سلطنة عمان
وزارة التربية والتعليم

رؤية عمان 2040
نتقدم بثقة
Moving Forward with Confidence

الفيزياء

الصف الثاني عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية
1445 هـ - 2023 م

سلطنة عمان
وزارة التربية والتعليم

الفيزياء

الصف الثاني عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية 1445 هـ - 2023 م

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

مطبعة جامعة كامبريدج، الرمز البريدي CB2 8BS، المملكة المتحدة.

تشكل مطبعة جامعة كامبريدج جزءًا من الجامعة.
وللمطبعة دور في تعزيز رسالة الجامعة من خلال نشر المعرفة، سعيًا وراء
تحقيق التعليم والتعلم وتوفير أدوات البحث على أعلى مستويات التميز العالمية.

© مطبعة جامعة كامبريدج ووزارة التربية والتعليم في سلطنة عُمان.

يخضع هذا الكتاب لقانون حقوق الطباعة والنشر، ويخضع للاستثناء التشريعي
المسموح به قانونًا ولأحكام التراخيص ذات الصلة.
لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب من دون الحصول على الإذن المكتوب من
مطبعة جامعة كامبريدج ومن وزارة التربية والتعليم في سلطنة عُمان.

الطبعة التجريبية ٢٠٢٣ م، طُبعت في سلطنة عُمان

هذه نسخة تمَّت مواءمتها من كتاب الطالب – الفيزياء للصف الثاني عشر – من سلسلة كامبريدج للفيزياء
لمستوى الدبلوم العام والمستوى المتقدم AS & A Level للمؤلفين دايفيد سانغ، وغراهام جونز، وغوريندر تشادا،
وريتشارد وودسيد.

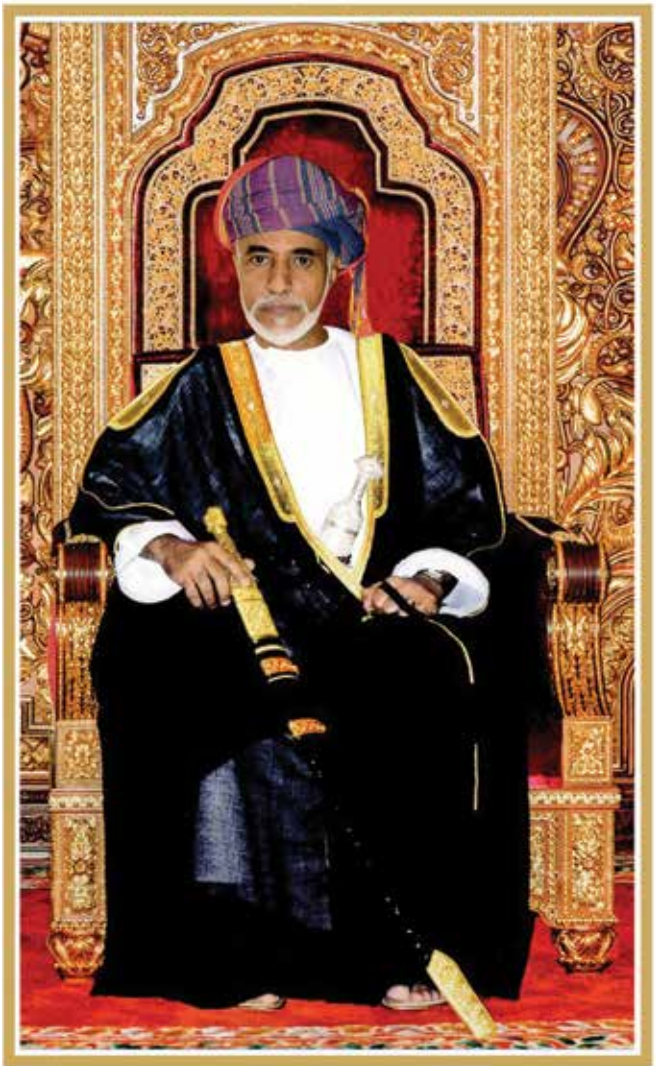
تمت مواءمة هذا الكتاب بناءً على العقد الموقع بين وزارة التربية والتعليم ومطبعة
جامعة كامبريدج.
لا تتحمل مطبعة جامعة كامبريدج المسؤولية تجاه المواقع الإلكترونية
المستخدمة في هذا الكتاب أو دقّتها، ولا تؤكد أن المحتوى الوارد على تلك المواقع دقيق
وملائم، أو أنه سيبقى كذلك.

تمت مواءمة الكتاب

بموجب القرار الوزاري رقم ٢٠٢٣/٣٦ واللجان المنبثقة عنه

جميع حقوق الطبع والتأليف والنشر محفوظة لوزارة التربية والتعليم

**ولا يجوز طبع الكتاب أو تصويره أو إعادة نسخه كاملًا أو مجزّأ أو ترجمته
أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات بهدف تجاري بأي شكل من الأشكال
إلّا بإذن كتابي مسبق من الوزارة، وفي حال الاقتباس القصير يجب ذكر المصدر.**



المغفور له

السلطان قابوس بن سعيد

-طيّب اللّه ثراه-

حضرة صاحب الجلالة

السلطان هيثم بن طارق المعظم

-حفظه اللّه ورعاه-

سلطنـــــة عُمـــــان

(المحافظات والولايات)

النَّشيدُ الْوَطَنِيُّ

يا رَبَّنا احْفَظْ لنا جَلالَةَ السُّلْطان
وَالشَّعْبَ في الأَوْطان بِالْعِزِّ والأَمان
وَلْيَدُمْ مُؤَيَّدًا عاهِلًا مُمَجَّدًا
بِالنُّفوسِ يُفْتَدى

يا عُمانُ نَحْنُ مِنْ عَهْدِ النَّبي أَوْفِياءُ مِنْ كِرامِ الْعَرَبِ
فارْتَقي هامَ السَّماء وَامْلَئي الْكَوْنَ ضياء
وَاسْعَدي وَانْعَمي بِالرَّخاء

تقديم

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على خير المرسلين، سيّدنا مُحمَّد، وعلى آله وصحبه أجمعين. وبعد:

فقد حرصت وزارة التربية والتعليم على تطوير المنظومة التعليمية في جوانبها ومجالاتها المختلفة كافة؛ لتُلبّي مُتطلّبات المجتمع الحالية، وتطلُّعاته المستقبلية، ولتتواكب مع المُستجدّات العالمية في اقتصاد المعرفة، والعلوم الحياتية المختلفة؛ بما يؤدّي إلى تمكين المخرجات التعليمية من المشاركة في مجالات التنمية الشاملة للسلطنة.

وقد حظيت المناهج الدراسية، باعتبارها مكوِّنًا أساسيًا من مكوِّنات المنظومة التعليمية، بمراجعة مستمرة وتطوير شامل في نواحيها المختلفة؛ بدءًا من المقرّرات الدراسية، وطرائق التدريس، وأساليب التقويم وغيرها؛ وذلك لتتناسب مع الرؤية المستقبلية للتعليم في السلطنة، ولتتوافق مع فلسفته وأهدافه.

وقد أولت الوزارة مجال تدريس العلوم والرياضيات اهتمامًا كبيرًا يتلاءم مع مستجدات التطور العلمي والتكنولوجي والمعرفي. ومن هذا المنطلق اتَّجهت إلى الاستفادة من الخبرات الدولية؛ اتساقًا مع التطوُّر المتسارع في هذا المجال، من خلال تبنّي مشروع السلاسل العالمية في تدريس هاتَين المادّتَين وفق المعايير الدولية؛ من أجل تنمية مهارات البحث والتقصّي والاستنتاج لدى الطلبة، وتعميق فهمهم للظواهر العلمية المختلفة، وتطوير قدراتهم التنافُسية في المسابقات العلمية والمعرفية، وتحقيق نتائج أفضل في الدراسات الدولية.

إن هذا الكتاب، بما يحويه من معارف ومهارات وقيَم واتجاهات، جاء مُحقِّقًا لأهداف التعليم في السلطنة، وموائمًا للبيئة العمانية، والخصوصية الثقافية للبلد، بما يتضمَّنه من أنشطة وصور ورسوم. وهو أحد مصادر المعرفة الداعمة لتعلُّم الطالب، بالإضافة إلى غيره من المصادر المختلفة.

نتمنّى لأبنائنا الطلبة النجاح، ولزملائنا المعلّمين التوفيق فيما يبذلونه من جهود مُخلِصة، لتحقيق أهداف الرسالة التربوية السامية؛ خدمة لهذا الوطن العزيز، تحت ظل القيادة الحكيمة لمولانا حضرة صاحب الجلالة السلطان هيثم بن طارق المعظّم، حفظه الله ورعاه.

والله ولي التوفيق

د. مديحة بنت أحمد الشيبانية

وزيرة التربية والتعليم

المحتويات

المقدمة xiii
كيف تستخدم هذه السلسلة xiv
كيف تستخدم هذا الكتاب xvi
الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء xviii

الوحدة الأولى: مجالات الجاذبية

١-١ تمثيل مجال الجاذبية ٢١
١-٢ شدة مجال الجاذبية (g) ٢٥
١-٣ الطاقة وجهد الجاذبية ٢٧
١-٤ الدوران تحت تأثير الجاذبية ٣١

الوحدة الثانية: المجالات الكهربائية وقانون كولوم

٢-١ المجال الكهربائي ٤٤
٢-٢ شدة المجال الكهربائي ٤٨
٢-٣ القوة المؤثّرة على شحنة كهربائية ٥١
٢-٤ قانون كولوم والمجالات الشعاعية ٥٢
٢-٥ الجهد وطاقة الوضع الكهربائية ٥٧

الوحدة الثالثة: الدوائر الكهربائية

٣-١ التيار الكهربائي ٧٤
٣-٢ فرق الجهد الكهربائي ٨٢
٣-٣ المقاومة النوعية ٨٣
٣-٤ قانونا كيرشوف ٨٦
٣-٥ الدوائر العملية ٩٢

الوحدة الرابعة: المكثفات

٤-١ التعرف على المكثفات ١١٧
٤-٢ الطاقة المخزنة في مكثف ١٢٠
٤-٣ توصيل المكثفات على التوازي ١٢٤
٤-٤ توصيل المكثفات على التوالي ١٢٦
٤-٥ شبكات المكثفات ١٢٨
٤-٦ شحن المكثفات وتفريغها ١٣٠

الوحدة الخامسة: المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسي

٥-١ توليد المجالات المغناطيسية وتمثيلها ١٤٢
٥-٢ القوة المغناطيسية ١٤٥
٥-٣ كثافة الفيض المغناطيسي ١٤٧
٥-٤ المزيد عن القوى على الموصلات الحاملة لتيار كهربائي ١٥٠
٥-٥ الحث الكهرومغناطيسي ١٥٣
٥-٦ قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي ١٦١
٥-٧ قانون لنز ١٦٣
٥-٨ تطبيقات الحث الكهرومغناطيسي ١٦٨

قائمة المصطلحات ١٨٠
ملحق: المكوّنات الكهربائية ورموزها ١٨٤

المقدمة

يغطي هذا الكتاب منهج الفيزياء للفصل الدراسي الأول للصف الثاني عشر بما يلبّي السياسة التعليمية وغاياتها في سلطنة عُمان.

يطرح هذا الكتاب المفاهيم الفيزيائية المختلفة ويشرحها ويعمق فهمك حولها، كما يزوّدك بالأمثلة والأسئلة التي ستساعدك على اختبار فهمك، وعلى تطوير المهارات الأساسية اللازمة للنجاح في هذه المادة. كما توضح صفحات «كيف تستخدم هذا الكتاب» مكوّنات وميزات هذا الكتاب.

خلال دراستك لمادة الفيزياء، ستجد أن بعض المفاهيم الأساسية قد تتكرر؛ وذلك لأن موضوعات الفيزياء مترابطة في المجالات المختلفة، وسوف تمضي قدمًا في دراستها بتعمق أكثر في الصفَّين الحادي عشر والثاني عشر، بذلك ستكتسب المزيد من الثقة في فهم مادة الفيزياء إذا تعمّقت في هذه الموضوعات. ويشمل هذا الكتاب المفاهيم الأساسية الآتية:

- نماذج الأنظمة الفيزيائية كالنموذج الرياضي للجاذبية الأرضية.
- اختبار التنبؤات مقابل الأدلة.
- الرياضيات كلغة وأداة لحل المسائل الفيزيائية.
- المادة والطاقة
- القوى والمجالات

تُعدّ دراسة الفيزياء تجربة مثيرة وممتعة وجديرة بالاهتمام؛ فالفيزياء مادة أساسية للعديد من المجالات والتخصصات العلمية المختلفة كالطب والهندسة وغيرهما، ومتكاملة مع مواد العلوم المختلفة كالجيولوجيا والكيمياء والأحياء. وتُعدّ تدريبًا مفيدًا لاكتشاف كيف أسهَم مختلف العلماء في تطوير معرفتنا ورفاهيتنا، وذلك من خلال أبحاثهم التي أجروها في مفاهيم الفيزياء وتطبيقها. نأمل ألّا يساعدك هذا الكتاب على النجاح في دراساتك ومهنتك المستقبلية فحسب، بل أن يحفّز فضولك وخيالك العلمي أيضًا؛ فقد يصبح طلبة اليوم من العلماء والمهندسين المبدعين غدًا، كما نأمل أن تكون التجارب التي أجراها الفيزيائيون في الماضي درجة من درجات سلّم التطوّر، فنمضي بالفيزياء قُدمًا نحو مستويات أعلى وأرقى.

كيف تستخدم هذه السلسلة

تقدّم هذه المكوّنات (أو المصادر) الدعم للطلبة في الصف الثاني عشر في سلطنة عمان لتعلم مادة الفيزياء واستيعابها، حيث تعمل كتب هذه السلسلة جميعها معًا لمساعدة الطلبة على تطوير المعرفة والمهارات العلمية اللازمة لهذه المادة. كما تقدّم الدعم للمعلمين لإيصال هذه المعارف للطلبة وتمكينهم من مهارات الاستقصاء العلمي.

يقدّم «كتاب الطالب» دعمًا شاملًا لمنهج الفيزياء للصف الثاني عشر في سلطنة عمان، ويقدّم شرحًا للحقائق والمفاهيم والتقنيات العلمية بوضوح، كما يستخدم أمثلة من العالم الواقعي للمبادئ العلمية. والأسئلة التي تتضمنها كل وحدة تساعد على تطوير فهم الطلبة للمحتوى، في حين أن الأسئلة الموجودة في نهاية كل وحدة تحقق لهم مزيدًا من التطبيقات العلمية الأساسية.

يحتوي «كتاب التجارب العملية والأنشطة» على أنشطة وأسئلة نهاية الوحدة، والتي تمّ اختيارها بعناية، بهدف مساعدة الطلبة على تطوير المهارات المختلفة التي يحتاجون إليها أثناء تقدمهم في دراسة كتاب الفيزياء. كما تساعد هذه الأسئلة الطلبة على تطوير فهمهم لمعنى الأفعال الإجرائية المستخدمة في الأسئلة، إضافة إلى دعمهم في الإجابة عن الأسئلة بشكل مناسب.

كما يحقّق هذا الكتاب للطلبة الدعم الكامل الذي يساعدهم على تطوير مهارات الاستقصاء العملية الأساسية. وكذلك مهارات تخطيط الاستقصاءات، واختيار الجهاز المناسب وكيفية التعامل معه، وطرح الفرضيات، وتدوين النتائج وعرضها، وتحليل البيانات وتقييمها.

يدعم دليل المعلم «كتاب الطالب» و «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، ويعزز الأسئلة والمهارات العملية الموجودة فيهما. ويتضمّن هذا الدليل أفكارًا تفصيلية للتدريس وإجابات عن كل سؤال ونشاط وارد في «كتاب الطالب» وفي «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، فضلًا عن الإرشادات التعليمية لكل موضوع، بما في ذلك خطة التدريس المقترحة، وأفكار للتعلم النشط والتقويم التكويني، والمصادر المرتبطة بالموضوع، والأنشطة التمهيدية، والتعليم المتمايز (تفريد التعليم) والمفاهيم الخاطئة وسوء الفهم. كما يتضمن أيضًا دعمًا مفصلًا لإجراء الاستقصاءات العملية وتنفيذها في «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، بما في ذلك فقرات «مهم» لجعل الأمور تسير بشكل جيد، إضافة إلى مجموعة من عينات النتائج التي يمكن استخدامها إذا لم يتمكن الطلبة من إجراء التجربة، أو أخفقوا في جمع النتائج النموذجية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

خلال دراستك هذا الكتاب، ستلاحظ الكثير من الميزات المختلفة التي ستساعدك في التعلم. هذه الميزات موضحة على النحو الآتي:

أهداف التعلّم

تُمثّل هذه الأهداف مضمون كل وحدة دراسية، وتساعد على إرشاد الطلبة خلال دراسة «كتاب الطالب»، كما تشير إلى المفاهيم المهمة المطروحة في كل موضوع، ويتم التركيز عليها عند تقويم الطالب.

قبل أن تبدأ بدراسة الوَحدة

تحتوي هذه الميزة على أسئلة وأنشطة تتمحور حول المعرفة القبلية للموضوعات التي ستحتاج إليها قبل البدء بدراسة الوحدة.

العلوم ضمن سياقها

تُقدّم هذه الميزة أمثلة وتطبيقات واقعية للمحتوى الموجود في كل وحدة دراسية، ما يعني أنها تشجع الطلبة على إجراء المزيد من البحث في الموضوعات المختلفة.

مهارة عملية

لا يحتوي هذا الجزء من الكتاب على تعليمات مفصلة لإجراء تجارب معيّنة، لكنك ستجد، في مربّعات النص هذه، توجيهات أساسية حول النشاط العملي الذي تحتاج إلى تطبيقه.

مصطلحات علمية

يتم تمييز المصطلحات الأساسية في النص عند تقديمها لأول مرة. ثم يتم تقديم تعريفات لها في الهامش تشرح معاني هذه المصطلحات.

سوف تجد أيضًا تعريفات لهذه المصطلحات في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

أفعال إجرائية

لقد تمّ إبراز الأفعال الإجرائية الواردة في المنهج الدراسي بلون غامق في أسئلة نهاية الوحدة، ويمكن استخدامها في الاختبارات، خصوصًا عندما يتم تقديمها للمرة الأولى. وستجد في الهامش تعريفًا لها.

سوف تجد أيضًا التعريفات نفسها في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

ترد التعريفات للمفاهيم العلمية والمبادئ والقوانين والنظريات العلمية المهمة في الهامش، ويتم إبرازها في النص بلون غامق عند تقديمه لأول مرة. وستجد هذه التعريفات أيضًا في قائمة المصطلحات الموجودة في نهاية هذا الكتاب.

المعادلة: يتم تمييز المعادلات الأساسية في النص عند تقديم المعادلة لأول مرة. تعريف للمعادلة ومزيد من المعلومات ترد في الهامش.

مهمّ

يتم في مربّعات النص هذه إدراج حقائق وإرشادات مهمّة للطلبة.

أمثلة

تحتوي على أمثلة محلولة توضّح كيفية استخدام صيغة رياضية معيّنة لإجراء عملية حسابية.

أسئلة

يتخلّل النص أسئلة تمنحك فرصة للتحقق من أنك قد فهمت الموضوع الذي قرأت عنه.

ملخّص

تحتوي مربّعات النص هذه على ملخّص للنقاط الرئيسية في نهاية كل وحدة.

أسئلة نهاية الوحدة

تقيس هذه الأسئلة مدى تحقّق الأهداف التعليمية في الوحدة، وقد يتطلب بعضها استخدام معارف علمية من وحدات سابقة. تتوافر إجابات هذه الأسئلة في دليل المعلم.

قائمة تقييم ذاتي

تلي الملخّص عبارات تتضمّن عناوين منها: «أستطيع أن» التي تتطابق مع أهداف التعلم الموجودة في بداية الوحدة؛ و «أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد»، أو «متمكّن إلى حدٍّ ما» اللتَين تشيران إلى وجوب مراجعة ما تراه ضروريًا في هذا المجال. وقد تجد أنه من المفيد تقييم مدى ثقتك بكل من هذه العبارات أثناء عملية المراجعة.

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا

الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء

- العمل بأمان في مختبر الفيزياء جانب أساسي من جوانب التعلّم الذي يتميّز به العمل التجريبي.
- كن دائمًا مستمعًا جيدًا للتعليمات، وملتزمًا التوجيهات وقواعد السلوك بعناية.
- إذا لم تكن متأكّدًا من أي جانب من جوانب عملك التجريبي، فلا تتوانَ في سؤال معلّمك، وإذا كنت تودّ تصميم استقصاءٍ خاصّ بك، فاطلب إلى معلّمك أن يتحقّق من خطّتك قبل تنفيذها.
- العديد من احتياطات الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء تُعنى بمنع حدوث ضرر يلحق بالطالب أو بالأجهزة والأدوات.

استخدام السوائل في العمل	ضع كل الأدوات في حوض بحيث إذا انسكب شيء منها لا يؤثّر على أوراق العمل. فإذا كنت تستخدم الماء الساخن أو المغلي؛ فاستخدم ماسكًا لحمل الأوعية مثل الكؤوس.
استخدام ميزان الحرارة الزجاجيّ المُعبّأ بسائل	ضع ميزان الحرارة بشكل آمن على الطاولة فور الانتهاء من استخدامه، وتأكّد من موقعه بحيث لا يتدحرج، وإذا تعرّض للكسر؛ فأبلغ معلّمك فورًا، ولا تلمس الزجاج المكسور أو السائل المتسرّب منه.
تعليق موادّ على أسلاك رفيعة	ارتدِ نظّارات واقية تحسّبًا لحدوث انقطاع في السلك، واحذر من سقوط أثقال في حالِ انقطاع السلك؛ وضَع وسادة أو ما شابه على الأرض.
توصيل مكوّنات كهربائية	لا تتجاوز فرق الجهد الكهربائي الموصى به للمكوِّن الكهربائي، على سبيل المثال: فرق الجهد الكهربائي لمصباح ما هو (6 V).
استخدام الحوامل المعرّضة للانقلاب	إذا كان الحامل متحرّكًا أو معرّضًا لخطر الانقلاب، فثبّته على الطاولة بإحكام.
استخدام الأجسام القابلة للتدحرُج كالأسطوانات	ضع شيئًا مناسبًا مثل صندوق لجمع الأجسام القابلة للتدحرُج، بحيث لا تسقط على الأرضية أو تؤثّر على تجربة شخص آخر.
الخلايا الجافة 1.5 V	لا توصل قطبَي الخلية أو البطارية أحدهما بالآخر بسلك كهربائي.

الجدول ١ احتياطات الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء

الوحدة الأولى

مجالات الجاذبية

Gravitational fields

أهداف التعلّم

١-١ يذكر أن مجال الجاذبية هو مثال على مجال القوة ويعرّف شدة مجال الجاذبية على أنها القوة لكل وحدة كتلة.

٢-١ يمثّل مجال الجاذبية باستخدام خطوط المجال.

٣-١ يذكر أنه بالنسبة إلى نقطة خارج كرة منتظمة يمكن اعتبار كتلة الكرة كتلة نقطية في مركزها.

٤-١ يذكر نص قانون الجاذبية لنيوتن ويستخدم المعادلة: $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$.

٥-١ يستنتج من قانون الجاذبية لنيوتن وتعريف شدة مجال الجاذبية المعادلة: $g = \frac{GM}{r^2}$ لشدة مجال الجاذبية لكتلة نقطية.

٦-١ يستخدم المعادلة: $g = \frac{GM}{r^2}$.

٧-١ يعرّف جهد الجاذبية عند نقطة معيّنة على أنه الشغل المبذول لوحدة الكتل لنقل كتلة نقطية (كتلة اختبارية) صغيرة من اللانهاية إلى تلك النقطة.

٨-١ يستخدم المعادلة: $\phi = -\frac{GM}{r}$ لجهد الجاذبية في مجال كتلة نقطية.

٩-١ يصف كيف أن مفهوم جهد الجاذبية مرتبط بطاقة وضع الجاذبية لكتلتَين نقطيتَين ويستخدم المعادلة: $E_p = -\frac{GMm}{r}$.

١٠-١ يحلّل المدارات الدائرية في مجالات الجاذبية بدلالة الجاذبية التي تعمل كقوة مركزية والتسارع المركزي الذي تسببه هذه القوة.

١١-١ يذكر أن القمر الصناعي الثابت بالنسبة للأرض يبقى في النقطة نفسها فوق سطح الأرض، ويدور بزمن دوري مدته ٢٤ ساعة، من الغرب إلى الشرق، مباشرة فوق خط الاستواء.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- لقد تعرضنا جميعًا للجاذبية وتأثيراتها في الحياة اليومية، تخيّل ما سيحدث إذا «انعدمت» الجاذبية، وناقش التأثيرات الناجمة عن ذلك في الحياة اليومية، وعلى نطاق أكثر اتساعًا: ماذا سيحدث للأشياء الموجودة على مكتبك على سبيل المثال؟ وهل يمكنك توقّع ما سيحدث لمدار الأرض حول الشمس؟

العلوم ضمن سياقها

قوى الجاذبية ومجالاتها

الجاذبية من عجائب خلق الله تعالى، حيث إنها التفاعل الأول الذي نتعرض له، وبدونها لن يكون هناك أرض ولا شمس ولا مجرات، ولا حتى نحن البشر!

ربما قد شاهدت من قبل صورًا مثل الصورة ١-١، حيث يمكن لروّاد الفضاء العوم داخل محطة الفضاء الدولية (ISS)، وهذا ليس بسبب عدم وجود جاذبية على هذا الارتفاع؛ ولكن لأن محطة الفضاء الدولية هي في الحقيقة في حالة سقوط حرّ في أثناء دورانها حول الأرض، فروّاد الفضاء هم الوحيدون الذين يتعرضون لانعدام الجاذبية وقد جربوها أثناء طريقهم إلى القمر وعودتهم منه، ومع ذلك فإنه لا يزال هناك تأثير صغير للجاذبية بسبب جذب الأرض

الصورة ١-١ رائد فضاء على متن محطة الفضاء في مدار حول الأرض.

تابع

والشمس والقمر نفسه، ويُشار إلى هذه الجاذبية أحيانًا بمسمّى الجاذبية الميكروية.

تتجلى عظمة الله تعالى في جعل كافة أشكال الحياة على الأرض متكيفة للعيش ضمن مجال الجاذبية الأرضية، وقد خلق أجسام جميع الكائنات الحية بحيث تتمكن من التعامل مع تأثيرات القوى الكامنة؛ وذلك من أجل العيش في مجال الجاذبية، فعلى سبيل المثال سيجد روّاد الفضاء الذين يقضون فترات طويلة من الوقت تحت تأثير الجاذبية الميكروية -كما في الرحلات المخطط لها إلى المريخ- أن أجسامهم تفقد الكالسيوم، وتضعف عضلاتهم التي تُستخدم في دعم أوزانهم.

من أكثر الأشياء المدهشة حول الجاذبية هو دورها في تطوّر الكون، فالسدم (الصورة ١-٢) هي سحب كبيرة من الغبار وأغلبها غاز الهيدروجين موجودة في الفضاء الخارجي، حيث يؤدي عدم الانتظام في كثافة السحابة إلى جذب المزيد من المواد إلى المناطق ذات الكثافة الأعلى وبالتالي تصبح هذه المناطق أكثر تركيزًا في المادة كلما جُذب إليها مزيدٌ من المواد. تجري هذه العملية بوتيرة متسارعة إذ تتحول الكمية الهائلة من طاقة وضع الجاذبية للهيدروجين المنتشر إلى طاقة حركة كبيرة جدًا لذرّات الهيدروجين إلى الحدّ الذي يكون كافيًا لحدوث اندماج نووي بين هذه الذرّات فيولد النجم.

لماذا يُعدّ هذا مدهشًا؟ لأن تأثير الجاذبية ضعيف جدًا؛ عند مقارنتها بالتأثير الكهرومغناطيسي حيث يُعتبر أقوى بكثير منها؛ فالتنافر الكهربائي بين بروتونَين في نواة الذرّة أكبر بنحو 10^{36} مرة (أي 10 متبوعة بـ 35 صفرًا!) من قوة جذب الجاذبية.

ومع ذلك يكون تأثير الجاذبية هو الغالب، ولكن لماذا؟ لأن قوة الجاذبية دائمًا تكون في حالة تجاذب، في حين يوجد نوعان من الشحنات الكهربائية (موجبة وسالبة)؛ لذلك يمكن أن يكون التأثير الكهرومغناطيسي إما تجاذبًا أو تنافرًا، وتعمل الشحنات السالبة والموجبة بشكل عام على إلغاء تأثير بعضهما على بعض، الأمر الذي يجعل أي جسم كبير الحجم متعادلًا كهربائيًا تقريبًا.

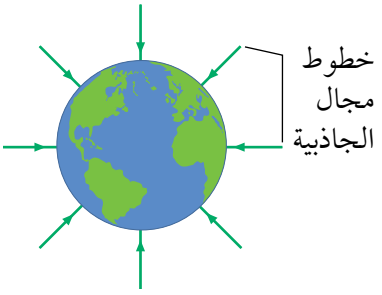
الصورة ١-٢ السُدُم (حاضنات النجوم الغازية).

١-١ تمثيل مجال الجاذبية

لتوضيح مفهوم الجاذبية وتأثيراتها استخدم الفيزيائيون مفهوم مجالات الجاذبية. يُمثل **مجال الجاذبية** **Gravitational field** باستخدام خطوط المجال، والتي تسمح لهم بفهم كيفية عمل الجاذبية. ويوضح الشكل ١-١ خطوط مجال الجاذبية الأرضية.

تبيّن لنا خطوط مجال الجاذبية أمرَين:

- تشير الأسهم على خطوط المجال إلى اتجاه قوة الجاذبية المؤثرة على كتلة موضوعة في المجال.
- يدلّ التباعد بين خطوط المجال على شدة مجال الجاذبية، فكلما تباعدت خطوط المجال بعضها عن بعض، أصبح المجال أضعف.



الشكل ١-١ تمثل خطوط المجال، مجال الجاذبية الأرضية.

مصطلحات علمية

مجال الجاذبية
Gravitational field:
منطقة من الفضاء تتأثر فيها كتلة ما بقوة الجاذبية.

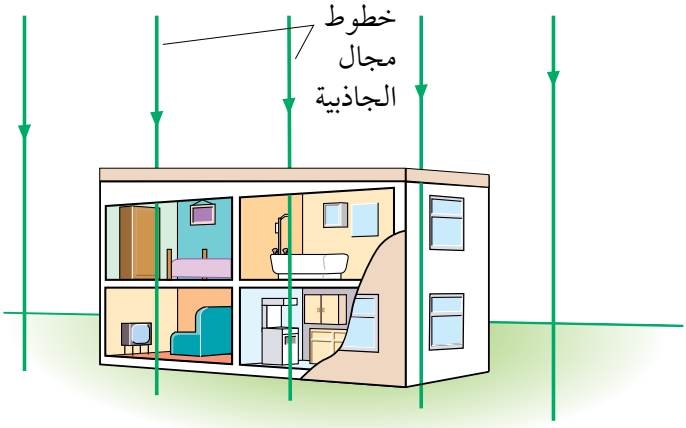
يبيّن رسم خطوط مجال الجاذبية الأرضية أن كل الأجسام تنجذب نحو مركز الأرض، وهذا صحيح حتى لو كانت هذه الأجسام تحت سطح الأرض، وتصبح قوة الجاذبية أضعف كلما ابتعدت عن سطح الأرض، وهذا واضح من خلال التباعد الأكبر بين خطوط المجال.

مصطلحات علمية

مركز الكتلة Centre of mass: هو النقطة التي يمكننا اعتبار إجمالي كتلة الجسم مركّزًا فيها.

تُعدّ الأرض كتلة كروية منتظمة تقريبًا، على الرغم من انتفاخها قليلًا عند خط الاستواء. ويُعتبر مجال الجاذبية للأرض كما لو كان مجمل كتلتها مركّزًا في مركزها؛ ويُسمّى هذا المركز **مركز الكتلة Centre of mass**. ولذلك تُعامل الأرض ككتلة نقطية مهما ابتعد أي جسم خارج سطحها.

يبيّن الشكل ١-٢ مجال الجاذبية الأرضية بالقرب من سطح الأرض، ويتضح من خطوط مجال الجاذبية الأرضية داخل المبنى وحوله أن قوة الجاذبية متجهة في كل مكان رأسيًا إلى الأسفل، وبما أن خطوط المجال تكاد تكون متوازية تمامًا، وتفصل بينها مسافات متساوية تقريبًا، فإن شدة مجال الجاذبية هي نفسها تقريبًا في جميع النقاط داخل المبنى وحوله، وهذا يعني أن وزنك هو تقريبًا نفسه في كل مكان ضمن مجال الجاذبية هذا، وبالتالي لا يصبح وزنك أقل عندما تصعد إلى الطابق العلوي.

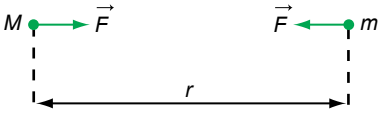


الشكل ١-٢ مجال الجاذبية الأرضية منتظم ضمن مقياس مبنى ما.

نَصِف مجال الجاذبية الأرضية بأنه **شعاعي** Radial، حيث تتباعد (تنتشر) خطوط المجال شعاعيًا كلما ابتعدنا عن مركز الأرض، ومع ذلك – على مقياس مبنى ما – يكون مجال الجاذبية **منتظمًا** Uniform نظرًا إلى أن المسافات بين خطوط المجال متساوية تقريبًا، وبما أن كوكب المشتري أضخم بكثير من الأرض فإننا سنمثل مجال جاذبيته برسم خطوط مجال أكثر تقاربًا من تلك التي للأرض.

قانون نيوتن للجاذبية

استخدم نيوتن أفكاره حول الكتلة والجاذبية ليقترح قانون الجاذبية لكتلتَين نقطيتَين (الشكل ١-٣).



الشكل ١-٣ كتلتان نقطيتان تفصلهما مسافة (r).

أخذ نيوتن بعين الاعتبار كتلتَين نقطيتَين (M) و (m) تفصل بينهما مسافة (r)، وكل كتلة نقطية تجذب الأخرى بقوة ($\vec{F}$). (ووفقًا لقانون نيوتن الثالث للحركة

فإن كلًا من الكتلتَين النقطيتَين تتفاعل مع الأخرى؛ وبالتالي تؤثر كل منهما على الأخرى بقوة مساوية في المقدار ولكنها معاكسة في الاتجاه).

ينص **قانون نيوتن للجاذبية Newton's law of gravitation** على أن أي كتلتَين نقطيتَين تجذب كل منهما الأخرى بقوة تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب كتلتَيهما وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.

> **مهمّ**
>
> **قانون نيوتن للجاذبية Newton's law of gravitation:**
> أي كتلتَين نقطيتَين تجذب كل منهما الأخرى بقوة تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب كتلتَيهما وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.

لاحظ أن القانون يشير إلى «الكتلة النقطية» ويمكنك بدلًا من ذلك استخدام مصطلح «جُسيمات»، إلّا أن الموضوع يصبح أكثر تعقيدًا خصوصًا إذا فكّرنا في الأجسام الصلبة الكبيرة؛ فكل جُسيم من مكوّنات جسم ما يجذب كل جُسيم من مكوّنات الجسم الآخر؛ وبناء على ذلك علينا أن نجمع كل هذه القوى معًا لإيجاد القوة التي يؤثر بها كل جسم على الجسم الآخر.

استطاع نيوتن إثبات أن كُرتَين منتظمتَين تجذب إحداهما الأخرى بقوة هي نفسها كما لو كانت كتلة كل منهما تتركّز في مركزها (شرط أن تكون المسافة من المركز إلى المركز أكبر من مجموع نصفَي قطرَيهما).

ووفقًا لقانون نيوتن للجاذبية يكون لدينا:

$$\text{القوة} \propto \text{حاصل ضرب كتلة الجسمَين}$$

$$\vec{F} \propto Mm$$

$$\text{القوة} \propto \frac{1}{\text{مربع المسافة}}$$

$$\vec{F} \propto \frac{1}{r^2}$$

وبدمج العلاقتَين فإن:

$$\vec{F} \propto \frac{Mm}{r^2}$$

لتحويل هذه العلاقة إلى معادلة، نضع ثابت الجاذبية (G) فتصبح المعادلة:

$$\vec{F} = \frac{GMm}{r^2}$$

القوة ($\vec{F}$) هي قوة تجاذب وهي متجهة نحو الجسم المنتج للقوة و (r) هي المسافة بين مركزي الجسمَين.

يُطلق على ثابت الجاذبية (G) أحيانًا ثابت الجذب الكوني؛ لأن له القيمة نفسها في أي مكان في الكون وهي تساوي ($6.67 \times 10^{-11}\ \text{N m}^2\ \text{kg}^{-2}$). وهذا الثابت مهم لفهم تاريخ الكون ومستقبله على المدى البعيد.

يمكن تطبيق المعادلة على الأجسام الكروية أيضًا (مثل الأرض والقمر) شرط أن نتذكّر قياس المسافة الفاصلة (r) **بين مركزَي الجسمَين**. يمكن كتابة معادلة قوة الجاذبية أيضًا على الصيغة:

قانون نيوتن للجاذبية

$$\vec{F} = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

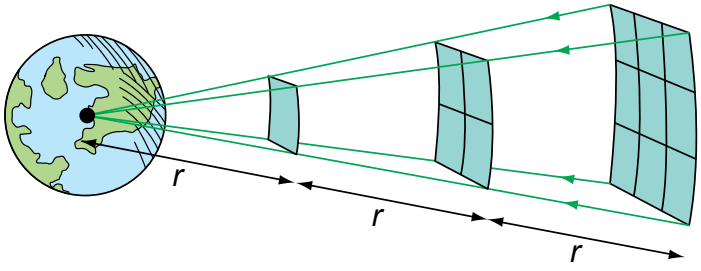
حيث (m_1) و (m_2) هما كتلتا الجسمَين.

دعونا ننظر إلى هذه المعادلة لنعرف ما إذا كانت منطقية.

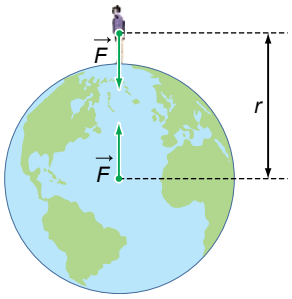
أولًا: كل من الكتلتَين مهمّة، حيث يعتمد وزنك (قوة الجاذبية المؤثرة عليك) على كتلتك وكتلة الكوكب الذي تقف عليه.

ثانيًا: كلما كنت بعيدًا عن الكوكب فإن قوة جذبه لك ستكون أضعف، فإذا ابتعدت عن الكوكب بمقدار ضعف المسافة فإن القوة تقل إلى الربع، ويمكن ملاحظة ذلك من مخطط خطوط المجال في الشكل ١-٤. فإذا تضاعفت المسافة فإن الخطوط تنتشر على مساحة أكبر بأربعة أمثال مساحة السطح الابتدائي، لذلك فإن تركيز الخطوط سيتناقص إلى الربع، وهذا يُسمّى قانون التربيع العكسي (inverse square law) (قوانين التربيع العكسي شائعة في الفيزياء، فمثلًا ينتشر الضوء أو أشعة جاما بشكل منتظم من مصدرها النقطي وهي تتبع قانون التربيع العكسي أيضًا).

نقيس المسافة من **مركز** كتلة أحد الجسمَين إلى **مركز** كتلة الجسم الآخر (الشكل ١-٥)، ونتعامل مع كل جسم كما لو أن كتلته مركّزة في نقطة واحدة. يجذب الجسمان أحدهما الآخر بقوّتَين متساويتَين في المقدار ومتعاكستَين في الاتجاه وفقًا لقانون نيوتن الثالث للحركة؛ لذلك تجذبك الأرض بقوة (قوة وزنك) نحو مركزها، وأنت تجذب الأرض في اتجاهك وبالقوة نفسها باتجاه مركزك، ويكون تأثير جذبك على جسم ضخم مثل الأرض قليلًا جدًا. في حين يكون تأثير جذب الشمس على الأرض وغيرها من الكواكب كبيرًا جدًا.



الشكل ١-٤ تنتشر خطوط المجال على مساحة أكبر لمسافات أكبر، وبالتالي فإن شدة المجال تصبح أضعف.



الشكل ١-٥ يؤثر كل من الشخص والأرض أحدهما على الآخر بقوة تجاذب متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه.

أسئلة

(١) احسب قوة الجاذبية لكل من:

أ. جسمَين تفصل بين مركزيهما مسافة (1.0 cm)، وكتلة كل منهما (100 g).

ب. كويكبَين تفصل بين مركزيهما مسافة (4.0×10^9 m) وكتلة كل منهما (5.0×10^{10} kg).

ج. قمر صناعي كتلته (1.4×10^4 kg) يدور حول الأرض على بُعد (6800 km) من مركز الأرض (كتلة الأرض تساوي 6.0×10^{24} kg).

(٢) قدّر قوة الجاذبية بين شخصَين يجلسان جنبًا إلى جنب على مقعد في حديقة. كيف تقارن هذه القوة بقوة الجاذبية التي تؤثر بها الأرض على كل منهما (بمعنى آخر، وزن كل منهما)؟ افترض أن كتلة كل شخص (70 kg)، وبينهما مسافة (0.5 m).

١-٢ شدة مجال الجاذبية g

يمكننا وصف مدى قوة مجال الجاذبية أو ضعفها بواسطة تحديد **شدة مجال الجاذبية** **Gravitational field strength**، فقد تعوّدنا على هذه الفكرة للأجسام الموجودة على سطح الأرض أو بالقرب منها، فشدة مجال الجاذبية الأرضية هي الكمية المألوفة (g) والتي تبلغ قيمتها ($9.81\ m\ s^{-2}$) تقريبًا، وهذه الكمية هي التي تمكّننا من معرفة أن وزن الجسم (W) الذي كتلته (m) من العلاقة ($W = mg$).

مصطلحات علمية

شدة مجال الجاذبية

Gravitational field strength:

شدة مجال الجاذبية عند نقطة ما هي قوة الجاذبية المؤثرة لكل وحدة كتلة لجسم صغير موضوع في تلك النقطة.

لجعل معنى شدة مجال الجاذبية (g) أكثر وضوحًا، يجب أن نكتبها (بالنسبة إلى الأرض) على الشكل ($9.81\ N\ kg^{-1}$)؛ أيّ أن كل ($1\ kg$) من الكتلة يتعرّض لقوة جاذبية مقدارها ($9.81\ N$)، وتعرّف شدة مجال الجاذبية (g) عند أي نقطة في مجال الجاذبية بأنها: قوة الجاذبية المؤثرة لكل وحدة كتلة لجسم صغير موضوع في تلك النقطة (وحدة كتلة تعني كيلوغرامًا واحدًا).

ويمكن كتابة ذلك على شكل معادلة:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

حيث ($\vec{F}$) هي قوة الجاذبية التي تؤثر على الجسم و (m) هي كتلة الجسم، وتُقاس شدة مجال الجاذبية بوحدة ($N\ kg^{-1}$)، وهذه الوحدة تكافئ ($m\ s^{-2}$)، ويمكننا استخدام هذا التعريف لتحديد شدة مجال الجاذبية لكتلة نقطية (أو كروية). تُعطى القوة بين كتلتَين نقطيتَين بالمعادلة:

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

لذلك فإن شدة مجال الجاذبية (g) الناتجة عن الكتلة (M) على مسافة (r) من مركزها تعطى كالآتي:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$g = \frac{GMm}{r^2 m}$$

$$= \frac{GM\cancel{m}}{r^2\cancel{m}}$$

$$= \frac{GM}{r^2}$$

شدة مجال الجاذبية (g) الناتجة عن كتلة نقطية هي:

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

حيث (G) هو ثابت الجذب الكوني، و (M) هي الكتلة المسبّبة للمجال، و (r) هي المسافة من مركز الكتلة.

بما أن القوة كمية متجهة فإن شدة مجال الجاذبية تكون متجهة أيضًا، فنحن نحتاج إلى تحديد اتجاهها ومقدارها معًا من أجل تحديدها تمامًا، وشدة المجال ($\vec{g}$) ليست ثابتة؛ فهي تتناقص كلما ازدادت المسافة (r)، وتخضع شدة المجال لقانون التربيع العكسي مع المسافة؛ فشدة المجال ستقل إلى الربع عندما تزداد المسافة عن المركز إلى

الضعف، فمثلًا قيمة ($\vec{g}$) تساوي ($9.81\ N\ kg^{-1}$) تقريبًا بالقرب من سطح الأرض، ولو صعدت جبل إيفرست – الذي يبلغ ارتفاعه (8.85 km) – فإن شدة المجال ستنخفض بنسبة (0.3%) فقط.

ومن هنا نجد أن شدة مجال الجاذبية ($\vec{g}$) عند نقطة ما تعتمد على الكتلة (M) للجسم الذي يسبب المجال والمسافة (r) عن مركزه (انظر المثال ١).

كما ذكرنا أن لشدة مجال الجاذبية ($\vec{g}$) وحدة أخرى مكافئة هي ($m\ s^{-2}$)؛ لذا فهي تَسارُعٌ وتعرف أيضًا بـ «تسارع السقوط الحر»، فأي جسم يسقط بحرّية في مجال الجاذبية هذا سيكون له هذا التسارع، وهو نحو ($9.81\ m\ s^{-2}$) بالقرب من سطح الأرض. لقد تعلمت في الصف الحادي عشر، طرائق مختلفة لإيجاد قيمة تجريبية لشدة مجال الجاذبية المحلية ($\vec{g}$) (في مكان إجراء التجربة).

مثال

١. يبلغ نصف قطر الأرض (6400 km)، وشدة مجال الجاذبية على سطح الأرض تساوي ($9.81\ N\ kg^{-1}$). استخدم هذه المعلومات لتحديد كتلة الأرض ومتوسط كثافتها.

الخطوة ١: اكتب الكمّيات المعطاة:

$r = 6.4 \times 10^6\ m$

$g = 9.81\ N\ kg^{-1}$

الخطوة ٢: استخدم المعادلة $g = \frac{GM}{r^2}$، لتحديد كتلة الأرض (M).

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

$$9.81 = \frac{6.67 \times 10^{-11}\ M}{(6.4 \times 10^6)^2}$$

$$M = 9.81 \times \frac{(6.4 \times 10^6)^2}{6.67 \times 10^{-11}}$$

$M = 6.0 \times 10^{24}\ kg$

الخطوة ٣: استخدم المعادلة:

الكثافة = $\frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$ لتحديد كثافة الأرض (ρ).

بما أن الأرض كتلة كروية تقريبًا، يمكن حساب حجمها باستخدام $\frac{4}{3}\pi r^3$:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$= \frac{6.0 \times 10^{24}}{\frac{4}{3} \times \pi \times (6.4 \times 10^6)^3}$$

$\rho = 5486 \approx 5500\ kg\ m^{-3}$

$= 5.5 \times 10^3$ (برقمَين معنويَّين)

أسئلة

ستحتاج إلى البيانات الواردة في الجدول ١-١ للإجابة عن الأسئلة من ٣ إلى ٧.

الجسم	الكتلة (kg)	نصف القطر (km)	المسافة من مركز الأرض (km)
الأرض	6.0×10^{24}	6400	–
القمر	7.3×10^{22}	1740	3.8×10^5
الشمس	2.0×10^{30}	7.0×10^5	1.5×10^8

الجدول ١-١

(٣) يبلغ ارتفاع جبل إيفرست (9.0 km) تقريبًا. قدّر كم يقل وزن متسلق جبال كتلته (100 kg) (مع حقيبة الظهر)، مقارنة بوزنه عند مستوى سطح البحر. هل سيكون هذا الاختلاف قابلًا للقياس بميزان الأشخاص؟

(٤) **أ.** احسب شدة مجال الجاذبية:
١. بالقرب من سطح القمر.
٢. بالقرب من سطح الشمس.

ب. اقترح كيف تساعد إجاباتك في شرح سبب وجود غلاف جوي رقيق للقمر، بينما يكون للشمس غلاف جوي سميك.

(٥) **أ.** احسب شدة مجال الجاذبية الأرضية في موقع القمر.

ب. احسب القوة التي تؤثر بها الأرض على القمر، ثم احسب تسارع القمر نحو الأرض.

(٦) تبلغ كتلة المشتري 320 مرة كتلة الأرض، ونصف قطره 11.2 مرة نصف قطر الأرض، وشدة مجال الجاذبية على سطح الأرض ($9.81\ N\ kg^{-1}$). احسب شدة مجال الجاذبية بالقرب من سطح كوكب المشتري.

(٧) يُسهم كل من القمر والشمس في المدّ والجزر على محيطات الأرض. أيّ منهما له قوة شد أكبر على كل كيلوغرام من مياه البحر، الشمس أم القمر؟

(٨) طفل كتلته (4.0 kg)، احسب قوة الجاذبية المؤثرة عليه بسبب:

أ. تأثير كوكب المريخ عندما يكون عند أقرب مسافة له عن الأرض ومقدارها (1.0×10^8 km) بين مركزيهما. علمًا بأن كتلة كوكب المريخ (6.4×10^{23} kg).

ب. تأثير أمّه التي كتلتها (50 kg) وتبعد عنه مسافة (0.40 m).

١-٣ الطاقة وجهد الجاذبية

بالإضافة إلى القوة المؤثرة على كتلة جسم ما في مجال الجاذبية، يمكننا أن نفكر أيضًا في طاقة الجسم في مجال الجاذبية، فإذا رفعت جسمًا عن الأرض فإنك تزيد من طاقة وضع الجاذبية (G.P.E) له؛ إذ يزداد الشغل الذي تبذله عليه كلما رفعته إلى أعلى، وهكذا تزداد طاقة وضع الجاذبية له، ويمكن حساب التغيّر في طاقة وضع الجاذبية للجسم من العلاقة $mg\Delta h$، حيث Δh هو التغيّر في ارتفاعه (كما تعلمته سابقًا).

هذه الطريقة كافية عندما نأخذ في الاعتبار الأجسام القريبة من سطح الأرض، ومع ذلك فنحن بحاجة إلى اتباع طريقة أعم لحساب طاقة الجاذبية وذلك لسببَين:

- إذا استخدمنا طاقة وضع الجاذبية $E_p = mg\Delta h$، فنحن نفترض أن طاقة وضع الجاذبية لجسم ما على سطح الأرض تساوي صفرًا باعتبارها المستوى المرجعي، وهذا جيد للعديد من الأغراض العملية ولكن ليس دائمًا، فعلى سبيل المثال إذا كنا نفكر في حركة الأجسام عبر الفضاء بعيدًا عن الأرض، فلا يوجد سبب يلزمنا باعتبار الأرض المستوى المرجعي دائمًا.
- إذا رفعنا جسمًا إلى ارتفاع كبير جدًا فإن (g) تقلّ وسنحتاج إلى أخذ ذلك بعين الاعتبار عند حساب طاقة وضع الجاذبية للجسم.

لهذه الأسباب نحتاج إلى إيجاد طرائق مختلفة للتفكير في طاقة وضع الجاذبية، فمثلًا نبدأ بتصوّر كتلة في اللانهاية، أي على مسافة لانهائية من جميع الكتل الأخرى، فنقول هنا إن هذه الكتلة ليس لها طاقة وضع، وهذه طريقة أفضل لتحديد قيمة الصفر لطاقة وضع الجاذبية بدلًا من استخدام سطح الأرض كمستوى مرجعي. والآن نتخيّل تحريك الكتلة إلى النقطة التي نريد أن نعرف طاقة وضع الجاذبية عندها، كما هي الحال مع رفع جسم ما عن الأرض فإننا نحدّد الشغل المبذول لتحريك الكتلة إلى النقطة، والذي يساوي الطاقة المنقولة إليها، وتسمّى طاقة وضع الجاذبية، وبهذه الطريقة نتمكن من تحديد طاقة وضع الجاذبية لكتلة معيّنة.

جهد الجاذبية

في الممارسات العملية من المفيد التطرّق إلى مفهوم جهد الجاذبية عند نقطة ما، فهو يشير إلى طاقة الوضع لكل وحدة كتلة موضوعة عند تلك النقطة (تمامًا كما تشير شدة المجال (g) إلى القوة لكل وحدة كتلة عند نقطة في المجال).

الرمز الذي يستخدم لجهد الجاذبية هو ϕ (الحرف اليوناني phi)، و**جهد الجاذبية** **Gravitational potential** في نقطة ما يُعرّف بأنه الشغل المبذول لكل وحدة كتلة لنقل كتلة نقطية من اللانهاية إلى تلك النقطة ووحدة جهد الجاذبية ($J\ kg^{-1}$).

بالنسبة إلى كتلة نقطية (M)، يمكننا كتابة معادلة لـ ϕ عند مسافة r عن M:

جهد الجاذبية:

$$\phi = -\frac{GM}{r}$$

مصطلحات علمية

جهد الجاذبية

Gravitational potential: جهد الجاذبية عند نقطة ما هو الشغل المبذول لكل وحدة كتلة لنقل كتلة نقطية من اللانهاية إلى تلك النقطة.

حيث G هو ثابت الجذب الكوني كما عرّفناه سابقًا، وتعني الإشارة السالبة أن جهد الجاذبية دائمًا سالب؛ لأنه كلما قرّبنا كتلة من كتلة أخرى فإن طاقة وضع الجاذبية لها تقل، بما أن طاقة وضع الجاذبية تساوي صفرًا عند اللانهاية – لذلك في أي مكان آخر – ستكون طاقة وضع الجاذبية وجهد الجاذبية أقل من صفر أي أنهما سالبتان.

ونظرًا إلى أن جهد الجاذبية عند نقطة ما يتم تعريفه على أنه الشغل المبذول لكل وحدة كتلة في تحريك كتلة نقطية من اللانهاية $\left(\phi = \frac{W}{m}\right)$، يمكن حساب طاقة وضع الجاذبية (E_p) للكتلة النقطية بضرب جهد الجاذبية (ϕ) في الكتلة النقطية (m):

$$E_p = m\phi$$

$$= -\frac{GMm}{r}$$

طاقة وضع الجاذبية:

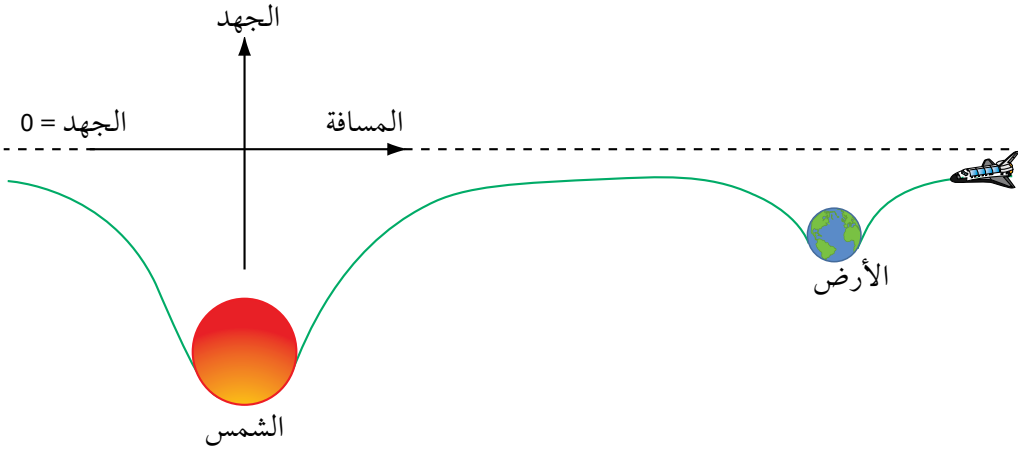
$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

تخيّل مركبة فضائية قادمة من نجم بعيد إلى النظام الشمسي. يظهر تغير جهد الجاذبية على طول مسارها في الشكل ١-٦. وسنركّز على ثلاثة أجزاء من رحلتها:

١. عندما تقترب المركبة الفضائية من الأرض، فإنها ستنجذب نحوها. وكلما اقتربت من الأرض، فإن طاقة وضع الجاذبية تقل، ويقل كذلك جهد الجاذبية لها.

٢. عندما تتحرك المركبة الفضائية بعيدًا عن الأرض، فإنها تبذل شغلًا عكس جاذبية الأرض، وعندها فإن طاقة وضع الجاذبية لها تزداد وبالتالي يمكننا القول إن جهد الجاذبية يزداد كذلك. يُنشئ مجال الجاذبية الأرضية «بئر جهد عملاقًا» في الفضاء، ونحن نعيش في قاع هذا البئر.

٣. عندما تقترب المركبة الفضائية من الشمس، فإنها تنجذب في بئر جهد أعمق بكثير؛ لأن كتلة الشمس أكبر بكثير من الأرض لذلك فإن جذبها سيكون أقوى بكثير من الأرض وجهد الجاذبية على سطح الشمس سيكون أكثر سالبية ممّا هو على سطح الأرض (على سطح الشمس $\phi = -1.9 \times 10^{11}\ J\ kg^{-1}$، وعلى سطح الأرض $\phi = -6.3 \times 10^{7}\ J\ kg^{-1}$).



الشكل ١-٦ جهد الجاذبية يساوي صفرًا عند اللانهاية (بعيدًا عن أي كتلة)، ويقل مع الاقتراب من كتلة ما.

مثال

٢. كوكب قطره (6800 km) وكتلته (4.9×10^{23} kg). وعلى مسافة بعيدة من الكوكب يوجد صخرة كتلتها (200 kg). في البداية كانت في حالة سكون ومن ثم تسارعت باتجاهه وارتطمت بسطحه. احسب التغيّر في طاقة وضع الجاذبية للصخرة وسرعتها عندما ارتطمت بسطح الكوكب.

الخطوة ١: اكتب الكمّيات المعطاة:

$r = 3.4 \times 10^6$ m

$M = 4.9 \times 10^{23}$ kg

$m = 200$ kg

الخطوة ٢: تُعطي المعادلة $\phi = -\frac{GM}{r}$، جهد الجاذبية على سطح الكوكب، أي طاقة وضع الجاذبية لكل وحدة كتلة عند تلك النقطة. إذًا تُعطى طاقة وضع الجاذبية لصخرة كتلتها (m) عند تلك النقطة من المعادلة:

طاقة وضع الجاذبية:

$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

طاقة وضع الجاذبية للصخرة عندما تكون بعيدة تساوي صفرًا، لذلك تعطي القيمة التي نحسبها باستخدام هذه المعادلة الانخفاض في طاقة وضع الجاذبية للصخرة خلال تسارعها وارتطامها بالكوكب.

طاقة وضع الجاذبية:

$$E_p = -\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 4.9 \times 10^{23} \times 200}{3.4 \times 10^6}$$

$$= -1.92 \times 10^9 \text{ J} \approx -1.9 \times 10^9 \text{ J}$$

الخطوة ٣: في حالة عدم وجود غلاف جوي، فإن كل طاقة وضع الجاذبية تتحوّل إلى طاقة حركة للصخرة، وعليه:

$$\frac{1}{2}mv^2 = 1.92 \times 10^9 \text{ J}$$

$$v = \sqrt{\frac{1.92 \times 10^9 \times 2}{200}}$$

$$= 4385 \approx 4400 \text{ m s}^{-1}$$

لاحظ أن السرعة النهائية للصخرة عند ارتطامها بالكوكب لا تعتمد على كتلة الصخرة؛ هذا لأنه عند مساواة المعادلتَين للتغير في طاقة الحركة والتغيّر في طاقة وضع الجاذبية، فإن كتلة الصخرة (m) تختزل.

سؤال

(٩) مستعينًا بالبيانات الواردة في الجدول ١-٢ أجب عما يأتي:

ثابت الجاذبية: $G = 6.67 \times 10^{-11}\ N\ m^2\ kg^{-2}$

الجسم	الكتلة (kg)	نصف القطر (km)
الأرض	6.0×10^{24}	6400
القمر	7.3×10^{22}	1740

الجدول ١-٢

أ. احسب جهد الجاذبية عند سطح الأرض.

ب. احسب جهد الجاذبية عند سطح القمر.

ج. أي «بئر جهد» أقل عمقًا: الأرض أم القمر؟ ارسم مخططًا مشابهًا للشكل ١-٦ لمقارنة «بئرَي الجهد» للأرض والقمر.

د. استخدم مخططًا لشرح سبب وجود حاجة إلى صاروخ كبير لرفع مركبة فضائية من سطح الأرض، في حين يمكن أن يستخدم صاروخ أصغر بكثير للانطلاق من سطح القمر.

فرق جهد الجاذبية

في كثير من الأحيان يكون من المفيد معرفة مقدار الطاقة اللازمة لرفع قمر صناعي من سطح كوكب أو سطح قمر ذي نصف قطر (r_1) إلى مدار ما ذي نصف قطر (r_2)، ولإيجاد التغير في جهد الجاذبية نحتاج إلى تطبيق معادلة جهد الجاذبية وهي $\phi = -\frac{GM}{r}$ على خطوتين:

الأولى لإيجاد جهد الجاذبية على السطح.

والثانية لإيجاد جهد الجاذبية على الارتفاع المداري المطلوب.

ثم إيجاد الفرق بينهما، أو من الأسهل دمج الخطوتَين في خطوة واحدة باستخدام المعادلة الآتية:

$$\Delta\phi = GM\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

وبمجرد تحديد التغير في جهد الجاذبية ($\Delta\phi$)، يمكن حساب التغير في طاقة وضع الجاذبية (ΔE_p) عبر ضرب التغير في جهد الجاذبية بكتلة القمر الصناعي (أو أي جسم آخر).

سؤال

(١٠) أثناء عمليات هبوط المركبات المأهولة على سطح القمر في الستينيات دارت مركبة القيادة للقمر الصناعي حول القمر في مدار إهليلجي بارتفاع أقصاه (310 km) فوق سطح القمر، في حين هبطت المركبة القمرية على سطح القمر.

أ. لماذا كانت طاقة وضع الجاذبية لمركبة القيادة تتغيّر في مدارها؟ اشرح إجابتك.

ب. احسب أكبر فرق لجهد الجاذبية بين سطح القمر وموقع مركبة القيادة.

مصطلحات خاصة بالمجالات

المصطلحات المستخدمة لوصف مجالات الجاذبية (وغيرها) يمكن أن تكون مشتتة، لذلك تذكّر:

- تعبّر **شدة المجال** عن **القوة** لوحدة الكتلة عند نقطة ما.

- يعبّر **الجهد** عن **طاقة الوضع** لوحدة الكتلة عند نقطة ما.

ستدرس مفهوم شدة المجال الكهربائي في الوحدة الثانية، حيث هي القوة المؤثرة على وحدة شحنة كهربائية، وبالمثل عندما نتحدث عن فرق الجهد الكهربائي بين نقطتَين في الكهرباء فإننا نتحدث عن الفرق في طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة وستدرس أيضًا المجالات التي تنتج قوى تجاذب وقوى تنافر، وهذا يجب أن يطوّر فهمك حول سبب اعتماد قيمة الصفر للجهد عند اللانهاية كخيار وحيد معقول.

٤-١ الدوران تحت تأثير الجاذبية

توفر الجاذبية القوة المركزية لجسم يدور حول كوكب – مثل قمر صناعي يدور حول الأرض – بحيث تبقيه في مداره (الشكل ١-٧)، وهذه حالة بسيطة حيث توجد قوة واحدة فقط تؤثر على القمر الصناعي وهي قوة الجاذبية الأرضية. يتبع القمر الصناعي مسارًا دائريًا؛ لأن قوة الجاذبية تكون بزاوية قائمة على سرعته المتجهة.

درست سابقًا أن مقدار القوة المركزية ($\vec{F}$) المؤثرة على جسم تُعطى من خلال المعادلة:

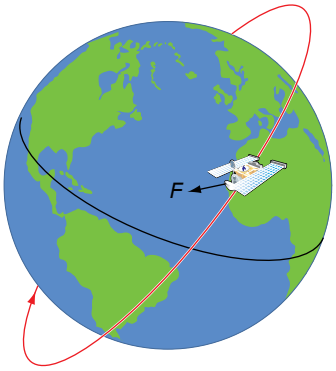
$$F = \frac{mv^2}{r}$$

لنفترض قمرًا صناعيًا كتلته (m) يدور حول الأرض على بُعد (r) من مركزها بسرعة ثابتة (v)، ونظرًا إلى أن قوة الجاذبية بين الأرض والقمر الصناعي هي مصدر القوة المركزية فإن:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

وبإعادة الترتيب نحصل على المعادلة:

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$



الشكل ١-٧ تعمل قوة الجاذبية الأرضية كقوة مركزية تؤثر على القمر الصناعي وتبقيه في المدار.

تتيح لنا هذه المعادلة حساب السرعة التي يجب أن يتحرك بها القمر الصناعي للبقاء في مدار دائري. لاحظ أن كتلة القمر الصناعي (m) تُحذف من المعادلة الأخيرة؛ وهذا يعني أن جميع الأقمار الصناعية مهما كانت كتلتها تتحرك في مدار معيّن بالسرعة نفسها، وقد تجد هذا مطمئنًا جدًا إذا كنت رائد فضاء وخرجت خارج مركبتك (الصورة ١-٣)، حيث إنك ستتحرك بسرعة مركبتك نفسها، على الرغم من حقيقة أن كتلتك أقل بكثير من كتلة مركبتك. يمكن تطبيق هذه المعادلة على كواكب نظامنا الشمسي حيث تمثل (M) كتلة الشمس.

المثال ٣ يوضح كيف يمكنك حساب السرعة (v).

الصورة ١-٣ يتحرك كل من رائد الفضاء والمركبة الفضائية عبر الفضاء خلال هذه الرحلة الفضائية بسرعة تزيد عن ($8\ km\ s^{-1}$).

مثال

٣. يدور القمر حول الأرض على مسافة متوسطها (384 000 km) من مركز الأرض. احسب سرعته المدارية. (كتلة الأرض 6.0×10^{24} kg).

الخطوة ١: اكتب الكمّيات المعطاة:

$r = 3.84 \times 10^{8}$ m

$M = 6.0 \times 10^{24}$ kg

$v = ?$

الخطوة ٢: استخدم المعادلة $v^2 = \frac{GM}{r}$، لتحديد السرعة المدارية (v).

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

$$= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}}{3.84 \times 10^{8}} = 1.04 \times 10^{6}$$

$$v = \sqrt{1.04 \times 10^{6}}$$

$$v = 1021 \text{ m s}^{-1} \approx 1.0 \times 10^{3} \text{ m s}^{-1}$$

أي أن القمر يدور في مداره بسرعة تقارب (1 km s^{-1}).

سؤال

(١١) احسب السرعة المدارية لقمر صناعي يدور على ارتفاع (200 km) فوق سطح الأرض (نصف قطر الأرض 6.4×10^{6} m وكتلتها 6.0×10^{24} kg).

الزمن الدوري المداري

يكون من المفيد الأخذ بالحسبان الفترة الزمنية التي يستغرقها جسم ما (مثل كوكب) لإكمال دورة واحدة كاملة في مداره، وهي ما يُطلق عليها **الزمن الدوري المداري** (**Orbital period** (*T*).

بما أن المسافة حول مدار دائري واحد كامل تساوي محيط الدائرة $2\pi r$، فإن معادلة السرعة تكون:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

وبالتعويض عن معادلة السرعة هذه في معادلة السرعة المدارية للقمر الصناعي نحصل على:

$$\frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{GM}{r}$$

وبإعادة ترتيب المعادلة نحصل على:

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM}\right) r^3$$

وبالتالي:

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 r^3}{GM}}$$

تبيّن هذه المعادلة أن الزمن الدوري المداري (T) مرتبط بنصف قطر المدار (r)، حيث يتناسب مربع الزمن الدوري طرديًا مع مكعّب نصف القطر ($T^2 \propto r^3$)، وهذه نتيجة مهمة اكتُشفت لأول مرة على يد يوهانس كبلر Johannes Kepler، الذي حلّل البيانات المتاحة آنذاك لكواكب النظام الشمسي، وقد كانت هذه نتيجةً تجريبيةً (اقتصرت على التجربة) لعدم وجود نظرية لديه تشرح سبب وجود هذه العلاقة بين (T) و (r)، ولم يكن من الممكن تفسيرها حتى صاغ إسحق نيوتن قانون الجاذبية الخاص به.

مصطلحات علمية

الزمن الدوري المداري

Orbital period:

الزمن الذي يستغرقه جسم ما لإكمال دورة واحدة كاملة في مداره.

الدوران حول الأرض

للأرض قمر طبيعي واحد وعدّة آلاف من الأقمار الصناعية، بعضها مركبات فضائية والكثير من حطام المركبات الفضائية، وتستخدم كل من هذه الأقمار الصناعية مجال الجاذبية لتوفير القوة المركزية التي تبقيها في المدار الدائري، وللإبقاء على قمر صناعي في مدار معيّن يجب أن يتحرّك هذا القمر بالسرعة المناسبة والتي تُعطى بالمعادلة:

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

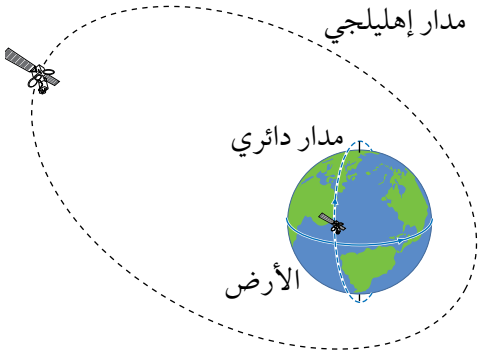
إذا تم وضع قمر صناعي في مدار نصف قطره (r) ويتحرك بسرعة ابتدائية (v) أقل من السرعة المناسبة للمدار، فسوف يسقط القمر الصناعي باتجاه الأرض. يتطلب هذا الأمر اكتساب سرعة إضافية (حيث تتحول طاقة وضع الجاذبية إلى طاقة حركة) حتى تصل سرعته إلى السرعة المناسبة لنصف قطر مداره (الجديد الأقرب إلى الأرض)، وعلى العكس من ذلك إذا كانت السرعة الابتدائية عالية جدًا، فسينتقل القمر الصناعي إلى مدار أعلى بعيدًا عن الأرض ريثما يعود إلى المدار الذي نصف قطره (r)، ويتطلب ذلك فقده لسرعته حتى تصل سرعته إلى السرعة المناسبة للمدار (r).

سؤال

(١٢) قمر صناعي يدور على ارتفاع بضع مئات من الكيلومترات فوق سطح الأرض ويتأثر بقوة احتكاك طفيفة مع الغلاف الجوي (الرقيق جدًا) للأرض. ارسم مخططًا لإظهار كيف تتوقع أن يتغيّر مدار القمر نتيجة لذلك. وكيف يمكن التغلّب على هذه المشكلة إذا كان ضروريًا الإبقاء على القمر الصناعي على ارتفاع معيّن فوق الأرض؟

مراقبة الأرض

للأقمار الصناعية استخدامات عديدة متنوعة، إذ يُستخدم الكثير منها لمراقبة سطح الأرض لأغراض تجارية أو بيئية أو جوية أو عسكرية، ويُستخدم بعضها الآخر في الرصد الفلكي، مستفيدين من وجودها فوق الغلاف الجوي للأرض، كما يُستخدم بعضها الآخر في الملاحة والاتصالات اللاسلكية والبث الإذاعي.



الشكل ١-٨ قمران صناعيان يدوران حول الأرض.

يوضح الشكل ١-٨ مدارَين نموذجيَّين، أحدهما لقمر صناعي في مدار دائري قريب من سطح الأرض ويمر من فوق القطبَين، ويكمل نحو 16 دورة في 24 ساعة، حيث «يرى» القمر الصناعي شريطًا مختلفًا من سطح الأرض خلال كل دورة له في أثناء دوران الأرض من تحته؛ أمّا المدار الآخر فهو لقمر صناعي يدور في مدار إهليلجي فيرى مشهدًا أبعد للأرض.

مدارات الأقمار الثابتة بالنسبة إلى الأرض

هناك نوع خاص من المدارات يتحرك فيه القمر الصناعي من الغرب إلى الشرق، ويُوضع بحيث يدور في أثناء دوران

الأرض من تحته بالسرعة الزاوية نفسها، فيظل القمر الصناعي فوق نقطة ثابتة على خط الاستواء، هذا النوع من المدارات يُسمى **مدار الأقمار الثابتة بالنسبة إلى الأرض Geostationary orbit**. هناك أكثر من 300 قمر صناعي في مثل هذه المدارات، وتُستخدم هذه الأقمار للاتصالات اللاسلكية مثل بث رسائل الهواتف حول العالم، وبث القنوات التلفزيونية الفضائية، حيث تُرسل المحطة الأساسية على الأرض الإشارة التلفزيونية إلى القمر الصناعي الذي يُضخّمها ويبثها مرة أخرى إلى الأرض.

مصطلحات علمية

مدار الأقمار الثابتة بالنسبة إلى الأرض
Geostationary orbit:
مدار يبقى فيه القمر الصناعي مباشرةً فوق النقطة نفسها على الأرض في جميع الأوقات.

يُعدّ منظر أطباق استقبال إشارات الأقمار الصناعية منظرًا مألوفًا، وربما تكون قد لاحظت كيف تتجه جميع لواقط تلك الأطباق إلى النقطة نفسها في السماء، ونظرًا إلى أن القمر الصناعي يكون في مدار ثابت بالنسبة إلى الأرض، فإنه يمكن تثبيت الطبق اللاقط؛ أمّا الأقمار الصناعية التي تتحرك في مدارات أخرى عبر السماء فتحتاج إلى نظام تتبع للتواصل معها، مثل هذا النظام معقّد ومكلف ومطلوب بكثرة في السوق.

الأقمار الثابتة بالنسبة إلى الأرض لها عمر يقارب العشر سنوات، حيث إنها تنحرف تدريجيًا خارج مداراتها الصحيحة؛ لذلك تحتاج إلى وقود خاص لمحركاتها الصاروخية لكي يعيدها إلى مداراتها الثابتة ويبقيها في موقعها الصحيح بالنسبة إلى الأرض، ولكن عندما ينفد الوقود منها فإنه لا بد من استبدالها.

يمكن تحديد بُعد القمر الصناعي في المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض باستخدام المعادلة:

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM}\right) r^3$$

ولكي يبقى القمر الصناعي فوق نقطة ثابتة على خط الاستواء يجب أن يستغرق 24 ساعة بالضبط لإكمال دورة واحدة (الشكل ١-٩).

نحن نعلم أن:

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \text{N m}^2\ \text{kg}^{-2}$$

$$T = 24\ \text{hours} = 86400\ \text{s}$$

$$M = 6.0 \times 10^{24}\ \text{kg}$$

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM}\right) r^3$$

$$86400^2 = \left(\frac{4\pi^2}{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}}\right) r^3$$

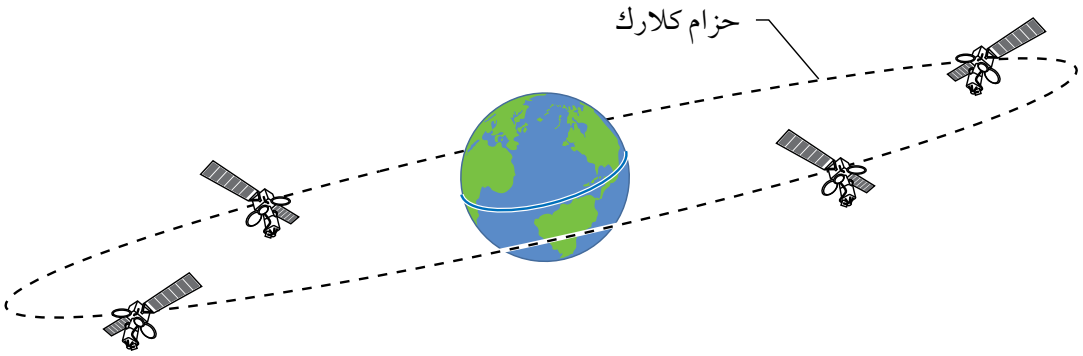
$$r^3 = \frac{86400^2}{\left(\frac{4\pi^2}{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}}\right)}$$

$$r^3 = 7.57 \times 10^{22}\ \text{m}^3$$

$$r = \sqrt[3]{7.57 \times 10^{22}}$$

$$r \approx 4.23 \times 10^{7}\ \text{m}$$

لذلك، لكي يبقى القمر الصناعي في مدار ثابت بالنسبة إلى الأرض، يجب أن يكون على بُعد (42300 km) من مركز الأرض وعند نقطة تقع فوق خط الاستواء مباشرة. لاحظ أن نصف قطر الأرض (6400 km)، وبالتالي فإن نصف قطر المدار يعادل 6.6 مرة قدر نصف قطر الأرض مقاسًا من مركز الأرض (أو 5.6 مرة قدر نصف قطر الأرض مقاسًا من سطحها). رُسم الشكل ١-٩ ليعطي تصورًا عن مدى كبر المدار.



الشكل ١-٩ الأقمار الصناعية الثابتة بالنسبة إلى الأرض مستقرة في «حزام كلارك»، عاليًا فوق خط الاستواء.

أسئلة

(١٣) سيكون من المفيد لأي مهمة مستقبلية إلى المريخ إنشاء نظام من ثلاثة أو أربعة أقمار صناعية ثابتة بالنسبة إلى المريخ للسماح بالتواصل بين المريخ والأرض.

احسب نصف قطر المدار المناسب حول المريخ إذا علمت أن كتلة كوكب المريخ (6.4×10^{23} kg)، وزمنه الدوري 24.6 ساعة.

(١٤) على الرغم من وجود بعض إشارات الهاتف الدولية التي تُرسل عبر الأقمار الصناعية في المدارات الثابتة بالنسبة إلى الأرض، إلّا أن معظمها يُرسل عبر الكابلات الموجودة على سطح الأرض، وهذا يقلّل من التأخير الزمني بين إرسال الإشارة واستقبالها. قدّر قيمة هذا التأخير الزمني عبر الأقمار الصناعية، واشرح السبب في أن يكون ذلك أقل أهمية عند استخدام الكابلات.

ستحتاج إلى ما يأتي:

- نصف قطر المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض = 42300 km
- نصف قطر الأرض = 6400 km
- سرعة الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ تساوي $c = 3.0 \times 10^8$ m s^{-1}

ملخّص

قوة الجاذبية هي قوة تجاذب بين أيّ جسمَين بسبب كتلتَيهما.

شدة مجال الجاذبية (g) عند نقطة ما هي قوة الجاذبية لكل وحدة كتلة لجسم صغير موضوع في تلك النقطة:

$$g = \frac{GM}{r^2} \quad \text{أو} \quad \vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

المجال خارج كتلة كروية منتظمة هو المجال نفسه لكتلة نقطية في مركز تلك الكرة.

ينص قانون نيوتن للجاذبية على:

تتجاذب أيّ كتلتَين نقطيتَين بقوة تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب كتلتَيهما وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.

معادلة قانون نيوتن للجاذبية هي:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

يكون مجال الجاذبية منتظمًا على سطح الأرض أو بالقرب منه، لذلك فإن قيمة (g) ثابتة تقريبًا وتساوي تسارع السقوط الحر.

جهد الجاذبية عند نقطة ما هو الشغل المبذول في نقل وحدة كتلة من اللانهاية إلى تلك النقطة.

يمكن الحصول على جهد الجاذبية لكتلة نقطية من خلال المعادلة:

$$\phi = -\frac{GM}{r}$$

يؤدي مفهوم جهد الجاذبية إلى طاقة وضع الجاذبية لكتلتين نقطيتين.

$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

يمكن تحديد السرعة المدارية لكوكب ما أو قمر صناعي ما باستخدام المعادلة:

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

الزمن الدوري للقمر الصناعي هو الزمن المستغرق لإكمال دورة واحدة كاملة في مداره.

يمكن إيجاد الزمن الدوري المداري من خلال مساواة قوة الجاذبية $\frac{GMm}{r^2}$ بالقوة المركزية $\frac{mv^2}{r}$، ثم التعويض عن (v) لإيجاد الزمن الدوري من خلال المعادلة:

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 r^3}{GM}}$$

الأقمار الصناعية الثابتة بالنسبة إلى الأرض لها زمن دوري مداري يبلغ 24 ساعة، وهي تستخدم لنقل الاتصالات اللاسلكية والبث التلفزيوني.

أسئلة نهاية الوحدة

١ يقف رائد فضاء على سطح كوكب كتلته ($0.50\ M_E$) ونصف قطره ($0.75\ r_E$)، حيث (M_E) هي كتلة الأرض و (r_E) هو نصف قطر الأرض. كم تبلغ شدة مجال الجاذبية على سطح الكوكب؟

أ. $6.5\ \text{N kg}^{-1}$

ب. $8.7\ \text{N kg}^{-1}$

ج. $11\ \text{N kg}^{-1}$

د. $12\ \text{N kg}^{-1}$

٢ يمكن اعتبار الكوكب القزم بلوتو كرة نصف قطرها ($1.2 \times 10^6\ \text{m}$) وكتلتها ($1.27 \times 10^{22}\ \text{kg}$). ما جهد الجاذبية على سطح بلوتو؟

أ. $-0.59\ \text{J kg}^{-1}$

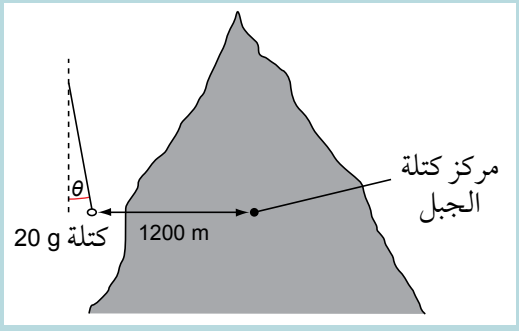
ب. $-7.1 \times 10^5\ \text{J kg}^{-1}$

ج. $0.59\ \text{J kg}^{-1}$

د. $7.1 \times 10^5\ \text{J kg}^{-1}$

٣ كُرتان صغيرتان كتلة كل منهما ($20\ \text{g}$) معلّقتان جنبًا إلى جنب، والبُعد بين مركزَيهما ($5.00\ \text{mm}$). احسب مقدار قوة الجاذبية بين الكُرتَين.

٤ يوضح الشكل ١-١٠ أنه يمكن قياس كتلة جبل ما بانحراف كتلة معلّقة عن الاتجاه الرأسي.



الشكل ١-١٠

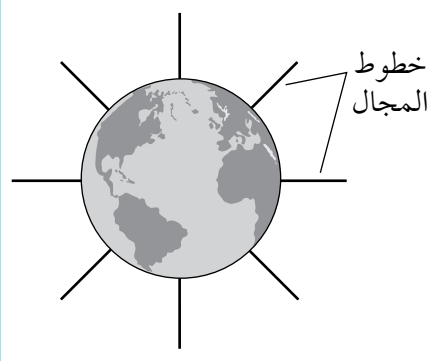
أ. انسخ الشكل وارسم الأسهم التي تمثل القوى المؤثرة على الكتلة. سمِّ الأسهم.

ب. الكتلة الكلّية للجبل هي ($3.8 \times 10^{12}\ \text{kg}$) ويمكن اعتبارها كما لو أنها مركزة في مركز كتلته. احسب القوة الأفقية المؤثرة على الكتلة بسبب الجبل.

ج. قارن بين القوة المحسوبة في الجزئية (ب) وقوة الجاذبية الأرضية المؤثرة على الكتلة.

تابع

٥ يوضح الشكل ١-١١ خطوط مجال الجاذبية الأرضية.



الشكل ١-١١

أ. انسخ الشكل وأضف أسهمًا لتبيّن اتجاه المجال.

ب. اشرح سبب استخدام صيغة طاقة الوضع المكتسبة ($mg\Delta h$) لإيجاد الزيادة في طاقة الوضع عند صعود طائرة إلى ارتفاع (10000 m)، ولا يمكن استخدامها لحساب الزيادة في طاقة الوضع عندما تنتقل مركبة فضائية من سطح الأرض إلى ارتفاع (10000 km).

٦ عطارد – أصغر كواكب المجموعة الشمسية الثمانية المعروفة – يبلغ قطره (4.88×10^6 m)، ومتوسط كثافته (5.4×10^3 kg m^{-3}).

أ. احسب شدة مجال الجاذبية على سطحه.

ب. رجل يبلغ وزنه (900 N) على سطح الأرض. كم سيكون وزنه لو كان على سطح عطارد؟

٧ احسب طاقة وضع الجاذبية لمركبة فضائية كتلتها (250 kg) عندما تكون على بُعد (20000 km) من كوكب المريخ (كتلة المريخ = 6.4×10^{23} kg، نصف قطر المريخ = 3.4×10^6 m).

٨ جانيميد هو أكبر أقمار كوكب المشتري، وتبلغ كتلته (1.48×10^{23} kg)، ويدور حول كوكب المشتري بنصف قطر مداري يبلغ (1.07×10^6 km)، ويدور حول محوره بزمن دوري مقداره 7.15 يومًا. اقتُرح من أجل مراقبة مركبة هبوط غير مأهولة على سطح جانيميد أنه يجب وضع قمر صناعي ثابت بالنسبة إلى جانيميد في مدار حوله.

أ. احسب نصف القطر المداري للقمر الصناعي الثابت المقترح.

ب. تنبأ بالصعوبات التي يمكن مواجهتها في تحقيق المدار الثابت لهذا القمر.

٩ تدور الأرض حول الشمس بزمن دوري مقداره سنة واحدة في مدار متوسط نصف قطره (1.50×10^{11} m). احسب:

أ. السرعة المدارية للأرض.

ب. التسارع المركزي للأرض.

ج. شدة مجال جاذبية الشمس على الأرض.

تابع

١٠ تبلغ كتلة كوكب المريخ (6.4×10^{23} kg)، وقطره (6790 km).

أ. ١. احسب التسارع بسبب الجاذبية على سطح الكوكب.

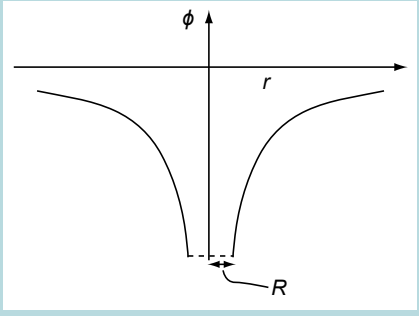
٢. احسب جهد الجاذبية على سطح الكوكب.

ب. يعيد الصاروخ عيّنات لبعض المواد من المريخ إلى الأرض. اكتب مقدار الطاقة الذي يجب أن تُعطى لكل كيلوغرام من المادة للإفلات تمامًا من مجال جاذبية المريخ (الإفلات من مجال الجاذبية يحتاج إلى طاقة إذ يصل الجسم إلى نقطة حيث جهد الجاذبية $0\ J\ kg^{-1}$).

ج. استخدم إجابتك عن الجزئية (ب) لتوضح أن الحد الأدنى للسرعة التي يجب أن يصلها الصاروخ للإفلات من مجال جاذبية المريخ هو ($5000\ m\ s^{-1}$).

د. من أجل مهمة ناجحة إلى المريخ يجب تجميع المركبة التي تنقل رواد الفضاء إلى المريخ في محطة فضائية في مدار حول الأرض لتُطلق من هناك وليس من سطح الأرض. ما سبب ذلك؟

١١ يبيّن الشكل ١-١٢ جهد الجاذبية بالقرب من كوكب كتلته (M) ونصف قطره (R).



الشكل ١-١٢

أ. اشرح المقصود بجهد الجاذبية عند نقطة ما.

ب. انسخ الشكل وارسم عليه منحنيات مشابهة:

١. لكوكب له نصف القطر نفسه ولكن كتلته ($2M$) سمِّ هذا المنحنى (أ).

٢. لكوكب له الكتلة نفسها ولكن نصف قطره ($2R$) سمِّ هذا المنحنى (ب).

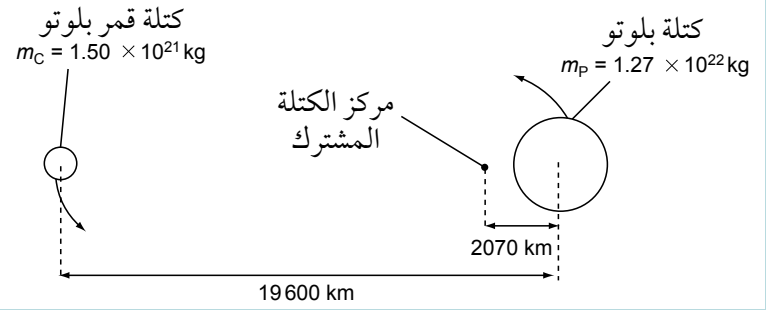
ج. أيّ من هذه الكواكب الثلاثة يتطلب أقل قدر من الطاقة للإفلات من سطحه؟ استخدم المخططات لشرح إجابتك.

د. يبلغ قطر كوكب الزهرة (12100 km) وكتلته (4.87×10^{24} kg). احسب الطاقة اللازمة لرفع كيلوغرام واحد من سطح كوكب الزهرة إلى محطة فضائية في مدار يبعد (900 km) عن سطحه.

تابع

١٢ **أ.** اشرح المقصود بشدة مجال الجاذبية عند نقطة ما.

ب. يبيّن الشكل ١-١٣ الكوكب القزم بلوتو وقمره، ويمكن اعتبارهما نظامًا كوكبيًا مزدوجًا يدوران حول المركز المشترك لكتلتَيهما.



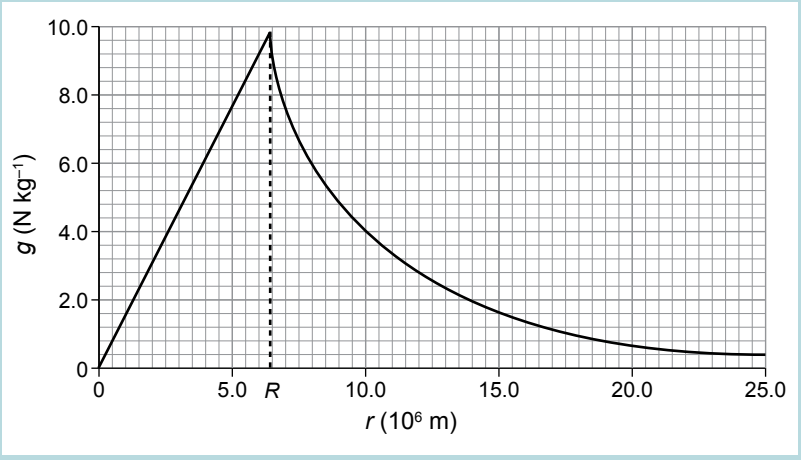
الشكل ١-١٣

١. احسب قوة جاذبية الكوكب بلوتو لقمره.

٢. استخدم إجابتك في الجزئية (١) لحساب الزمن الدوري المداري لقمر بلوتو.

٣. لماذا يجب أن يكون الزمن الدوري المداري لكوكب بلوتو مماثلًا لقمره؟ اشرح إجابتك.

١٣ يبيّن التمثيل البياني في الشكل ١-١٤ اختلاف شدة مجال الجاذبية الأرضية مع البُعد عن مركزها.



الشكل ١-١٤

أ. حدّد شدة مجال الجاذبية على ارتفاع يساوي (2R) فوق سطح الأرض، حيث (R) هو نصف قطر الأرض.

ب. يوضع قمر صناعي في مدار على هذا الارتفاع. احسب التسارع المركزي للقمر الصناعي.

ج. احسب السرعة التي يجب أن يتحرك بها القمر الصناعي للبقاء في هذا المدار.

د. قوى الاحتكاك تعني أن القمر الصناعي يتباطأ تدريجيًا بينما يكمل دورة كاملة. ارسم مخططًا للمسار المداري الدائري الابتدائي للقمر الصناعي، وبيّن المدار الناتج عندما تعمل قوى الاحتكاك على إبطاء حركة القمر الصناعي.

هـ. لماذا لا تسقط الأقمار الصناعية القديمة على سطح الأرض باستمرار؟ اقترح السبب واشرح إجابتك.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم طبيعة مجال الجاذبية.	١-١			
أمثّل مجال الجاذبية باستخدام خطوط المجال وأفسره.	١-١			
أتذكر نص قانون نيوتن للجاذبية وأستخدم المعادلة: $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$.	١-١			
أفهم سبب كون (g) ثابتةً تقريبًا بالقرب من سطح الأرض.	١-٢			
أستنتج من قانون نيوتن للجاذبية المعادلة: $g = \frac{GM}{r^2}$.	١-٢			
أستخدم المعادلة: $g = \frac{GM}{r^2}$.	١-٢			
أفهم أن جهد الجاذبية عند اللانهاية يساوي صفرًا.	١-٣			
أُعرّف جهد الجاذبية ϕ عند نقطة ما على أنها الشغل المبذول في نقل وحدة كتلة من اللانهاية إلى تلك النقطة.	١-٣			
أفهم أن جهد الجاذبية يتناقص عندما يتحرك جسم مقتربًا من الجسم الثاني، بحيث يكون أكثر سالبية.	١-٣			
أستخدم معادلة جهد الجاذبية: $\phi = -\frac{GM}{r}$.	١-٣			
أستخدم المعادلة: $\Delta\phi = GM\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$.	١-٣			
أفهم أن طاقة الوضع لكتلتَين نقطتَين تساوي: $E_p = -\frac{GMm}{r}$.	١-٣			
أحل مسائل تتضمن مدارات دائرية للأقمار الصناعية من خلال ربط قوة الجاذبية بالتسارع المركزي للقمر الصناعي.	١-٤			
أفهم أن قمرًا صناعيًا في حالة الأقمار الصناعية الثابتة بالنسبة إلى الأرض يبقى فوق النقطة نفسها على سطح الأرض.	١-٤			
أفهم أن القمر الصناعي الثابت بالنسبة إلى الأرض له زمن دوري مداري مقداره 24 ساعة ويتحرك من الغرب إلى الشرق في أثناء دورانه حول الأرض.	١-٤			

الوحدة الثانية

المجالات الكهربائية وقانون كولوم

Electric Fields and Coulomb's Law

أهداف التعلّم

٢-١ يذكر أن المجال الكهربائي هو مثال على مجال القوة ويعرّف شدة المجال الكهربائي على أنه القوة لوحدة الشحنة الموجبة.

٢-٢ يمثّل مجالًا كهربائيًا باستخدام خطوط المجال.

٢-٣ يستخدم معادلة القوة المؤثرة على شحنة في مجال كهربائي: $\vec{F} = Q\vec{E}$.

٢-٤ يستخدم معادلة حساب شدة المجال الكهربائي المنتظم بين لوحَين متوازيَين مشحونَين: $\vec{E} = \frac{\Delta V}{\Delta d}$.

٢-٥ يصف تأثير المجال الكهربائي المنتظم على حركة الجسيمات المشحونة.

٢-٦ يذكر أنه بالنسبة إلى نقطة خارج موصل كروي، يمكن اعتبار الشحنة الموجودة على الكرة شحنة نقطية في مركزها.

٢-٧ يذكر نص قانون كولوم ويستخدم معادلة القوة بين شحنتَين نقطيتَين في الفراغ: $\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 \vec{r}^2}$.

٢-٨ يستخدم معادلة شدة المجال الكهربائي: $\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \vec{r}^2}$ الناشئ عن شحنة نقطية في الفراغ.

٢-٩ يعرّف الجهد الكهربائي عند نقطة ما على أنه الشغل المبذول لوحدة الشحنة الموجبة لنقل شحنة اختبارية صغيرة من اللانهاية إلى تلك النقطة.

٢-١٠ يستخدم معادلة الجهد الكهربائي في المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية: $V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$.

٢-١١ يصف كيف أن مفهوم الجهد الكهربائي مرتبط بطاقة الوضع الكهربائية لشحنتَين نقطيتَين ويستخدم المعادلة: $E_p = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- لقد درست الكهرباء الساكنة في الصف العاشر وتعرضت لها في الحياة اليومية، وتطرّقت أيضًا إلى فكرة المغناطيسية.
- اكتب قائمة بأوجه التشابه والاختلاف بين الكهرباء الساكنة والمغناطيسية.
- هل هاتان الظاهرتان (الكهربائية والمغناطيسية) مترابطتان؟ وإذا كانتا كذلك فكيف؟

العلوم ضمن سياقها

عادة ما يكون السطح السفلي من السحب الرعدية مشحونًا بشحنة سالبة، أثناء وميض البرق (الصورة ٢-١) يتكوّن تيار كهربائي شديد من السحابة إلى الأرض، وربما لاحظت ظاهرة «الومضات الدورية strobe effect»، والسبب أن كل ضربة برق تتكوّن عادة من أربع أو خمس ومضات على فترات زمنية 50 ملّي ثانية أو ما يقارب ذلك. ربما تكون لديك بعض المعرفة حول المجالات الكهربائية (أو الكهروستاتيكية) من خلال دراستك للعلوم أو من خلال ملاحظتك للكهرباء الساكنة في الحياة اليومية. وسنتعلّم في هذه الوحدة كيف يمكننا ترسيخ هذه الأفكار، وكيف تنشأ القوى الكهربائية، وكيف يمكننا تمثيل آثارها باستخدام المجالات الكهربائية، ثم سندرس كيفية حساب القوى الكهربائية وشدة المجال الكهربائي.

هناك نحو ثلاثة ملايين ضربة برق تصل إلى الأرض كل يوم، والطاقة المنقولة في كل ضربة تساوي (10 MJ)، إذًا هناك ما يفوق متطلبات العالم الصناعي بكل احتياجاته من الطاقة، فلماذا لا تُستغل هذه الطاقة؟ وما التحديات التي تعيق استغلالها؟

الصورة ٢-١ ومضات البرق؛ مثال مثير على المجالات الكهربائية الطبيعية.

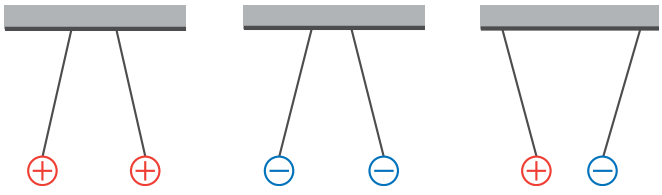
٢-١ المجال الكهربائي

الكهرباء الساكنة

تكمن أهمية الكهرباء الساكنة (الكهروستاتيكية) في أنها ضرورية في عدد من التطبيقات مثل: عملية تصوير الوثائق، وتنظيف الانبعاثات الصناعية عن طريق ترسيب الغبار، ورش المحاصيل الزراعية، وأيضًا للقرش خلايا تستجيب للمجالات الكهربائية الضعيفة والتي تسببها العضلات المتحركة في الفريسة، وبالتالي يمكنه معرفة مكان فريسته حتى لو اختبأت عنه. لكنها قد تكون مصدر إزعاج أيضًا؛ فمن منّا لم يتعرض لوخزة كهربائية، سواء عند الخروج من السيارة أو عند لمس مقبض الباب؟ يحدث ذلك لأن الشحنات الكهربائية الساكنة تتراكم وتسبب لنا وخزة عند تفريغها.

يمكن تفسير كل هذه التأثيرات بما يسمّى **الشحنة الكهربائية Electric charge**. ويمكن أن نستنتج النقاط الآتية من خلال الملاحظات المختبرية البسيطة:

- الأجسام عادة ما تكون متعادلة كهربائيًا (غير مشحونة)، ولكنها قد تصبح مشحونة كهربائيًا، على سبيل المثال عندما تدلك مادة بأخرى.
- هناك نوعان من الشحنات الكهربائية: موجبة وسالبة.
- الشحنات المختلفة تتجاذب والمتشابهة تتنافر (الشكل ٢-١).
- قد يكون الجسم المشحون قادرًا على جذب جسم آخر غير مشحون أيضًا؛ نتيجةً للحث الكهروستاتيكي.



الشكل ٢-١ التجاذب والتنافر بين الشحنات الكهربائية.

مصطلحات علمية

الشحنة الكهربائية Electric charge: هي خاصية لدى الجسم تجعله يتأثر بقوة (تجاذب أو تنافر) عندما يوضع في مجال كهربائي.

هذه الملاحظات جهرية (عيانية)؛ إذ إنها أوصاف للظواهر التي يمكننا ملاحظتها في المختبر من دون الحاجة إلى النظر فيما يحدث على المستوى المجهري أي على مستوى الجسيمات مثل الذرات والإلكترونات، إلا أنه يمكننا تقديم تفسير أكثر دقة إذا أخذنا في الاعتبار الصورة المجهرية للكهرباء الساكنة.

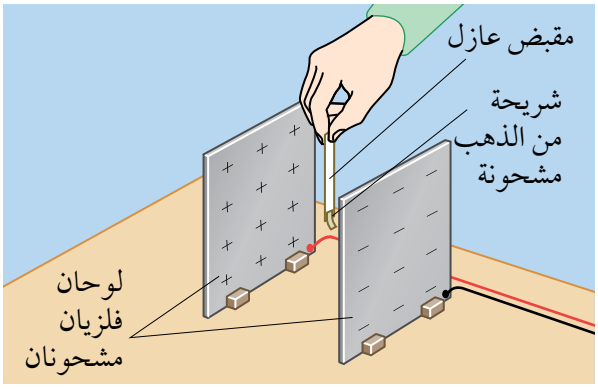
وللتبسيط يمكن اعتبار المادة مكوّنة من ثلاثة أنواع من الجسيمات: الإلكترونات (سالبة الشحنة)، والبروتونات (موجبة الشحنة)، والنيوترونات (المتعادلة كهربائيًا). يحتوي الجسم غير المشحون على عدد متساوٍ من البروتونات والإلكترونات، وبالتالي لا تظهر عليه شحنة.

مفهوم المجال الكهربائي

مهارة عملية ٢-١

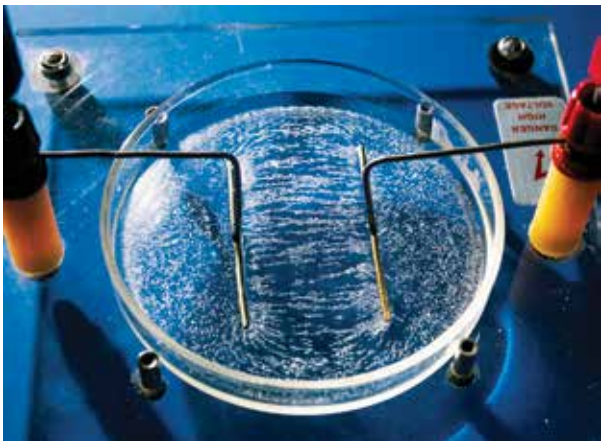
استقصاء المجالات الكهربائية

إذا دلكت ساقًا من البلاستيك بحيث تصبح مشحونةً ثم قرّبتها من شعرك، فستشعر بأن شعرك ينجذب إلى الساق، حيث ينتشر تأثير البلاستيك المشحون في الحيّز المحيط به؛ فنقول أن هناك **مجالًا كهربائيًا Electric field** حول الشحنة الكهربائية، ولإنتاج مجال كهربائي نحتاج إلى أجسام مشحونة (كما هي الحال مع ساق البلاستيك المشحونة)، ولملاحظة المجال نحتاج إلى وضع شيء ما فيه يتأثر بالمجال (كما تأثّر شعرك)، وهناك طريقتان بسيطتان يمكنك من خلالهما القيام بذلك في المختبر؛ يُستخدم في الطريقة الأولى شريحة رقيقة من الذهب مشحونة، مثبّتة على مقبض عازل (الشكل ٢-٢).



الشكل ٢-٢ استقصاء المجال الكهربائي بين لوحَين فلزيَّين مشحونَين.

وتُستخدم في الطريقة الثانية حبيبات من مادة مثل السميد؛ حيث تصطفّ حبيبات السميد في المجال الكهربائي (الصورة ٢-٢)، كما تصطفّ برادة الحديد في المجال المغناطيسي.



الصورة ٢-٢ حبيبات السميد تُظهر مجالًا كهربائيًا منتظمًا بين لوحَين فلزيَّين مشحونَين متوازيَين.

يتأثر أي جسم مشحون بقوة في مجال كهربائي، ويمكننا القول أن هناك مجالًا كهربائيًا في أي مكان تتأثر فيه شحنة كهربائية بقوة، والمجال الكهربائي هو **مجال قوة Field of force**، وقد تكون هذه فكرة مجرّدة إلى حدٍ ما لكنك أكثر دراية بفكرة «مجال القوة» من خبرتك السابقة بالمغانط، حيث يوجد مجال مغناطيسي حول المغناطيس الدائم وسيتأثر أيّ مغناطيس آخر يوضع في مكان قريب منه بقوة، وقد رسمت في الصفوف السابقة خطوط المجال المستخدمة لتمثيل المجال حول مغناطيس ما، كما درست سابقًا النوع الثالث من مجال القوة في الوحدة الأولى وهو مجال الجاذبية الذي نعيش فيه.

مصطلحات علمية

المجال الكهربائي Electric field: المنطقة التي يتأثر فيها جسم مشحون بقوة كهربائية. هذا ما يُعرف بـ «مجال القوة».

مجال القوة Field of force: منطقة من الفضاء يتأثر فيها جسم ما بقوة؛ قد تكون هذه القوة جاذبية أو كهربائية أو مغناطيسية أو غير ذلك.

هناك الكثير من أوجه التشابه بين المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية ومجالات الجاذبية فضلًا عن الاختلافات الرئيسية والتي أهمها:

- تؤثر المجالات الكهربائية على الأجسام المشحونة كهربائيًا.
- تؤثر المجالات المغناطيسية على المواد المغناطيسية، والمغانط، والشحنات الكهربائية المتحركة (بما في ذلك التيارات الكهربائية).
- تؤثر مجالات الجاذبية على الأجسام ذات الكتلة.

سنرى لاحقًا أن القوى الكهربائية والمغناطيسية قوتان مرتبطتان ارتباطًا وثيقًا، حيث يمكن اعتبارهما بشكل عام كيانًا واحدًا، وهو القوة الكهرومغناطيسية.

تمثيل المجالات الكهربائية

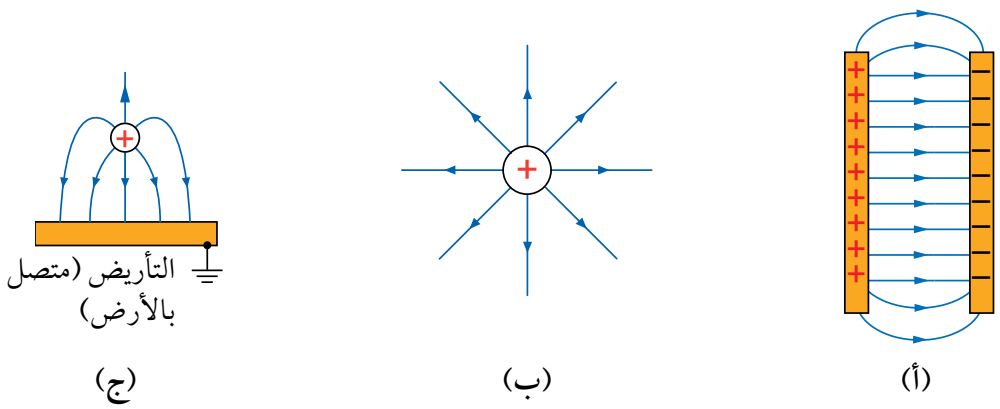
يمكننا رسم المجالات الكهربائية بالطريقة نفسها التي تمكّنا فيها من رسم المجالات المغناطيسية أو مجالات الجاذبية، وذلك بواسطة **خطوط المجال** **Field lines** (تسمى أحيانًا خطوط القوة)، ويوضح الشكل ٢-٣ ثلاثة أشكال للمجال الكهربائي.

مصطلحات علمية

خطوط المجال Field lines: خطوط مرسومة لتمثيل شدة مجال القوة واتجاهه.

وكما هي الحال مع المجالات المغناطيسية؛ يفيدنا هذا التمثيل بمعرفة أمرَين عن المجال الكهربائي: اتجاهه (اتجاه الخطوط نفسها)، وشدته (مدى تباعد الخطوط بعضها عن بعض)، حيث تتجه الأسهم من الشحنة الموجبة إلى الشحنة السالبة؛ فهي تشير إلى اتجاه القوة المؤثرة على شحنة كهربائية موجبة في هذا المجال، ويمكننا أن نشير هنا إلى نوعَين من المجالات الكهربائية:

- المجال المنتظم والذي له الشدة نفسها عند جميع النقاط. مثال: المجال الكهربائي بين لوحَين متوازيَين مشحونَين بشحنتَين مختلفتَين الشكل ٢-٣ (أ).
- المجال الشعاعي والذي ينتشر إلى الخارج في جميع الاتجاهات. مثال: المجال الكهربائي حول شحنة كهربائية نقطية أو كرة مشحونة الشكل ٢-٣ (ب).



الشكل ٢-٣ تُرسم خطوط المجال لتمثيل مجال كهربائي. تُظهِر خطوط المجال اتجاه القوة على شحنة كهربائية موجبة موضوعة عند نقطة ما في المجال. (أ) ينتج مجال كهربائي منتظم بين لوحَين متوازيين مشحونَين بشحنتَين مختلفتَين. (ب) مجال كهربائي شعاعي يحيط بكرة مشحونة. (ج) المجال الكهربائي بين كرة مشحونة ولوح مؤرض.

يمكنك أن ترى في الشكل ٢-٣ (ج) المجال الكهربائي الناشئ بين كرة مشحونة ولوح مؤرض، لاحظ رمز التأريض (earth) والمفترض أن يكون غير مشحون (بمعنى آخر، عند صفر فولت). يمكننا رسم المجالات الكهربائية لحالات أخرى مختلفة.

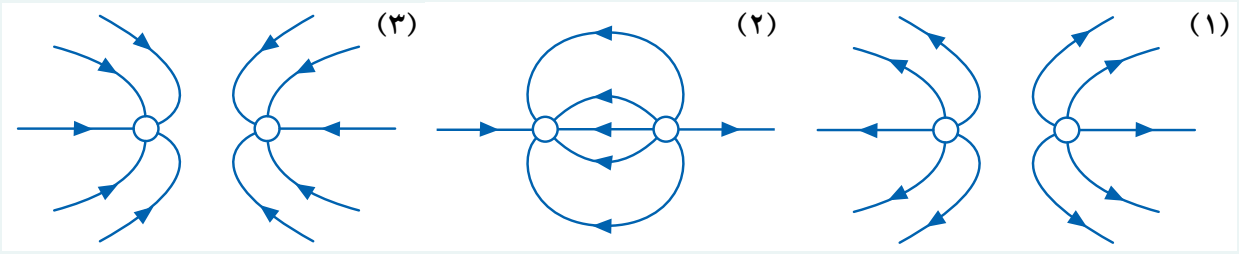
أسئلة

(١) أي من مخططات المجالات الثلاثة في الشكل ٢-٤ يمثّل المجال الناشئ عن:

أ. شحنتَين موجبتَين؟

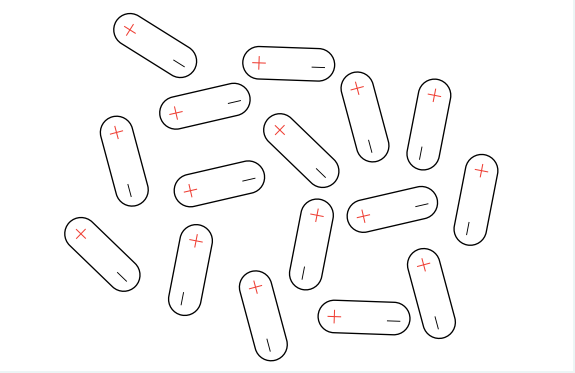
ب. شحنتَين سالبتَين؟

ج. شحنتَين مختلفتَين؟



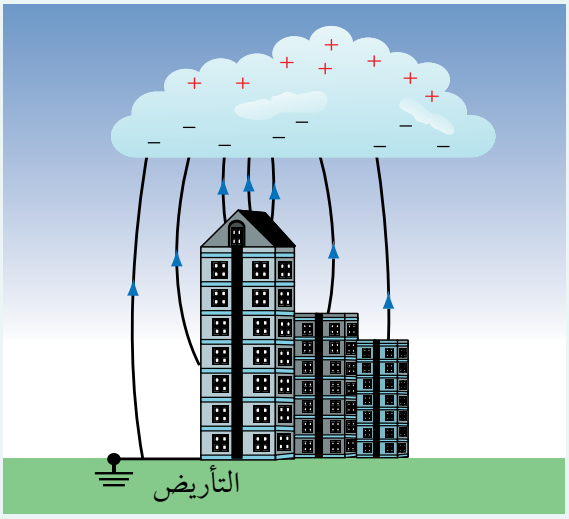
الشكل ٢-٤ مجالات كهربائية بين شحنتَين كهربائيتَين.

(٢) توصف العديد من الجزيئات بأنها قطبية؛ أي أن لديها أطرافًا مشحونة بشحنة موجبة وأخرى سالبة، ومع ذلك فإنها متعادلة بشكل عام. ارسم مخططًا لتوضيح كيف يمكن للجزيئات القطبية مثل تلك المبيّنة في الشكل ٢-٥ أن تغير موقعها وترتب أطرافها في مادة صلبة عند تعرضها لمجال كهربائي.



الشكل ٢-٥ جزيئات قطبية غير منتظمة.

(٣) يبيّن الشكل ٢-٦ نمط المجال الكهربائي بين سحابة رعدية ومبنى. أين تكون شدة المجال الكهربائي أكبر؟ اشرح إجابتك.



الشكل ٢-٦ نمط المجال الكهربائي بين سحابة رعدية ومبنى.

٢-٢ شدة المجال الكهربائي

تُعرّف **شدة المجال الكهربائي** Electric field strength عند نقطة ما على أنها القوة لكل وحدة شحنة كهربائية، والتي تؤثّر على شحنة كهربائية موجبة ثابتة موضوعة عند تلك النقطة.

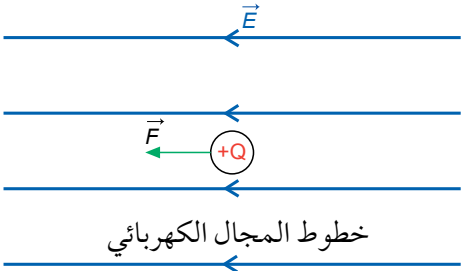
لتعريف شدة المجال الكهربائي نتخيل وضع شحنة كهربائية اختبارية موجبة (+Q) في المجال، وقياس القوة الكهربائية ($\vec{F}$) التي تؤثر عليها (الشكل ٢-٧). والشحنة الاختبارية هي ببساطة جسم صغير مشحون يشغل حجمًا ضئيلًا في الفراغ، ومن المهم إدراك أهمية استخدام شحنة اختبارية موجبة؛ لأن هذا يحدد اتجاه المجال الكهربائي. (إذا كنت قد استخدمت ورقة ذهبية مشحونة لاستقصاء المجال الكهربائي كما في المهارة العملية ٢-١، فإن ذلك يبيّن مبدأ اختبار المجال بواسطة شحنة كهربائية).

من هذا التعريف يمكننا كتابة معادلة شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$):

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

مصطلحات علمية

شدة المجال الكهربائي (عند نقطة)
Electric field strength:
القوة لكل وحدة شحنة كهربائية والتي تؤثر على شحنة كهربائية موجبة ثابتة موضوعة عند تلك النقطة.



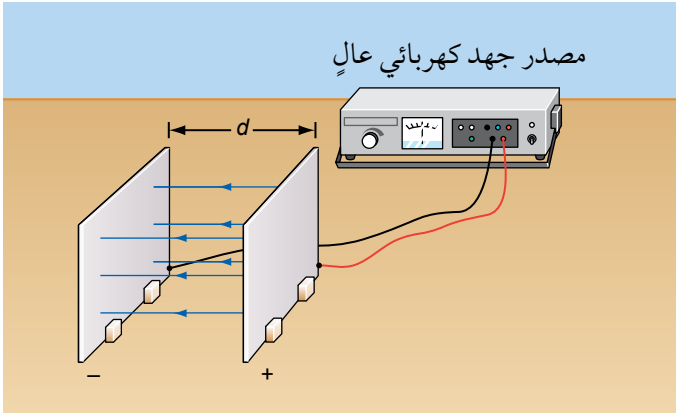
الشكل ٢-٧ يؤثر مجال كهربائي شدته ($\vec{E}$) بقوة ($\vec{F}$) على الشحنة الكهربائية +Q.

حيث ($\vec{E}$) هي شدة المجال الكهربائي، و ($\vec{F}$) هي القوة المؤثرة على الشحنة الكهربائية، و (Q) هي الشحنة الكهربائية.

ويترتب على ذلك أن وحدة شدة المجال الكهربائي هي نيوتن لكل كولوم ($N\,C^{-1}$).

شدة المجال الكهربائي المنتظم

يمكنك توليد مجال كهربائي منتظم بين لوحَين فلزيَّين متوازيَين بواسطة توصيلهما بطرفَي مصدر جهد كهربائي عالٍ (الشكل ٢-٨).



الشكل ٢-٨ ينشأ مجال كهربائي منتظم بين اللوحَين المشحونَين المتوازيَين والمتصلَين بمصدر جهد كهربائي عالٍ.

شدة المجال الكهربائي بين اللوحَين تعتمد على عاملَين:

- فرق الجهد الكهربائي (ΔV) بين اللوحَين، فكلما زاد فرق الجهد كانت شدة المجال الكهربائي أكبر: $\vec{E} \propto \Delta V$.
- المسافة (Δd) بين اللوحَين، فكلما كانت المسافة بين اللوحَين أكبر كانت شدة المجال الكهربائي أضعف: $\vec{E} \propto \frac{1}{\Delta d}$.

هذان العاملان يمكن الجمع بينهما لإعطاء معادلة شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$):

$$\vec{E} = -\frac{\Delta V}{\Delta d}$$

من هذه المعادلة نرى أنه يمكننا كتابة وحدة شدة المجال الكهربائي بوحدة الفولت لكل متر ($V\ m^{-1}$)، ومن المعادلة $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$ نلاحظ أن هذه الوحدة تكافئ:

$$1\ V\ m^{-1} = 1\ N\ C^{-1}$$

شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) كمية متجهة ولكن لاحظ أنه غالبًا ما تُحذف الإشارة السالبة في هذه المعادلة لأننا نهتم فقط بمقدار المجال وليس باتجاهه، وتضمن الإشارة السالبة ببساطة –رياضيًا– أن يكون اتجاه شدة المجال الكهربائي صحيحًا عند الأخذ بالاعتبار اتجاه متجه الإزاحة بين اللوحين وفرق الجهد بينهما، فمثلًا في الشكل ٢–٨ يزيد فرق الجهد (ΔV) عند تحريك الشحنة الاختبارية باتجاه اليمين (اللوح الموجب) في حين تؤثر القوة ($\vec{F}$) بالاتجاه المعاكس، نحو اليسار (اللوح السالب).

مقدار شدة المجال الكهربائي المنتظم بين لوحَين فلزيَّين متوازيَين.

$$\vec{E} = \frac{\Delta V}{\Delta d}$$

إذا نظرنا إلى المعادلة السابقة بمزيد من التمعّن، يمكننا استنتاج أن المجال الكهربائي يساوي فعلًا التغيّر في الجهد (فرق الجهد الكهربائي) مقسومًا على التغيّر في المسافة (المسافة المقطوعة).

يوضح المثال ٢ كيفية حل المسائل التي تتضمن مجالات كهربائية منتظمة.

أمثلة

١. لوحان فلزيّان تفصل بينهما مسافة (d)، وفرق الجهد الكهربائي بينهما (V). سُحبت شحنة كهربائية موجبة (Q) بسرعة ثابتة وبقوة ثابتة ($\vec{F}$) بدءًا من اللوح السالب في خط مستقيم إلى اللوح الموجب. باستخدام تعريف شدة المجال الكهربائي ومفهوم الشغل المبذول، بيّن أن مقدار شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) تُعطى بالمعادلة:

$$E = \frac{V}{d}$$

الخطوة ١: لدينا:

الشغل المبذول على الشحنة الكهربائية = الطاقة المنقولة للشحنة

من تعريفات الشغل المبذول، يمكننا أن نكتب:

الشغل المبذول = القوة × المسافة

$$W = \vec{F}\,\vec{d}$$

الطاقة المنقولة = VQ

الخطوة ٢: بالتعويض عن معادلتي الشغل والطاقة المنقولة نحصل على:

$$\vec{F}\,\vec{d} = VQ$$

وبإعادة ترتيب المعادلة نحصل على:

$$\frac{F}{Q} = \frac{V}{d}$$

الخطوة ٣: الجانب الأيسر من المعادلة هو شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$). لذلك فإن:

$$E = \frac{V}{d}$$

تابع

٢. لوحان فلزيان متوازيان المسافة بينهما (2.0 cm) وفرق الجهد الكهربائي بينهما (5.0 kV). احسب القوة الكهربائية المؤثرة على جُسيم من جُسيمات الغبار يحمل شحنة كهربائية مقدارها (8.0×10^{-19} C) موضوع بين اللوحَين.

الخطوة ١: اكتب الكميات المعطاة في السؤال:

$d = 2.0 \times 10^{-2}$ m

$V = 5.0 \times 10^{3}$ V

$Q = 8.0 \times 10^{-19}$ C

مساعدة: عند كتابة الكميّات من المهم تضمين الوحدات وتحويلها إلى وحدات أساسية. وقد استخدمنا الأس العشري هنا.

الخطوة ٢: لحساب القوة ($\vec{F}$)، عليك أولًا تحديد شدة المجال الكهربائي:

$$E = \frac{V}{d}$$

$$= \frac{5.0 \times 10^{3}}{2.0 \times 10^{-2}} = 2.5 \times 10^{5} \text{ V m}^{-1}$$

الخطوة ٣: احسب الآن القوة المؤثرة على جُسيم الغبار.

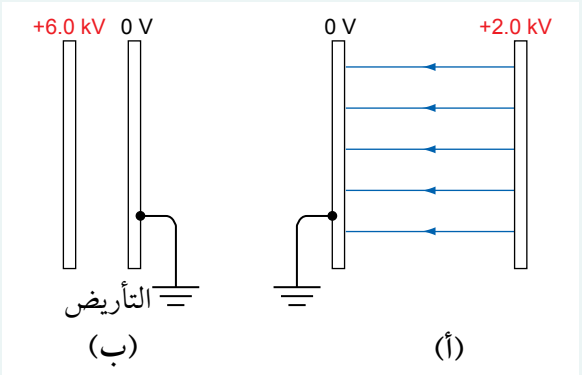
$$\vec{F} = \vec{E}Q$$

$$F = 2.5 \times 10^{5} \times 8.0 \times 10^{-19}$$

$$= 2.0 \times 10^{-13} \text{ N}$$

أسئلة

٤ يبيّن الشكل ٢-٩ زوجَين من الألواح المتوازية المشحونة، كل زوج منهما له فرق جهد كهربائي مختلف. تظهر خطوط المجال الكهربائي في الشكل (أ). انسخ الشكل (ب) وأكمله لإظهار خطوط المجال الكهربائي. انتبه للمسافة بين خطوط المجال الكهربائي حتى تستطيع تمييز شدة المجال الكهربائي في (ب).



الشكل ٢-٩ زوجان من الألواح المتوازية المشحونة.

٥ احسب شدة المجال الكهربائي واتجاهه عند نقطة موضوع فيها شحنة كهربائية مقدارها (20 mC) بحيث تتأثر بقوة رأسية إلى الأسفل مقدارها (150 N).

٦ احسب شدة المجال الكهربائي بين لوحَين متوازيَين مشحونَين، تفصل بينهما مسافة مقدارها (40 cm)، وفرق الجهد الكهربائي بينهما (1000 V).

٧ تؤثر قوة كهربائية مقدارها (8×10^{-16} N) على إلكترون موضوع في مجال كهربائي منتظم. ما شدة المجال الكهربائي المنتظم؟ (شحنة الإلكترون $e = -1.6 \times 10^{-19}$ C).

٨ الهواء عادة يكون عازلًا جيدًا، ومع ذلك يمكن أن تقفز شرارة عبر الهواء الجاف عندما تكون شدة المجال الكهربائي أكبر من (40000 V cm^{-1}) تقريبًا. وهذا ما يسمى الانهيار الكهربائي (electrical breakdown). تُظهر الشرارة أن الشحنة الكهربائية تمر عبر الهواء أي أن هناك تيارًا كهربائيًا (لا تخلط بين هذه الشرارة والشرارة الكيميائية، مثل التي تراها عند مشاهدة الألعاب النارية؛ في تلك الحالة تحترق جسيمات صغيرة من مادة كيميائية بسرعة).

أ. موّلد فان دي جراف (الصورة ٢-٣) قادر على توليد شحنات ينتج عنها شرر يمكن أن يقفز عبر فجوة عرضها (4 cm). قدّر فرق الجهد الكهربائي الذي ينتجه الموّلد؟

ب. قدّر الجهد الكهربائي لسحابة رعدية ارتفاعها (100 m) والتي يضرب البرق منها الأرض.

الصورة ٢-٣ ينتج موّلد فان دي جراف فرق جهد كهربائي يحدث شررًا عبر الهواء.

٢-٣ القوة المؤثّرة على شحنة كهربائية

يمكننا حساب القوة ($\vec{F}$) المؤثرة على شحنة كهربائية (Q) في مجال كهربائي منتظم بين لوحَين متوازيَين، وبالتعويض عن شدة المجال الكهربائي المنتظم $\left(\vec{E} = \frac{-V}{d}\right)$ في معادلة القوة التي نحصل عليها من المعادلة العامة لشدة المجال الكهربائي ($\vec{F} = Q\vec{E}$):

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

مقدار القوة:

$$F = -\frac{QV}{d}$$

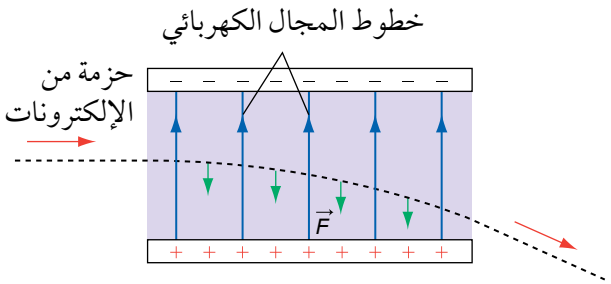
ولإلكترون شحنته (e)، تصبح المعادلة:

$$F = \frac{eV}{d}$$

يبيّن الشكل ٢-١٠ دخول حزمة من الإلكترونات بسرعه معيّنة بشكل عمودي بين لوحَين متوازيَين مشحونَين، فكيف ستتحرك الحزمة؟

علينا أن نفكر في القوة المؤثرة على إلكترون واحد، وبما أن اللوح العلوي في الشكل ٢-١٠ سالب بالنسبة إلى اللوح السفلي، بالتالي يُدفع الإلكترون إلى الأسفل تحت تأثير القوة الكهربائية المؤثرة عليه (يمكنك التفكير في هذا ببساطة على أن الإلكترون السالب الشحنة الكهربائية ينجذب بواسطة اللوح الموجب، ويتنافر مع اللوح السالب).

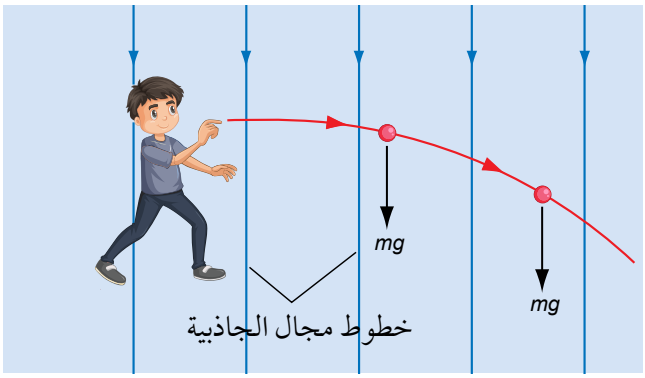
إذا كان الإلكترون ساكنًا فسيتسارع مباشرة إلى الأسفل، أما في هذا المثال فسيستمر الإلكترون بالحركة نحو اليمين. فسرعته المتجهة الأفقية لن تتأثر بالقوة، ولكنه مع تحركه أفقيًا سيتسارع إلى الأسفل أي أن سرعته الرأسية تزداد، وسيتبع مسارًا مقوّسًا يكون على شكل قطع مكافئ.



الشكل ٢-١٠ مسار القطع المكافئ لإلكترون متحرك في مجال كهربائي منتظم.

لاحظ أن القوة المؤثرة على الإلكترون هي نفسها عند جميع النقاط بين اللوحَين، ودائمًا ما تكون بالاتجاه نفسه (في الشكل ٢-١٠ تكون القوة إلى الأسفل بالاتجاه المعاكس لخطوط المجال الكهربائي).

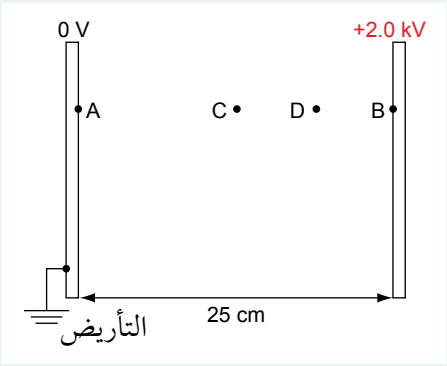
هذه الحالة تشبه حالة رمي كرة أفقيًا في مجال الجاذبية الأرضية المنتظم (الشكل ٢-١١)، فهي تستمر في التحرك بسرعة أفقية ثابتة لكن في الوقت نفسه تتسارع إلى الأسفل، ونتيجة لذلك تأخذ شكل المسار المقوّس المألوف والمبيّن أدناه (ملاحظة: تؤثر على الإلكترون المذكور سابقًا قوة جاذبية صغيرة إلا أنها لا تكاد تُذكر مقارنة بالقوة الكهربائية المؤثرة عليه لأن كتلته صغيرة جدًا).



الشكل ٢-١١ رمي كرة في مجال الجاذبية الأرضية المنتظم يتبع مسار قطع مكافئ.

أسئلة

(٩) يوضح الشكل ٢-١٢ لوحَين متوازيَين مشحونَين، تفصل بينهما مسافة (25 cm).



الشكل ٢-١٢ لوحان متوازيان ومشحونان.

أ. انسخ الشكل وارسم خطوط المجال عليه لتمثل المجال الكهربائي بين اللوحَين.

ب. ما مقدار فرق الجهد الكهربائي بين النقطتَين A و B؟

ج. ما مقدار شدة المجال الكهربائي عند C و D؟

د. احسب القوة الكهربائية المؤثرة على شحنة كهربائية مقدارها (+5 μC) موضوعة عند النقطة C، وحدّد في أي اتجاه تؤثر القوة؟

(١٠) جُسيم ذو شحنة كهربائية مقدارها (+2 μC) وضع بين لوحَين متوازيَين مشحونَين تفصل بينهما مسافة (10 cm)، وفرق الجهد الكهربائي بينهما (5.0 kV). احسب شدة المجال الكهربائي بين اللوحَين، والقوة المؤثرة على الشحنة الكهربائية.

(١١) عادة نحن نتأثر بتسارع لا يزيد مقداره عن ($10\ m\ s^{-2}$)، على سبيل المثال عندما نسقط فإن التسارع يكون ($9.81\ m\ s^{-2}$) تقريبًا، وعندما تنعطف السيارة بحدة وبسرعة فإن تسارعها على الأغلب لا يتجاوز ($5\ m\ s^{-2}$)، أما في حالة الإلكترون في المجال الكهربائي فإن التسارع الذي يتحرك به أكبر بكثير من هذا. احسب تسارع الإلكترون في (أنبوبة تومسون) حيث تكون شدة المجال الكهربائي ($50000\ V\ cm^{-1}$).

(شحنة الإلكترون $e = -1.6 \times 10^{-19}\ C$، كتلة الإلكترون $m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ kg$).

(١٢) **أ.** استخدم مخططًا لشرح كيفية استخدام القوة الكهربائية المؤثرة على جُسيم مشحون لفصل حزمة من الإلكترونات (e^-)، والبوزيترونات (e^+) إلى حزمتَين منفصلتَين (البوزيترون هو جُسيم مشحون له كتلة جُسيم الإلكترون نفسها، ومقدار الشحنة نفسها لكنها موجبة. وغالبًا ما تنتج أزواج البوزيترونات - الإلكترونات من التصادمات في مسرّعات الجسيمات).

ب. اشرح كيف يمكن استخدام هذا التأثير لفصل الأيونات التي لها كتل مختلفة وشحنات مختلفة.

٤-٢ قانون كولوم والمجالات الشعاعية

ينتج أي جسم مشحون كهربائيًا مجالًا كهربائيًا في الحيّز من حوله، ويمكن أن يكون الجسم المشحون صغيرًا مثل إلكترون أو بروتون، أو كبيرًا بحجم كوكب أو نجم، فعندما نقول أنه ينتج مجالًا كهربائيًا يعني أنه سيؤثر بقوة على أي جسم مشحون آخر موجود في هذا المجال. كيف نحدد مقدار هذه القوة؟

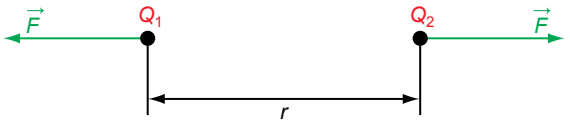
كان الفيزيائي الفرنسي تشارلز كولوم Charles Coulomb أول من اكتشف الإجابة عن هذا السؤال، لقد أدرك أنه من المهم التفكير في استخدام **الشحنة الكهربائية النقطية** point charge؛ وهذا يعني أن الشحنات الكهربائية تكون صغيرة جدًا بحيث يصبح شكلها غير مهم، واقترح كولوم في عام 1785م قانونًا يصف القوة التي يؤثر بها جُسيم مشحون على جُسيم مشحون آخر، وهذا القانون مشابه بشكل كبير لقانون الجاذبية لنيوتن.

ينصّ **قانون كولوم Coulomb's law** على أن أيّ شحنتَين نقطيتَين تؤثر إحداهما على الأخرى بقوة كهربائية تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب شحنتَيهما وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.

لنعتبر شحنتَين نقطيتَين (Q_1) و (Q_2) تفصلهما مسافة (r) (الشكل ٢-١٣)، القوة التي تؤثر بها كل شحنة كهربائية على الأخرى هي ($\vec{F}$)، ووفقًا لقانون نيوتن الثالث للحركة تتفاعل الشحنتان النقطيتان فيما بينهما، وبالتالي تؤثر إحداهما على الأخرى بقوة متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه.

مهمّ

قانون كولوم Coulomb's law:
تؤثر أي شحنتَين نقطيتَين إحداهما على الأخرى بقوة كهربائية تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب مقدار الشحنتين وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.



الشكل ٢-١٣ المتغيّرات المتضمنة في قانون كولوم.

وفقًا لقانون كولوم، يكون لدينا:

القوة ∝ حاصل ضرب مقدار الشحنتَين

$$\vec{F} \propto Q_1 Q_2$$

$$\text{القوة} \propto \frac{1}{\text{مربع المسافة}}$$

$$\vec{F} \propto \frac{1}{r^2}$$

وبالتالي وبدمج العلاقتين:

$$\vec{F} \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

ويمكننا كتابة ذلك بصيغة رياضية هكذا:

$$\vec{F} = \frac{kQ_1 Q_2}{r^2}$$

حيث k هو ثابت التناسب ويُطلق عليه ثابت كولوم.

وعادة ما يُكتب الثابت k على أنه:

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

حيث تُعرف (ε_0) باسم **السماحية الكهربائية للفراغ** Permittivity of free space (ε هو الحرف اليوناني إبسيلون). قيمة (ε_0) تساوي (8.85×10^{-12} F m^{-1}) تقريبًا (F هنا هو رمز وحدة الفاراد التي ستدرسها لاحقًا في الوحدة الرابعة).

وبالتالي يمكن كتابة معادلة قانون كولوم:

قانون كولوم

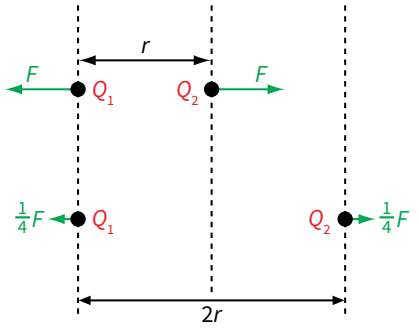
$$\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

حيث ($\vec{F}$) هي القوة بين الشحنتَين (Q_1) و (Q_2)، و (r) هي المسافة بين مركزَيهما. لاحظ أنه أحيانًا، يتم استخدام الرموز (Q) و (q) للتمييز بين كمّيتَي شحنتَين كهربائيتَين بدلًا من (Q_1) و (Q_2). استخدام كِلا المجموعتين يُعدّ مقبولًا.

بعد دراستك لقانون نيوتن للجاذبية ينبغي ألّا تتفاجأ بهذه العلاقة فهي مشابهة لها، وتعتمد القوة على الخصائص التي تنتجها (الشحنات في هذه الحالة)، وهي تتبع قانون التربيع العكسي مع المسافة، فإذا تباعدت الجُسيمات إلى ضعف المسافة، فإن القوة الكهربائية تقل إلى ربع قيمتها السابقة (الشكل ٢-١٤).

لاحظ أيضًا أنه إذا كان لدينا شحنة كهربائية موجبة وشحنة سالبة، فإن القوة ($\vec{F}$) تكون سالبة، ونحن نفسّر هذا كقوة تجاذب، بينما تكون القوة موجبة بين شحنتَين متشابهتَين؛ وهي بالتالي قوة تنافر، وتذكّر أنه لدينا في قانون الجاذبية لنيوتن قوة تجاذب فقط.

حتى الآن تحدثنا عن الشحنات النقطية، فلو فكرنا في الكرات منتظمة الشحنة الكهربائية فإننا نقيس المسافة من مركزَيهما؛ فهما تسلكان كما لو كانت جميع شحنتَيهما مستقرّة في المركز، ومن هنا يمكننا تطبيق معادلة قانون كولوم لكلتا الحالتين: للشحنتَين النقطيتَين (مثل البروتونات والإلكترونات وغيرها)، وكذلك للكرات منتظمة الشحنة الكهربائية، طالما أننا نستخدم المسافة من المركز إلى المركز بين الأجسام.



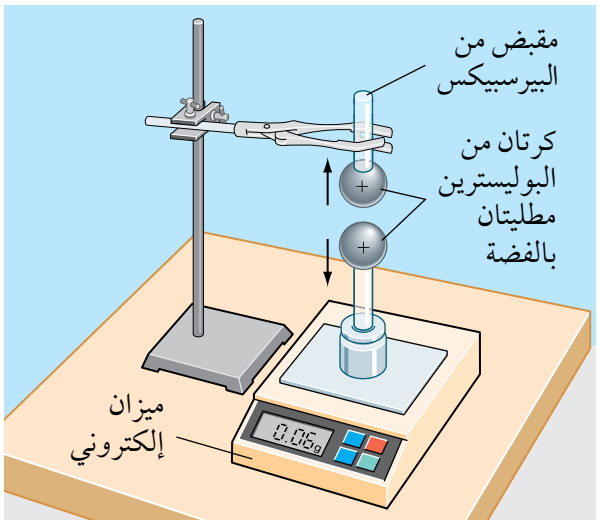
الشكل ٢-١٤ مضاعفة المسافة الفاصلة بين الشحنتين تقلّل القوة إلى الربع، وهذه نتيجة مباشرة لقانون كولوم.

مهارة عملية ٢-٢

استقصاء قانون كولوم

من الصعب جدًا استقصاء القوة بين الأجسام المشحونة؛ لأن الشحنة الكهربائية تميل إلى التسرّب بعيدًا في الهواء أو إلى الأرض في أثناء إجراء أي تجربة، كما أن كمية الشحنة الكهربائية التي يمكننا استقصاؤها من الصعب قياسها، وعادة ما تكون صغيرة، ما يؤدي إلى توليد قوى صغيرة.

يبيّن الشكل ٢-١٥ إحدى الطرائق لاستقصاء قانون التربيع العكسي لكرتَين فلزيتَين مشحونتَين بشحنتَين موجبتَين (كرتا بوليسترين مطليتان بطلاء موصل من الفضة). عند إنزال إحدى الكرتَين المشحونتَين إلى الأسفل باتجاه الأخرى، تقل المسافة الفاصلة بينهما؛ وبالتالي تزداد قوة التنافر بينهما، ما يؤدي إلى الازدياد في قراءة الميزان.



الشكل ٢-١٥ استقصاء قانون كولوم.

شدة المجال الكهربائي لمجال شعاعي

رأينا سابقًا في هذه الوحدة أن شدة المجال الكهربائي عند نقطة ما تُعرّف بأنها القوة لكل وحدة شحنة كهربائية والتي تؤثر على شحنة كهربائية موجبة موضوعة عند تلك النقطة حسب العلاقة $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$ ، وللحصول على شدة المجال بالقرب من شحنة كهربائية تجريبية نقطية (Q_1) (أو خارج كرة منتظمة الشحنة الكهربائية)، علينا أن نتخيل شحنة كهربائية صغيرة موجبة (Q_2) موضوعة لاختبار شدة المجال الكهربائي، وتحديد القوة لكل وحدة شحنة كهربائية مؤثرة عليها، يمكننا بعد ذلك استخدام المعادلة لتحديد شدة المجال الكهربائي لشحنة نقطية (أو كرة منتظمة الشحنة).

في الشكل ٢-١٦، تُعطى القوة بين شحنتَين نقطيتَين بواسطة:

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

شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) بسبب الشحنة الكهربائية (Q_1) عند مسافة (r) من مركزها هي:

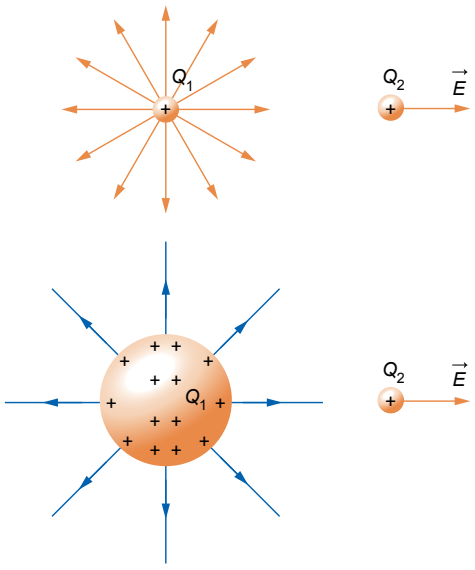
$$\text{شدة المجال الكهربائي} = \frac{\text{القوة}}{\text{شحنة الاختبار}}$$

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

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

شدة المجال الكهربائي:

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



الشكل ٢-١٦

حيث ($\vec{E}$) هي شدة المجال الكهربائي الناشيء عن الشحنة الكهربائية النقطية (Q)، و (r) هو بُعد النقطة عن الشحنة النقطية.

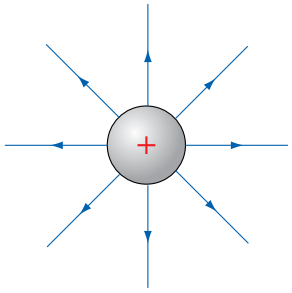
شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) ليست ثابتة، بل تتناقص كلما ازدادت المسافة (r)، كما إن شدة المجال الكهربائي تخضع لقانون التربيع العكسي مع المسافة تمامًا مثل شدة مجال الجاذبية لكتلة نقطية؛ ولذلك ستتناقص شدة المجال إلى الربع عندما تزيد المسافة عن المركز إلى الضعف.

لاحظ أيضًا أنه ونظرًا إلى أن القوة كميّة متجهة، فإن ذلك يعني أن شدة المجال الكهربائي هي كميّة متجهة أيضًا. أي نحتاج إلى تحديد اتجاه المجال الكهربائي مثلما نحتاج إلى تحديد مقداره تمامًا. يبيّن المثال ٣ كيفية استخدام معادلة شدة المجال بالقرب من كرة مشحونة.

أمثلة

٣. كرة فلزية موجبة الشحنة قطرها (12 cm) وشدة المجال الكهربائي على سطحها ($4.0 \times 10^5\ V\ m^{-1}$). ارسم خطوط المجال الكهربائي للكرة، واحسب مقدار الشحنة الكهربائية الكلية لسطح الكرة.

الخطوة ١: ارسم نمط خطوط المجال الكهربائي (الشكل ٢-١٧). يجب أن تكون خطوط المجال الكهربائي عمودية على السطح وشعاعية.



الشكل ٢-١٧ خطوط المجال الكهربائي حول جسم كروي مشحون.

تابع

الخطوة ١: احسب شدة المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة الموجبة.

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

$$\vec{E} = \frac{5.0 \times 10^{-9}}{(4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.025^2)}$$

$$= 7.2 \times 10^4 \text{ V m}^{-1}$$

الخطوة ٢: احسب شدة المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة السالبة.

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

$$\vec{E} = \frac{3.0 \times 10^{-9}}{(4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.075^2)}$$

$$= 4.8 \times 10^3 \text{ V m}^{-1}$$

الخطوة ٣: ضع في اعتبارك اتجاه كل من متجهي شدة المجالين الكهربائيين لتحدد الكمية المتجة المحصلة.

المجال الكهربائي من الشحنة الموجبة متجه إلى جهة اليمين للنقطة X.

المجال الكهربائي من الشحنة السالبة متجه أيضًا إلى جهة اليمين للنقطة X.

وبالتالي فإن متجهي شدة المجالين الكهربائيين يجب أن يُجمعا.

$$\vec{E}_R = 7.2 \times 10^4 + 4.8 \times 10^3 = 7.7 \times 10^4 \text{ V m}^{-1}$$

(إلى جهة اليمين).

الخطوة ٢: اكتب الكميّات المعطاة:

شدة المجال الكهربائي:

$$\vec{E} = 4.0 \times 10^5 \text{ V m}^{-1}$$

نصف القطر :

$$r = \frac{0.12}{2} = 0.060 \text{ m}$$

الخطوة ٣: استخدم معادلة شدة المجال الكهربائي وأعِد ترتيبها لتحديد شحنة السطح الكهربائية:

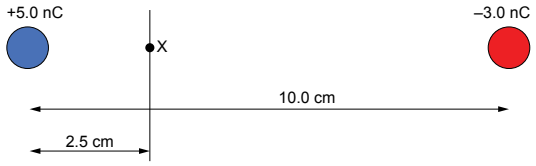
$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 r^2 \times E$$

$$= 4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.060)^2 \times 4.0 \times 10^5$$

$$= 1.6 \times 10^{-7} \text{ C} = 0.16 \text{ μC}$$

٤. كرتان تحملان شحنتين متعاكستين تفصل بين مركزيهما مسافة تساوي (10.0 cm) كما يظهر في الشكل ٢-١٨. احسب محصلة شدة المجال الكهربائي في نقطة X تقع على مسافة (2.5 cm) من مركز الكرة التي تحمل شحنة موجبة.



الشكل ٢-١٨ كرتان تحملان شحنتين متعاكستين تفصل بين مركزيهما مسافة (10.0 cm).

أسئلة

(١٣) كرة فلزية نصف قطرها (20 cm) تحمل شحنة كهربائية موجبة مقدارها (+2.0 μC).

أ. ما مقدار شدة المجال الكهربائي على مسافة (25 cm) من مركز الكرة؟

ب. وضعت كرة فلزية مماثلة لها تحمل شحنة كهربائية سالبة مقدارها (−1.0 μC) بجوار الكرة الأولى بحيث كانت بينهما فجوة مقدارها (10 cm). احسب القوة الكهربائية التي تؤثر بها كل كرة على الأخرى.

ج. احسب شدة المجال الكهربائي في منتصف المسافة على طول الخط الذي يصل بين مركزَي الكرتَين.

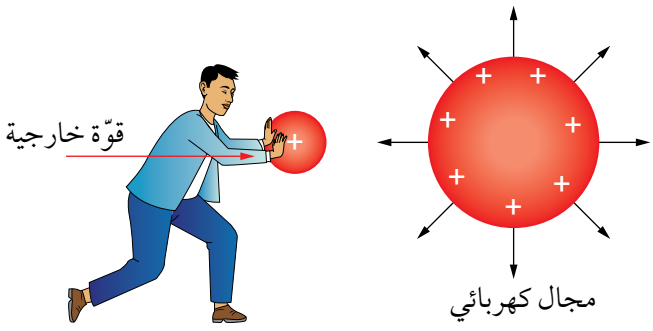
(١٤) ينتج مولّد فان دي جراف شرارات عندما تكون شدة المجال الكهربائي على سطحه ($4.0 \times 10^4 \text{ V cm}^{-1}$)، فإذا كان قطر الموصل الكروي للمولد (40 cm)، فما مقدار الشحنة الكهربائية على سطحه؟

٢-٥ الجهد وطاقة الوضع الكهربائية

عندما ناقشنا جهد الجاذبية في الوحدة الأولى بدأنا بفكرة طاقة الوضع، فالجهد عند نقطة ما هو طاقة الوضع لوحدة الكتلة عند تلك النقطة، وسنقترب من فكرة الجهد الكهربائي بالطريقة نفسها، وستشعر بالارتياح عندما ترى أنك ملمّ بعض الشيء بفكرة الجهد الكهربائي؛ بسبب معرفتك للجهد وفرق الجهد. في هذا الموضوع سنوضح فكرة الجهد الكهربائي، وسبب استخدام تعبير «فرق الجهد» في بعض الأحيان.

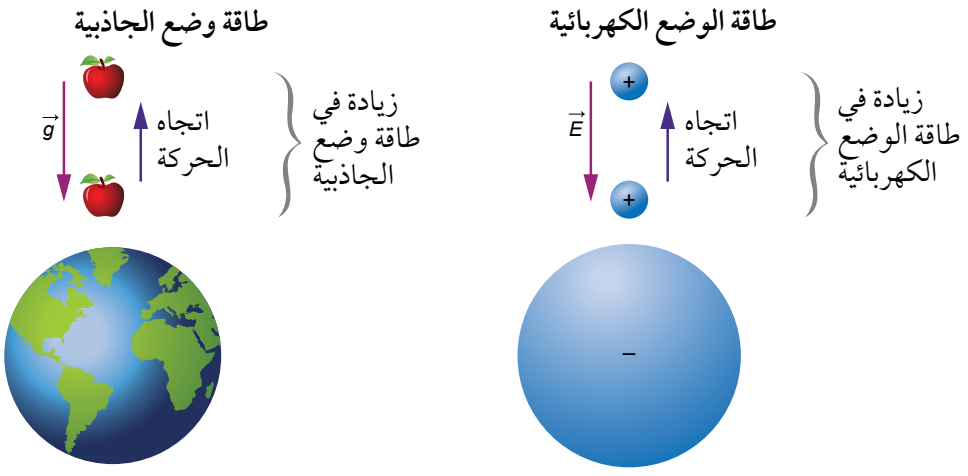
طاقة الوضع الكهربائية

عندما تتحرك شحنة كهربائية عبر مجال كهربائي فإن طاقة وضعها تتغيّر، تخيل معي هذا المثال: إذا أردت تقريب شحنة كهربائية موجبة من شحنة كهربائية موجبة أخرى فعليك دفعها (الشكل ٢-١٩)؛ وهذا ببساطة لأن هناك قوة تنافر بين الشحنتَين، وهذا يعني أنه يجب عليك بذل شغل من أجل تقريب شحنة كهربائية من شحنة كهربائية أخرى مماثلة، وعندما تبذل شغلاً، فإن الطاقة تنتقل منك إلى الشحنة الكهربائية التي تدفعها، ولذا فإن طاقة وضع الشحنة تزداد. أما إذا تركت الشحنة الكهربائية حرةً فستبتعد بسبب التنافر بين الشحنتَين وتقل طاقة وضعها.



الشكل ٢-١٩ يجب بذل شغل لدفع شحنة كهربائية موجبة نحو شحنة أخرى موجبة.

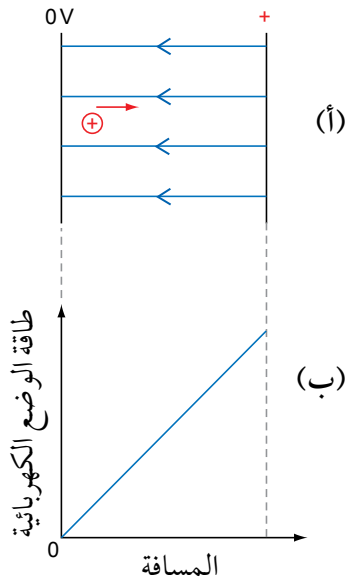
أما عند رفع كتلة عن سطح الأرض فإن الكتلة تكتسب طاقة وضع جاذبية في أثناء رفعها، وإذا تركتها فإنها تسقط نحو الأرض وبالتالي تقل طاقة وضعها (الشكل ٢-٢٠).



الشكل ٢-٢٠ طاقة الوضع الكهربائية وطاقة وضع الجاذبية.

تغيّرات الطاقة في المجال الكهربائي المنتظم

يمكننا أيضًا التفكير في تحريك شحنة كهربائية موجبة في مجال كهربائي منتظم بين لوحَين متوازيَين، فإذا أردنا تحريك الشحنة الكهربائية الموجبة نحو اللوح الموجب (الشكل ٢-٢١ أ) فعلينا بذل شغل، وبالتالي فإن طاقة الوضع للشحنة الكهربائية تتزايد، أمّا إذا تركناها في المجال فإنها ستتحرك نحو اللوح السالب فتتناقص طاقة وضعها.



الشكل ٢-٢١ تغيّرات طاقة الوضع الكهربائية في مجال كهربائي منتظم.

بما أن القوة متساوية عند جميع النقاط في المجال الكهربائي المنتظم فإنه يترتب على ذلك أن طاقة وضع الشحنة الكهربائية تزداد بانتظام في أثناء دفع الشحنة الكهربائية من اللوح السالب إلى اللوح الموجب، التمثيل البياني لطاقة الوضع الكهربائية مقابل المسافة هو خط مستقيم، كما هو مبيّن في الشكل ٢-٢١ (ب).

يمكننا بكل بساطة حساب التغيّر في طاقة الوضع الكهربائية لشحنة كهربائية ما (Q) عند نقلها من اللوح السالب إلى اللوح الموجب. ويُعرّف **فرق الجهد الكهربائي** Electric potential difference على أنه التغيّر في الطاقة (بالجول) لكل وحدة شحنة كهربائية (بالكولوم) عند نقلها بين نقطتَين (فولت واحد يعادل جول لكل كولوم)، ولهذا فإن الشغل المبذول لنقل شحنة كهربائية (Q) من اللوح السالب إلى اللوح الموجب يُعطى بالمعادلة:

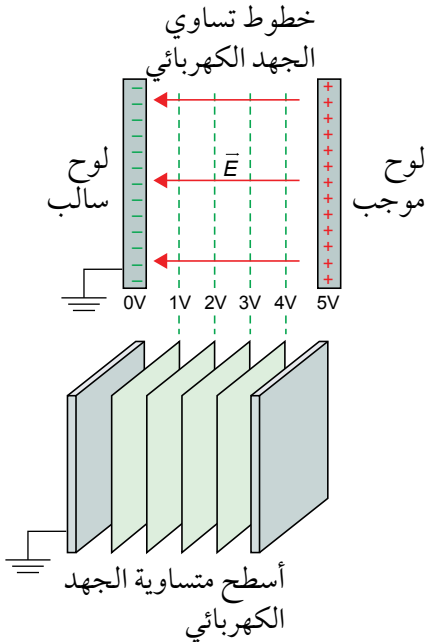
$$W = QV$$

يمكننا إعادة ترتيب المعادلة:

$$V = \frac{W}{Q}$$

وبهذه الطريقة يمكن أن يُعرّف الجهد الكهربائي (V) عند نقطة ما في المجال الكهربائي على أنه طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة كهربائية موجبة عند تلك النقطة، وبشكل مماثل لجهد الجاذبية نسمي هذا بالجهد الكهربائي عند نقطة ما. الآن يجب أن تكون قادرًا على رؤية أن ما نعتبره شائعًا لمصطلح الجهد يجب أن يشار إليه بشكل صحيح على أنه الجهد الكهربائي، والفرق في الجهد بين نقطتَين هو ما يُعرف بفرق الجهد الكهربائي بينهما.

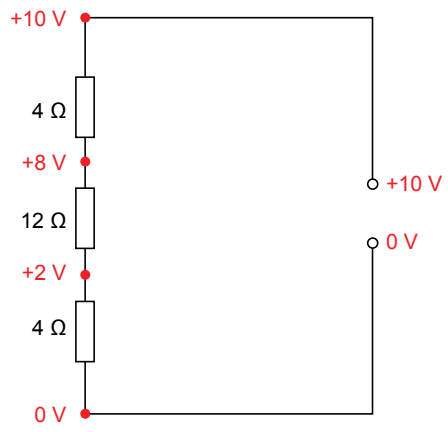
تمامًا كما هي الحال مع مجالات الجاذبية، يجب أن نحدد صفر الجهد (وهذه هي النقطة التي نعتبر أن الشحنة الكهربائية تكون لها طاقة وضع مساوية للصفر عندها). في المختبر عادة ما نعتبر أن الأرض تمتلك جهدًا كهربائيًا يساوي صفر فولت، فإذا رسمنا لوحَين متوازيَين مشحونَين وأحدهما مؤرض (متصل بالأرض) (الشكل ٢-٢٢)، يمكننا أن نرى هنا



الشكل ٢-٢٢ خطوط وأسطح تساوي الجهد الكهربائي في مجال كهربائي منتظم.

مدى تشابه الأمر مع فكرتنا عن مجالات الجاذبية. يبيّن الشكل أيضًا كيف يمكننا تضمين خطوط تساوي الجهد الكهربائي في تمثيل المجال الكهربائي (خط تساوي الجهد هو الخط الذي يمر بجميع النقاط التي يتساوى عندها الجهد الكهربائي).

يمكننا تقريب فكرة الجهد الكهربائي إلى قياس جهد كل نقطة في المجالات الكهربائية. وفي الشكل ٢-٢٣ يوفر مصدر الطاقة فرق جهد كهربائي مقداره (10 V). عُرضت في الشكل قيم الجهد الكهربائي في نقاط مختلفة. يمكنك أن ترى أن فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الوسطى (12 Ω) هو 6 V = (2 – 8) V.

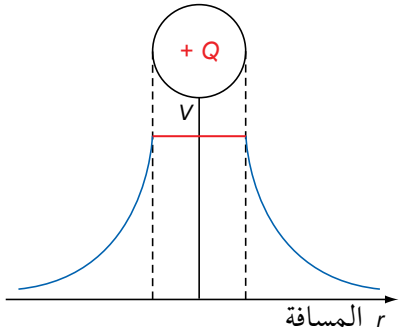


الشكل ٢-٢٣ التغيّرات في الجهد الكهربائي (المبيّنة باللون الأحمر) في دائرة كهربائية.

الطاقة في مجال كهربائي شعاعي

تخيل مرة أخرى دفع شحنة اختبار كهربائية صغيرة موجبة نحو شحنة كهربائية كبيرة موجبة، في البداية، تكون قوة التنافر ضعيفة، وما عليك سوى بذل قدر ضئيل من الشغل كلما اقتربت تزداد قوة التنافر (قانون كولوم)، وعليك عندئذٍ أن تبذل شغلًا إضافيًا أكبر نتيجة لذلك.

تزداد طاقة الوضع للشحنة الاختبارية طالما أنك تدفعها، وتزداد أكثر فأكثر كلما اقتربنا من الشحنة الكهربائية التي تتنافر معها، وهذا مبيّن في التمثيل البياني الوارد في الشكل ٢-٢٤؛ لأن الجهد الكهربائي (كما هو مبيّن على المحور الصادي) هو طاقة الوضع الكهربائية لوحدة شحنة كهربائية.



الشكل ٢-٢٤ تغيّر الجهد الكهربائي حسب قانون التربيع العكسي بالقرب من كرة كهربائية مشحونة.

يمكننا كتابة معادلة للجهد الكهربائي (V) عند مسافة (r) من شحنة كهربائية (Q):

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

الجهد الكهربائي في مجال كهربائي شعاعي الناشئ عن شحنة كهربائية نقطية.

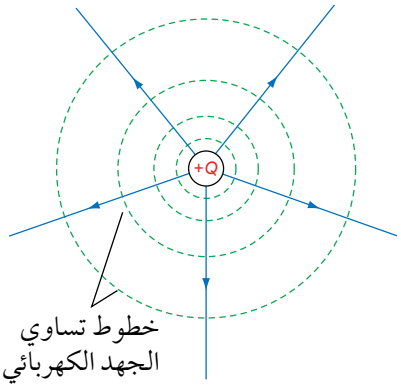
حيث (V) هو الجهد الكهربائي عند نقطة تقع على مسافة (r) من الشحنة الكهربائية (Q)، و (ε_0) هي السماحية الكهربائية للفراغ.

لعلك استطعت أن ترى مدى تشابه هذه العلاقة مع الصيغة المكافئة لجهد الجاذبية في مجال شعاعي:

$$\phi = -\frac{GM}{r}$$

لاحظ أننا لا نحتاج إلى الإشارة السالبة في معادلة الجهد الكهربائي؛ لأنها ضُمّنت في الشحنة الكهربائية، تعطي الشحنة الكهربائية السالبة مجالًا تجاذبيًا (سالبًا)، في حين تعطي الشحنة الكهربائية الموجبة مجالًا تنافريًا (موجبًا).

يمكننا إظهار هذه الأفكار نفسها بواسطة رسم خطوط المجال الكهربائي وخطوط تساوي الجهد الكهربائي، حيث تتقارب خطوط تساوي الجهد الكهربائي كلما اقتربنا من الشحنة الكهربائية (الشكل ٢-٢٥)، وللوصول إلى هذه النتيجة نعود إلى تعريف صفر الجهد الكهربائي مرة أخرى، فنقول أنّ الشحنة الكهربائية لها طاقة وضع تساوي صفرًا عندما تكون في اللانهاية (مكان ما بحيث يكون خارج نطاق تأثير أي شحنات أخرى)، إذا تحرّكنا نحو أو بعيدًا عن شحنة كهربائية موجبة يكون الجهد الكهربائي موجبًا، وإذا تحرّكنا نحو أو بعيدًا عن شحنة كهربائية سالبة فإن الجهد الكهربائي يكون سالبًا.



الشكل ٢-٢٥ المجال الكهربائي حول شحنة كهربائية موجبة. توضح الخطوط المتقطعة النقاط التي يتساوى عندها الجهد الكهربائي (خطوط متساوية الجهد)، ويوجد تغير ثابت في الجهد الكهربائي بين الخطوط حول الشحنة.

هذا الأمر يسمح لنا بإعطاء تعريف للجهد الكهربائي عند نقطة ما: **الجهد الكهربائي Electric potential** عند نقطة ما يساوي الشغل المبذول لكل وحدة شحنة كهربائية لنقل وحدة شحنة كهربائية موجبة من اللانهاية إلى تلك النقطة، والجهد الكهربائي كميّة عددية، ولكي تحسب الجهد الكهربائي الناتج عن أكثر من شحنة كهربائية نقطية عند نقطة ما، جِد كل جهد بمفرده ثم اجمع الجهود، وتذكّر أن الشحنات الكهربائية الموجبة تسبّب جهدًا كهربائيًا موجبًا والشحنات الكهربائية السالبة تسبّب جهدًا كهربائيًا سالبًا.

مصطلحات علمية

الجهد الكهربائي Electric potential: الجهد الكهربائي عند نقطة ما يساوي الشغل المبذول لكل وحدة شحنة كهربائية لنقل وحدة شحنة كهربائية موجبة من اللانهاية إلى تلك النقطة.

لقد عرّفنا طاقة الوضع الكهربائية بين نقطتَين A و B على أنه الشغل المبذول في تحريك شحنة كهربائية موجبة من النقطة A إلى النقطة B، وهذا يعني أن التغير في طاقة الوضع الكهربائية عند تحريك شحنة كهربائية نقطية (Q_1) من اللانهاية نحو شحنة كهربائية نقطية (Q_2) تساوي الجهد الكهربائي للشحنة (Q_2) عند تلك النقطة مضروبًا في (Q_1) وتُكتب بالرموز كالآتي:

$$W = VQ_1$$

الجهد الكهربائي (V) بالقرب من الشحنة الكهربائية (Q_2) هو:

$$V = \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

وبالتالي تكون طاقة الوضع الكهربائية لزوج الشحنات الكهربائية النقطية (W) (كما هو مبيّن E_p في المعادلة):

$$E_p = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

طاقة الوضع لزوج من الشحنات الكهربائية النقطية.

مثال

٥. يقترب جُسيم ألفا من نواة ذهب، ويستقر للحظة على مسافة (4.5×10^{-14} m) من نواة الذهب. احسب طاقة الوضع الكهربائية للجُسيمَين في تلك اللحظة.

(الشحنة الكهربائية لجسيم ألفا = $2e$؛ الشحنة الكهربائية لنواة الذهب = $79e$).

الخطوة ١: احسب الشحنة الكهربائية بوحدة الكولوم.

الشحنة الكهربائية لجُسيم ألفا:

$$Q_1 = 2 \times 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$$

الشحنة الكهربائية لنواة الذهب:

$$Q_2 = 79 \times 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$$

الخطوة ٢: $E_p = \dfrac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$

$$E_p = \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 79 \times 1.6 \times 10^{-19}}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 4.5 \times 10^{-14}}$$

$$= 8.1 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

فرق الجهد الكهربائي في مجال شعاعي

لقد رأينا بالفعل أن الجهد الكهربائي (V) عند المسافة (r) من شحنة كهربائية نقطية (Q) يُعطى بالمعادلة:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

يُعطى فرق الجهد الكهربائي بين نقطتَين إحداهما تقع على مسافة (r_1) من الشحنة الكهربائية (Q) والثانية على مسافة (r_2) منها بالمعادلة:

$$\Delta V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_2} - \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_1}$$

$$\Delta V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$$

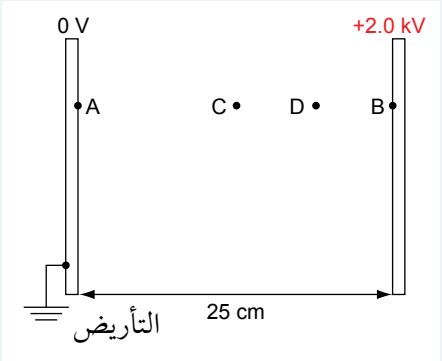
فرق الجهد بين نقطتَين بالقرب من شحنة كهربائية (Q).

لاحظ التشابه بين هذه الصيغة وصيغة فرق جهد الجاذبية بين نقطتَين بالقرب من كتلة نقطية.

أسئلة

(١٥) أ. ما مقدار طاقة الوضع الكهربائية لشحنة مقدارها (+1 C) موضوعة في كل من النقاط A و B و C و D بين لوحَين متوازيَين مشحونَين كما هو مبيّن في الشكل ٢-٢٦؟ C تقع في منتصف المسافة بين (A و B)، و D تقع في منتصف المسافة بين (C و B).

ب. ما مقدار طاقة الوضع الكهربائية لشحنة مقدارها (+2 C) موضوعة في كل من هذه النقاط؟



الشكل ٢-٢٦ مجال كهربائي منتظم.

(١٦) لمولّد فان دي جراف قبّة كروية نصف قطرها (10 cm)، وتُشحن القبة بجهد كهربائي يصل إلى (100 kV). ما كمية الشحنة الكهربائية المخزّنة على سطح القبّة؟ ما الجهد الكهربائي على مسافة (10 cm) من القبّة؟

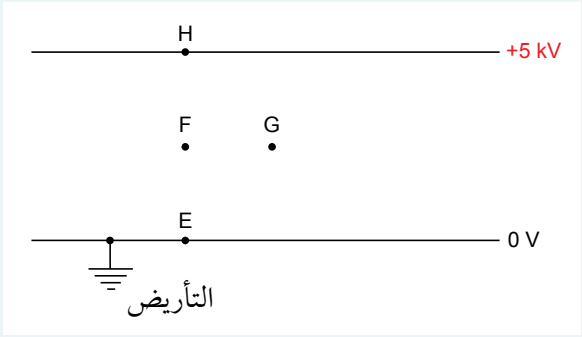
(١٧) يتولّد مجال كهربائي منتظم بين لوحَين متوازيَين مع فرق جهد كهربائي بينهما يساوي (5 kV) كما في الشكل ٢-٢٧. تقع النقطتان E و H على اللوحَين، وتقع النقطتان F و G على مسافة متساوية بين اللوحَين في المنتصف.

أ. ما مقدار الشغل المبذول في تحريك شحنة كهربائية مقدارها (+1 C) على طول المسارات الآتية المبيّنة في الشكل: من E إلى H، ومن E إلى F، ومن F إلى G، ومن H إلى E؟

ب. كيف تختلف إجاباتك إذا كانت:

١. الشحنة الكهربائية مقدارها (−1 C)؟

٢. الشحنة الكهربائية مقدارها (+2 C)؟



الشكل ٢-٢٧ مجال كهربائي منتظم بين لوحين متوازيين.

ملخّص

المجال الكهربائي هو المنطقة المحيطة بالأجسام المشحونة والتي تتأثر فيها الشحنات الأخرى بقوة تجاذب أو تنافر، ويمكن تمثيله بخطوط المجال الكهربائي.

شدة المجال الكهربائي هي القوة لكل وحدة شحنة كهربائية موجبة والتي تؤثر على شحنة كهربائية موجبة ثابتة عند نقطة ما في المجال:

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

تكون القوة المؤثرة على شحنة كهربائية في المجال المنتظم (على سبيل المثال بين لوحَين متوازيَين مشحونَين) متساوية عند جميع النقاط؛ وتُعطى شدة المجال بواسطة:

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta d}$$

الشحنة الكهربائية التي تدخل منطقة المجال الكهربائي المنتظم بشكل عمودي تتبع مسار قطع مكافئ.

ينصّ قانون كولوم على أن أي شحنتَين كهربائيتَين نقطيّتَين تؤثر إحداهما على الأخرى بقوة كهربائية تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب شحنتَيهما، وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.

معادلة قانون كولوم هي:

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

ينتج عن الشحنة الكهربائية النقطية (Q) مجال شعاعي، وتُعطى شدة مجالها الكهربائي بالمعادلة:

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

يُعرّف الجهد الكهربائي عند نقطة ما بأنه الشغل المبذول لكل وحدة شحنة كهربائية موجبة في نقل الشحنة الكهربائية من اللانهاية إلى تلك النقطة. يُعطى الجهد الكهربائي بالنسبة إلى شحنة نقطية من خلال المعادلة:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

طاقة الوضع الكهربائية لشحنتَين نقطيّتَين تساوي:

$$E_p = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

يعطى فرق الجهد الكهربائي لشحنة كهربائية بين نقطتين من خلال المعادلة:

$$\Delta V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$$

أسئلة نهاية الوحدة

١ وضِع زوج من الألواح المشحونة المتوازية بشكل أفقي تفصل بينهما مسافة، اللوح العلوي يحمل شحنة كهربائية سالبة واللوح السفلي مؤرض، ويدخل إلكترون في الحيز بين اللوحَين بزاوية قائمة على المجال الكهربائي.

ما اتجاه المجال الكهربائي بين اللوحَين؟ وفي أيِّ اتجاه تكون القوة المؤثرة على الإلكترون؟

	اتجاه المجال الكهربائي	اتجاه القوة المؤثرة على الإلكترون
أ	إلى الأسفل نحو اللوح السفلي	إلى الأسفل نحو اللوح السفلي
ب	إلى الأسفل نحو اللوح السفلي	إلى الأعلى نحو اللوح العلوي
ج	إلى الأعلى نحو اللوح العلوي	إلى الأسفل نحو اللوح السفلي
د	إلى الأعلى نحو اللوح العلوي	إلى الأعلى نحو اللوح العلوي

الجدول ٢-١

٢ زوج من الألواح المتوازية المشحونة تفصلهما مسافة (2.0 cm) وبينهما فرق جهد كهربائي مقداره (5.0 kV)، وبسبب المجال الكهربائي يتأثر أيون مشحون بين اللوحَين بقوة مقدارها (1.2×10^{-13} N).

ما مقدار الشحنة الكهربائية للأيون؟

أ. 1.6×10^{-19} C

ب. 4.8×10^{-19} C

ج. 2.5×10^{-15} C

د. 4.0×10^{-6} C

٣ يبيّن الشكل ٢-٢ الأدوات المستخدمة لاستقصاء المجال بين زوج من الألواح المتوازية المشحونة.

أ. اشرح سبب انحراف شريحة الذهب بالطريقة المبيّنة في الشكل.

ب. اذكر مع الشرح ما يمكن ملاحظته في حالة ملامسة شريحة الذهب اللوح السالب لحظيًا.

٤ يتعرّض جُسيم غبار مشحون في مجال كهربائي لقوة مقدارها (4.4×10^{-13} N). إذا علمت أن الشحنة الكهربائية للجسيم (8.8×10^{-17} C) فاحسب شدة المجال الكهربائي.

٥ احسب فرق الجهد الكهربائي الذي يجب تطبيقه بين لوحَين متوازيَين، تفصل بينهما مسافة مقدارها (4 cm)، لتوليد مجال كهربائي شدّته ($4000\ \text{V m}^{-1}$).

٦ يُطبق فرق جهد كهربائي مقداره (2.4 kV) بين لوحَين متوازيَين لتوليد مجال كهربائي منتظم شدته ($3.0 \times 10^{4}\ \text{V m}^{-1}$).

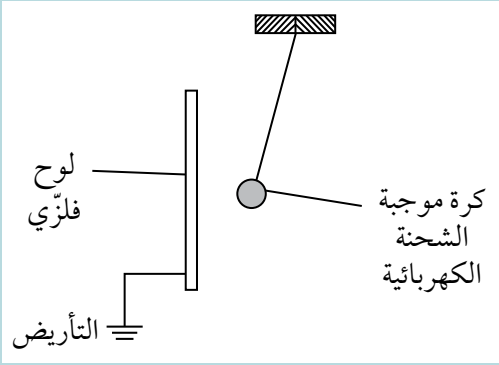
أ. احسب المسافة الفاصلة بين اللوحَين.

تابع

ب. حُرّك اللوحان بحيث أصبحت المسافة بينهما (2.0 cm). احسب شدة المجال الكهربائي الناتج في هذه الحالة.

٧ وُصِّل مصدر جهد كهربائي متغيّر عبر زوج من الألواح المتوازية، ثم ضوعف فرق الجهد الكهربائي بين اللوحَين وقُلّلت المسافة بينهما إلى ثلث ما كانت عليه أصلًا. اذكر التغير الذي سيحدث لشدة المجال الكهربائي، واشرح أسباب ذلك.

٨ يبيّن الشكل ٢-٢٨ كرة موجبة الشحنة الكهربائية معلّقة بخيط عازل بالقرب من لوح فلزي مؤرض (متصل بالأرض).



الشكل ٢-٢٨

أ. انسخ الشكل وارسم خمسة خطوط لإظهار المجال الكهربائي بالقرب من اللوح والكرة.

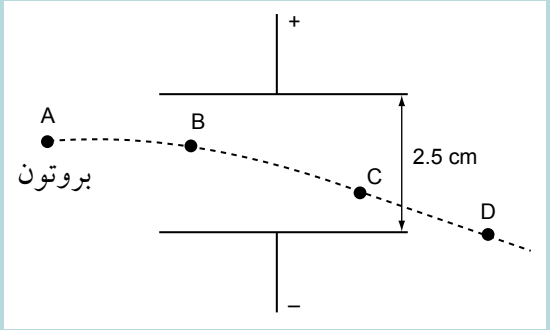
ب. اشرح سبب انجذاب الكرة نحو اللوح الفلزي.

ج. اُستُبدلت الكرة بكرة مماثلة سالبة الشحنة الكهربائية.

١. اشرح ما يمكن ملاحظته عندما تُقرّب الكرة من اللوح الفلزي المؤرض.

٢. صِف أي تغيّرات قد تحدث في المجال الكهربائي.

٩ يبيّن الشكل ٢-٢٩ «بروتون» وهو يتحرك بين لوحَين متوازيَين مشحونَين. مقدار شحنة البروتون $(+1.6 \times 10^{-19}\ C)$.



الشكل ٢-٢٩

أ. انسخ الشكل وارسم خطوط المجال الكهربائي بين اللوحَين المتوازيَين.

تابع

ب. القوة المؤثرة على البروتون عندما يكون في الموضع B تساوي (6.4×10^{-14} N).

١. بأيِّ اتجاه تؤثر القوة على البروتون عندما يكون في الموضع B؟

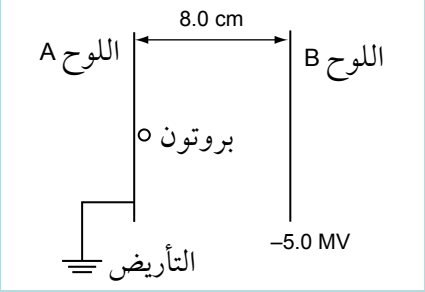
٢. ما مقدار القوة المؤثرة على البروتون عندما يكون في الموضع C؟

ج. احسب شدة المجال الكهربائي بين اللوحَين.

د. احسب فرق الجهد الكهربائي بين اللوحَين.

١٠ **أ.** عرّف المقصود بشدة المجال الكهربائي عند نقطة ما.

ب. في مسرع الجسيمات يكون البروتون في البداية في حالة سكون، ثم يُسرّع بين لوحَين فلزيَّين، كما هو مبيّن في الشكل ٢-٣٠.



الشكل ٢-٣٠

١. احسب القوة المؤثرة على البروتون بسبب المجال الكهربائي.

٢. احسب الشغل المبذول على البروتون بواسطة المجال الكهربائي عندما ينتقل من اللوح A إلى اللوح B.

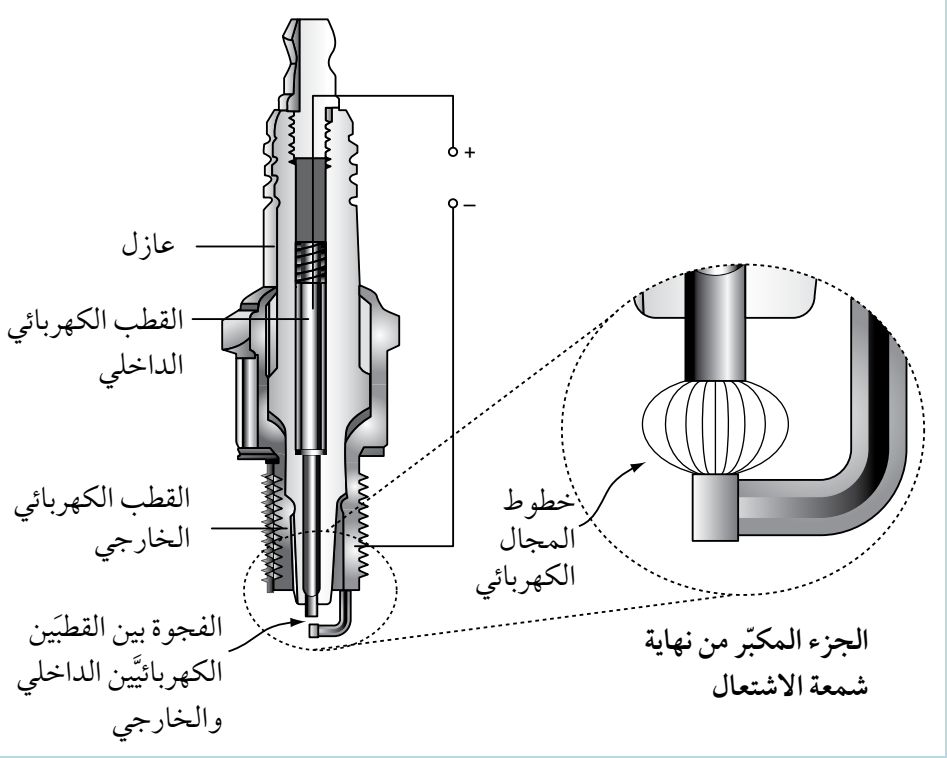
٣. ما مقدار الطاقة التي يكتسبها البروتون؟

٤. بافتراض أن كل هذه الطاقة التي اكتسبها البروتون تحوّلت إلى طاقة حركة، احسب سرعة البروتون عندما يصل إلى اللوح B.

(شحنة البروتون = $+1.6 \times 10^{-19}$ C؛ كتلة البروتون = 1.7×10^{-27} kg).

تابع

١١ يبيّن الشكل ٢-٣١ تركيب شمعة الاشتعال في محرك الاحتراق الداخلي. يُظهر الجزء المكبّر نهاية شمعة الاشتعال، مع بعض خطوط القوة التي تمثل المجال الكهربائي.



الشكل ٢-٣١

أ. انسخ خطوط المجال الكهربائي من الشكل، وارسم أسهمًا لإظهار اتجاه المجال الكهربائي.

ب. ما الدليل الذي يقدمه الشكل على أن المجال الكهربائي يكون أقوى بالقرب من طرف القطب الداخلي؟

ج. الفجوة بين القطبَين الكهربائيَّين الداخلي والخارجي (1.25 mm) وشدة المجال الكهربائي المطلوب للانهيار الكهربائي تساوي (5.0×10^6 N C^{-1}). قدّر أدنى فرق جهد كهربائي يجب تطبيقه عبر القطبَين الكهربائيَّين الداخلي والخارجي لإنتاج شرارة (يمكنك معاملة القطبَين كزوج من الألواح المتوازية).

د. عندما يسرّع إلكترون من خلال فرق في الجهد الكهربائي مقداره نحو (20 V)، فسيكون لديه طاقة كافية لتأيين ذرة نيتروجين. بيّن أن الإلكترون يجب أن يتحرك مسافة (4.0 μm) لاكتساب هذه الطاقة.

تابع

١٢ كيف يتغيّر الجهد الكهربائي (V) مع المسافة (r) عن الشحنة الكهربائية النقطية؟

أ. $V \propto r$

ب. $V \propto r^2$

ج. $V \propto r^{-1}$

د. $V \propto r^{-2}$

١٣ شدة المجال الكهربائي على بُعد (20 cm) من شحنة كهربائية نقطية معزولة يساوي ($1.9 \times 10^4\ N\ C^{-1}$). ما شدة المجال الكهربائي على بُعد (30 cm) من هذه الشحنة الكهربائية؟

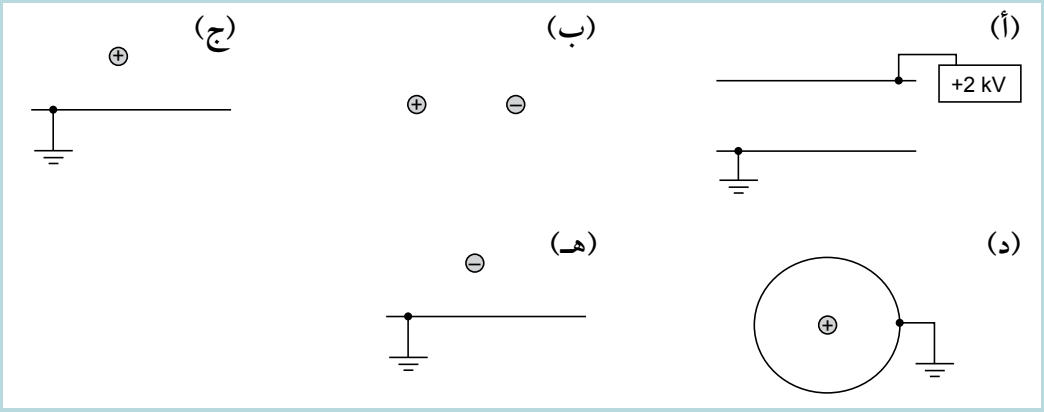
أ. $8.4 \times 10^3\ N\ C^{-1}$

ب. $1.3 \times 10^4\ N\ C^{-1}$

ج. $2.9 \times 10^4\ N\ C^{-1}$

د. $4.3 \times 10^4\ N\ C^{-1}$

١٤ ارسم على نسخة من الشكل ٢-٣٢ المجالات الكهربائية بين الأجسام المشحونة في الحالات (أ، ب، ج، د، هـ).



الشكل ٢-٣٢

١٥ لوحان متوازيان تفصلهما مسافة (4 cm) ويوجد فرق جهد كهربائي بينهما مقداره (2.5 kV).

أ. احسب شدة المجال الكهربائي بين اللوحَين.

ب. يتحرك جُسيم من الغبار يحمل شحنة كهربائية مقدارها (+2.4 nC) في الحيز بين اللوحَين. احسب:

١. القوة المؤثرة على جُسيم الغبار.

٢. تسارع الجُسيم نحو اللوح السالب إذا كانت كتلة جُسيم الغبار تساوي (4.2 mg).

١٦ كرة صغيرة تحمل شحنة كهربائية مقدارها ($2.4 \times 10^{-9}\ C$). احسب شدة المجال الكهربائي على مسافة:

أ. (2 cm) من مركز الكرة.

ب. (4 cm) من مركز الكرة.

تابع

١٧ كرة موصلة قطرها (6.0 cm) مثبّتة على قاعدة عازلة، وتتصل الكرة بمصدر جهد كهربائي مقداره (20 kV). احسب:

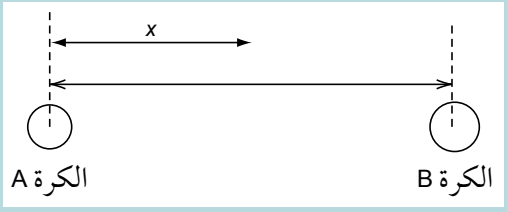
أ. مقدار الشحنة الكهربائية على سطح الكرة.

ب. شدة المجال الكهربائي على سطح الكرة.

١٨ تحمل نواة ذرة الهيدروجين شحنة كهربائية مقدارها ($+1.60 \times 10^{-19}$ C)، ويقع إلكترونها على مسافة (1.05×10^{-10} m) من النواة. احسب جهد التأيّن للهيدروجين.

(تلميح: جهد التأين يساوي الشغل لوحدة الشحنة اللازم لنقل الإلكترون إلى اللانهاية).

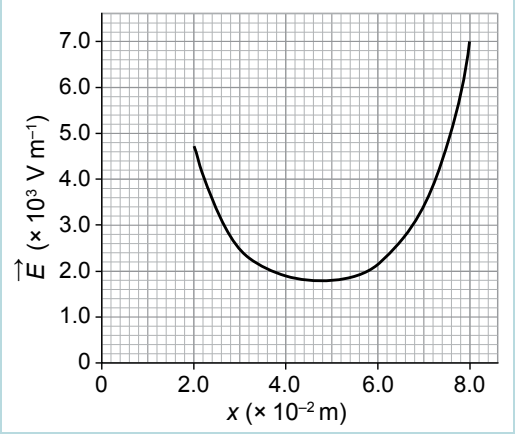
١٩ **أ.** وُضعت كرتان موصلتان مشحونتان، نصف قطر كل منهما (1.0 cm) بحيث يتباعد مركزاهما (10 cm)، كما هو مبيّن في الشكل ٢-٣٣.



الشكل ٢-٣٣

تحمل الكرة A شحنة كهربائية مقدارها ($+2.0 \times 10^{-9}$ C).

يبيّن التمثيل البياني (الشكل ٢-٣٤) كيف تتغيّر شدة المجال الكهربائي بين الكرتَين مع المسافة (x).



الشكل ٢-٣٤

١. حدّد شدة المجال الكهربائي الناتجة عن الكرة A والتي تبعد مسافة (5.0 cm) من مركزها.

٢. استخدم إجابتك من الجزئية (١) لحساب مقدار الشحنة الكهربائية على الكرة B.

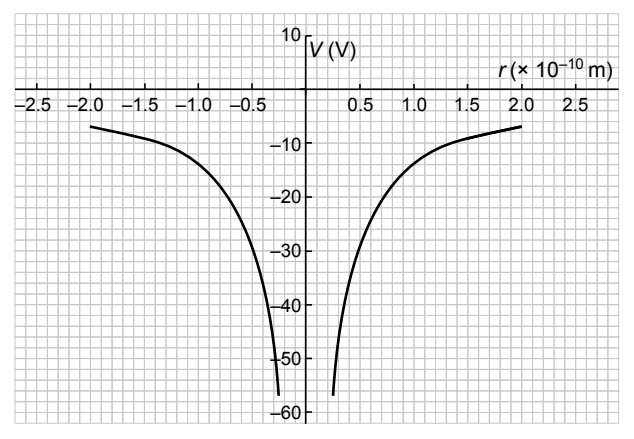
ب. ١. إذا أُزيلت الكرة B فاحسب الجهد الكهربائي على سطح الكرة A.

٢. اقترح كيف ستقارن الجهد الكهربائي على سطح الكرة A قبل إزالة الكرة B وبعد إزالتها واشرح ذلك.

تابع

٢٠ **أ.** عرّف الجهد الكهربائي عند نقطة ما.

ب. يبيّن التمثيل البياني في الشكل ٢-٣٥ الجهد الكهربائي بالقرب من البروتون المضاد (جسيم المادة المضادة للبروتون لديه الكتلة نفسها لكن نوع شحنة معاكسة).

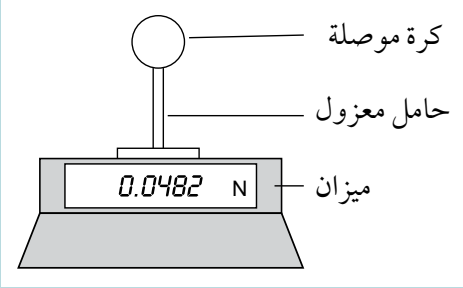


الشكل ٢-٣٥

١. جِد الجهد الكهربائي على مسافة (0.53×10^{-10} m) من البروتون المضاد.

٢. جِد طاقة الوضع الكهربائية التي يمتلكها البوزيترون (جُسيم المادة المضادة للإلكترون) عند هذه المسافة.

٢١ يبيّن الشكل ٢-٣٦ كرة نصف قطرها (0.80 cm) تحمل شحنة كهربائية مقدارها ($+6.0 \times 10^{-8}$ C)، وهي في حالة سكون على ميزان.



الشكل ٢-٣٦

أ. احسب شدة المجال الكهربائي على سطح الكرة.

ب. كرة مماثلة تحمل شحنة كهربائية مقدارها (-4.5×10^{-8} C) ثُبتت بحيث يكون مركزها على مسافة (5.0 cm) رأسيًا فوق مركز الكرة الأولى.

١. احسب القوة الكهربائية بين الكرتَين.

٢. احسب القراءة الجديدة للميزان.

ج. تحركت الكرة الثانية رأسيًا نحو الأسفل مسافة مقدارها (1.5 cm). احسب الشغل المبذول في تحريك الكرة عكس اتجاه المجال الكهربائي.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم أن المجال الكهربائي هو مجال قوة.	٢-١			
أُعرّف شدة المجال الكهربائي كقوة لكل وحدة شحنة كهربائية موجبة.	٢-٢			
أُمثل المجال الكهربائي بواسطة خطوط المجال.	٢-٢			
أفهم أن المجال الكهربائي بين الألواح المتوازية والمشحونة منتظم.	٢-٢			
أستخدم المعادلة: $E = -\frac{\Delta V}{\Delta d}$.	٢-٢			
أصف المسارات التي تسلكها الجُسيمات المشحونة وهي تمر عبر مجال كهربائي منتظم.	٢-٣			
أتذكّر نص قانون كولوم، وأستخدم المعادلة $F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$.	٢-٤			
أفهم أن شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) تُعرّف بأنها القوة الكهربائية لكل وحدة كولوم.	٢-٤			
أستنتج من قانون كولوم معادلة شدة المجال الكهربائي: $E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$.	٢-٤			
أعرّف الجهد الكهربائي عند نقطة ما (V) على أنه الشغل المبذول في نقل وحدة شحنة من اللانهاية إلى تلك النقطة.	٢-٥			
أعرف أن الجهد الكهربائي عند اللانهاية يساوي صفرًا.	٢-٥			
أعرف أن الجهد الكهربائي يزداد كلما اقتربت من جسم موجب الشحنة.	٢-٥			
أعرف أن الجهد الكهربائي يتناقص كلما اقتربت من جسم سالب الشحنة.	٢-٥			
أستخدم معادلة الجهد الكهربائي: $V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$.	٢-٥			
أستخدم المعادلة: $\Delta V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$.	٢-٥			
أفهم أن طاقة الوضع الكهربائية لشحنتَين نقطيتين تساوي: $E_p = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$.	٢-٥			

الوحدة الثالثة

الدوائر الكهربائية

Electrical Circuits

أهداف التعلّم

٣-١ يذكر أن التيار الكهربائي هو تدفق لحاملات شحنة كهربائية مكمّمة.

٣-٢ يستخدم المعادلتَين: $Q = It$ و $I = Anvq$ المتعلقتَين بموصل حامل لتيار كهربائي.

٣-٣ يعرّف فرق الجهد الكهربائي عبر أي مكوِّن على أنه الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة ويستخدم المعادلة: $V = \frac{W}{Q}$.

٣-٤ يستخدم المعادلة: $R = \frac{\rho L}{A}$.

٣-٥ يذكر القانون الأول لكيرشوف ويشرح أنه نتيجة لقانون حفظ الشحنة الكهربائية.

٣-٦ يذكر القانون الثاني لكيرشوف ويشرح أنه نتيجة لقانون حفظ الطاقة.

٣-٧ يستخدم قانونَي كيرشوف لحل مسائل الدائرة الكهربائية.

٣-٨ يصف تأثيرات المقاومة الداخلية لمصدر قوة دافعة كهربائية على فرق الجهد الكهربائي بين طرفيه.

٣-٩ يصف مبدأ عمل دائرة مجزئ الجهد ويستخدمه.

٣-١٠ يذكر مبدأ عمل مقياس الجهد كوسيلة لمقارنة فروق الجهد ويستخدمه.

٣-١١ يصف استخدام الجلفانوميتر بالطرق الصفرية (انعدام شدة التيار).

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- اكتب ما تعرفه عن المصطلحات: التيار الكهربائي، والشحنة الكهربائية، وفرق الجهد الكهربائي، والقوة الدافعة الكهربائية، والمقاومة.
- اكتب ما تعرف من معادلات تتعلق بالكهرباء.
- هل يمكنك توصيل دائرة كهربائية بسيطة لقياس شدة التيار الكهربائي المار في مصباح، وفرق الجهد الكهربائي بين طرفَيه؟ ارسم مخططًا للدائرة الكهربائية وتبادله مع زميل لك للتحقّق من صحته.

العلوم ضمن سياقها

أصبحت الدوائر الكهربائية بمرور السنين تزداد تعقيدًا، وتجمع عددًا كبيرًا من المكونات لتحقيق نتائج في غاية الدقة، وعادة تتضمن هذه الدوائر مصادر طاقة، ومستشعرات ومجزئات جهد وغيرها (الصورة ٣-١).

في الماضي كان مصمّمو الدوائر يبدأون بدائرة بسيطة ثم يقومون بعد ذلك بتعديلها تدريجيًا حتى تتحقق النتيجة المرجوة، لكن الآن يستحيل القيام بذلك؛ حيث تحتوي الدوائر على مئات أو آلاف المكوّنات، لذلك يعتمد مهندسو الإلكترونيات الآن على برامج التصميم المحوسبة والتي يمكنها تحديد تأثير أي تجميع من المكوّنات (الصورة ٣-٢).

الصورة ٣-١ دائرة إلكترونية معقّدة تسمّى اللوحة الأم تتحكّم في محرك الأقراص الصلبة في جهاز الحاسوب.

تابع

وهذا ممكن لأن أجهزة الحاسوب يمكن أن تكون مبرمجة بالمعادلات التي تصف سلوك التيار الكهربائي وفرق الجهد الكهربائي في دائرة ما.

تأسست هذه المعادلات – التي تتضمن قانون أوم، وقانونَي كيرشوف – في القرن الثامن عشر، ولكنها ظهرت في القرن الحادي والعشرين من خلال استخدامها في أنظمة التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD).

فكّر في مجالات الصناعة الأخرى، وكيف غيرّت أجهزة الحاسوب الممارسات الصناعية في الـ 30 سنة الأخيرة؟

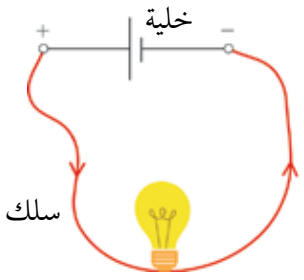
الصورة ٣-٢ يستخدم مهندس الحاسوب برمجة معيّنة للتصميم بمساعدة الحاسوب (CAD)، من أجل تصميم دائرة تشكل جزءًا من معالج دقيق يُعدّ بمثابة قلب كل حاسوب.

٣-١ التيار الكهربائي

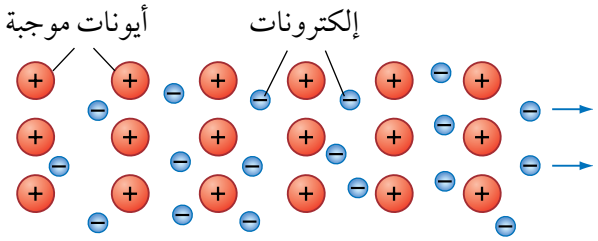
سبق أن نفّذت العديد من الأنشطة العملية التي تتضمن استخدام تيار كهربائي، على سبيل المثال إذا قمت بتوصيل مصباح بخلية كما في الشكل ٣-١، فسيمرّ تيار كهربائي في المصباح. أنت تستخدم التيار الكهربائي في كل يوم عند تشغيل المصابيح في المنزل أو تشغيل الحاسوب أو غير ذلك.

يكون اتجاه التيار الكهربائي في الدائرة الواردة في الشكل ٣-١ من الطرف الموجب للخلية عبر الدائرة إلى الطرف السالب وهذا متفق عليه علميًا، ويشار إلى هذا التيار على أنه **تيار اصطلاحي**، لكن ما الذي يحدث داخل السلك؟

يُصنع السلك من فلز، ويوجد داخل الفلز إلكترونات سالبة الشحنة يمكنها التحرّك بحرّية تُسمّى إلكترونات **التوصيل** أو **إلكترونات حرّة**؛ لأنها تسمح للفلز بتوصيل التيار الكهربائي، وتكون ذرات الفلز مرتبطة ببعضها بإحكام؛ وعادة ما تشكّل مصفوفة منتظمة، كما هو مبيّن في الشكل ٣-٢، ففي فلز مثل النحاس أو الفضة، يتحرّر إلكترون واحد أو أكثر من كل ذرّة ليصبح إلكترون توصيل، وتصبح الذرّة أيونًا موجب الشحنة، ونظرًا إلى وجود عدد متساوٍ من الإلكترونات الحرّة (السالبة) والأيونات (الموجبة) فإن الفلز ليس له شحنة أي إنه متعادل كهربائيًا.



الشكل ٣-١ يمرّ تيار في المصباح عند توصيله بخلية.

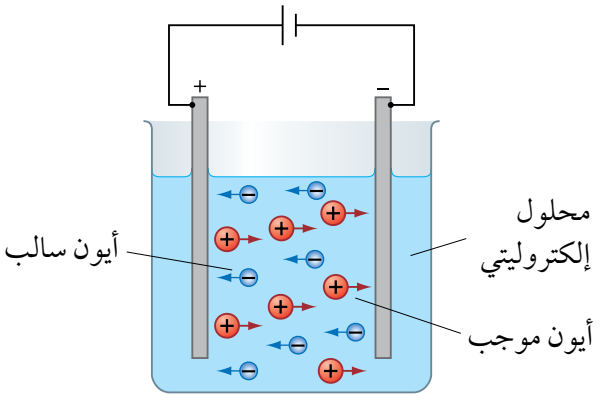


الشكل ٣-٢ تكون إلكترونات التوصيل في الفلز حرّة في تحرّكها بين الأيونات الموجبة الثابتة. تؤدي الخلية الموصلة عبر طرفَي الفلز إلى انجراف الإلكترونات الحرة نحو طرفها الموجب.

عندما تتصل الخلية بالسلك فإنها تؤثر بقوة كهربائية على إلكترونات التوصيل فتجعلها تتحرك على طول السلك، وبما أن الإلكترونات سالبة الشحنة فإنها تتدفق مبتعدة عن الطرف السالب للخلية وتتجه نحو الطرف الموجب، أي أنها تتحرك عكس اتجاه التيار الاصطلاحي، وقد يبدو هذا غريبًا بعض الشيء؛ ولكن يجب أن تعرف أن الاتجاه الاصطلاحي اِختير قبل وقت طويل من وجود أيّ فكرة عمّا كان يجري داخل السلك الفلزي الذي يحمل تيارًا كهربائيًا.

حاملات الشحنة الكهربائية

يكون التيار الكهربائي أحيانًا عبارة عن تدفق لشحنات موجبة كحزمة من البروتونات تنتج في مسرّع الجسيمات ويكون اتجاه التيار الكهربائي في هذه الحالة باتجاه حركة الجسيمات نفسها، وفي أحيان أخرى يكون التيار نتيجة الشحنات الموجبة والشحنات السالبة معًا، على سبيل المثال عندما تتدفق الجسيمات المشحونة خلال محلول ما. يسمى المحلول الذي يوصل الكهرباء بالمحلول الإلكتروليتي، ويحتوي على كل من الأيونات الموجبة والسالبة، وتتحرك هذه الأيونات باتجاهَين متعاكسَين عندما يكون المحلول متصلًا بخلية كهربائية (الشكل ٣-٣)، وتسمى هذه الجسيمات المشحونة **حاملات الشحنة Charge carriers**، وإذا أخذنا في الاعتبار بُنية الجسيمات المشحونة؛ فإنك ستدرك أن الشحنة الكهربائية تكون بمقادير محدّدة تساوي مضاعفات صحيحة من أصغر مقدار للشحنة والتي تمثل شحنة الإلكترون الواحد أو البروتون الواحد، وهذا ببساطة ما نعنيه عندما نصف الشحنة الكهربائية على أنها كمية **مكمّمة Quantised**.



الشكل ٣-٣ كل من الشحنات الموجبة والسالبة حرّة التحرّك في المحلول، وكلاهما يُسهم في التيار الكهربائي.

مصطلحات علمية

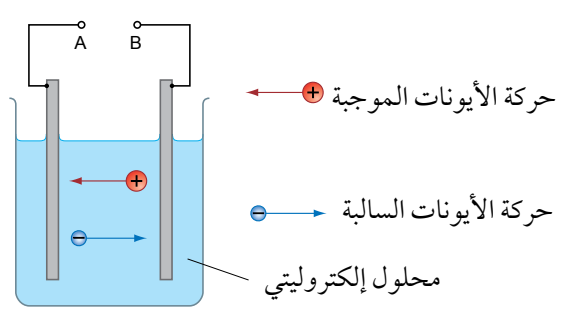
حامل الشحنة الكهربائية
Charge carrier:
جسيم مشحون يُسهم في التيار الكهربائي؛ وقد يكون هذا الجسيم إلكترونًا أو بروتونًا أو أيونًا.

مكمّمة Quantised:
يُقال إن الكميّة مكمّمة عندما يكون لها حد أدنى من المقدار وتكون دائمًا بمضاعفات من هذا المقدار.

أسئلة

١ انظر إلى الشكل ٣-٣، وحدّد اتجاه التيار الاصطلاحي في المحلول الإلكتروليتي (نحو اليسار أم نحو اليمين أم في كِلا الاتجاهَين في الوقت نفسه).

٢ يبيّن الشكل ٣-٤ دائرة بها محلول إلكتروليتي موصل يحتوي على كل من الأيونات الموجبة والسالبة.



الشكل ٣-٤

أ. انسخ الشكل، وارسم خلية بين النقطتَين A و B. أشِر بوضوح إلى القطب الموجب والقطب السالب للخلية.

ب. أضف سهمًا لتبيّن اتجاه التيار الاصطلاحي في المحلول.

ج. أضف أسهمًا لتبيّن اتجاه التيار الاصطلاحي في السلكَين الموصلَين.

التيار الكهربائي والشحنة الكهربائية

عندما تتدفق الجسيمات المشحونة عبر نقطة في دائرة ما نقول أنّ هناك تيارًا كهربائيًا، ويعرف معدل تدفق الشحنة الكهربائية عبر تلك النقطة **بشدة التيار الكهربائي Current**، وتُقاس شدة التيار الكهربائي بوحدة **الأمبير ampere (A)**، إذًا ما كميّة الشحنة الكهربائية التي تتحرك عندما يمرّ تيار كهربائي شدته (1 A)؟ تقاس الشحنة الكهربائية بوحدة **الكولوم coulombs (C)**، والمعدل الذي تمر به الشحنة الكهربائية لتيار شدته (1 A) من نقطة في الدائرة هو (1 C) في زمن (1 s)، وبالمثل فإن تيارًا شدته (2 A) ينقل شحنة مقدارها (2 C) خلال زمن (1 s)، وينقل تيارًا شدته (3 A) شحنة مقدارها (6 C) خلال زمن (2 s) وهكذا، فالعلاقة بين الشحنة الكهربائية وشدة التيار الكهربائي والزمن يمكن كتابتها بمعادلة على النحو الآتي:

$$\text{شدة التيار الكهربائي} = \frac{\text{الشحنة الكهربائية}}{\text{الزمن}}$$

$$I = \frac{Q}{t}$$

تشرح هذه المعادلة ما نعنيه بشدة التيار الكهربائي.

يمكن إعادة ترتيب معادلة شدة التيار الكهربائي لإيجاد مقدار الشحنة:

$$\text{الشحنة الكهربائية} = \text{شدة التيار الكهربائي} \times \text{الزمن}$$

$$Q = It$$

حيث (Q) هي الشحنة الكهربائية التي تتدفق خلال فترة زمنية (t) و (I) هي شدة التيار الكهربائي.

لاحظ أن كلًا من الأمبير والكولوم من وحدات النظام الدولي للوحدات (SI)، والأمبير وحدة أساسية في حين الكولوم وحدة مشتقة.

مصطلحات علمية

شدة التيار الكهربائي Current:
معدل تدفق الشحنة الكهربائية عبر نقطة في دائرة كهربائية.

الأمبير ampere:
يعادل تدفق كولوم واحد من الشحنات في مقطع موصل خلال ثانية واحدة، وهو وحدة قياس شدة التيار الكهربائي في النظام الدولي للوحدات (SI) (ويُرمز إليه بالرمز A).

الكولوم coulomb:
الكولوم الواحد هو كمية الشحنة الكهربائية التي تتدفق عبر نقطة في الدائرة خلال زمن (1 s) عندما تكون شدة التيار الكهربائي (1 A) (ويُرمز إليه بالرمز C).

أمثلة

١. مرّ تيار كهربائي شدته (10 A) عبر مصباح لمدة (1.0 h). احسب مقدار الشحنة الكهربائية التي تدفقت عبر المصباح خلال هذا الزمن.

الخطوة ١: علينا إيجاد الزمن (t) بالثواني:

$$t = 60 \times 60 = 3600 \text{ s}$$

الخطوة ٢: نحن نعرف أن شدة التيار الكهربائي $I = 10$ A ؛ لذا فإن الشحنة الكهربائية التي تتدفق تساوي:

$$Q = It$$

$$= 10 \times 3600 = 36000 \text{ C} = 3.6 \times 10^4 \text{ C}$$

٢. احسب شدة التيار الكهربائي في دائرة ما عندما تمر شحنة مقدارها (180 C) من نقطة في الدائرة خلال (2.0 min).

الخطوة ١: بإعادة ترتيب المعادلة $Q = It$:

$$I = \frac{Q}{t}$$

الخطوة ٢: عندما يكون الزمن بالثواني فإن:

شدة التيار الكهربائي:

$$I = \frac{180}{120} = 1.5 \text{ A}$$

أسئلة

(٣) يمر تيار كهربائي شدته (0.40 A) في دائرة ما. احسب مقدار الشحنة الكهربائية التي تعبر نقطة في الدائرة في زمن مقداره (15 s).

(٤) احسب شدة التيار الكهربائي الناتج من تدفق شحنة مقدارها (150 C) خلال زمن مقداره (30 s).

(٥) تعبر شحنة كهربائية مقدارها (50 C) من نقطة ما في دائرة كهربائية خلال زمن مقداره (20 s). احسب شدة التيار الكهربائي المارّ في الدائرة.

(٦) كُتب على بطارية السيارة «50 A h»، وهذا يعني أنه يمكن لهذه البطارية أن تعطي تيارًا شدته (50 A) لمدة ساعة واحدة.

أ. ما الزمن الذي يمكن للبطارية أن تستغرقه لإنتاج تيار مستمر مقداره (200 A) لبدء تشغيل السيارة؟

ب. احسب مقدار الشحنة الكهربائية التي تمر عبر نقطة في الدائرة خلال هذا الزمن.

الجسيمات المشحونة

التيار الكهربائي كما رأينا هو تدفق جسيمات مشحونة تسمى حاملات الشحنة الكهربائية، ولكن ما مقدار الشحنة الكهربائية التي يحملها كل جسيم؟

يحمل كل إلكترون شحنة سالبة صغيرة مقدارها نحو (-1.6×10^{-19} C)، تُمثّل هذه الشحنة الكهربائية بواسطة الرمز (e)، ويُعرف هذا المقدار من الشحنة الكهربائية باسم **الشحنة الأولية Elementary charge**، هذه الشحنة الكهربائية صغيرة جدًا لدرجة أنك بحاجة إلى نحو ستة مليون مليون مليون إلكترون أيّ (6 000 000 000 000 000 000 000) من الإلكترونات للحصول على شحنة تعادل كولوم واحد تقريبًا.

مهمّ

الشحنة الأولية

Elementary charge:

الشحنة الأولية ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C).

البروتونات موجبة الشحنة وشحنتها ($+e$)، وهذا يساوي شحنة إلكترون واحد في المقدار، ويعاكسه بنوع الشحنة الكهربائية، وتحمل الأيونات شحنات تساوي مضاعفات ($-e$) أو ($+e$).

وبما أنّ الشحنة الكهربائية تحملها جسيمات، فإنها يجب أن تأتي بكميّات مضاعفة للشحنة الأولية (e)؛ لذلك – فإنه على سبيل المثال – تكون الشحنة الكهربائية (3.2×10^{-19} C) ممكنة؛ لأن هذا الكميّة هي ($+2e$)، ولكن الكميّة (2.5×10^{-19} C) مستحيلة؛ لأنها ليست مضاعفًا صحيحًا لـ (e).

هذا الأمر يعزّز فكرة أن الشحنة الكهربائية هي كميّة مكمّمة؛ وهذا يعني أنه لا يمكن أن تأتي إلا بمقادير عددية صحيحة من مضاعفات الشحنة الكهربائية الأولية، وإذا كنت تدرس الكيمياء فستعرف أن الأيونات لها شحنة ($\pm e$)، ($\pm 2e$)... إلخ، ولكن الاستثناء الوحيد يكون في حالة الجسيمات الأساسية التي تسمى الكواركات: وهي اللبنات الأساسية التي تبنى منها جسيمات مثل البروتونات والنيوترونات؛ حيث إن هذه اللبنات لها شحنات ($\pm \frac{2}{3} e$) أو ($\pm \frac{1}{3} e$)، ومع ذلك لا تظهر الكواركات مفردة وإنما تظهر على شكل ثنائي أو ثلاثي بحيث تكون شحنتها الكلّية صفرًا أو مضاعفًا لـ (e).

أسئلة

(٧) احسب عدد البروتونات في كولوم واحد من الشحنة الكهربائية (شحنة البروتون = $+1.6 \times 10^{-19}$ C).

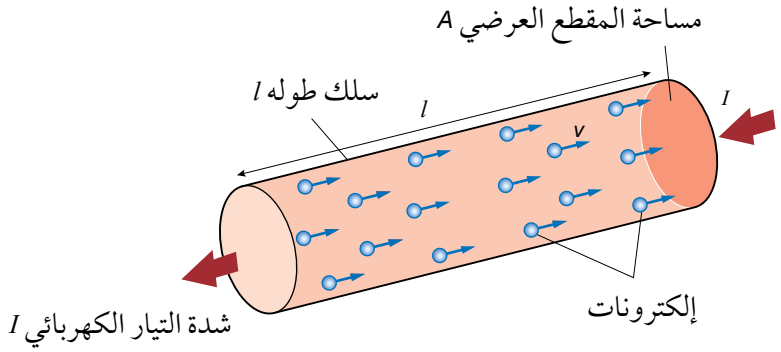
(٨) أيّ من الكميّات الآتية تُعدّ شحنات كهربائية ممكنة؟ اشرح إجابتك.

(6.0×10^{-19} C)، (8.0×10^{-19} C)، (10.0×10^{-19} C)

معادلة للتيار الكهربائي

درست سابقًا أن النحاس والفضة والذهب موصلات جيدة للتيار الكهربائي، ويوجد عدد كبير من إلكترونات التوصيل في السلك النحاسي، حيث يكون هناك عدد كبير من إلكترونات التوصيل يساوي عدد الذرات في السلك، ويسمى عدد إلكترونات التوصيل لكل وحدة حجم من الفلز ($1\ m^3$) **الكثافة العددية** **Number density** ورمزها (n). تبلغ قيمة (n) بالنسبة إلى النحاس ($10^{29}\ m^{-3}$) تقريبًا.

يبيّن الشكل ٣-٥ جزءًا من سلك طوله (l) ومساحة مقطعه العرضي (A)، ويمر عبره تيار كهربائي شدته (I).



الشكل ٣-٥ شدة تيار كهربائي I في سلك مساحة مقطعه العرضي A.
حاملات الشحنة الكهربائية هي عبارة عن إلكترونات توصيل متحركة بمتوسط السرعة المتجهة الانجرافية ($\vec{v}$) Mean drift velocity.

مصطلحات علمية

الكثافة العددية Number density: عدد حاملات الشحنة الكهربائية لكل وحدة حجم من المادة.

متوسط السرعة المتجهة الانجرافية Mean drift velocity: متوسط سرعة مجموعة من الجسيمات المشحونة عند مرور تيار كهربائي في موصل.

ما مدى سرعة انتقال الإلكترونات في الشكل ٣-٥؟ تسمح لنا المعادلة الآتية بالإجابة عن هذا السؤال:

شدة التيار الكهربائي:

$$I = nAvq$$

حيث (n) هي الكثافة العددية، و (A) هي مساحة المقطع العرضي للموصل، و ($\vec{v}$) هي متوسط السرعة المتجهة الانجرافية لحاملات الشحنة الكهربائية، و (q) هي الشحنة الكهربائية على كل حاملة شحنة.

لاستنتاج هذه المعادلة تخيل أن جميع الإلكترونات المبيّنة في الشكل ٣-٥ تتحرك بالسرعة نفسها (v) على طول السلك (l)، وأنك تقوم بقياس زمن تدفق الإلكترونات لتحديد سرعتها، فتبدأ قياس الزمن عندما يعبر أول إلكترون من الطرف الأيمن للسلك، وتتوقف عن قياس الزمن عندما يعبر آخر الإلكترونات المبيّنة في المخطط (وهذا هو الإلكترون المبيّن في الطرف الأيسر من السلك في المخطط)، يبيّن قياس الزمن بهذه الطريقة أن الإلكترون الأخير قد استغرق زمن (t) في قطع المسافة (l)، وبالتالي تكون جميع الإلكترونات قد قطعت الطول (l) من السلك في الزمن (t)، ويمكننا حساب عدد هذه الإلكترونات، ومنها نحسب الشحنة الكهربائية التي تدفقت خلال الزمن (t):

عدد الإلكترونات = الكثافة العددية × حجم السلك

$$= n \times A \times l$$

الشحنة الكهربائية الكلّية للإلكترونات = عدد الإلكترونات × شحنة الإلكترون

$$Q = n \times A \times l \times e$$

ويمكننا إيجاد شدة التيار الكهربائي (I)؛ لأننا نعلم أن هذه هي الشحنة الكهربائية التي تدفقت خلال الزمن (t).

$$\text{وشدة التيار الكهربائي} = \frac{\text{الشحنة الكهربائية}}{\text{الزمن}}$$

$$I = \frac{n \times A \times l \times e}{t}$$

وبالتعويض عن السرعة (v) بدلًا من $\frac{l}{t}$ نحصل على:

$$I = nAve$$

إن حاملات الشحنة الكهربائية المتحركة التي تشكل تيارًا ليست دائمًا إلكترونات، فقد تكون - على سبيل المثال - أيونات (موجبة أو سالبة) شحنتها (q)، وتكون من مضاعفات (e)، ومن هنا يمكننا كتابة صيغة جديدة للمعادلة أكثر عمومية من المعادلة السابقة على النحو الآتي:

$$I = nAvq$$

يبيّن المثال ٣ كيفية استخدام هذه المعادلة لحساب القيمة النموذجية لمتوسط السرعة المتجهة الانجرافية ($\vec{v}$).

مثال

٣. احسب متوسط السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات في سلك نحاسي مساحة مقطعه العرضي ($5.0 \times 10^{-6}\ m^2$)، ويحمل تيارًا كهربائيًا شدته ($1.0\ A$). علمًا بأن الكثافة العددية لإلكترونات النحاس تساوي ($8.5 \times 10^{28}\ m^{-3}$).

الخطوة ١: أعد ترتيب المعادلة $I = nAve$ لجعل (v) في أحد طرفي المعادلة:

$$v = \frac{I}{nAe}$$

الخطوة ٢: عوّض القيم واحسب (v).

$$v = \frac{1.0}{8.5 \times 10^{28} \times 5.0 \times 10^{-6} \times 1.6 \times 10^{-19}}$$

$$= 1.47 \times 10^{-5}\ m\ s^{-1}$$

$$= 1.5 \times 10^{-5}\ m\ s^{-1} \text{ أو}$$

$$v = 0.015\ mm\ s^{-1}$$

ملاحظة: يمكن أن نقارن هذه السرعة البطيئة التي تحتاج إلى 19 ساعة تقريبًا لقطع متر واحد بسرعة الإلكترونات العالية داخل الفلز.

من المثير للاهتمام أن ندرك أن وحدات المعادلة $I = nAvq$ متجانسة **Homogeneous**.

وحدة شدة التيار الكهربائي (I) هي الأمبير (A).

وحدة عدد حاملات الشحنة الكهربائية لكل وحدة حجم (n) هي (m^{-3}).

وحدة المساحة (A) هي (m^2).

وحدة السرعة المتجهة الانجرافية ($\vec{v}$) هي ($m\ s^{-1}$).

وحدة الشحنة الكهربائية (q) هي كولوم (C).

كل من هذه الوحدات هي أساسية باستثناء الكولوم، و 1 كولوم يكافئ 1 أمبير ثانية (A s).

عند وضع الوحدات في الطرف الأيسر من المعادلة تكون:

$$m^{-3} \times m^2 \times m\ s^{-1} \times A\ s = A$$

ونلاحظ أنها متماثلة مع الطرف الأيمن من المعادلة نفسها، وعلى الرغم من أن هذا لا يُعدّ إثباتًا للمعادلة إلا أنه يعطي دليلًا قويًا على صحتها.

غالبًا ما تستخدم هذه الطريقة للتحقّق من صحة التعابير الرياضية وللتنبؤ أيضًا بصيغة أخرى ممكنة.

مهمّ

متجانسة Homogenous:
لكي تكون المعادلة صحيحة يجب أن تكون الوحدات متجانسة، ما يعني أنه عند اختزال الوحدات في طرفي المعادلة نحصل على وحدات متماثلة.

العوامل التي يعتمد عليها متوسط السرعة المتجهة الانجرافية

قد تدهشك النتيجة التي توصلنا إليها في المثال ٣ والتي تعني أن الإلكترونات في سلك النحاس قد انجرفت بسرعة تقدّر بجزء من المليمتر في الثانية، ولفهم هذه النتيجة فهمًا كاملًا نحتاج إلى التحقّق عن قرب من كيفية سلوك الإلكترونات في فلز ما، فإلكترونات التوصيل حرّة التحرّك داخل الفلز، ولذلك عند توصيل السلك ببطارية أو مصدر جهد كهربائي خارجي فإن كل إلكترون ضمن الفلز يتأثر بقوة كهربائية تجعله يتحرك نحو الطرف الموجب للبطارية، حيث تتصادم الإلكترونات بشكل عشوائي مع أيونات الفلز الثابتة والمهتزة، فانتقالها على طول الفلز عشوائي جدًا، والسرعة المتجهة الفعلية للإلكترون بين التصادمات تقدّر بـ ($10^5\ m\ s^{-1}$)، ولكن انتقالها العشوائي ينتج عنه سرعة انجراف نحو النهاية الموجبة للبطارية لتصبح بطيئة، ونظرًا إلى وجود بلايين الإلكترونات فإننا نستخدم المصطلح متوسط السرعة المتجهة الانجرافية ($\vec{v}$) للإلكترونات.

يبيّن الشكل ٣-٦ كيف يختلف متوسط السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات في الحالات المختلفة.

يمكننا فهم ذلك باستخدام المعادلة:

$$v = \frac{I}{nAe}$$

- إذا ازدادت شدة التيار الكهربائي، فإن السرعة المتجهة الانجرافية (v) يجب أن تزداد.

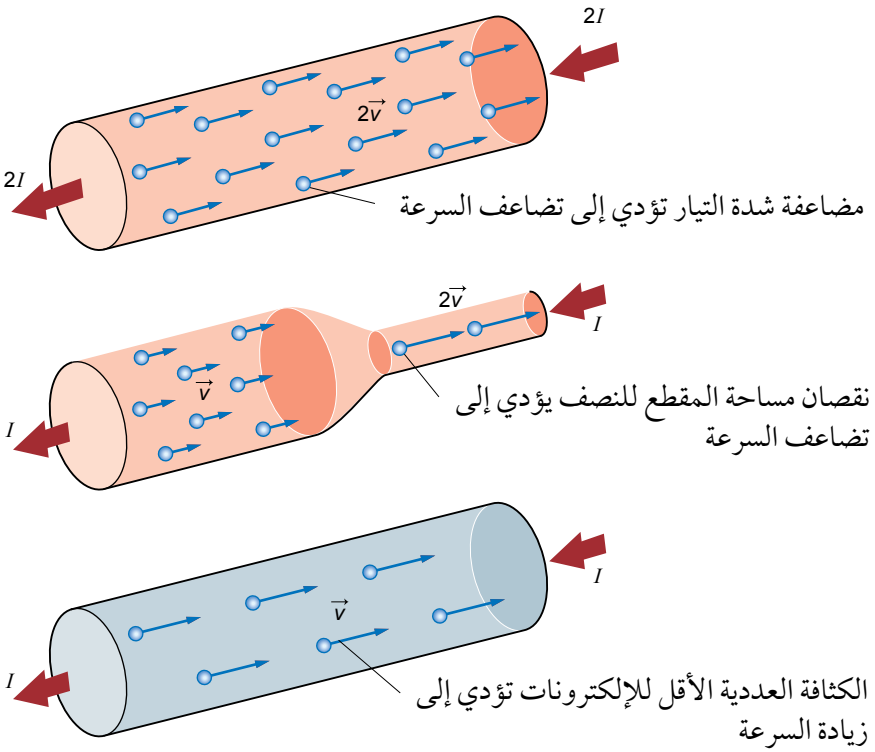
$$v \propto I$$

- إذا كان السلك رفيعًا أكثر (مساحة مقطعه العرضي أقل)، فإن الإلكترونات تتحرك بسرعة أكبر لمقدار معيّن من شدة التيار الكهربائي.

$$v \propto \frac{1}{A}$$

- يوجد عدد أقل من الإلكترونات في الجزء الرفيع من السلك، لذلك يجب أن ينتقل الإلكترون الفردي بسرعة أكبر، لتوفير نفس شدة التيار الكهربائي الكلي (معدل تدفق الشحنة).
- في مادة ذات كثافة عددية منخفضة من الإلكترونات (n أصغر)، يجب أن يكون متوسط السرعة المتجهة الانجرافية أكبر لمقدار معيّن من شدة التيار الكهربائي.

$$v \propto \frac{1}{n}$$



الشكل ٣-٦ يعتمد متوسط السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات على شدة التيار الكهربائي، ومساحة المقطع العرضي، والكثافة العددية للإلكترونات في المادة.

أسئلة

(٩) احسب شدة التيار الكهربائي في سلك من الذهب مساحة مقطعه العرضي ($2.0\ mm^2$) عندما يكون متوسط السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات في السلك ($0.10\ mm\ s^{-1}$). علمًا بأن الكثافة العددية لإلكترونات الذهب تساوي ($5.9 \times 10^{28}\ m^{-3}$).

(١٠) احسب متوسط السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات في سلك نحاسي قطره (1.0 mm)، يمر به تيار كهربائي شدته (5.0 A). علمًا بأن الكثافة العددية لإلكترونات النحاس ($8.5 \times 10^{28}\ m^{-3}$).

(١١) توصل قطعة من سلك نحاسي على التوالي مع قطعة من سلك فضي لهما القطر نفسه. كل من السلكين يمر بهما تيار عند توصيلهما ببطارية. اشرح كيف سيتغير متوسط السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات في أثناء انتقالها من النحاس إلى الفضة. الكثافة العددية للإلكترونات في كل منهما كالآتي:

النحاس: $n = 8.5 \times 10^{28}\ m^{-3}$

الفضة: $n = 5.9 \times 10^{28}\ m^{-3}$

لتعرف كيف تتغير السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات فكّر في تدفق الماء في نهر ما، فعند معدل تدفق مرتفع يتحرك الماء بسرعة وهذا يتوافق مع شدة تيار كهربائي (I) أكبر، وإذا ضاق مجرى النهر فإن سرعة الماء تزداد، وهذا يتوافق مع مساحة مقطع عرضي (A) أصغر.

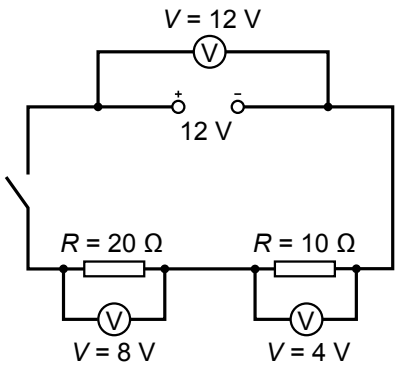
إن الفلزات لها كثافة عددية عالية للإلكترونات الحرة، وعادة ما تكون بمعدل ($10^{28}\ m^{-3}$) أو ($10^{29}\ m^{-3}$) بينما تحتوي أشباه الموصلات مثل السيليكون والجرمانيوم على قيم (n) أقل بكثير من الفلزات ربما في حدود ($10^{23}\ m^{-3}$)؛ لذلك يكون متوسط السرعة المتجهة الانجرافية في أشباه الموصلات عادةً أكبر بمليون مرة من تلك الموجودة في الفلزات لشدة التيار الكهربائي نفسه، أما العوازل الكهربائية – مثل المطاط والبلاستيك – فإنها تحتوي على عدد قليل جدًا من إلكترونات التوصيل لكل وحدة حجم لتعمل كحاملات شحنة، بحيث يكون فعليًا متوسط السرعة المتجهة الانجرافية صفر.

٣-٢ فرق الجهد الكهربائي

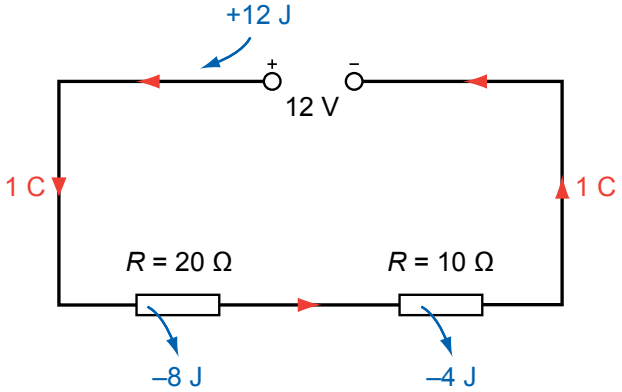
غالبًا ما يُستخدم مصطلح فرق الجهد الكهربائي في السياقات العامة بطريقة غير دقيقة علميًا وخاطئة في كثير من الأحيان، وسننظر في هذا الموضوع بعناية أكبر إلى ما نعنيه بالجهد الكهربائي وفرق الجهد الكهربائي بالنسبة إلى الدوائر الكهربائية.

انظر إلى الدائرة الكهربائية البسيطة في الشكل ٣-٧، افترض أن المقاومة الداخلية لمصدر الجهد الكهربائي مهملة (ستدرس المقاومة الداخلية في هذه الوحدة). تقيس الڤولتميترات الثلاثة ثلاث قيم لفروق الجهد الكهربائي، فعندما يكون المفتاح مفتوحًا فإن الڤولتميتر الموضوع بين طرفَي مصدر الجهد الكهربائي يقيس (12 V)، وعند إغلاق المفتاح وبقاء الڤولتميتر عبر مصدر الجهد الكهربائي فإنه يقيس (12 V) أيضًا، ويقيس الڤولتميترَين الموجودَين عبر كل من المقاومتَين (8 V) و (4 V)، ولن تتفاجأ عندما تلاحظ أن فرق الجهد بين طرفَي مصدر الجهد الكهربائي يساوي مجموع فرقَي الجهد عبر المقاومتَين.

في الموضوع السابق رأينا أن شدة التيار الكهربائي هي معدل تدفق الشحنة الكهربائية، ويبيّن الشكل ٣-٨ الدائرة الكهربائية نفسها كما في الشكل ٣-٧، ولكننا هنا ننظر إلى حركة شحنة مقدارها كولوم واحد (1 C) في الدائرة. تُنقل الطاقة الكهربائية إلى الشحنة الكهربائية بواسطة مصدر الجهد الكهربائي، وتتدفق الشحنة الكهربائية في الدائرة ويتحوّل بعض طاقتها إلى طاقة داخلية في المقاومة الأولى والباقي إلى طاقة داخلية في المقاومة الثانية.



الشكل ٣-٧ قياس فروق الجهد الكهربائية في دائرة ما. لاحظ أن كل ڤولتميتر متصل بطرفَي مكوّن من مكوّنات الدائرة.



الشكل ٣-٨ تنتقل الطاقة مع تدفق شحنة كهربائية 1 C في دائرة كهربائية، وهذه الدائرة هي الدائرة نفسها المبيّنة في الشكل ٣-٧.

تشير قراءات الڤولتميتر إلى الطاقة المنقولة للمكوّن بواسطة كل وحدة شحنة، ويقيس الڤولتميتر الموصل بين طرفَي مصدر الجهد الكهربائي القوة الدافعة الكهربائية لمصدر الجهد عندما تكون مقاومته الداخلية مهملة، في حين يقيس الڤولتميتران الموصّلان بين طرفَي كل من المقاومتَين فرق الجهد الكهربائي عبر هذَين المكوّنَين. إن مصطلحَي القوة الدافعة الكهربائية وفرق الجهد الكهربائي لهما معنيان مختلفان؛ لذلك عليك أن تكون حذرًا عند التعامل معهما.

يُستخدم مصطلح **فرق الجهد الكهربائي** **Potential difference** عندما تفقد الشحنات الكهربائية الطاقة بواسطة نقل الطاقة الكهربائية إلى أشكال أخرى من الطاقة في أحد المكوّنات مثل الطاقة الحرارية أو طاقة الحركة، ويُعرّف فرق الجهد الكهربائي (V)، على أنه الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة.

فرق الجهد الكهربائي بين نقطتَين A و B، هو الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة في أثناء تحركها من النقطة A إلى النقطة B.

$$\text{فرق الجهد الكهربائي} = \frac{\text{الطاقة المنقولة}}{\text{الشحنة الكهربائية}}$$

$$V = \frac{\Delta W}{Q}$$

يمكن إعادة ترتيب المعادلة لحساب الطاقة المنقولة في المكوّن كالآتي:

الطاقة المنقولة = فرق الجهد الكهربائي × الشحنة الكهربائية

$$\Delta W = VQ$$

مصطلحات علمية

فرق الجهد الكهربائي **Potential difference**: فرق الجهد الكهربائي (V) بين نقطتَين A و B، هو الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة في أثناء انتقالها من النقطة A إلى النقطة B.

القوة الدافعة الكهربائية **Electromotive force (e.m.f.)**: الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة لدفع الشحنة الكهربائية في الدائرة الكاملة.

ينقل مصدر الجهد الكهربائي أو البطارية الطاقة إلى الشحنات الكهربائية في الدائرة، وتُعرّف **القوة الدافعة الكهربائية** (ε) **Electromotive force (e.m.f)**، لمصدر الجهد الكهربائي على أنها الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة أيضًا، إلّا أن هذا يشير إلى الطاقة المعطاة للشحنة من قبل المصدر، فالقوة الدافعة الكهربائية لمصدر ما هي الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة لدفع الشحنة الكهربائية في الدائرة الكاملة.

٣-٣ المقاومة النوعية

درست سابقًا قانون أوم الذي يوضح العلاقة بين فرق الجهد الكهربائي وشدة التيار الكهربائي $R = \frac{V}{I}$، ودرست المقاومة الكهربائية (R) ووحدتها الأوم (Ω).

تعتمد المقاومة (R) بالنسبة إلى سلك فلزي، على العوامل الآتية:

- الطول (L).
- مساحة المقطع العرضي (A).
- المادة المصنوع منها السلك.
- درجة حرارة السلك.

تتناسب المقاومة عند درجة حرارة ثابتة طرديًا مع طول السلك وعكسيًا مع مساحة مقطعه العرضي.

$$\text{المقاومة} \propto \text{الطول}$$

$$\text{المقاومة} \propto \frac{1}{\text{مساحة المقطع العرضي}}$$

يمكننا أن نرى كيف ترتبط هاتان العلاقتان بصيغة توصيل المقاومات على التوالي وعلى التوازي:

- إذا ضاعفنا طول السلك فسيبدو وكأننا ربطنا مقاومتَين متماثلتَين على التوالي؛ وهكذا فإن مقاومتهما تجمع لإعطاء ضعف المقاومة ($R_T = R + R$). فالمقاومة إذًا تتناسب طرديًا مع الطول.
- مضاعفة مساحة المقطع العرضي للسلك تشبه عملية ربط مقاومتَين متماثلتَين على التوازي؛ فمقاومتهما المجمّعة انخفضت إلى النصف ($\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R}$). ومن هنا فإن المقاومة تتناسب عكسيًا مع مساحة المقطع العرضي.

وعند الجمع بين العلاقتَين (الطول ومساحة المقطع العرضي) نحصل على:

$$\text{المقاومة} \propto \frac{\text{الطول}}{\text{مساحة المقطع العرضي}}$$

$$R \propto \frac{L}{A}$$

لكن مقاومة السلك تعتمد أيضًا على المادة المصنوع منها، فالنحاس موصل أفضل من الفولاذ، والفولاذ موصل أفضل من السيليكون وهكذا؛ لذا فإذا أردنا تحديد المقاومة (R) لسلك معيّن فعلينا أن نأخذ في الاعتبار طوله (L) ومساحة مقطعه العرضي (A) ونوع المادة المصنوع منها، والخاصية التي تتعلّق بنوع المادة المصنوع منها هي **المقاومة النوعية** **Resistivity**، والتي يُرمز إليها بالرمز (ρ) (الحرف اليوناني رو"rho").

معادلة المقاومة هي:

$$\text{المقاومة} = \frac{\text{المقاومة النوعية} \times \text{الطول}}{\text{مساحة المقطع العرضي}}$$

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

يمكننا إعادة ترتيب هذه المعادلة للحصول على المقاومة النوعية، وتُعطى المقاومة النوعية للمادة بالمعادلة الآتية:

$$\text{المقاومة النوعية} = \frac{\text{المقاومة} \times \text{مساحة المقطع العرضي}}{\text{الطول}}$$

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

مصطلحات علمية

المقاومة النوعية **Resistivity**: خاصية للمادة وهي مقياس لمقاومتها الكهربائية المعرّفة بالمعادلة: $\rho = \frac{RA}{L}$.

يبيّن الجدول ٣–١ القيم النموذجية للمقاومة النوعية لبعض المواد، لاحظ أن وحدة المقاومة النوعية هي أوم متر (Ω m)، وهذا يختلف عن أوم لكل متر (Ω/m).

المادة	المقاومة النوعية (Ω m)
فضّة	1.60×10^{-8}
نحاس	1.69×10^{-8}
نيكروم (أ)	1.30×10^{-8}
ألومنيوم	3.21×10^{-8}
رصاص	20.8×10^{-8}
منجانين (ب)	44.0×10^{-8}
يوريكا (ج)	49.0×10^{-8}
زئبق	69.0×10^{-8}
جرافيت	800×10^{-8}
جرمانيوم	0.65
سيليكون	2.3×10^{3}
زجاج بيركس	10^{12}
تفلون (د)	$10^{13} - 10^{16}$
كوارتز	5×10^{16}

(أ) نيكروم: سبيكة من النيكل والنحاس والألمنيوم تستخدم في السخانات الكهربائية لأنها لا تتأكسد عند (1000 °C).

(ب) المنجانين: سبيكة من (84%) نحاس، و (12%) منجنيز و (4%) نيكل.

(ج) يوريكا (كونستانتان): سبيكة من (60%) نحاس و (40%) نيكل.

(د) التفلون: بولي رباعي فلوروإيثين.

الجدول ٣–١ المقاومة النوعية لمواد مختلفة عند درجة حرارة (20 °C).

مثال

٤. جِد مقاومة سلك يوريكا طوله (2.6 m) ومساحة مقطعه العرضي (2.5×10^{-7} m²).

الخطوة ١: استخدم معادلة المقاومة:

$$\text{المقاومة} = \frac{\text{المقاومة النوعية} \times \text{الطول}}{\text{مساحة المقطع العرضي}}$$

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

الخطوة ٢: عوّض القيّم في المعادلة واستخدم قيمة (ρ) لليوريكا من الجدول ٣–١:

$$R = \frac{49.0 \times 10^{-8} \times 2.6}{2.5 \times 10^{-7}} = 5.1\ \Omega$$

لذلك، فإن مقاومة السلك (5.1 Ω).

المقاومة النوعية ودرجة الحرارة

تعتمد المقاومة النوعية – مثل المقاومة – على درجة الحرارة، إذ تزداد المقاومة النوعية لفلز ما بزيادة درجة الحرارة، وذلك بسبب وجود تصادمات أكثر بين إلكترونات التوصيل والأيونات المهتزة في الفلز.

أسئلة

(١٢) استخدم قيمة المقاومة النوعية للمنجانين المذكورة في الجدول ٣–١ لحساب طول سلك منجانين قطره (0.50 mm) يلزم لصنع ملفات مقاومة مقدارها:

أ. 1.0 Ω

ب. 5.0 Ω

ج. 10 Ω

(١٣) قطعة من النحاس حجمها ($1.0\ cm^3$) شُكل منها سلك طويل مساحة مقطعه العرضي ($4.0 \times 10^{-7}\ m^2$). احسب مقاومته (استخدم قيمة المقاومة النوعية للنحاس من الجدول ٣-١).

(١٤) سلك نحاسي طوله (1.0 m)، ومقاومته (0.50 Ω).

أ. احسب مقاومة طول (5.0 m) من السلك نفسه.

ب. كم ستكون مقاومة سلك من النحاس طوله (1.0 m) له نصف مقدار قطر السلك الأصلي؟

(١٥) قطعة من سلك فولاذي لها مقاومة (10 Ω) تمددّت إلى ضعف طولها الأصلي. قارن مقاومتها بعد التمدّد بمقاومتها الأصلية.

٣-٤ قانونا كيرشوف

القانون الأول لكيرشوف

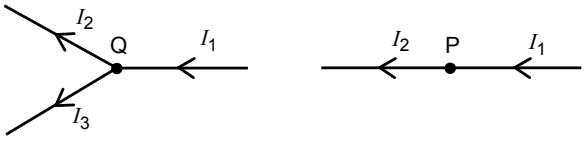
لقد تعلّمت أن التيار الكهربائي قد يتجزأ عندما تتفرع الدائرة إلى فرعَين منفصلَين بالتوازي، فعلى سبيل المثال تيار كهربائي شدته (5.0 A) قد يتجزأ عند نقطة ما في الدائرة إلى تيارَين منفصلَين شدتاهما (2.0 A) و (3.0 A)، بحيث تبقى الشدة الكلية للتيار الكهربائي كما هي بعد انفصاله. لا نتوقع اختفاء جزء من التيار الكهربائي أو ظهور تيار كهربائي إضافي من العدم، وهذا أساس **القانون الأول لكيرشوف** **Kirchhoff's first law** الذي ينص على أن مجموع التيارات الكهربائية الداخلة إلى أي نقطة في دائرة ما يساوي مجموع التيارات الكهربائية الخارجة من تلك النقطة.

هذا موضّح في الشكل ٣-٩ (أ) إذ يجب أن تساوي شدة التيار الكهربائي الداخل إلى النقطة P شدة التيار الكهربائي الخارج منها، لذلك:

$$I_1 = I_2$$

أما في الشكل ٣-٩ (ب)، فلدينا تيار واحد (I_1) يدخل إلى النقطة Q، وتياران يخرجان منها (I_2 ، I_3). يتجزأ التيار الكهربائي (I_1) عند النقطة Q، وحسب القانون الأول لكيرشوف فإن:

$$I_1 = I_2 + I_3$$



(ب) (أ)

الشكل ٣-٩ القانون الأول لكيرشوف: التيار الكهربائي محفوظ؛ لأن الشحنة الكهربائية محفوظة.

مهمّ

القانون الأول لكيرشوف
Kirchhoff's first law:
مجموع التيارات الكهربائية الداخلة إلى أي نقطة في دائرة ما يساوي مجموع التيارات الكهربائية الخارجة من تلك النقطة.

القانون الأول لكيرشوف هو تعبير عن **حفظ الشحنة الكهربائية** **Conservation of charge**. الفكرة هي أن كميّة الشحنة الكهربائية الكلية التي تدخل نقطة ما مساوية للخارجة منها، وبصيغة أوضح فإذا دخل مليار إلكترون إلى نقطة في دائرة ما خلال فترة زمنية (1.0 s)، فإنه يجب أن يخرج مليار إلكترون من هذه النقطة في (1.0 s)، ويمكن التحقق من القانون بواسطة توصيل عدة أميترات في نقاط مختلفة من دائرة كهربائية والتي يتجزأ عندها التيار الكهربائي. ويجب أن تتذكر أنه يجب توصيل الأميتر على التوالي حتى يمر من خلاله التيار الكهربائي المراد قياسه.

يمكننا كتابة القانون الأول لكيرشوف كمعادلة بالصيغة:

القانون الأول لكيرشوف:

$$\Sigma I_{in} = \Sigma I_{out}$$

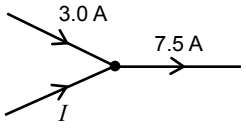
هنا الرمز (Σ) (الحرف اليوناني سيجما) يعني «المجموع الكلّي»، لذا فإن (ΣI_{in}) تعني «مجموع التيارات الكهربائية الداخلة إلى نقطة ما» و (ΣI_{out}) تعني «مجموع التيارات الكهربائية الخارجة من هذه النقطة»، وهذه المعادلة هي التي تُستخدم في برنامج الحاسوب للتنبؤ بسلوك دائرة معقدة.

مصطلحات علمية

حفظ الشحنة الكهربائية
Conservation of charge:
لا يمكن استحداث شحنة كهربائية أو إفناؤها.

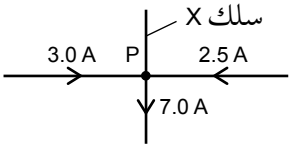
أسئلة

(١٦) استخدم القانون الأول لكيرشوف لاستنتاج شدة التيار الكهربائي (I) في الشكل ٣-١٠.



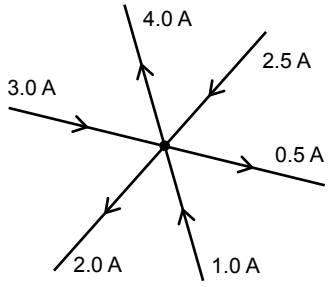
الشكل ٣-١٠

(١٧) احسب شدة التيار الكهربائي في السلك X في الشكل ٣-١١. وحدّد اتجاه هذا التيار الكهربائي (داخلًا إلى النقطة P أو خارجًا منها).



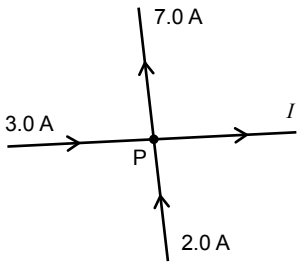
الشكل ٣-١١

(١٨) احسب (ΣI_{in}) و (ΣI_{out}) في الشكل ٣-١٢. هل يتحقق القانون الأول لكيرشوف؟



الشكل ٣-١٢

(١٩) استخدم القانون الأول لكيرشوف لاستنتاج قيمة واتجاه التيار الكهربائي (I) في الشكل ٣-١٣.



الشكل ٣-١٣

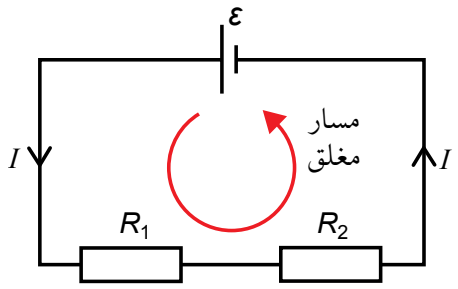
القانون الثاني لكيرشوف

يتعامل هذا القانون مع القوى الدافعة الكهربائية (e.m.f.) وفروق الجهد الكهربائية في دائرة ما، سنبدأ بالنظر في دائرة بسيطة تحتوي على خلية ومقاومتَين (R_1) و (R_2) (الشكل ٣-١٤)، وبما أنّ هذه الدائرة البسيطة موصلة على التوالي فإن شدة التيار الكهربائي (I) يجب أن تكون هي نفسها على طول الدائرة. يمكننا بالنسبة إلى هذه الدائرة كتابة المعادلة الآتية:

$$\varepsilon = IR_1 + IR_2$$

أي القوة الدافعة الكهربائية للبطارية تساوي مجموع فرقَي الجهد عبر المقاومتَين.

ربما لا تكون هذه المعادلات مفاجئة، ومع ذلك فربما لا تدرك أنها نتيجة لتطبيق **القانون الثاني لكيرشوف Kirchhoff's second law** على الدائرة الكهربائية، حيث ينص هذا القانون على أن مجموع القوى الدافعة الكهربائية في أي مسار مغلق في دائرة كهربائية ما يساوي مجموع فروق الجهد في ذلك المسار.



الشكل ٣-١٤ دائرة توالي بسيطة.

مهمّ

القانون الثاني لكيرشوف

Kirchhoff's second law:

مجموع القوى الدافعة الكهربائية في أي مسار مغلق في دائرة ما يساوي مجموع فروق الجهد الكهربائية في ذلك المسار.

وبطريقة مشابهة للقانون الأول، يمكن كتابة القانون الثاني لكيرشوف كمعادلة بالصيغة:

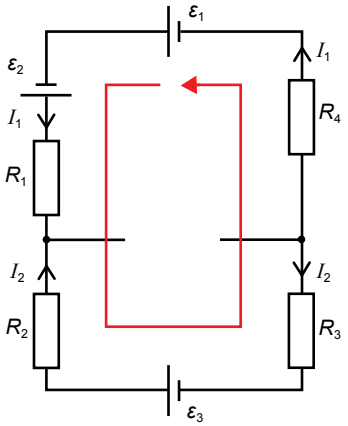
القانون الثاني لكيرشوف:

$$\Sigma\varepsilon = \Sigma V$$

حيث ($\Sigma\varepsilon$) هي مجموع القوى الدافعة الكهربائية و (ΣV) هي مجموع فروق الجهد الكهربائية.

الإشارات والاتجاهات

انتبه عند تطبيق القانون الثاني لكيرشوف، فعليك أن تأخذ في الحسبان الطرائق التي توصّل بها مصادر القوى الدافعة الكهربائية واتجاهات التيارات الكهربائية؛ فمصادر القوى الدافعة الكهربائية لها دائمًا قيمة موجبة عندما يكون اتجاه المسار من القطب السالب إلى القطب الموجب لخلية ما، كما أن فرق الجهد بين طرفَي مقاومة ما له قيمة موجبة عندما يكون اتجاه المسار له الاتجاه نفسه للتيار الكهربائي المارّ في المقاومة، ويبيّن الشكل ٣-١٥ مسارًا مغلقًا من دائرة معقدة لتوضيح هذه النقطة.



الشكل ٣-١٥ مسار مغلق من دائرة معقدة.

القوى الدافعة الكهربائية

باختيار نقطة معيّنة للبدء منها، ولتكن الخلية التي لها القوة الدافعة الكهربائية (ε_1) حيث نأخذ المسار عكس عقارب الساعة كما هو موضح في الشكل باللون الأحمر.

مجموع القوى الدافعة الكهربائية:

$$\Sigma\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3$$

لاحظ أن (ε_3) تعاكس القوة الدافعة الكهربائية للبطاريتَين الأخريَين وتكون سالبة لأن اتجاه المسار عبرها من القطب الموجب إلى القطب السالب.

فروق الجهد الكهربائية

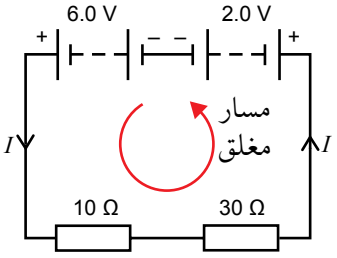
بدءًا من النقطة نفسها والعمل بعكس اتجاه عقارب الساعة مرة أخرى، فإن مجموع فروق الجهد:

$$\Sigma V = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_2 R_3 + I_1 R_4$$

لاحظ أن اتجاه التيار الكهربائي (I_2) باتجاه عقارب الساعة (عكس المسار الذي تم اختياره)، لذا فإن فرق الجهد الكهربائي الذي يتضمن (I_2) سالب.

أمثلة

٥. استخدم قانونَي كيرشوف لإيجاد شدة التيار الكهربائي في الدائرة في الشكل ٣-١٦.



الشكل ٣-١٦ دائرة بها بطاريتان متعاكستان.

هذه دائرة توالي لذلك شدة التيار الكهربائي هي نفسها على طول المسار في الدائرة.

الخطوة ١: نحسب مجموع القوى الدافعة الكهربائية.

مجموع القوى الدافعة الكهربائية:

$\Sigma\varepsilon = 6.0\ \text{V} - 2.0\ \text{V} = 4.0\ \text{V}$

يجب أن نعتبر أن إحدى القوّتَين الدافعتَين سالبة عند توصيل البطاريتَين باتجاهَين متعاكسَين.

الخطوة ٢: نحسب مجموع فروق الجهد الكهربائية.

مجموع فروق الجهد الكهربائية:

$\Sigma V = (I \times 10) + (I \times 30) = 40\ I$

الخطوة ٣: نساوي بين النتيجتَين:

$\Sigma\varepsilon = \Sigma V$

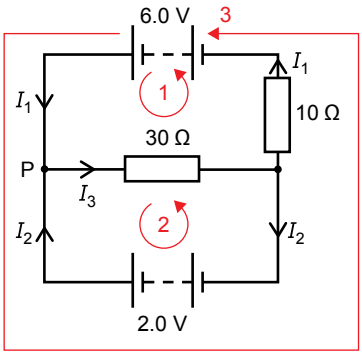
$4.0 = 40\ I$

أي أن: $I = 0.1\ \text{A}$

لا شك أنه كان بإمكانك حلّ هذه المسألة من دون تطبيق القانون الثاني لكيرشوف، ولكنك ستجد أنه في المسائل الأكثر تعقيدًا، سيساعدك استخدام هذَين القانونَين على تجنّب الأخطاء، وسترى لاحقًا أن القانون الثاني لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الطاقة. سننظر إلى مثال آخر حول كيفية تطبيق هذا القانون، ثم ننظر إلى كيفية تطبيقه بشكل عام.

تابع

٦. احسب شدة التيار الكهربائي المار بكل من المقاومتَين في الدائرة المبيّنة في الشكل ٣-١٧.



الشكل ٣-١٧ قانونا كيرشوف مهمّان لتحديد شدة التيارات الكهربائية المختلفة في هذه الدائرة.

الخطوة ١: حدّد اتجاه التيارات الكهربائية. يبيّن المخطط التيارات الكهربائية (I_1)، (I_2) و (I_3).

تلميح: لا يهم إذا حدّدنا هذه التيارات الكهربائية بالاتجاهات الخاطئة؛ لأنها ستظهر ببساطة على شكل كميات سالبة في الحل.

الخطوة ٢: نطبق القانون الأول لكيرشوف عند النقطة P. حيث يعطي الآتي:

$$I_1 + I_2 = I_3 \qquad (١)$$

الخطوة ٣: اختر مسارًا مغلقًا وطبّق القانون الثاني لكيرشوف. عند اختيار المسار العلوي 1 نحصل على:

$$6.0 = (I_3 \times 30) + (I_1 \times 10) \qquad (٢)$$

الخطوة ٤: كرّر الخطوة ٣ حول مسارات مغلقة أخرى حتى يكون هناك عدد من المعادلات يساوي عدد التيارات الكهربائية المجهولة الشدة. ومن المسار المغلق السفلي 2 نحصل على المعادلة:

$$-2.0 = -I_3 \times 30 \qquad (٣)$$

لدينا الآن ثلاث معادلات بها ثلاث كميات مجهولة (التيارات الكهربائية الثلاثة).

الخطوة ٥: حل هذه المعادلات كمعادلات آنية. في هذه الحالة، يتم اختيار المعادلات التي تعطي حلولًا بسيطة. فالمعادلة ٣ تعطي $(I_3 = 0.067\ A)$، عوّض هذه القيمة في المعادلة ٢ فتحصل على $(I_1 = 0.40\ A)$. يمكننا الآن إيجاد (I_2) بالتعويض في المعادلة ١:

$$I_2 = I_3 - I_1 = 0.067 - 0.40 \approx -0.33\ A$$

وبالتالي فإن (I_2) سالب، أي يكون بالاتجاه المعاكس للسهم المبيّن في الشكل ٣-١٧ أي يكون خارجًا من النقطة P.

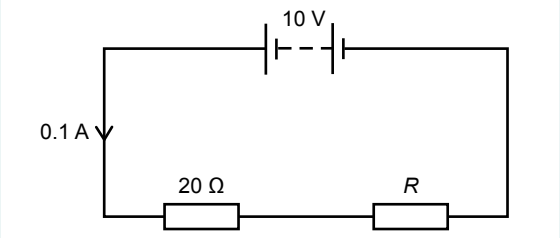
لاحظ أن هناك مسارًا مغلقًا ثالثًا في هذه الدائرة؛ كان بإمكاننا أن نطبق القانون الثاني لكيرشوف عليه، وهو المسار المغلق الخارجي للدائرة. ويمكن أن يعطي هذا المسار معادلة رابعة:

$$6.0 - 2.0 = I_1 \times 10$$

ومع ذلك، فإن هذه ليست معادلة مستقلة؛ كان من الممكن أن نصل إليها بطرح المعادلة ٣ من المعادلة ٢.

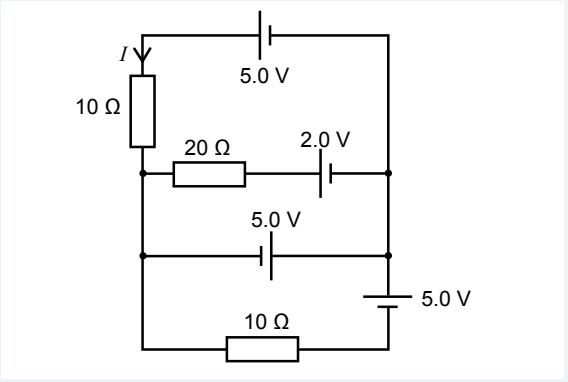
أسئلة

٢٠ استخدم القانون الثاني لكيرشوف لاستنتاج فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المقاومة (R) في الدائرة الموضحة في الشكل ٣-١٨، ومن ثم جِد قيمة (R) (افترض أن المقاومة الداخلية للبطارية مهملة).



الشكل ٣-١٨

(٢١) يمكنك استخدام القانون الثاني لكيرشوف للحصول على شدة التيار الكهربائي (I) في الدائرة المبيّنة في الشكل ٣-١٩. يمكن أن يؤدي اختيار أفضل مسار مغلق إلى تبسيط المسألة.

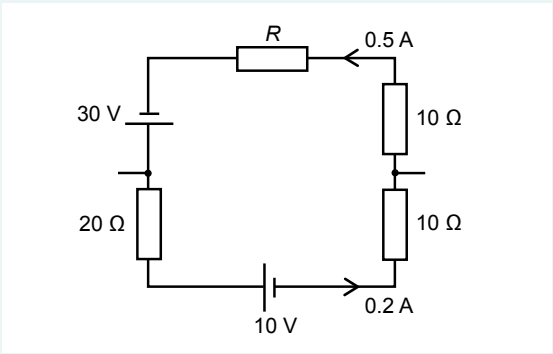


الشكل ٣-١٩

أ. أي مسار مغلق في الدائرة يجب أن تختار؟

ب. احسب شدة التيار الكهربائي (I).

(٢٢) استخدم القانون الثاني لكيرشوف لاستنتاج مقدار المقاومة (R) المبيّنة في المسار المغلق بالشكل ٣-٢٠.



الشكل ٣-٢٠

حفظ الطاقة

القانون الثاني لكيرشوف هو نتيجة لمبدأ حفظ الطاقة، فعلى سبيل المثال إذا تحركت شحنة مقدارها (1 C) عبر دائرة ما فإنها تكتسب طاقة في أثناء تحرّكها خلال كل مصدر من مصادر القوة الدافعة الكهربائية، وتفقد طاقة عند مرورها خلال كل فرق جهد كهربائي عبر مكوّن ما. فإذا تحرّكت الشحنة الكهربائية على طول مسار الدائرة فإن الطاقة للشحنة محفوظة (المفقودة = المكتسبة)؛ وذلك لأنه لا يمكن استحداث الطاقة من خلال حركة الشحنات في المسار عبر الدوائر الكهربائية.

لذلك:

الطاقة المكتسبة عبر مصادر القوة الدافعة الكهربائية = الطاقة المفقودة في أثناء المرور عبر مكوّنات ذات فروق جهد كهربائية.

يجب أن تتذكّر أن القوة الدافعة الكهربائية بالفولت هي ببساطة الطاقة المكتسبة لكل (1 C) من الشحنة الكهربائية في أثناء مرورها عبر المصدر، وبالمثل، فرق الجهد الكهربائي هو الطاقة المفقودة لكل (1 C) في أثناء مرورها عبر أحد المكوّنات.

1 فولت = 1 جول لكل كولوم

ومن هنا يمكننا التفكير في القانون الثاني لكيرشوف على النحو الآتي:

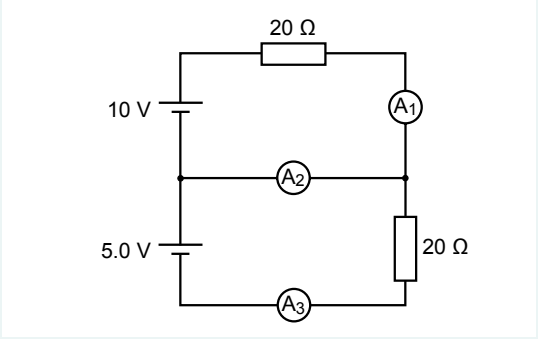
الطاقة المكتسبة لكل كولوم في أي مسار مغلق = الطاقة المفقودة لكل كولوم في ذلك المسار

إليك طريقة أخرى للتفكير في معنى القوة الدافعة الكهربائية؛ فخلية (1.5 V) تعطي (1.5 J) من الطاقة لكل شحنة كهربائية مقدارها (1 C) تمر عبرها، وبعد ذلك تتحرك هذه الشحنة الكهربائية في الدائرة، فتتحوّل الطاقة منها إلى المكوّنات في الدائرة والنتيجة هي أن الخلية تحوّل (1.5 J) من الطاقة من خلال دفع (1 C) من الشحنة الكهربائية، ومن

هنا فإن القوة الدافعة الكهربائية لمصدر ما تخبرنا ببساطة بمقدار الطاقة المحوّلة (بالجول) بواسطة المصدر في دفع شحنة مقدارها (1 C) عبر الدائرة.

سؤال

(٢٣) طبّق قوانين كيرشوف على الدائرة المبيّنة في الشكل ٣-٢١ لتحديد شدة التيار الكهربائي المقاسة بواسطة أجهزة الأمّيتر (A_1) و (A_2) و (A_3).



الشكل ٣-٢١ تجعل قوانين كيرشوف من الممكن استنتاج قراءات أجهزة الأمّيتر الثلاثة.

٣-٥ الدوائر العملية

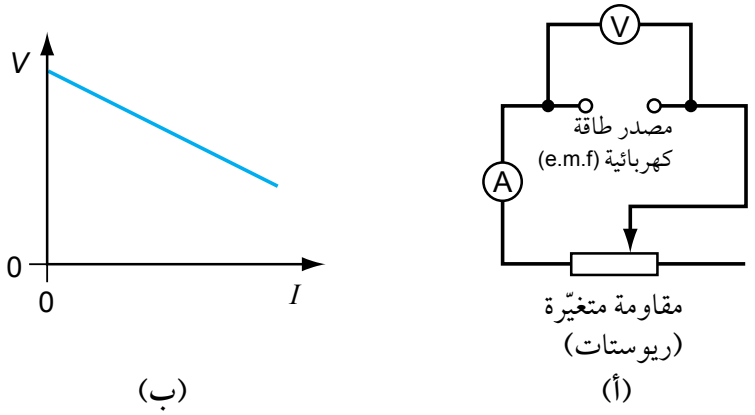
المقاومة الداخلية

عند استخدام أي مصدر للقوة الدافعة الكهربائية، فإنه لا يمكنك افتراض أن هذا المصدر يوفّر لك فرق جهد كهربائي بين طرفَيه مساويًا لمقدار قوته الدافعة الكهربائية، فهناك عوامل تجعل ذلك مستحيلًا، فعلى سبيل المثال ربما لا يكون المصدر مصنوعًا على درجة عالية من الكفاءة، أو أن البطاريات أصبحت فارغة وما إلى ذلك، ومع هذا فهناك عامل أكثر أهمية وهو العامل المشترك بين جميع مصادر القوة الدافعة الكهربائية وهو **المقاومة الداخلية** **Internal resistance**، فبالنسبة إلى أجهزة مصادر الطاقة (أجهزة مصادر القوة الدافعة الكهربائية)، قد يكون هذا بسبب الأسلاك ومكوناتها الداخلية، في حين تكون المقاومة الداخلية للخلية الكهروكيميائية ناتجة عن المواد الكيميائية الموجودة بداخلها. تبيّن التجارب أن فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي مصدر القوة الدافعة الكهربائية يعتمد على الدائرة التي يشكّل المصدر جزءًا منها، فعلى وجه التحديد ينخفض فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي مصدر القوة الدافعة الكهربائية إذا أردنا منه تيارًا كهربائيًا أكبر.

مصطلحات علمية

المقاومة الداخلية
Internal resistance:
هي المقاومة الكامنة في مصدر القوة الدافعة الكهربائية، والتي يتحوّل فيها بعض الطاقة إلى أشكال أخرى، كالشغل المبذول في دفع الشحنة الكهربائية من خلال المصدر نفسه.

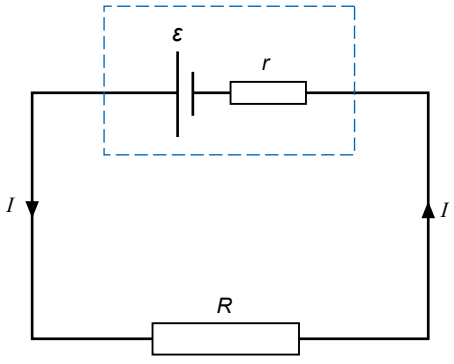
يبيّن الشكل ٣-٢٢ (أ) دائرة يمكنك استخدامها لاستقصاء هذا التأثير، ويبيّن التمثيل البياني في الشكل ٣-٢٢ (ب) كيف يمكن أن ينخفض فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي مصدر القوة الدافعة الكهربائية مع ازدياد شدة التيار الكهربائي المتدفق منه.



الشكل ٣-٢٢ (أ) دائرة كهربائية لتحديد القوة الدافعة الكهربائية (e.m.f) والمقاومة الداخلية لمصدر ما. (ب) التمثيل البياني لأنموذج النتائج.

تمر الشحنات التي تتحرك في الدائرة عبر المكوّنات الخارجية وكذلك خلال مصدر القوة الدافعة الكهربائية، حيث تكتسب هذه الشحنات طاقة كهربائية من المصدر، وتُفقد هذه الطاقة على شكل طاقة حرارية عندما تمر هذه الشحنات عبر المكوّنات الخارجية وكذلك بسبب المقاومة الداخلية للمصدر؛ لذلك تزداد سخونة مصادر الطاقة الكهربائية (e.m.f) والبطاريات عند استخدامها (جرّب استخدام خلية لإضاءة مصباح يدوي صغير؛ المس الخلية قبل توصيلها بالمصباح، ثم المسها مرة أخرى بعد إضاءة المصباح لمدة 15 ثانية تقريبًا)، حيث يعود سبب التسخين هذا إلى أن بعض طاقة الوضع الكهربائية للشحنات تتحوّل إلى طاقة داخلية؛ لأنها تبذل شغلًا ضد المقاومة الداخلية للخلية.

غالبًا ما يساعدنا إظهار المقاومة الداخلية (r) لمصدر قوة دافعة كهربائية في حل المسائل كما هو موضح في مخطط الدائرة (الشكل ٣-٢٣). نحن هنا نمثّل خلية كما لو كانت خلية مثالية للقوة الدافعة الكهربائية (ε)، جنبًا إلى جنب على التوالي مع مقاومة مقدارها (r). يمثل الخط المتقطع الذي يحيط بالمصدر (ε) والمقاومة الداخلية (r) حقيقة أن هذَين الشيئَين هما في الواقع مكوّن واحد.



الشكل ٣-٢٣ قد يكون مفيدًا إظهار المقاومة الداخلية (r) لخلية (أو مصدر) في مخطط الدائرة.

يمكننا الآن تحديد شدة التيار الكهربائي عندما تكون هذه الخلية متصلة بمقاومة خارجية (R). يمكنك أن ترى أن (R) و (r) متصلتان إحداهما مع الأخرى على التوالي، وشدة التيار الكهربائي (I) هي نفسها لكل من هاتَين المقاومتَين، وبالتالي تكون المقاومة المجمّعة للدائرة هي $R + r$، ويمكننا أن نكتب:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

$$\varepsilon = I(R + r)$$

لا يمكننا قياس القوة الدافعة الكهربائية (ε) للخلية مباشرة، لكن يمكننا فقط توصيل الڤولتميتر بين طرفَي الخلية.

وهذا يعطي **فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المصدر Terminal p.d. (V)** ودائمًا ما يكون هو نفسه فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الخارجية.

لذلك لدينا:

$$V = IR$$

سيكون هذا أقل من القوة الدافعة الكهربائية (ε) بمقدار (Ir)، والكميّة (Ir) هي فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية. فإذا جمعنا هاتَين المعادلتَين، نحصل على:

فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المصدر = القوة الدافعة الكهربائية للمصدر − فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية.

فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي مصدر جهد كهربائي:

$$V = \varepsilon - Ir$$

حيث (ε) هي القوة الدافعة الكهربائية للمصدر، و (I) هي شدة التيار الكهربائي في المصدر، و (r) هي المقاومة الداخلية للمصدر.

يشير فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية (Ir) إلى الطاقة المنقولة إلى المقاومة الداخلية من المصدر، فإذا قمت بتقصير دائرة البطارية عبر توصيل قطعة سلك مباشرة بين طرفَي البطارية، فسيتدفق تيار كبير، وستصبح البطارية دافئة ما دامت الطاقة تنتقل إلى داخلها، وهذا هو السبب الذي قد يُلحق الضرر أيضًا بمصدر الجهد الكهربائي نتيجة محاولة جعله يوفّر تيارًا أكبر مما هو مصمّم لإعطائه.

مصطلحات علمية

فرق الجهد الكهربائي الطرفي للمصدر Terminal p.d: هو فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المصدر والذي يعتمد على شدة التيار الكهربائي المتدفق من المصدر.

مثال

٧. **يتولد تيار كهربائي شدته (0.40 A) عند توصيل بطارية قوّتها الدافعة الكهربائية (6.0 V) بمقاومة (13.5 Ω). احسب المقاومة الداخلية للبطارية.**

الخطوة ١: عوّض القيم من السؤال في معادلة القوة الدافعة الكهربائية:

$R = 13.5\ \Omega$ ، $I = 0.40\ A$ ، $\varepsilon = 6.0\ V$

$\varepsilon = IR + Ir$

$6.0 = 0.40 \times 13.5 + 0.40 \times r$

$= 5.4 + 0.40\,r$

الخطوة ٢: أعد ترتيب المعادلة لإيجاد (r):

$6.0 - 5.4 = 0.40 \times r$

$0.60 = 0.40\,r$

$r = \frac{0.60}{0.40} = 1.5\ \Omega$

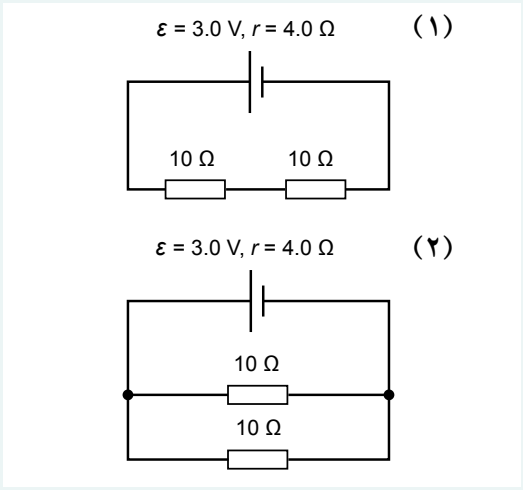
أسئلة

(٢٤) بطارية قوّتها الدافعة الكهربائية (5.0 V)، ومقاومتها الداخلية (2.0 Ω) متصلة بمقاومة خارجية (8.0 Ω). ارسم مخطط الدائرة، واحسب شدة التيار الكهربائي المارّ في الدائرة الكهربائية.

(٢٥) **أ.** احسب شدة التيار الكهربائي المارّ في كل دائرة في الشكل ٣-٢٤.

ب. احسب فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية لكل من الخليتَين أيضًا، وفرق الجهد الكهربائي بين طرفَي كل منهما.

(٢٦) أربع خلايا متماثلة ولكل منها قوّتها الدافعة الكهربائية (1.5 V)، والمقاومة الداخلية لكل منها (0.10 Ω) موصلة جميعًا على التوالي، وصل مع الخلايا الأربع مصباح مقاومته (2.0 Ω). احسب شدة التيار الكهربائي المارّ في المصباح.



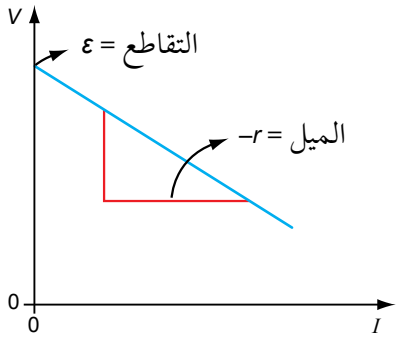
الشكل ٣-٢٤ بيانات السؤال ٢٥.

مهارة عملية ٣-١

تحديد القوة الدافعة الكهربائية والمقاومة الداخلية

يمكنك الحصول على فكرة جيدة عن القوة الدافعة الكهربائية لمصدر كهربائي معزول أو بطارية بواسطة توصيل فولتميتر رقمي عبر المصدر، حيث يتميز الفولتميتر الرقمي بمقاومة عالية جدًا (في حدود $10^7\ \Omega$)؛ لذلك لن يمر عبره سوى تيار كهربائي صغير جدًا، وسيكون فرق الجهد عبر المقاومة الداخلية بعد ذلك جزءًا صغيرًا فقط من القوة الدافعة الكهربائية. فإذا كنت ترغب في تحديد المقاومة الداخلية (r)، وكذلك القوة الدافعة الكهربائية (ε)، فإنك تحتاج إلى استخدام دائرة كتلك المبيّنة في الشكل ٣-٢٢. وعندما تُغيّر مقدار المقاومة المتغيرة، فإن شدة التيار الكهربائي في الدائرة تتغير، ويمكن تسجيل قياسات شدة التيار الكهربائي (I)، وفرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المصدر الكهربائي، ويمكن الحصول على المقاومة الداخلية (r) من التمثيل البياني (فرق الجهد الكهربائي – شدة التيار الكهربائي) (الشكل ٣- ٢٥).

قارن المعادلة $V = \varepsilon - Ir$ بمعادلة الخط المستقيم $y = mx + c$. من خلال تمثيل (V) على المحور الصادي (y)، و (I) على المحور السيني (x)، يجب أن ينتج خط مستقيم، ونقطة التقاطع مع المحور الصادي (y) هي (ε)، والميل هو ($-r$).



الشكل ٣-٢٥ يمكن الحصول على ε و r من هذا التمثيل البياني.

أسئلة

(٢٧) عندما يُوضع فولتميتر عالي المقاومة بين طرفَي بطارية مباشرةً، تصبح قراءته (3.0 V)، وعندما توصل مقاومة (10 Ω) بين طرفَي البطارية تنخفض قراءة الفولتميتر إلى (2.8 V). استخدم هذه المعلومات لتحديد المقاومة الداخلية للبطارية.

(٢٨) يوضح الجدول ٣-٢ نتائج تجربة لتحديد القوة الدافعة الكهربائية لمصدر طاقة (ε)، والمقاومة الداخلية (r). ارسم تمثيلًا بيانيًا مناسبًا، واستخدمه لإيجاد (ε) و (r).

0.98	1.10	1.18	1.33	1.43	V (V)
1.00	0.75	0.60	0.30	0.10	I (A)

الجدول ٣-٢

تأثيرات المقاومة الداخلية

لا يمكنك تجاهل تأثيرات المقاومة الداخلية، ضع في اعتبارك بطارية ذات قوة دافعة كهربائية (3.0 V)، ومقاومة داخلية (1.0 Ω)، يمكن حساب **الحد الأقصى لشدة التيار الكهربائي** الذي يمكن تدفقه من هذه البطارية عند تقصير طرفيها (أيّ المقاومة الخارجية $R \approx 0$) بواسطة العلاقة:

$$I_{max} = \frac{\varepsilon}{r}$$

$$= \frac{3.0}{1.0} = 3.0 \text{ A}$$

يعتمد **فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي** البطارية على مقدار المقاومة الخارجية؛ فمثلًا لمقاومة خارجية مقدارها (1.0 Ω)، يكون فرق الجهد الكهربائي بين طرفَيها (1.5 V)، أيّ نصف القوة الدافعة الكهربائية، ويقترب فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي البطارية من قيمة القوة الدافعة الكهربائية للبطارية عندما تكون المقاومة الخارجية (R) أكبر بكثير من المقاومة الداخلية للبطارية، على سبيل المثال مقدار المقاومة الخارجية المتصلة ببطارية (1000 Ω) تُعطي فرق جهد كهربائي بين طرفَي البطارية مقداره (2.997 V)، وهذا يساوي تقريبًا قيمة القوة الدافعة الكهربائية للبطارية، وكلما ازدادت شدة التيار الذي تزوّد به البطارية تناقص فرق الجهد الكهربائي بين طرفيها، ويمكن رؤية مثال على ذلك عندما يحاول سائق تشغيل سيارة والمصابيح الأمامية مضاءة، فإن بدء تشغيل المحرك يتطلب تيارًا كبيرًا من البطارية، فيهبط فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي البطارية، وبالتالي تخفت إضاءة المصابيح الأمامية.

سؤال

(٢٩) القوة الدافعة الكهربائية لبطارية سيارة (12 V)، والمقاومة الداخلية (0.04 Ω). يستهلك بادئ المحرك تيارًا كهربائيًا شدته (100 A).

احسب فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي البطارية عندما يكون بادئ المحرك قيد التشغيل.

مجزئات الجهد الكهربائي

كيف يمكننا الحصول على فرق جهد خارج (V_{out}) مقداره (3.0 V) من بطارية ذات قوة دافعة كهربائية (6.0 V)؟ نريد في بعض الأحيان استخدام جزء من القوة الدافعة الكهربائية فقط، ولإجراء ذلك نستخدم ترتيبًا معيّنًا للمقاومات يسمى بدائرة **مجزئ الجهد الكهربائي Potential divider**.

يبيّن الشكل ٣-٢٦ دائرتَي مجزئ جهد كهربائي، كل منهما متصلة ببطارية قوتها الدافعة الكهربائية (6.0 V)، ولكل منهما مقاومة داخلية مهملة. يقيس الڤولتميتر عالي المقاومة فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي مقاومة مقدارها (R_2)، سنشير إلى فرق الجهد هذا على أنه فرق جهد خارج (V_{out}) للدائرة. تتكوّن الدائرة الأولى (أ) من مقاومتَين قيمتهما (R_1) و (R_2)، وفرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المقاومة (R_2) عبارة عن نصف الـ (6.0 V) للبطارية. إن مجزئ الجهد الكهربائي الثاني (ب) يُعدّ أكثر فائدة؛ فهو يتكوّن من مقاومة متغيّرة وحيدة، ومن خلال تحريك منزلق الاتصال للمقاومة المتغيّرة يمكننا ضبط أي قيمة (V_{out}) بين (0.0 V) (عندما يكون منزلق الاتصال في الأسفل)، و (6.0 V) (عندما يكون المنزلق في الأعلى).

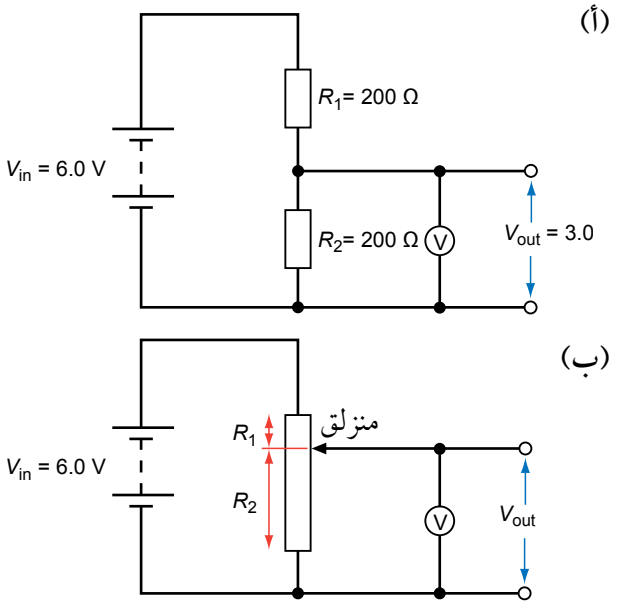
مصطلحات علمية

مجزئ الجهد الكهربائي

Potential divider:

دائرة تقسّم فرق الجهد الكهربائي (V) للمصدر إلى جزأين، بحيث يكون فرق الجهد الكهربائي عبر الجزء الأول هو (V_1) وفرق الجهد الكهربائي عبر الجزء الآخر هو (V_2)؛ بحيث يكون:

$V_1 + V_2 = V$



الشكل ٣-٢٦ دائرتا مجزئَي جهد.

يعتمد فرق الجهد (V_{out}) على القيم النسبية لـ (R_1) و (R_2). يمكنك حساب قيمة (V_{out}) باستخدام **معادلة مجزئ الجهد الكهربائي** الآتية:

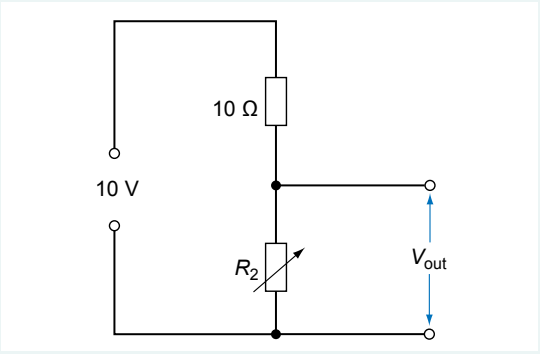
معادلة مجزئ الجهد الكهربائي:

$$(V_{out}) = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \times (V_{in})$$

حيث (R_2) هي مقاومة المكوّن الذي يتم أخذ فرق الجهد الكهربائي الخارج له، و (R_1) هي مقاومة المكوّن الثاني في مجزئ الجهد الكهربائي، و (V_{in}) هي فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المكوّنَين.

سؤال

(٣٠) حدّد مدى (V_{out}) للدائرة في الشكل ٣-٢٧ حيث ضُبّطت المقاومة المتغيّرة (R_2) حول مداها الكامل من (0 Ω) إلى (40 Ω). (افترض أن المقاومة الداخلية مهملة لمصدر القوة الدافعة الكهربائية 10 V).



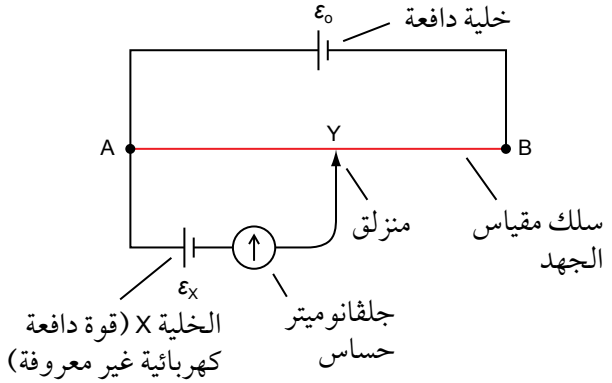
الشكل ٣-٢٧

دوائر مقياس الجهد الكهربائي

مقياس الجهد الكهربائي Potentiometer هو جهاز يستخدم لمقارنة فروق الجهد الكهربائية، فعلى سبيل المثال يمكن استخدامه لقياس القوة الدافعة الكهربائية لخلية، شرط أن يكون لديك بالفعل مصدر قوة دافعة كهربائية معروف بدقة، وكما سنرى يمكن اعتبار مقياس الجهد الكهربائي نوعًا من دوائر مجزئات الجهد الكهربائي.

يتكوّن مقياس الجهد الكهربائي من قطعة من سلك مقاومة - يبلغ طولها عادةً مترًا واحدًا - ممتدة أفقيًا بين نقطتَين A و B كما في الشكل ٣-٢٨، توصل خلية دافعة (معلومة المقدار) بين طرفَي السلك. افترض أن هذه الخلية لها قوة دافعة كهربائية (ε_o) مقدارها (2.0 V)، ويمكننا بعد ذلك أن نقول أن النقطة A عند جهد كهربائي (2.0 V)، و B عند جهد كهربائي (0 V)، ونقطة المنتصف للسلك عند جهد كهربائي (1.0 V). بمعنى آخر ينخفض الجهد الكهربائي بشكل تدريجي على طول السلك.

فلنفترض الآن أننا نرغب في قياس القوة الدافعة الكهربائية (ε_X) للخلية X (يجب أن يكون لها قيمة أقل من تلك التي للخلية الدافعة). يُوصل الطرف الموجب للخلية X بالنقطة A (لاحظ أن كلا الخليتَين لهما طرف موجب متصل بـ A)، ويُوصل الطرف السالب من السلك مع **الجلفانوميتر Galvanometer** الحسّاس (مثل ميكروأميتر)، ويوصل سلك الطرف الآخر من الجلفانوميتر بالمنزلق الفلزي، والمنزلق عبارة عن جهاز توصيل بسيط له حافة حادة جدًا تتيح تحديد موضع السلك بدقة شديدة.



الشكل ٣-٢٨ مقياس جهد متصل مع خلية X لقياس القوة الدافعة الكهربائية لها.

مصطلحات علمية

مقياس الجهد الكهربائي Potentiometer: جهاز يستخدم لمقارنة فروق الجهد الكهربائية.

الجلفانوميتر Galvanometer: أداة تستخدم لقياس شدة التيارات الكهربائية الصغيرة أو الكشف عنها.

إذا لامس المنزلق السلك بالقرب من النقطة A، فإن إبرة الجلفانوميتر ستنحرف في اتجاه ما، وإذا لامس المنزلق السلك بالقرب من النقطة B، فإن إبرة الجلفانوميتر ستنحرف في الاتجاه المعاكس، من الواضح أنه لا بد من وجود نقطة ما Y على طول السلك والتي عند لمسها بواسطة المنزلق لا تعطي أي انحراف أي لا تتحرك الإبرة لا إلى اليسار ولا إلى اليمين.

ولإيجاد هذا الموضع يجب جعل المنزلق يلمس السلك برفق ولفترة قصيرة؛ يبيّن انحراف الجلفانوميتر ما إذا كان المنزلق بعيدًا جدًا عن اليسار أو اليمين، ومن المهم عدم تحريك المنزلق على طول سلك مقياس الجهد الكهربائي؛ لأن ذلك قد يؤدي إلى كشط سطحه وجعله غير منتظم؛ بحيث لا يتغير الجهد الكهربائي بشكل منتظم على طوله.

وعندما يوضع المنزلق عند Y، فإن الجلفانوميتر يعطي انحرافًا صفريًا، ما يدل على عدم تدفق تيار كهربائي خلاله ويمكن أن يحدث هذا فقط إذا كان فرق الجهد الكهربائي عبر طول السلك AY يساوي القوة الدافعة الكهربائية للخلية X، ويمكننا القول إن مقياس الجهد الكهربائي عندها متزن، فإذا كانت نقطة الاتزان في منتصف المسافة تمامًا على طول السلك، فسنكون قادرين على القول إن مقدار القوة الدافعة الكهربائية للخلية X هي نصف قيمتها للخلية الدافعة، وتُعرف هذه التقنية لإيجاد نقطة ما عندما تكون القراءة صفرًا **الطريقة الصفرية Null method**.

ولحساب القوة الدافعة الكهربائية (ε_X) غير المعروفة، نقيس الطول AY، وبذلك يكون لدينا:

لمقارنة قوتَين دافعتَين كهربائيتَين (ε_X) و (ε_o):

$$\varepsilon_X = \frac{AY}{AB} \times \varepsilon_o$$

حيث (ε_o) هي القوة الدافعة الكهربائية للخلية الدافعة.

مصطلحات علمية

الطريقة الصفرية

Null method: تقنية تجريبية للبحث عن قراءة صفرية.

يمكن اعتبار مقياس الجهد الكهربائي على أنه مجزئ جهد؛ لأن نقطة التلامس Y تقسم سلك المقاومة إلى جزأَين، أي ما يكافئ مقاومتَين في مجزئ الجهد الكهربائي.

مقارنة القوة الدافعة الكهربائية على مقياس الجهد الكهربائي

عندما يكون مقياس الجهد الكهربائي متزنًا لا يتدفق أي تيار كهربائي من الخلية قيد الاستقصاء، وهذا يعني أن فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي الخلية يساوي القوة الدافعة الكهربائية للخلية، ولا داعي إلى القلق بشأن فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية (لأنه لا يتدفق تيار كهربائي عبر الخلية)، وتعد هذه ميزة يتفوق بها مقياس الجهد الكهربائي على الڤولتميتر، الذي يتصف بأنه يجب أن يسحب تيارًا صغيرًا حتى يعمل.

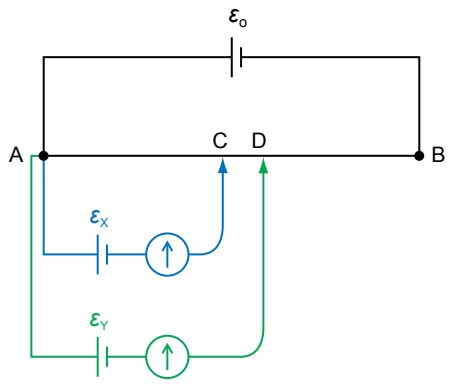
ومع ذلك فالمشكلة هنا تتمثّل في أن الخلية الأساسية توفر تيارًا لمقياس الجهد الكهربائي، وبالتالي فإن فرق الجهد الكهربائي بين النقطتَين A و B سيكون أقل من القوة الدافعة الكهربائية للخلية الأساسية (تفقد جزءًا من فرق الجهد الكهربائي بسبب مقاومتها الداخلية)، وللتغلب على هذه المشكلة نستخدم مقياس الجهد الكهربائي لمقارنة فروق الجهد الكهربائية. لنفترض أن لدينا خليتَين قوتهما الدافعة الكهربائية (ε_X) و (ε_Y) ونريد مقارنتهما، وكل منهما

متصل بدوره بمقياس الجهد الكهربائي، ما يعطي نقطتَي اتزان عند النقطتَين C و D، انظر الشكل ٣-٢٩ (يمكنك أن ترى في المخطط أن (ε_Y) يجب أن تكون أكبر من (ε_X)؛ لأن D أبعد إلى جهة اليمين من C).

ستكون النسبة بين القوّتَين الدافعتَين الكهربائيتَين للخليتَين مساوية للنسبة بين الطولَين AC و AD:

$$\frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_Y} = \frac{AC}{AD}$$

إذا كانت إحدى الخلايا المستخدمة لها قيمة قوة دافعة كهربائية معروفة بدقة، فيمكن حساب القوة الدافعة الكهربائية الأخرى بدرجة الدقة نفسها.



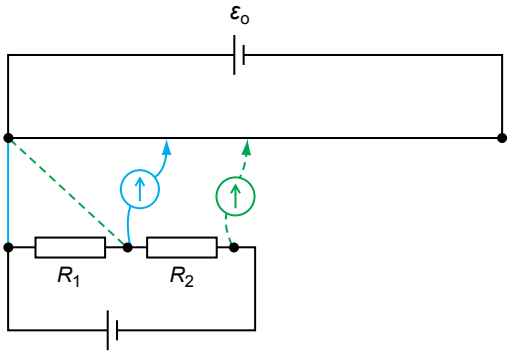
الشكل ٣-٢٩ مقارنة قوّتَين دافعتَين كهربائيتَين باستخدام مقياس الجهد الكهربائي.

مقارنة فروق الجهد الكهربائية

يمكن استخدام الأسلوب نفسه لمقارنة فروق الجهد الكهربائية، فعلى سبيل المثال يمكن توصيل مقاومتَين على التوالي بخلية (الشكل ٣-٣٠) لإيجاد فرق الجهد الكهربائي عبر أحد المقاومتَين؛ حيث تُوصل أولًا بمقياس الجهد الكهربائي (الخطوط الزرقاء)، ويحدّد طول سلك الاتزان (الطول اللازم لجعل شدة التيار صفرًا)، ثم تكرّر هذه الطريقة مع المقاومة الأخرى (الخطوط الخضراء)؛ للحصول على نقطة الاتزان الجديدة (انتبه أن النسبة بين الطولَين هنا تساوي النسبة بين فرقَي الجهد الكهربائية).

ونظرًا إلى أن كلًا من المقاومتَين يتدفق خلالهما التيار الكهربائي نفسه، فإن النسبة بين فرقَي الجهد هي أيضًا كالنسبة بين مقاومتيهما.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$$



الشكل ٣-٣٠ مقارنة فرقَي الجهد الكهربائية باستخدام مقياس الجهد الكهربائي.

سؤال

(٣١) توصل خلية قوتها الدافعة الكهربائية (4.0 V) بين طرفَي سلك مقاومة طوله (1.00 m) لعمل مقياس جهد.

أ. ما فرق الجهد الكهربائي عبر كل (1 cm) من طول السلك؟ وما طول السلك الذي فرق الجهد بين طرفَيه (1.0 V)؟

ب. خلية قوتها الدافعة الكهربائية (ε) غير معروفة تتصل بمقياس الجهد، فوُجد أن نقطة الاتزان على مقياس الجهد الكهربائي لها تقع على مسافة (37.0 cm) من نهاية السلك الذي يتصل به الجلفانومتر. قدّر قيمة (ε)، واشرح السبب في أنه لا يمكن أن يكون إلّا تقديرًا.

ج. خلية قوتها الدافعة الكهربائية (1.230 V)، ويُعطى طول سلك الاتزان لها على مقياس الجهد على مسافة (31.2 cm). استخدم هذه القيمة للحصول على قيمة أكثر دقة لـ (ε).

ملخّص

شدة التيار الكهربائي هي معدل تدفق الشحنة الكهربائية، والشحنة الكهربائية في فلز ما عبارة عن إلكترونات، وفي محلول إلكتروليتي تتكوّن من الأيونات الموجبة والسالبة.

اتجاه التيار الاصطلاحي من الطرف الموجب إلى الطرف السالب؛ وبما أن شحنة الإلكترونات سالبة، فإنها تتحرك بالاتجاه المعاكس.

وحدة الشحنة الكهربائية في النظام الدولي للوحدات هي كولوم (C)، وكولوم واحد هو الشحنة الكهربائية التي تمر من نقطة ما عندما تكون شدة التيار عند تلك النقطة أمبير واحد ولمدة ثانية واحدة:

الشحنة الكهربائية = شدة التيار الكهربائي × الزمن

$$Q = It$$

تعتمد شدة التيار الكهربائي (I) في موصل ما على مساحة المقطع العرضي (A)، وعلى متوسط السرعة المتجهة الانجرافية ($\vec{v}$) لحاملات الشحنة الكهربائية، والكثافة العددية للإلكترونات (n):

$$I = nAvq$$

يستخدم مصطلح فرق الجهد الكهربائي عندما تنقل الشحنة الكهربائية الطاقة إلى المكوّن أو المحيط الخارجي وتعرّف على أنها الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة:

$$\Delta W = VQ \quad \text{أو} \quad V = \frac{\Delta W}{Q}$$

الفولت يساوي جول لكل كولوم ($1\ \text{J C}^{-1}$).

مقدار المقاومة هو نسبة فرق الجهد الكهربائي إلى شدة التيار الكهربائي:

$$R = \frac{V}{I}$$

تُحسب المقاومة النوعية (ρ) للمادة من المعادلة:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

حيث (R) هي مقاومة السلك لتلك المادة، و (A) هي مساحة المقطع العرضي، و (L) هي طول السلك، ووحدة قياس المقاومة النوعية هي أوم متر ($\Omega\ \text{m}$).

ينصّ القانون الأول لكيرشوف على أن مجموع التيارات الكهربائية الداخلة إلى أي نقطة في دائرة ما تساوي مجموع التيارات الكهربائية الخارجة من تلك النقطة.

ينصّ القانون الثاني لكيرشوف على أن مجموع القوى الدافعة الكهربائية في أي مسار مغلق في دائرة ما يساوي مجموع فروق الجهد الكهربائية في ذلك المسار.

يكون لأي مصدر قوة دافعة كهربائية مثل البطارية، مقاومة داخلية، ويمكننا أن نفكّر في المصدر على أنه يحتوي على مقاومة داخلية (r) موصلة مع القوة الدافعة الكهربائية (ε) على التوالي.

فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي مصدر قوة دافعة كهربائية أقل من القوة الدافعة الكهربائية بسبب فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية:

فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي مصدر = القوة الدافعة الكهربائية للمصدر − فرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية

$$V = \varepsilon - Ir$$

تتكوّن دائرة مجزئ الجهد الكهربائي من مقاومتَين أو أكثر موصلتَين على التوالي بمصدر كهربائي، ويعطى فرق الجهد الخارج (V_{out}) عبر المقاومة (R_2) من خلال المعادلة:

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \times V_{in}$$

يمكن استخدام مقياس الجهد الكهربائي لمقارنة فروق الجهد الكهربائية.

أسئلة نهاية الوحدة

١ ما العبارة التي تُعرّف القوة الدافعة الكهربائية؟

أ. القوة الدافعة الكهربائية لمصدر ما هي الطاقة المنقولة عندما تُدفع شحنة كهربائية من خلال مقاومة.

ب. القوة الدافعة الكهربائية لمصدر ما هي الطاقة المنقولة عندما تُدفع شحنة كهربائية حول دائرة كاملة.

ج. القوة الدافعة الكهربائية لمصدر ما هي الطاقة المنقولة عندما تُدفع وحدة شحنة كهربائية حول دائرة كاملة.

د. القوة الدافعة الكهربائية لمصدر ما هي الطاقة المنقولة عندما تُدفع وحدة شحنة كهربائية من خلال مقاومة.

٢ احسب الشحنة الكهربائية التي تمر عبر مصباح عندما يمر به تيار كهربائي شدته (150 mA) لمدة 40 دقيقة.

٣ مولد ينتج تيارًا كهربائيًا شدته (40 A). احسب المدة التي سيستغرقها تدفق شحنة كهربائية مقدارها (2000 C) عبر الدائرة الخارجية للمولد.

٤ يتولد في حالة حدوث الصواعق تيار كهربائي متوسط شدته (30 kA)، ويستمر لمدة (2000 μs). احسب الشحنة الكهربائية التي انتقلت أثناء هذه العملية.

٥ **أ.** مصباح مقاومته (15 Ω) يتصل ببطارية قوتها الدافعة الكهربائية (4.5 V). احسب شدة التيار الكهربائي المارّ في المصباح.

ب. احسب مقاومة فتيل سخان كهربائي يستهلك تيارًا كهربائيًا شدته (6.5 A) عندما يوصل عبر مصدر كهربائي (230 V).

ج. احسب فرق الجهد الكهربائي اللازم لدفع تيار كهربائي شدته (2.4 A) من خلال سلك مقاومته (3.5 Ω).

٦ بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (6 V) تولّد تيارًا كهربائيًا ثابتًا شدته (2.4 A) لمدة 10 دقائق. احسب:

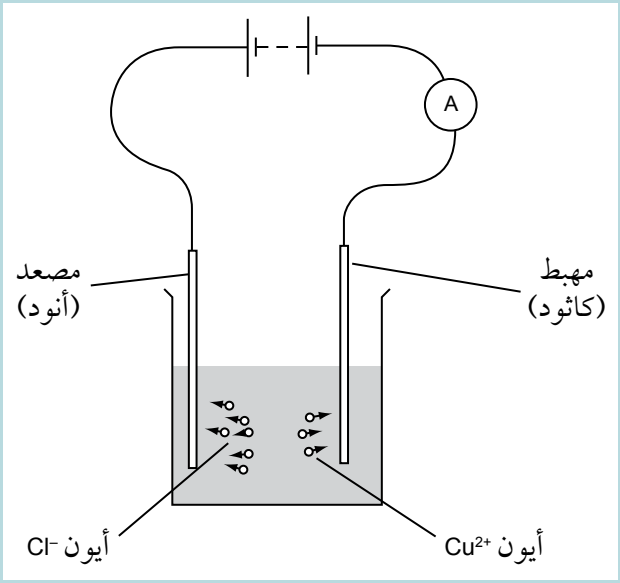
أ. الشحنة الكهربائية التي توفرها البطارية.

ب. الطاقة التي نقلتها الشحنة.

٧ احسب الطاقة التي يكتسبها إلكترون عندما يتسارع خلال فرق جهد كهربائي (50 kV). (الشحنة الكهربائية للإلكترون = -1.6×10^{-19} C).

تابع

٨ يبيّن الشكل ٣-٣١ التحليل الكهربائي لكلوريد النحاس.



الشكل ٣-٣١

أ. ١. حدّد على نسخة من الشكل اتجاه التيار الاصطلاحي في المحلول الإلكتروليتي. سمِّه التيار الاصطلاحي.

٢. حدّد اتجاه تدفق الإلكترونات في الأسلاك المتصلة. سمِّه تدفق الإلكترونات.

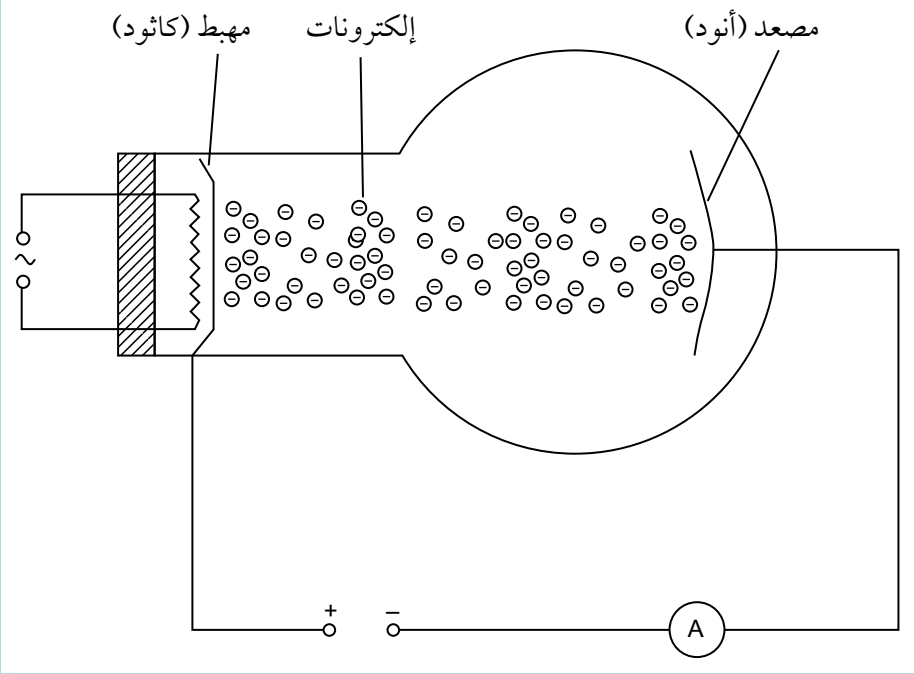
ب. في فترة زمنية مدتها 8 دقائق، يكون (3.6×10^{16}) أيون كلوريد (Cl^-) قد تعادلت وتحرّرت عند المصعد (الأنود) و (1.8×10^{16}) أيون نحاس (Cu^{2+}) قد تعادلت وترسّبت على المهبط (الكاثود).

١. احسب الشحنة الكهربائية الكلية التي تمر عبر المحلول الإلكتروليتي خلال هذا الزمن.

٢. احسب شدة التيار الكهربائي المارّ في الدائرة.

تابع

٩ يبيّن الشكل ٣-٣٢ أنبوب إلكترونات. تشكّل الإلكترونات التي تتحرك من المهبط إلى المصعد تيارًا كهربائيًا. شدة التيار الكهربائي في الأميتر هي (4.5 mA).



الشكل ٣-٣٢

أ. احسب الشحنة الكهربائية التي تمر عبر الأميتر خلال 3 دقائق.

ب. احسب عدد الإلكترونات التي تصطدم بالمصعد (الأنود) خلال 3 دقائق.

ج. فرق الجهد الكهربائي بين المهبط (الكاثود) والمصعد (الأنود) هو (75 V). احسب الطاقة التي يكتسبها إلكترون في أثناء انتقاله من المهبط (الكاثود) إلى المصعد (الأنود).

١٠ مساحة المقطع العرضي لمسار نحاسي على لوحة دوائر مطبوعة ($5.0 \times 10^{-8}\ m^2$)، وشدة التيار الكهربائي في المسار (3.5 mA)، تمّ تزويدك ببعض المعلومات المفيدة حول النحاس:

($1\ m^3$) من النحاس كتلته ($8.9 \times 10^3\ kg$).

يحتوي (54 kg) من النحاس على (6.0×10^{26}) ذرة.

يوجد في النحاس إلكترون واحد حرّ تقريبًا من كل ذرة نحاس.

أ. بيّن أن الكثافة العددية للإلكترونات في النحاس (n) تبلغ نحو ($10^{29}\ m^{-3}$).

ب. احسب متوسط السرعة المتجهة الانجرافية للإلكترونات.

تابع

١١ **أ.** اشرح الفرق بين فرق الجهد الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية.

ب. بطارية مقاومتها الداخلية مهملة، وقوتها الدافعة الكهربائية (12.0 V)، وسعتها الكلية المخزّنة (100 A h) (أمبير ساعة). احسب:

١. الشحنة الكهربائية الكلية التي يمكن أن توفرها.

٢. الطاقة الكلية التي يمكن أن تنقلها.

١٢ يقيس طالب المقاومة لكل وحدة طول من سلك مقاومة ويأخذ القياسات الآتية (الجدول ٣-٣).

الكميّة	القيمة	عدم اليقين
طول السلك	80 mm	±2%
التيار الكهربائي المارّ في السلك	2.4 A	±0.1 A
فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي السلك	8.9 V	±5%

الجدول ٣-٣

أ. احسب النسبة المئوية لعدم اليقين في قياس شدة التيار الكهربائي.

ب. احسب قيمة المقاومة لكل وحدة طول من السلك.

ج. احسب قيمة عدم اليقين المطلق للمقاومة لكل وحدة طول من السلك.

١٣ يتكوّن عنصر تسخين كهربائي من سلك نيكروم قطره (0.40 mm) وطوله (5.0 m). ومقاومة هذا العنصر هي (R_1). عنصر تسخين آخر مصنوع أيضًا من النيكروم طوله (2.0 m) وقطره (0.20 mm). هذا العنصر له مقاومة (R_2). ما العلاقة بين (R_1) و (R_2)؟

أ. $R_2 = 0.80\ R_1$

ب. $R_2 = 1.6\ R_1$

ج. $R_2 = 5.0\ R_1$

د. $R_2 = 10\ R_1$

١٤ سلك نيكروم طوله (1.5 m)، ومساحة مقطعه العرضي ($0.0080\ mm^2$)، والمقاومة النوعية للنيكروم تساوي ($1.30 \times 10^{-8}\ \Omega\ m$).

أ. احسب مقاومة السلك.

ب. احسب طول السلك اللازم لصنع مقاومة من النيكروم مقدارها (30 Ω) لسخان كهربائي.

١٥ **أ.** حدّد عاملَين آخرَين يحددان مقاومة سلك ما له طول ثابت.

ب. عندما يكون فرق الجهد الكهربائي (1.5 V) بين طرفَي سلك نحاسي معزول طوله (5.0 m) يمرّ به تيار كهربائي شدته (0.24 A).

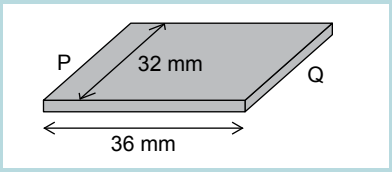
١. احسب مقاومة هذا الطول من السلك.

٢. احسب قطر السلك إذا علمت أن المقاومة النوعية للنحاس هي ($1.69 \times 10^{-8}\ \Omega\ m$).

تابع

ج. شُكّل السلك على شكل حزمة مشدودة، كيف تتوقع أن تتغيّر شدة التيار الكهربائي فيه؟ اشرح ذلك.

١٦ يُبيّن الشكل ٣-٣٣ قطعة من السيليكون بعرض (32 mm)، وطول (36 mm). مقاومة السليكون بين النقطتَين P و Q هي (1.1 MΩ)، والمقاومة النوعية للسيليكون تساوي (2.3×10^3 Ω m).



الشكل ٣-٣٣

أ. احسب سمك قطعة السليكون.

ب. احسب شدة التيار الكهربائي الذي يمر عبر السيليكون إذا طُبق عليه فرق جهد (12 V) بين P و Q.

١٧ القراءات المسجلة في الجدول ٣-٤ هي من تجربة لقياس المقاومة النوعية للفضّة.

قطر السلك	0.40 ± 0.02 mm
طول السلك	2.25 ± 0.05 m
مقاومة السلك	0.28 ± 0.01 Ω

الجدول ٣-٤

أ. احسب المقاومة النوعية للفضة.

ب. ١. احسب النسبة المئوية لعدم اليقين في كل المتغيّرات.

٢. استخدم إجاباتك على الجزئية (ب ١) لحساب قيمة عدم اليقين المطلق في قيمة المقاومة النوعية التي تمّ الحصول عليها من التجربة.

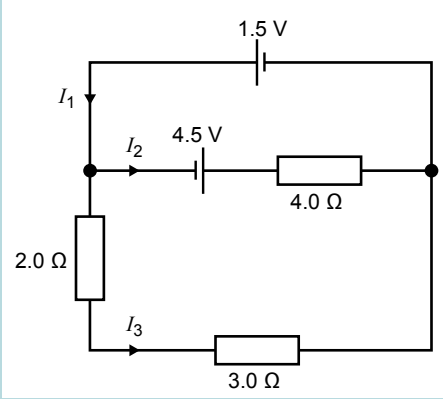
١٨ أيّ البدائل الآتية في الجدول ٣-٥ صحيح؟

أ	القانون الأول لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الشحنة الكهربائية.	القانون الثاني لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الشحنة الكهربائية.
ب	القانون الأول لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الشحنة الكهربائية.	القانون الثاني لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الطاقة.
ج	القانون الأول لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الطاقة.	القانون الثاني لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الشحنة الكهربائية.
د	القانون الأول لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الطاقة.	القانون الثاني لكيرشوف هو تعبير عن حفظ الطاقة.

الجدول ٣-٥

تابع

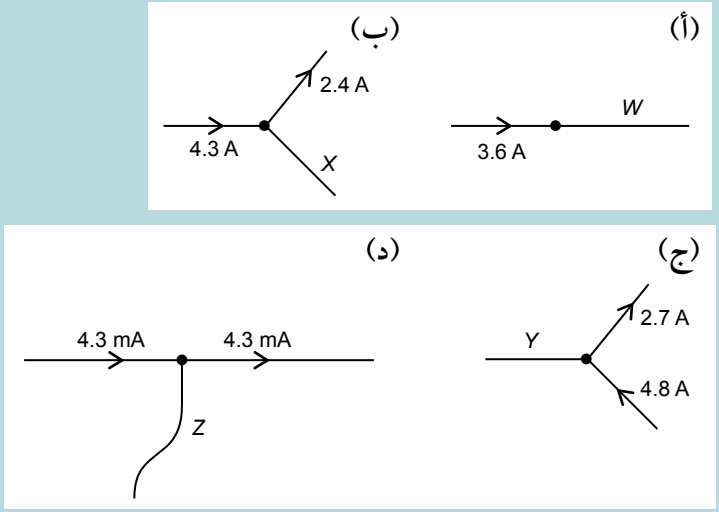
١٩ ما مقدار شدة التيار الكهربائي (I_1) المار في الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل ٣-٣٤؟



الشكل ٣-٣٤

أ. −0.45 A **ب.** +0.45 A **ج.** +1.2 A **د.** +1.8 A

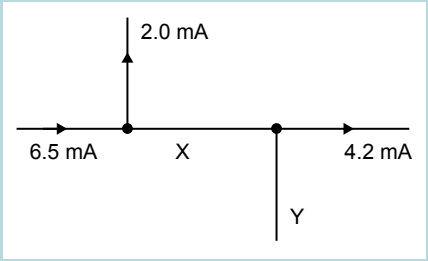
٢٠ استخدم القانون الأول لكيرشوف لحساب شدة التيار الكهربائي المجهولة في الشكل ٣-٣٥. حدّد اتجاه التيار الكهربائي في كل حالة.



الشكل ٣-٣٥

تابع

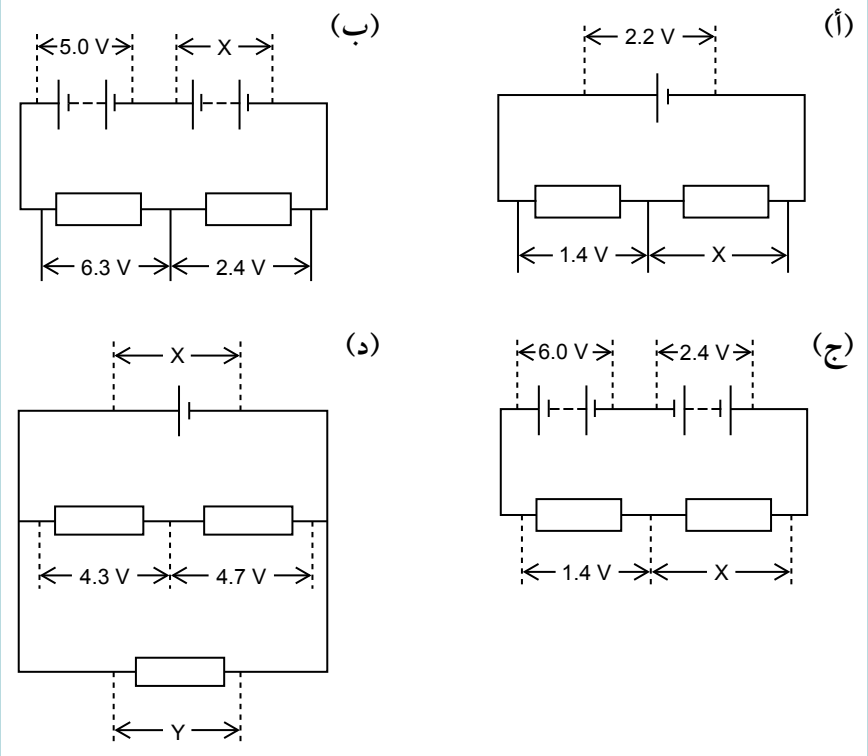
٢١ يبيّن الشكل ٣-٣٦ جزءًا من دائرة كهربائية.



الشكل ٣-٣٦

انسخ هذا الشكل واكتب شدّتَي التيارَين عند X و Y، وبيّن اتجاههما.

٢٢ حدّد فرق الجهد الكهربائي المجهول أو فروق الجهد الكهربائية في كل حالة لكل من الدوائر الأربع في الشكل ٣-٣٧.



الشكل ٣-٣٧

٢٣ مصباح ذو فتيل، ومقاومة (220 Ω) موصلان على التوالي ببطارية قوّتها الدافعة الكهربائية (6.0 V)، ومقاومتها الداخلية مهملة، وضع فولتميتر عالي المقاومة عبر المقاومة فقاس (1.8 V). احسب:

أ. شدة التيار الكهربائي المتدفق من البطارية.

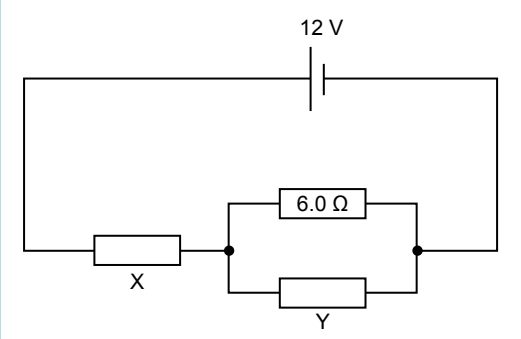
ب. فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المصباح.

تابع

ج. المقاومة الكلية للدائرة.

د. عدد الإلكترونات التي تمر عبر البطارية في زمن 1.0 دقيقة.
(الشحنة الكهربائية الأولية 1.6×10^{-19} C).

٢٤ يبيّن الشكل ٣–٣٨ دائرة حيث مصدر جهد كهربائي (12 V) متصل ببعض المقاومات.



الشكل ٣–٣٨

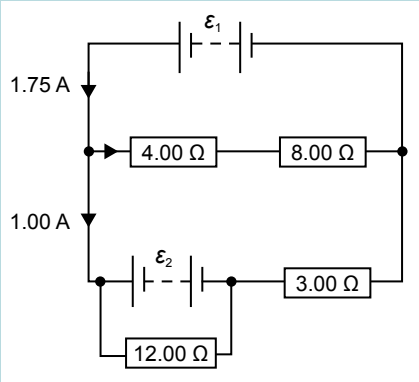
شدة التيار الكهربائي في المقاومة X هي (2.0 A)، وشدة التيار الكهربائي في المقاومة (6.0 Ω) تساوي (0.5 A). احسب:

أ. شدة التيار الكهربائي في المقاومة Y.

ب. مقدار المقاومة Y.

ج. مقدار المقاومة X.

٢٥ تحتوي الدائرة الكهربائية في الشكل ٣–٣٩ على بطاريتَين ومقاومات. اعتبر أن لكل من البطاريتَين مقاومة داخلية مهملة.



الشكل ٣–٣٩

أ. استخدم القانون الأول لكيرشوف لإيجاد شدة التيار الكهربائي في كل من المقاومتَين (4.00 Ω)، و (8.00 Ω).

ب. احسب القوة الدافعة الكهربائية (ε_1).

ج. احسب قيمة القوة الدافعة الكهربائية (ε_2).

د. احسب شدة التيار الكهربائي المارّ في المقاومة (12.00 Ω).

تابع

٢٦ وصّلت مقاومة مقدارها (6.0 Ω)، ومقاومة أخرى مقدارها (3.0 Ω) على التوازي ببطارية ذات قوة دافعة كهربائية (4.5 V)، ومقاومة داخلية (0.50 Ω).

ما شدة التيار الكهربائي المارّ في البطارية؟

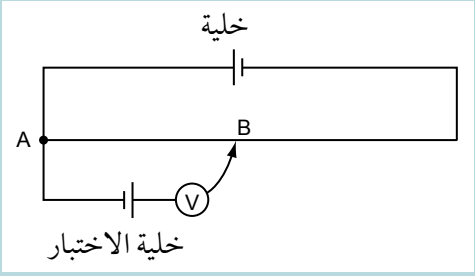
أ. 0.47 A **ب.** 1.8 A **ج.** 3.0 A **د.** 11 A

٢٧ وصّلت خلية كهربائية ذات قوة دافعة كهربائية (1.5 V) عبر مقاومة (0.30 Ω). شدة التيار الكهربائي المارّ في الدائرة (2.5 A).

أ. احسب فرق الجهد بين طرفَي الخلية، واشرح سبب عدم تساويه مع القوة الدافعة الكهربائية للخلية.

ب. بيّن أن المقاومة الداخلية (r) للخلية تساوي (0.30 Ω).

٢٨ يُطلب إلى طالب مقارنة القوة الدافعة الكهربائية لخلية قياسية ما ولخلية اختبار. يقوم الطالب بإعداد الدائرة المبيّنة في الشكل ٣-٤٠ باستخدام خلية الاختبار.



الشكل ٣-٤٠

أ. ١. اشرح سبب عدم قدرة الطالب على إيجاد نقطة اتزان، واذكر التغيير الذي يجب أن يقوم به من أجل تحقيق هذا الاتزان.

٢. اذكر كيف سيتعرف إلى نقطة الاتزان.

ب. يحدث الاتزان عندما تكون المسافة AB تساوي (22.5 cm). يكرّر الطالب التجربة مع خلية قياسية ذات قوة دافعة كهربائية (1.434 V)، وتكون نقطة الاتزان باستخدام هذه الخلية عند (34.6 cm). احسب قيمة القوة الدافعة الكهربائية لخلية الاختبار.

٢٩ **أ.** اشرح المقصود بالمقاومة الداخلية لخلية ما.

ب. عند توصيل خلية كهربائية على التوالي مع مقاومة مقدارها (2.00 Ω) يمرّ تيار كهربائي شدته (0.625 A)، فإذا تم توصيل مقاومة أخرى مقدارها (2.00 Ω) على التوالي مع المقاومة الأولى، فإن شدة التيار الكهربائي تنخفض إلى (0.341 A). احسب:

١. المقاومة الداخلية للخلية.

٢. القوة الدافعة الكهربائية للخلية.

تابع

ج. تحتاج بطارية السيارة إلى توفير تيار كهربائي شدته (200 A) لتدوير بادئ تشغيل المحرك. اشرح السبب في أن البطارية المكوّنة من خلايا متصلة على التوالي كالنوع الموصوف في الجزئية (ب) غير مناسبة لبطارية السيارة.

٣٠ **أ.** اذكر المقصود بالقوة الدافعة الكهربائية لخلية ما.

ب. يقوم طالب بتوصيل فولتميتر عالي المقاومة عبر طرفَي بطارية، ويلاحظ أنه يقرأ (8.94 V). ثم يقوم بتوصيل مقاومة (12 Ω) عبر طرفَيها فيجد أن فرق الجهد ينخفض إلى (8.40 V).

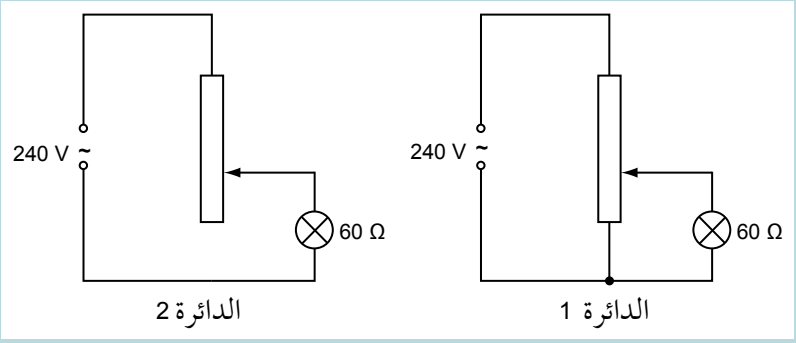
١. اشرح سبب انخفاض فرق الجهد الكهربائي المقاس.

٢. احسب شدة التيار الكهربائي المارّ في الدائرة.

٣. احسب المقاومة الداخلية للبطارية.

٤. اذكر أي افتراضات قمت بها في حساباتك.

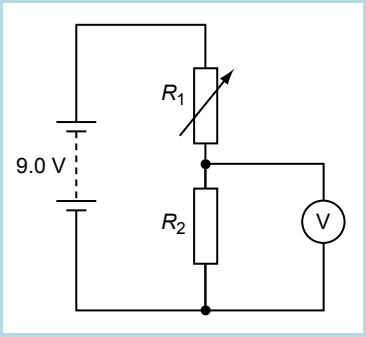
٣١ يبيّن الشكل ٣-٤١ دائرتَين يمكن استخدامهما للعمل كمفتاح لخفت ضوء مصباح. اشرح فائدة واحدة للدائرة 1 أكثر من الدائرة 2.



الشكل ٣-٤١

تابع

٣٢ تُبيّن الدائرة في الشكل ٣-٤٢ مجزئ جهد كهربائي. المقاومة الداخلية للبطارية مهملة والڤولتميتر له مقاومة لانهائية.



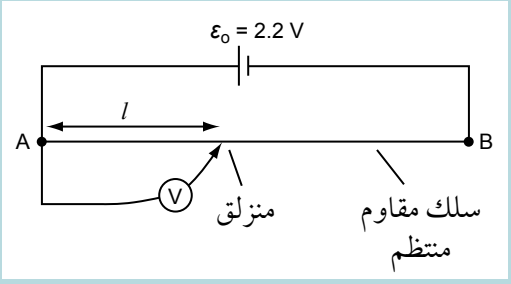
الشكل ٣-٤٢

أ. كيف ستتغير القراءة على الڤولتميتر عند ازدياد مقدار المقاومة المتغيّرة؟ اشرح إجابتك.

ب. المقاومة (R_2) لها مقاومة (470 Ω). احسب قيمة المقاومة المتغيّرة عندما تكون القراءة على الڤولتميتر (2.0 V).

ج. أُستبدل الڤولتميتر بآخر مقاومته (2 kΩ). احسب القراءة على هذا الڤولتميتر.

٣٣ يوضح الشكل ٣-٤٣ مقياس جهد كهربائي.



الشكل ٣-٤٣

أ. ١. مثّل بيانيًا القراءة على الڤولتميتر مقابل الطول (l)، وذلك كلما تحرك المنزلق من النقطة A إلى النقطة B.

٢. اذكر القراءة على الڤولتميتر عندما يكون المنزلق متصلًا بـ A وعندما يكون متصلًا بـ B (يمكنك افتراض أن المقاومة الداخلية للخلية الدافعة مهملة).

٣. ارسم رسمًا تخطيطيًا لدائرة تبيّن كيف يمكن أن يستخدم مقياس الجهد لمقارنة القوة الدافعة الكهربائية لبطاريتَين.

ب. عند توصيل زوج من المقاومات (4 Ω) على التوالي ببطارية، يتولّد تيار كهربائي مقداره (0.60 A) عبر البطارية. وعندما توصّل المقاومتان نفساهما على التوازي ثم توصلان عبر البطارية، يتولّد تيار كهربائي مقداره (1.50 A) عبر البطارية. احسب القوة الدافعة الكهربائية والمقاومة الداخلية للبطارية.

تابع

٣٤ يتكوّن مقياس جهد كهربائي من خلية دافعة متصلة بسلك مقاومة طوله (100 cm)، اُستُخدم لمقارنة مقدارَي مقاومتَين.

أ. ارسم مخططًا لتبيّن الدوائر المستخدمة لمقارنة المقاومتَين.

ب. عندما اختُبرت المقاومة (R_1) وحدها، كان طول سلك المقاومة لتحقيق الاتزان (15.4 cm). وقيمة عدم اليقين في قياس بداية سلك المقاومة (0.1 cm)، وقيمة عدم اليقين في تأكيد نقطة الاتزان مقدارها (0.1 cm) إضافية.

١. حدّد قيمة عدم اليقين في طول سلك الاتزان.

٢. عندما تُختبر (R_1) و (R_2) وهما على التوالي، يكون طول سلك الاتزان (42.6 cm)، وتكون قيم عدم اليقين مماثلة في قياس طول سلك الاتزان هذا.

أ. احسب نسبة $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

ب. احسب قيمة النسبة $\frac{R_1}{R_2}$.

ج. احسب قيمة عدم اليقين في قيمة النسبة $\frac{R_1}{R_2}$.

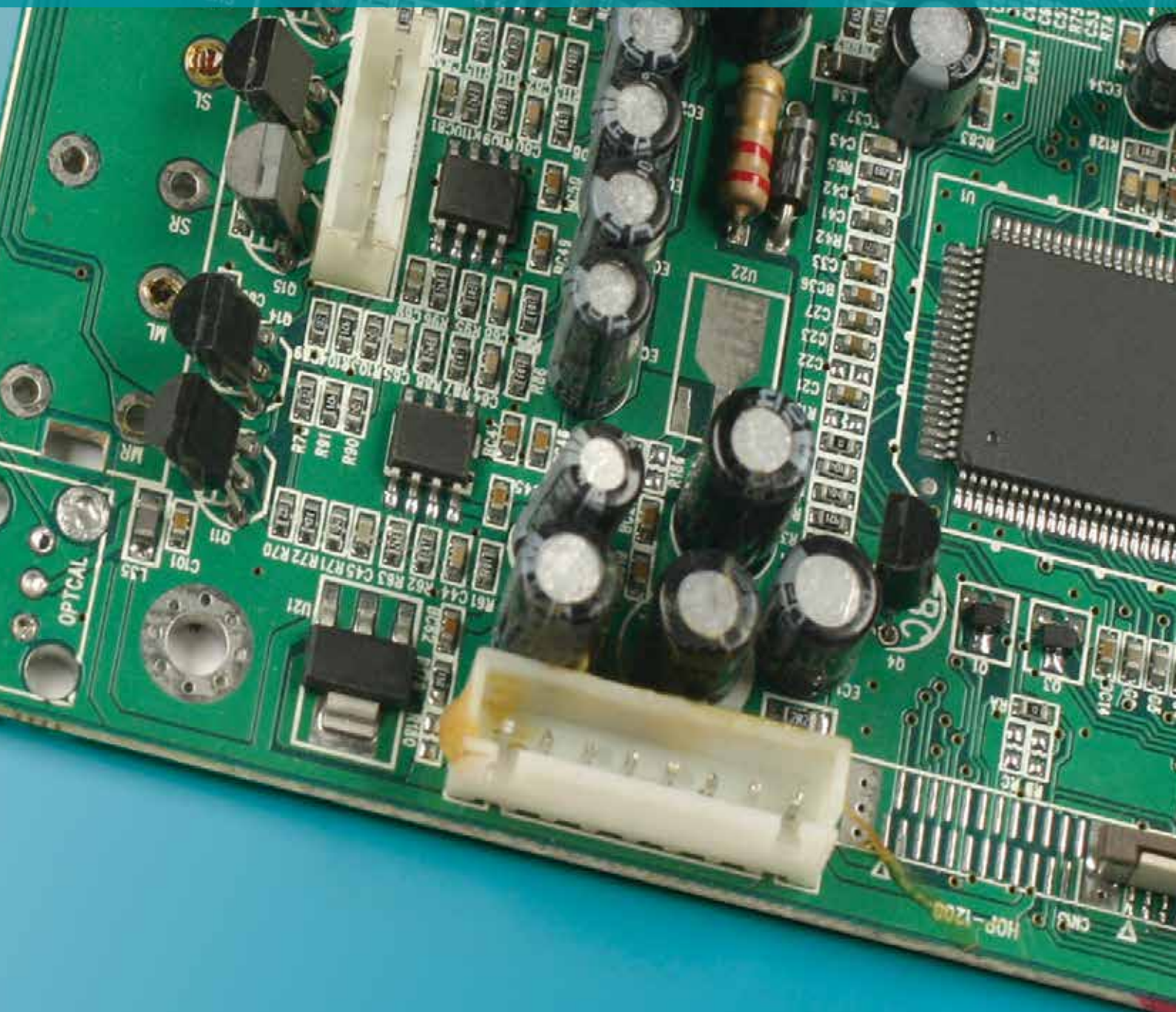
قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم طبيعة التيار الكهربائي.	٣–١			
أفهم مصطلح الشحنة الكهربائية وأتعرّف إلى وحدتها الكولوم.	٣–١			
أفهم أن الشحنة الكهربائية مكمّمة.	٣–١			
أحل مسائل باستخدام المعادلة: $Q = It$.	٣–١			
أحل مسائل باستخدام الصيغة: $I = nAvq$.	٣–١			
أحل مسائل تتضمن متوسط السرعة المتجهة الانجرافية لحاملات الشحنات.	٣–١			
أفهم مصطلح فرق الجهد الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية والفولت.	٣–٢			
أميّز بين فرق الجهد الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية.	٣–٢			
أحل مسائل باستخدام الصيغة: $V = \frac{W}{Q}$.	٣–٢			
أحل مسائل تتضمن المقاومة النوعية لمادة ما: $\rho = \frac{RA}{L}$ حيث (R) هي مقاومة السلك لتلك المادة، و (A) هي مساحة المقطع العرضي و (L) هي طول السلك. وحدة المقاومة النوعية هي أوم متر $(\Omega\ m)$.	٣–٣			
أذكر نص القانون الأول لكيرشوف وأستخدمه.	٣–٤			
أذكر نص القانون الثاني لكيرشوف وأستخدمه.	٣–٤			
أفهم مفهوم المقاومة الداخلية لمصدر قوة دافعة كهربائية.	٣–٥			
أحل مسائل تتضمن مقاومة داخلية، وقوة دافعة كهربائية، وفرق الجهد الكهربائي عبر المقاومة الداخلية.	٣–٥			
أتعرّف إلى مجزئ الجهد الكهربائي وأحل مسائل باستخدام المعادلة: $V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \times V_{in}$	٣–٥			
أستخدم مقياس الجهد الكهربائي لمقارنة فروق الجهد.	٣–٥			

الوحدة الرابعة

المكثفات Capacitors



أهداف التعلّم

٤-١ يعرّف سعة المكثف، عند تطبيقها على المكثفات المتوازية الألواح.

٤-٢ يستخدم المعادلة $C = \frac{Q}{V}$.

٤-٣ يستنتج معادلات السعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوالي والموصلة على التوازي مستخدمًا المعادلة $C = \frac{Q}{V}$.

٤-٤ يحسب السعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوالي والموصلة على التوازي.

٤-٥ يجد طاقة الوضع الكهربائية المخزّنة في مكثف من المساحة الواقعة تحت منحنى التمثيل البياني (الجهد الكهربائي - الشحنة الكهربائية).

٤-٦ يستخدم المعادلات $W = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$.

٤-٧ يحلّل التمثيلات البيانية لتغيّر كل من فرق الجهد الكهربائي والشحنة الكهربائية وشدة التيار الكهربائي مع الزمن لمكثف يُفرّغ عبر مقاومة ما.

٤-٨ يستخدم معادلة الثابت الزمني لمكثف يُفرّغ عبر مقاومة ما $\tau = RC$.

٤-٩ يستخدم معادلات بالصيغة $x = x_0 e^{-(t/RC)}$ حيث يمكن أن تمثّل x شدة التيار الكهربائي أو الشحنة الكهربائية أو فرق الجهد الكهربائي لمكثف يُفرّغ عبر مقاومة ما.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- لتجنب حدوث صدمة كهربائية يقوم مهندسو الكهرباء عادةً بتوصيل نقاط مختلفة من الأجهزة الكهربائية بالأرض، حتى لو كانت هذه الأجهزة مفصولة عن المصدر الكهربائي.
- لماذا يقوم المهندسون بذلك برأيك؟ كيف يمكن أن يصاب الشخص بصدمة كهربائية عندما لا تكون الأجهزة موصلة بالمصدر الكهربائي؟ ناقش ذلك مع زملائك.

العلوم ضمن سياقها

تحتوي معظم الأجهزة الإلكترونية، مثل التلفاز والحاسوب والألعاب الإلكترونية على مكوّنات تسمى مكثفات، وعادة ما تكون هذه المكوّنات صغيرة جدًا، لكن الصورة ٤-١ تبيّن مكثفًا عملاقًا بُني خصيصًا لتخزين الطاقة الكهربائية في مسرّع الجسيمات بمختبر فيرمي (Fermilab) في الولايات المتحدة.

مختبر فيرمي هو مختبر فيزياء الجسيمات والمسرعات، حيث تعمل مسرعات الجسيمات على تسريع الجسيمات مثل البروتونات حتى تصل إلى طاقات عالية بشكل مذهل، ويمكن لمسرّع «تيفاترون» في مختبر فيرمي تسريع البروتونات حتى طاقات تقارب 2 تيرا إلكترون فولت (1 TeV = 10^{12} eV)، وهذا يتطلب نبضات من فرق جهد كهربائي عالية الطاقة وقصيرة الأمد (النبضة 100 kV وتستمر لمدة قصيرة جدًا مقدارها 10^{-5} s)، ومثل هذه النبضات يمكن أن تعطّل المصدر

الصورة ٤-١ أحد أكبر المكثفات في العالم؛ بُني لتخزين الطاقة في مسرّع الجسيمات في مختبر فيرمي.

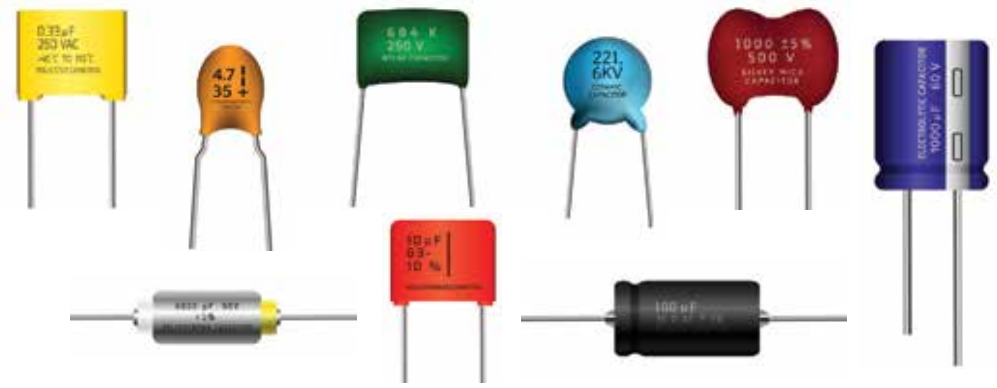
العلوم ضمن سياقها (تابع)

العام للكهرباء، ولضمان بقاء تحميل هذا المصدر وعدم تعطّله بسبب هذه النبضات العالية، فإن مكثفات كبيرة (أجهزة تخزين الطاقة المؤقتة) تُشحن وتُفرغ 50 مرة في الثانية باستمرار.

تولّد توربينات الرياح والخلايا الشمسية الطاقة في الظروف الجوية المناسبة فقط. هل يمكن استخدام المكثفات الكبيرة لتخزين هذه الطاقة من أجل استخدامها في أوقات لا تكون فيها الظروف الجوية مناسبة؟ وإلّا فكيف يمكن تخزين الطاقة بدونها؟

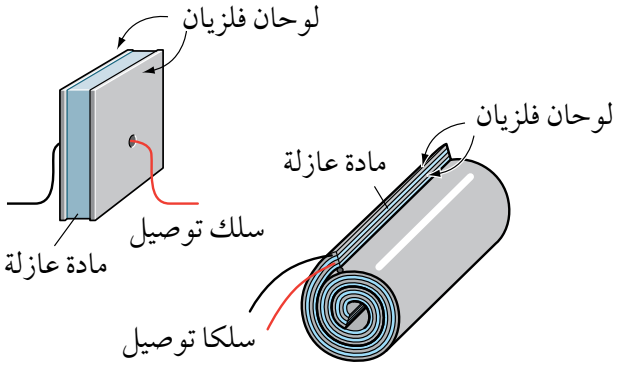
٤-١ التعرف على المكثفات

تُستخدم المكثفات لتخزين الطاقة في الدوائر الكهربائية والإلكترونية، وهذا يعني أن للمكثفات تطبيقات قيّمة عديدة، على سبيل المثال تستخدم المكثفات في أجهزة الحاسوب؛ حيث تعمل على تخزين الطاقة في حالة الاستخدام العادي ثم تحرّر هذه الطاقة تدريجيًا في حالة انقطاع الطاقة الكهربائية فجأةً، بحيث يعمل الحاسوب لفترة كافية على حفظ البيانات، وتبيّن الصورة ٤-٢ مجموعة من المكثفات متنوعة الأشكال والأحجام. ويمكن استخدام المكثفات في الدوائر الكهربائية لتخزين الطاقة وتأخير الزمن وكأجهزة تقاوم زيادة شدة التيار الكهربائي وتقاوم حدوث الشرر.



الصورة ٤-٢ مجموعة متنوعة من المكثفات.

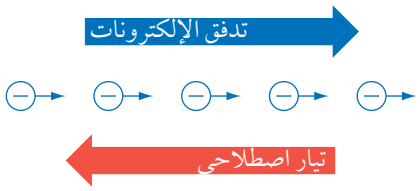
يتكوّن المكثف من لوحَين فلزيّين تفصل بينهما مادة عازلة، ويتصل كل لوح بسلك توصيل، ولتخزين الطاقة يجب إعطاء هذين اللوحَين شحنة كهربائية متساوية في المقدار ومتعاكسة في النوع، يبيّن الشكل ٤-١ تركيب أبسط أشكال المكثفات، وعمليًا العديد من المكثفات تأتي بشكل حلزوني، ويُرمز إلى المكثف عند رسم مخططات الدوائر الكهربائية بالرمز ⊣⊢.



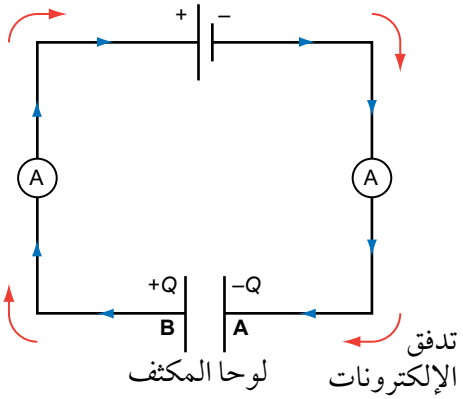
الشكل ٤-١ بُنية نوعَين من المكثفات.

الشحنة الكهربائية على لوحَي المكثف

لتحريك الشحنات إلى لوحَي المكثف يجب توصيلهما بمصدر جهد كهربائي كما في الشكل ٤-٢، بحيث يدفع الطرف السالب للمصدر إلكترونات إلى أحد اللوحَين، الأمر الذي يجعل اللوح A سالب الشحنة الكهربائية؛ وتتنافر هذه الإلكترونات مع الإلكترونات الموجودة في اللوح B لتندفع إلى الطرف الموجب للمصدر ويصبح هذا اللوح موجب الشحنة. يبيّن الشكل ٤-٢ أن هناك تدفقًا للإلكترونات على طول مسار الدائرة، وسيعطي الأميتران القراءة نفسها، وسيتوقف التيار الكهربائي عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف مساويًا للقوة الدافعة الكهربائية للمصدر، عندئذٍ يصبح المكثف «مشحونًا تمامًا»، وعليك أن تتذكر بأن التيار الاصطلاحي هو تدفق للشحنات الموجبة ويكون معاكسًا لاتجاه تدفق الإلكترونات كما هو مبين في الشكل ٤-٣.



الشكل ٤-٣ ينشأ من تدفق الإلكترونات إلى اليمين هنا تيار اصطلاحي إلى اليسار.



الشكل ٤-٢ تدفق الإلكترونات أثناء شحن المكثف.

فكّر في مكثف ذي لوحَين غير مشحونَين، فكل لوح يمتلك كميّتَين متساويتَين من الشحنات الكهربائية الموجبة والسالبة، وعند توصيل المكثف بمصدر كهرباء فإنه يسحب الإلكترونات من أحد اللوحَين وينقلها إلى اللوح الآخر، تاركًا اللوح وراءه مشحونًا بشحنة كهربائية موجبة (+Q)، ولوح المكثف الذي يكسب الإلكترونات يكتسب شحنة سالبة (−Q)؛ فيكون المصدر قد بذل شغلًا في فصل الشحنات، ونظرًا إلى أن اللوحَين يخزّنان الآن شحنتَين كهربائيتَين متساويتين في المقدار ومتعاكستين في النوع، تكون الشحنة الكهربائية الكلية للمكثف صفرًا، وعندما نتحدث عن «الشحنة الكهربائية المخزّنة» بواسطة مكثف فإننا نعني الكميّة (Q)، أيّ مقدار الشحنة الكهربائية المخزّنة على كل لوح، ولجعل لوحَي المكثف يخزّنان مزيدًا من الشحنة الكهربائية (إذا كان غير مشحون كلّيًا) فإن ذلك يتطلّب استخدام مصدر قوة دافعة كهربائية أعلى.

أما لتفريغ المكثف فإنه يتم توصيل سلكَي المكثف معًا؛ حيث تتدفق الإلكترونات من اللوح السالب عائدة نحو اللوح الموجب على طول مسار الدائرة، ويفرغ المكثف ليصبح متعادلًا. يمكنك ملاحظة تفريغ المكثف على النحو الآتي: صِل سلكَي توصيل المكثف بطرفَي بطارية، ثم افصِل السلكَين ثم أعِد توصيلهما بوَصلة ثنائية ضوئية (LED) فستلاحظ أن مصباح الـ (LED) سيتوهج لفترة وجيزة في أثناء تفريغ المكثف (من الأفضل توصيل مقاومة حماية مع الوصلة الثنائية الضوئية على التوالي).

في أي دائرة كهربائية تكون الشحنة الكهربائية التي تعبر نقطة في زمن معيّن مساوية للمساحة الواقعة تحت منحنى التمثيل البياني (شدة التيار الكهربائي - الزمن) المقاسة في أثناء شحن المكثف.

السعة الكهربائية

إذا نظرت إلى بعض المكثفات فسترى أنه يُكتب عليها قيمة **السعة الكهربائية Electric capacitance** الخاصة بها، وكلما ازدادت السعة ازدادت الشحنة الكهربائية على لوحَي المكثف لفرق جهد كهربائي معيّن بين لوحَيه.

تُعرّف السعة (C) لمكثف ما بأنها الشحنة الكهربائية المخزّنة على لوحَي المكثف لكل وحدة فرق جهد كهربائي بين اللوحَين، وتعطى بالمعادلة:

$$\text{السعة} = \frac{\text{الشحنة الكهربائية}}{\text{فرق الجهد الكهربائي}}$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

مصطلحات علمية

السعة الكهربائية Electric capacitance: سعة المكثف هي الشحنة الكهربائية المخزّنة على لوحَي المكثف لكل وحدة فرق جهد كهربائي بين اللوحَين.

حيث (Q) مقدار الشحنة الكهربائية على كل لوح من لوحَي المكثف و (V) فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف، ويمكن حساب شحنة المكثف باستخدام المعادلة:

$$Q = CV$$

تبيّن هذه المعادلة أن الشحنة الكهربائية تعتمد على عاملَين هما: السعة (C)، وفرق الجهد الكهربائي (V) (فمضاعفة فرق الجهد الكهربائي يعني مضاعفة الشحنة الكهربائية). لاحظ أن السعة ليست فقط للمكثفات؛ إذ يمكن شحن أي جسم بواسطة توصيله بمصدر جهد كهربائي. عندئذ تكون سعة الجسم هي نسبة الشحنة الكهربائية إلى فرق الجهد الكهربائي.

وحدات قياس السعة الكهربائية

وحدة قياس السعة الكهربائية هي **الفاراد farad (F)**، ويمكنك أن ترى من معادلة السعة أن الفاراد يكافئ وحدة الشحنة (C) مقسومة على وحدة فرق الجهد الكهربائي (V):

$$1\ \text{F} = 1\ \text{C V}^{-1}$$

مصطلحات علمية

الفاراد farad: هو سعة مكثف يزداد فرق الجهد بين لوحَيه بمقدار فولت واحد عندما يشحن بشحنة مقدارها واحد كولوم. وهو وحدة قياس سعة المكثف (ويُرمز إليها بالرمز F)؛
$1\ \text{F} = 1\ \text{C V}^{-1}$

إن وحدة الفاراد وحدة كبيرة لا تتناسب مع المكثفات المستخدمة في الدوائر الإلكترونية للأجهزة وذلك من الناحية العملية، ولكن هناك وحدات صغيرة جدًا تتناسب عمليًا مع الصناعات الإلكترونية لذلك غالبًا ما نحتاج إلى استخدام البادئات للتعبير عن قيم سعات المكثفات فتُكتب بالبيكوفاراد (pF) أو النانوفاراد (nF) أو الميكروفارد (μF).

$$1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F} \qquad 1\ \text{nF} = 10^{-9}\ \text{F} \qquad 1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}$$

المزيد عن المكثفات

تتميز العديد من المكثفات بمستوى أمان حيث يكتب عليها أعلى قيمة لفرق الجهد الكهربائي الآمن لتشغيلها، فإذا تجاوزت هذه القيمة فإن الشحنة الكهربائية قد تتسرب بين اللوحَين، وستتوقف المادة العازلة عن كونها عازلة، ويجب توصيل بعض المكثفات مثل المكثفات الإلكتروليتية بشكل صحيح في الدائرة، وتوضح الإشارة المطبوعة عليها الطرف

الذي يجب توصيله بالطرف الموجب للمصدر؛ لأن التوصيل غير الصحيح سيؤدي إلى تلف المكثف، ويمكن أن يكون ذلك في غاية الخطورة.

مثال

١. مكثف سعته (5.0 mF) يخزّن شحنة مقدارها (45 mC). احسب فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه.

الخطوة ١: نكتب الكميّات التي نعرفها:

$C = 5.0\ \text{mF} = 5.0 \times 10^{-3}\ \text{F}$

$Q = 45\ \text{mC} = 45 \times 10^{-3}\ \text{C}$

الخطوة ٢: اكتب معادلة السعة وعوّض القيم فيها:

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{45 \times 10^{-3}}{5.0 \times 10^{-3}} = 9.0\ \text{V}$$

أسئلة

١ احسب الشحنة الكهربائية على مكثف سعته (220 μF) شُحن ليصبح فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (15 V). أعطِ إجابتك بوحدة ميكروكولوم (μC)، وبوحدة الكولوم (C).

٢ قيست شحنة كهربائية على مكثف فكانت (1.0×10^{-3} C) عندما كان فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (500 V). احسب سعته بالفاراد (F)، والميكروفاراد (μF)، والبيكوفاراد (pF).

٣ احسب متوسط شدة التيار الكهربائي المطلوب لشحن مكثف سعته (50 μF) ليصبح فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (10 V) في فترة زمنية مقدارها (0.01 s).

٤ وصّل زياد مكثفًا غير مشحون سعته (C) على التوالي مع مقاومة، وخلية، ومفتاح، ثم أغلق المفتاح وقاس شدة التيار الكهربائي (I) كل (10 s) (النتائج مبيّنة في الجدول ٤-١). بعد (60 s) أصبح فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف (8.5 V). مثّل بيانيًا (شدة التيار الكهربائي - الزمن)، واستخدمه لتقدير قيمة (C).

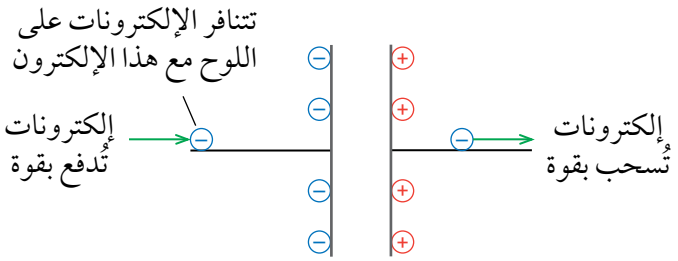
الزمن (s)	0	10	20	30	40	50	60
شدة التيار الكهربائي (μA)	200	142	102	75	51	37	27

الجدول ٤-١

٤-٢ الطاقة المخزنة في مكثف

عندما تشحن مكثفًا فإنك تستخدم مصدر جهد كهربائي لدفع الإلكترونات إلى أحد اللوحَين وسحبها من الآخر، ويبذل مصدر الجهد الكهربائي شغلًا على الإلكترونات وبالتالي تزداد طاقة وضعها، ويمكنك استعادة هذه الطاقة عندما تفرّغ المكثف، فمثلًا إذا شحنت مكثفًا سعته كبيرة (1000 μF أو أكثر) بفرق جهد كهربائي (6.0 V)، وفصلته عن المصدر ثم وصلته عبر مصباح (6.0 V)، عندها يمكنك رؤية توهّج المصباح في أثناء تحرّر الطاقة من المكثف، حيث يومض المصباح لفترة وجيزة، فمن الواضح أن مثل هذا المكثف لا يخزّن الكثير من الطاقة الكهربائية عند شحنه.

ومن أجل شحن المكثف يجب بذل شغل؛ وذلك لدفع إلكترونات إلى أحد لوحَي المكثف وسحبها من الآخر (الشكل ٤-٤)، حيث توجد في البداية كميّة صغيرة فقط من الشحنة الكهربائية السالبة على اللوح الأيسر، ويُعدّ إضافة مزيد من الإلكترونات في البداية سهلًا نسبيًا؛ لأنه لا توجد قوة تنافر كبيرة، ومع زيادة الشحنة الكهربائية السالبة على اللوح تزداد قوة التنافر بين الإلكترونات الموجودة على اللوح والإلكترونات الجديدة، لذلك يجب بذل شغل أكبر لزيادة الشحنة الكهربائية على اللوح.



الشكل ٤-٤ يجب بذل شغل أكبر عند شحن مكثف من أجل دفع إلكترونات إضافية للتغلب على قوة تنافرها مع الإلكترونات الموجودة على اللوح.

يمكن ملاحظة ذلك نوعيًا (بدون قيم) في الشكل ٤-٥ (أ). حيث يبيّن هذا التمثيل البياني كيف أن فرق الجهد الكهربائي (V) يزداد مع ازدياد مقدار الشحنة الكهربائية (Q)، فالتمثيل البياني هو خط مستقيم؛ لأن (Q) و (V) مرتبطتان بالمعادلة:

$$V = \frac{Q}{C}$$

يمكننا استخدام الشكل ٤-٥ (أ) لحساب الشغل المبذول لشحن المكثف.

الشغل المبذول (W) في نقل الشحنة الكهربائية (Q) عند فرق جهد كهربائي ثابت (V) يعطى بالمعادلة:

$$W = QV$$

لقد درست هذه المعادلة في الوحدة الثالثة، ويمكنك أن ترى من التمثيل البياني لـ (V) مقابل (Q) (الشكل ٤-٥ ب)، أن المساحة تحت منحنى التمثيل البياني تمثل الكمية $Q \times V$ وهي عبارة عن الشغل المبذول لدفع شحنة كهربائية عبر مقاومة ما.

إذا طبّقنا الفكرة نفسها على التمثيل البياني للمكثف (الشكل ٤-٥ أ)، فإن المساحة تحت منحنى التمثيل البياني هي عبارة عن المثلث المظلّل (مساحته = $\frac{1}{2}$ قاعدته × ارتفاعه)؛ لذلك فإن الشغل المبذول في شحن مكثف ليصل إلى فرق جهد كهربائي معيّن يُعطى من خلال المعادلة:

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

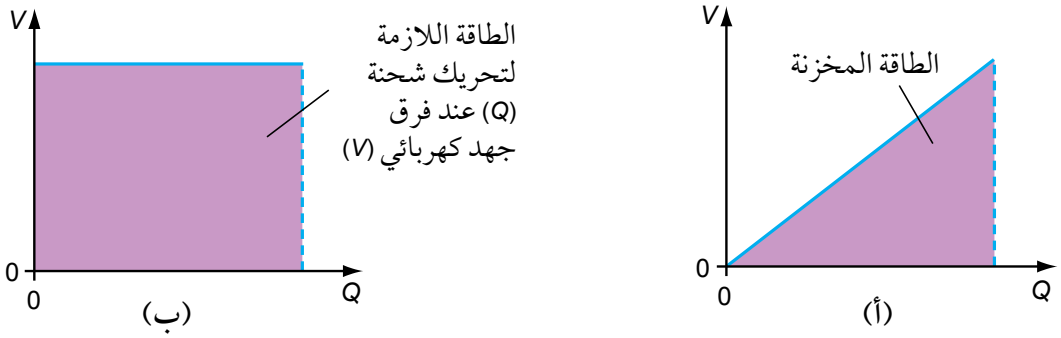
وبالتعويض عن $Q = CV$ في المعادلة السابقة نحصل على معادلتَين أخريَين:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

حيث (W): الطاقة المخزّنة، و (Q): الشحنة الكهربائية المخزّنة على المكثف، و (C): سعة المكثف، و (V): فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف.

تبيّن هذه المعادلات الثلاث الشغل المبذول في شحن المكثف، وهذا الشغل يساوي الطاقة المخزّنة في المكثف؛ وهي تساوي كميّة الطاقة المتحرّرة عند تفريغ المكثف.



الشكل ٤-٥ المساحة تحت منحنى التمثيل البياني لفرق الجهد الكهربائي مقابل الشحنة الكهربائية تمثل كميّة من الطاقة. (أ) تمثل المساحة تحت المنحنى الطاقة المخزّنة في مكثف؛ (ب) تمثل المساحة تحت المنحنى الطاقة اللازمة لدفع شحنة كهربائية عبر مقاومة.

يمكننا أن نرى من الصيغة الثانية ($W = \frac{1}{2} CV^2$) أن الطاقة (W) التي يخزّنها المكثف تعتمد على كل من سعته (C)، وفرق الجهد الكهربائي (V) الذي شُحن عنده. (لقد تم التركيز على الصيغة الثانية بدل الصيغتين في مناقشة العوامل التي تعتمد عليها الطاقة المخزنة؛ لأن هذه هي العوامل التي يمكن التحكم بها (أو ضبطها)، فيمكننا اختيار المكثفات ذات السعات المختلفة وشحنها بدرجات مختلفة، لذلك من الصعب التحكم في مقدار الشحنة الكهربائية).

تتناسب الطاقة (W) المخزّنة طرديًا مع مربع فرق الجهد الكهربائي (V)؛ حيث ($W \propto V^2$) أي أن عند مضاعفة فرق الجهد الكهربائي فإن الطاقة المخزّنة تتضاعف إلى أربعة أمثال ما كانت عليه.

الشغل المبذول في شحن مكثف:

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

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

مثال

٢. شُحن مكثف سعته (2000 μF) ليصبح فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (10 V). احسب الطاقة المخزّنة في المكثف.

الخطوة ١: نكتب الكميّات التي نعرفها:

$C = 2000\ \mu F = 2000 \times 10^{-6}\ F$

$V = 10\ V$

الخطوة ٢: اكتب معادلة الطاقة المخزّنة وعوّض القيم فيها:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 2000 \times 10^{-6} \times 10^2 = 0.1\ J$$

هذه كمية صغيرة من الطاقة، عند مقارنتها بالطاقة المخزّنة بواسطة بطارية قابلة لإعادة الشحن، والتي تقدّر عادة بحدود (10 kJ). نجد أنه لا يمكن استخدام المكثف المشحون لتشغيل مشغل (MP3) ولو لفترة قصيرة جدًا.

أسئلة

٥ ما الكميّة التي يمثلها ميل الخط المستقيم المبيّن في الشكل ٤-٥ (أ)؟

٦ يبيّن التمثيل البياني في الشكل ٤-٦ كيف تعتمد (V) على (Q) لمكثف معيّن.

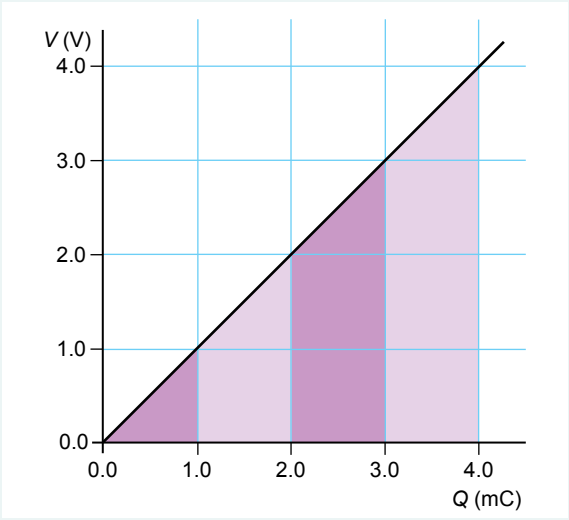
قُسمت المنطقة الواقعة تحت منحنى التمثيل البياني إلى أعمدة لتسهيل حساب الطاقة المخزّنة. فيبيّن العمود الأول (وهو ببساطة مثلث) الطاقة المخزّنة. عند شحن المكثف حتى يصبح فرق الجهد بين لوحَيه (1.0 V)، ويمكن حساب الطاقة المخزّنة كالآتي:

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} \times 1.0\ \text{mC} \times 1.0\ \text{V}$$
$$= 0.50\ \text{mJ}$$

أ. احسب السعة الكهربائية (C) للمكثف.

ب. انسخ الجدول ٤-٢ وأكمله بحساب مساحات الأعمدة المتتالية، لتبيّن كيف تعتمد الطاقة المخزنة (W) على فرق الجهد الكهربائي (V).

ج. ارسم تمثيلًا بيانيًا لـ (W) مقابل (V). صِف شكل التمثيل البياني الذي رسمته.



الشكل ٤-٦ الطاقة المخزّنة في مكثف تساوي المساحة تحت منحنى التمثيل البياني (فرق الجهد الكهربائي- الشحنة الكهربائية).

Q (mC)	V (V)	مساحة العمود ΔW (mJ)	مجموع المساحات W (mJ)
1.0	1.0	0.5	0.5
2.0	2.0	1.5	2.0
3.0			
4.0			

الجدول ٤-٢ بيانات السؤال ٦.

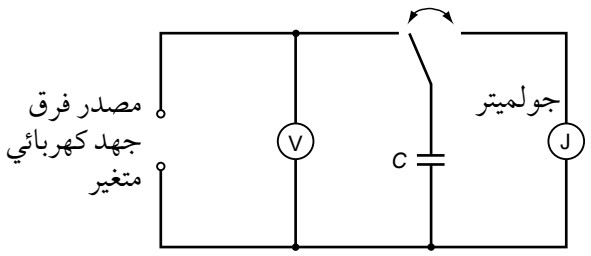
مهارة عملية ٤-١

استقصاء الطاقة المخزّنة في مكثف

يمكنك استقصاء معادلة الطاقة المخزّنة في المكثف، من خلال توصيل جهاز «جولميتر» حساس (جهاز قادر على قياس الطاقة بوحدة الميلي جول mJ) بدائرة كهربائية كالموضحة في الشكل ٤-٧.

يُشحن المكثف عندما يوصل المفتاح بمصدر فرق الجهد الكهربائي. وعندما يوصل المفتاح بالجولميتر يُفرّغ المكثف خلال الجولميتر (من المهم انتظار المكثف لتفريغه تمامًا). سيقيس الجولميتر كمية الطاقة التي حرّرها المكثف.

باستخدام مكثفات ذات سعات (C) مختلفة وبواسطة تغيير فرق الجهد الكهربائي (V)، يمكنك استقصاء كيف تعتمد الطاقة المخزّنة (W) على (C) و (V).



الشكل ٤-٧ عندما يكون المفتاح إلى اليسار يُشحن المكثف C، وعندما يكون إلى اليمين يُفرغ المكثف من خلال الجولميتر.

أسئلة

(٧) احسب الطاقة المخزّنة في المكثفات الآتية:
أ. مكثف سعته (5000 μF) مشحون إلى (5.0 V).
ب. مكثف سعته (5000 pF) مشحون إلى (5.0 V).
ج. مكثف سعته (200 μF) مشحون إلى (230 V).

(٨) أيّ مكثف يمتلك شحنة أكبر، مكثف سعته (100 μF) مشحون إلى (200 V) أم مكثف سعته (200 μF) مشحون إلى (100 V)؟ وأيّهما يخزّن طاقة أكبر؟

(٩) مكثف سعته (10000 μF) مشحون إلى (12 V)، وصّل بين طرفَي مصباح مكتوب عليه «12 V، 36 W».
احسب الطاقة المخزّنة بواسطة المكثف.

(١٠) في الوماض (الفلاش) المستخدم في التصوير يُشحن مكثف سعته (0.20 F) بواسطة بطارية (9.0 V)، ثم يُفرّغ في ومضة (فلاش) مدتها (0.01 s). احسب:
أ. الشحنة الكهربائية على المكثف، والطاقة المخزّنة فيه.
ب. متوسط شدة التيار الكهربائي في مصباح الوميض (الفلاش).

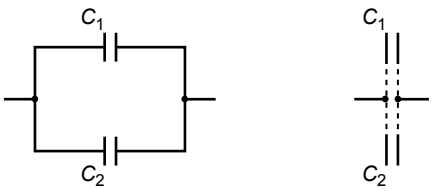
٤-٣ توصيل المكثفات على التوازي

تُستخدم المكثفات في الدوائر الكهربائية لتخزين الطاقة، وتوصّل مع بعضها في الدوائر الكهربائية بطرائق مختلفة، ستدرس في هذا الموضوع المكثفات الموصلة على التوازي، وسيتناول الموضوع التالي المكثفات الموصلة على التوالي.

عندما يُوصل مكثفان على التوازي (الشكل ٤-٨)، فإن السعة المكافئة أو الكلية (C_T) تساوي مجموع سعتَيهما الفردية (C_1) و (C_2):

$$C_T = C_1 + C_2$$

وتُجمع سعتاهما لأنه عندما يوصل مكثفان معًا فإنهما يكافئان مكثفًا واحدًا بألواح أكبر، وكلما كانت الألواح أكبر ازدادت الشحنة الكهربائية التي يمكن تخزينها لفرق جهد كهربائي معيّن وبالتالي تزداد السعة.



الشكل ٤-٨ المكثفان الموصلان على التوازي يكافئان مكثفًا واحدًا أكبر.

ويمكن إيجاد الشحنة الكهربائية المكافئة (Q_T) على مكثفَين موصلَين على التوازي ومشحونَين إلى فرق جهد كهربائي (V) من خلال المعادلة:

$$Q_T = C_T V$$

وبالتالي تكون معادلة السعة المكافئة بالنسبة إلى ثلاثة مكثفات أو أكثر موصلة على التوازي، كما يأتي:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

استنتاج السعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوازي

يمكننا استنتاج معادلة السعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوازي من خلال شحنة المكثفَين، فكما هو مبيّن في الشكل ٤–٩، يخزّن المكثف (C_1) شحنة (Q_1)، ويخزّن المكثف (C_2) شحنة (Q_2). وبما أن فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي كل مكثف هو (V)، لذلك يمكننا كتابة الآتي:

$$Q_1 = C_1 V$$

$$Q_2 = C_2 V$$

ويمكن إيجاد الشحنة الكهربائية المكافئة بواسطة جمع هاتَين المعادلتَين:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 = C_1 V + C_2 V$$

وبما أن فرق الجهد الكهربائي (V) متساوٍ للمكثفَين (عامل مشترك) فإن:

$$Q_T = (C_1 + C_2)V$$

وعند مقارنة هذا بالمعادلة $Q_T = C_T V$ نجد أن السعة المكافئة تساوي $C_T = C_1 + C_2$.

وينطبق ذلك على ثلاثة مكثفات أو أكثر موصلة على التوازي فيكون لدينا:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

تنطبق القواعد الآتية على المكثفات الموصلة على التوازي:

- فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي كل مكثف متساوٍ.
- شحنة المكثفات الكلية تساوي مجموع شحناتها:

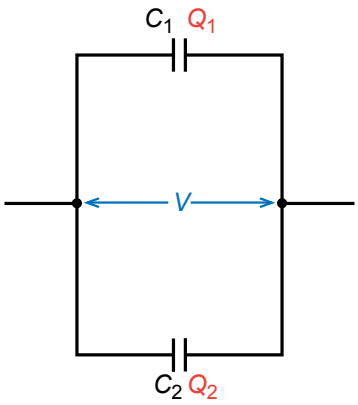
$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots$$

- تعطى السعة المكافئة (C_T) بالمعادلة:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

مهمّ

عند توصيل المكثفات على التوازي، يجب أن تكون السعة المكافئة لها أكبر من قيمة أكبر سعة للمكثفات التي تم توصيلها.



الشكل ٤–٩ مكثفان موصلان على التوازي حيث أن فرق الجهد الكهربائي هو نفسه بين لوحَي كل منهما، ولكن لهما كميّتان مختلفتان من الشحنة الكهربائية.

أسئلة

(١١) أ. احسب السعة المكافئة لمكثفَين موصلَين على التوازي سعة كل منهما (100 μF).

ب. احسب الشحنة الكهربائية الكلية التي يخزنها المكثفان عندما يُشحنان إلى فرق جهد كهربائي (20 V).

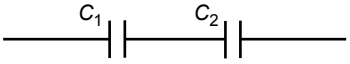
(١٢) كيف يمكنك الحصول على مكثف سعته (50 μF)، إذا كانت سعات المكثفات المتوفرة لديك هي (10 μF) و (20 μF) و (100 μF)؟ (يمكنك استخدام أي قيمة من هذه القيم أكثر من مرة). كيف ستحقِّق القيمة المطلوبة بواسطة توصيل المكثفات على التوازي؟ أعطِ ما لا يقل عن إجابتَين.

٤-٤ توصيل المكثفات على التوالي

يمكننا النظر بطريقة مشابهة لتوصيل المكثفات على التوازي، وذلك بأخذ مكثفَين أو أكثر من المكثفات وتوصيلها على التوالي (الشكل ٤-١٠).

تُعطى السعة المكافئة (C_T) لمكثفَين سعتاهما (C_1) و (C_2) موصلَين على التوالي من خلال المعادلة:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$



الشكل ٤-١٠ مكثفان موصلان على التوالي.

لاحظ في هذه الحالة أن مجموع مقلوب السعات يُعطي مقلوب السعة المكافئة، ولثلاثة مكثفات أو أكثر من المكثفات الموصلة على التوالي، تكون معادلة السعة المكافئة هي:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots$$

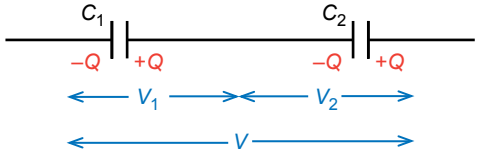
استنتاج السعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوالي

تنطبق المبادئ نفسها هنا كما هي الحال في المكثفات الموصلة على التوازي، ويبيّن الشكل ٤-١١ حالة مكثفَين (C_1) و (C_2) موصلَين على التوالي، ويوجد فرق جهد كهربائي (V) بين لوحَي كل منهما، إن فرق الجهد الكهربائي هذا مقسّم (يتجزأ بين المكثفَين)، فإذا كان فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي (C_1) هو (V_1) وفرق الجهد الكهربائي بين لوحَي (C_2) هو (V_2). فإن:

$$V = V_1 + V_2$$

مهمّ

عند توصيل المكثفات على التوالي، يجب أن تكون السعة المكافئة لها أقل من قيمة أصغر سعة للمكثفات التي تم توصيلها.



الشكل ٤-١١ تخزّن المكثفات الموصلة على التوالي الشحنة الكهربائية نفسها، ولكن فرق الجهد الكهربائي بين لوحي كل منها مختلف.

الآن يجب أن نفكر في الشحنة الكهربائية المخزّنة بواسطة مجموعة من المكثفات الموصلة على التوالي. سترى في الشكل ٤-١١ أن كلًا من المكثفَين يخزّنان الشحنة الكهربائية نفسها (Q)، فكيف يحدث ذلك؟ عند توصيل مصدر الطاقة لأول مرة تصل الشحنة الكهربائية ($-Q$) إلى اللوح الأيسر لـ (C_1)، والتي تتنافر مع شحنة كهربائية ($-Q$) على اللوح الأيمن له فتترك هذا اللوح مشحونًا بشحنة ($+Q$)، وتصل الشحنة الكهربائية ($-Q$) هذه إلى اللوح الأيسر لـ (C_2)، وهذا بدوره يؤدي إلى شحن اللوح الأيمن للمكثف (C_2) بشحنة ($+Q$).

لاحظ أن الشحنة الكهربائية في هذه العملية لا يمكن استحداثها أو إفناؤها لأن مجموع الشحنة الكهربائية في النظام ثابت، وهذا مثال على مبدأ حفظ الشحنة الكهربائية.

وبما أن الشحنة الكهربائية هي نفسها على المكثفَين وفرق الجهد الكهربائي يتجزأ بينهما فهذا يسمح لنا بكتابة معادلات (V_1) و (V_2) على النحو الآتي:

$$V_1 = \frac{Q}{C_1}$$

و

$$V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

يخزّن المكثف المكافئ للمكثفَين شحنة (Q) عندما يُشحن إلى فرق جهد كهربائي (V)، ولذا يمكننا أن نكتب:

$$V = \frac{Q}{C_T}$$

وبالتعويض في المعادلة $V = V_1 + V_2$ نحصل على:

$$\frac{Q}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

وباختزال العامل المشترك (Q) من الطرفَين نحصل على:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

وبالتالي يمكن إيجاد السعة المكافئة بالنسبة إلى ثلاثة مكثفات أو أكثر موصلة على التوالي من خلال المعادلة:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots$$

يبيّن المثال ٣ كيفية استخدام هذه العلاقة.

مثال

٣. احسب السعة المكافئة لمكثف سعته (300 μF) ومكثف سعته (600 μF) موصلَين على التوالي.

يمكن أن يُجرى الحساب في خطوتَين.

الخطوة ١: عوّض القيم في المعادلة:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{300} + \frac{1}{600}$$

$$\frac{1}{C_T} = 0.005\ \mu F^{-1}$$

الخطوة ٢: خذ الآن مقلوب هذه القيمة لتحديد السعة المكافئة بوحدة μF:

$$C_T = \frac{1}{0.005} = 200\ \mu F$$

لاحظ أن السعة المكافئة للمكثفَين الموصلَين على التوالي أقل من أي من سعتَيهما الفردية.

يمكنك حساب السعة المكافئة أيضًا بخطوة واحدة باستخدام مفتاح x^{-1} على الآلة الحاسبة.

$$C_T = (300^{-1} + 600^{-1})^{-1} = 200\ \mu F$$

أسئلة

(١٣) احسب السعة المكافئة لثلاثة مكثفات موصلة على التوالي سعاتها (200 μF) و (300 μF) و (600 μF).

(١٤) لديك عدد من المكثفات المتماثلة كل منها سعته (C). حدّد السعة المكافئة عندما يكون:

أ. اثنان من المكثفات موصلَين على التوالي.

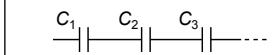
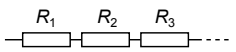
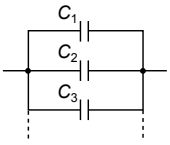
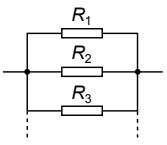
ب. عدد (n) من المكثفات موصلة على التوالي.

ج. مكثفان موصلَين على التوازي.

د. عدد (n) من المكثفات موصلة على التوازي.

مقارنة بين المكثفات والمقاومات

من المفيد مقارنة صيغ سعة المكثفات مع صيغ المقاومات الموصلة على التوالي والموصلة على التوازي (الجدول ٤-٣).

طريقة التوصيل	سعة المكثفات	المقاومات
على التوالي	 $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots$	 $R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$
على التوازي	 $C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$	 $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots$

الجدول ٤-٣ مقارنة بين صيغ المكثفات والمقاومات.

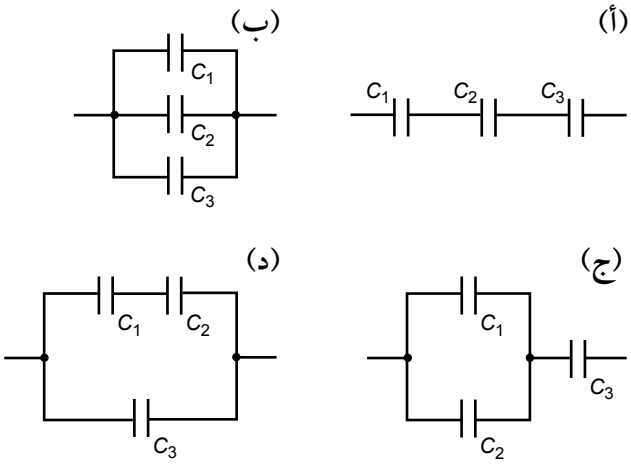
لاحظ أن الصيغة المقلوبة تنطبق على المكثفات الموصلة على التوالي ولكن في المقابل تنطبق على المقاومات الموصلة على التوازي، وتشير السعة إلى مدى جودة المكثف في تخزين الشحنة الكهربائية لفرق جهد كهربائي معيّن، وتشير المقاومة إلى مدى قدرتها في ممانعة مرور التيار من خلالها لفرق جهد كهربائي معيّن.

٤-٥ شبكات المكثفات

هناك أربع طرائق يمكن من خلالها توصيل ثلاثة مكثفات معًا، وهذه الطرائق مبيّنة في الشكل ٤-١٢، ويمكن حساب السعة المكافئة للتوصيل في الشبكتَين (أ) و (ب) (ثلاثة مكثفات موصلة على التوالي، وثلاثة مكثفات موصلة على التوازي) باستخدام الصيغ السابقة كما في الجدول ٤-٣.

أما المجموعات الأخرى فيجب التعامل معها بطريقة مختلفة:

- الشكل ٤-١٢ (ج) احسب أولًا (C_T) للمكثفَين اللذَين سعتاهما (C_1) و (C_2) والموصلان على التوازي، ثم خذ في الاعتبار المكثف الثالث الذي سعته (C_3)، والذي يتصل على التوالي مع المكثف المكافئ.
- الشكل ٤-١٢ (د) احسب أولًا (C_T) للمكثفَين اللذَين سعتاهما (C_1) و (C_2) والموصلان على التوالي، ثم خذ في الاعتبار المكثف الثالث الذي سعته (C_3)، والذي يتصل على التوازي مع المكثف المكافئ.



الشكل ٤-١٢ أربع طرائق لتوصيل ثلاثة مكثفات.

أسئلة

(١٥) احسب السعة المكافئة بوحدة (μF) لكل دائرة من الدوائر الأربع المبيّنة في الشكل ٤-١٢، إذا كان كل مكثف منها سعته (100 μF).

(١٦) أُعطيت أربعة مكثفات سعة كل منها (100 μF)، كيف يمكنك تكوين شبكات منها لإعطاء قيم السعات الآتية:

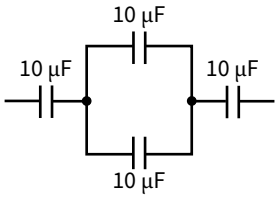
أ. 400 μF

ب. 25 μF

ج. 250 μF

(١٧) لديك ثلاثة مكثفات سعاتها (100 pF) و(200 pF) و(600 pF). حدّد القيم العظمى والقيم الصغرى من السعات التي يمكن الحصول عليها عند توصيل المكثفات معًا لتكوين شبكة. اذكر كيف يجب أن تكون موصلة في كل حالة.

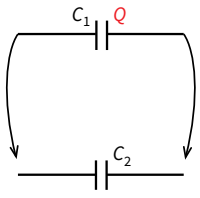
(١٨) احسب السعة بوحدة (μF) لشبكة المكثفات المبيّنة في الشكل ٤-١٣.



الشكل ٤-١٣ شبكة مكثفات.

التشارك بالشحنة الكهربائية والتشارك بالطاقة

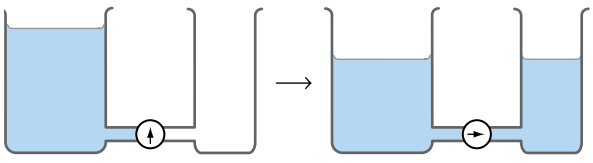
إذا شُحن مكثف (C_1) ثم وصّل بمكثف غير مشحون (C_2) (الشكل ٤-١٤)، فماذا يحدث للشحنة والطاقة التي يخزّنها؟ سنلاحظ أن المكثفَين يكونان موصلَين على التوازي، لذلك فإن فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيهما هو نفسه، والسعة المكافئة (C_T) لهما تساوي مجموع سعتَيهما الفردية.



الشكل ٤-١٤ توصيل مكثف مشحون سعته C_1 مع مكثف غير مشحون سعته C_2 بطريقة التوازي.

الآن يمكننا التفكير في الشحنة الكهربائية المخزّنة (Q) وهذه الشحنة الكهربائية تصبح مشتركة بين المكثفَين، لذا يجب أن تبقى كمية الشحنة الكهربائية الكلية المخزّنة هي نفسها؛ لأن الشحنة الكهربائية محفوظة، وهذه الشحنة الكهربائية سوف تتقسم بين المكثفَين بما يتناسب مع سعتَيهما. والآن يمكن حساب فرق الجهد الكهربائي من المعادلة $V = \frac{Q}{C}$ والطاقة من المعادلة $W = \frac{1}{2} CV^2$، حيث (C) هي السعة المكافئة للمكثفَين و (V) فرق الجهد الكهربائي المشترك.

يمكن تشبيه تشارك الشحنة الكهربائية بين مكثفَين بحاويتَي ماء كما في الشكل (٤-١٥)، وتمثّل المكثفات بواسطة حاويات ماء، وتُملأ حاوية عريضة (ذات سعة كبيرة) إلى مستوى معيّن (فرق الجهد) ثم توصل بحاوية ذات سعة أصغر، فيتساوى المستويان (فرق الجهد النهائي هو نفسه لكل منهما). لاحظ أن طاقة الوضع للماء قد انخفضت؛ لأن ارتفاع مركز الجاذبية (مركز الكتلة) فوق مستوى القاعدة قد انخفض، فتتبدّد طاقة على شكل حرارة؛ حيث يوجد احتكاك بين جزيئات الماء المتحرك وبين الماء والحاوية.



الشكل ٤-١٥ تشبيه تشارك الشحنة الكهربائية بين مكثفَين بتشارك الماء بين الحاويتين.

مثال

٤. لنفترض أن مكثفَين سعة كل منهما (100 mF)، شُحن أحدهما إلى (10 V)، وفُصل عن مصدر الطاقة الكهربائية، ثم وصِل مع المكثف الآخر. احسب الشحنة والطاقة المخزّنة بواسطة المكثفَين بعد توصيلهما معًا.

الخطوة ١: احسب الشحنة الكهربائية والطاقة المخزّنة على المكثف الأول:

الشحنة الكهربائية الابتدائية:

$$Q = CV = 10 \times 0.10 = 1.0\ \text{C}$$

الطاقة المخزّنة الابتدائية:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.10 \times 10^2 = 5.0\ \text{J}$$

الخطوة ٢: احسب فرق الجهد الكهربائي النهائي بين لوحَي المكثفَين. بما أن المكثفَين موصلان على التوازي ولهما شحنة مخزّنة كلية (1.0 C).

$$C_T = C_1 + C_2$$

$$= 100 + 100 = 200\ \text{mF}$$

يمكن حساب فرق الجهد الكهربائي باستخدام $Q = CV$:

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$= \frac{1.0}{200 \times 10^{-3}} = 5.0\ \text{V}$$

بسبب تشارك الشحنة الكهربائية بالتساوي مع المكثف الأصلي، فإن المكثف الأصلي يفقد نصف شحنته.

الخطوة ٣: الآن احسب الطاقة الكلية المخزّنة بواسطة المكثفَين.

الطاقة الكلية:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 200 \times 10^{-3} \times 5.0^2 = 2.5\ \text{J}$$

تبقى الشحنة الكهربائية المخزّنة نفسها، ولكن يُفقد جزء من الطاقة المخزّنة في المكثف الأول.

أسئلة

(١٩) وصّلت ثلاثة مكثفات سعة كل منها (120 μF) على التوالي. ثم وصلت شبكة المكثفات بمصدر جهد كهربائي (10 kV). احسب:

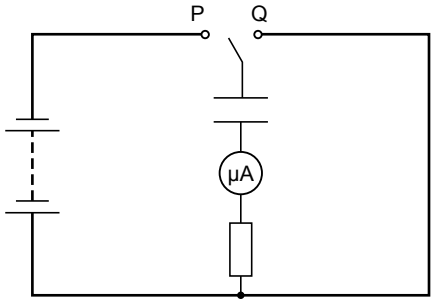
أ. السعة المكافئة بوحدة (μF).
ب. الشحنة الكهربائية المخزّنة.
ج. الطاقة الكلية المخزّنة.

(٢٠) شُحن مكثف سعته (20 μF) إلى (200 V) ثم فُصِل عن المصدر. ثم وُصّل مع مكثف آخر سعته (5.0 μF). احسب:

أ. السعة المكافئة للمكثفَين بوحدة (μF).
ب. الشحنة الكهربائية التي خزّنها المكثفان.
ج. فرق الجهد الكهربائي عبر المجموعة.
د. الطاقة المبدّدة عند توصيلهما معًا.

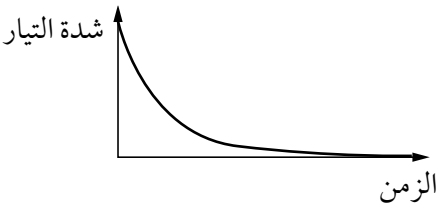
٤-٦ شحن المكثفات وتفريغها

يُشحن المكثف في الشكل ٤-١٦ بواسطة البطارية وذلك عند توصيل المفتاح بالطرف P، فعند توصيله في البداية بالطرف P فإن تيارًا كهربائيًا سيمرّ ويمكن ملاحظته من خلال الميكروأميتر؛ حيث تكون شدّته كبيرة جدًا ثم تنخفض تدريجيًا إلى الصفر. وعند توصيل المفتاح بالطرف Q يُفرّغ المكثف شحنته خلال المقاومة، ويلاحظ مرور تيار كهربائي بالاتجاه



الشكل ٤-١٦ دائرة لشحن مكثف وتفريغه.

المعاكس، وكما هي الحال مع التيار الكهربائي في الوصف السابق، يبدأ التيار بشدّة كبيرة ثم تنخفض تدريجيًا إلى الصفر (في النهاية).



الشكل ٤–١٧ تمثيل بياني يوضح كيف تتغيّر شدة التيار الكهربائي مع مرور الزمن عندما يُفرّغ مكثف خلال مقاومة.

هذا النوع من التمثيل البياني الموضح في الشكل ٤–١٧ شائع جدًا في العلوم، ويحدث في حالات مختلفة مثل اضمحلال السعة في الاهتزازات المخمدة وأيضًا ستراه في موضوع الانحلال الإشعاعي الذي ستدرسه في الفصل الدراسي الثاني. ويأتي الشكل في هذه الحالة من حقيقة أنه مع تدفق الشحنة الكهربائية من المكثف فإن فرق الجهد الكهربائي ينخفض، وبالتالي تنخفض شدة التيار الكهربائي (الشحنة الكهربائية المتدفقة لكل ثانية) أيضًا في الدائرة الكهربائية.

يسمى هذا النوع من التغير **بالاضمحلال الأُسّي** **Exponential decay** ويوصف بالصيغة الآتية:

$$x = x_0 e^{-ky}$$

حيث (x) هو المتغيّر التابع، و (y) هو المتغيّر المستقل، و (k) هو ثابت، و (x_0) هي القيمة الابتدائية (القصوى) للمتغير التابع و (e) هو الثابت الطبيعي ويساوي تقريبًا (...2.7118 28).

سؤال

(٢١) المقاومة في الدائرة المبيّنة في الشكل ٤–١٦ قيمتها (2000 Ω)، وسعة المكثف (1000 μF) والقوة الدافعة الكهربائية للبطارية تساوي (12 V).

أ. احسب:

١. فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف عندما يُشحن تمامًا بواسطة البطارية.

٢. الشحنة الكهربائية المخزّنة بواسطة المكثف عندما يكون مشحونًا تمامًا.

٣. شدة التيار الكهربائي المارّ في المقاومة لحظة توصيل المفتاح بالطرف Q.

ب. اشرح ما يحدث لمقدار الشحنة الكهربائية المخزّنة على اللوحَين في اللحظات التي تلي توصيل المفتاح بالطرف Q.

ج. بناءً على إجابتك عن الجزئية (ب)، اشرح تأثير ذلك على:

١. فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف.

٢. شدة التيار الكهربائي المارّ في المقاومة.

بمجرد أن تحل السؤال ٢١ ستفهم سبب انخفاض شدة التيار الكهربائي تدريجيًا: فهي تنخفض بسبب التيار الكهربائي نفسه حيث يأخذ الشحنة الكهربائية من اللوحَين.

ما تأثير تغيير قيمة المقاومة في الدائرة الكهربائية (الشكل ٤–١٦)؟ لن يكون هناك تغيير في فرق الجهد الابتدائي بين لوحَي المكثف، ولكن شدة التيار الابتدائي خلال المقاومة ستتغير؛ فزيادة المقاومة تعني انخفاض شدة التيار الكهربائي ($R = \frac{V}{I}$)، لذلك سيكون تدفق الشحنة الكهربائية من لوحَي المكثف أبطأ، وبالتالي سيستغرق تفريغ المكثف زمنًا أطول، وبالمقابل يؤدي تقليل مقدار المقاومة إلى جعل تفريغ المكثف يحدث بسرعة أكبر.

ما تأثير ازدياد سعة المكثف مع وجود مقاومة ثابتة؟ لن يتغيّر فرق الجهد الابتدائي بين لوحَي المكثف مرة أخرى، وبما أن المقاومة ثابتة فإن شدة التيار الكهربائي الابتدائي لن تتغير، ومع ذلك سيخزّن المكثف المزيد من الشحنات الكهربائية ($C = \frac{Q}{V}$)، وبالتالي سيستغرق تفريغه زمنًا أطول.

من هذا الأمر يمكننا أن نرى أن الزمن الذي يستغرقه تفريغ المكثف يعتمد على كل من سعة المكثف ومقدار المقاومة في الدائرة الكهربائية. تسمى الكمية (RC) **الثابت الزمني Time constant** لدائرة تتكوّن من مكثف – مقاومة. ويُرمز إليه باستخدام الحرف اليوناني تاو (τ) حيث (C) سعة المكثف في الدائرة و (R) مقدار المقاومة في الدائرة، والثابت الزمني يساوي الزمن الذي يستغرقة التيار الكهربائي في الدائرة لينخفض إلى $\frac{1}{e}$ والتي تعادل نسبة 37% تقريبًا من قيمة التيار الابتدائي، حيث (e) هي الدالة الأُسّية.

مصطلحات علمية

الثابت الزمني Time constant: الثابت الزمني (τ) لدائرة تتكوّن من مكثف – مقاومة يساوي (RC). وهو يساوي الزمن الذي يستغرقه التيار الكهربائي في الدائرة لينخفض إلى $\frac{1}{e}$ من قيمة شدة التيار الكهربائي الابتدائي، حيث (e) هي الدالة الأسّية.

الثابت الزمني لتفريغ مكثف:

$$\tau = RC$$

نعبّر عن شدة التيار الكهربائي (I) في أية لحظة زمنية (t) من خلال معادلة الاضمحلال الأُسّي وهي:

$$I = I_0 e^{-(t/RC)}$$

حيث (I): شدة التيار الكهربائي، و (I_0): شدة التيار الكهربائي الابتدائي، و (t): الزمن، و (RC): الثابت الزمني (τ).

تتناسب شدة التيار الكهربائي في أي لحظة طرديًا مع فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف، وفرق الجهد الكهربائي بدوره يتناسب طرديًا مع الشحنة الكهربائية على اللوح، ولذلك يمكن أن تصف المعادلة أيضًا التغير في فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي المكثف والشحنة الكهربائية عليه.

وبالتالي:

$$V = V_0 e^{-(t/RC)}$$

حيث (V): فرق الجهد الكهربائي عند أي لحظة، و (V_0): فرق الجهد الكهربائي الابتدائي.

و:

$$Q = Q_0 e^{-(t/RC)}$$

حيث (Q): الشحنة الكهربائية عند أي لحظة، و (Q_0): الشحنة الكهربائية الابتدائية.

معادلات الاضمحلال الأسّي لشدة التيار الكهربائي والشحنة الكهربائية وفرق الجهد الكهربائي لمكثف:

$$I = I_0 e^{-(t/RC)}$$

$$Q = Q_0 e^{-(t/RC)}$$

$$V = V_0 e^{-(t/RC)}$$

مثال

٥. مكثف سعته (500 μF) وفرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (240 V). وصل المكثف عبر طرفَي مقاومة مقدارها (600 Ω).

جِد الزمن الذي يستغرقه هبوط شدة التيار الكهربائي إلى (0.10 A).

الخطوة ١: احسب شدة التيار الكهربائي الابتدائي:

$$I_0 = \frac{V}{R} = \frac{240}{600} = 0.40 \text{ A}$$

الخطوة ٢: احسب الثابت الزمني:

$$\tau = RC = 600 \times 500 \times 10^{-6}$$
$$= 0.30 \text{ s}$$

الخطوة ٣: عوّض عن شدة التيار الكهربائي الابتدائي، والثابت الزمني في المعادلة:

$$I = I_0 e^{-(t/RC)}$$
$$0.10 = 0.40\, e^{-\left(\frac{t}{0.30}\right)}$$
$$\frac{0.10}{0.40} = e^{-\left(\frac{t}{0.30}\right)}$$
$$0.25 = e^{-\left(\frac{t}{0.30}\right)}$$

الخطوة ٤: باستخدام الخاصية الرياضية:

$$\ln (e^x) = x$$

نأخذ (ln) لكِلا الطرفَين:

$$\ln 0.25 = -\frac{t}{0.30}$$
$$-1.386 = -\frac{t}{0.30}$$
$$t = 1.386 \times 0.30 = 0.42 \text{ s}$$

أسئلة

(٢٢) بيّن أن شدة التيار الكهربائي في دائرة مكثف–مقاومة تنخفض إلى $\frac{1}{e}$ من قيمة شدة التيار الكهربائي الابتدائي عندما يكون الزمن الذي يستغرقه تفريغ المكثف ($t = \tau$).

(٢٣) بيّن أن وحدة الثابت الزمني (RC) هي الثانية.

(٢٤) شُحن مكثف سعته (400 μF) باستخدام بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (20 V)، ووصّل عبر طرفَيه مقاومة مقدارها (600 Ω) بفرق جهد كهربائي (20 V) بين لوحَيه.

أ. احسب الشحنة الكهربائية المخزّنة على المكثف.

ب. احسب الثابت الزمني لتفريغ الدائرة الكهربائية.

ج. احسب الزمن الذي تستغرقه الشحنة الكهربائية على المكثف لتنخفض إلى (2.0 mC).

د. ما فرق الجهد الكهربائي بين اللوحَين عندما تنخفض الشحنة الكهربائية إلى (2.0 mC)؟

ملخّص

تُصنع المكثفات من لوحَين فلزيَّين (صفيحتَين) تفصل بينهما مادة عازلة، ويخزّن لوحا المكثف كميتَين متساويتَين من الشحنة الكهربائية ومتعاكستَين في النوع.

تتناسب الشحنة الكهربائية المخزّنة بالنسبة إلى مكثف ما طرديًا مع فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه:

$$Q = CV$$

سعة المكثف هي الشحنة الكهربائية المخزّنة لكل وحدة فرق جهد كهربائي.

الفاراد هو سعة مكثف يزداد فرق الجهد بين لوحَيه بمقدار فولت واحد عندما يشحن بشحنة مقدارها واحد كولوم. وهو وحدة قياس سعة المكثف (ويُرمز إليها بالرمز F): $1\ F = 1\ C\ V^{-1}$

تخزّن المكثفات الطاقة. وتعطى الطاقة المخزّنة (W) عند فرق جهد كهربائي (V) بـ:

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

تُستنتج الصيغة $W = \frac{1}{2} QV$ من المساحة تحت منحنى التمثيل البياني لفرق الجهد الكهربائي مقابل الشحنة الكهربائية.

السعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوازي والموصلة على التوالي، هي:

المكثفات الموصلة على التوازي: $C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$

المكثفات الموصلة على التوالي: $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2} + \ldots$

هاتان الصيغتان مستنتجتان من حفظ الشحنة الكهربائية وجمع فروق الجهد الكهربائية.

التمثيلات البيانية لشدة التيار الكهربائي والشحنة الكهربائية المخزّنة وفرق الجهد الكهربائي بين لوحَي مكثف أثناء التفريغ كلها أمثلة على الاضمحلال الأُسّي.

الثابت الزمني للدوائر التي تحتوي على سعة ومقاومة هو: $\tau = RC$.

التمثيلات البيانية لشدة التيار الكهربائي والشحنة الكهربائية المخزّنة وفرق الجهد الكهربائي بين لوحَي مكثف في أثناء التفريغ كلها على شكل دالة أُسّية تعطى من الصيغة:

$$x = x_0\, e^{-(t/RC)}$$

أسئلة نهاية الوحدة

١ فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي مكثف يساوي (6.0 V) ويخزّن (9.0 mJ) من الطاقة.

أيّ البدائل في الجدول ٤-٤ يعطي سعة المكثف والشحنة الكهربائية على لوحَيه؟

	السعة (μF)	الشحنة الكهربائية (mC)
أ	500	3.0
ب	500	18
ج	3000	3.0
د	3000	18

الجدول ٤-٤

٢ صُمّم مكثف في دائرة إلكترونية ليتم تفريغه ببطء من خلال مصباح بيان (مؤشر ضوئي).

لزيادة الزمن المستغرق لتفريغ المكثف اقترحت التغيرات الأربعة الآتية:

(١) توصيل مكثف ثانٍ على التوازي مع المكثف الأصلي.

(٢) توصيل مكثف ثانٍ على التوالي مع المكثف الأصلي.

(٣) توصيل مقاومة على التوازي مع المصباح.

(٤) توصيل مقاومة على التوالي مع المصباح.

ما الاقتراح الذي سيؤدي إلى زيادة زمن التفريغ؟

أ. (١) و (٣) فقط.

ب. (١) و (٤) فقط.

ج. (٢) و (٣) فقط.

د. (٢) و (٤) فقط.

٣ مكثف سعته (470 μF) متصل بطرفَي بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (9 V) احسب الشحنة الكهربائية على لوحَي المكثف.

٤ احسب فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي مكثف سعته (2200 μF) عندما تكون الشحنة الكهربائية على لوحَيه (0.033 C).

٥ احسب سعة مكثف إذا كان يخزّن شحنة كهربائية مقدارها (2.0 C) عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (5000 V).

٦ احسب الطاقة المخزّنة في مكثف سعته (470 μF) عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (12 V).

٧ احسب الطاقة المخزّنة في مكثف إذا كان يخزّن (1.5 mC) من الشحنة الكهربائية عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (50 V).

تابع

٨ مكثف سعته (5000 μF) وفرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (24 V).

أ. احسب الطاقة المخزّنة في المكثف.

ب. تمّ توصيل المكثف لفترة وجيزة بمصباح فتدفقت نصف الشحنة الكهربائية من المكثف. احسب الطاقة المبدّدة في المصباح.

٩ مكثف سعته (4700 μF) وفرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (12 V). تمّ توصيله بمقاومة فتسربت الشحنة الكهربائية عبر المقاومة خلال زمن (2.5 s).

أ. احسب الطاقة المخزّنة في المكثف.

ب. احسب الشحنة الكهربائية المخزّنة على المكثف.

ج. قدّر متوسط شدة التيار الكهربائي المار خلال المقاومة.

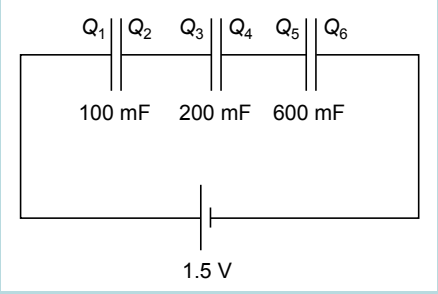
د. قدّر قيمة المقاومة.

هـ. لماذا لا يمكن أن تكون الكميتان الأخيرتان (شدة التيار الكهربائي، والمقاومة) سوى تقديرات فقط؟ اقترح السبب.

١٠ يصمّم مهندس إلكترونيات دائرة يتم فيها توصيل مكثف سعته (4700 μF) بفرق جهد كهربائي (9.0 V). إذا كان لديه أربعة مكثفات سعة كل منها (4700 μF) وكل منها يمكن أن يكون لديه فرق جهد قيمته (6.0 V) كحد أقصى بين لوحَيه، ارسم مخططًا يبيّن كيف يمكن استخدام المكثفات الأربعة لتصميم الدائرة المطلوبة لهذا الغرض.

١١ احسب السعات المختلفة التي يمكن تكوينها من ثلاثة مكثفات سعة كل منها (100 μF)، ارسم الشبكة المستخدمة في كل حالة.

١٢ يبيّن الشكل ٤-١٨ مخططًا لثلاثة مكثفات موصلة على التوالي بخلية قوّتها الدافعة الكهربائية (1.5 V).



الشكل ٤-١٨

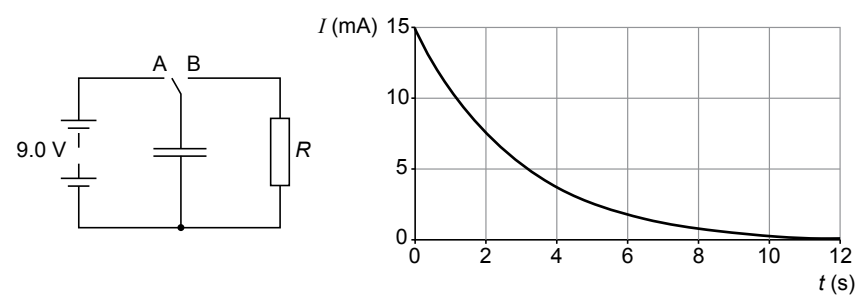
أ. احسب الشحنات الكهربائية من (Q_1) إلى (Q_6) على كل لوح.

ب. احسب فرق الجهد الكهربائي بين لوحَي كل مكثف.

تابع

١٣ **أ.** اذكر أحد استخدامات المكثفات في الدوائر الكهربائية البسيطة.

ب. يُظهر الشكل ٤–١٩ دائرة تُستخدم لاستقصاء تفريغ مكثف، وتمثيلًا بيانيًا يوضح التغيّر في شدة التيار الكهربائي مع مرور الزمن عند تفريغ المكثف.



الشكل ٤–١٩

١. احسب قيمة المقاومة (R).

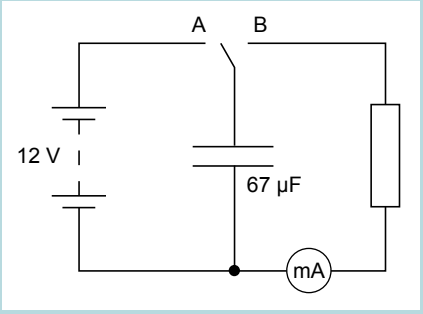
٢. اشرح سبب تناقص شدة التيار الكهربائي في أثناء تفريغ المكثف.

٣. شحنة المكثف تساوي المساحة الواقعة تحت منحنى التمثيل البياني، قدّر شحنة المكثف عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (9.0 V).

٤. احسب سعة المكثف.

١٤ **أ.** عرّف سعة المكثف.

ب. الدائرة الكهربائية في الشكل ٤–٢٠ يمكن استخدامها لقياس سعة مكثف.



الشكل ٤–٢٠

يهتز المفتاح الكهربائي إلى الأمام وإلى الخلف بين A و B بتردد (50 Hz). وفي كل مرة يتلامس فيها مع A، يُشحن المكثف بواسطة البطارية بحيث يصبح فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (12 V). وفي كل مرة يتلامس فيها مع B، يُفرّغ تمامًا من خلال المقاومة.

١. احسب الشحنة الكهربائية المخزّنة على المكثف عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (12 V).

٢. وصّل مكثف آخر له السعة نفسها على التوالي مع المكثف الأول. ناقش تأثير ذلك على شدة التيار الكهربائي المقاس.

تابع

١٥ **أ.** ما المقصود بالثابت الزمني لدائرة تتضمن سعة ومقاومة؟

ب. تتكوّن دائرة من مكثفَين سعتاهما (500 μF) و (2000 μF) موصلَين على التوالي، ومقاومة مقدارها (2.5 kΩ) موصلة معهما على التوالي أيضًا. احسب:

١. السعة المكافئة للمكثفَين.

٢. الشحنة الكهربائية على لوحَي المكثف عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (50 V).

٣. الزمن المستغرق لتنخفض الشحنة على اللوحَين إلى (5%) من الشحنة الكهربائية الابتدائية عندما يكون فرق الجهد الكهربائي بين لوحَيه (50 V).

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أعرّف السعة للمكثف.	١-٤			
أستخدم الصيغة الآتية: $C = \frac{Q}{V}$	١-٤			
أعرف أن وحدة السعة هي الفاراد (F).	١-٤			
أحدّد الطاقة المخزّنة في مكثف من التمثيل البياني (الشحنة الكهربائية - الجهد الكهربائي).	٢-٤			
أستخدم الصيغ الآتية: $W = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$	٢-٤			
أستنتج الصيغة الآتية للسعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوازي وأستخدمها: $C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$	٣-٤			
أستنتج الصيغة الآتية للسعة المكافئة للمكثفات الموصلة على التوالي وأستخدمها: $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots$	٤-٤			
أستخدم معادلة الثابت الزمني لدائرة تتضمن سعة ومقاومة: $\tau = CR$	٦-٤			

تابع

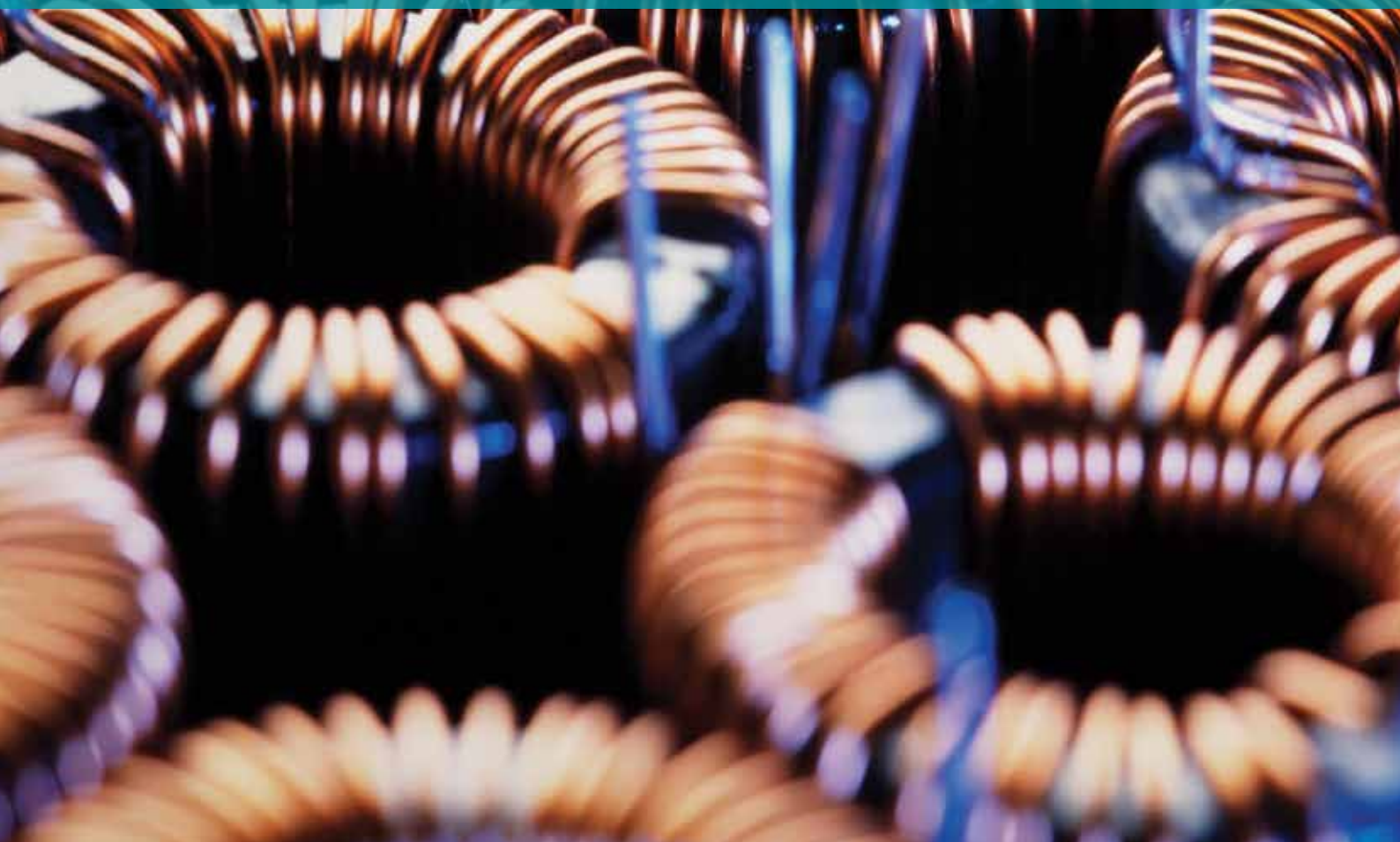
بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم أن اضمحلال الشحنة الكهربائية عن المكثف، وشدة التيار الكهربائي، وفرق الجهد الكهربائي بين اللوحَين أثناء التفريغ هو اضمحلال أُسّي.	٤–٦			
أعرف أن معدل التفريغ يعتمد على الثابت الزمني للدائرة الكهربائية.	٤–٦			
أستخدم المعادلة الآتية لفرق الجهد الكهربائي، وشدة التيار الكهربائي، والشحنة الكهربائية على لوحَي مكثف أثناء التفريغ: $x = x_0 e^{-(t/RC)}$	٤–٦			

الوحدة الخامسة

المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسي

Magnetism and Electromagnetic Induction



أهداف التعلّم

٥-١ يطبق مفهوم أن المجال المغناطيسي مثال على مجال القوة الناتج من: الشحنات الكهربائية المتحركة أو من المغناطيس الدائم.

٥-٢ يمثل المجالات المغناطيسية المتولدة حول سلك مستقيم وملف دائري وملف حلزوني (ملف لولبي) بخطوط المجال المغناطيسي.

٥-٣ يستخدم المعادلة $F = BIL \sin\theta$، ويحدد الاتجاهات باستخدام قاعدة فليمنج لليد اليسرى.

٥-٤ يعرّف كثافة الفيض المغناطيسي على أنها القوة المؤثرة لكل وحدة تيار كهربائي لكل وحدة طول من سلك موضوع بزاوية قائمة على المجال المغناطيسي.

٥-٥ يصف الملاحظات الآتية للتجارب ويشرحها:

- الفيض المغناطيسي المتغيّر يمكن أن يولد قوة دافعة كهربائية مستحثة في دائرة كهربائية.
- القوة الدافعة الكهربائية المستحثة تكون في الاتجاه المعاكس للتغيّر الذي أنتجها.
- العوامل التي تؤثر على مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة (التأثيرية).

٥-٦ يعرّف الفيض المغناطيسي على أنه حاصل ضرب كثافة الفيض المغناطيسي في مساحة المقطع العرضي العمودية على اتجاه كثافة الفيض المغناطيسي.

٥-٧ يستخدم المعادلة $\Phi = \vec{B}\vec{A}$ ويحلّل $\vec{B}$ إلى مركّبتها العمودية باستخدام $\Phi = BA\cos\theta$.

٥-٨ يصف مفهوم الفيض المغناطيسي الكليّ ويستخدمه، بما في ذلك استخدام معادلة الفيض المغناطيسي الكليّ: $BAN\cos\theta$.

٥-٩ يحلّل التيار الكهربائي المستحث باستخدام قاعدة فليمنج لليد اليمنى.

٥-١٠ يذكر نص قانون فاراداي ونص قانون لنز للحث الكهرومغناطيسي ويستخدم المعادلة $\varepsilon = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- هل يمكنك وصف كيفية رسم خطوط مجال مغناطيسي باستخدام بوصلة وبرادة حديد؟
- ما تأثير الأقطاب المتشابهة والمختلفة بعضها على بعض؟
- اكتب تعريفًا لكل من مجال الجاذبية والمجال الكهربائي. تبادل التعريفات التي كتبتها مع زميلك.
- ناقش مع زميلك كيف ترتبط الشحنة الكهربائية والتيار الكهربائي.

العلوم ضمن سياقها

المريض المبيّن في الصورة ٥-١ على وشك الخضوع لفحص التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)، حيث يُوضع المريض في مجال مغناطيسي أُنتج بواسطة ملف حلزوني - أو ملف طويل- يتكوّن من عدة لفات من سلك، حيث يتولد مجال مغناطيسي قوي جدًا في هذه الملفات بواسطة تيار كهربائي ذي شدة عالية، إنّ معظم هذه الملفات مصنوعة من مواد فائقة التوصيل (مواد ذات مقاومة نوعية صفرية).

لماذا تعتقد أن الأجسام الحديدية - كالمقصات وأسطوانات الغاز - يجب عدم إدخالها إلى الغرفة حيث توجد هذه الآلة؟

ما فوائد صنع أسلاك الملف من مادة فائقة التوصيل؟

في هذه الوحدة سنلقي نظرة على القوى المغناطيسية والمجالات المغناطيسية، وكيف تنشأ وكيف تتفاعل.

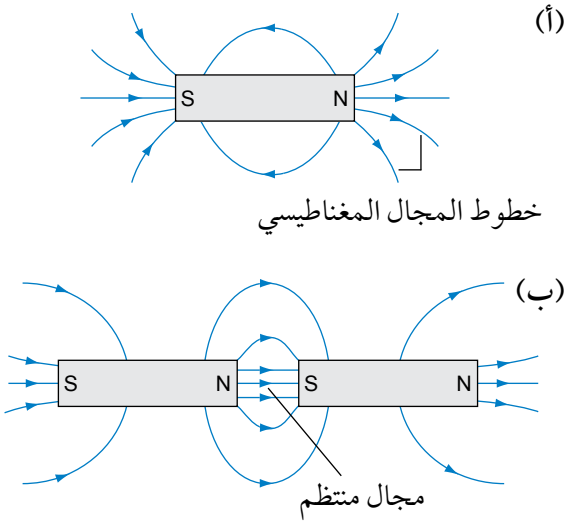
الصورة ٥-١ مريض على وشك أن يُجرى له فحص بالرنين المغناطيسي.

٥-١ توليد المجالات المغناطيسية وتمثيلها

يوجد مجال مغناطيسي أينما وُجدت قوة في قطب مغناطيسي، فكما رأينا في مجالات الكهرباء والجاذبية فإن المجال المغناطيسي هو مجال قوة.

يمكنك توليد مجال مغناطيسي بطريقتَين: استخدام مغناطيس دائم، أو عن طريق شحنات كهربائية متحرّكة والتي عادة ما تكون على شكل تيار كهربائي (الكهرومغناطيسية).

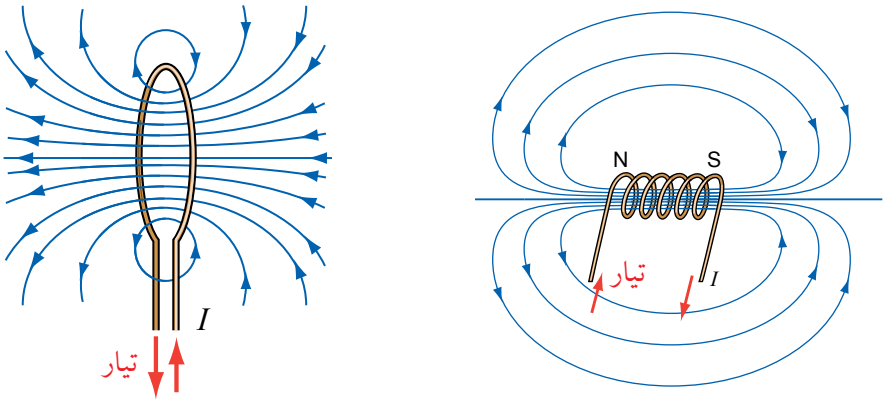
درست سابقًا أنماط المجال المغناطيسي لقضبان من المغناطيس الدائم كالموضحة في الشكل ٥-١، ويمكن إظهار ذلك باستخدام برادة حديد أو بوصلة، ونمثّل أنماط المجال المغناطيسي بواسطة رسم خطوط المجال المغناطيسي.



الشكل ٥-١ أنماط المجال المغناطيسي: (أ) لقضيب مغناطيسي (ب) لقضيبَين مغناطيسيَّين متجاذبَين (ج) لقضيبَين مغناطيسيَّين متنافرَين.

- تخرج خطوط المجال المغناطيسي من القطب الشمالي لمغناطيس ما وتدخل في قطبه الجنوبي.
- اتجاه خط المجال في أي نقطة في المجال يُظهر اتجاه القوة المؤثرة على قطب مغناطيسي شمالي «حرّ» عند تلك النقطة.
- يكون المجال أقوى كلما كانت خطوط المجال متقاربة.

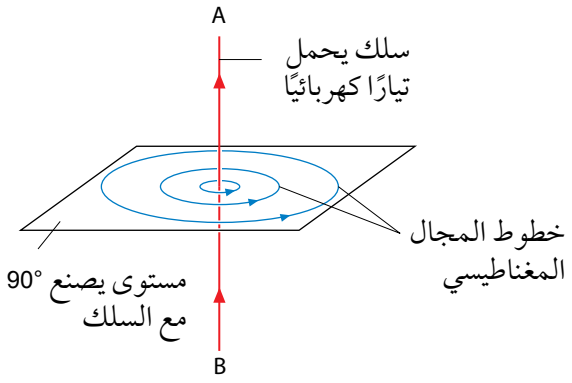
نحصل على مغناطيس كهربائي من خلال المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي (الشكل ٥-٢ أ)؛ حيث يستخدم ملفًا لتركيز المجال المغناطيسي، فيصبح أحد طرفَيه قطبًا شماليًا (تخرج خطوط المجال منه)، في حين يصبح الطرف الآخر قطبًا جنوبيًا، ويسمّى هذا الملف الملف الحلزوني Solenoid، وهو ملف طويل يحمل تيارًا كهربائيًا يُستخدم لتوليد مجال مغناطيسيّ منتظم بداخله.



الشكل ٥-٢ أنماط المجال المغناطيسي: (أ) لملف حلزوني (ب) لملف دائري.

نمط المجال للملف الحلزوني (الشكل ٥-٢ أ) يبدو مشابهًا جدًا لمجال قضيب مغناطيسي (الشكل ٥-١ أ)، بحيث تخرج خطوط المجال من القطب الشمالي من أحد طرفَيه وتعود إلى القطب الجنوبي في الطرف الآخر، ويمكن زيادة شدة المجال المغناطيسي للملف الحلزوني بشكل كبير بواسطة إضافة قلب مصنوع من مادة حديدية (غنية بالحديد)، فعندما يتدفق التيار الكهربائي عبر الملف الحلزوني فإن القلب الحديدي نفسه يصبح ممغنطًا وينتج عنه مجال مغناطيسي أقوى بكثير.

يكون للملف الدائري (الشكل ٥-٢ ب) مجال مشابه لمجال الملف الحلزوني. إذا فردنا ملفًا مغناطيسيًا كهربائيًا لجعله سلكًا طويلًا فسنحصل على مجال أضعف، ويمكن استقصاء ذلك باستخدام برادة حديد أو بوصلات، ويختلف نمط المجال المغناطيسي لسلك طويل يحمل تيارًا كهربائيًا اختلافًا كبيرًا عن نمط المجال للملف الحلزوني؛ فخطوط المجال المغناطيسي المبيّنة في الشكل ٥-٣ دائرية تتمركز حول السلك الطويل الحامل للتيار الكهربائي، وتُرسم خطوط المجال المغناطيسي متباعدة عن بعضها كلما ابتعدنا عن السلك، حيث يصبح المجال المغناطيسي أضعف كلما زادت المسافة، وعند عكس اتجاه التيار الكهربائي ينعكس اتجاه المجال المغناطيسي.

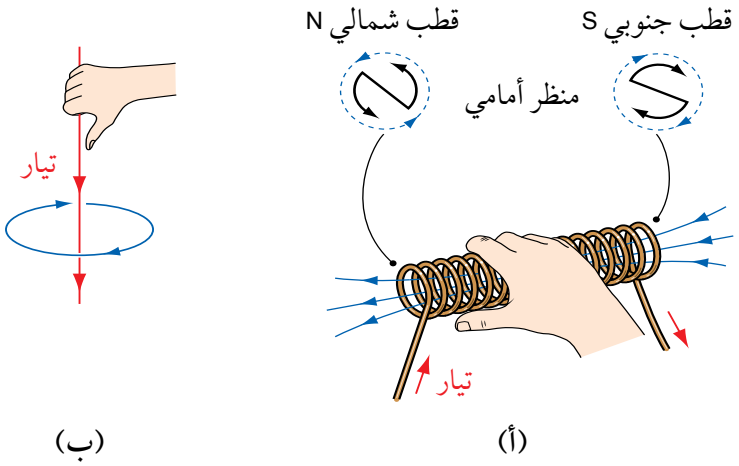


الشكل ٥-٣ نمط المجال المغناطيسي حول سلك يحمل تيارًا كهربائيًا. يبيّن المخطط أيضًا الاصطلاح المستخدم للإشارة إلى اتجاه التيار الكهربائي.

تنشأ جميع المجالات المغناطيسية بواسطة شحنات متحركة (تكون الشحنات المتحركة في حالة السلك الفلزي إلكترونات حرة)، وهذا صحيح حتى بالنسبة إلى قضيب المغناطيس الدائم، إذ يتولّد المجال المغناطيسي في المغناطيس الدائم بواسطة حركة الإلكترونات داخل ذرات المغناطيس حيث يمثل كل إلكترون تيارًا كهربائيًا صغيرًا وهو يدور حول نواة ذرته، وهذا التيار الكهربائي بدوره يُنشئ مجالًا مغناطيسيًا، وفي المادة الحديدية تتحد المجالات المغناطيسية الضعيفة الناتجة من جميع الإلكترونات معًا لتكوين مجال مغناطيسي قوي، بحيث ينتشر هذا المجال في الحيّز خارج المغناطيس، وفي المقابل تلغي المجالات المغناطيسية التي تولدّها الإلكترونات في المواد غير المغناطيسية بعضها بعضًا؛ لذلك تكون غير ممغنطة.

اتجاه المجال المغناطيسي

فكرة أن خطوط المجال المغناطيسي تخرج من القطب الشمالي وتتجه إلى القطب الجنوبي هي ببساطة اصطلاح، يبيّن الشكل ٥-٤ بعض القواعد المفيدة لتذكر اتجاه المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي.



الشكل ٥-٤ قاعدتان لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي: (أ) داخل ملف حلزوني (ب) حول سلك يحمل تيارًا كهربائيًا.

تُستخدم **قاعدة قبضة اليد اليمنى** **Right-hand grip rule** لتحديد اتجاه خطوط المجال المغناطيسي للمغناطيس الكهربائي، اقبض الملف بحيث تلتف أصابعك حوله متبعة اتجاه التيار الكهربائي، فيشير إبهامك عندئذٍ إلى اتجاه خطوط المجال المغناطيسي داخل الملف، أي أنه يشير إلى القطب الشمالي للمغناطيس الكهربائي.

هناك طريقة أخرى لتحديد أقطاب المغناطيس الكهربائي وهي النظر إلى أحد نهايتَيه وتحديد الاتجاه الذي يتدفق حوله التيار الكهربائي؛ حيث يبيّن الشكل ٥-٤ (أ) كيف يمكنك أن تتذكر أن اتجاه التيار مع عقارب الساعة هو قطب جنوبي، وعكس اتجاه عقارب الساعة هو قطب شمالي.

المجال المغناطيسي الدائري الناشئ حول سلك مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًا ليس له أقطاب مغناطيسية (الشكل ٥-٤ ب)، ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي يجب أن تستخدم قاعدة أخرى، وهي **قاعدة اليد اليمنى** **Right-hand rule** كما درستها في الصف العاشر، اقبض السلك بيدك اليمنى مع توجيه إبهامك باتجاه التيار الكهربائي، فإن أصابعك تلتف باتجاه المجال المغناطيسي.

لاحظ أن هاتَين القاعدتَين مختلفتان قليلًا؛ إذ تنطبق قاعدة قبضة اليد اليمنى على الملف الحلزوني؛ حيث تنحني الأصابع باتجاه التيار الكهربائي فيشير الإبهام إلى اتجاه خطوط المجال المغناطيسي، وتنطبق قاعدة اليد اليمنى على التيار الكهربائي في سلك مستقيم؛ ولكن يشير الإبهام إلى اتجاه التيار الكهربائي، وباقي الأصابع المنحنية تشير إلى اتجاه خطوط المجال المغناطيسي.

مصطلحات علمية

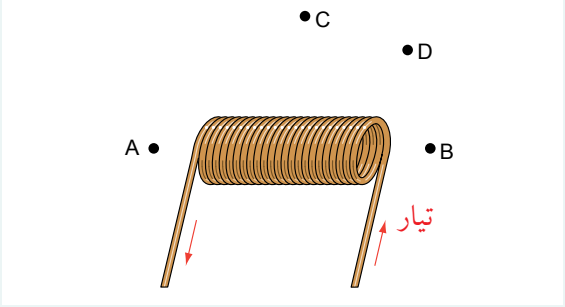
قاعدة قبضة اليد اليمنى
Right-hand grip rule: قاعدة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف حلزوني. إذا كانت اليد اليمنى تقبض الملف الحلزوني بالأصابع متبعة اتجاه التيار الاصطلاحي حول الملف الحلزوني، فإن الإبهام يشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي.

قاعدة اليد اليمنى
Right-hand rule: قاعدة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي حول سلك يحمل تيارًا كهربائيًا. إذا كانت اليد اليمنى تقبض السلك، مع توجيه الإبهام باتجاه التيار الكهربائي، فإن الأصابع ستلتف باتجاه المجال المغناطيسي.

أسئلة

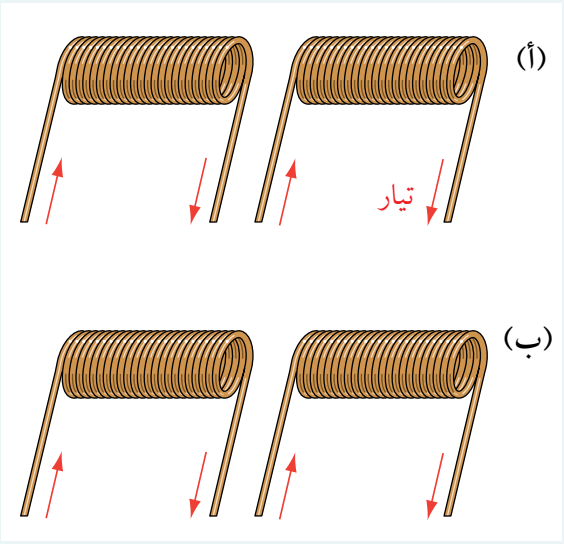
(١) ارسم نمط المجال المغناطيسي لسلك طويل مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًا، وبجانب الرسم ارسم مخططًا ثانيًا لتبيّن نمط المجال المغناطيسي إذا تضاعفت شدة التيار الكهربائي المتدفق وعُكس اتجاهه. فكيف يمكن أن يُظهر النمط أن المجال المغناطيسي أقوى بالقرب من السلك؟

(٢) انسخ الشكل ٥-٥، وسمِّ القطبَين الشمالي والجنوبي للمغناطيس الكهربائي. بيّن على المخطط الذي رسمته اتجاه المجال المغناطيسي في كل من المواضع A و B و C و D.



الشكل ٥-٥ ملف حلزوني يحمل تيارًا كهربائيًا.

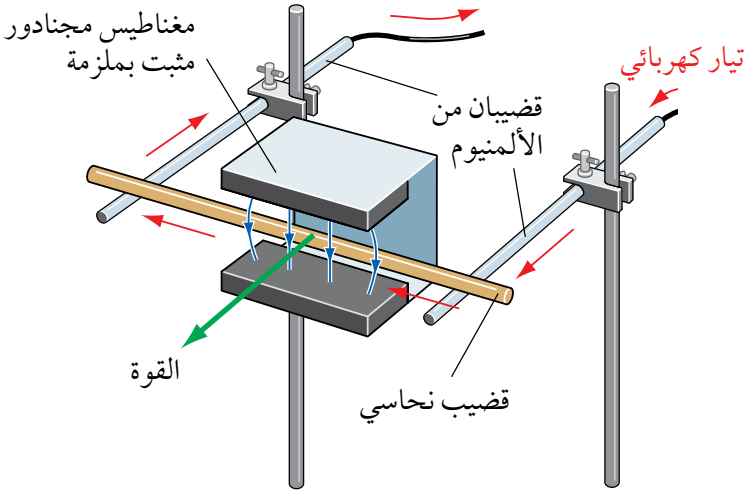
(٣) حدّد زوج المغناطيسات الكهربائية المبيّنة في الشكل ٥-٦ التي تجذب بعضها بعضًا، وتلك التي تتنافر.



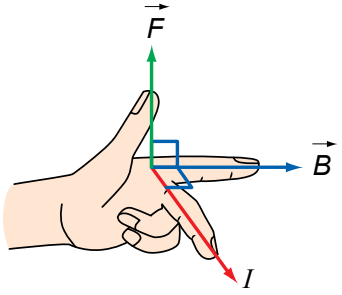
الشكل ٥-٦ زوجان من الملفات الحلزونية.

٥-٢ القوة المغناطيسية

عند وضع موصل حامل لتيار كهربائي بين قطبَي مغناطيس فإنه ينشأ عن التيار الكهربائي مجال مغناطيسي يتفاعل مع المجال المغناطيسي الخارجي (الناشئ عن الأقطاب)، ما يؤدي إلى ظهور قوة تؤثر على الموصل، يُظهر الشكل ٥-٧ حالة مبسّطة لمجالَين مغناطيسيَّين متفاعلَين.



الشكل ٥-٧ قضيب نحاسي حرّ التدحرج على طول «قضيبَين» أفقيَّين مصنوعَين من الألمنيوم.



الشكل ٥-٨ قاعدة اليد اليسرى لفليمنج.

يولّد المغناطيس مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا إلى حد ما، وبمجرد مرور التيار الكهربائي في القضيب النحاسي يبدأ القضيب بالتدحرج، ما يدل على أن هناك قوة تؤثر عليه، ويمكننا استخدام **قاعدة فليمنج لليد اليسرى (قاعدة المحرك)** **Fleming's left-hand (motor) rule** (الشكل ٥-٨) التي درستها في الصف العاشر لتحديد اتجاه القوة المؤثرة على الموصل الحامل للتيار الكهربائي، والتي ستوجهه على طول قضيبَي الألمنيوم إلى الخارج، كما هو مبيّن في الشكل ٥-٧.

مصطلحات علمية

قاعدة فليمنج لليد اليسرى (قاعدة المحرك) **Fleming's left-hand (motor) rule**: تُستخدم هذه القاعدة لتحديد اتجاه القوة التي تؤثر على موصل يحمل تيارًا كهربائيًا وموضوع في مجال مغناطيسي خارجي؛ حيث تشير:

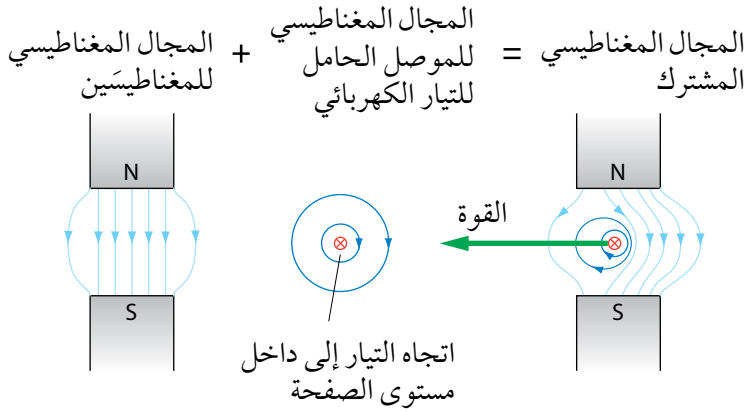
- الإبهام: اتجاه الحركة (القوة)
- السبابة: اتجاه المجال المغناطيسي
- الوسطى: اتجاه التيار الاصطلاحي.

شرح القوة المغناطيسية

يمكننا شرح هذه القوة بالأخذ في الاعتبار المجالَين المغناطيسيَّين لكل من المغناطيس والموصل الحامل للتيار الكهربائي، إذ يتّحد هذان المجالان أو يتفاعلان لتوليد القوة المؤثرة على الموصل.

يبيّن الشكل ٥-٩ ما يأتي:

- المجال المغناطيسي الخارجي للمغناطيسَين.
- المجال المغناطيسي للموصل الحامل للتيار الكهربائي.
- المجال المشترك للموصل الحامل للتيار الكهربائي وللمغناطيسَين.



الشكل ٥-٩ يتأثر الموصل الحامل للتيار الكهربائي في مجال المغناطيس الدائم بقوة وفقًا لقاعدة فليمنج لليد اليسرى، حيث يتّحد المجالان الناتجان عن المغناطيس الدائم والمجال الناتج عن التيار الكهربائي (المجال الأيسر والأوسط) كما هو مبيّن إلى اليمين.

إذا تخيلت أن خطوط المجال المغناطيسي كأشرطة مطاطية تتمدد، فسوف يتضح لك سبب دفع السلك إلى الخارج بالاتجاه المبيّن. هناك «أشرطة مطاطية» (خطوط مجال) في جهة اليمين من السلك، وبالتالي فإن المجال هناك أشد من جهة اليسار للسلك.

يُسمى إنتاج هذه القوة **تأثير المحرّك Motor effect**؛ لأن هذه القوة تُستخدم في المحركات الكهربائية، حيث أنه في محرك بسيط، ينتج التيار الكهربائي المار في ملف مجالًا مغناطيسيًا؛ فيتفاعل هذا المجال مع مجال مغناطيسي ثانٍ ينتجه مغناطيس دائم لإنتاج قوة، فتتسبب القوة الناتجة في دوران ملف يمر به تيار كهربائي في المحرك.

مصطلحات علمية

تأثير المحرك Motor effect: يُستخدم هذا المصطلح عندما يخضع سلك يحمل تيارًا كهربائيًا لقوة بوجود مجال مغناطيسي.

٥-٣ كثافة الفيض المغناطيسي

يشار إلى شدة المجال في مخططات المجال الكهربائي أو مجال الجاذبية، بواسطة المسافات الفاصلة بين خطوط المجال، فالمجال يكون أقوى عندما تكون خطوطه متقاربة بعضها من بعض، وينطبق هذا الوصف على المجالات المغناطيسية، فشدة المجال المغناطيسي تُعرف بأنها **كثافة الفيض المغناطيسي Magnetic flux density** ويرمز إليها بالرمز (B)، وأحيانًا تُسمى: شدة المجال المغناطيسي (يمكنك تخيّل أن هذه الكمية تمثل عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تمر خلال سطح ما لكل وحدة مساحة)، وتكون كثافة الفيض المغناطيسي أكبر بالقرب من قطب قضيب المغناطيس، وتقل كلما ابتعدت عنه.

مصطلحات علمية

كثافة الفيض المغناطيسي Magnetic flux density: القوة المؤثرة لكل وحدة تيار كهربائي لكل وحدة طول على سلك موضوع بزاوية قائمة مع المجال المغناطيسي ووحدة قياسها التسلا Tesla (T).

درست في الوحدة الأولى أن شدة مجال الجاذبية (g) عند نقطة ما تعرف على أنها القوة لكل وحدة كتلة:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

ودرست في الوحدة الثانية أن شدة المجال الكهربائي (E) تعرف بأنها القوة لكل وحدة شحنة موجبة:

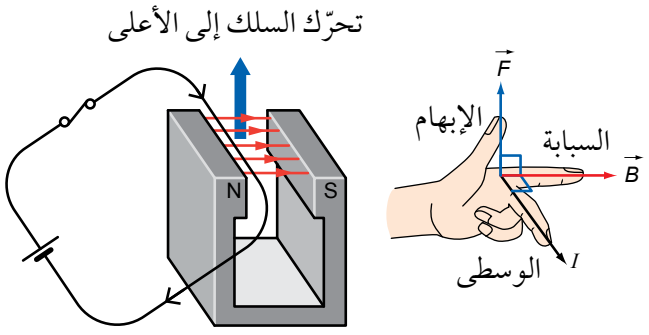
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

وبطريقة مماثلة تُعرّف كثافة الفيض المغناطيسي (شدة المجال المغناطيسي) بدلالة القوة المغناطيسية التي تؤثر على موصل حامل لتيار كهربائي موضوع بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي، وتُعرّف كثافة الفيض المغناطيسي (B) بالنسبة إلى المجال المغناطيسي المنتظم بالمعادلة:

$$B = \frac{F}{IL}$$

حيث (F) القوة المؤثرة على الموصل الحامل للتيار الكهربائي، و (I) شدة التيار الكهربائي المار في الموصل، و (L) طول الموصل الذي يتقاطع مع المجال المغناطيسي المنتظم، و (B) كثافة الفيض المغناطيسي، ويُحدّد اتجاه القوة (F) بواسطة قاعدة فليمنج لليد اليسرى كما هو موضح في الشكل ٥-١٠.

كثافة الفيض المغناطيسي عند نقطة ما في الفراغ هي



الشكل ٥-١٠ تحديد اتجاه القوة باستخدام قاعدة فلمنج لليد اليسرى.

القوة التي تؤثر على كل وحدة طول لموصل مستقيم طويل يحمل وحدة التيار الكهربائي وموضوع بزاوية قائمة مع المجال المغناطيسي عند تلك النقطة.

ووحدة قياس كثافة الفيض المغناطيسي (B) هي تسلا (T)، ويتضح من المعادلة أنها تكافئ ($1\ T = 1\ N\ A^{-1}\ m^{-1}$)، وتُعطى القوة المؤثرة على الموصل الحامل للتيار بالمعادلة:

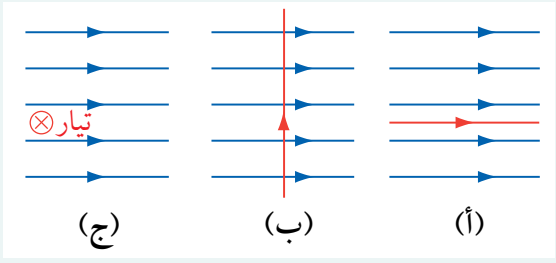
$$F = BIL$$

القوة المؤثرة على موصل حامل للتيار الكهربائي موضوع **بزاوية قائمة** مع المجال المغناطيسي.

لاحظ أنه يمكنك فقط استخدام هذه المعادلة عندما يكون المجال المغناطيسي موضوعًا بزاوية قائمة مع التيار الكهربائي.

أسئلة

٤) يبيّن الشكل ٥-١١ ثلاثة موصلات حاملة لتيار كهربائي وموضوعة في مجالات مغناطيسية. حدّد لكل موصل ما إذا كانت هناك قوة مغناطيسية تؤثر عليه. وإذا كان هناك قوة، ففي أيِّ اتجاه ستؤثر؟ لاحظ أن إشارة التقاطع (×) داخل دائرة تبيّن أن اتجاه التيار الكهربائي إلى داخل مستوى الورقة.



الشكل ٥-١١ ثلاثة موصلات موضوعة في مجال مغناطيسي.

٥) يتدفق تيار كهربائي شدته (0.20 A) في سلك طوله (2.50 m) موضوع بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي كثافة فيضه (0.060 T). احسب القوة المؤثرة على السلك.

٦) وُضع سلك طوله (20 cm) بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي، وتؤثر على السلك قوة مقدارها (0.015 N) عندما يتدفق فيه تيار كهربائي شدته (1.5 A). احسب كثافة الفيض المغناطيسي.

٧) سلك طوله (50 cm) ويحمل تيارًا كهربائيًا موضوعًا بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي كثافة فيضه (5.0 mT).

أ. إذا عبر 10^{18} إلكترونًا من نقطة ما في السلك كل ثانية، فما شدة التيار الكهربائي المتدفق؟
(شحنة إلكترون: $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C).

ب. احسب القوة المؤثرة على السلك.

قياس كثافة الفيض المغناطيسي

توضح المهارة العملية ٥-١ طريقة عملية لقياس كثافة الفيض المغناطيسي، كما عُرضت طريقة أخرى (باستخدام التسلاميتر) للاستفادة.

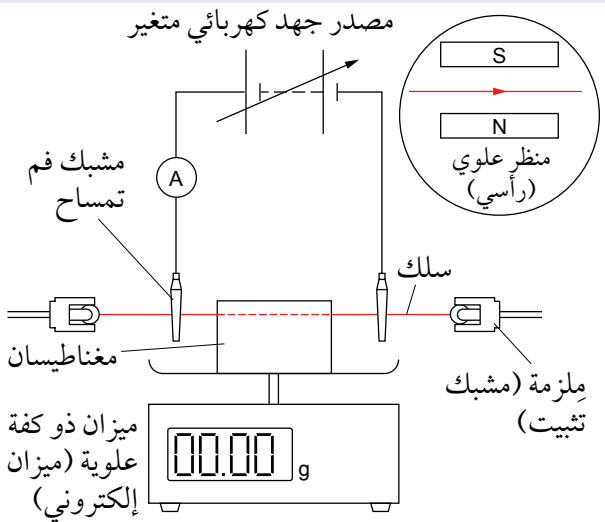
مهارة عملية ٥-١

قياس كثافة الفيض المغناطيسي B بالميزان التياري

يبيّن الشكل ٥-١١ تركيبًا مخبريًا بسيطًا يمكن أن يُستخدم لتحديد كثافة الفيض المغناطيسي بين مغناطيسَين. فالمجال المغناطيسي بين المغناطيسَين منتظم (تقريبًا)، ويمكن قياس طول السلك (L) الحامل للتيار الكهربائي في المجال المغناطيسي المنتظم باستخدام مسطرة.

يوضع التركيب المغناطيسي على سطح كفة الميزان كما يوضحه المنظر العلوي (الرأسي) في الشكل ٥-١١، فعندما لا يمرّ تيار كهربائي في السلك، لا يسجل الميزان أي قراءة، وعندما يتدفق تيار كهربائي (I) في السلك، فإن السلك عند ذلك يخضع لقوة نحو الأعلى حسب قاعدة فليمنج لليد اليسرى، ووفقًا لقانون نيوتن الثالث للحركة، فإنه توجد قوة مساوية بالمقدار ومعاكسة بالاتجاه تؤثر على المغناطيسَين، فيُدفع المغناطيسان نحو الأسفل وتظهر قراءة على شاشة الميزان، وتُحسب القوة (F) من خلال ($F = mg$)، حيث (m) هي الكتلة التي يقرأها الميزان بوحدة الكيلوغرام و (g) هي تسارع السقوط الحر ($9.81\ m\ s^{-2}$).

تابع



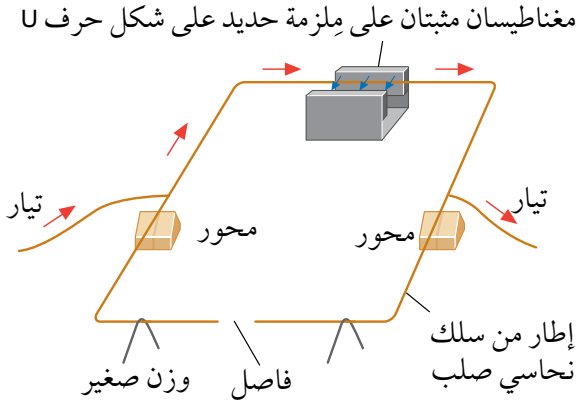
الشكل ٥-١٢ تركيب مخبري بسيط لتحديد كثافة الفيض المغناطيسي.

وبمعرفة (F) و (I) و (L)، يمكن تحديد كثافة الفيض المغناطيسي (B) بين المغناطيسَين باستخدام المعادلة:

$$B = \frac{F}{IL}$$

يمكنك استخدام التركيب في الشكل ٥-١٢ أيضًا لإظهار أن القوة تتناسب طرديًا مع شدة التيار الكهربائي. وهو يقيس في الواقع مقدار القوة المؤثرة على الموصل الحامل للتيار الكهربائي، وهو مثال على الميزان التياري.

يظهر في الشكل ٥-١٣ شكلٌ آخر للميزان التياري، حيث يتكوّن من إطار سلكي يتزن على محورَين، فعندما يتدفق تيار كهربائي عبر الإطار، يدفع المجال المغناطيسي الإطار نحو الأسفل، ويمكنك إعادته إلى وضع الاتزان بإضافة أوزان صغيرة إلى الجانب الآخر من الإطار.

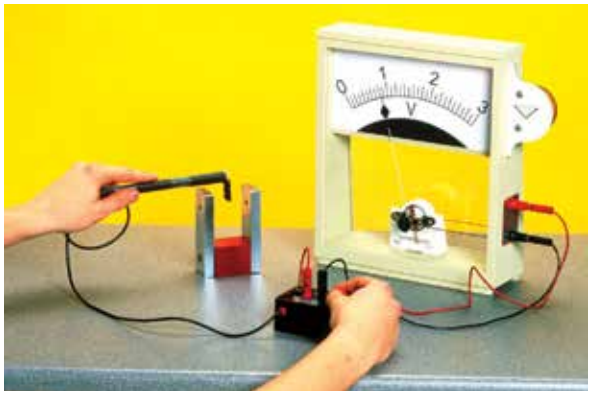


الشكل ٥-١٣ ميزان تياري مخبري بسيط.

قياس كثافة الفيض المغناطيسي بتسلاميتر

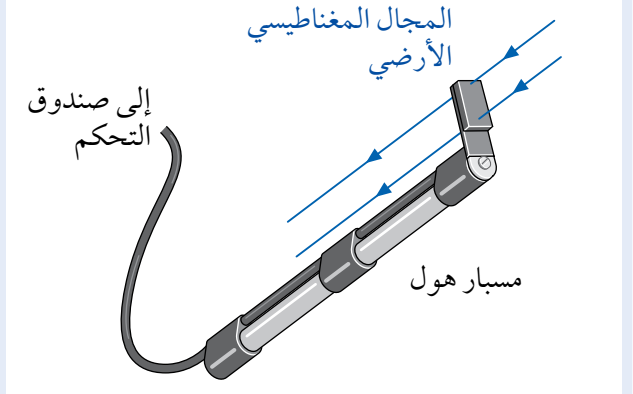
أبسط جهاز لقياس كثافة الفيض المغناطيسي (B) هو تسلاميتر (مسبار هول Hall probe) (الصورة ٥-٢). فعندما يُمسك المسبار بحيث تمر خطوط المجال المغناطيسي بزاوية قائمة عبر الوجه المسطح للمسبار، فإن الجهاز يعطي قراءة لقيمة (B).

يتم معايرة بعض الأجهزة بحيث تعطي قراءات بوحدة ميكروتسلا (μT) أو ميلّي تسلا (mT)، وإذا لم تكن الأجهزة معايرة فإنه يجب عليك إما معايرتها أو استخدامها للحصول على قياسات نسبية لـ (B).



الصورة ٥-٢ استخدام تسلاميتر لقياس كثافة الفيض المغناطيسي بين مغناطيسَين.

يجب الإمساك بمسبار هول بحيث تعبر خطوط المجال مباشرة من خلاله بزاوية قائمة مع الوجه المسطّح للمسبار (الشكل ٥-١٤). فإذا لم يكن المسبار قد أُمسك بتوجيه صحيح، فإن القراءة على المقياس ستنخفض.



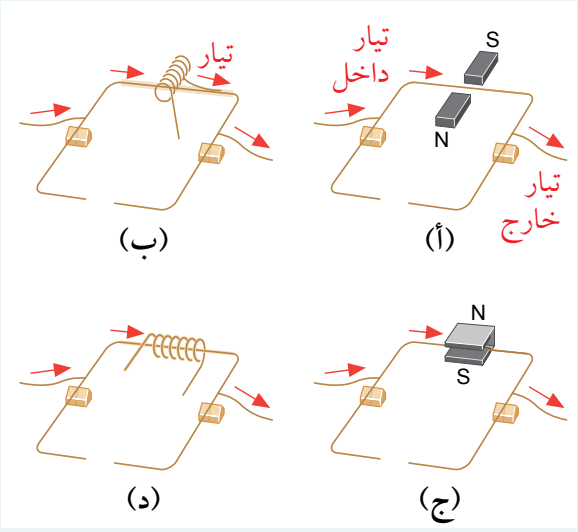
الشكل ٥-١٤ يجب أن تعبر خطوط الفيض المغناطيسي عبر المسبار بزاوية 90° مع وجهه المسطح .

تابع

يُعدّ التسلاميتر حساسًا بدرجة كافية لقياس كثافة الفيض المغناطيسي الأرضي؛ إذ يمسك المسبار أولًا بحيث تعبر خطوط المجال المغناطيسي الأرضي مباشرة من خلاله، كما هو مبيّن في الشكل ٥-١٤. وستكون للقراءة على الڤولتميتر بهذا التوجيه قيمة قصوى، ثم يدوّر المسبار بزاوية 180° بحيث تعبر خطوط المجال المغناطيسي من خلاله بالاتجاه المعاكس، والتغيّر في قراءة المقياس هو ضعف كثافة الفيض المغناطيسي الأرضي.

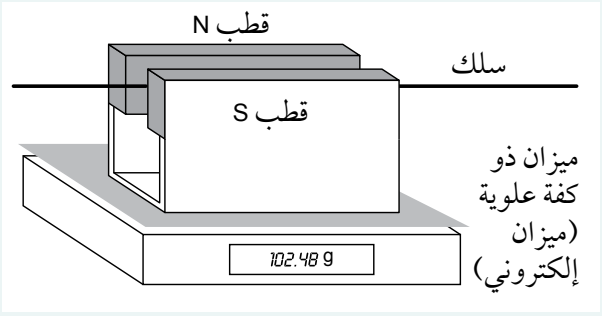
أسئلة

(٨) في الأمثلة المبيّنة في الشكل ٥-١٥، أي ميزان تياري سيميل؟ وإلى أي اتجاه سيميل الجانب الذي يحمل التيار الكهربائي؟



الشكل ٥-١٥ أربعة موازين تيارية.

(٩) تتغير قراءة الميزان في التركيب المبيّن في الشكل ٥-١٦ من (102.48 g) إلى (104.48 g) عند مرور التيار الكهربائي. اشرح سبب حدوث ذلك، وحدّد مقدار القوة المؤثرة على السلك واتجاهها عند مرور التيار الكهربائي. ما اتجاه التيار الكهربائي المارّ في السلك؟



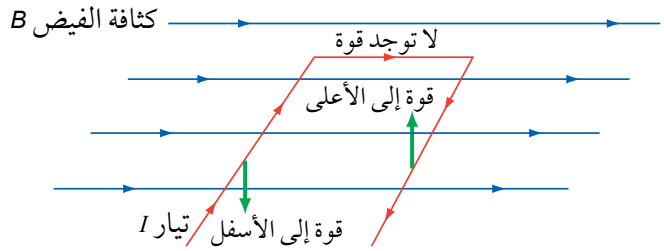
الشكل ٥-١٦ استخدام ميزان إلكتروني.

٥-٤ المزيد عن القوى على الموصلات الحاملة لتيار كهربائي

شرحنا القوة المؤثرة على موصل حامل لتيار كهربائي موضوع في مجال مغناطيسي من خلال تفاعل مجالَين مغناطيسيَّين: المجال الناتج عن التيار الكهربائي والمجال الخارجي، وفي هذا الموضوع سنستخدم طريقة أخرى أكثر تجريدًا للتفكير في هذا الأمر؛ حيث سنتناول القوة المؤثرة على موصل حامل لتيار كهربائي يقطع مجالًا مغناطيسيًا في حالتين: بزاوية قائمة، وبزاوية تختلف عن 90°.

أولًا: تيار يمرّ عموديًا في مجال مغناطيسي

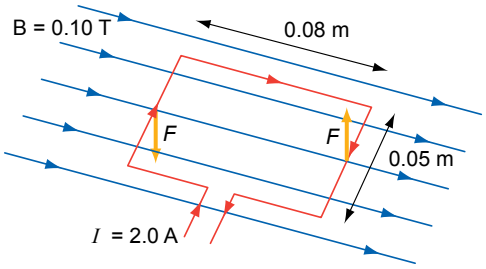
عندما يقطع تيار كهربائي خطوط المجال المغناطيسي بزوايا قائمة (الشكل ٥-١٧)، تنتج قوة تُبذل على الموصل الحامل للتيار الكهربائي، وهذا يساعدنا على تذكّر أنه لا يتأثر الموصل بأي قوة عندما يكون اتجاه التيار الكهربائي موازيًا للمجال المغناطيسي. وبالتالي ليس علينا التفكير في المجال الناشئ عن التيار الكهربائي؛ إذ يمكننا أن نرى في الشكل ٥-١٧ أن هناك قوة فقط عندما يقطع التيار الكهربائي خطوط المجال المغناطيسي، وهذه القوة مهمة جدًا؛ فهي أساس عمل المحركات الكهربائية.



الشكل ٥–١٧ القوة المؤثرة على موصل حامل لتيار كهربائي قاطعًا مجالًا مغناطيسيًا بزوايا قائمة.

مثال (إثرائي)

١. يحتوي محرك كهربائي على ملف مستطيل من سلك بالأبعاد المبيّنة في الشكل ٥–١٦. وضع الملف في مجال مغناطيسي كثافة فيضه (0.10 T) و شدة التيار الكهربائي في الحلقة (2.0 A). احسب الازدواج (عزم الدوران) الذي يؤثر على الملف في الوضع المبيّن في الشكل ٥–١٨.



الشكل ٥–١٨ محرك كهربائي بسيط– ملف حامل لتيار كهربائي في مجال مغناطيسي.

الخطوة ١: الكميّات التي نعرفها هي:

$B = 0.10\ \text{T}$ و $I = 2.0\ \text{A}$ و $L = 0.05\ \text{m}$

الخطوة ٢: يمكننا الآن حساب القوة على أحد جوانب الملف باستخدام المعادلة:

$F = BIL$

$= 0.10 \times 2.0 \times 0.05 = 0.01\ \text{N}$

الخطوة ٣: القوّتان على جانبَي الملف المتقابلَين متساويتان في المقدار ومتوازيتان باتجاهَين متعاكسَين. وبكلمات أخرى، فإنهما يشكلان ازدواجًا. إن الازدواج (عزم الدوران) لزوج القوى يساوي مقدار إحدى القوّتَين مضروبة في المسافة العمودية بينهما. يفصل بين القوّتَين مسافة (0.08 m)، لذلك:

عزم الازدواج = القوة × المسافة العمودية الفاصلة بين القوّتَين

$= 0.01 \times 0.08 = 8.0 \times 10^{-4}\ \text{N m}$

أسئلة

(١٠) سلك طوله (50 cm) يحمل تيارًا كهربائيًا شدته (2.4 A)، وموضوع بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي كثافة فيضه (5.0 mT). احسب القوة المؤثرة على السلك.

(١١) يتكوّن ملف مربع الشكل طول ضلعه (20 cm) لمحرك كهربائي من 200 لفة ويحمل تيارًا كهربائيًا شدته (1.0 A) وموضوع في مجال مغناطيسي كثافة فيضه (0.05 T).

أ. احسب أقصى قوة تؤثر على كل ضلع في الملف.

ب. في أي وضعية يجب أن يكون الملف لكي يكون لهذه القوة أكبر عزم دوراني؟

ثانيًا: تيار يمرّ بزاوية غير قائمة على مجال مغناطيسي

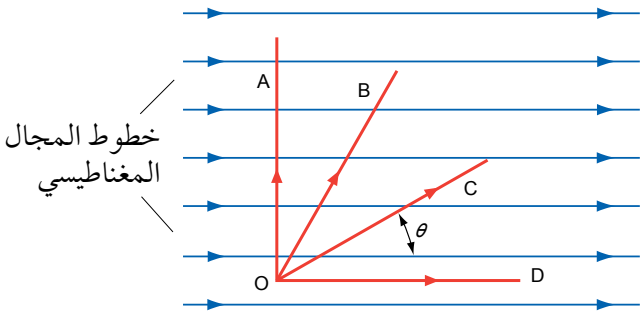
يجب أن نفكر أيضًا في الحالة التي يقطع فيها الموصل الحامل للتيار الكهربائي مجالًا مغناطيسيًا بزاوية غير قائمة. يوضح الشكل ٥-١٩ أن القوة تصبح أضعف عندما يُحرّك الموصل من الموضع OA إلى OB، ومن ثم إلى OC وأخيرًا إلى OD حيث تصبح صفرًا على الموصل في الموضع OD؛ لأنه أصبح موازيًا لخطوط المجال المغناطيسي، ولحساب القوة يجب علينا إيجاد مركبة كثافة الفيض المغناطيسي ($\vec{B}$) بزاوية قائمة مع التيار الكهربائي، وهذه المركبة هي $B \sin\theta$، حيث (θ) هي الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي واتجاه التيار الكهربائي أو الموصل، وبالتعويض في المعادلة $F = BIL$ نحصل على:

$$F = (B \sin\theta)\, IL$$

أو ببساطة:

$F = BIL\sin\theta$

القوة المؤثرة على موصل يحمل تيارًا كهربائيًا.



الشكل ٥-١٩ تعتمد القوة المؤثرة على موصل حامل لتيار كهربائي على الزاوية التي يصنعها مع خطوط المجال المغناطيسي.

لاحظ أن مركّبة ($\vec{B}$) الموازية للتيار الكهربائي هي $B\cos\theta$، لكن هذه المركبة لا تؤثر في القوة؛ لأنه لا توجد قوة عندما يكون المجال المغناطيسي والتيار الكهربائي متوازيَين. فالقوة ($\vec{F}$) يجب أن تكون بزاوية قائمة على كل من اتجاهَي التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي.

مثال

٢. الموصل في الوضعية OC (انظر الشكل ٥-١٩) طوله (0.20 m) وموضوع بزاوية θ مقدارها 25° مع مجال مغناطيسي كثافة فيضه (0.050 T). احسب القوة المؤثرة على الموصل عندما يحمل تيارًا كهربائيًا شدته (400 mA).

الخطوة ١: اكتب ما تعرفه وما تريد أن تعرفه:

$B = 0.050$ T و $I = 400$ mA $= 0.40$ A

و $L = 0.20$ m و $\theta = 25°$

$F = ?$

الخطوة ٢: اكتب المعادلة وعوّض القيم وقم بحلّها:

$F = BIL\sin\theta$

$= 0.050 \times 0.40 \times 0.20 \times \sin 25°$

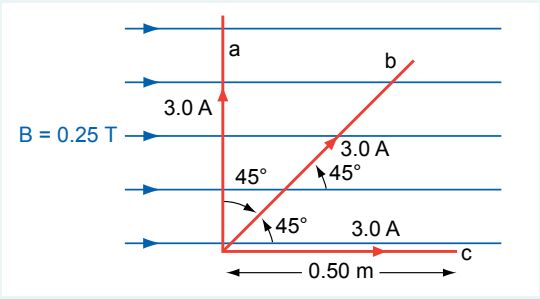
$\approx 1.7 \times 10^{-3}$ N

الخطوة ٣: حدّد اتجاه القوة:

تصنع القوة زاوية 90° على كل من المجال المغناطيسي والتيار الكهربائي، أي عموديًا على الصفحة، وتبيّن قاعدة اليد اليسرى أنها تؤثر إلى داخل مستوى الورقة.

سؤال

(١٢) ما مقدار القوة المؤثرة على سلك يمر فيه تيار كهربائي موضوع في مجال مغناطيسي منتظم عند ثلاثة مواضع مختلفة: a، b، c (الشكل ٥-٢٠)؟ حدّد اتجاه القوة في كل موضع.



الشكل ٥-٢٠ ثلاثة مواضع مختلفة لسلك يمرّ به تيار كهربائي موضوع في مجال مغناطيسي منتظم.

٥-٥ الحث الكهرومغناطيسي

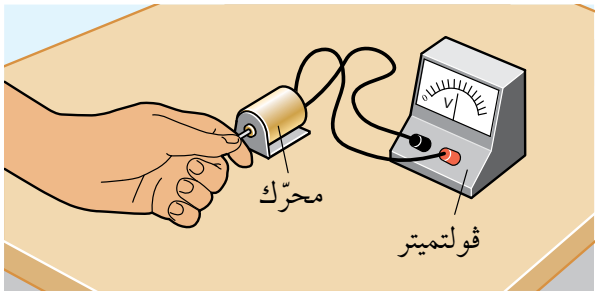
فيما سبق رأينا كيف يتولد مجال مغناطيسي من التيار الكهربائي، فهل يحدث العكس؟ يمكنك إجراء بعض التجارب البسيطة لملاحظة ذلك وهو ما يُعرف بظاهرة الحث الكهرومغناطيسي.

مهارة عملية ٥-٢

حاول أن تتنبأ بما ستلاحظه في كل تجربة قبل إجرائها.

التجربة 1

صِل محركًا كهربائيًا صغيرًا بفولتميتر ذي ملف متحرك (الشكل ٥-٢١)، دوّر محور المحرك ولاحظ انحراف مؤشر الفولتميتر. ماذا يحدث عندما تدوّر المحرك بحركة أبطأ؟ وماذا يحدث عندما توقفه؟ عادة نوصل المحرك بمصدر جهد كهربائي فيدور، ولكن في هذه التجربة أنت قمت بتدوير المحرك فولّد فرق جهد كهربائي بين طرفَيه، وهذا يطلق عليه المولد وهو يشبه المحرك الكهربائي لكنه يعمل بطريقة عكسية كمولّد.

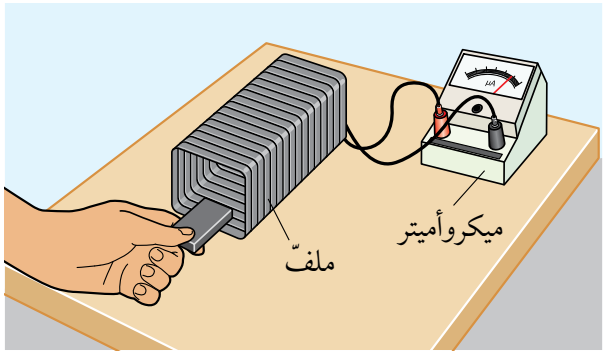


الشكل ٥-٢١ يعمل المحرك الكهربائي بطريقة عكسية كمولّد.

التجربة 2

صِل ملفًا بميكروأميتر حسّاس (الشكل ٥-٢٢)، ولاحظ ما يحدث عندما: تقرّب قضيبًا مغناطيسيًا من الملف. أمسكه من دون حركة ثم أبعده، كيف يتغيّر انحراف إبرة الميكروأميتر؟ حاول تحريكه بسرعات مختلفة، وبعكس قطبَي المغناطيس وحاول استخدام مغانط ضعيفة تارة وقوية تارة أخرى.

حرّك الملف نحو المغناطيس باستخدام الأدوات نفسها ولاحظ انحراف مؤشر الميكروأميتر.

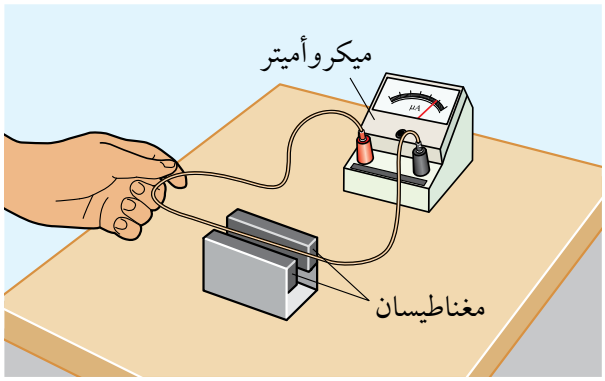


الشكل ٥-٢٢ يتحرك مغناطيس بالقرب من ملف فيولّد فيه تيارًا كهربائيًا صغيرًا (مستحثًا).

تابع

التجربة 3

صل سلكًا طويلًا بميكروأميتر حسّاس، وحرّك الجزء الأوسط من السلك إلى الأعلى وإلى الأسفل عبر المجال المغناطيسي بين مغناطيسَين (الشكل ٥-٢٣). ضاعف طول السلك بحيث يعبر ضعف طوله المجال المغناطيسي، ماذا يحدث لقراءة الميكروأميتر الآن؟ كيف يمكنك تشكيل السلك على شكل حلقة لينحرف مؤشر الميكروأميتر بمقدار الضعف عما سبق؟



الشكل ٥-٢٣ استقصاء شدة التيار الكهربائي المتولّد (المستحث) عندما يتحرك سلك خلال مجال مغناطيسي.

العوامل المؤثرة على القوة الدافعة الكهربائية المستحثة

لقد درست أنه لكي يتولد تيار كهربائي لا بد من قوة دافعة كهربائية، ونظرًا إلى أنه لا يوجد مصدر في التجارب التي نفذتها فإن القوة الدافعة الكهربائية هنا هي قوة دافعة كهربائية مستحثة، والتيار الناتج عنها يسمى تيارًا كهربائيًا مستحثًا، حيث لاحظت في جميع التجارب الواردة في المهارة العملية ٥-٢ تيارًا كهربائيًا مستحثًا ناتجًا عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة. فهناك مجال مغناطيسي وموصل في كل حالة، فعندما تُحرّك المغناطيس أو الموصل ينتج عن ذلك قوة دافعة كهربائية مستحثة، وعندما تتوقف فإن التيار الكهربائي يتوقف.

يتّضح من التجربة الثالثة أن مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة لسلك مستقيم يعتمد على عدة عوامل:

- مقدار كثافة الفيض المغناطيسي.
- طول السلك في المجال.
- سرعة تحرّك السلك عبر المجال المغناطيسي.

وتعتمد القوة الدافعة الكهربائية المستحثة لملف ما كما في التجربتَين الأولى والثانية على العوامل الآتية:

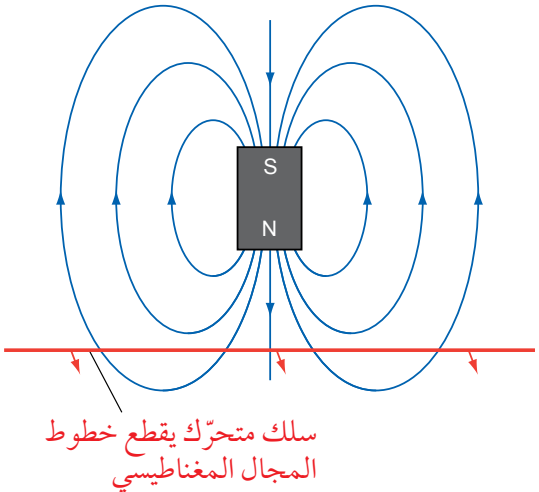
- مقدار كثافة الفيض المغناطيسي.
- مساحة المقطع العرضي للملف.
- الزاوية بين مستوى الملف والمجال المغناطيسي.
- عدد لفات سلك الملف.
- معدل دوران الملف في المجال.

تفسير الحث الكهرومغناطيسي

لقد رأيت أن الحركة النسبية بين الموصل والمجال المغناطيسي تولد تيارًا كهربائيًا مستحثًا في الموصل عندما يكون الموصل جزءًا من دائرة كاملة، وقد استُخدمت أدوات القياس في تجارب المهارة العملية ٥-٢ للاستدلال على مرور تيار كهربائي، والآن نحن بحاجة إلى التفكير في كيفية شرح هذه الملاحظات باستخدام ما نعرفه عن المجالات المغناطيسية.

قطع خطوط المجال المغناطيسي

لنفترض قضيبًا مغناطيسيًا؛ فإن له مجالًا مغناطيسيًا في الحيّز المحيط به، ونمثّل هذا المجال بخطوط المجال المغناطيسي. والآن فكّر فيما سيحدث عندما يتحرّك سلك إلى الداخل في المجال المغناطيسي بشكل عمودي (الشكل ٥-٢٤)؛ ففي أثناء تحركه فإنه يقطع المجال المغناطيسي، ثم أَبعِد السلك عن المجال؛ فإنه مرة أخرى يقطع خطوط المجال ولكن بالاتجاه المعاكس.

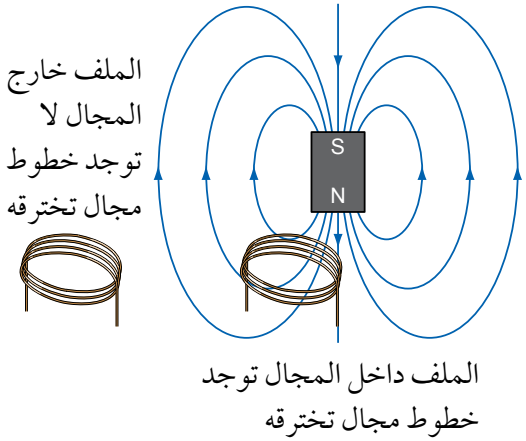


الشكل ٥-٢٤ توليد تيار كهربائي مستحث بتحريك سلك بشكل عمودي خلال مجال مغناطيسي.

إنّ قطع خطوط المجال المغناطيسي بواسطة موصل هو التأثير الذي يؤدي إلى ظهور تيار كهربائي ناتج عن قوة دافعة كهربائية مستحثة في الموصل، ولا يهم ما إذا كان الموصل قد حُرّك خلال المجال المغناطيسي أو حُرّك المغناطيس خلال الموصل؛ فالنتيجة هي نفسها، أي سيكون هناك قوة دافعة كهربائية مستحثة.

يظهر التأثير بشكل أوضح إذا استخدمنا ملفًا، حيث إنّ التأثير لملف مكوّن من عدد N لفة، أكبر بمقدار N مرة من لفة واحدة من السلك؛ وفي حالة الملف من المهم أن تركز على عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق الملف؛ فإذا كان هناك تغيّر في عدد خطوط المجال التي تعبر خلال الملف، فإنه ستتولد قوة دافعة كهربائية مستحثة عبر نهايتَي الملف (أو سيكون هناك تيار كهربائي ناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة إذا كان الملف يشكّل جزءًا من دائرة كاملة).

يبيّن الشكل ٥-٢٥ ملفًا بالقرب من مغناطيس، فعندما يكون الملف خارج المجال، لا توجد خطوط مجال مغناطيسي تخترق الملف، بينما عندما يكون الملف داخل المجال، فإن خطوط المجال تخترق الملف، ويؤدي إدخال الملف وإخراجه من المجال إلى تغيير عدد خطوط المجال التي تخترق هذا الملف، وهذا يؤدي إلى إحداث قوة دافعة كهربائية مستحثة عبر نهايتَي الملف، وتُعدّ خطوط المجال التي تخترق الملف نقطة انطلاق مفيدة في فهمنا للقوة الدافعة الكهربائية المستحثة، ومع ذلك -وكما سترى لاحقًا- فإن

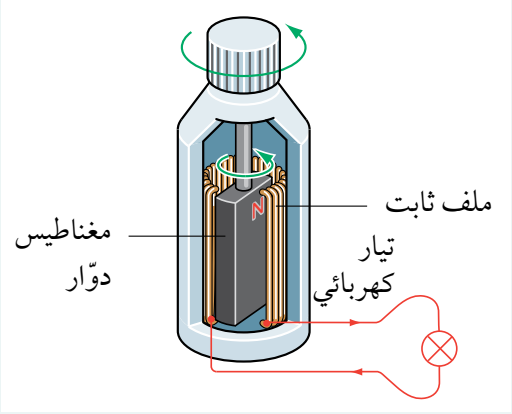


الشكل ٥-٢٥ تتغيّر خطوط المجال التي تمر خلال ملف في أثناء تحريكه إلى داخل مجال مغناطيسي وإلى خارجه.

هناك حاجة إلى التفكير بعمق في الفيض المغناطيسي من أجل فهم أفضل لكيفية تولُّد القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في دائرة ما.

سؤال

(١٣) استخدم فكرة قطع موصل لخطوط المجال المغناطيسي لشرح كيفية توليد تيار كهربائي بواسطة قوة دافعة كهربائية مستحثة في مولّد الدراجة (الشكل ٥-٢٦).



الشكل ٥-٢٦ يدور مغناطيس دائم داخل ملف ثابت في مولّد الدراجة.

اتجاه التيار الكهربائي

كيف يمكننا تحديد اتجاه التيار الكهربائي الناتج عن قوة دافعة كهربائية مستحثة؟ استخدمنا قاعدة فليمنج لليد اليسرى (قاعدة المحرك) التي درسناها سابقًا في هذه الوحدة لاستنتاج اتجاه حركة السلك (القوة المغناطيسية المؤثرة)، أما الحث الكهرومغناطيسي فهو بمثابة الصورة المعكوسة في مرآة مقارنة بتأثير المحرّك، فبدلًا من تيار كهربائي يُنتج قوة تؤثر على موصل حامل لتيار كهربائي موضوع في مجال مغناطيسي، هنا تؤثر قوة خارجية على الموصل تعمل على تحريكه في مجال مغناطيسي ونتيجة لذلك يستحث تيارًا كهربائيًا في الموصل، لذلك لا تتفاجأ إذا علمت أننا نستخدم صورة بالمرآة (صورة معكوسة) لقاعدة اليد اليسرى: **قاعدة اليد اليمنى لفليمنج (قاعدة المولّد)** **Fleming's right-hand (generator) rule**.

تمثل الأصابع الثلاثة الاتجاهات نفسها مرة أخرى (الشكل ٥-٢٧):

- الإبهام: اتجاه الحركة (القوة).
- السبّابة: اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي.
- الوسطى: اتجاه التيار (الاصطلاحي) الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة.

يُحرّك الموصل في المثال المبيّن في الشكل ٥-٢٨ إلى الأسفل خلال المجال المغناطيسي بشكل عمودي، فيتولّد تيار كهربائي في الموصل ناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة كما

مصطلحات علمية

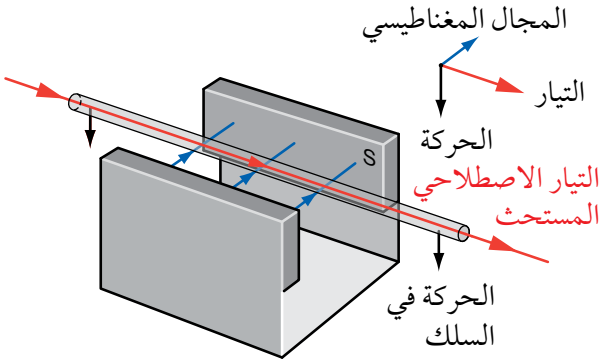
قاعدة لليد اليمنى لفليمنج (قاعدة المولّد)

Fleming's right-hand (generator) rule: تستخدم هذه القاعدة لتحديد اتجاه التيار الاصطلاحي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في موصل يتحرك بزاوية قائمة مع المجال المغناطيسي:

- الإبهام: الحركة (القوة)
- السبابة: المجال المغناطيسي
- الوسطى: التيار الاصطلاحي المستحث.

هو مبيّن. تحقّق من هذا بتطبيق القاعدة مستخدمًا يدك اليمنى، ويمكنك أيضًا التحقّق من أنه عند عكس اتجاه الحركة أو المجال ينتج تيار كهربائي مستحث متدفق بالاتجاه المعاكس.

الشكل ٥-٢٧ قاعدة اليد اليمنى لفليمنج (قاعدة المولّد).



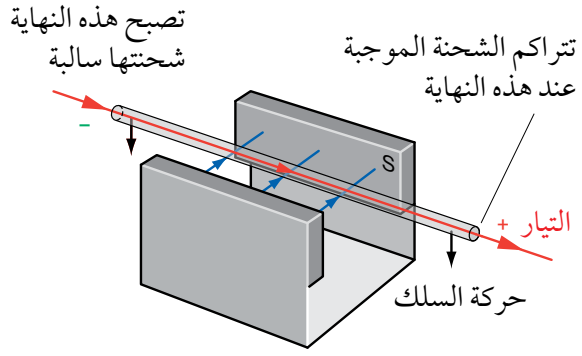
الشكل ٥-٢٨ تحديد اتجاه التيار الكهربائي المستحث باستخدام قاعدة اليد اليمنى لفليمنج (السلك المبيّن جزء من دائرة أو حلقة كاملة).

القوة الدافعة الكهربائية المستحثة

عندما لا يكون الموصل جزءًا من دائرة كاملة، فإنه لا يمكن أن ينتج تيارًا كهربائيًا مستحثًا بواسطة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، ولكن بدلًا من ذلك ستتراكم الشحنة السالبة على أحد طرفَي الموصل، تاركةً الطرف الآخر مشحونًا بشحنة موجبة، فنكون قد حصلنا على قوة دافعة كهربائية مستحثة عبر طرفَي الموصل.

هل مصطلح قوة دافعة كهربائية صحيح؟ أم هل يجب أن يسمى فرق الجهد الكهربائي؟ درست سابقًا تمييزًا بين فرق الجهد الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية، فمصطلح قوة دافعة كهربائية صحيح هنا؛ لأنه من خلال دفع السلك عبر المجال المغناطيسي يُبذل شغل، ويتحوّل هذا الشغل إلى طاقة كهربائية، فكّر في هذا بطريقة أخرى: فبما أنه يمكننا توصيل طرفَي الموصل بحيث يكون هناك تيار كهربائي في مكونات أخرى عبر الدائرة الكهربائية - مثل المصباح - لذا يجب أن يكون هناك قوة دافعة كهربائية، أي مصدر للطاقة الكهربائية.

يبيّن الشكل ٥-٢٩ كيف تُستحث القوة الدافعة الكهربائية. لاحظ أن التيار الاصطلاحي يكون داخل الموصل من الطرف السالب إلى الطرف الموجب، حيث تنتقل الإلكترونات الحرة في الواقع داخل الموصل من اليمين إلى اليسار، ما يجعل الطرف الأيسر من الموصل سالبًا، وهذا ما يحدث بالضبط داخل البطارية أو أي مصدر آخر للقوة الدافعة الكهربائية. ما الذي يجعل هذه الإلكترونات تتحرك؟ إن تحريك الموصل يكافئ إعطاء إلكترون حر داخل الموصل سرعة باتجاه هذه الحركة، وهذا الإلكترون موجود في مجال مغناطيسي خارجي، وبالتالي يتأثر بقوة مغناطيسية *Bev* من اليمين إلى اليسار. تحقّق من هذا بنفسك.



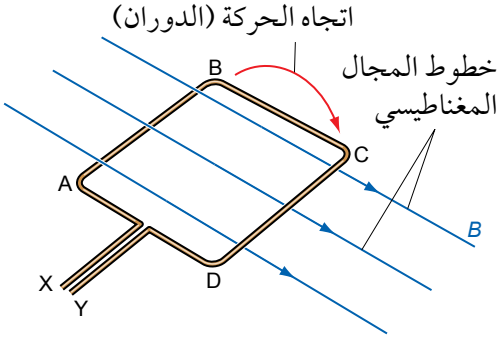
الشكل ٥-٢٩ تُستحث قوة دافعة كهربائية عبر نهايتَي الموصل.

أسئلة

(١٤) يدور الملف في الشكل ٥-٣٠ في مجال مغناطيسي منتظم.

حدّد اتجاه التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الضلَعين AB و CD.

اذكر أي طرف X أو Y سيصبح موجبًا.



الشكل ٥-٣٠ ملف يدور في مجال مغناطيسي منتظم.

(١٥) عندما تطير طائرة من الشرق إلى الغرب، فإن أجنحتها تكون عبارة عن موصل كهربائي يقطع الفيض المغناطيسي الأرضي. حدّد أي طرف جناح (الأيسر أم الأيمن) في نصف الكرة الأرضية الشمالي سيصبح موجبًا.

ما الذي سيحدث لطرف الجناح هذا في نصف الكرة الأرضية الجنوبي؟ اشرح ذلك.

الفيض المغناطيسي والفيض المغناطيسي الكلّي

درسنا حتى الآن في هذه الوحدة الحث الكهرومغناطيسي بطريقة وصفية بحتة، والآن سندرس كيفية حساب قيمة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، وكذلك كيفية تحديد اتجاهها.

رأينا سابقًا في هذه الوحدة كيف أن كثافة الفيض المغناطيسي (B) تُعطى بالمعادلة:

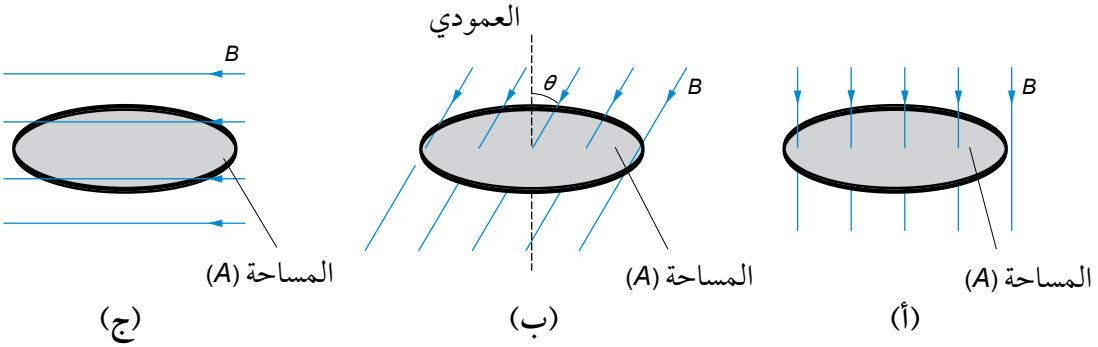
$$B = \frac{F}{IL}$$

والآن سندرس **الفيض المغناطيسي** **Magnetic flux** بطريقة كمّية، وقد عبّرنا عن كثافة الفيض المغناطيسي (B) بأنها عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تمر عبر سطح لكل وحدة مساحة، ويمكننا تمثيل الفيض المغناطيسي على أنه العدد الكلي لخطوط المجال المغناطيسي التي تمر عبر مساحة المقطع العرضي (A)، لاحظ أن مساحة المقطع العرضي (A) تعتبر كمية متجهة (متجه مساحة ثنائي الأبعاد) يحدد اتجاهها باتجاه العمودي على السطح، ويجب أن يكون الفيض المغناطيسي (Φ) (الحرف اليوناني phi) بالنسبة إلى المجال المغناطيسي العمودي على (A)، مساويًا لحاصل ضرب كثافة الفيض المغناطيسي (B) في المساحة (A) (الشكل ٥-٣١ أ).

مصطلحات علمية

الفيض المغناطيسي

Magnetic flux: حاصل ضرب كثافة الفيض المغناطيسي في مساحة المقطع العرضي العمودية على اتجاه كثافة الفيض المغناطيسي. ووحدة قياسه: ويبر Wb وتكافئ $T\,m^2$.



الشكل ٥-٣١ (أ) يكون الفيض المغناطيسي مساويًا لـ ***BA*** عندما يكون المجال المغناطيسي عموديًا على المساحة.
(ب) يصبح الفيض المغناطيسي ***BA cosθ*** عندما يكون بين المجال المغناطيسي والعمودي على المساحة زاوية ***θ***.
(ج) يكون الفيض المغناطيسي مساويًا للصفر عندما يكون المجال المغناطيسي موازيًا للمساحة.

يعطى الفيض المغناطيسي (Φ) خلال مساحة المقطع العرضي (A) بالمعادلة:

$$\Phi = \vec{B}\vec{A}$$

حيث ($\vec{B}$) هي مركبة كثافة الفيض المغناطيسي العمودية على المساحة.

$B \cos\theta$

مركّبة كثافة الفيض المغناطيسي $\vec{B}$ العمودية على مستوى مساحة المقطع العرضي أو الموازية للمتجه A، حيث θ هي الزاوية بين العمودي على المساحة والمجال المغناطيسي.

كيف يمكننا حساب الفيض المغناطيسي عندما لا يكون ($\vec{B}$) عموديًا على (A)؟ يمكنك أن ترى ذلك بسهولة عندما يكون المجال موازيًا لمستوى المساحة (الشكل ٥-٣١ ج)، حيث يكون الفيض المغناطيسي خلال (A) صفرًا. ولإيجاد الفيض المغناطيسي بشكل عام، علينا إيجاد مركّبة كثافة الفيض المغناطيسي العمودية على مساحة المقطع العرضي. يبيّن الشكل ٥-٣١(ب) مجالاً مغناطيسيًا بينه وبين العمودي على المساحة زاوية θ، في هذه الحالة الفيض المغناطيسي:

$$\Phi = (B\cos\theta)\, A$$

أو ببساطة الفيض المغناطيسي:

$$\Phi = BA\cos\theta$$

(لاحظ أنه عندما تكون $\theta = 90°$، فإن $\Phi = 0$؛ وعندما $\theta = 0°$، فإن $\Phi = BA$).

بالنسبة إلى الملف ذي اللفات N، يُعرّف **الفيض المغناطيسي الكلي Magnetic flux linkage** على أنه حاصل ضرب الفيض المغناطيسي في عدد اللفات؛ أي سيكون:

الفيض المغناطيسي الكلي $= N\Phi$

أو:

الفيض المغناطيسي الكلي $= BAN\cos\theta$

مصطلحات علمية

الفيض المغناطيسي الكلي
Magnetic flux linkage: حاصل ضرب الفيض المغناطيسي لملف ما في عدد اللفات. ووحدة قياسه: ويبر (Wb).

وحدة قياس الفيض المغناطيسي هي ويبر (Wb)، ووحدة الفيض المغناطيسي الكلي هي ويبر (Wb) أيضًا.

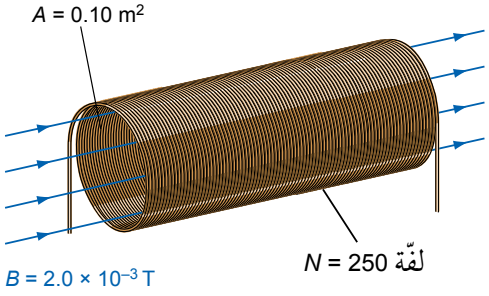
الويبر الواحد (1 Wb) هو الفيض المغناطيسي الذي يعبر عموديًا خلال مقطع عرضي مساحته ($1\ m^2$) عندما تكون كثافة الفيض المغناطيسي (1 T) حيث أن ($1\ Wb = 1\ Tm^2$).

تُستحث القوة الدافعة الكهربائية في دائرة كهربائية ما عندما يتغير الفيض المغناطيسي الكلي للدائرة الكهربائية بالنسبة إلى الزمن. وبما أن الفيض المغناطيسي يساوي $BA\cos\theta$، لذلك هناك ثلاث طرائق يمكن أن تُستحث بها القوة الدافعة الكهربائية:

- تغيّر كثافة الفيض المغناطيسي (B).
- تغيّر مساحة المقطع العرضي (A) للملف.
- تغيّر الزاوية θ.

مثال

٣. يبيّن الشكل ٥-٣٢ ملفًا حلزونيًا مساحة مقطعه العرضي ($0.10\ m^2$). يخترقه مجال مغناطيسي كثافة فيضه المغناطيسي ($2.0 \times 10^{-3}\ T$) وعدد لفاته 250 لفة. جِد الفيض المغناطيسي والفيض المغناطيسي الكلي لهذا الملف الحلزوني.



الشكل ٥-٣٢ ملف حلزوني في مجال مغناطيسي.

الخطوة ١: لدينا:

$A = 0.10\ m^2$ و $B = 2.0 \times 10^{-3}\ T$

$\theta = 0°$ و $N = 250$ لفة

لذلك يمكننا حساب Φ:

$\Phi = BA = 2.0 \times 10^{-3} \times 0.10 = 2.0 \times 10^{-4}\ Wb$

الخطوة ٢: الآن احسب الفيض المغناطيسي الكلي.

الفيض المغناطيسي الكلي:

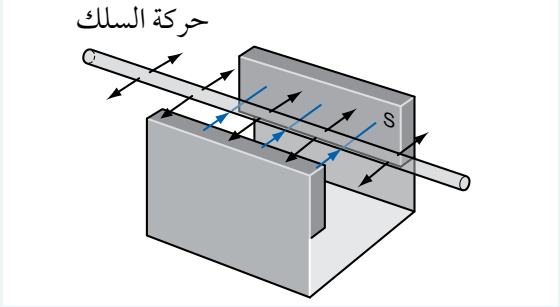
$= N\Phi$

$= 2.0 \times 10^{-4} \times 250 = 5.0 \times 10^{-2}\ Wb$

أسئلة

(١٦) استخدم فكرة الفيض المغناطيسي الكلي لشرح أنه عندما يُحرك مغناطيس داخل ملف، فإن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة تعتمد على شدة المجال المغناطيسي والسرعة التي يتحرك بها.

(١٧) في تجربة لاستقصاء العوامل التي تؤثر على مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة. يحرك طالب سلكًا إلى الأمام وإلى الخلف بين مغناطيسَين، كما هو مبيّن في الشكل ٥-٣٣. اذكر السبب في أن القوة الدافعة الكهربائية المتولّدة بهذه الطريقة تكاد تكون صفرًا.



الشكل ٥-٣٣ يُحرّك السلك أفقيًا في مجال مغناطيسي أفقي.

(١٨) يُصنع مغناطيس كهربائي كبير للدوران داخل ملف ثابت في مولّد موجود في محطة لإنتاج الطاقة الكهربائية (الصورة ٥-٣). استُحثت في مولّد المحطة قوة دافعة كهربائية متناوبة مقدارها (25 kV)؛ 50 مرة في الثانية.

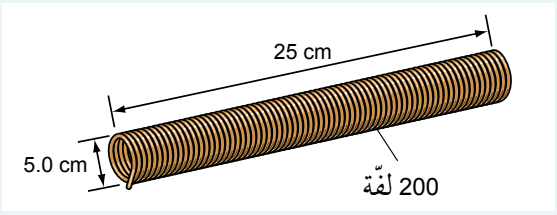
الصورة ٥-٣ تنتج مولدات محطة الطاقة هذه الكهرباء بقوة دافعة كهربائية مستحثة (25 kV).

أ. اذكر العامل الذي يحدّد عدد مرات تناوب القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الثانية.

ب. اقترح العوامل التي تعتقد أنها ستؤثر على القوة الدافعة الكهربائية المستحثة.

(١٩) قضيب مغناطيسي ينشئ مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا شدته (0.15 T) عند سطح قطبه الشمالي. احسب الفيض المغناطيسي عند هذا القطب حيث أبعاده (1.0 cm × 1.5 cm).

(٢٠) ملف حلزوني قطره (5.0 cm) وطوله (25 cm) وعدد لفاته 200 لفة (الشكل ٥-٣٤) يمر به تيار كهربائي شدته (2.0 A) ينشئ مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا كثافة فيضه (2.0×10^{-3} T) عبر قلب الملف الحلزوني.



الشكل ٥-٣٤ ملف حلزوني.

أ. احسب الفيض المغناطيسي الكلي للملف الحلزوني.

ب. إذا علمت أن قطر الملف الحلزوني (5.0 ± 0.2) cm، فحدّد قيمة عدم اليقين المطلق في القيمة المحسوبة في الجزئية (أ). افترض أن قيمة عدم اليقين في كل الكميّات الأخرى مهملة.

(٢١) ملف مستطيل أبعاده (5.0 cm × 7.5 cm)، وعدد لفاته 120 لفة موضوع بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي كثافة فيضه (1.2 T). احسب الفيض المغناطيسي الكلي لهذا الملف.

٥-٦ قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي

رأينا سابقًا في هذه الوحدة أن الحث الكهرومغناطيسي يحدث عندما يتغيّر الفيض المغناطيسي الذي يخترق ملفًا ما مع مرور الزمن، كما درست أيضًا في الصف العاشر تجربة فاراداي، ويمكننا الآن استخدام **قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي Faraday's law of electromagnetic induction** لحساب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في ملف ما.

يتناسب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة طرديًا مع معدّل تغيّر الفيض المغناطيسي الكلي.

ويمكننا كتابة هذا رياضيًا كالآتي:

$$\varepsilon \propto \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

حيث $\Delta(N\Phi)$ هو التغيّر في الفيض المغناطيسي الكلي خلال الزمن (Δt)، وعند التعامل بوحدات النظام الدولي للوحدات (SI)، فإن ثابت التناسب يساوي (1).

مهمّ

قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي
Faraday's law of electromagnetic induction:
يتناسب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة طرديًا مع معدّل تغيّر الفيض المغناطيسي الكلي.

لذلك:

قانون فاراداي:

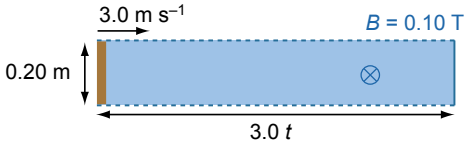
$$\varepsilon = \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

لاحظ أن هذه المعادلة تسمح لنا بحساب **مقدار** القوة الدافعة الكهربائية المستحثة؛ ويُعطى **اتجاهها** بواسطة قانون لنز، والذي ستتم مناقشته لاحقًا في الموضوع ٥-٧.

أمثلة

٤. سلك مستقيم طوله (0.20 m) يتحرك بسرعة ثابتة مقدارها ($3.0\ m\ s^{-1}$) وبزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي كثافة فيضه (0.10 T). استخدم قانون فاراداي لحساب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة بين طرفَي السلك.

الخطوة ١: لحساب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة لسلك نحتاج إلى إيجاد معدّل تغير الفيض المغناطيسي؛ بمعنى آخر، التغيّر في الفيض المغناطيسي لكل ثانية.



الشكل ٥-٣٥ سلك متحرك يقطع المجال المغناطيسي.

يبيّن الشكل ٥-٣٥ أن السلك في زمن (t) يقطع مسافة ($3.0\ t$). لذلك:

التغيّر في الفيض المغناطيسي خلال فترة من الزمن = B × التغيّر في المساحة

الفيض المغناطيسي خلال الزمن t:

$\Phi = BA\cos\theta$

$\cos\theta = 1$

$\Phi = 0.10 \times (3.0\ t \times 0.20) = 0.060\ t$

الخطوة ٢: استخدم قانون فاراداي لحساب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة.

معدل التغيّر في الفيض المغناطيسي الكلي $\varepsilon =$

$$\varepsilon = \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

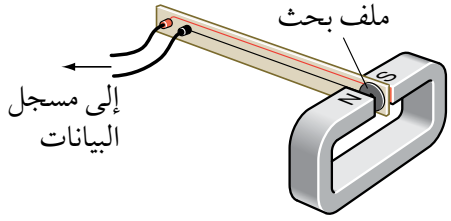
$\Delta\Phi = 0.060\ t$ و $\Delta t = t$ و $N = 1$

$$\varepsilon = \frac{0.060\ t}{t} = 0.060\ \text{V}$$

٥. يوضح هذا المثال إحدى الطرائق التي يمكن بها قياس كثافة المجال المغناطيسي، كما هو مبيّن في الشكل ٥-٣٦؛ ملف البحث عبارة عن ملف مسطح يتكوّن من عدد من لفات سلك رفيع جدًا ومعزول (يستخدم في قياس المغناطيسية بالحث الكهرومغناطيسي).

يتكوّن ملف بحث من 2500 لفة ومساحة مقطعه العرضي ($1.2\ cm^2$) موضوع بين قطبَي مغناطيس بحيث يمر الفيض المغناطيسي خلال مستوى الملف عموديًا. عندما تمّ سحب الملف بسرعة من المجال في زمن (0.10 s)، يقاس متوسط القوة الدافعة الكهربائية بـ (1.5 V) بواسطة مسجل البيانات.

احسب كثافة فيض المجال المغناطيسي بين قطبي المغناطيس.



الشكل ٥-٣٦ تُستحث القوة الدافعة الكهربائية في ملف البحث عند تحريكه خارج المجال بين قطبَي المغناطيس، ويمكن استخدام ملف البحث للكشف عن وجود فيض مغناطيسي.

الخطوة ١: استخدم قانون فاراداي لحساب التغيّر في الفيض المغناطيسي الكلي $\Delta(N\Phi)$.

القوة الدافعة الكهربائية المستحثة:

$$\varepsilon = \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

تابع

باعادة ترتيب المعادلة للحصول على $\Delta(N\Phi)$:

$$\Delta(N\Phi) = \varepsilon \times \Delta t = 1.5 \times 0.10$$

$$\Delta(N\Phi) = 0.15 \text{ Wb}$$

الخطوة ٢: احسب كثافة الفيض المغناطيسي (B).

ينخفض الفيض المغناطيسي الكلي من قيمته القصوى بين القطبين إلى الصفر، كذلك وجدنا أن الفيض المغناطيسي الكلي بين القطبين يساوي (0.15 Wb).

الفيض المغناطيسي الكلي:

$$\Delta(N\Phi) = BAN$$

كثافة الفيض المغناطيسي (B):

$$B = \frac{\Delta(N\Phi)}{AN} = \frac{0.15}{(1.2 \times 10^{-4} \times 2500)} = 0.50 \text{ T}$$

أسئلة

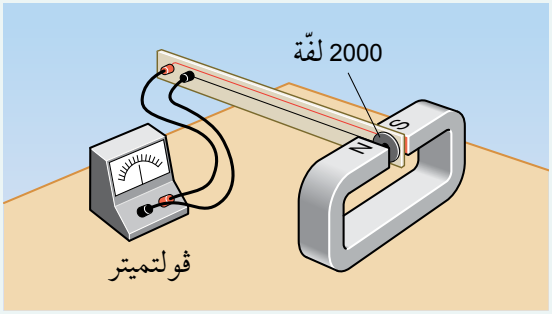
(٢٢) يتحرك موصل طوله (L) بسرعة ثابتة (v) بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه (B).

أثبت أن مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة (ε) بين طرفَي الموصل تُعطى بالمعادلة: $\varepsilon = BLv$.

(٢٣) سلك طوله (10 cm) يتحرك مسافة (2.0 cm) بزاوية قائمة مع طوله في الحيّز بين قطبَي مغناطيس، وعمودي مع مجال مغناطيسي، كثافة فيضه (1.5 T). إذا استغرق في قطع هذه المسافة (0.50 s) فاحسب متوسط مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة بين طرفَي السلك.

(٢٤) يبيّن الشكل ٥-٣٧ ملف بحث عدد لفاته 2000 لفة ومساحة مقطعه العرضي ($1.2\ \text{cm}^2$)، وضع بين قطبَي مغناطيس قوي وكان المجال المغناطيسي عموديًا على مستوى الملف، ونهايتا الملف متصلتان بفولتميتر. بعد ذلك سحب الملف من المجال المغناطيسي، فسجّل الفولتميتر قوة دافعة كهربائية مستحثة متوسطة مقدارها (0.40 V) خلال فترة زمنية (0.20 s).

احسب كثافة الفيض المغناطيسي بين قطبَي المغناطيس.



الشكل ٥-٣٧ استخدام ملف بحث لتحديد كثافة الفيض المغناطيسي للمجال المغناطيسي بين قطبَي المغناطيس.

٥-٧ قانون لنز

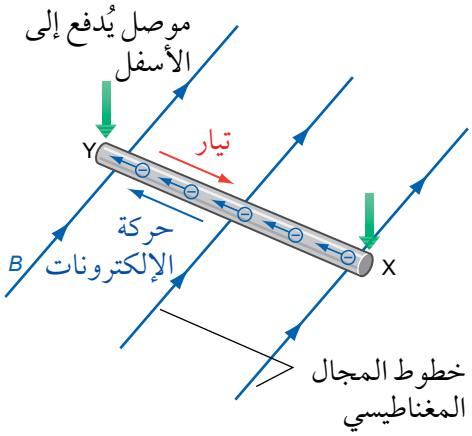
نستخدم قانون فاراداي لحساب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، سنفكر الآن في كيفية تحديد اتجاه القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، وبعبارة أخرى أيّ طرف للسلك أو الملف المتحرك في المجال المغناطيسي يصبح موجبًا؟ وأيُّها يصبح سالبًا؟

تُحدد قاعدة فليمنج لليد اليمنى اتجاه التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، وهذه حالة خاصة من قانون أكثر عمومية وهو قانون لنز، وسنرى في البداية كيف يكون تأثير المحرّك وتأثير المولّد مرتبطَين معًا.

شرح الحث الكهرومغناطيسي

لم نعطِ حتى الآن تفسيرًا للحث الكهرومغناطيسي، ولقد رأيت من التجارب في بداية هذه الوحدة بأن الحث الكهرومغناطيسي يحدث فعلًا، وتعرفت على العوامل التي تؤثر عليه، ولكن ما منشأ هذا التيار الكهربائي؟

يُعطي الشكل ٥-٣٨ تفسيرًا لذلك؛ حيث يُدفع سلك فلزيّ مستقيم XY إلى الأسفل عبر مجال مغناطيسي أفقي كثافة فيضه (*B*). فكّر الآن في الإلكترونات الحرّة في السلك، فهي تتحرك إلى الأسفل (بسرعة السلك نفسه)، لذا فهي في الواقع تشكّل تيارًا اصطلاحيًا رأسيًا إلى الأعلى، وبما أن الإلكترونات مشحونة بشحنة سالبة فإن التيار الاصطلاحي يتدفق إلى الأعلى (عندما يدفع السلك إلى الأسفل تنتقل معه الإلكترونات مما يشكل تيارًا اصطلاحيًا بالاتجاه المعاكس؛ أي إلى الأعلى).



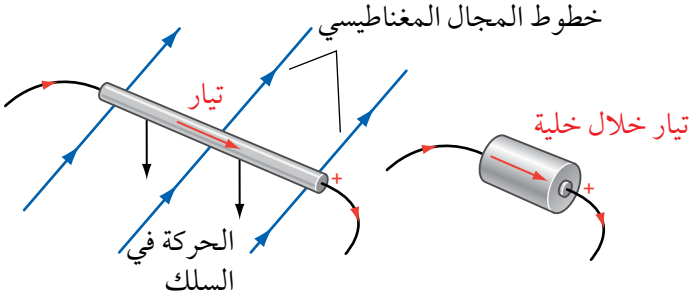
الشكل ٥-٣٨ توضيح لاتجاه التيار الكهربائي المستحث الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة.

لدينا الآن تيار اصطلاحي يتدفق إلى الأعلى عبر مجال مغناطيسي، وبالتالي فإن تأثير المحرك سيظهر هنا، فكل إلكترون سيتأثر بقوة مقدارها *Bev*، وباستخدام قاعدة فليمنج لليد اليسرى يمكننا إيجاد اتجاه القوة المؤثرة على الإلكترونات (هذا الاتجاه سوف يكون متعامدًا مع السطح المكون من اتجاه سرعة دفع السلك واتجاه المجال المغناطيسي). يبيّن المخطط أن الإلكترونات ستندفع بالاتجاه من X إلى Y، وعليه فإنه تمّ حث تيار كهربائي ليتدفق في السلك؛ ويكون اتجاه التيار الكهربائي الاصطلاحي من Y إلى X.

الآن، يمكننا التحقّق من أن قاعدة اليد اليمنى لفليمنج تعطي الاتجاهات الصحيحة للحركة وللمجال المغناطيسي وللتيار الكهربائي، والتي هي بالفعل كذلك.

إذًا - خلاصة القول - هناك تيار كهربائي ينتج من القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، وينتج هذا التيار الكهربائي لأن الإلكترونات تُدفع بواسطة تأثير المحرك، فالحث الكهرومغناطيسي ببساطة هو نتيجة تأثير المحرك.

وُجِد في الشكل ٥-٣٨ أن الإلكترونات تتراكم عند Y. وبالتالي فإن نهاية السلك هذه هي النهاية السالبة للقوة الدافعة الكهربائية و X هي النهاية الموجبة، فإذا كان السلك متصلًا بدائرة خارجية فإن الإلكترونات ستتدفق خارجة من Y على طول مسار الدائرة وتعود داخلة إلى X. يبيّن الشكل ٥-٣٩ كيف يكون السلك المتحرك مكافئًا لخلية (أو أي مصدر قوة دافعة كهربائية آخر).



الشكل ٥-٣٩ السلك المتحرك في مجال مغناطيسي هو مصدر قوة دافعة كهربائية أي يكافئ خلية.

القوى والحركة

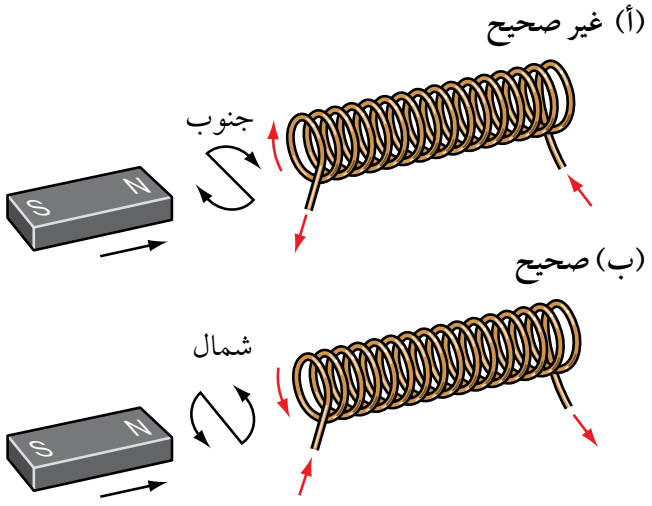
الحث الكهرومغناطيسي هو الطريقة التي تنتج بها معظم الكهرباء التي نستهلكها أو نستخدمها، فعندما ندير ملفًا في مجال مغناطيسي، تتحوّل الطاقة الميكانيكية التي نبذلها فيه إلى طاقة كهربائية، ويمكننا تحديد اتجاه التيار الكهربائي من خلال تتبّع عمليات نقل الطاقة هذه.

يبيّن الشكل ٥-٤٠ إحدى التجارب السابقة في هذه الوحدة، إذ يُدفع القطب الشمالي للمغناطيس نحو ملف، فينشأ تيار كهربائي في الملف، ولكن ما اتجاهه؟ يبيّن الشكل كِلا الاحتمالَين.

التيار الكهربائي في الملف يجعله مغناطيسًا كهربائيًا، فتصبح إحدى نهايتَيه قطبًا شماليًا، وتصبح النهاية الأخرى قطبًا جنوبيًا. ففي الشكل ٥-٤٠ (أ)، إذا كان التيار الكهربائي في هذا الاتجاه، فإن نهاية الملف الأقرب للقطب الشمالي من المغناطيس المقترب ستكون قطبًا جنوبيًا، وسيجذب هذان القطبان أحدهما الآخر، ويمكنك ترك المغناطيس برفق ليُسحب إلى داخل الملف، وسيتسارع المغناطيس في داخل الملف، وستزداد شدة التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة أكثر، وكذلك ستزداد قوة التجاذب بين الملف والمغناطيس.

لن نبذل أي طاقة في النظام في هذه الحالة (أو ربما القليل جدًا من الطاقة في البداية)، ولكن المغناطيس سيكتسب طاقة حركة، وسيكتسب التيار الكهربائي طاقة كهربائية. هذه خدعة لطيفة إذا كنت تستطيع فعلها، لكن هذا من شأنه أن يتناقض مع مبدأ حفظ الطاقة!

يبيّن الشكل ٥-٤٠ (ب) الحالة الصحيحة، فعندما يُدفع القطب الشمالي للمغناطيس نحو الملف، فإن اتجاه التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة يجعل نهاية الملف الأقرب إلى المغناطيس قطبًا شماليًا، فيتنافر القطبان أحدهما مع الآخر، وعليك بذل شغل لدفع المغناطيس داخل الملف، وهنا تتحوّل الطاقة المنقولة بواسطة الشغل الذي بذلته إلى طاقة كهربائية للتيار الكهربائي، وهذا لا يتناقض مع مبدأ حفظ الطاقة في هذه الحالة.



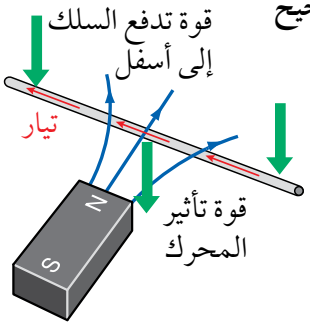
الشكل ٥-٤٠ تحريك مغناطيس نحو ملف: اتجاه التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة صحيح كما هو مبيّن في (ب)، وليس كما هو مبيّن في (أ).

يبيّن الشكل ٥-٤١ كيف يمكننا تطبيق المنطق نفسه على سلك مستقيم يتحرك نحو الأسفل خلال مجال مغناطيسي، حيث سيكون هناك تيار كهربائي ناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في السلك، ولكن في أي اتجاه؟ بما أن هذه حالة لسلك يمرّ به تيار كهربائي موضوع في مجال مغناطيسي، فستؤثر على السلك قوة (تأثير المحرك)، ويمكننا استخدام قاعدة اليد اليسرى لفليمنج لاستنتاج اتجاهها.

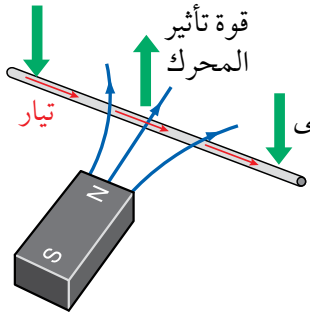
أولًا، سننظر فيما يحدث إذا كان التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة بالاتجاه الخاطئ، وهذا مبيّن في الشكل ٥-٤١ (أ). تبيّن قاعدة اليد اليسرى لفليمنج أن القوة المغناطيسية الناتجة ستكون إلى الأسفل، أيّ بالاتجاه الذي نحاول تحريك السلك فيه، وبالتالي سيتسارع السلك، وستزداد شدة التيار الكهربائي، ومرة أخرى سنحصل على كل من طاقة حركة وطاقة كهربائية من دون بذل أية طاقة.

لكن في الحقيقة يجب أن يكون اتجاه التيار الكهربائي كما هو مبيّن في الشكل ٥-٤١ (ب)، حيث يكون اتجاه القوة المغناطيسية الناتجة التي تؤثر على السلك بسبب تأثير المحرك إلى الأعلى وأنت تحاول تحريك السلك عبر المجال المغناطيسي إلى الأسفل، لذلك عليك بذل شغل لتحريك السلك، وبالتالي توليد طاقة كهربائية، ومرة أخرى هذا لا يتناقض مع مبدأ حفظ الطاقة.

(أ) غير صحيح



(ب) صحيح



الشكل ٥-٤١ سلك عبر مجال مغناطيسي: اتجاه التيار الكهربائي كما هو مبيّن في (ب)، وليس كما هو مبيّن في (أ).

أسئلة

(٢٥) استخدم الأفكار الواردة في الموضوع السابق لشرح ما يحدث إذا توقفت عن دفع المغناطيس (أ) نحو الملف المبيّن في الشكل ٥-٤٠، وفي (ب) إذا سحبت المغناطيس بعيدًا عن الملف.

(٢٦) ارسم مخططًا تبيّن فيه اتجاه كل من التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، والقوة المعاكسة، إذا حاولت تحريك السلك المبيّن في الشكل ٥-٤١ نحو الأعلى خلال المجال المغناطيسي.

قانون عام للقوة الدافعة الكهربائية المستحثة

يلخص **قانون لنز** **Lenz's law** المبدأ العام لحفظ الطاقة؛ حيث يكون اتجاه التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة أو القوة الدافعة الكهربائية بحيث يُنتج دائمًا قوة تقاوم الحركة التي تستخدم لإنتاجه. فإذا كان اتجاه القوة الدافعة الكهربائية عكس ذلك، فسنحصل على طاقة مقابل لا شيء، وهذا يتنافى مع مبدأ حفظ الطاقة.

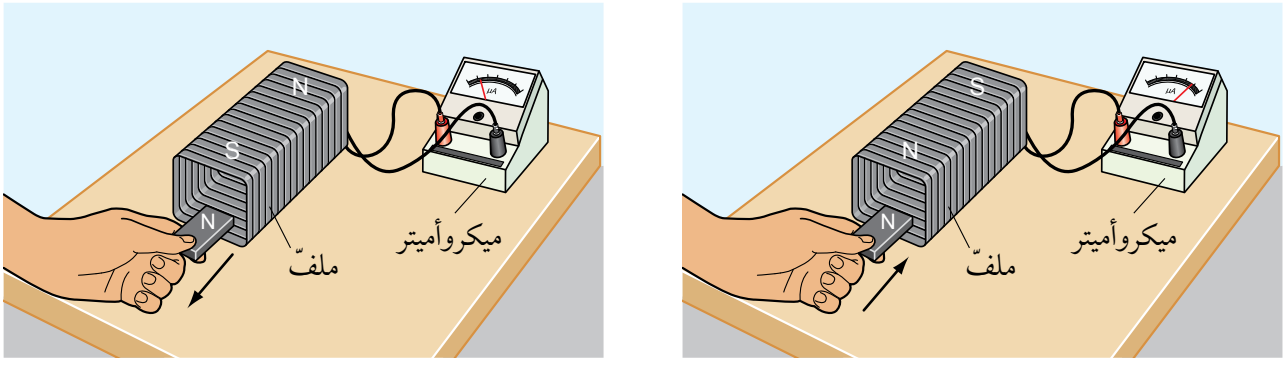
مهمّ

قانون لنز Lenz's law:
تنشأ أي قوة دافعة كهربائية مستحثة باتجاه معيّن بحيث ينتج عنها تأثيرات تقاوم التغيّر الذي أنتجها.

فيما يلي نصّ قانون لنز:

تنشأ أي قوة دافعة كهربائية مستحثة باتجاه معيّن بحيث ينتج عنها تأثيرات تقاوم التغيّر الذي أنتجها.

يمكن إثبات صحة هذا القانون عمليًا، على سبيل المثال، في الشكل ٥-٤٢، يبيّن الميكروأميتر الحسّاس المتصل بالدائرة اتجاه التيار الكهربائي ما دام المغناطيس يتحرك إلى الداخل وإلى الخارج، فإذا وصّلت بطارية بعد ذلك بالملف (في مكان الميكروأميتر) لتوليد تيار كهربائي أكبر وثابت وبالاتجاه نفسه، فستُظهر الإبرة المغناطيسية لبوصلة موضوعة أمام أحد نهايتَي الملف الحلزوني قطبَي نهايتَي الملف، أي نهاية منهما هي قطب شمالي والأخرى قطب جنوبي، فإذا حُرّك القطب الشمالي للمغناطيس إلى داخل الملف الحلزوني، فعندئذ سيكون للملف الحلزوني نفسه قطب شمالي عند النهاية المقابلة للقطب الشمالي للمغناطيس، وإذا حُرّك القطب الشمالي إلى خارج الملف الحلزوني، فسيكون للملف الحلزوني قطب جنوبي عند تلك النهاية.



(ب) (أ)

الشكل ٥-٤٢ عند تحريك قطب مغناطيس ما مقابل نهاية ملف يتكون عند هذه النهاية قطب مغناطيسي يعاكس حركة قطب المغناطيس.

يمكن تلخيص قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي وقانون لنز باستخدام المعادلة:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

القوة الدافعة الكهربائية المستحثة.

حيث (ε) هي مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة، وتشير الإشارة السالبة إلى أن هذه القوة الدافعة الكهربائية المستحثة تسبب تأثيرات تقاوم التغيّر الذي أنتجها، والإشارة السالبة موجودة بسبب قانون لنز، أيّ إنها ضرورية للتأكيد على مبدأ حفظ الطاقة.

أسئلة

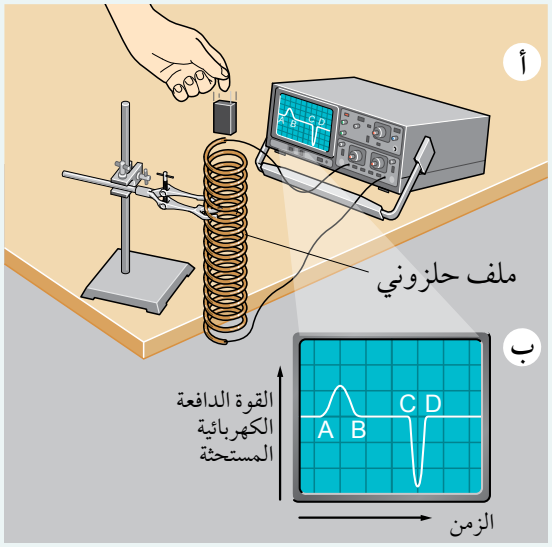
(٢٧) يسقط قضيب مغناطيسي رأسيًا إلى الأسفل خلال ملف حلزوني طويل متصل بجهاز راسم الذبذبات (أوسيلوسكوب) (الشكل ٥-٤٣). تُظهر إشارة راسم الذبذبات كيف تتغيّر القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف مع الزمن في أثناء تسارع المغناطيس إلى الأسفل.

أ. اشرح سبب وجود قوة دافعة كهربائية مستحثة في الملف عندما يدخل المغناطيس فيه (الجزء AB من الإشارة).

ب. اشرح سبب عدم وجود قوة دافعة كهربائية مستحثة في أثناء وجود المغناطيس بالكامل داخل الملف (الجزء BC).

ج. لماذا يُظهر الجزء CD إشارة سالبة؟ ولماذا تكون القوة الدافعة الكهربائية أكبر عند هذا الجزء؟ ولماذا يمثل CD فترة زمنية أقصر من AB؟ اشرح إجابتك.

(٢٨) يمكنك تدوير مولّد الدراجة باليد وجعل المصابيح تضيء. استخدم فكرة قانون لنز لشرح سبب سهولة تشغيل المولّد عند إطفاء المصابيح أكثر ممّا هي في حالة تشغيلها.



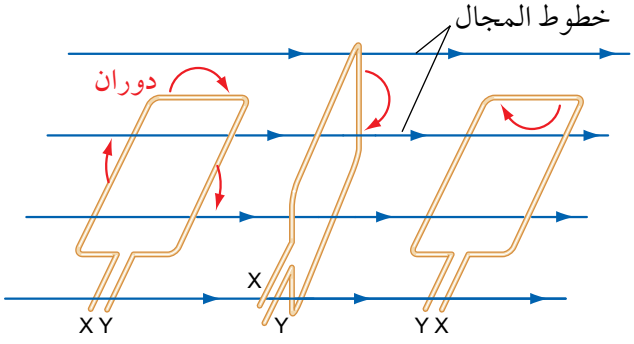
الشكل ٥-٤٣ (أ) يسقط قضيب مغناطيسي خلال ملف حلزوني طويل (ب) تُظهر إشارة راسم الذبذبات كيف تتغيّر القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف مع الزمن.

٥-٨ تطبيقات الحث الكهرومغناطيسي

يمكن توليد القوة الدافعة الكهربائية المستحثة بعدة طرائق، ولكن يمكن تفسيرها بدلالة قانونَي فاراداي ولنز، وقد تستحث القوة الدافعة الكهربائية عندما يكون هناك تغيّر في معدل الفيض المغناطيسي الكلي في دائرة أو جهاز. سندرس في هذا الموضوع فكرة عمل جهازَين هما المولّد والمحوّل، وقد درست هذين الجهازين في الصف العاشر.

المولّدات الكهربائية

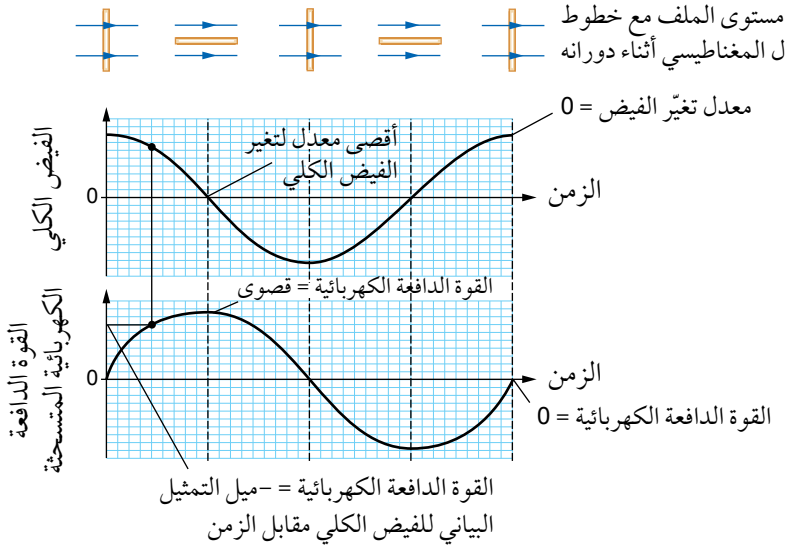
يمكننا توليد الكهرباء بواسطة تدوير ملف في مجال مغناطيسي، وهذا يمثل عكس فكرة عمل المحرك الكهربائي، ويبيّن الشكل ٥-٤٤ مثل هذا الملف بثلاث وضعيات مختلفة أثناء دورانه.



الشكل ٥-٤٤ ملف يدور في مجال مغناطيسي.

لاحظ أن معدّل تغيّر الفيض المغناطيسي الكلي يكون أقصى عندما يتحرك الملف خلال الوضع الأفقي. في هذه الوضعية، نحصل على أكبر قوة دافعة كهربائية مستحثة. أما عندما يتحرك الملف عبر الوضع الرأسي فإن معدّل تغير الفيض المغناطيسي يكون صفرًا والقوة الدافعة الكهربائية المستحثة تكون صفرًا.

يبيّن الشكل ٥-٤٥ كيف يتغيّر الفيض المغناطيسي الكلي مع الزمن للملف الدوّار.



الشكل ٥-٤٥ الفيض المغناطيسي الذي يربط ملفًا دوّارًا في أثناء تغيّره، وهذا يعطي قوة دافعة كهربائية مستحثة مترددة، وتظهر وضعية مستوى الملف بالنسبة إلى مجال مغناطيسي فوق التمثيلات البيانية.

وفقًا لقانونَي فاراداي ولنز، فإن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة تساوي سالب ميل التمثيل البياني للفيض المغناطيسي الكلي مقابل الزمن:

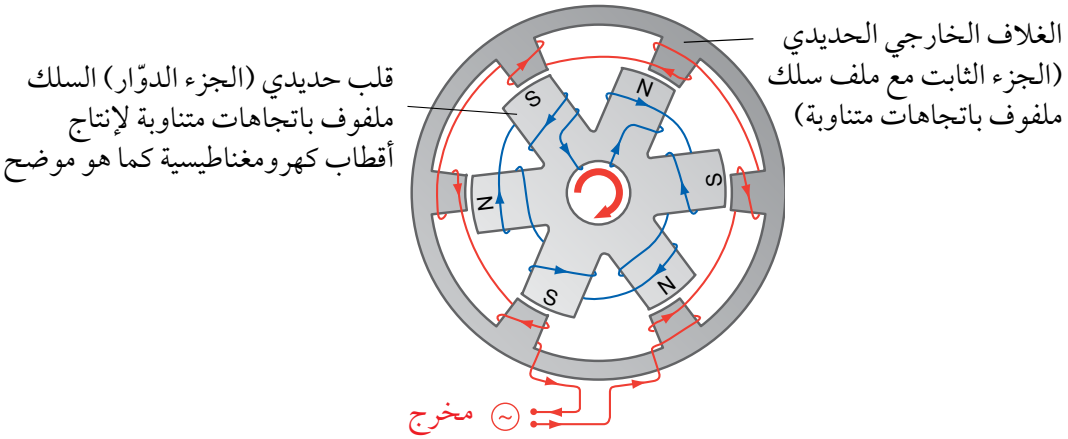
$$\varepsilon = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

عندما يكون مقدار الفيض المغناطيسي الكلي الذي يخترق الملف هو:

- الأقصى، فإن معدل تغيّر الفيض المغناطيسي الكلي $\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$ يساوي صفرًا، ومن ثم فإن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة (ε) تساوي صفرًا أيضًا.
- صفر، فإن معدل التغيّر في الفيض الكلي هو الأقصى (ويكون ميل التمثيل البياني أكثر انحدارًا)، وبالتالي فإن قيمة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة تكون قصوى أيضًا.

ومن هنا، فإننا نحصل من ملف مثل هذا، على قوة دافعة كهربائية متغيّرة، وهذا يبيّن كيفية توليد التيار الكهربائي المتردد (المتناوب).

من الأسهل عمليًا الإبقاء على الملف الكبير ثابتًا وتدوير مغناطيس كهربائي بداخله (الشكل ٥-٤٦). إن مولد الدراجة مشابه لهذا، ولكن في هذه الحالة يصنع مغناطيس دائم ليدور داخل ملف ثابت.

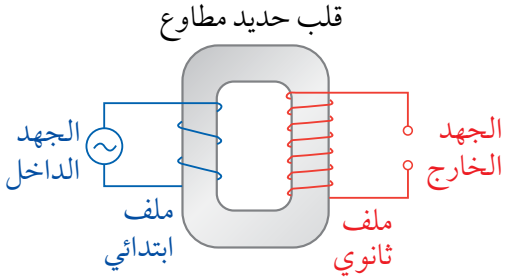


الشكل ٥-٤٦ يدور مغناطيس كهربائي داخل ملف في المولّد الكهربائي.

المحولات الكهربائية

لقد درست في الصف العاشر عن المحولات الكهربائية، يتكوّن المحول البسيط من ملف ابتدائي وملف ثانوي، وكلاهما ملفوفان حول قلب من الحديد المطاوع (حلقة). يزوّد الملف الابتدائي بتيار كهربائي متردد، ينتج فيضًا مغناطيسيًا متغيرًا في قلب الحديد المطاوع (الشكل ٥-٤٧). يرتبط الملف الثانوي بتغيّر الفيض المغناطيسي في قلب الحديد المطاوع نفسه، لذلك فإن قوة دافعة كهربائية تُستحث في نهايتَي هذا الملف. وبحسب قانون فاراداي، فإنه يمكنك زيادة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف الثانوي بواسطة زيادة عدد لفاته. أما وجود عدد أقل من اللفات في الملف الثانوي فسيكون له تأثير عكسي.

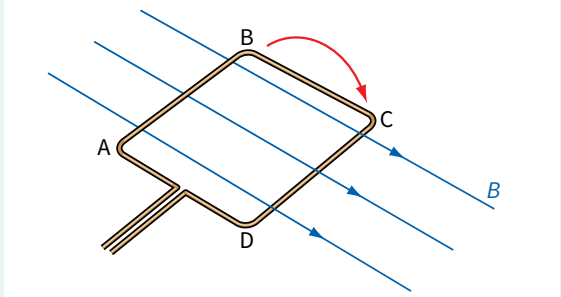
تستخدم المحولات الكهربائية لنقل الطاقة الكهربائية باستخدام الكابلات العلوية.



الشكل ٥-٤٧ يمكن استخدام قانون فاراداي لشرح ما ينتج من المحولات.

أسئلة

(٢٩) يمثل الشكل ٥-٤٨ ملفًا من سلك ABCD، يُدار في مجال مغناطيسي أفقي منتظم. انسخ هذا الشكل وأكمله لتبيّن اتجاه التيار الكهربائي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف، واتجاهات القوى على الضلعَين AB و CD والتي تقاوم دوران الملف.



الشكل ٥-٤٨ ملف يدور في مجال مغناطيسي.

(٣٠) هل يولّد مولّد الدراجة (الشكل ٥-٢٦) تيارًا كهربائيًا مترددًا، أم تيارًا كهربائيًا مستمرًا؟ برّر إجابتك.

(٣١) تعتمد القوة الدافعة الكهربائية المستحثة العظمى في ملف دوّار في مجال مغناطيسي على أربعة عوامل: كثافة الفيض المغناطيسي (B)، مساحة الملف (A)، عدد اللفات (N)، وتردد الدوران (f). لماذا يجب أن تكون القوة الدافعة الكهربائية المستحثة متناسبة مع كل من هذه الكميّات؟ استخدم قانون فاراداي لشرح إجابتك.

(٣٢) إذا كان المحول متصلًا بمصدر تيار كهربائي ثابت (تيار كهربائي مستمر)، فلماذا لا توجد قوة دافعة كهربائية مستحثة عبر الملف الثانوي؟ اشرح إجابتك.

ملخّص

تُنتج الشحنات المتحركة مجالًا مغناطيسيًا؛ وهذه هي الكهرومغناطيسية.

لموصل حامل لتيار كهربائي خطوط مجال مغناطيسي على شكل دوائر متحدة المركز، بينما نمط المجال المغناطيسي للملف الحلزوني يشبه نمط المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي.

تُعدّ المسافة الفاصلة بين خطوط المجال المغناطيسي مؤشرًا على شدة المجال المغناطيسي.

تحدّد كثافة الفيض المغناطيسي (B) بالمعادلة:

$$B = \frac{F}{IL}$$

حيث (F): القوة المؤثرة على الموصل الحامل للتيار الكهربائي، و (I): شدة التيار الكهربائي في الموصل و (L): طول الموصل في المجال المغناطيسي المنتظم.

وحدة قياس كثافة الفيض المغناطيسي هي تسلا (T)، وتكافئ ($1\ T = 1\ N\ A^{-1}\ m^{-1}$).

تُعطى القوة المغناطيسية المؤثرة على موصل حامل لتيار كهربائي موضوع في مجال مغناطيسي بالمعادلة:

$$F = BIL \sin\theta$$

يمكن استخدام القوة المؤثرة على موصل حامل لتيار كهربائي لقياس كثافة فيض مجال مغناطيسي.

يعطى الفيض المغناطيسي (Φ) الذي يمر عبر مساحة المقطع العرضي (A) في مجال مغناطيسي وكثافة فيضه المغناطيسي (B) من خلال المعادلة:

$$\Phi = BA \cos\theta$$

الفيض المغناطيسي الكلي = N × الفيض المغناطيسي = $N\Phi = BAN \cos\theta$.

يقاس كل من الفيض المغناطيسي الكلي والفيض المغناطيسي بالويبر (Wb). ($1\ Wb = 1\ T\ m^2$).

تتولد قوة دافعة كهربائية مستحثة في دائرة ما عندما يكون هناك تغيّر في الفيض المغناطيسي الكلي بالنسبة إلى الزمن.

ينصّ قانون فاراداي على أن مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة يساوي معدّل تغيّر الفيض المغناطيسي الكلي.

$$\varepsilon = \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

ينصّ قانون لنز على أن التيار الكهربائي المستحث أو القوة الدافعة الكهربائية المستحثة يكونان باتجاه بحيث ينتج عنهما تأثيرات تقاوم التغيّر الذي أنتجهما.

يمكن كتابة معادلة قانونَي فاراداي ولنز على النحو الآتي:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$

أسئلة نهاية الوحدة

١ سلك يحمل تيارًا كهربائيًا وموضوع بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي (B). فعندما تكون شدة التيار الكهربائي في السلك (I)، فإن القوة المغناطيسية التي تؤثر على السلك تساوي (F).

ما القوة المؤثرة على سلك آخر موضوع في الاتجاه نفسه للسلك الأول، إذا أصبحت شدة المجال المغناطيسي $2B$ وشدة التيار $\frac{I}{4}$ ؟

أ. $\frac{F}{4}$ **ب.** $\frac{F}{2}$ **ج.** F **د.** $2F$

٢ يسري تيار كهربائي في سلك كتلته لكل وحدة طول ($40\ g\ m^{-1}$). تمّ وضع السلك في مجال مغناطيسي شدته ($0.50\ T$). فازدادت شدة التيار تدريجيًا حتى ارتفع السلك تمامًا عن الأرض، فما قيمة شدة التيار الكهربائي عند حدوث ذلك؟

أ. $0.080\ A$ **ب.** $0.20\ A$ **ج.** $0.78\ A$ **د.** $780\ A$

٣ تمّ وضع سلك يحمل تيارًا كهربائيًا في مجال مغناطيسي منتظم.

أ. صِف كيف يجب وضع السلك ليتأثر بأقصى قوة بسبب المجال المغناطيسي.

ب. صِف كيف يجب وضع السلك بحيث لا يتأثر بأي قوة بسبب المجال المغناطيسي.

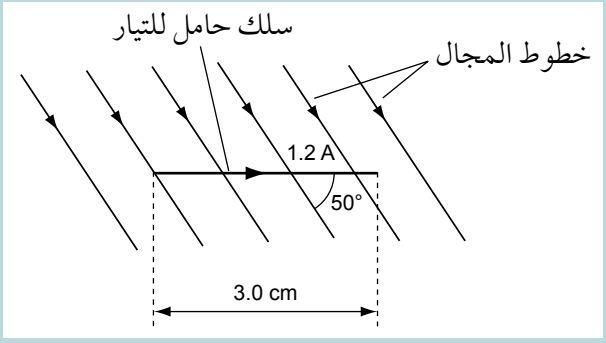
٤ تمّ وضع موصل حامل لتيار كهربائي بزاوية قائمة مع مجال مغناطيسي منتظم، فأثرت عليه قوة مقدارها ($4.70 \times 10^{-3}\ N$). حدّد مقدار القوة المؤثرة على السلك عندما:

أ. تزداد شدة التيار الكهربائي في السلك إلى ثلاثة أمثال ما كانت عليه.

ب. تنخفض كثافة الفيض المغناطيسي إلى النصف.

ج. يقل طول السلك في المجال المغناطيسي إلى 40% من طوله الأصلي.

٥ سلك نحاسي يحمل تيارًا كهربائيًا شدته ($1.2\ A$)، وطوله ($3.0\ cm$) تمّ وضعه في مجال مغناطيسي منتظم، كما هو مبيّن في الشكل ٥-٤٩.



الشكل ٥-٤٩

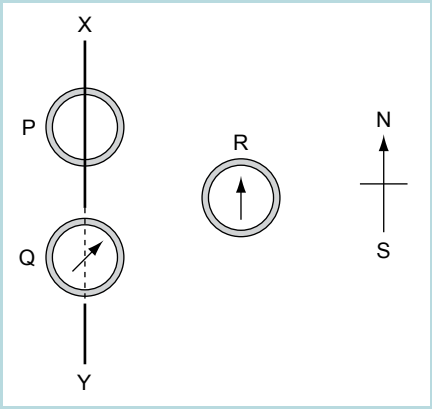
تابع

تبلغ القوة المؤثرة على السلك (3.8×10^{-3} N) عندما تكون الزاوية بين السلك والمجال المغناطيسي (50°).

أ. احسب كثافة الفيض المغناطيسي.

ب. ما اتجاه القوة المؤثرة على السلك؟

٦ يبيّن الشكل ٥-٥٠ السلك XY الذي يحمل تيارًا كهربائيًا مستمرًا. وُضعت بوصلة R بجانب السلك، وهي تشير إلى الشمال. ووُضعت البوصلة P أسفل السلك ووُضعت البوصلة Q فوق السلك.



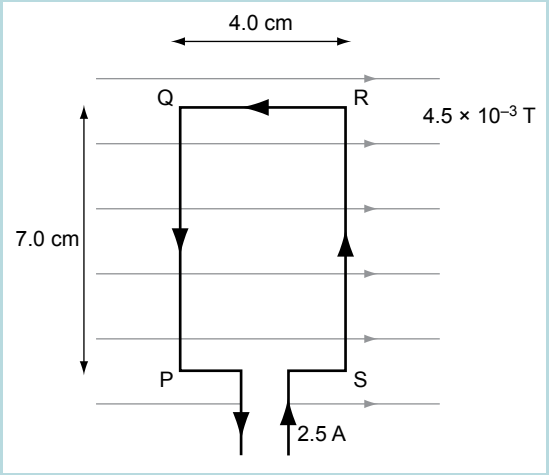
الشكل ٥-٥٠

أ. ما اتجاه التيار الكهربائي المارّ في السلك؟

ب. ما الاتجاه الذي تشير إليه البوصلة P؟

ج. حدّد الاتجاه الذي تشير إليه البوصلة Q إذا انعكس اتجاه التيار الكهربائي المارّ في السلك.

٧ يبيّن الشكل ٥-٥١ إطارًا فلزيًا مستطيلًا PQRS موضوعًا في مجال مغناطيسي منتظم.



الشكل ٥-٥١

كثافة الفيض المغناطيسي (4.5×10^{-3} T) وشدة التيار الكهربائي في الإطار الفلزي (2.5 A).

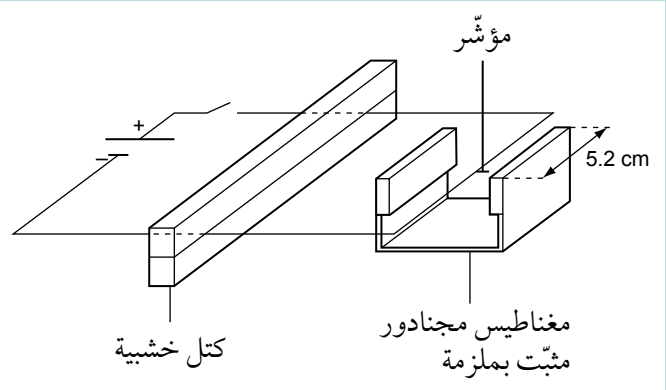
تابع

أ. احسب القوة المؤثرة على ضلع الإطار PQ.

ب. اقترح سبب عدم تأثر ضلع الإطار QR بأي قوة.

ج. صف حركة الإطار مباشرة بعد مرور التيار الكهربائي في الإطار.

٨ يُبيّن الشكل ٥-٥٢ إطارًا من سلك حامل لتيار كهربائي موضوعًا بين زوج من مغانط مجنادور المثبّتة بحامل على شكل حرف U من الحديد المطاوع. ومؤشر متصل بالسلك.



الشكل ٥-٥٢

يتسبب تيار كهربائي شدته (8.5 A) مارّ في السلك بتحريك المؤشر رأسيًا إلى الأعلى. عُلّق شريط ورقي صغير بالمؤشر وضُبطت شدة التيار الكهربائي حتى أدى وزن الشريط الورقي إلى عودة المؤشر إلى وضعه الابتدائي (عندما كان من دون تيار كهربائي ومن دون شريط ورقي). إذا كانت كتلة الشريط الورقي (60 mg)، وطول جزء السلك بين قطبَي المغناطيس (5.2 cm):

أ. ما اتجاه المجال المغناطيسي؟

ب. احسب القوة المؤثرة على السلك بسبب المجال المغناطيسي عندما كان يحمل تيارًا كهربائيًا شدته (8.5 A).

ج. احسب كثافة الفيض المغناطيسي للمجال المغناطيسي بين قطبَي المغناطيس.

د. صِف ما يحدث للإطار في حالة مرور تيار كهربائي متردد عبر السلك بتردد منخفض.

٩ **أ.** يتناسب مقدار القوة المؤثرة على سلك يحمل تيارًا كهربائيًا في مجال مغناطيسي طرديًا مع شدة التيار في السلك. صِف مع التوضيح بمخطط كيف يمكن إثبات ذلك عمليًا في مختبر المدرسة.

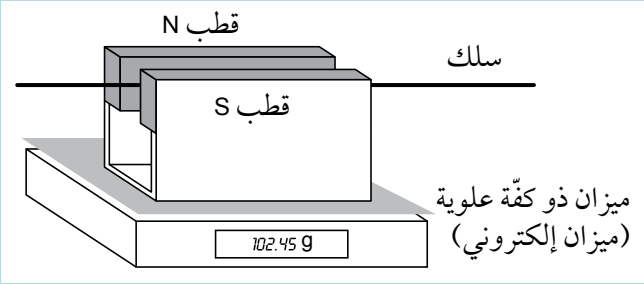
ب. مقدار المركبة الأفقية B_x للمجال المغناطيسي الأرضي في نصف الكرة الشمالي عند نقطة معيّنة على سطح الأرض تساوي (1.6×10^{-5} T)، وُضعت قطعة من سلك طولها (3.0 m) ووزنها (0.020 N) على منضدة في المختبر باتجاه شرق-غرب. يرتفع السلك تمامًا عن سطح المنضدة عندما يتدفق عبره تيار كهربائي كبير في السلك.

١. ما اتجاه التيار الكهربائي المار في السلك؟

٢. احسب أقل شدة تيار كهربائي يلزم لرفع السلك عن المنضدة.

تابع

١٠ يبيّن الشكل ٥-٥٣ سلكًا أفقيًا ثابتًا يمر مركزيًا بين قطبَي مغناطيس دائم موضوع على ميزان ذي كفة علوية (ميزان إلكتروني).



الشكل ٥-٥٣

يسجل الميزان كتلة مقدارها (102.45 g) عندما لا يتدفق تيار كهربائي في السلك. وعندما يتدفق تيار كهربائي شدته (4.0 A) في السلك، يسجل الميزان كتلة مقدارها (101.06 g).

أ. اشرح سبب انخفاض قراءة الميزان ذي الكفة العلوية (الميزان الإلكتروني) عندما يتدفق التيار الكهربائي.

ب. ما اتجاه تدفق التيار الكهربائي في السلك؟ اشرح ذلك.

ج. إذا كان طول السلك في المجال المغناطيسي (5.0 cm). فاحسب متوسط كثافة الفيض المغناطيسي بين قطبَي المغناطيس.

د. ارسم تمثيلًا بيانيًا لقراءة الميزان على المحور الرأسي (y) وشدة التيار الكهربائي على المحور الأفقي (x)، لتبيّن كيف تتغيّر قراءة الميزان عندما تتغيّر شدة التيار الكهربائي.

١١ أيّ الوحدات الآتية غير صحيحة للفيض المغناطيسي؟

أ. $kg\ m^2\ s^{-2}\ A^{-1}$ **ب.** T **ج.** $T\ m^2$ **د.** Wb

١٢ يعتقد محمود أن التيار الكهربائي يمر عبر القلب الحديدي في المحوّل إلى الملف الثانوي. صِف كيف يمكنك تصحيح هذا الاعتقاد، واشرح كيف يُستحث التيار الكهربائي فعلًا في الملف الثانوي. استخدم قانون فاراداي في شرحك.

١٣ ملف مربع الشكل طول ضلعه (5.0 cm) مكوّن من 100 لفة. وُضع في مجال مغناطيسي كثافة فيضه (20 mT)، بحيث يكون الفيض عموديًا على مستوى الملف.

أ. احسب الفيض عبر الملف.

ب. إذا أُخرج الملف من المجال المغناطيسي في زمن قدره (0.10 s). احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية (ε) المستحثة فيه.

تابع

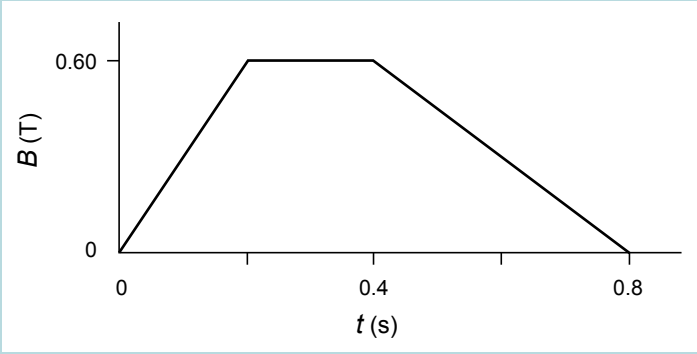
١٤ طائرة طول جناحَيها (40 m) تطير أفقيًا بسرعة $(300 \pm 10)\ m\ s^{-1}$ في منطقة تكون فيها المركّبة الرأسية B_y للمجال المغناطيسي الأرضي تساوي $(5.0 \times 10^{-5}\ T)$.

احسب القوة الدافعة الكهربائية المستحثة بين طرفَي جناحَي الطائرة. ضمّن قيمة عدم اليقين المطلق في إجابتك.

١٥ يبيّن الشكل ٥-٤٥ الفيض المغناطيسي الكلي والقوة الدافعة الكهربائية المستحثة طالما أن الملف يدور. اشرح السبب في أن قيمة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة تكون أقصى ما يمكن عندما لا يكون هناك فيض مغناطيسي كلي، وتكون صفرًا عندما تكون قيمة الفيض المغناطيسي الكلي عظمى.

١٦ **أ.** اشرح المقصود بفيض مغناطيسي كلي مقداره (1 Wb).

ب. يبيّن الشكل ٥-٤٦ تمثيلًا بيانيًا لكثافة الفيض المغناطيسي خلال ملف مكوّن من 240 لفة، ومساحة مقطعه العرضي $(1.2 \times 10^{-4}\ m^2)$ مقابل الزمن.



الشكل ٥-٤٦

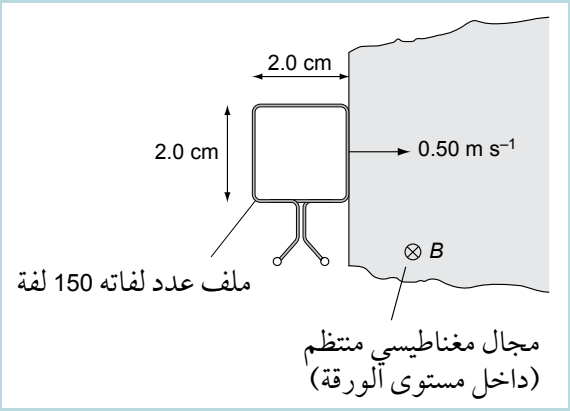
١. حدّد القيمة القصوى لمعدل تغيّر الفيض المغناطيسي في الملف.

٢. حدّد القيمة القصوى لمقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف.

٣. ارسم تمثيلًا بيانيًا يظهر تغيّر القوة الدافعة الكهربائية المستحثة مع الزمن. ضع قيمًا على كل من محور القوة الدافعة الكهربائية المستحثة ومحور الزمن.

تابع

١٧ يبيّن الشكل ٥–٥٥ ملفًا مربعًا على وشك الدخول إلى منطقة مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي (0.30 T). ويتجه المجال المغناطيسي بزاوية قائمة على مستوى الملف. يتكوّن الملف من 150 لفة، وطول كل ضلع فيه (2.0 cm)، ويتحرك الملف بسرعة ثابتة مقدارها ($0.50\ m\ s^{-1}$).



الشكل ٥–٥٥

أ. ١. احسب الزمن الذي يستغرقه الملف للدخول كاملًا إلى منطقة المجال المغناطيسي.

٢. احسب مقدار الفيض المغناطيسي الكلي خلال الملف عندما يكون بالكامل داخل منطقة المجال المغناطيسي.

ب. اشرح السبب في أن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة ثابتة في أثناء دخول الملف المجال المغناطيسي.

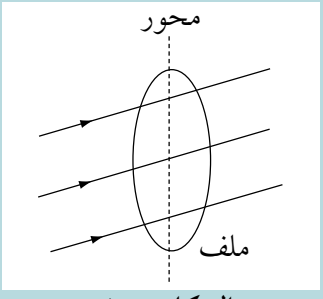
ج. استخدم إجابتك عن الجزئية (أ) لتحدّد قيمة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة عبر طرفَي الملف.

د. ما مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة عبر نهايتَي الملف عندما يكون الملف بالكامل داخل المجال المغناطيسي؟

هـ. ارسم تمثيلًا بيانيًا لتظهر تغير القوة الدافعة الكهربائية المستحثة مع مرور الزمن من لحظة دخول الملف إلى المجال المغناطيسي. يجب أن يبدأ محور الزمن من (0 s) إلى (0.08 s).

١٨ **أ.** اذكر نصّ قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي.

ب. يظهر الشكل ٥–٥٦ ملفًا دائريًا قطره (200 mm) وعدد لفاته 600 لفة. وُضع مستواه عموديًا على مجال مغناطيسي أفقي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي (50 mT). دُوّر الملف بزاوية (90°) حول محور رأسي في زمن (120 ms).



الشكل ٥–٥٦

تابع

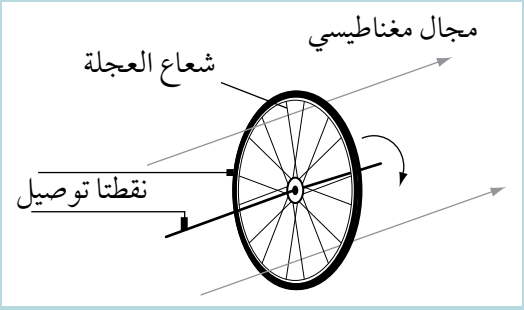
احسب:

١. الفيض المغناطيسي الذي يمر عبر الملف قبل الدوران.

٢. التغيّر في الفيض المغناطيسي الكلي الناتج من الدوران.

٣. متوسط مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في الملف في أثناء الدوران.

١٩ ثُبّتت عجلة دراجة رأسيًا على محور فلزي في مجال مغناطيسي أفقي، كما هو مبيّن في الشكل ٥-٥٧. تمّ وضع نقطتَي توصيل منزلقتَين على الإطار الفلزي للعجلة وعلى المحور الفلزي.



الشكل ٥-٥٧

أ. ١. لماذا تستحث قوة دافعة كهربائية عندما تدور العجلة؟ اشرح إجابتك.

٢. اذكر طريقتَين يمكن زيادة القوة الدافعة الكهربائية المستحثة من خلالهما واشرحهما.

ب. يبلغ نصف قطر العجلة (15 cm)، وتدور خمس مرات في الثانية. بافتراض أن كثافة الفيض المغناطيسي منتظم وقيمته (5.0×10^{-3} T). احسب:

١. المساحة التي يمسحها شعاع عجلة واحد في كل ثانية.

٢. القوة الدافعة الكهربائية المستحثة بين نقطتَي التوصيل.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم أن المجال المغناطيسي هو مجال قوة ناتج عن شحنات متحركة أو مغناطيس دائم ويمثّل بخطوط المجال.	٥–١			
أرسم أنماط خطوط المجال المغناطيسي بسبب التيارات الكهربائية في سلك مستقيم طويل، وملف دائري وملف حلزوني طويل.	٥–١			
أفهم أن المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربائي في ملف حلزوني يمكن زيادته بواسطة قلب حديدي.	٥–١			
أفهم القوى المؤثرة على موصل حامل لتيار كهربائي موضوع في مجال مغناطيسي.	٥–٣			
أستخدم المعادلة $F = BIL \sin\theta$، وأستخدم قاعدة فليمنج لليد اليسرى لتحديد الاتجاهات.	٥–٢، ٥–٤			
أعرّف كثافة الفيض المغناطيسي.	٥–٣			
أعرّف الفيض المغناطيسي Φ.	٥–٥			
أستخدم الصيغة الآتية: $\Phi = BA\cos\theta$	٥–٥			
أعرّف مفهوم الفيض المغناطيسي الكلي وأستخدمه.	٥–٥			
أفهم التجارب التي تنتج قوة دافعة كهربائية مستحثة في الدوائر وأشرحها.	٥–٥			
أتذكّر نص قانونَي فاراداي ولنز في الحثّ الكهرومغناطيسي وأستخدم المعادلة: $\varepsilon = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$	٥–٦، ٥–٧، ٥–٨			

قائمة المصطلحات

الأفعال الإجرائية

في ما يأتي تعريفات للأفعال الإجرائية المعتمدة في المنهج.

احسب Calculate: اعرض استخلص من الحقائق المعطاة، المعلومات أو الأرقام.

اذكر State: عبّر بكلمات واضحة.

برّر Justify: ادعم الموضوع بالأدلة والحجة.

قارن Compare: حدّد أوجه التشابه و/ أو الاختلاف معلّقًا عليها.

عرّف Define: أعط معنًى دقيقًا.

المصطلحات العلمية

الأمبير ampere: يعادل تدفق كولوم واحد من الشحنات في مقطع موصل خلال ثانية واحدة، وهو وحدة قياس شدة التيار الكهربائي في النظام الدولي للوحدات (SI) (ويُرمز إليه بالرمز A). (ص ٧٦)

تأثير المحرك Motor effect: يُستخدم هذا المصطلح عندما يخضع سلك يحمل تيارًا كهربائيًا لقوة بوجود مجال مغناطيسي. (ص ١٤٧)

الثابت الزمني Time constant: الثابت الزمني (τ) لدائرة تتكوّن من مكثف – مقاومة يساوي (RC). وهو يساوي الزمن الذي يستغرقه التيار الكهربائي في الدائرة لينخفض إلى $\frac{1}{e}$ من قيمة شدة التيار الكهربائي الابتدائي، حيث (e) هي الدالة الأُسّية. (ص ١٣٢)

الجلفانوميتر Galvanometer: أداة تستخدم لقياس شدة التيارات الكهربائية الصغيرة أو الكشف عنها. (ص ٩٨)

جهد الجاذبية Gravitational potential: جهد الجاذبية عند نقطة ما هو الشغل المبذول لكل وحدة كتلة لنقل كتلة نقطية من اللانهاية إلى تلك النقطة. (ص ٢٨)

الجهد الكهربائي Electric potential: الجهد الكهربائي عند نقطة ما يساوي الشغل المبذول لكل وحدة شحنة كهربائية لنقل وحدة شحنة كهربائية موجبة من اللانهاية إلى تلك النقطة. (ص ٦٠)

حامل الشحنة الكهربائية Charge carrier: جسيم مشحون يُسهم في التيار الكهربائي؛ وقد يكون هذا الجسيم إلكترونًا أو بروتونًا أو أيونًا. (ص ٧٥)

حفظ الشحنة الكهربائية Conservation of charge: لا يمكن استحداث شحنة كهربائية أو إفناؤها. (ص ٨٧)

خطوط المجال Field lines: خطوط مرسومة لتمثيل شدة مجال القوة واتجاهه. (ص ٤٦)

الزمن الدوري المداري Orbital period: الزمن الذي يستغرقه جسم ما لإكمال دورة واحدة كاملة في مداره. (ص ٣٢)

السعة الكهربائية Electric capacitance: سعة المكثف هي الشحنة الكهربائية المخزّنة على لوحَي المكثف لكل وحدة فرق جهد كهربائي بين اللوحَين. (ص ١١٩)

الشحنة الأولية Elementary charge: الشحنة الأولية ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C). (ص ٧٧)

الشحنة الكهربائية Electric charge: هي خاصية لدى الجسم تجعله يتأثر بقوة (تجاذب أو تنافر) عندما يوضع في مجال كهربائي. (ص ٤٤)

شدة التيار الكهربائي Current: معدل تدفق الشحنة الكهربائية عبر نقطة في دائرة كهربائية. (ص ٧٦)

شدة مجال الجاذبية Gravitational field strength: شدة مجال الجاذبية عند نقطة ما هي قوة الجاذبية المؤثرة لكل وحدة كتلة لجسم صغير موضوع في تلك النقطة. (ص ٢٥)

شدة المجال الكهربائي (عند نقطة) Electric field strength: القوة لكل وحدة شحنة كهربائية والتي تؤثر على شحنة كهربائية موجبة ثابتة موضوعة عند تلك النقطة. (ص ٤٨)

الطريقة الصفرية Null method: تقنية تجريبية للبحث عن قراءة صفرية. (ص ٩٩)

الفاراد farad: هو سعة مكثف يزداد فرق الجهد بين لوحَيه بمقدار ڤولت واحد عندما يشحن بشحنة مقدارها واحد كولوم. وهو وحدة قياس سعة المكثف (ويُرمز إليها بالرمز F)؛ $1\ F = 1\ C\ V^{-1}$. (ص ١١٩)

فرق الجهد الكهربائي Potential difference: فرق الجهد الكهربائي (V) بين نقطتَين A و B، هو الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة في أثناء انتقالها من النقطة A إلى النقطة B. (ص ٨٢)

فرق الجهد الكهربائي الطرفي للمصدر Terminal p.d: هو فرق الجهد الكهربائي بين طرفَي المصدر والذي يعتمد على شدة التيار الكهربائي المتدفق من المصدر. (ص ٩٤)

الفيض المغناطيسي Magnetic flux: حاصل ضرب كثافة الفيض المغناطيسي في مساحة المقطع العرضي العمودية على اتجاه كثافة الفيض المغناطيسي. ووحدة قياسه: ويبر Wb وتكافئ $T\ m^2$. (ص ١٥٨)

الفيض المغناطيسي الكلي Magnetic flux linkage: حاصل ضرب الفيض المغناطيسي لملف ما في عدد اللفات. ووحدة قياسه: ويبر (Wb). (ص ١٥٩)

قاعدة فليمنج لليد اليسرى (قاعدة المحرك) Fleming's left-hand (motor) rule: تُستخدم هذه القاعدة لتحديد اتجاه القوة التي تؤثر على موصل يحمل تيارًا كهربائيًا وموضوع في مجال مغناطيسي خارجي؛ حيث تشير:

- الإبهام: اتجاه الحركة (القوة)
- السبابة: اتجاه المجال المغناطيسي
- الوسطى: اتجاه التيار الاصطلاحي. (ص ١٤٦)

قاعدة قبضة اليد اليمنى Right-hand grip rule: قاعدة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف حلزوني. إذا كانت اليد اليمنى تقبض الملف الحلزوني بالأصابع متبعة اتجاه التيار الاصطلاحي حول الملف الحلزوني، فإن الإبهام يشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي. (ص ١٤٤)

قاعدة اليد اليمنى Right-hand rule: قاعدة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي حول سلك يحمل تيارًا كهربائيًا. إذا كانت اليد اليمنى تقبض السلك، مع توجيه الإبهام باتجاه التيار الكهربائي، فإن الأصابع ستلتف باتجاه المجال المغناطيسي. (ص ١٤٤)

قاعدة لليد اليمنى لفليمنج (قاعدة المولّد) Fleming's right-hand (generator) rule: تستخدم هذه القاعدة لتحديد اتجاه التيار الاصطلاحي الناتج عن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في موصل يتحرك بزاوية قائمة مع المجال المغناطيسي:

- الإبهام: الحركة (القوة)
- السبابة: المجال المغناطيسي
- الوسطى: التيار الاصطلاحي المستحث. (ص ١٥٦)

القانون الأول لكيرشوف Kirchhoff's first law: مجموع التيارات الكهربائية الداخلة إلى أي نقطة في دائرة ما يساوي مجموع التيارات الكهربائية الخارجة من تلك النقطة. (ص ٨٦)

القانون الثاني لكيرشوف Kirchhoff's second law: مجموع القوى الدافعة الكهربائية في أي مسار مغلق في دائرة ما يساوي مجموع فروق الجهد الكهربائية في ذلك المسار. (ص ٨٨)

قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي Faraday's law of electromagnetic induction: يتناسب مقدار القوة الدافعة الكهربائية المستحثة طرديًا مع معدّل تغيّر الفيض المغناطيسي الكلي. (ص ١٦١)

قانون كولوم Coulomb's law: تؤثر أي شحنتَين نقطيتَين إحداهما على الأخرى بقوة كهربائية تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب مقدار الشحنتين وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما. (ص ٥٣)

قانون لنز Lenz's law: تنشأ أي قوة دافعة كهربائية مستحثة باتجاه معيّن بحيث ينتج عنها تأثيرات تقاوم التغيّر الذي أنتجها. (ص ١٦٦)

قانون نيوتن للجاذبية Newton's law of gravitation: أي كتلتَين نقطيتَين تجذب كل منهما الأخرى بقوة تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب كتلتَيهما وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما. (ص ٢٣)

القوة الدافعة الكهربائية Electromotive force (e.m.f.): الطاقة المنقولة لكل وحدة شحنة لدفع الشحنة الكهربائية في الدائرة الكاملة. (ص ٨٢)

الكثافة العددية Number density: عدد حاملات الشحنة الكهربائية لكل وحدة حجم من المادة. (ص ٧٨)

كثافة الفيض المغناطيسي Magnetic flux density: القوة المؤثرة لكل وحدة تيار كهربائي لكل وحدة طول على سلك موضوع بزاوية قائمة مع المجال المغناطيسي ووحدة قياسها التسلا Tesla (T). (ص ١٤٧)

الكولوم coulomb: الكولوم الواحد هو كمية الشحنة الكهربائية التي تتدفق عبر نقطة في الدائرة خلال زمن (1 s) عندما تكون شدة التيار الكهربائي (1 A) (ويُرمز إليه بالرمز C). (ص ٧٦)

متجانسة Homogenous: لكي تكون المعادلة صحيحة يجب أن تكون الوحدات متجانسة، ما يعني أنه عند اختزال الوحدات في طرفي المعادلة نحصل على وحدات متماثلة. (ص ٨٠)

متوسط السرعة المتجهة الانجرافية Mean drift velocity: متوسط سرعة مجموعة من الجسيمات المشحونة عند مرور تيار كهربائي في موصل. (ص ٧٨)

مجال الجاذبية Gravitational field: منطقة من الفضاء تتأثر فيها كتلة ما بقوة الجاذبية. (ص ٢١)

مجال القوة Field of force: منطقة من الفضاء يتأثر فيها جسم ما بقوة؛ قد تكون هذه القوة جاذبية أو كهربائية أو مغناطيسية أو غير ذلك. (ص ٤٥)

المجال الكهربائي Electric field: المنطقة التي يتأثر فيها جسم مشحون بقوة كهربائية. هذا ما يُعرف بـ «مجال القوة». (ص ٤٥)

مجزئ الجهد الكهربائي Potential divider: دائرة تقسّم فرق الجهد الكهربائي (V) للمصدر إلى جزأين، بحيث يكون فرق الجهد الكهربائي عبر الجزء الأول هو (V_1) وفرق الجهد الكهربائي عبر الجزء الآخر هو (V_2)؛ بحيث يكون: $V_1 + V_2 = V$. (ص ٩٧)

مدار الأقمار الثابتة بالنسبة إلى الأرض Geostationary orbit: مدار يبقى فيه القمر الصناعي مباشرةً فوق النقطة نفسها على الأرض في جميع الأوقات. (ص ٣٤)

مركز الكتلة Centre of mass: هو النقطة التي يمكننا اعتبار إجمالي كتلة الجسم مركّزًا فيها. (ص ٢٢)

المقاومة الداخلية Internal resistance: هي المقاومة الكامنة في مصدر القوة الدافعة الكهربائية، والتي يتحوّل فيها بعض الطاقة إلى أشكال أخرى، كالشغل المبذول في دفع الشحنة الكهربائية من خلال المصدر نفسه. (ص ٩٢)

المقاومة النوعية Resistivity: خاصية للمادة وهي مقياس لمقاومتها الكهربائية المعرّفة بالمعادلة: $\rho = \frac{RA}{L}$. (ص ٨٤)

مقياس الجهد الكهربائي Potentiometer: جهاز يستخدم لمقارنة فروق الجهد الكهربائية. (ص ٩٨)

مكمّمة Quantised: يُقال إن الكميّة مكمّمة عندما يكون لها حد أدنى من المقدار وتكون دائمًا بمضاعفات من هذا المقدار. (ص ٧٥)

ملحق: المكوّنات الكهربائية ورموزها

بعض المكونات الكهربائية ورموزها في الدوائر الكهربائية

الرمز	اسم المكوّن	الرمز	اسم المكوّن
	سلك توصيل		مقاومة متغيّرة
	خلية كهربائية		ميكروفون
	بطارية مكونة من عدة خلايا		مكبّر صوت (سمّاعة)
	مقاومة ثابتة المقدار		منصهر
	مصدر طاقة كهربائية		تأريض (توصيل بالأرض)
	تقاطع موصلات		مصدر جهد متردد (متناوب)
	عبور موصلات (لا يوجد تقاطع بينها)		مكثف
	مصباح ذو فتيل		مقاومة حرارية
	فولتميتر		مقاومة ضوئية (LDR)
	أميتر		وصلة ثنائية (دايود)
	مفتاح كهربائي		وصلة ثنائية ضوئية (LED)

شكر وتقدير

يتوجه المؤلفون والناشرون بالشكر الجزيل إلى جميع من منحهم حقوق استخدام مصادرهم أو مراجعهم. وبالرغم من رغبتهم فى الإعراب عن تقديرهم لكل جهد تم بذله، وذكر كل مصدر تم استخدامه لإنجاز هذا العمل، إلا أنه يستحيل ذكرها وحصرها جميعًا. وفي حال إغفالهم لأي مصدر أو مرجع فإنه يسرهم ذكره في النسخ القادمة من هذا الكتاب.

Cover Photo: Petrovich9/Getty Images

NASA/Getty Images; Space Frontiers/Getty Images; Jurik Peter/Shutterstock; NASA/Getty Images; Miluxian/Getty Images; Ralph H Wetmore II/Getty Images; ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY / SCIENCE PHOTO LIBRARY; ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY / SCIENCE PHOTO LIBRARY; BLKstudio/Shutterstock; RainerPlendl/Getty Images; Alvarez/Getty Images; MARTYN F. CHILLMAID / SCIENCE PHOTO LIBRARY; Tim Wright/Getty Images, Erik von Weber/Getty Images

رقم الإيداع : ٦٥٧٧ / ٢٠٢٣ م

Printed by: Mazoon Printing, Publishing & Packaging L.L.C - 24815693

الفيزياء – كتاب الطالب

يساعد البحث المكثف على تلبية الاحتياجات الحقيقة للطلبة الذين يدرسون مادة الفيزياء. حيث تضمن الأسئلة الواردة في نهاية كل وحدة الشعور بالثقة أثناء عملية التقييم، وفرصًا أكثر للتفكير، و تساعد قوائم المراجعة الخاصة بالتقييم الذاتي؛ على أن تصبح مسؤولاً عن عملية التعلم.

يؤمّن كتاب الطالب مجموعة من أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية وأسئلة المناقشة، والتي تساعدك على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

- بعض الميزات مثل «قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة»، والملخصات، وكيفية التعلم النشط، وبناء المهارات، تمنح فرصًا للتفكير.
- ميزات «العلوم ضمن سياقها»، من تفسير الأفكار ضمن سياق العالم الواقعي، إضافة إلى مناقشة المفاهيم مع الطلبة الآخرين.
- تعمل الأسئلة ذات الجزئيات المتعددة الموجودة في نهاية كل وحدة على التحضير لخوض الامتحانات بثقة.
- تساعد أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية والعمل ضمن مجموعات، وأسئلة المناقشة، على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

يشمل منهج الفيزياء للصف الثاني عشر من هذه السلسلة أيضًا:

- كتاب التجارب العملية والأنشطة
- دليل المعلّم

www.moe.gov.om

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS