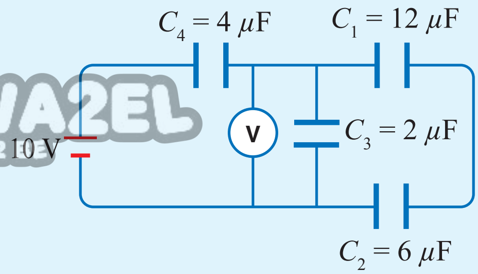
$$Q_{23} = (8\times10^{-6})(10) = 8 \times 10^{-5}\ \text{C} = Q_1$$

أحسبُ مواسعة المواسع C_1:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_1} = \frac{8 \times 10^{-5}}{5} = 1.6 \times 10^{-5}\ \text{F} = 16\ \mu\text{F}$$

تمرين

تتّصل (4) مواسعات مع بطّارية جهدها (10 V) كما في الشكل، أحسبُ:



أ. المواسعة المكافئة.

ب. شحنة المواسع الرابع.

جـ. قراءة الفولتميتر.

د. الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع الثالث.

الربط مع الطب

جهاز الصدمة الكهربائية للقلب
(AED) Automated External Defibrillator

يحدث أحيانًا توقّف مفاجئ للقلب، ويتوقّف عن النبض بشكل غير متوقّع، وإذا لم يُعالج في غضون دقائق؛ فإنّه يؤدّي غالبًا إلى الموت.

وجهاز الصدمة الكهربائية للقلب (AED) جهاز يُستعمل لمساعدة الأشخاص الذين يعانون من توقّف القلب المفاجئ، أنظرُ إلى الشكل (42). وهو جهاز طبي متطوّر خفيف الوزن ومحمول وسهل الاستعمال، يُمكنه تحليل نبضات القلب، وإذا اكتشف نبضًا غير طبيعي للقلب؛ فإنّه يعمل على مساعدة القلب وإعادة تنظيم ضرباته الطبيعية عن طريق صدمة كهربائية عبر الصدر إلى القلب؛ إذ يطلب برنامج الجهاز من المستعمل الضغط على زر لإصدار صدمة كهربائية. وفي بعض الأجهزة المتطوّرة يجري ذلك تلقائيًّا من دون تدخّل المستعمل.

يُمكن استعمال الجهاز بسهولة؛ إذ تتوافر تعليمات الاستعمال الصوتية والمرئية كافّة على الشاشة. ويجري توفير هذه الأجهزة في الأماكن العامة مثل القاعات الرياضية.

يتركّب الجهاز من عدّة أجزاء رئيسة منها مواسع كهربائي مواسعته ($32\ \mu F$)؛ وهو الجزء المسؤول عن تأمين الشحنات الكهربائية اللازمة لحدوث الصدمة؛ عن طريق تفريغ الشحنات بشكل لحظي، ويجري شحنه باستعمال بطّارية مشحونة وجاهزة للاستعمال.

الشكل (42): جهاز الصدمة الكهربائية للقلب (AED).

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بكلّ من المفاهيم والمصطلحات الآتية: المواسع الكهربائي، المواسعة الكهربائية، المواسعة المكافئة.

2. **أُحلّل:** مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، كيف يُمكنني زيادة مواسعته إلى (4) أضعاف؟

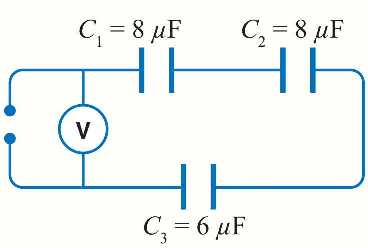
3. **أُحلّل:** ماذا نعني بقولنا مواسعة مواسع (5 F)؟

4. أحسبُ الطاقة الكلّية المختزنة في (3) مواسعات مواسعة كل منها ($30\ \mu F$) تتّصل على التوازي مع بطّارية جهدها (12 V).

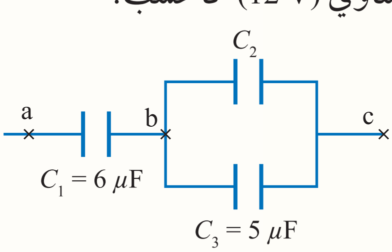
5. **أحلّ مشكلات:** في أثناء عمل مهندس في صيانة الحواسيب، لزمه مواسع مواسعته (5 nF) وليس لديه سوى مواسعين مواسعة كل منهما (10 nF). ما طريقة التوصّل الأنسب للمواسعين للحصول على المواسعة المطلوبة؟ أُوضّح إجابتي.

6. **أستعملُ المتغيّرات:** مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مساحة كلّ من صفيحتيه $2 \times 10^{-3}\ m^2$ والبُعد بينهما (0.1 cm)، مشحون بشحنة مقدارها 6 nC ومفصول عن مصدر الطاقة (البطارية) ، أحسبُ:
   - أ . مواسعة المواسع.
   - ب. جهد المواسع.
   - جـ. إذا تناقصت مساحة كلّ من الصفيحتين إلى النصف، ماذا يحدث لكلّ من: مواسعة المواسع وجهده، والطاقة الكهربائية المختزنة فيه.

7. **أستعملُ المتغيّرات:** تتّصل (3) مواسعات مع مصدر كما في الشكل المجاور. إذا علمتُ أنّ شحنة المواسع C_3 تساوي 3×10^{-5} C فأحسبُ:
   - أ . المواسعة المكافئة.
   - ب. قراءة الفولتميتر.



8. **التفكير الناقد:** يُمثّل الشكل المجاور جزءًا من دارة كهربائية تحتوي على (3) مواسعات. إذا علمتُ أنّ فرق الجهد بين النقطتين a و c يساوي (20 V)، وبين النقطتين b و c يساوي (12 V)، فأحسبُ:
   - أ . شحنة المواسع C_1.
   - ب. مواسعة المواسع C_2.
   - جـ. الطاقة الكلّية المختزنة في المواسعات الثلاثة.

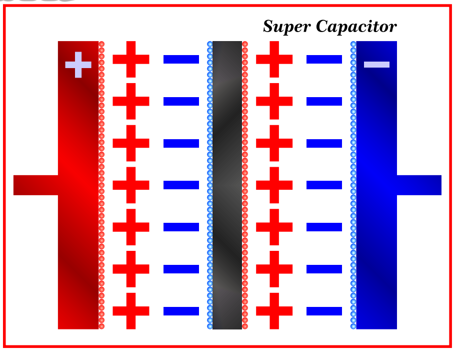


الإثراء والتوسّع

المواسع الفائق Super Capacitor

المواسعات الفائقة Super capacitors أو العالية المواسعة Ultra capacitance، كلّها تسميات لنمط واحد من المواسعات، وهي أحدث التطويرات التكنولوجية في مجال تخزين الطاقة. فما المواسعات الفائقة؟ وما مميّزاتها؟

المواسعات العادية غالبًا ما تُقاس بوحدة الميكرو أو النانو أو البيكو كما تعلّمتُ؛ لأنّ الفاراد كبير جدًّا، وعملية تطوير المواسعات بدأت منذ عشرات السنين لتخزين طاقة أكبر عن طريق المواسعات الفائقة، والتي تُدعى أحيانًا المواسعات ذات **الطبقة المضاعفة Double layer capacitor (DLC)** كونها الأكثر انتشارًا، أنظرُ إلى الشكل المجاور. وهي مواسعات ذات مواسعة عالية جدًّا تصل إلى مئات الآلاف من الفاراد وبحجم مماثل للمواسعات العادية، ولكنّ جهدها قليل يتراوح بين (2.5 - 2.75 V) مقارنة مع جهود المواسعات العادية كما في الشكل، ولكن يُمكن توصيل عدّة مواسعات على التوالي للحصول على جهد أكبر.



عند المقارنة بين المواسعات الفائقة والبطّاريات المستعملة حاليًّا مثل بطّارية الليثيوم؛ فإنّ المواسعات الفائقة تتميّز عن البطّاريات بما يأتي:

- زمن الشحن والتفريغ قليل جدًّا؛ فمثلًا الزمن اللازم لشحن هاتف خلوي دقيقة تقريبًا، بينما الهاتف الخلوي الذي تُستعمل فيه بطّارية يحتاج إلى عدّة ساعات.
- عدد دورات الشحن والتفريغ التي يُمكن إجراؤها قد تصل إلى مليون دورة، بينما لا تصل في البطارية إلى أكثر من (1000) دورة.
- آمنة ولا تحتوي على موادّ سامّة في تركيبها، وتكلفتها الماديّة قليلة.
- قدرتها على تحمّل تغيّر درجات الحرارة (80°C) – (-50°C).

مواسع عادي

مواسع فائق المواسعة

إلّا أنّ البطّاريات تتميّز عن المواسعات الفائقة بكبر الجهد الكهربائي المخزّن، بالمقارنة مع الجهد القليل في المواسعات الفائقة، كذلك نسبة التفريغ الذاتي في البطّاريات أقل بكثير منها في المواسعات الفائقة.

أبحث مستعينًا بمصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الانترنت، أبحث عن معلومات إضافية عن المواسعات الفائقة وتطبيقاتها المستقبلية، ثم أكتبُ تقريرًا مدعمًا بالصور عن ذلك، وأقرؤه أمام المعلم والطلبة في الصف وأناقشه معهم.

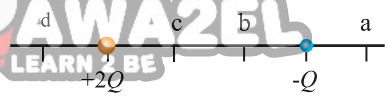
1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. الوحدة التي تُقاس بها مواسعة مواسع هي:

أ . فولت. كولوم.   ب. فولت / كولوم.

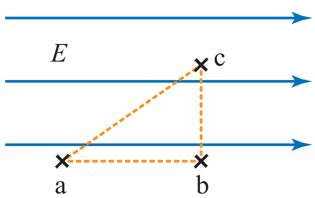
جـ. كولوم / م^2.   د. كولوم / فولت.

2. النقطة التي يُمكن أن يكون الجهد عندها يساوي صفرًا على الخطّ الواصل بين الشحنتين في الشكل، هي:



أ. a   ب. b   جـ. c   د. d

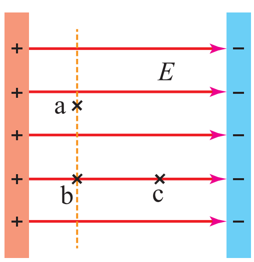
3. تزداد طاقة الوضع الكهربائية لبروتون في مجال كهربائي كما في الشكل، عند انتقاله:



أ . من النقطة c إلى النقطة b.   ب. من النقطة b إلى النقطة c.

جـ. من النقطة a إلى النقطة c.   د. من النقطة c إلى النقطة a.

4. (3) نقاط في مجال كهربائي منتظم كما في الشكل، أيّ المقارنات الآتية صحيحة بين جهد تلك النقاط:



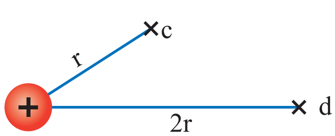
أ . $V_a = V_b = V_c$ ب. $V_a > V_b = V_c$

جـ. $V_a = V_b > V_c$ د. $V_a = V_b < V_c$

5. الجهد الكهربائي عند نقطة تقع على سطح موصل كروي مشحون ومعزول نصف قطره R يساوي (400 V). ما مقدار الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد مسافة $\frac{R}{2}$ عن مركزه؟

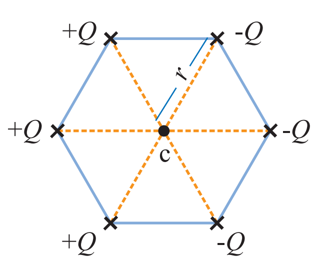
أ. 200 V   ب. 400 V   جـ. 800 V   د. 0 V

6. النسبة بين جهد النقطة c إلى جهد النقطة d ($V_c : V_d$) تساوي:



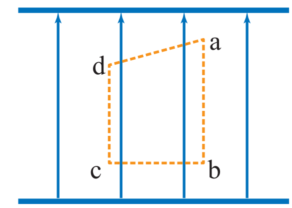
أ. (1:2)   ب. (2:1)   جـ. (1:4)   د. (4:1)

7. (6) شحنات على رؤوس شكل سداسي منتظم كما في الشكل، إذا أُزيلت شحنة سالبة Q- من إحدى رؤوس الشكل؛ فإنّ جهد النقطة c في مركز الشكل تساوي:



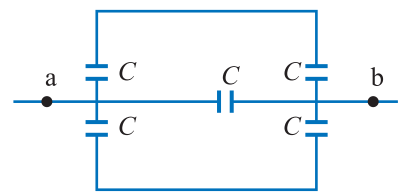
أ . $V = k\,\frac{5\,Q}{r}$ ب. $V = k\,\frac{-Q}{r}$

جـ. $V = k\,\frac{+Q}{r}$ د. $V = 0$



8. يُبيّن الشكل (4) نقاط على شكل شبه منحرف في مجال كهربائي منتظم، النقطتان اللتان يكون فرق الجهد بينهما يساوي صفرًا هما:

أ. (a,b) ب. (b,c) جـ. (c,d) د. (d,a)



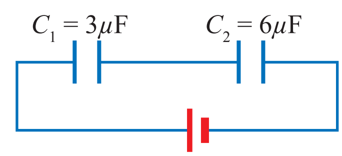
9. مقدار المواسعة المكافئة لمجموعة المواسعات بين النقطتين (a ,b) في الشكل يساوي:

أ. $\frac{C}{2}$ ب. C جـ. $2\,C$ د. $5\,C$

10. ما التغيّر الذي يحدث للطاقة المختزنة في مواسع عند مضاعفة جهده؟

أ . تزداد إلى الضعف. ب. تقلّ إلى النصف.

جـ. تزداد إلى (4) أضعاف. د. تقلّ إلى الربع.



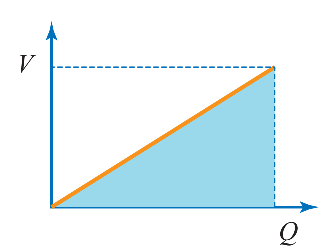
11. مواسعان يتّصلان مع بطّارية كما في الشكل، عند المقارنة بين المواسعين؛ أيّ العبارات الآتية صحيحة؟

أ . $V_2 = 2V_1$ ب. $V_2 = V_1$

جـ. $Q_2 = 2Q_1$ د . $Q_2 = Q_1$

12. مواسع ذو صفيحتين متوازيين مواسعته C، إذا ازدادت مساحة كلّ من صفيحتيه إلى مثلَي ما كانت عليه، وقلّت المسافة بينهما إلى النصف؛ فإنّ مواسعتة تُصبح:

أ. $\frac{C}{2}$ ب. $\frac{C}{4}$ جـ. $4C$ د. C



13. يُمثّل الشكل العلاقة البيانية بين شحنة مواسع وجهده، أيّ ممّا يأتي يُمثّل: (ميل الخط، المساحة الكلّية تحت الخط) على الترتيب:

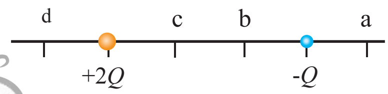
أ. (مواسعة المواسع، الطاقة المختزنة في المواسع).

ب. (الطاقة المختزنة في المواسع، مواسعة المواسع).

جـ. (مقلوب مواسعة المواسع، الطاقة المختزنة في المواسع).

د. (مواسعة المواسع، مقلوب الطاقة المختزنة في المواسع).

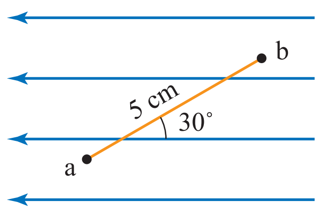
2 أستعملُ المتغيّرات: شحنة نقطية مقدارها $(-2\ \mu C)$ والنقطتان (c, d) تقعان في مجال تلك الشحنة وتُبعدان مسافة (4 cm, 10 cm) على الترتيب عن مركز الشحنة، مستعينًا بالشكل أحسبُ:



أ . جهد كل من النقطتين c وd.

ب. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائية لنقل إلكترون من النقطة d إلى النقطة c.

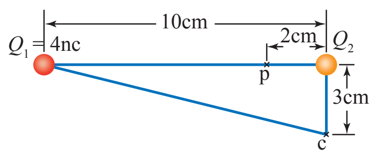
3 أستعملُ المتغيّرات: مجال كهربائي منتظم مقداره 3×10^4 N/C كما في الشكل، مستعينًا بالشكل أحسبُ:



أ . فرق الجهد بين النقطتين V_{ab}.

ب. التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية عند انتقال شحنة مقدارها (-6 pC) من النقطة a إلى النقطة b.

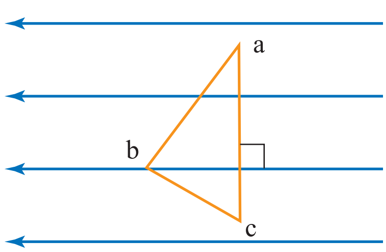
4 أستعملُ المتغيّرات: شحنتان نقطيتان (Q_1, Q_2) كما في الشكل. إذا علمتُ أنّ جهد النقطة p الواقعة على الخط الواصل بين الشحنتين يساوي صفرًا، فمستعينًا بالشكل أُجيب عما يأتي:



أ . ما نوع الشحنة Q_2؟ وما مقدارها؟

ب. أحسبُ جهد النقطة c.

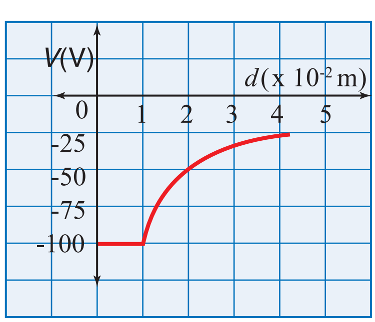
5 التفكير الناقد: (3) نقاط (a, b, c) في مجال كهربائي منتظم كما في الشكل، إذا بذلت القوّة الكهربائية شغلًا مقداره (100 J) لنقل بروتون من النقطة a إلى النقطة b، فأحسب:



أ . التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية عند انتقال بروتون من النقطة a إلى النقطة c.

ب. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائية لنقل بروتون من النقطة c إلى النقطة b.

6 أُحلّل: يُمثّل الرسم البياني في الشكل، العلاقة بين الجهد الكهربائي والبُعد عن مركز موصل كروي مشحون بشحنة سالبة، مستعينًا بالشكل أحسبُ:



أ . جهد الموصل الكروي ونصف قطره.

ب. الشغل المبذول من قِبَل القوّة الكهربائية لنقل شحنة (+6 nC) من نقطة تبعد (4 cm) إلى نقطة أخرى تبعد (2 cm) عن مركز الموصل.

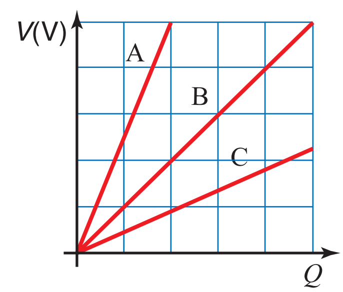
7 **التفكير الناقد: أُثبتُ أنّ الجهد الكهربائي على سطح موصل كروي موضوع في الهواء نصف قطره R والكثافة السطحية لشحنته σ، يُعطى بالعلاقة:**

$$V = \frac{\sigma R}{\varepsilon_0}$$

8 **أستعملُ المتغيّرات: يُستعمل مواسع مواسعته ($180\ \mu F$) في وحدة إضاءة (فلاش) الكاميرا كما في الشكل لتخزين الطاقة الكهربائية؛ لتُفرّغ من المواسع خلال جزء من الثانية على شكل طاقة ضوئية في أثناء التقاط الصورة. إذا شُحِن المواسع حتى أصبح جهده (200 V) بوساطة بطارية؛ فأحسبُ:**

أ. شحنة المواسع الكلية.

ب. الطاقة الكهربائية المختزنة في المواسع.

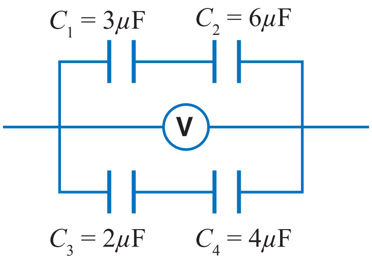


9 **التفكير الناقد: رُسِمت العلاقة البيانية بين الشحنة والجهد لـ (3) مواسعات (A, B, C) كما في الشكل. أيّ المواسعات مواسعته أكبر؟ أُفسّر إجابتي.**

10 **أستعملُ المتغيّرات: مواسع ضمن لوحة إلكترونية كما في الشكل، مستعينًا بالبيانات المثبّتة عليه أحسبُ:**

أ. أكبر شحنة يُمكنني تخزينها بأمان في المواسع.

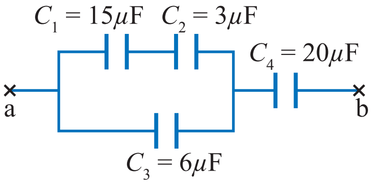
ب. الطاقة الكهربائية التي تُختزن في المواسع عند وصله ببطارية جهدها (150 V).



11 **أستعملُ المتغيّرات: يُمثّل الشكل جزءًا من دارة كهربائية. إذا علمتُ أنّ قراءة الفولتميتر (12 V)؛ فأحسبُ:**

أ. المواسعة المكافئة.

ب. الطاقة الكلية المختزنة في المواسعات.



12 **أستعملُ المتغيّرات: تتّصل (4) مواسعات معًا في جزء من دارة كهربائية كما في الشكل. إذا علمتُ أنّ شحنة المواسع C_4 تساوي ($30\mu C$)؛ فأحسبُ فرق الجهد بين النقطتين a و b.**

مسرد المصطلحات

- **تدفّق كهربائي Electric Flux:** خطوط المجال الكهربائي التي تعبر مساحة محدّدة.
- **الجهد الكهربائي** عند نقطة **Electric Potential at a Point:** الشغل الذي تبذله قوّة خارجية لنقل وحدة الشحنة الموجبة بسرعة ثابتة، من اللانهاية إلى تلك النقطة في المجال الكهربائي.
- **جول joule:** شغل تبذله قوّة مقدارها (1 N)؛ عندما تؤثّر في جسم وتحرِّكه إزاحة مقدارها (1 m) في اتّجاهها.
- **حفظ الطاقة الميكانيكية Conservation of Mechanical Energy:** تبقى الطاقة الميكانيكية لجسم ثابتة في ظل وجود قوى محافظة فقط تبذل شغلًا.
- **خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines:** مسارات شحنة اختبار نقطية موجبة، تتحرّك تحت تأثير المجال فقط.
- **سطح تساوي الجهد Equipotential Surface:** السطح الذي يكون الجهد الكهربائي عند نقاطه جميعها متساويًا.
- **سطح غاوس Gaussian surface:** سطح افتراضي (وهمي) مغلق يُحيط بالشحنة الكهربائية ويُستعمل لحساب المجال الكهربائي.
- **شحن بالتوصيل Charging by Surface:** عملية ملامسة جسم مشحون مع آخر متعادل؛ فيحدث انتقال للشحنات الكهربائية بين الجسمين.
- **شحن بالحثّ Charging by Induction:** عملية شحن جسم موصل متعادل؛ عن طريق تقريب جسم مشحون (موصل أو عازل) منه من دون ملامسته؛ فيُعاد توزيع الشحنات على طرفَي الجسم الموصل المتعادل ويُصبح مشحونًا.
- **شحن بالدلك Charging by Rubbing:** عملية دلك جسم مع جسم آخر، فينتج عنها انتقال الإلكترونات من سطح أحد الجسمين إلى سطح الجسم الآخر.
- **شحنة نقطية Point Charge:** شحنة كهربائية يحملها جسم تكون أبعاده صغيرة ومهملة بالنسبة إلى المسافات بين الشحنات.

- **شغل Work:** كمّية فيزيائية ناتجة عن الضرب القياسي لمتّجه القوّة المؤثّرة في جسم في متّجه إزاحة الجسم ورمزه (W)، وهو إحدى طرائق نقل الطاقة بين الأجسام، ويُقاس بوحدة الجول joule (J) حسب النظام الدولي للوحدات.
- **طاقة Energy:** مقدرة الجسم على بذل شغل، وهي كمّية قياسية تُقاس بوحدة الجول joule (J) حسب النظام الدولي للوحدات.
- **طاقة الوضع الكهربائية Electric Potential Energy:** الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية لنقل شحنة اختبار موجبة بسرعة ثابتة، من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي.
- **طاقة حركية Kinetic Energy:** الطاقة المرتبطة بحركة جسم ورمزها (KE)، ويُعبّر عنها بالمعادلة الآتية: $KE = \frac{1}{2} mv^2$.
- **طاقة ميكانيكية Mechanical Energy:** مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع لجسم عند موقع معين ورمزها ME، ويُعبّر عنها بالمعادلة الآتية: $ME = KE + PE$.
- **طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية Gravitational Potential Energy:** الطاقة المختزنة في نظام (جسم – الأرض) نتيجة موقع الجسم في مجال الجاذبية ورمزها PE ، ويُعبّر عنها بالعلاقة الآتية: $PE = mgy$.
- **فرق الجهد الكهربائي** بين نقطتين **Electric Potential Difference**: التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة q؛ عند انتقالها من نقطة إلى أخرى في المجال الكهربائي مقسومًا على الشحنة q.
- **قانون غاوس Gauss's Law:** ينص على أنّ التدفّق الكهربائي الكلّي عبر سطح مغلق، يساوي مجموع الشحنات الكلّية داخل السطح مقسومًا على سماحية الفراغ.
- **قانون كولوم Coulomb's Law:** ينص على أنّ القوّة الناشئة بين شحنتين نقطيتين في الفراغ تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنتين، وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما.
- **قدرة Power:** المعدّل الزمني للشغل المبذول، أي إنّها تساوي ناتج قسمة الشغل المبذول (W) على الزمن المستغرق لبذله (t). رمز القدرة المتوسطة ($\overline{P}$)، ورمز القدرة اللحظية (P)، وتُقاس بوحدة (J/s)، وتُسمّى واط watt (W) حسب النظام الدولي للوحدات.
- **كثافة خطوط المجال الكهربائي Density of Electric Field Lines:** عدد خطوط المجال التي

تخترق وحدة المساحة من سطح ما، بشكل عمودي عليه.

- **كثافة سطحية للشحنة Surface Charge Density:** ناتج قسمة الشحنة الكلّية للجسم على مساحة سطحه.
- **مبرهنة الشغل – الطاقة الحركية Work – Kinetic Energy Theorem:** تنص على أنّ: "الشغل الكلّي المبذول على جسم يساوي التغيّر في طاقته الحركية".
- **مجال كهربائي Electric Field:** حيّز يُحيط بالجسم المشحون، وتظهر فيه آثار القوى الكهربائية التي تؤثّر في الأجسام المشحونة الأُخرى.
- **مجال كهربائي عند نقطة Electric Field at a Point:** القوّة الكهربائية التي تؤثّر في وحدة الشحنة الموجبة الموضوعة في تلك النقطة.
- **مجال كهربائي منتظم Uniform Electric Field:** عندما يكون المجال الكهربائي ثابتًا في مقداره واتّجاهه عند نقاطه جميعها؛ فإنّه يُسمّى مجالًا كهربائيًّا منتظمًا.
- **المواسع Capacitor:** جهاز يُستعمل لتخزين الطاقة الكهربائية.
- **المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين Parallel Plate Capacitor:** مواسع يتكوّن من صفيحتين موصلتين متوازيتين متقابلتين ومتساويتين في المساحة، تفصلهما مادّة عازلة.
- **المواسعة Capacitance:** الشحنة الكهربائية المختزنة لوحدة فرق الجهد الكهربائي.
- **المواسعة المكافئة Equivalent Capacitance:** المواسعة الكلّية لمجموعة مواسعات تتّصل معًا في دارة كهربائية.
- **واط watt:** قدرة آلة أو جهاز تبذل شغلًا مقداره (1 J) خلال فترة زمنية مقدارها (1 s).

جدولُ الاقتراناتِ المثلثيةِ

الزاوية	الجيب	جيب التمام	الظل
صفر	0.0000	1.000	0.000
1	0.018	1.000	0.018
2	0.035	0.999	0.035
3	0.052	0.999	0.052
4	0.070	0.998	0.070
5	0.087	0.996	0.088
6	0.105	0.995	0.105
7	0.122	0.993	0.123
8	0.139	0.990	0.141
9	0.156	0.989	0.158
10	0.174	0.985	0.176
11	0.191	0.982	0.194
12	0.208	0.978	0.213
13	0.225	0.974	0.231
14	0.242	0.970	0.249
15	0.259	0.966	0.268
16	0.276	0.961	0.287
17	0.292	0.956	0.306
18	0.309	0.951	0.325
19	0.326	0.946	0.344
20	0.342	0.940	0.364
21	0.358	0.934	0.384
22	0.375	0.927	0.404
23	0.391	0.921	0.425
24	0.407	0.914	0.445
25	0.423	0.906	0.466
26	0.438	0.899	0.488
27	0.454	0.891	0.510
28	0.470	0.883	0.531
29	0.485	0.875	0.554
30	0.500	0.866	0.577
31	0.515	0.857	0.604
32	0.530	0.848	0.625
33	0.545	0.839	0.650
34	0.559	0.829	0.675
35	0.574	0.819	0.700
36	0.588	0.809	0.727
37	0.602	0.799	0.754
38	0.616	0.788	0.781
39	0.629	0.777	0.810
40	0.643	0.766	0.839
41	0.656	0.755	0.869
42	0.669	0.734	0.900
43	0.682	0.731	0.932
44	0.695	0.719	0.966
45	0.707	0.707	1.000

الزاوية	الجيب	جيب التمام	الظل
46	0.719	0.695	1.036
47	0.731	0.682	1.072
48	0.743	0.669	1.110
49	0.756	0.656	1.150
50	0.766	0.643	1.192
51	0.777	0.629	1.235
52	0.788	0.616	1.280
53	0.799	0.602	1.327
54	0.809	0.588	1.376
55	0.819	0.574	1.428
56	0.829	0.559	1.483
57	0.839	0.545	1.540
58	0.848	0.530	1.600
59	0.857	0.515	1.664
60	0.866	0.500	1.732
61	0.875	0.485	1.804
62	0.883	0.470	1.880
63	0.891	0.454	1.963
64	0.899	0.438	2.050
65	0.906	0.423	2.145
66	0.914	0.407	2.246
67	0.921	0.391	2.356
68	0.927	0.375	2.475
69	0.935	0.384	2.605
70	0.940	0.342	2.748
71	0.946	0.326	2.904
72	0.951	0.309	3.078
73	0.956	0.292	3.271
74	0.961	0.276	3.487
75	0.966	0.259	3.732
76	0.970	0.242	4.011
77	0.974	0.225	4.331
78	0.978	0.208	4.705
79	0.982	0.191	5.145
80	0.985	0.174	5.671
81	0.988	0.156	6.314
82	0.990	0.139	7.115
83	0.993	0.122	8.144
84	0.995	0.105	9.514
85	0.996	0.087	11.43
86	0.998	0.070	14.30
87	0.998	0.052	19.08
88	0.999	0.035	28.64
89	1.000	0.018	57.29
90	1.000	0.000	∞

(References) قائمةُ المراجِع

1. Avijit Lahiri, **BASIC PHYSICS: PRINCIPLES AND CONCEPTS,** Avijit Lahiri, 2018 David Halliday, Robert Resnick , Jearl Walker, Fundamentals of Physics, Wiley; 11 edition 2018.

2. Douglas C. Giancoli, Physics: **Principles with Applications**, Addison Wesley, 6th edition, 2009.

3. Gurinder Chadha, **A Level Physics a for OCR**, A Level Physics a for OCR, 2015.

4. Hugh D. Young , Roger A. Freedman, **University Physics with Modern Physics**, Pearson; 14 edition (February 24, 2015)

5. Paul A. Tipler, Gene Mosca, **Physics for Scientists and Engineers**, W. H. Freeman; 6th edition, 2007.

6. Paul G. Hewitt, **Conceptual Physics**, Pearson; 14th edition, 2015.

7. R. Shankar, **Fundamentals of Physics I: Mechanics, Relativity, and Thermodynamics**, Yale University Press; Expanded Edition, 2019.

8. Raymond A. Serway , John W. Jewett, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, Cengage Learning; 009 edition, 2015.

9. Raymond A. Serway, Chris Vuille, **College Physics**, Cengage Learning; 11 edition, 2017.

10. Roger Muncaster, **A Level Physics**, Oxford University Press; 4th edition, 2014.

11. Steve Adams, **Advanced Physics**, Oxford University Press, USA; 2nd. Edition, 2013.

12. Tom Duncan, **Advanced Physics**, Hodder Murray; 5th edition, 2000.