الفيزياء

للصف الثاني عشر

الفرعين العلمي والصناعي

الناشر

وزارة التربية والتعليم

إدارة المناهج والكتب المدرسية

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

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

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

قرّرت وزارة التربية والتعليم تدريس هذا الكتاب في مدارس المملكة الأردنية الهاشمية جميعها، بناءً على قرار مجلس التربية والتعليم رقم —/ —، تاريخ —/—/——م، بدءًا من العام الدراسي ٢٠١٧م/ ٢٠١٨م.

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية

(—/—/—)

ISBN: ... - .... - .. - ... - ..

أشرف على تأليف هذا الكتاب كل من:

أ.د. معروف الحاج عبد الله (رئيسًا)

أ.د. خالد موسى أبو مراد

د. عادل أحمد شاهين

أ. بديع صالح الخطيب

أ. موسى محمود جرادات

أ. شفاء طاهر عباس (مقررًا)

وقام بتأليفه كل من:

ربحي سعيد حميدي

د. حسين محمود الخطيب

ميمي محمد التكروري

أمل محمد الحوامدة

د. أحمد محمد عوض الله

إبتهال إسماعيل العالم

التحرير العلمي: شفاء طاهر عباس

التصميم : نايف محمد أمين مراشدة

الرسم : نايف محمد أمين مراشدة

التحرير الفني: أنس خليل الجرابعة

التحرير اللغوي: د. محمد سلمان كنانة

الإنتاج: سليمان أحمد الخلايلة

دقّق الطباعة: إبتهال إسماعيل العالم

راجعها: شفاء طاهر عباس

الطبعة الأولى (التجريبية) **١٤٣٨ هـ/ ٢٠١٧ م**

المحتويـات

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

جاء كتاب الفيزياء للصف الثاني عشر، منسجمًا مع فلسفة التربية والتعليم، ومحققًا لرؤيتها في تحسين جودة التعلّم والتعليم، ومواكبة التطور العلمي والتكنولوجي المتسارع الذي يشهده العالم.

ويشتمل هذا الكتاب على موضوعات عدة، بُنيت بأسلوب تربوي حديث يكون للطالب فيه، الدور الرئيس والمحوري في عمليتي التعلّم والتعليم، ويعرض محتوى الكتاب العلمي بأسلوب شائق وتنظيم تربوي فاعل، يعكس توجهات المنهاج وفلسفته. وقد أُلِّف هذا الكتاب بحيث يساعد على تنمية مهارات التفكير العلمي والتحليل والتفسير والاستنتاج بأسلوب بنائي، ويهتم بالربط بين المفاهيم، واستخدام مهارات الرياضيات وقراءة الرسوم البيانية وتحليلها، والربط بين العلاقات. بالإضافة إلى اشتماله على العديد من الأنشطة العملية التي تُنفذ بسهولة، وتمكّن الطالب من استخدام مهارات العلم للوصول إلى الاستنتاج المنطقي السليم؛ لتحقيق الهدف من النشاط. ويشتمل الكتاب على رسوم وصور وأشكال توضيحية تساعد الطالب على تصور المفاهيم وتقريبها، وجعلها أكثر سهولة واستيعابًا، ويراعي أيضًا الفروق الفردية بين الطلبة، إلى جانب التكامل مع المواد الدراسية الأخرى، وربط الفيزياء بالحياة.

ويتضمن الكتاب العديد من التطبيقات الحديثة، التي تسهم في توسيع مدارك الطلبة. ولأن الغاية من التعلّم هي إظهار أثر ما يتعلمه الطالب في حياته اليومية، فقد تضمن المحتوى أسئلة ونصوصًا تحفز الطلبة على التأمل في التعلّم، وتشجعهم على اتباع الأساليب العلمية الصحيحة في جوانب الحياة المختلفة.

وجاء هذا الكتاب في ثلاث وحدات دراسية: الكهرباء، والمغناطيسية، والفيزياء الحديثة. وتحتوي الوحدة الأولى أربعة فصول هي المجال الكهربائي، والجهد الكهربائي، والمواسعة الكهربائية، والتيار الكهربائي ودارات التيار المباشر، وتحتوي الوحدة الثانية فصلي المجال المغناطيسي، والحث الكهرمغناطيسي، أما الوحدة الثالثة فتحتوي فصلي مقدمة إلى فيزياء الكم، والفيزياء النووية. وجاء في نهاية الكتاب بعض الملاحق التي تفيد الطلبة في عملية التعلّم.

نسأل الله العظيم أن يكون هذا الكتاب محققًا للأهداف التي خُطِّط لها، وأن تعود مخرجاته على أبنائنا ومجتمعنا الأردني الكريم بالفائدة، وأن يسهم في التطور العلمي الذي يزيد من رفعة بلدنا وشعبنا، وأن نحقق طموحاتنا في ظل حضرة صاحب الجلالة الهاشمية الملك عبد الله الثاني المعظم.

علمًا بأن هذه الطبعة تجريبية خاضعة للمراجعة والتنقيح؛ لذا نرجو من زملائنا المعلمين وأولياء الأمور أن يزودونا بأي ملحوظات تغني الكتاب، وتسهم في تحسينه وتطويره.

الفصل الدراسي الأول

الفصل الأول

المجال الكهربائي

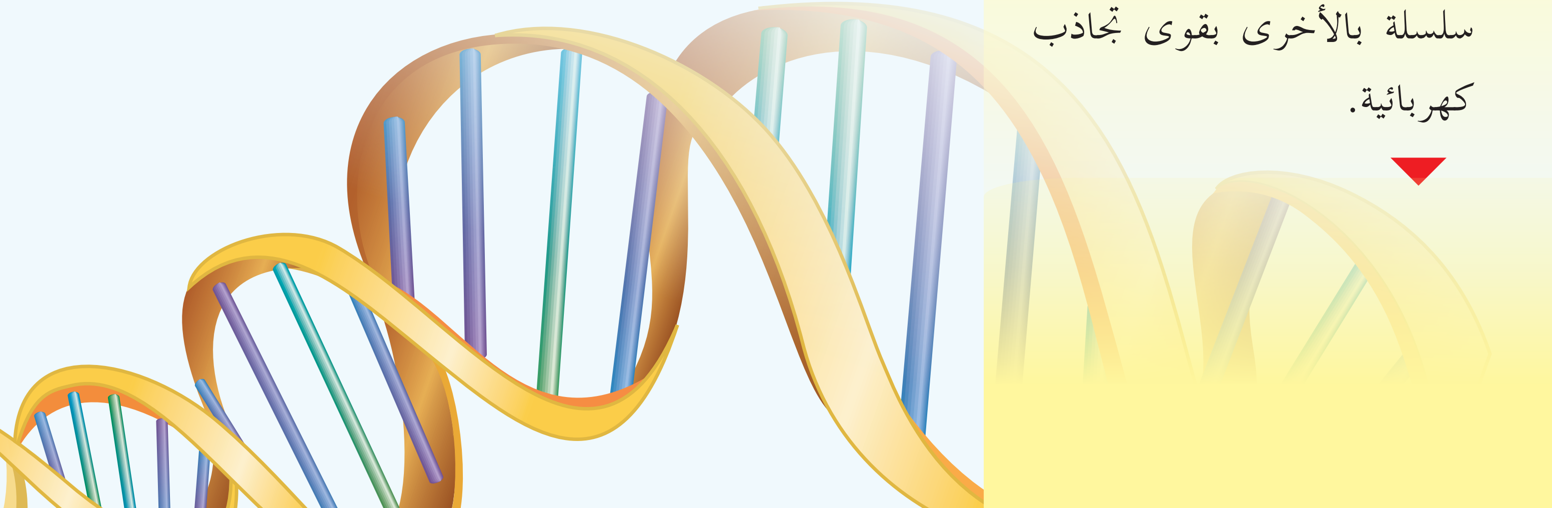
Electric Field

في هذا الفصل

يعود تاريخ اكتشاف الكهرباء السكونية إلى القرن السادس قبل الميلاد، وكان أول من اكتشف هذه الظاهرة الفيلسوف طاليس. وعبر التاريخ درس العديد من العلماء الظواهر الكهربائية المرتبطة بالشحنات الساكنة. وفي هذا الفصل سنبدأ دراستنا لعلم الكهرباء السكونية بدراسة خاصية للحيز المحيط بالأجسام المشحونة تعرف بالمجال الكهربائي. فما المقصود بالمجال الكهربائي؟ وكيف نكشف عنه؟ وما الآثار المترتبة على المجالات الكهربائية؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

يتكون الحمض النووي (DNA) من سلسلتين طويلتين، وترتبط كل سلسلة بالأخرى بقوى تجاذب كهربائية.



ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضح المقصود بالمجال الكهربائي لشحنة نقطية، وتعبر عنه رياضيًّا.
- تطبق العلاقات الرياضية للمجال الكهربائي في حساب محصلة مجالات شحنات نقطية عدة في بعدين.
- تصف المجال الكهربائي المنتظم وتعبر عنه رياضيًّا.
- تحل مسائل حسابية تتعلق بحركة جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم.
- تبحث في التطبيقات التكنولوجية لحركة الأجسام المشحونة في مجالات كهربائية منتظمة، والحماية من المجالات الكهربائية الخارجية.

١-١ القوة الكهربائية والمجال الكهربائي

Scalar and Vector Quantities

تتكون المادة من ذرات، ومن مكونات الذرة بروتونات موجبة الشحنة وإلكترونات سالبة الشحنة. وفي الذرة المتعادلة يكون عدد الإلكترونات مساويًا عدد البروتونات، ويصبح الجسم مشحونًا عندما يفقد عددًا صحيحًا من الإلكترونات أو يكسبها، لذلك فإن شحنة أي جسم يجب أن تكون من مضاعفات شحنة الإلكترون وهذا ما يسمى مبدأ تكمية الشحنة، ويمكن التعبير عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

س = ن س$_e$ .... (١-١)

حيث (س): شحنة الجسم، و(ن): عدد الإلكترونات المفقودة أو المكتسبة، و(س$_e$): شحنة الإلكترون، وهي أصغر شحنة حرة في الطبيعة، وتساوي ($١,٦ \times ١٠^{-١٩}$) كولوم، وتسمى الشحنة الأساسية.

وإذا كانت أبعاد الأجسام المشحونة صغيرة جدًّا بالنسبة إلى الأبعاد بينها، تبدو الشحنة الكهربائية على الجسم كأنها تتركز في نقطة، فيطلق على الشحنة الكهربائية التي يحملها الجسم عندئذ **شحنة نقطية**.

وتنشأ بين الأجسام المشحونة قوى كهربائية تكون على شكل قوى تنافر أو تجاذب، وقد تمكن العالم كولوم من تحديد العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة الكهربائية المتبادلة بين شحنتين نقطيتين، وتوصّل إلى أن مقدار القوة الكهربائية تتناسب طرديًّا مع مقدار كل من الشحنتين النقطيتين وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما، وتعتمد القوة الكهربائية أيضًا على طبيعة الوسط الذي توجد فيه الشحنات. ويُعبّر عن القوة الكهربائية بالعلاقة الرياضية الآتية والتي تعرف بقانون كولوم:

$$\text{ق} = \frac{\text{أ}\ \text{س}_1\ \text{س}_2}{\text{ف}^2}$$ .... (١-٢)

حيث (أ): ثابت كولوم، ويعتمد فقط على طبيعة الوسط الذي توجد فيه الشحنات، ويعبر عن هذا الثابت بالمقدار ($\frac{١}{٤\pi\varepsilon}$) حيث (ε): السماحية الكهربائية للوسط، فإذا كان الوسط فراغًا أو هواءً يعبر عن السماحية الكهربائية بالرمز (ε_0) وتساوي $٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢}$ كولوم^٢/ نيوتن.م^٢. وعليه تصبح قيمة الثابت (أ): ($\frac{١}{٤\pi\varepsilon_0}$) = ٩×١٠^{٩} نيوتن.م^٢/ كولوم^٢ تقريبًا، وسنقتصر في دراستنا على الشحنات الكهربائية التي توضع في الهواء.

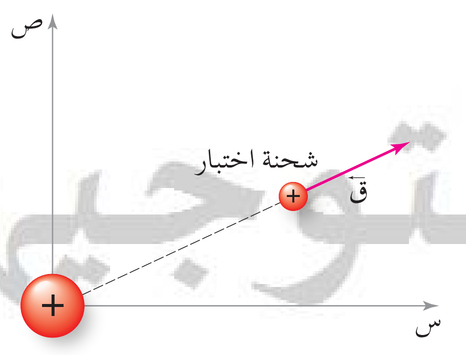
ويمكن التوصل لوحدة قياس ثابت كولوم من قانون كولوم على النحو الآتي:

$$\text{ق} = \frac{\text{أ شـ}_{١}\text{ شـ}_{٢}}{\text{ف}^{٢}} \Leftarrow [\text{أ}] = \frac{[\text{ق}][\text{ف}^{٢}]}{[\text{شـ}_{١}][\text{شـ}_{٢}]} = \frac{\text{نيوتن.م}^{٢}}{\text{كولوم}^{٢}}$$

حيث يعني وضع رمز الكمية الفيزيائية بين قوسين مربعين الوحدة التي تقاس بها تلك الكمية في النظام العالمي.

والقوة الكهربائية ذات تأثير عن بعد، وقد تمكن العالم فارادي من تفسيرها بافتراض مفهوم المجال الكهربائي، إذ يُعد المجال الكهربائي خاصية للحيز المحيط بالشحنة الكهربائية يظهر تأثيره على شكل قوة كهربائية تؤثر في شحنة أخرى توضع في هذا الحيز، لذلك تعد القوة الكهربائية قوة مجال.

وتستخدم في الكشف عن المجال الكهربائي شحنة نقطية صغيرة موجبة تسمى شحنة الاختبار، فإذا وضعت شحنة الاختبار عند نقطة ضمن مجال كهربائي فإنها تتأثر بقوة كهربائية، انظر الشكل (١-١)، فيكون مقدار المجال الكهربائي عند النقطة مساويًا مقدار القوة الكهربائية مقسومًا على مقدار شحنة الاختبار.



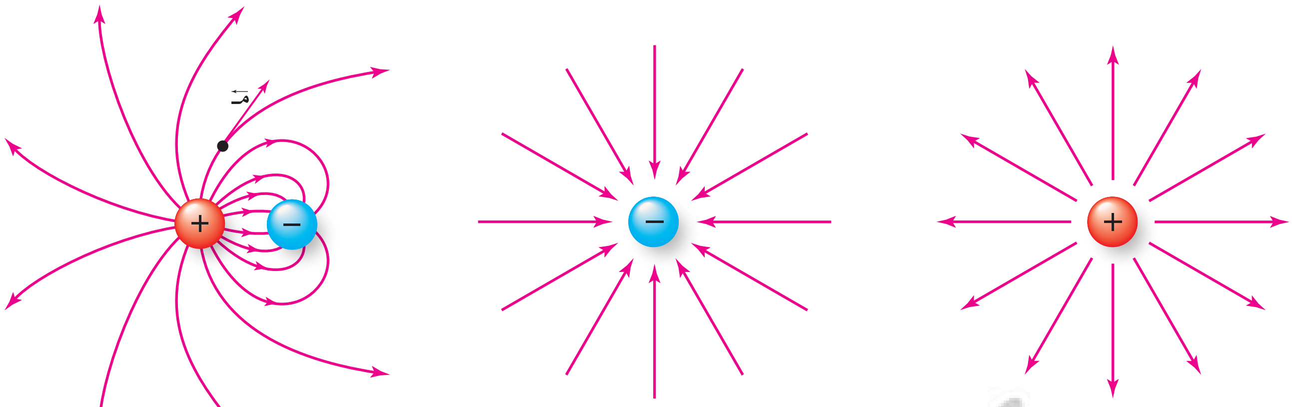
الشكل (١-١): المجال الكهربائي عند نقطة.

ويعرف المجال الكهربائي **عند نقطة بأنه القوة الكهربائية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة إذا وضعت عند تلك النقطة**. ويعبر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\vec{\text{م}} = \frac{\vec{\text{ق}}}{\text{شـ}_{.}} \quad \text{.......} \quad (١-٣)$$

والمجال الكهربائي كمية متجهة، يحدد اتجاهه عند نقطة باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة الاختبار الموجبة إذا وضعت عند تلك النقطة. من المهم الانتباه أن المجال الكهربائي لا يعتمد على مقدار شحنة الاختبار، فإذا أصبح المجال الكهربائي عند نقطة معلومًا فإنه يمكن حساب القوة الكهربائية المؤثرة في أي شحنة كهربائية (شـ.) توضع عند تلك النقطة من العلاقة (ق=مـشـ.). وفي النظام العالمي للوحدات فإن وحدة قياس المجال الكهربائي (نيوتن/ كولوم).

ومن أجل التعرف على المجال الكهربائي ووصفه مقدارًا واتجاهًا يُخطّط برسم خطوط وهمية تسمى خطوط المجال الكهربائي، إذ يمثل **خط المجال الكهربائي المسار الذي تسلكه شحنة الاختبار حرة الحركة عند وضعها في المجال الكهربائي**. ويبين الشكل (١-٢) خطوط المجال الكهربائي حول شحنات نقطية مختلفة. لاحظ أن خطوط المجال لا تتقاطع، وتبدو خارجة من الشحنة الموجبة وداخلة في الشحنة السالبة؛ لماذا؟



الشكل (١-٢): خطوط المجال الكهربائي حول شحنات نقطية مختلفة.

وتدل كثافة خطوط المجال الكهربائي في منطقة ما (عدد الخطوط التي تخترق وحدة المساحة عموديًا) على مقدار المجال الكهربائي؛ حيث يكون مقدار المجال الكهربائي كبيرًا في المنطقة التي تتقارب فيها الخطوط، بينما يكون مقداره صغيرًا في المنطقة التي تتباعد فيها الخطوط، ويحدد اتجاه المجال الكهربائي عند نقطة ما برسم مماس لخط المجال الكهربائي عند تلك النقطة.

مراجعة (١-١)

١ هل يمكن لجسم مشحون أن يحمل شحنة (٣×١٠^{-١٩}) كولوم؟ فسر إجابتك.

٢ يعد الكولوم وحدة قياس كبيرة نسبيًا من الناحية العملية. وضح ذلك من حساب عدد الإلكترونات التي يفقدها جسم أو يكسبها لتصبح شحنته (١) كولوم.

٣ بين كيف يمكن الإفادة من خطوط المجال الكهربائي في معرفة:

أ مقدار المجال الكهربائي في منطقة ما. ب اتجاه المجال الكهربائي عند نقطة.

٤ وضعت شحنة اختبار (شَ) عند نقطة في مجال كهربائي فتأثرت بقوة باتجاه المحور الصادي السالب:

أ ما اتجاه المجال عند تلك النقطة؟

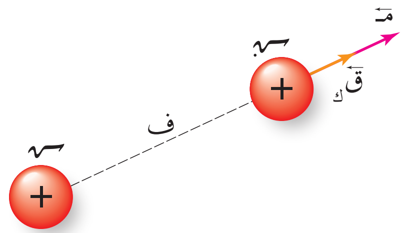
ب إذا وضعت شحنة (٢شَ) بدلًا من شحنة الاختبار (شَ)، فهل يتغير مقدار المجال الكهربائي عند النقطة؟ فسر إجابتك.

١–٢ المجال الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية

Electric field due to point charges

تستخدم العلاقة ($\vec{\text{م}} = \frac{\vec{\text{ق}}}{\text{س}_{٠}}$) لحساب المجال الكهربائي عند نقطة بغض النظر عن مصدر المجال الكهربائي، فإذا كان مصدر المجال الكهربائي شحنة نقطية فما العوامل التي يعتمد عليها المجال الكهربائي عند نقطة تقع في مجال تلك الشحنة ؟

يبين الشكل (١–٣) نقطة تقع في المجال الكهربائي لشحنة نقطية (س) وعلى بعد (ف) منها، فإذا وضعت شحنة نقطية ($\text{س}_{٠}$) عند تلك النقطة فإن المجال الكهربائي يؤثر فيها بقوة كهربائية ($\text{ق}_{\text{ك}}$).



الشكل (١–٣): المجال الكهربائي عند نقطة في مجال شحنة نقطية.

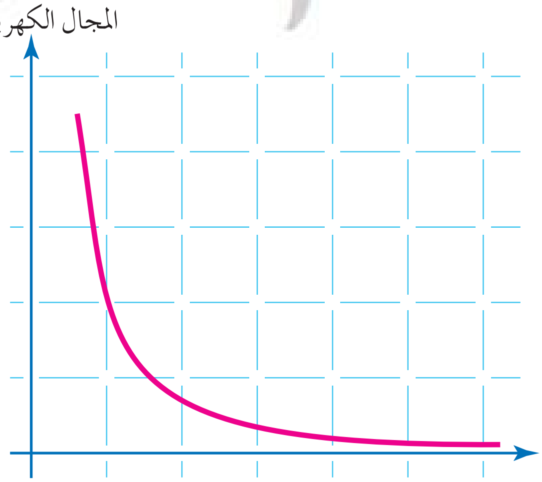
وبما أن الشحنة الكهربائية المولدة للمجال الكهربائي نقطية، وكذلك الشحنة الكهربائية ($\text{س}_{٠}$) فإنه طبقًا لقانون كولوم؛ العلاقة (١–٢)، تكون القوة الكهربائية المؤثرة في ($\text{س}_{٠}$): $\text{ق} = \frac{\text{أ س س}_{٠}}{\text{ف}^{٢}}$

وبتعويض ($\text{ق}_{\text{ك}}$) في العلاقة (١–٣)؛ $\vec{\text{م}} = \frac{\vec{\text{ق}}}{\text{س}_{٠}}$ فإن: $\vec{\text{م}} = \frac{\text{أ س س}_{٠}}{\text{ف}^{٢}\,\text{س}_{٠}}$

وباختصار($\text{س}_{٠}$) فإن:

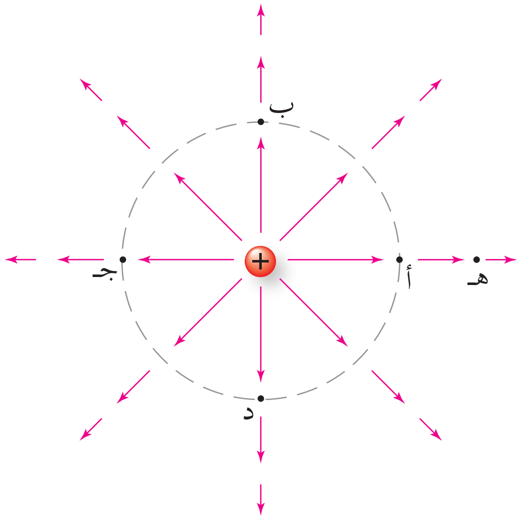
$$\vec{\text{م}} = \frac{\text{أ س}}{\text{ف}^{٢}} \qquad (١–٤)$$

تبين العلاقة (١–٤) أن مقدار المجال الكهربائي عند نقطة في الهواء يتناسب طرديًّا مع مقدار الشحنة الكهربائية المولدة للمجال الكهربائي (المصدر)، ويتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بين الشحنة الكهربائية والنقطة المراد حساب المجال عندها. ويبين الشكل (١–٤) التمثيل البياني للعلاقة بين المجال الكهربائي، وبعد النقطة عن الشحنة.



الشكل (١–٤): التمثيل البياني للعلاقة بين المجال الكهربائي، وبعد النقطة عن الشحنة.

ويعد المجال الكهربائي للشحنة النقطية مجالًا غير منتظم؛ أي أنه غير ثابت في المقدار والاتجاه. ففي الشكل (١–٥) مقدار المجال الكهربائي عند النقاط (أ، ب، جـ، د) متساوٍ لأن لها البعد نفسه عن الشحنة النقطية (س)، لكن اتجاه المجال الكهربائي عند كل منها مختلف، وكذلك مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) أقل من مقداره عند النقطة (أ) على الرغم من أن للمجال الكهربائي الاتجاه نفسه عند النقطتين.



الشكل (١–٤): المجال الكهربائي لشحنة نقطية موجبة.

مثال (١-١)

يبين الشكل (١–٦/أ) شحنة نقطية (٢×١٠^{-٦}) كولوم توضع في الهواء. إذا كانت (هـ) نقطة تقع في مجال الشحنة الكهربائية وعلى بعد (١٠)سم منها فجد عند النقطة (هـ):

١ المجال الكهربائي مقدارا واتجاها.

٢ القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (-٢×١٠^{-٩}) كولوم توضع عند تلك النقطة، مقدارًا واتجاهًا.

الشكل (١–٦): مثال (١–١).

الحل:

١ يحسب مقدار المجال الكهربائي عند النقطة من العلاقة:

$$م = \frac{أ\, س}{ف^{٢}}$$

$$= \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٢ \times ١٠^{-٦}}{(١٠ \times ١٠^{-٢})^{٢}}$$

$$= ١٨ \times ١٠^{٥} \text{ نيوتن/كولوم}$$

ويحدد اتجاه المجال الكهربائي باتجاه تأثير القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة اختبار موجبة نفترض وجودها عند النقطة (هـ)، فيكون اتجاه المجال الكهربائي باتجاه المحور السيني الموجب، كما يبين الشكل (١-٦/ب).

٢ تحسب القوة المؤثرة في شحنة توضع عند النقطة (هـ) من العلاقة:

ق = م ش.

$= ١٨ \times ١٠^{٥} \times ٢ \times ١٠^{-٩}$

$= ٣٦ \times ١٠^{-٤}$ نيوتن.

لاحظ أن الشحنة الكهربائية تعوض دون إشارتها السالبة، وإذا كانت الشحنة المتأثرة سالبة، فإن اتجاه القوة الكهربائية يكون بعكس اتجاه المجال الكهربائي؛ أي باتجاه المحور السيني السالب.

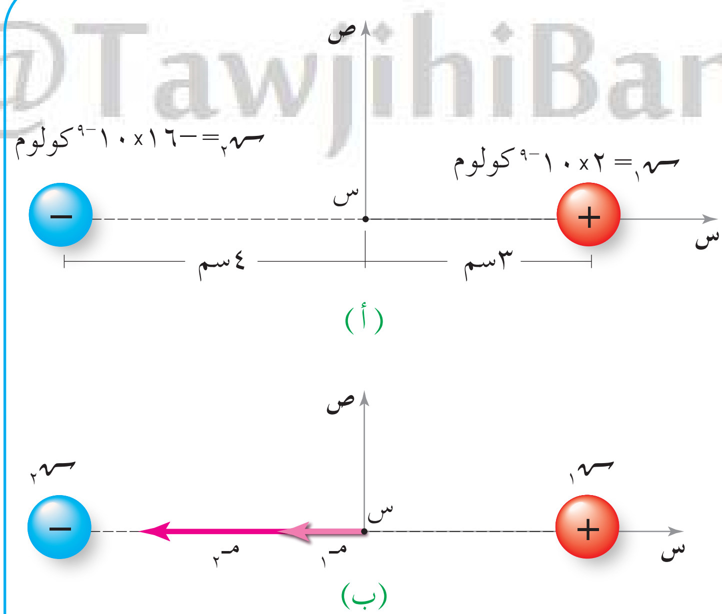
ماذا لو وقعت النقطة في مجالات كهربائية لشحنات عدة؟ كيف نحسب المجال الكهربائي الناشئ عن مجموعة من الشحنات النقطية؟ في هذه الحالة يحسب المجال الكهربائي بإيجاد المجال الكهربائي المحصل الناشئ عن هذه الشحنات عند تلك النقطة.

مثال (١-٢)

بالاعتماد على البيانات المثبتة في الشكل (١-٧)، جد:

١ المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (س) مقدارًا واتجاهًا.

٢ القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (٢ بيكوكولوم) توضع عند النقطة (س) مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (١-٧): مثال (١-٢).

الحل:

١ نحسب المجالين الكهربائيين ($م_١$، $م_٢$) الناشئين عن الشحنتين ($س_١$، $س_٢$) عند النقطة (س) على الترتيب من العلاقة (١-٤):

$$م_١ = \frac{أ س}{ف^٢}$$

$$م_١ = \frac{أ س_١}{ف_١^٢} = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٢ \times ١٠^{-٩}}{(٣ \times ١٠^{-٢})^٢} \Leftarrow م_١ = ٢ \times ١٠^٤$$ نيوتن/كولوم. باتجاه المحور السيني السالب.

$$م_٢ = \frac{أ س_١}{ف_٢^٢} = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٢ \times ١٠^{-٩}}{(٤ \times ١٠^{-٢})^٢} \Leftarrow م_٢ = ٩ \times ١٠^٤$$ نيوتن/كولوم. باتجاه المحور السيني السالب.

بما إن اتجاه المجالين الكهربائيين ($م_١$، $م_٢$) باتجاه المحور السيني السالب كما في الشكل (١-٧/ب)، لذا يكون المجال الكهربائي المحصل مساويًا حاصل جمعهما:

$م = م_١ + م_٢$

$= ٩ \times ١٠^٤ + ٢ \times ١٠^٤$

$= ١١ \times ١٠^٤$ نيوتن/ كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.

٢ تتأثر الشحنة الكهربائية (٢بيكوكولوم) الموضوعة عند النقطة (س) بالمجال الكهربائي المحصل (م)، ومن العلاقة:

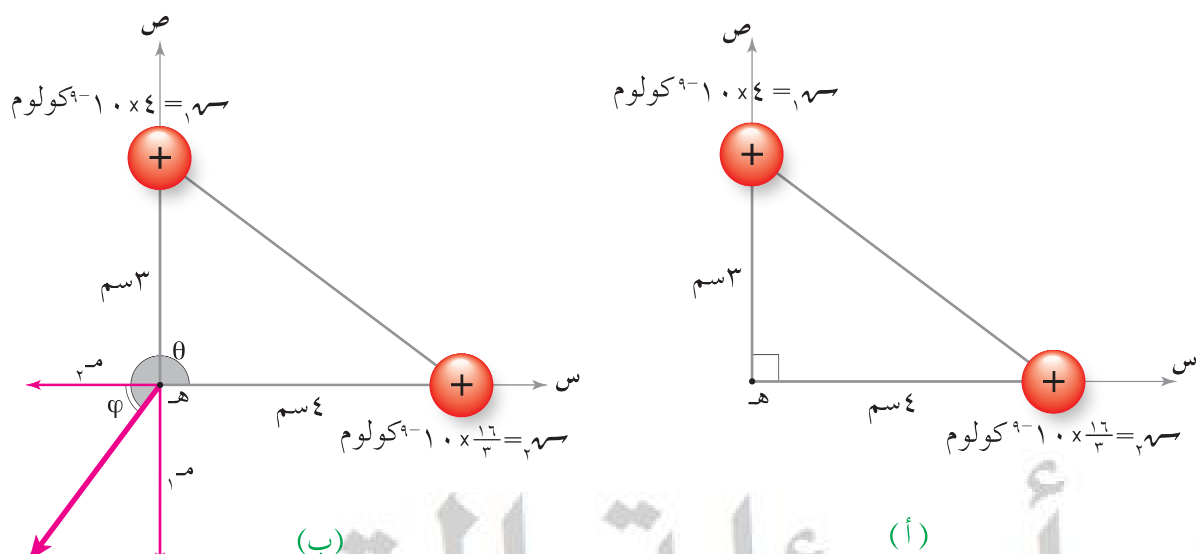
$ق_ك = م س$.

$= ١١ \times ١٠^٤ \times ٢ \times ١٠^{-١٢} = ٢٢ \times ١٠^{-٨}$ نيوتن.

ويكون اتجاه القوة الكهربائية مع اتجاه المجال الكهربائي المحصل؛ أي باتجاه المحور السيني السالب؛ لأن الشحنة الكهربائية المتأثرة موجبة.

مثال (١-٣)

شحنتان نقطيتان موضوعتان في الهواء، كما يبين الشكل (١-٨/أ). جد المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (١-٨): مثال (١-٣).

الحل:

نجد المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) والناشئ عن كل من الشحنتين (سـ_1، سـ_2) بتطبيق العلاقة (١-٤):

$$\text{مـ} = \frac{\text{أ}\,\text{سـ}_1}{\text{ف}_1^{٢}}$$

$$\text{مـ}_1 = \frac{٩ \times ١٠^{٤} \times ٤ \times ١٠^{-٩}}{(٣ \times ١٠^{-٢})^{٢}}$$

$= ٤ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم. باتجاه المحور الصادي السالب.

$$\text{مـ}_2 = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times \frac{١٦}{٣} \times ١٠^{-٩}}{(٤ \times ١٠^{-٢})^{٢}}$$

$= ٣ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم. باتجاه المحور السيني السالب.

وبما أن المجالين الكهربائيين (مـ_1، مـ_2) متعامدان فإن المجال الكهربائي المحصل يحسب من قاعدة فيثاغورس:

$$م_{هـ} = \sqrt{م_{١}^{٢} + م_{٢}^{٢}}$$

$$= \sqrt{(٤ \times ١٠^{٤})^{٢} + (٣ \times ١٠^{٤})^{٢}}$$

$= ٥ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم.

ويبين الشكل (١–٨/ب) أن المجال الكهربائي المحصل يصنع زاوية (Φ) مع المحور السيني السالب، حيث ظا $\Phi = \frac{م_{١}}{م_{٢}} = \frac{٤}{٣}$ ، فتكون $\Phi = ٥٣°$.

ويحدد اتجاه المجال الكهربائي المحصل بالزاوية المحصورة بين المحور السيني الموجب والمجال الكهربائي المحصل (θ)؛ بعكس دوران عقارب الساعة، وعليه تكون:

$\theta = (١٨٠ + ٥٣) = ٢٣٣°$.

$\therefore$ م $= ٥ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم، $٢٣٣°$.

مثال (١–٤)

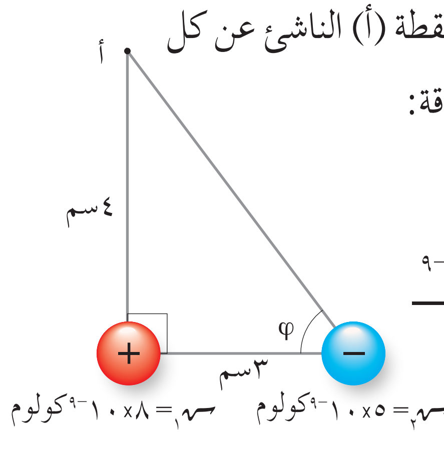
شحنتان نقطيتان موضوعتان في الهواء، كما هو مبين في الشكل (١–٩/أ). إذا كانت ($ش_{١} = ٨ \times ١٠^{-٩}$) كولوم، ($ش_{٢} = ٥ \times ١٠^{-٩}$) كولوم، فجد المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (أ) مقدارًا واتجاهًا.

الحل:

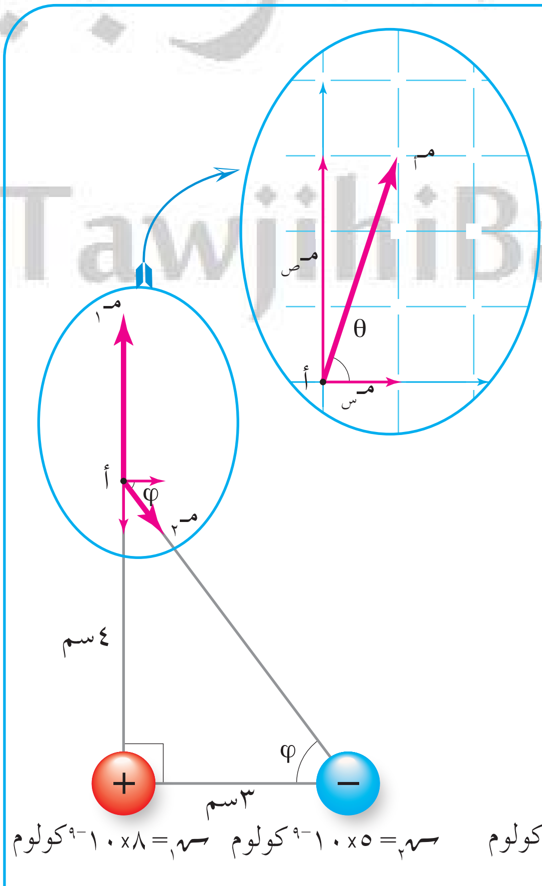
نجد المجال الكهربائي عند النقطة (أ) الناشئ عن كل من الشحنتين باستخدام العلاقة:

$$م = أ \frac{ش}{ف^{٢}}$$

$$م_{١} = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٨ \times ١٠^{-٩}}{١٦ \times ١٠^{-٤}}$$



(أ)



(ب)

الشكل (١–٩): مثال (١–٤).

$= ٤,٥ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/ كولوم. باتجاه المحور الصادي الموجب.

$$م_{٢} = \frac{٩\times١٠^{٩}\times٥\times١٠^{-٩}}{٢٥\times١٠^{-٤}}$$

$= ١,٨ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/ كولوم. باتجاه يصنع زاوية (φ) مع المحور السيني الموجب. كما يبين الشكل (١-٩/ب) .

ولإيجاد محصلة المجالين الكهربائيين، نحلل($م_{٢}$) إلى مركبتين، لاحظ الشكل (١-٩/ب):

$م_{٢س} = م_{٢}$ جتا φ

$$= ١,٨\times١٠^{٤} \times \frac{٣}{٥}$$

$= ١,٠٨\times١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم.

$م_{٢ص} = م_{٢}$جا$\varphi = ١,٨\times١٠^{٤}\times\frac{٤}{٥} = ١,٤٤\times١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم.

نجد مجموع المركبات باتجاه المحور السيني:

$م_{س} = ١,٠٨\times١٠^{٤} \approx ١\times١٠^{٤}$ نيوتن/ كولوم. باتجاه المحور السيني الموجب.

ونجد مجموع المركبات باتجاه المحور الصادي:

$م_{ص} = م_{١} - م_{٢ص} = ٤,٥\times١٠^{٤} - ١,٤٤\times١٠^{٤}$

$م_{ص} = ٣,٠٦\times١٠^{٤} \approx ٣\times١٠^{٤}$ نيوتن/ كولوم. باتجاه المحور الصادي الموجب.

ولإيجاد محصلة المجال الكهربائي عند النقطة (أ):

$م_{أ} = \sqrt{(١\times١٠^{٤})^{٢} + (٣\times١٠^{٤})^{٢}} = \sqrt{١٠\times١٠^{٤}}$ نيوتن/ كولوم.

باتجاه يصنع زاوية (θ) مع المحور السيني الموجب كما هو مبين في الشكل (١-٩/جـ). حيث

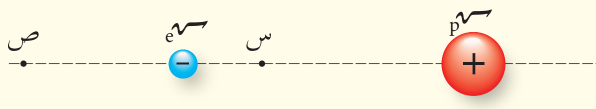
$$ظا\ \theta = \frac{م_{ص}}{م_{س}} = \frac{٣}{١} = ٣$$

فتكون $\theta = ٧٢^{\circ}$.

$\therefore م = \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم، ٧٢°.

مراجعة (١-١)

١ يبين الشكل (١-١٠) إلكترونًا وبروتونًا موضوعين على المحور السيني.



الشكل (١-١٠): سؤال (١).

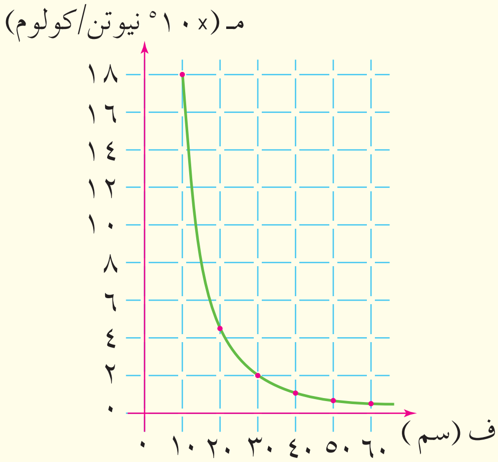
حدد اتجاه المجال الكهربائي المحصل عند النقطتين (س)، (ص).

٢ يبين الشكل (١-١١) العلاقة بين المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية والبعد عنها. معتمدًا على الشكل جد مقدار كل مما يأتي:

أ المجال الكهربائي عند نقطة تبعد عن الشحنة (٣٠) سم.

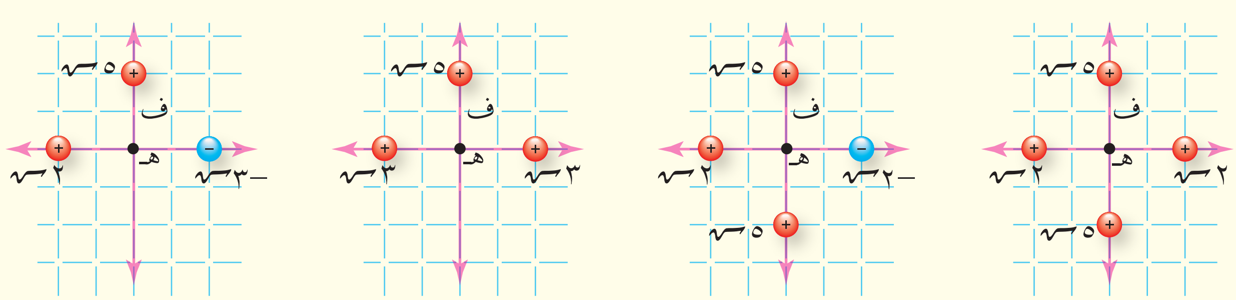
ب مقدار القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (١×١٠⁻⁹) كولوم توضع عند نقطة تبعد (٢٠) سم عن الشحنة.

جـ الشحنة الكهربائية المولدة للمجال.



الشكل (١-١١): سؤال (٢).

٣ يبين الشكل (١-١٢) توزيعات مختلفة من الشحنات النقطية، إذا كانت (ف) تمثل بعد كل شحنة عن نقطة المركز (هـ)، فجد مقدار المجال الكهربائي المحصل نقطة المركز بدلالة كل من (شـ، ف).



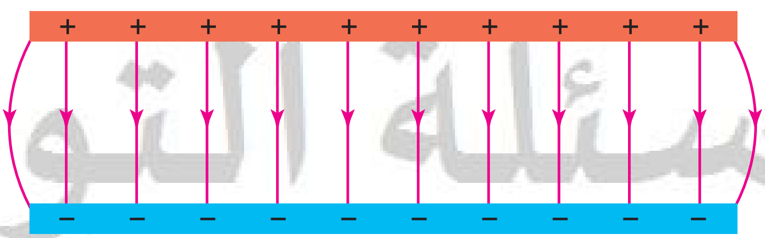
الشكل (١-١٢): سؤال (٣).

١–٣ المجال الكهربائي المنتظم
Uniform Electric Field

يعد المجال الكهربائي الناشئ عن الشحنات النقطية مجالًا كهربائيًّا غير منتظم، فكيف يمكن الحصول على مجال كهربائي منتظم؟ وكيف نعبر عنه رياضيًّا؟

عند شحن صفيحتين موصلتين متوازيتين إحداهما بشحنة سالبة والأخرى بشحنة موجبة كما يبين الشكل (١–١٣)، وتتوزع الشحنة على سطحيهما بانتظام، فينشأ بينهما **مجال كهربائي منتظم ثابت مقدارًا واتجاهًا عند النقاط جميعها** في الحيز بين الصفيحتين وبعيدًا عن الأطراف.

ويمثَّل المجال الكهربائي المنتظم بخطوط مستقيمة ومتوازية والبعد بينها متساوٍ، اتجاهها يمثل اتجاه المجال الكهربائي.



الشكل (١–١٣): المجال الكهربائي المنتظم.

لاحظ أن المجال الكهربائي في هذه الحالة مصدره الشحنات الموزعة على سطحي الصفيحتين.

فإذا كان مقدار الشحنة على إحدى الصفيحتين (ش) ومساحة الصفيحة (أ) فإن كمية الشحنة الكهربائية لكل وحدة مساحة تعرف بالكثافة السطحية للشحنة **ويرمز لها بالرمز** (σ) حيث ($\sigma = \frac{ش}{أ}$) وتقاس بوحدة (كولوم/ م^{٢}).

ويتناسب مقدار المجال الكهربائي طرديًّا مع الكثافة السطحية للشحنة على الصفيحتين، ويعتمد المجال الكهربائي أيضًا على السماحية الكهربائية للوسط الفاصل بين الصفيحتين، فإذا كانت الكثافة السطحية للشحنة على الصفيحتين متساوية، وكان الوسط بين الصفيحتين هواءً أو فراغًا فإن المجال الكهربائي يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$م = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\circ}} \quad \text{(١–٥)}$$

ماذا يحدث إذا وضع جسيم مشحون عند نقطة في مجال كهربائي منتظم؟

عندما يوضع جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم فإنه يتأثر بقوة كهربائية ثابتة مقدارًا واتجاهًا. فإذا تحرك الجسيم تحت تأثير القوة الكهربائية فإنه سيكتسب تسارعًا ثابتًا مقدارًا واتجاهًا، وفقًا للقانون الثاني لنيوتن. وفي حالة الجسيمات الذرية (البروتونات والإلكترونات) فإن وزنها يكون مهملًا مقارنة بالقوة الكهربائية المؤثرة فيها؛ لذلك فإن القوة الكهربائية تمثل $ق_{\text{المحصلة}}$. أي أن:

$$ق_{\text{محصلة}} = ك\ ت$$

$$ق_{ك} = ك\ ت$$

$$\text{م سـ.} = ك\ ت$$

وبذلك فإن التسارع :

$$ت = \frac{\text{م سـ.}}{ك} \quad \text{(١-٦)}$$

ويكون اتجاه التسارع باتجاه القوة الكهربائية. وبما أن التسارع ثابت، فإن حركة الجسيم يمكن وصفها باستخدام معادلات الحركة بتسارع ثابت:

$$ع = ع. + ت\ ز \quad \text{(١-٧)}$$

$$\Delta س = ع.\ ز + \frac{١}{٢}\ ت\ ز^{٢} \quad \text{(١-٨)}$$

$$ع^{٢} = ع.^{٢} + ٢\ ت\ \Delta س \quad \text{(١-٩)}$$

حيث (ع) : السرعة النهائية للجسيم.

(ع.) : السرعة الابتدائية للجسيم.

(Δس) : الإزاحة التي يقطعها الجسيم.

(ز) : الزمن اللازم للحركة.

مثال (١-٥)

صفيحتان موصلتان متوازيتان مساحة كل منهما (١×١٠^{-٢}) م^{٢}، شحنت إحداهما بشحنة موجبة والأخرى بشحنة سالبة، وكانت الشحنة الكهربائية على كل صفيحة ($١,٧٧ \times ١٠^{-٩}$) كولوم.

علمًا أن $\varepsilon_{.} = ٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢} \frac{\text{كولوم}^{٢}}{\text{نيوتن.م}^{٢}}$. احسب:

١ مقدار المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين.

٢ مقدار القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (١×١٠^{-٩}) كولوم توضع في الحيز بين الصفيحتين.

٣ المجال الكهربائي عندما تصبح الشحنة الكهربائية مثلي ما كانت عليه على كل من الصفيحتين، مع بقاء مساحة كل من الصفيحتين ثابتة.

الحل:

١ أوّلًا: لحساب الكثافة السطحية للشحنة نستخدم العلاقة:

$$\sigma = \frac{\text{س}}{\text{أ}}$$

$$= \frac{١,٧٧ \times ١٠^{-٩}}{١ \times ١٠^{-٢}} \Leftarrow \sigma = ١,٧٧ \times ١٠^{-٧} \text{ كولوم/م}^{٢}.$$

ثانيًا: لحساب المجال الكهربائي نستخدم العلاقة:

$$\text{مـ} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{.}}$$

$$= \frac{١,٧٧ \times ١٠^{-٧}}{٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢}}$$

$$\text{مـ} = ٢ \times ١٠^{٤} \text{ نيوتن/ كولوم.}$$

٢ لحساب القوة الكهربائية المؤثرة في الشحنة الكهربائية نستخدم العلاقة:

$$\text{ق} = \text{مـ س.}$$

$$= ٢ \times ١٠^{٤} \times ١ \times ١٠^{-٩} = ٢ \times ١٠^{-٥} \text{ نيوتن.}$$

٣ عندما تصبح الشحنة الكهربائية مثلي ما كانت عليه مع بقاء مساحة الصفيحتين ثابتة تصبح (σ) مثلي قيمتها، وبما أن المجال الكهربائي (مـ) يتناسب طرديًا مع كثافة الشحنة السطحية (σ) فإن المجال الكهربائي يصبح مثلي مقدارة أي أن مـ = ٤×١٠^{٤} نيوتن/ كولوم.

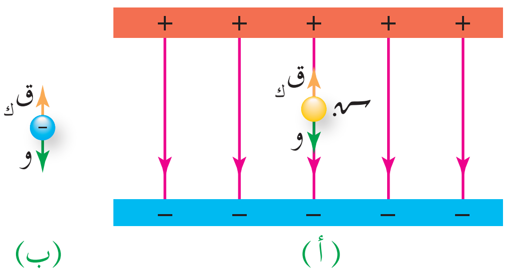
مثال (١-٦)

يبين الشكل (١-١٤/أ) مجالًا كهربائيًا منتظمًا اتجاهه نحو المحور الصادي السالب، وضع فيه جسيم شحنته (٣) نانوكولوم وكتلته (٣×١٠^{-٥}) كغ، فاتزن. أجب عما يأتي:

١ ما نوع شحنة الجسيم؟

٢ احسب مقدار المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين.

٣ إذا استخدمنا صفيحتين لهما نصف المساحة، فكيف يجب أن نُغير الشحنة الكهربائية على الصفيحتين كي يبقى الجسيم متزنًا؟



الشكل (١-١٤): مثال (١-٦).

الحل:

١ بما أن الجسيم متزن، واتجاه الوزن للأسفل، فإن اتجاه القوة الكهربائية يجب أن يكون للأعلى. انظر الشكل (١-١٤/ب)، وبما أن القوة الكهربائية بعكس اتجاه المجال الكهربائي فإن شحنة الجسيم سالبة.

٢ الجسيم متزن، وعليه فإن:

$$\text{ق}_{\text{ك}} = \text{و}$$

$$\text{مـ ش}. = \text{ك جـ}$$

$$\text{مـ} = \frac{\text{ك جـ}}{\text{ش}.} = \frac{٣ \times ١٠^{-٥} \times ١٠}{٣ \times ١٠^{-٩}}$$

مـ = ١×١٠^{٥} نيوتن/كولوم.

٣ لبقاء الجسيم متزنًا يجب الحفاظ على المجال الكهربائي مقدارًا واتجاهًا (مـ = $\frac{\sigma}{\varepsilon.}$) وبما أن ($\sigma = \frac{\text{ش}}{\text{أ}}$)، لذا عندما تقل مساحة الصفيحتين إلى النصف يجب أن تقل الشحنة الكهربائية إلى النصف.

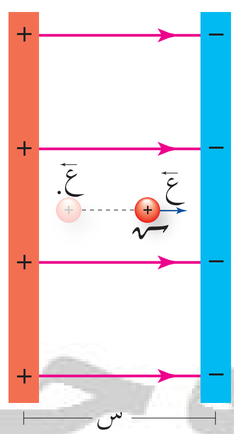
مثال (١-٧)

تحرك بروتون من السكون في مجال كهربائي منتظم مقداره (٥٠١) نيوتن/ كولوم من نقطة عند الصفيحة الموجبة إلى نقطة عند الصفيحة السالبة، كما يبين الشكل(١–١٥). إذا كانت سرعة البروتون بعد قطعه هذه الإزاحة (١,٢×١٠^٥) م/ث، وكتلته ١,٦٧×١٠^-٢٧ كغ فاحسب:

١ تسارع البروتون.

٢ الزمن الذي يحتاجه البروتون كي يصل إلى الصفيحة السالبة.

٣ الإزاحة التي قطعها.



الشكل (١–١٥): مثال (١– ٧) .

الحل:

١ يحسب التسارع من العلاقة:

$$ت = \frac{\text{مـــهـ.}}{ك}$$

$$= \frac{٦٠٠ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩}}{١,٦٧ \times ١٠^{-٢٧}}$$

$= ٤,٨ \times ١٠^{١٠}$ م/ث^{٢}، باتجاه المحور السيني الموجب.

٢ يحسب الزمن من العلاقة:

$$ع = ع. + ت\ ز$$

$$١,٢\times١٠^{٥} = ٠ + ٤,٨ \times ١٠^{١٠}\ ز$$

$ز = ٢,٥ \times ١٠^{-٦}$ ث.

٣ تحسب الإزاحة من العلاقة:

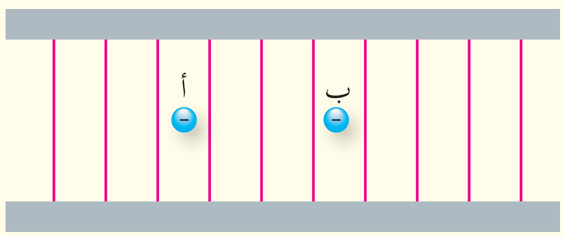
$$\Delta س = \frac{ع.\ ز + ١}{٢ \ ت\ ز^{٢}}$$

$$= \frac{٠ + ١}{٢ \times ٤,٨ \times ١٠^{١٠} (٢,٥\times١٠^{-٦})^{٢}}$$

$= ٠ + ١/٢ \times ٤,٨ \times ١٠\ ١٠ (٢,٥\times١٠\ -٦) ٢$

$\Delta س = ١٥$ م، باتجاه المحور السيني الموجب.

مراجعة (١-٣)



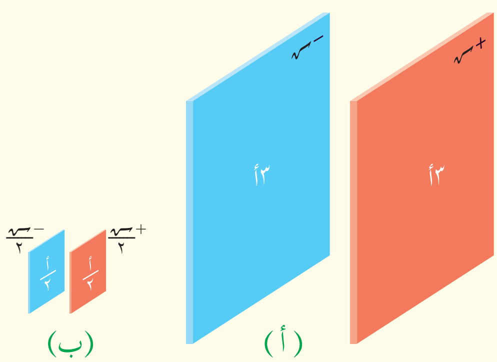
الشكل (١-١٦): سؤال (١).

١ اتزن جسيم (أ) شحنته (−س.) وكتلته (ك) في مجال كهربائي منتظم رأسيّ كما هو مبين في الشكل (١-١٦)، ادرس الشكل ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

أ حدد نوع الشحنة الكهربائية على الصفيحتين.

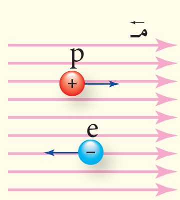
ب إذا أُدخل جسيم (ب) شحنته (−س.) وكتلته (٢ك) في المجال الكهربائي نفسه، فهل يتزن؟ فسر إجابتك .

جـ إذا زادت الشحنة الكهربائية على الصفيحتين فهل يبقى الجسيم (أ) محافظًا على اتزانه؟ فسر ذلك.



الشكل (١-١٧): سؤال (٢).

٢ معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (١-١٧) حدد في أي الحالتين يكون مقدار المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين أكبر؟ فسر إجابتك.



الشكل (١-١٨): سؤال (٣).

٣ يبين الشكل(١- ١٨) مجالًا كهربائيًا منتظمًا يتحرك فيه إلكترون وبروتون، إذا كانت كتلة الإلكترون تعادل $\frac{١}{١٨٤٠}$ من كتلة البروتون، فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ أيهما أكبر مقدارًا القوة الكهربائية المؤثرة في البروتون أم المؤثرة في الإلكترون؟

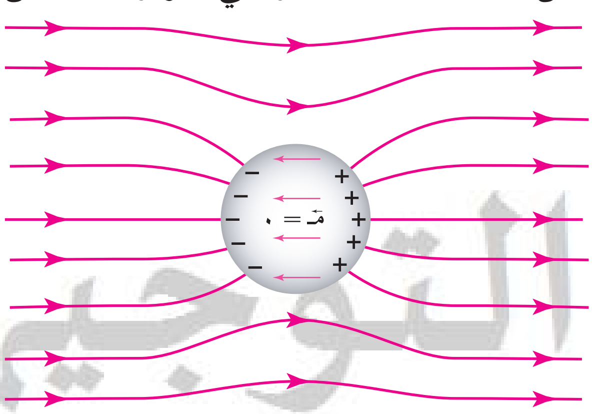
ب أيهما أكبر مقدارًا تسارع البروتون أم تسارع الإلكترون؟

٤ تحرك إلكترون من السكون بالاتجاه الأفقي في مجال كهربائي منتظم مقداره (٥٠٠) نيوتن/ كولوم. إذا علمت أن كتلة الإلكترون ٩,١١×١٠$^{-٣١}$ كغ، فاحسب سرعة الإلكترون بعد قطعه إزاحة أفقية مقدارها (١٠)مم.

١–٤ حماية الأجهزة الإلكترونية من المجالات الكهربائية الخارجية

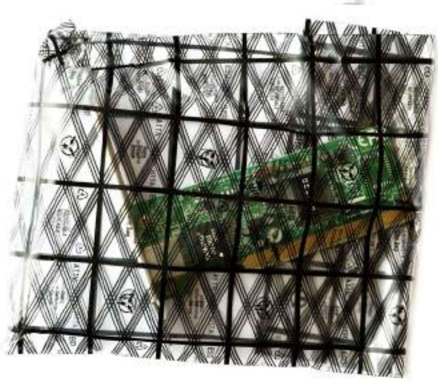
نعتمد في حياتنا على الكهرباء بشكل أساسي، وحيثما وجدت شحنات كهربائية توجد مجالات كهربائية. وقد تسبب هذه المجالات الكهربائية ضررًا للأجهزة الإلكترونية الحساسة، فكيف نحمي جهازًا ما من مجال كهربائي خارجي؟

تحتوي الموصلات على إلكترونات حرة، وعندما يوضع موصل في مجال كهربائي خارجي تتأثر هذه الإلكترونات بقوة كهربائية تدفعها للحركة بعكس اتجاه المجال الكهربائي المؤثر، فيشحن الموصل بالحث، وتتوزع الشحنات على السطح الخارجي للموصل، كما هو مبين في الشكل (١–١٩)، فينشأ داخل الموصل مجال كهربائي مساوٍ للمجال الكهربائي الخارجي ومعاكسٌ له في الاتجاه، فيكون المجال الكهربائي المحصّل داخل الموصل صفرًا، وبذلك يمنع الموصل المجال الكهربائي الخارجي من اختراقه.



الشكل (١–١٩): المجال الكهربائي داخل الموصل.

وبناء على ماسبق، فإن الموصلات تشكل درعًا واقيًا لحماية الأجهزة من المجالات الكهربائية الخارجية. ويبين الشكل (١–٢٠) أكياسًا مصنوعة من مادة موصلة لحماية الدارات الإلكترونية.



الشكل (١–٢٠): أكياس مصنوعة من مادة موصلة لحماية الدارات الإلكترونية.

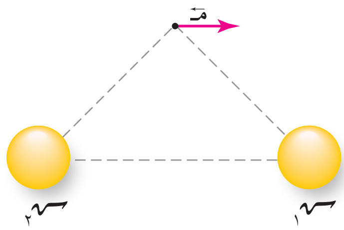
مراجعة (١-٤)

١ قام طالب بإجراء النشاط المبين في الشكل (١-٢١)، فلاحظ أنه لا يمكن الاتصال مع الهاتف في هذه الحالة. كيف تفسر ذلك؟ (يمكنك أن تجرب بنفسك)

٢ أيهما أكثر أمانًا البقاء داخل سيارة خلال العاصفة المصحوبة بالبرق، أم الخروج منها؟ فسر إجابتك.

الشكل (١-٢١): سؤال (١).

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:



الشكل (١-٢٢): سؤال (١) فقرة (١).

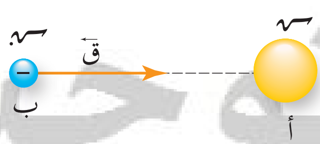
١) شحنتان نقطيتان متساويتان في المقدار($ـــم_١ = ـــم_٢$). ويبين الشكل (١-٢٢) اتجاه المجال الكهربائي المحصل عند نقطة تبعد عن الشحنتين المسافة نفسها. نستنتج أن:

أ) ـــم١ موجبة، ـــم٢ موجبة. ب) ـــم١ موجبة، ـــم٢ سالبة.

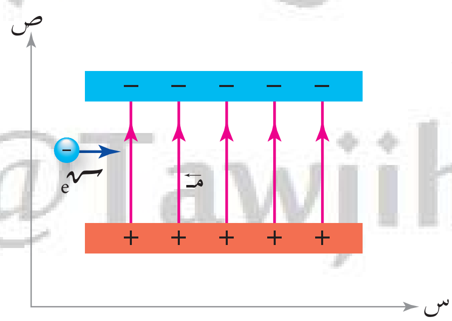
جـ) ـــم١ سالبة، ـــم٢ موجبة. د) ـــم١ سالبة، ـــم٢ سالبة.

٢) يبين الشكل (١-٢٣) شحنة نقطية (ـــم) عند النقطة (أ) تولد حولها مجالًا كهربائيًا. عندما وضعت شحنة (−ـــم.) عند النقطة (ب) في المجال الكهربائي تأثرت بقوة كهربائية باتجاه المحور السيني الموجب، فيكون اتجاه المجال الكهربائي عند النقطة (ب)، ونوع الشحنة الكهربائية (ـــم):

	اتجاه المجال الكهربائي	الشحنة الكهربائية (ـــم)
أ	+س	سالبة
ب	+س	موجبة
جـ	−س	سالبة
د	−س	موجبة



الشكل (١-٢٣): سؤال (١) فقرة (٢).



الشكل (١-٢٤): سؤال (١) فقرة (٣).

٣) عندما يدخل إلكترون متحركًا بالاتجاه السيني الموجب إلى منطقة مجال كهربائي منتظم، كما يبين الشكل (١-٢٤)، فإن هذا الإلكترون يكتسب تسارعًا بالاتجاه:

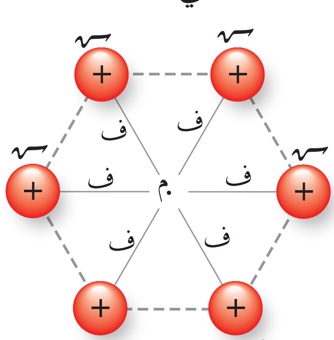
أ) الصادي الموجب ب) الصادي السالب

جـ) السيني الموجب د) السيني السالب.

٤) ينشأ مجال كهربائي منتظم في الحيز بين صفيحتين موصلتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في النوع. فإذا أصبحت مساحة الصفيحتين مثلي ما كانت عليه وقلت الشحنة الكهربائية إلى النصف فإن المجال الكهربائي:

أ) يقل إلى النصف ب) يتضاعف

جـ) يقل إلى الربع د) يصبح أربعة أضعاف.



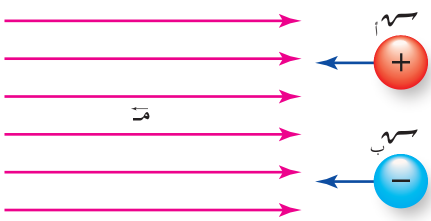
الشكل (١-٢٥): سؤال (١) فقرة (٥).

٥) وزعت شحنات نقطية مقدار كل منها (+ـــم) على رؤوس مضلع سداسي كما في الشكل (١-٢٥). إذا أزيلت شحنة نقطية واحدة

فإن مقدار المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (م) يساوي:

أ) صفرًا ب) $٥\times(\text{أ}\,\frac{ش}{ف^{٢}})$ جـ) $٦\times(\text{أ}\,\frac{ش}{ف^{٢}})$ د) $(\text{أ}\,\frac{ش}{ف^{٢}})$

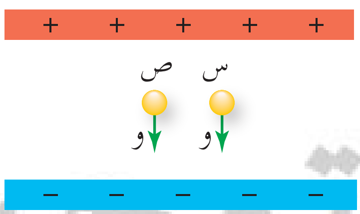
٢ عند دخول الجسيمات المشحونة إلى مجال كهربائي فإنها تتأثر بقوة كهربائية، ويبين الشكل (١-٢٦) اتجاه الحركة لجسيمين (أ) موجب الشحنة و(ب) سالب الشحنة قبل دخولهما إلى مجال كهربائي منتظم. وضح لكل جسيم:


الشكل (١-٢٦): سؤال (٢).

أ) اتجاه القوة الكهربائية المؤثرة فيه في أثناء حركته في المجال الكهربائي.

ب) أثر القوة الكهربائية في مقدار سرعة الجسيم.

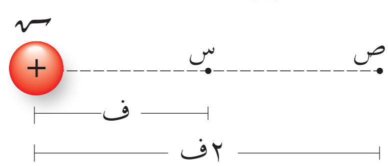
٣ جسيمان (س)، و(ص) مشحونان متساويان في الوزن وضعا ساكنين في مجال كهربائي منتظم كما يبين الشكل (١-٢٧)، فلوحظ أن الجسيم (س) بقي ساكنًا، بينما تحرك الجسيم (ص) إلى الأعلى. أجب عما يأتي:


الشكل (١-٢٧): سؤال (٣).

أ) ما نوع شحنة كل من الجسيمين؟

ب) كيف تفسر اتزان الجسيم (س) وتحرك الجسيم (ص) إلى الأعلى بالرغم من أن الجسيمين متساويان في الوزن؟

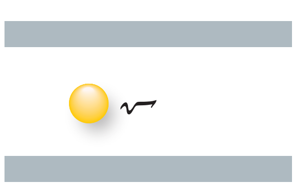
٤ نقطتان (س، ص) تقعان في المجال الكهربائي لشحنة نقطية موجبة. كما يبين الشكل (١-٢٨)، وضعت شحنة مقدارها (١×١٠^{-٦}) كولوم عند النقطة (س) فتأثرت بقوة كهربائية مقدارها (٨×١٠^{-٣}) نيوتن. جد:


الشكل (١-٢٨): سؤال (٤).

أ) المجال الكهربائي عند النقطة (س) مقدارًا واتجاهًا.

ب) القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة نقطية مقدارها (-١×١٠^{-٦}) كولوم توضع عند النقطة (ص) مقدارًا واتجاهًا.

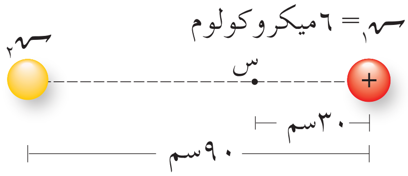
٥ جسيم مشحون كتلته (٤×١٠^{-٩}) كغ وشحنته ($+٣,٢\times١٠^{-١٢}$) كولوم، اتزن في الحيز بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين في المقدار، إحداهما موجبة والأخرى سالبة كما يبين الشكل (١-٢٩).


الشكل (١-٢٩): سؤال (٥).

أ) ما نوع الشحنة الكهربائية على كل صفيحة؟

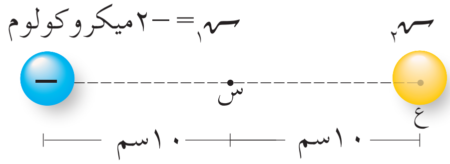
ب) احسب الكثافة السطحية للشحنة على كل صفيحة.

٦ شحنتان نقطيتان موضوعتان في الهواء، والبعد بينهما (٩٠) سم، إذا علمت أن المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (س) يساوي صفرًا، ومعتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (١-٣٠)، فجد مقدار الشحنة (ش٢) ونوعها.



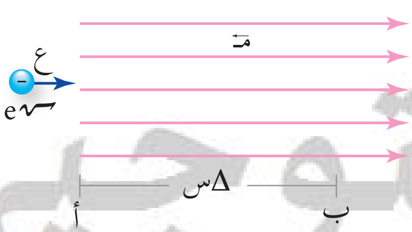
الشكل (١-٣٠): سؤال (٦).

٧ وضعت شحنة (-٢×١٠^{-٦}) كولوم على بعد (١٠) سم من النقطة (س) كما في الشكل (١-٣١). احسب مقدار الشحنة الكهربائية الواجب وضعها عند النقطة (ع)، وحدد نوعها، ليكون مقدار المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (س) مساويًا (٥٤×١٠^{٥}) نيوتن/كولوم واتجاهه نحو النقطة (ع).



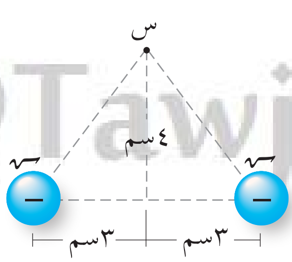
الشكل (١-٣١): سؤال (٧).

٨ إلكترون يتحرك باتجاه المحور السيني الموجب بسرعة ($\frac{٨}{٣} \times ١٠^{٦}$) م/ث دخل مجالًا كهربائيًا منتظمًا مقداره (١×١٠^{٣}) نيوتن/كولوم، وبالاتجاه المبين في الشكل (١-٣٢). إذا بدأ الإلكترون الحركة من النقطة (أ) وتوقف عند النقطة (ب) فاحسب الإزاحة التي قطعها.



الشكل (١-٣٢): سؤال (٨).

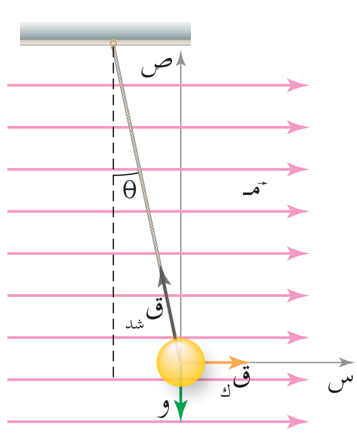
٩ شحنتان نقطيتان متماثلتان (ش = -٥×١٠^{-٦}) كولوم، وموضوعتان في الهواء. معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (١-٣٣)، احسب المجال الكهربائي عند النقطة (س) مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (١-٣٣): سؤال (٩).

١٠ كرة صغيرة مشحونة شحنتها (ش.)، ووزنها (و) علقت بخيط داخل مجال كهربائي منتظم، فاتزنت كما هو مبين في الشكل (١-٣٤)، أثبت أن مقدار المجال الكهربائي يعطى بالعلاقة:

$$مـ = \frac{و \ ظا \ \theta}{ش} .$$



الشكل (١-٣٣): سؤال (٩).

الفصل الثاني

الجهد الكهربائي

Electric Potential

عند دراسة علم الكهرباء السكونية لا بد من تناول مفهومين مترابطين: المجال الكهربائي والجهد الكهربائي، وقد تناولنا في الفصل الأول المجال الكهربائي، وفي هذا الفصل سندرس الجهد الكهربائي، وهو من المفاهيم الأساسية في علم الكهرباء، ويرتبط الجهد الكهربائي بأحد أشكال الطاقة وهو طاقة الوضع. فما المقصود بالجهد الكهربائي؟ وكيف نحسب فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي ؟ وكيف نربط بين الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

في هذا الفصل

(٢-١)
الجهد الكهربائي.

(٢-٢)
الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية.

(٢-٣)
طاقة الوضع الكهربائية لنظام يتألف من شحنتين نقطيتين.

(٢-٤)
فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.

(٢-٥)
سطوح تساوي الجهد.

(٢-٦)
الجهد الكهربائي لموصل مشحون.

يحدث البرق عندما يصل فرق الجهد الكهربائي بين الغيوم والأرض إلى أكثر من مليون فولت.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضح المقصود بالجهد الكهربائي، ووحدة قياسه، وتعبر عنه رياضيًّا.
- تستنتج العوامل التي يعتمد عليها الجهد الكهربائي عند نقطة في مجال كهربائي.
- تتوصل إلى قانون فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين بالاعتماد على مبرهنة الشغل والطاقة الحركية.
- تستنتج العلاقة بين فرق الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي المنتظم.
- تطبق العلاقات والقوانين الخاصة بالجهد الكهربائي في حل مسائل.
- تعرف سطح تساوي الجهد، وتذكر خصائصه.
- تصف سطح تساوي الجهد لموصلات مختلفة مشحونة.
- تصف الجهد الكهربائي لموصل كروي مشحون.

٢-١ الجهد الكهربائي

Scalar and Vector Quantities

تحدث الأرض في الحيز المحيط بها مجالًا يسمى مجال الجاذبية الأرضية، وتشكل الأرض مع أي جسم يقع ضمن مجالها نظامًا، يسمى نظام (الجسم- الأرض)، يظهر فيه شكل من أشكال الطاقة يسمى طاقة الوضع، وهي طاقة ترتبط بقوى المجال عمومًا. وبالمثل، إذا وضعت شحنة في مجال كهربائي خارجي فإن الشحنة والمجال الكهربائي يشكلان نظامًا واحدًا، يسمى نظام (الشحنة الكهربائية - المجال الكهربائي)، يختزن في النظام **طاقة وضع كهربائية**، تعزى هذه الطاقة إلى الشحنة الكهربائية، فكيف تنشأ هذه الطاقة؟ وعلى ماذا يعتمد مقدارها؟

في مجال الجاذبية الأرضية، كي نحسب طاقة الوضع لجسم عند موقع ما، نحتاج إلى موقع مرجعي تكون طاقة الوضع عنده صفرًا. ففي الشكل (٢-١/أ)، يمكن القول إن الجسم يختزن طاقة وضع نتيجة وجوده على ارتفاع ما عن سطح الأرض؛ على فرض أن الأرض في هذه الحالة تمثل الموقع المرجعيّ.

(أ): طاقة الوضع في مجال الجاذبية الأرضية.

(ب): طاقة الوضع الكهربائية في المجال الكهربائي.

الشكل (٢-١): طاقة الوضع في مجال الجاذبية الأرضية وفي المجال الكهربائي.

وفي المجال الكهربائي اصطلح على أن اللانهاية (∞) هي النقطة المرجعية التي تكون طاقة الوضع عندها صفرًا؛ (ط$_{و}$∞ = ٠).

ولبناء النظام المبين في الشكل (٢-١/ب)، بداية وعلى افتراض أن الشحنة (ـمـ.) في اللانهاية، ولنقلها إلى نقطة ضمن المجال الكهربائي بسرعة ثابتة نؤثر فيها بقوة خارجية مساوية في المقدار ومعاكسة في الاتجاه للقوة الكهربائية، وعندئذ تبذل القوة الخارجية شغلًا يختزن في الشحنة على شكل طاقة وضع كهربائية (ط$_و$)، حيث طاقتها الحركية بقيت ثابتة (Δط$_ح$= ٠).

ويمثل مقدار طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة توضع عند نقطة ما في مجال كهربائي **الجهدَ الكهربائيَّ** للنقطة، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ج} = \frac{\text{ط}_{\text{و}}}{\text{سـ}_{.}} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٢-١)$$

والجهد الكهربائي كمية قياسية، وفي النظام العالمي للوحدات يقاس بوحدة (جول/ كولوم) وتعرف بالفولت. فعندما نقول إن الجهد الكهربائي عند نقطة (١) فولت فهذا **يعني أنه إذا وضعت شحنة كهربائية مقدارها (١) كولوم عند تلك النقطة، ستختزن طاقة وضع كهربائية مقدارها (١) جول.** ويتخذ الجهد الكهربائي عند نقطة ما قيمة محددة، ولا يعتمد على ($\text{سـ}_{.}$). فإذا تغيرت ($\text{سـ}_{.}$) فإن طاقة الوضع ($\text{ط}_{\text{و}}$) تتغير بحيث تبقى النسبة ($\frac{\text{ط}_{\text{و}}}{\text{سـ}_{.}}$) ثابتة.

أما إذا تغيرت طاقة الوضع الكهربائية للشحنة عند انتقالها من نقطة إلى أخرى ضمن المجال الكهربائي فهذا يعني أنه يوجد فرق في الجهد الكهربائي بين النقطتين.

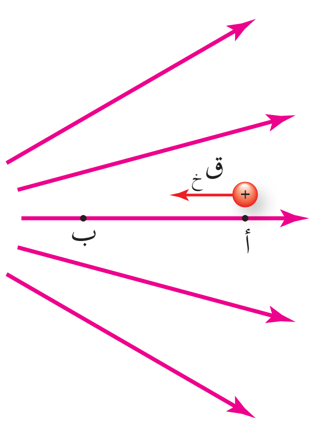
ويعرف **فرق الجهد الكهربائي** **بين النقطتين بأنه التغير في طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة عند انتقالها بين نقطتين في مجال كهربائي**، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\Delta\text{ج} = \frac{\Delta\text{ط}_{\text{و}}}{\text{سـ}_{.}} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٢-١)$$

حيث $\Delta\text{ج} = \text{ج}_{\text{نهائية}} - \text{ج}_{\text{ابتدائية}}$.

فإذا أثرت قوة خارجية في شحنة ($\text{سـ}_{.}$)، ونقلتها بسرعة ثابتة من نقطة (أ) إلى نقطة (ب) ضمن مجال كهربائي كما في الشكل (٢-٢)، فإن الشغل ($\text{ش}_{\text{خ}}$) الذي تبذله القوة الخارجية يظهر على شكل تغير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة، أي أن:

$$(\text{ش}_{\text{خ}})_{\text{أ}\leftarrow\text{ب}} = \Delta\text{ط}_{\text{و}\,\text{أ}\leftarrow\text{ب}}$$



الشكل (٢-٢): حركة شحنة في مجال كهربائي بتأثير قوة خارجية.

وبالرجوع إلى العلاقة (٢-٢) فإن:

$$\text{ج}_{\text{نهائية}} - \text{ج}_{\text{ابتدائية}} = \frac{\Delta\text{ط}_{\text{و}}}{\text{سـ}_{.}} = \frac{\text{ش}_{\text{خ}}}{\text{سـ}_{.}}$$

وعليه يمكن التعبير عن شغل القوة الخارجية كما يأتي:

$$ش_{خ} = س.\,(جـ_{\text{نهائية}} - جـ_{\text{ابتدائية}}) \quad \text{......} \quad (٢-٣)$$

حيث ($ش_{خ}$) : الشغل الذي تبذله القوة الخارجية لنقل شحنة بسرعة ثابتة بين نقطتين في مجال كهربائي.

($س.$) : الشحنة الكهربائية المنقولة.

($جـ_{\text{نهائية}}$) : جهد النقطة النهائية التي نُقلت إليها الشحنة.

($جـ_{\text{ابتدائية}}$): جهد النقطة الابتدائية التي نُقلت منها الشحنة.

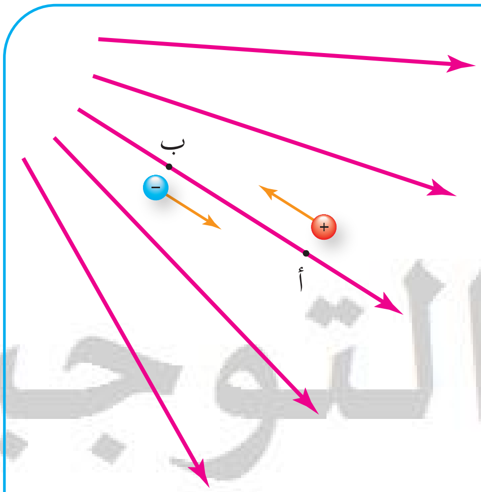
مثال (٢-١)

شحنة نقطية ($+٢\times١٠^{-٩}$) كولوم نقلت من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) في مجال كهربائي بسرعة ثابتة كما يبين الشكل (٢-٣)، فإذا بذلت القوة الخارجية شغلًا (١٤×١٠^{-٩} جول)

فاحسب:

١ فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين أ، وب ($جـ_{ب} - جـ_{أ}$)

٢ الشغل الذي تبذله قوة خارجية لنقل شحنة (-٢×١٠^{-٩}) كولوم من (ب) إلى (أ) بسرعة ثابتة.



الشكل (٢-٣): مثال (٢-١).

الحل:

١ لحساب فرق الجهد الكهربائي ($جـ_{ب} - جـ_{أ}$) نطبق العلاقة (٢-٣)، وبما أن الشحنة انتقلت من النقطة (أ) إلى النقطة (ب)، فإن:

$$ش_{أ\leftarrow ب} = س.\,(جـ_{ب} - جـ_{أ})$$

$$١٤\times١٠^{-٩} = ٢\times١٠^{-٩} \times (جـ_{ب} - جـ_{أ})$$

$$جـ_{ب} - جـ_{أ} = ٧ \text{ فولت.}$$

ويمكن التعبير عن فرق الجهد الكهربائي بالرمز ($جـ_{ب\,أ}$)، أي أن $جـ_{ب\,أ} = ٧$ فولت.

٢ لحساب الشغل اللازم لنقل شحنة كهربائية من النقطة (ب) إلى النقطة (أ):

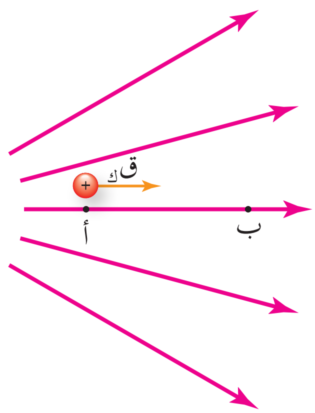
$$ش_{ب\leftarrow أ} = س.\,(جـ_{أب}) = -٢\times١٠^{-٩} \times -٧ = ١٤\times١٠^{-٩} \text{ جول}$$

حيث ($جـ_{ب\,أ} = -جـ_{أب}$).

لاحظ أننا تحدثنا عن حركة الشحنة تحت تأثير القوة الخارجية، ماذا يحدث إذا تركت الشحنة حرة؟

افترض أن شحنة موجبة (ـسـ.) وضعت عند النقطة (أ) في مجال كهربائي كما في الشكل (٢-٤)، وتركت حرة لتتحرك تحت تأثير القوة الكهربائية فقط، فإنها ستنتقل إلى النقطة (ب).

إن نظام (الشحنة الكهربائية – المجال الكهربائي) نظام محافظ، أي أن الطاقة الكلية الميكانيكية للنظام محفوظة:



الشكل (٢-٤): حركة شحنة في مجال كهربائي بتأثير القوة كهربائية فقط.

$$\Delta\text{ط}_{\text{م}} = \Delta\text{ط}_{\text{و}} + \Delta\text{ط}_{\text{ح}} = \text{صفرًا}$$

$$\Delta\text{ط}_{\text{ح}} = \Delta\text{ط}_{\text{و}}$$

تؤدي حركة الشحنة الحرة الموجبة تحت تأثير القوة الكهربائية فقط إلى نقصان طاقة الوضع الكهربائية المختزنة فيها، ويقابله زيادة مساوية في الطاقة الحركية، فالقوة الكهربائية تبذل شغلًا ($\text{ش}_{\text{ك}}$) على الشحنة تحول طاقة الوضع الكهربائية المختزنة فيها إلى طاقة حركية أي أن:

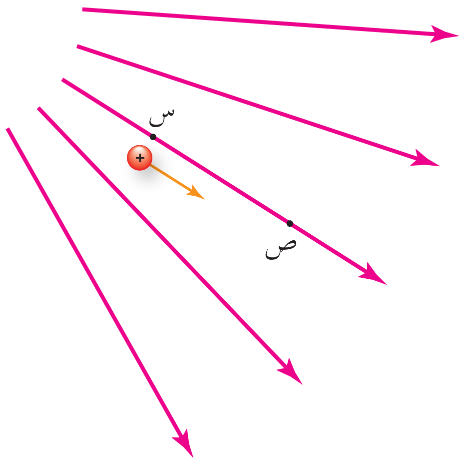
$$\text{ش}_{\text{ك}} = -\Delta\text{ط}_{\text{و}} = \Delta\text{ط}_{\text{ح}}$$

ويحدث الأمر نفسه عندما تتحرك شحنة سالبة في المجال الكهربائي من النقطة (ب) إلى النقطة (أ) تحت تأثير القوة الكهربائية فقط، فحركة الشحنة الحرة (موجبة أو سالبة) باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة فيها يؤدي إلى نقصان طاقة الوضع الكهربائية المختزنة فيها، ويقابله زيادة مساوية في طاقتها الحركية.

وبالرجوع إلى العلاقة (٢-٢)؛ ($\text{جـ}_{\text{نهائية}} - \text{جـ}_{\text{ابتدائية}} = \frac{\Delta\text{ط}_{\text{و}}}{\text{ـسـ}}$.)، يمكننا أن نعبر عن شغل القوة الكهربائية بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ش}_{\text{ك}} = -\text{ـسـ}.(\text{جـ}_{\text{نهائية}} - \text{جـ}_{\text{ابتدائية}}) \quad \text{.......................................} \quad (٢-٤)$$

مثال (٢-٢)



الشكل (٢-٥): مثال (٢-٢).

يبين الشكل (٢-٥) بروتونًا تحرك في مجال كهربائي تحت تأثير القوة الكهربائية من النقطة (س) إلى النقطة (ص)، فإذا بذلت القوة الكهربائية شغلًا (٨ × ١٠$^{-١٩}$جول) فاحسب فرق الجهد (جـ$_{ص س}$).

الحل:

١ لحساب فرق الجهد نطبق العلاقة (٢-٤):

ش$_{ك}$ = −ـــ. (جـ$_{نهائية}$ − جـ$_{ابتدائية}$)

وبما أن البروتون انتقل من النقطة (س) إلى النقطة (ص)، فإن:

ش$_{س ← ص}$ = −ـــ. (جـ$_{ص}$ − جـ$_{س}$)

٨×١٠$^{-١٩}$= −١,٦×١٠$^{-١٩}$ × (جـ$_{ص س}$)

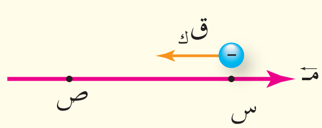
(جـ$_{ص س}$) = $\frac{-٨ × ١٠^{-١٩}}{١,٦ × ١٠^{-١٩}}$

(جـ$_{ص س}$) = −٥ فولت. والإشارة السالبة تعني أن جهد النقطة ص أقل من جهد النقطة س.

مراجعة (١-٢)

١ ماذا نعني بقولنا إن فرق الجهد بين نقطتين يساوي (٥) فولت.

٢ نقطتان (س)،(ص) ضمن مجال كهربائي. انظر الشكل (٢-٦)،



الشكل (٢-٦): سؤال (٢).

إذا كان (جـ$_{س ص}$ = −٥) فولت و(جـ$_{ص}$ = ٨) فولت فاحسب:

أ شغل القوة الخارجية لنقل بروتون من اللانهاية إلى النقطة (س) بسرعة ثابتة.

ب شغل القوة الكهربائية لنقل إلكترون من النقطة (س) إلى النقطة (ص).

جـ مقدار التغير في طاقة وضع الإلكترون والبروتون الكهربائية في الفرعين السابقين.

٢-٢ الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية
Electric Potential due to a Point Charge

يكون للجهد الكهربائي عند نقطة ما في مجال كهربائي قيمة محددة، فإذا كان مصدر المجال الكهربائي شحنة نقطية، فما العوامل التي يعتمد عليها الجهد الكهربائي عند نقطة في مجال تلك الشحنة؟

وجد تجريبيًا أن الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية (س) توضع في الهواء عند نقطة على بعد (ف) من الشحنة يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{جـ} = \text{أ}\,\frac{\text{س}}{\text{ف}} \quad \text{.......................} \quad (٢-٥)$$

ومن هذه العلاقة نلاحظ أن الجهد الكهربائي يعتمد على مقدار الشحنة المولدة للمجال الكهربائي (س) ونوعها، وبعد النقطة عن الشحنة المولدة للمجال الكهربائي (ف)، والسماحية الكهربائية للهواء.

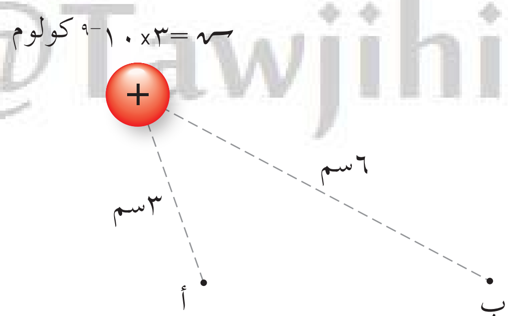
وقد تكون إشارة الجهد الكهربائي موجبة أو سالبة تبعًا لنوع الشحنة (س) المولّدة للمجال الكهربائي.

مثال (٢-٣)

يبين الشكل (٢-٧) شحنة نقطية (س) = +٣ نانوكولوم، ونقطتان (أ)، (ب) تبعدان عن الشحنة مسافة (٣)سم و (٦)سم على الترتيب:

١ جد فرق الجهد ($\text{جـ}_{\text{أب}}$)

٢ جد فرق الجهد ($\text{جـ}_{\text{أب}}$) إذا كانت (س) = -٣ نانوكولوم؟



الشكل (٢-٧): مثال (٢-٣).

الحل:

١ لحساب الجهد عند نقطة نستخدم العلاقة:

$$\text{جـ} = \text{أ}\,\frac{\text{س}}{\text{ف}}$$

$$= 9 \times 10^{9}\,\frac{3 \times 10^{-9}}{3 \times 10^{-2}}$$

$$\text{جـ}_{\text{أ}} = 900 \text{ فولت}$$

$$\text{جـ}_{\text{ب}} = 9 \times 10^{9}\,\frac{3 \times 10^{-9}}{6 \times 10^{-2}}$$

$$= 450 \text{ فولت}$$

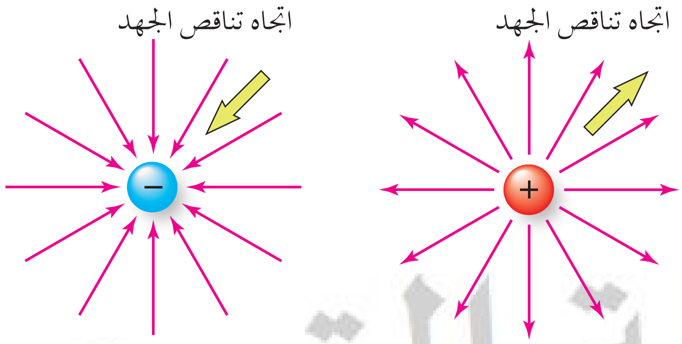
جـ$_{أب}$ = ٩٠٠ − ٤٥٠ = +٤٥٠ فولت. (أي أن جـ$_{أ}$ > جـ$_{ب}$)

٢) إذا كانت الشحنة المولدة للمجال سالبة فإن الجهد الكهربائي عند كل من النقطتين سالب:

جـ$_{أ}$ = −٩٠٠ فولت، جـ$_{ب}$ = −٤٥٠ فولت.

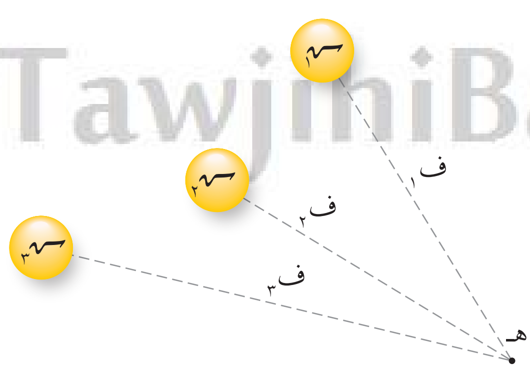
جـ$_{أب}$ = −٩٠٠ −(−٤٥٠) = −٤٥٠ فولت (أي أن جـ$_{أ}$ < جـ$_{ب}$).

لاحظ أن إشارة الجهد تساعدنا على ترتيب النقاط من الأقل جهدًا إلى الأعلى جهدًا، كما أن **اتجاه المجال الكهربائي يكون دائمًا باتجاه تناقص الجهد الكهربائي. انظر الشكل (٢–٨).**



الشكل (٢–٨): العلاقة بين تغير الجهد الكهربائي واتجاه خطوط المجال الكهربائي.

ماذا يحدث إذا كانت النقطة المراد حساب الجهد الكهربائي عندها واقعة بالقرب من شحنات نقطية عدة؟



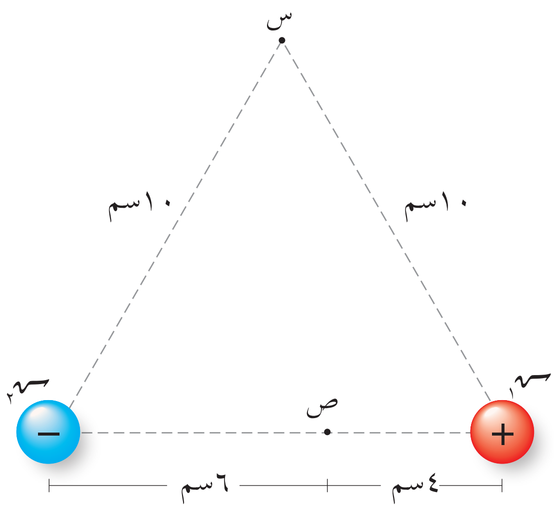
الشكل (٢–٩) : الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية عدة.

بما أن الجهد الكهربائي كمية قياسية فإن الجهد الكهربائي عند نقطة مثل (هـ) في الشكل (٢–٩)؛ هو المجموع الجبري للجهود الناتجة عن كل هذه الشحنات، أي أن:

جـ = جـ$_{١}$ + جـ$_{٢}$ + جـ$_{٣}$ + ...

$$جـ = أ \left(\frac{ش_{١}}{ف_{١}} + \frac{ش_{٢}}{ف_{٢}} + \frac{ش_{٣}}{ف_{٣}} + \dots \right) \quad .... (٢–٦)$$

مثال (٢-٤)



الشكل (٢-١٠): مثال (٢-٤).

يبين الشكل (٢-١٠) شحنتين نقطيتين موضوعتين في الهواء ($ش_{١}=٤$، $ش_{٢}=-٤$) ميكروكولوم. معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل احسب جهد كل من النقطتين (س)، (ص).

الحل:

$$جـ_{س} = جـ_{١} + جـ_{٢}$$

$$جـ_{س} = أ\left(\frac{ش_{١}}{ف_{١}} + \frac{ش_{٢}}{ف_{٢}}\right)$$

$$جـ_{س} = ٩\times١٠^{٩}\left(\frac{٤\times١٠^{-٦}}{١٠\times١٠^{-٢}} + \frac{-٤\times١٠^{-٦}}{١٠\times١٠^{-٢}}\right) = \text{صفرًا}$$

وهذا يعني أن طاقة الوضع الكهربائية لوحدة الشحنات عند النقطة (س) تساوي صفرًا؛ فلا يلزم بذل شغل لنقل الشحنة من اللانهاية ($جـ_{\infty}$) إلى النقطة س.

$$جـ_{ص} = جـ_{١} + جـ_{٢}$$

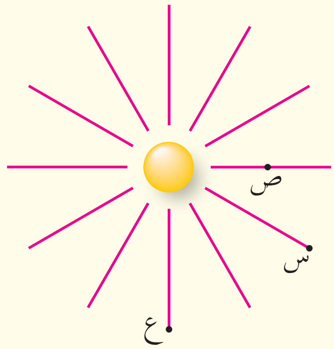
$$جـ_{ص} = أ\left(\frac{ش_{١}}{ف_{١}} + \frac{ش_{٢}}{ف_{٢}}\right)$$

$$= ٩\times١٠^{٩}\left(\frac{٤\times١٠^{-٦}}{٤\times١٠^{-٢}} + \frac{-٤\times١٠^{-٦}}{٦\times١٠^{-٢}}\right)$$

$$جـ_{ص} = ٩\times١٠^{٩}\times١٠^{-٦}\times١٠^{٢}\left(١ - \frac{٢}{٢}\right)$$

$$جـ_{ص} = ٣\times١٠^{٥}\ \text{فولت.}$$

مراجعة (٢-٢)



الشكل (٢-١١): سؤال (١).

١ يبين الشكل (٢-١١) ثلاث نقاط (س، ص، ع) تقع ضمن المجال الكهربائي لشحنة نقطية، بُعد النقطة (س) عن الشحنة يساوي بُعد النقطة (ع). و(جـ$_{\text{س ص}}$ = ٣ فولت). أجب عما يأتي:

أ أي النقطتين(س، ص) الجهد عندها أعلى؟

ب ما نوع الشحنة المولدة للمجال الكهربائي؟

جـ حدد اتجاه خطوط المجال الكهربائي؟

د قارن بين (جـ$_{\text{س ص}}$) و(جـ$_{\text{ص ع}}$).

الشكل (٢-١٢): سؤال (٢).

٢ يبين الشكل (٢-١٢) نقطة (س) تقع بين شحنتين نقطيتين وعلى الخط الواصل بينهما، إذا كانت (ســ١) موجبة و(جـ$_{\text{س}}$ = صفر). فأجب عما يأتي:

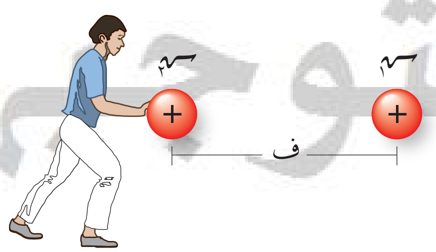
أ ما نوع الشحنة (ســ٢)؟

ب أيهما أكبر مقدارًا (ســ١) أم (ســ٢) ؟

٢–٣ طاقة الوضع الكهربائية لنظام يتألف من شحنتين نقطيتين
The Potential Energy of a System of Two Point Charges

عندما تكون شحنة نقطية في مجال كهربائي خارجي فإنهما يشكلان نظامًا واحدًا، وتعلمت أن تحسب طاقة الوضع الكهربائية للشحنة ضمن هذا النظام، ويمكننا حساب طاقة الوضع الكهربائية لأي نظام يتألف من توزيع من الشحنات، وستقتصر دراستنا على حساب طاقة الوضع الكهربائية لنظام مكون من شحنتين نقطيتين، ولتشكيل نظام مكون من شحنتين موجبتين(س_1، س_2) بعيدتين جدًّا عن بعضهما؛ فإنهما تنقلان من اللانهاية إلى منطقة يكون البعد بينهما(ف).

إن نقل الشحنة الأولى (س_1) لا يتطلب بذل شغل لأنها منقولة إلى منطقة لا يوجد فيها مجال كهربائي، أما نقل الشحنة الثانية (س_2) من اللانهاية إلى نقطة على بعد (ف) من الشحنة (س_1) بسرعة ثابتة فيتطلب التأثير بقوة خارجية تبذل شغلًا كما في الشكل(٢–١٣)، لأنها ستدخل مجالًا كهربائيًا، ويحسب الشغل من العلاقة (٢–٤):



الشكل (٢–١٣): بناء نظام من شحنتين نقطيتين موجبتين.

$$\text{ش}_{\text{خ}} = \text{س} \,.\, (\text{ج}_{\text{نهائية}} - \text{ج}_{\text{ابتدائية}})$$

وبما أن الشحنة (س_2) نقلت من اللانهاية حيث ($\text{ج}_\infty = ٠$) إلى نقطة في المجال الكهربائي للشحنة (س_1)، فإن:

$$\text{ش}_{\text{خ}\ \infty \leftarrow \text{النقطة}} = \text{س}_2\ (\text{ج}_{\text{النقطة}} - \text{ج}_\infty) = \text{س}_2\ \text{ج}$$

حيث (ج): جهد نقطة في مجال الشحنة (س_1)، ويحسب من العلاقة (٢–٥):

$$\text{ج} = \text{أ} \frac{\text{س}_1}{\text{ف}}$$

لذا فإن:

$$\text{ش}_{\text{خ}} = \text{أ} \frac{\text{س}_1}{\text{ف}} \text{س}_2 \,.$$

ويمثل الشغل في هذه الحالة طاقة الوضع الكهربائية المنقولة إلى النظام، ويمكننا القول إن طاقة الوضع الكهربائية لنظام يتألف من شحنتين موضوعتين في الهواء وتفصل بينهما مسافة (ف) يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ط}_{\text{و}} = \text{أ} \frac{\text{س}_1}{\text{ف}} \text{س}_2 \quad \text{.................} \quad (٢\text{–}٧)$$

إذا كانت الشحنتان متشابهتين في النوع فإن طاقة الوضع للنظام تكون موجبة؛ فالشحنتان

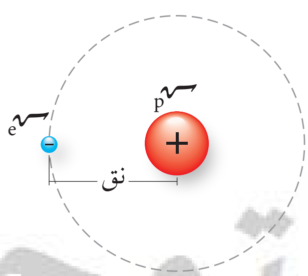
كانتا بعيدتين جدًّا، وتقريبهما على بعد (ف) بسرعة ثابتة يتطلب التأثير بقوة خارجية في إحداهما فتبذل شغلًا للتغلب على قوة التنافر الكهربائية، وهذا الشغل ظهر على شكل زيادة في طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في النظام.

أما إذا كانت الشحنتان مختلفتين في النوع فإن طاقة الوضع الكهربائية للنظام تكون سالبة؛ فالشحنتان كانتا بعيدتين جدًّا، وتقريبهما على بعد (ف) بسرعة ثابتة يتطلّب قوة خارجية تؤثر في إحداهما بعكس اتجاه قوة التجاذب الكهربائية، فتبذل القوة الخارجية شغلًا سالبًا يسحب طاقة من النظام.

مثال (٢-٥)

يفصل بين الإلكترون والبروتون في ذرة الهيدروجين مسافة ($٥,٢٩ \times ١٠^{-١١}$) م تقريبًا. انظر الشكل (٢-١٤).

احسب طاقة الوضع الكهربائية لذرة الهيدروجين.



الشكل (٢-١٤): مثال (٢-٥).

الحل:

باستخدام العلاقة: $ط_و = أ \frac{ش_١}{ف} ش_٢$

بما أن شحنة الإلكترون تساوي شحنة البروتون، فإنه يمكن التعبير عن طاقة الوضع بما يأتي:

$$ط_و = -أ \frac{ش_e^{٢}}{ف}$$

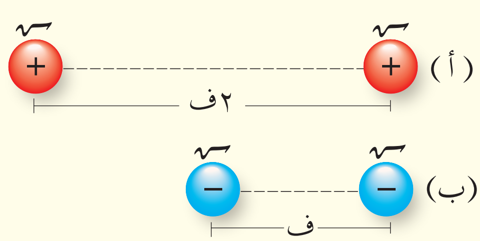
$$= \frac{-٩ \times ١٠^{٩} \times (١,٦ \times ١٠^{-١٩})^{٢}}{٥,٢٩ \times ١٠^{-١١}}$$

$ط_و = -٤,٣٦ \times ١٠^{-١٨}$ جول.

مراجعة (٢-٣)

١ نظام يتألف من شحنتين نقطيتين سالبتين طاقة وضعه الكهربائية موجبة، فما تفسير ذلك؟

٢ معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (٢-١٥) والذي يبين نظامين للشحنات (أ، ب)، قارن بين مقدار طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في كل نظام.



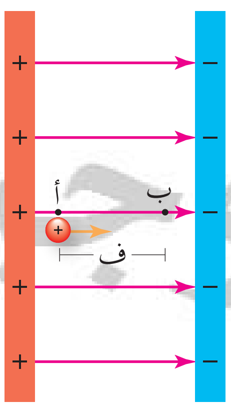
الشكل (٢-١٥): سؤال (٢).

٢–٤ فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم

Potential Difference in a Uniform Electric Field

تناولنا في ما سبق كيفية حساب الجهد الكهربائي الناشئ عن الشحنات النقطية. ماذا يحدث إذا تغير مصدر المجال الكهربائي ليصبح صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في النوع؟ سنحصل عندئذ على مجال كهربائي منتظم بإهمال تأثير الأطراف، فكيف يمكن حساب فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم؟

يبين الشكل(٢–١٦) شحنة موجبة وضعت ضمن مجال كهربائي منتظم (مـ)، فتحركت بفعل القوة الكهربائية ($ق_{ك}$)، وقطعت إزاحة (ف) من النقطة (أ) إلى النقطة (ب). تبذل القوة الكهربائية شغلًا يمكن أن نعبر عنه بالعلاقة:



الشكل (٢–١٦) : فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.

$$ش_{ك\,أ\leftarrow ب} = \overleftarrow{ق}_{ك} \cdot \overleftarrow{ف}_{أ\leftarrow ب}$$

وبتعويض $(\overleftarrow{ق}_{ك} = \overleftarrow{مـ}\,س.)$ فإن:

$$ش_{ك\,أ\leftarrow ب} = س. \,(\overleftarrow{مـ} \cdot \overleftarrow{ف}_{أ\leftarrow ب})$$

$$= س. \,مـ\, ف_{أ\leftarrow ب}\, جتا\,\theta$$

ومن العلاقة (٢–٤) فإن:

$$ش_{ك\,أ\leftarrow ب} = -س. \,(جـ_{ب} - جـ_{أ})$$

أي أن :

$$-س. \,(جـ_{ب} - جـ_{أ}) = س. \,مـ\, ف_{أ\leftarrow ب}\, جتا\,\theta$$

وباختصار(س.) من الطرفين: $-(جـ_{ب} - جـ_{أ}) = مـ\, ف_{أ\leftarrow ب}\, جتا\,\theta$

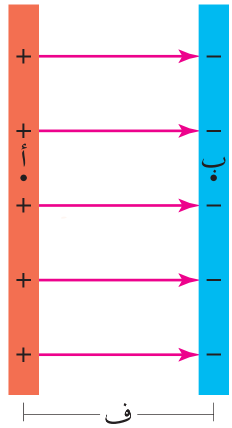
أي أن :

$$جـ_{أب} = مـ\, ف_{أ\leftarrow ب}\, جتا\,\theta \quad \text{.......... (٢–٨)}$$

وتستخدم هذه العلاقة لحساب فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.

حيث (مـ): مقدار المجال الكهربائي المنتظم، و($ف_{أ\leftarrow ب}$): الإزاحة من (أ) إلى (ب)، و(θ): الزاوية المحصورة بين اتجاهي المجال الكهربائي والإزاحة؛ ($٠ \le \theta \le ١٨٠$).

وبتطبيق العلاقة (٢-٨) يمكننا حساب فرق الجهد بين صفيحتين مشحونتين كما في الشكل (٢-١٧)، فإذا كان البعد بين الصفيحتين (ف)، وكانت (أ) نقطة تقع على الصفيحة الموجبة و(ب) نقطة تقع على الصفيحة السالبة، فإن ($\text{جـ}_{\text{أب}}$) في هذه الحالة يساوي **فرق الجهد بين الصفيحتين**، ويرمز له بالرمز (جـ). أي أن:



الشكل (٢-١٧): فرق الجهد بين صفيحتين متوازيتين.

$$\text{جـ}_{\text{أب}} = \text{مـ ف}_{\text{أ}\leftarrow\text{ب}}\ \text{جتا}\,\theta$$

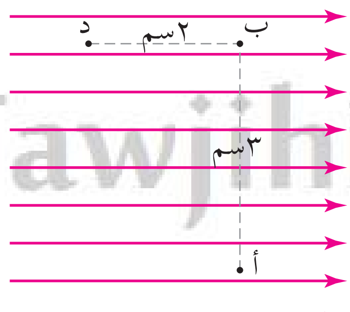
$$\text{جـ} = \text{مـ ف جتا}\ ٠$$

$$\text{جـ} = \text{مـ ف} \quad .... \quad (٢-٩)$$

وبالاعتماد على هذه العلاقة يمكن القول إن المجال الكهربائي ($\text{مـ} = \frac{\text{جـ}}{\text{ف}}$) مقياس للتغير في الجهد مع تغير الموقع.

مثال (٢-٦)

يبين الشكل (٢-١٨) ثلاث نقاط (أ، ب، د) ضمن مجال كهربائي منتظم مقداره ($١٠^{٣}$) نيوتن/ كولوم. معتمدًا على الشكل، احسب: ($\text{جـ}_{\text{ب د}}$)، ($\text{جـ}_{\text{أب}}$).



الشكل (٢-١٨): مثال (٢-٦).

الحل:

١) لحساب ($\text{جـ}_{\text{ب د}}$) نطبق العلاقة:

$$\text{جـ}_{\text{ب د}} = \text{مـ ف}_{\text{ب}\leftarrow\text{د}}\ \text{جتا}\,\theta$$

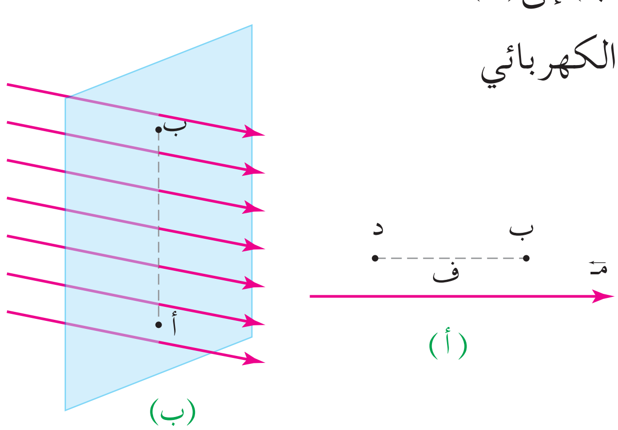
ويبين الشكل (٢-١٩/أ)، أن اتجاه الإزاحة من (ب) إلى (د)، وأن الزاوية بين اتجاهي الإزاحة والمجال الكهربائي المنتظم (θ) = ١٨٠.

$$\text{جـ}_{\text{ب د}} = ١٠^{٣} \times ٢ \times ١٠^{-٢} \times \text{جتا}\ ١٨٠$$

$$= -٢٠ \text{ فولت.}$$

٢) $\text{جـ}_{\text{أب}} = \text{مـ ف}_{\text{أ}\leftarrow\text{ب}}\ \text{جتا}\,\theta$.

$$\text{جـ}_{\text{أب}} = ١٠^{٣} \times ٣ \times ١٠^{-٢} \times \text{جتا}\ ٩٠ = ٠$$



الشكل (٢-١٩): مثال (٢-٦).

جـ$_{أ}$ − جـ$_{ب}$ = صفر . أي أن جـ$_{أ}$ = جـ$_{ب}$.

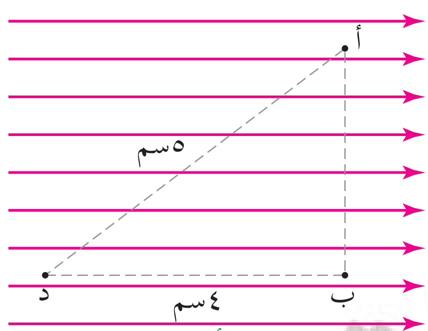
والنقاط جميعها الواقعة على الخط الواصل بين النقطتين (أ) و(ب) متساوية في الجهد، ويسمى السطح الذي تقع عليه هذه النقاط سطح تساوي جهد. لاحظ الشكل (٢-١٩/ب)، وسنبحث في سطوح تساوي الجهد لاحقًا.

مثال (٢-٧)

يبين الشكل (٢-٢٠/أ) ثلاث نقاط (أ، ب، د) في مجال كهربائي منتظم مقداره (٢×١٠^{٢}) نيوتن/ كولوم. معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل احسب (جـ أ د):

١ عبر المسار (أ ⟸ د).

٢ عبر المسار (أ ⟸ ب ⟸ د).



(أ)

الشكل (٢-٢٠): مثال (٢-٧).

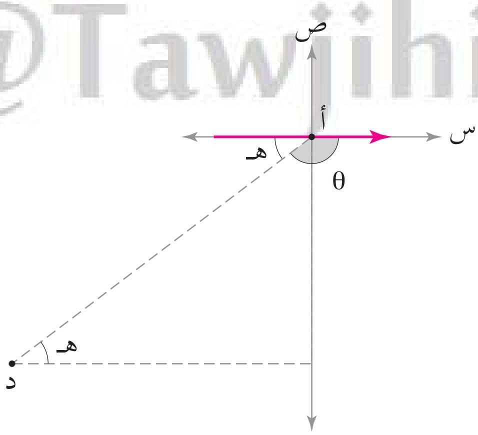
الحل:

١ لحساب فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين (أ، د) عبر المسار أ ⟸ د:

جـ$_{أد}$ = − مـ ف$_{أ←د}$ جتاθ، حيث جتا θ = − جتا هـ = − $\frac{٤}{٥}$ لاحظ الشكل (٢-٢٠/ب).

= − ٢×١٠^{٢} × ٥ × ١٠$^{-٢}$ × $\frac{٤}{٥}$

جـ$_{أد}$ = −٨ فولت.



(ب)

٢ لحساب فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين (أ، د)

عبر المسار أ ⟸ ب ⟸ د:

جـ$_{أد}$ = جـ$_{أب}$ + جـ$_{بد}$

جـ$_{أد}$ = مـ ف$_{أب}$ جتا٩٠ + مـ ف$_{بد}$ جتا١٨٠

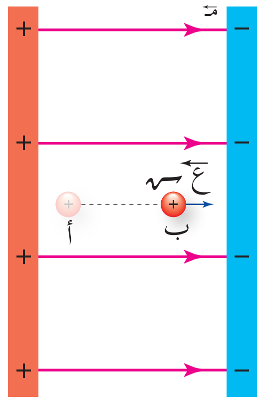
= ٠ + ٢ × ١٠^{٢} × ٤ × ١٠$^{-٢}$ × −١

جـ$_{أد}$ = −٨ فولت.

نستنتج مما سبق أن فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم ثابت ولا يعتمد على المسار، وهذا يعود إلى أن القوة الكهربائية هي قوة محافظة، والشغل الناتج عنها لا يعتمد على المسار.

مثال (٢-٨)

تحرك بروتون شحنته (س.) وكتلته (ك) من السكون من النقطة (أ) عند الصفيحة الموجبة إلى النقطة (ب) عند الصفيحة السالبة في الحيز بين صفيحتين كما في الشكل (٢-٢١). إذا كان فرق الجهد بين الصفيحتين (جـ)، فأثبت أن سرعة البروتون بعد قطعه الإزاحة بين الصفيحتين تعطى بالعلاقة الآتية: $\text{ع} = \sqrt{\dfrac{2\ \text{س}.\ \text{جـ}}{\text{ك}}}$



الشكل (٢-٢١): مثال (٢-٨).

الحل:

تتحرك الشحنة تحت تأثير القوة الكهربائية، ويحسب شغل ($\text{ق}_\text{ك}$) من العلاقة:

$$\text{ش}_{\text{ك}\ \text{أ}\leftarrow\text{ب}} = -\text{س}.\ (\text{جـ}_\text{ب} - \text{جـ}_\text{أ})$$

وبما أن النظام محافظ فإن: $\text{ش}_\text{ك} = \Delta\ \text{ط}_\text{ح} = \text{ط}_{\text{ح}\ \text{ب}} - \text{ط}_{\text{ح}\ \text{أ}}$

ولأن الشحنة تحركت من السكون فإن: $-\text{س}.\ (\text{جـ}_\text{ب} - \text{جـ}_\text{أ}) = \text{ط}_{\text{ح}\ \text{ب}} - 0$

وبتعويض $\text{ط}_\text{ح} = \frac{1}{2}\ \text{ك}\ \text{ع}^2$ وبإعادة ترتيب الحدود:

$$\text{س}.\ (\text{جـ}_\text{أ} - \text{جـ}_\text{ب}) = \frac{1}{2}\ \text{ك}\ \text{ع}_\text{ب}^2$$

$$\text{ع}^2 = \frac{2\ \text{س}.\ \text{جـ}_{\text{أب}}}{\text{ك}}$$

$$\text{ع} = \sqrt{\frac{2\ \text{س}.\ \text{جـ}}{\text{ك}}}$$

بتطبيق هذه العلاقة يمكننا أن نحسب سرعة الجسيمات الذرية المتحركة عبر فرق جهد كهربائي عالٍ، حيث تتحرك هذه الجسيمات بسرعة كبيرة يصعب قياسها عمليًا.

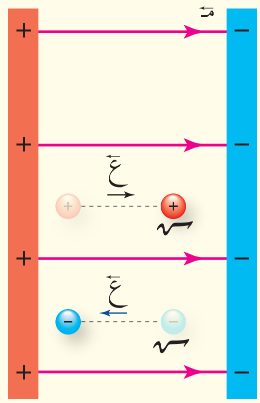
مراجعة (٢-٤)

١ يقاس المجال الكهربائي بوحدة (نيوتن/ كولوم) وتبين المعادلة ($م = \frac{ق}{ش}$) أن وحدة قياس المجال الكهربائي (فولت/م). أثبت أن الوحدتين متكافئتان.

٢ تحرك إلكترون وبروتون من السكون داخل مجال كهربائي منتظم باتجاهين متعاكسين كما هو مبين في الشكل (٢-٢٢)، فقطع كل منهما الإزاحة نفسها، إذا علمت أن كتلة الإلكترون تعادل $\frac{١}{١٨٤٠}$ من كتلة البروتون تقريبًا، فقارن بين:

أ سرعة الإلكترون وسرعة البروتون.

ب الطاقة الحركية لكل منهما.



الشكل (٢-٢٢): سؤال (٢-٨).

٢–٥ سطوح تساوي الجهد

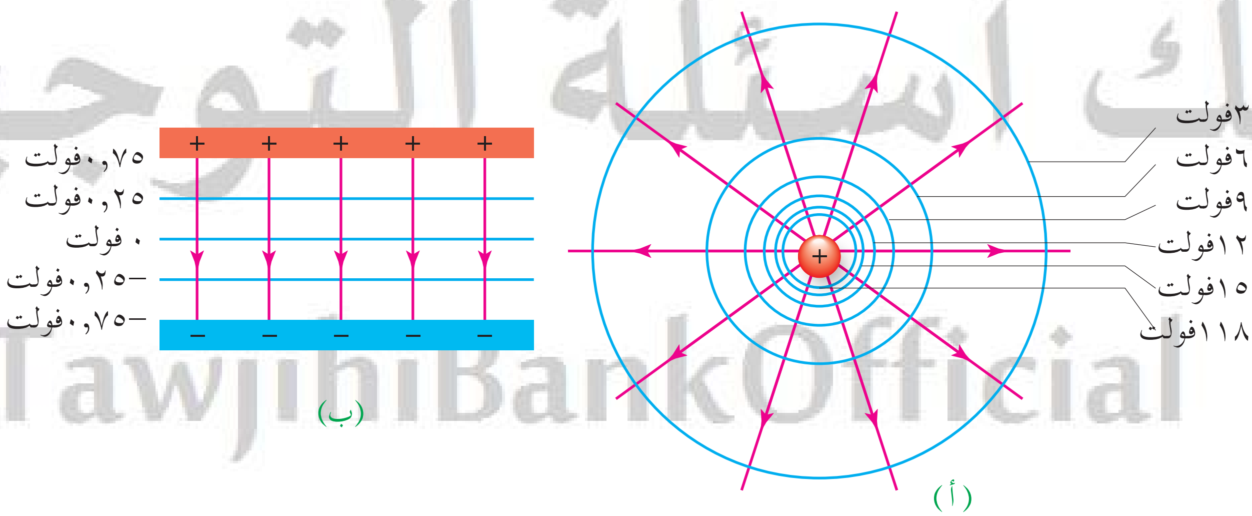
Equipotential Surfaces

يسمى السطح الذي يكون الجهد عند نقاطه جميعها متساويًا ويساوي قيمة ثابتة سطح تساوي الجهد.
وسطوح تساوي الجهد تسهم في فهم توزيع قيم الجهد وتصورها حول شحنة أو توزيع من الشحنات.

نشاط (٢-١) سطوح تساوي الجهد

الهدف: وصف سطوح تساوي الجهد لموصلات مختلفة مشحونة.

يبين الشكل (٢–٢٣) سطوح تساوي الجهد، لشحنة نقطية كما في الشكل (٢–٢٣/ أ)، وسطوح تساوي الجهد في الحيز بين صفيحتين متوازيتين كما يبين الشكل (٢–٢٣/ ب). ادرس الشكل وأجب عن الأسئلة الآتية:



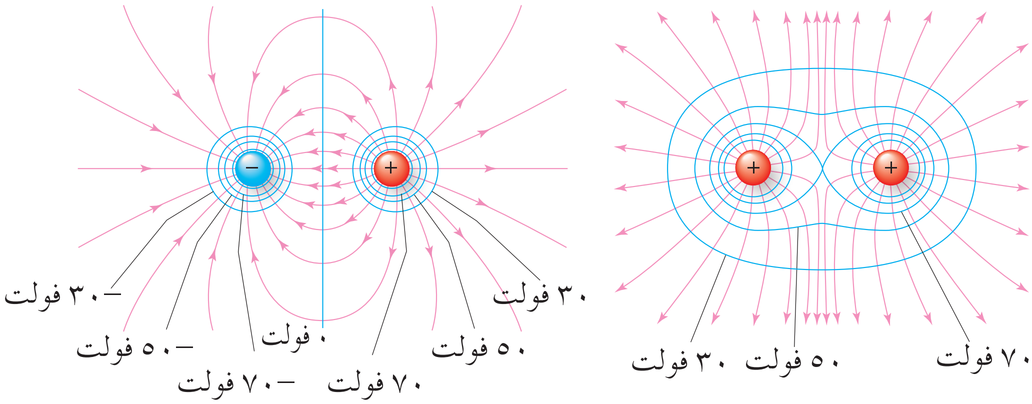
الشكل (٢–٢٣): سطوح تساوي الجهد.

١) صف سطوح تساوي الجهد في الشكلين.

٢) في أي منطقة تتقارب سطوح تساوي الجهد، أبعيدًا عن الشحنة أم بالقرب منها؟

لعلك تلاحظ أن سطوح تساوي الجهد للشحنة النقطية تبدو كروية الشكل، وتكون أكثر تقاربًا بالقرب من الشحنة؛ لأن المجال الكهربائي للشحنة النقطية مجال غير منتظم، يقل كلما ابتعدنا عن الشحنة وحيثما تقاربت سطوح تساوي الجهد دل ذلك على قيمة كبيرة للمجال الكهربائي. أما سطوح تساوي الجهد في الحيز بين الصفيحتين فتظهر متوازية والمسافات بينها

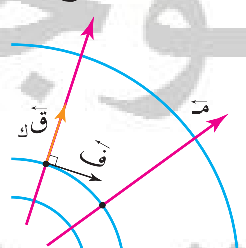
متساوية لتدل على أن المجال الكهربائي منتظم. ويمكن رسم سطوح تساوي الجهد لأي توزيع من الشحنات الكهربائية، انظر الشكل(٢-٢٤).



الشكل (٢-٢٤): سطوح تساوي الجهد لتوزيع من الشحنات الكهربائية.

وبما أنه لا يوجد فرق في الجهد الكهربائي بين أي نقطتين واقعتين على سطح تساوي الجهد فإنه لا يلزم بذل شغل لنقل شحنة على سطح تساوي الجهد. وعليه تكون سطوح تساوي الجهد دائمًا عمودية على خطوط المجال الكهربائي، انظر الشكل (٢-٢٥)؛ ويمكن إثبات ذلك من العلاقة: ش = ق ف جتاθ

بما أن ش$_{ك}$ = صفر، فإن جتاθ = صفر، ويكون ذلك صحيحًا عندما (θ = ٩٠°)؛ أي عندما يتعامد اتجاه الإزاحة مع اتجاه القوة الكهربائية التي تكون باتجاه المجال الكهربائي.



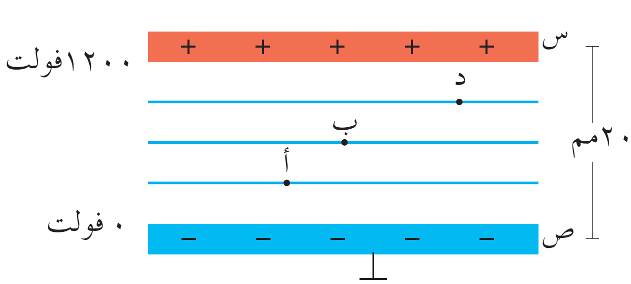
الشكل (٢-٢٥): خطوط المجال عمودية على سطوح تساوي الجهد.

مثال (٢-٩)

صفيحتان موصلتان متوازيتان شحنت الصفيحة (س) بشحنة موجبة، ووصلت الصفيحة (ص) بالأرض فشحنت بالحث بشحنة سالبة، والشكل(٢-٢٦) يبين سطوح تساوي الجهد في الحيز بين الصفيحتين. احسب:

١) المجال الكهربائي بين الصفيحتين مقدارًا واتجاهًا.

٢) الجهد الكهربائي عند النقاط (أ، ب، د).



الشكل (٢-٢٧): مثال (٢-٩).

الحل:

١ لحساب المجال الكهربائي نطبق العلاقة (٢-٩): جـ = مـ ف .

وبما أن الصفيحة (ب) تتصل بالأرض، فإن جهدها يساوي صفرًا. ويكون فرق الجهد بين الصفيحتين

جـ = ١٢٠٠ − ٠ = ١٢٠٠ فولت .

$$\text{مـ} = \frac{\text{جـ}}{\text{ف}} = \frac{١٢٠٠}{٢٠ \times ١٠^{-٣}} = ٦ \times ١٠^{٤} \text{ فولت/م}$$

ويكون اتجاه المجال الكهربائي نحو المحور الصادي السالب؛ أي من الصفيحة الموجبة إلى الصفيحة السالبة.

٢ بما أن المجال الكهربائي بين الصفيحتين منتظم فالمسافات بين سطوح تساوي الجهد متساوية؛ وعليه فإن:

- $\text{ف}_{\text{أ}} = \frac{\text{ف}}{٤} \Leftarrow \text{ف}_{\text{أ}} = \frac{٢٠}{٤} \Leftarrow \text{ف}_{\text{أ}} = ٥\text{مم}$

$\text{جـ}_{\text{أص}} = \text{مـ} \times \text{ف}_{\text{أص}}$

$\text{جـ}_{\text{أ}} - ٠ = \text{مـ} \times \text{ف}_{\text{أص}} \Leftarrow \text{جـ}_{\text{أ}} = ٦ \times ١٠^{٤} \times (٥ - ٠) \times ١٠^{-٣} \Leftarrow \text{جـ}_{\text{أ}} = ٣٠٠$ فولت.

- $\text{ف}_{\text{ب}} = \text{ف}_{\text{أ}} + ٥ \Leftarrow \text{ف}_{\text{ب}} = ١٠\text{مم}$

$\text{جـ}_{\text{ب ص}} = \text{مـ} \times \text{ف}_{\text{ب ص}}$

$\text{جـ}_{\text{ب}} - ٠ = \text{مـ} \times \text{ف}_{\text{ب ص}} \Leftarrow \text{جـ}_{\text{ب}} = ٦ \times ١٠^{٤} \times (١٠ - ٠) \times ١٠^{-٣} \Leftarrow \text{جـ}_{\text{ب}} = ٦٠٠$ فولت.

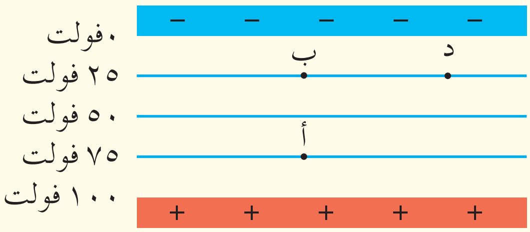
- $\text{ف}_{\text{د}} = \text{ف}_{\text{أ}} + ١٠ \Leftarrow \text{ف}_{\text{د}} = ١٥\text{مم}$

$\text{جـ}_{\text{دص}} = \text{مـ} \times \text{ف}_{\text{دص}}$

$\text{جـ}_{\text{د}} - ٠ = \text{مـ} \times \text{ف}_{\text{دص}} \Leftarrow \text{جـ}_{\text{د}} = ٦ \times ١٠^{٤} \times (١٥ - ٠) \times ١٠^{-٣} \Leftarrow \text{جـ}_{\text{د}} = ٩٠٠$ فولت.

مراجعة (٢-٥)

١ يبين الشكل (٢-٢٧) سطوح تساوي الجهد في الحيز بين صفيحتين موصلتين متوازيتين. احسب:

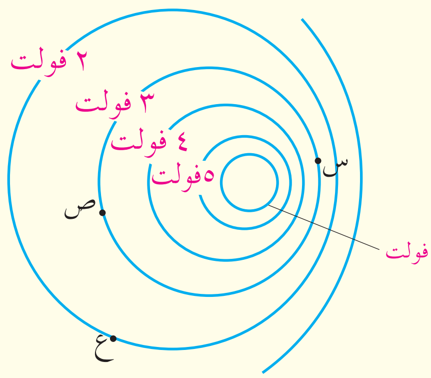


الشكل (٢-٢٨): سؤال (١).

أ فرق الجهد (جـ$_{\text{أب}}$).

ب شغل القوة الكهربائية المبذول عند نقل شحنة (٢) نانوكولوم من (ب) إلى (د).

٢ يبين الشكل (٢-٢٨) سطوح تساوي الجهد لتوزيع من الشحنات الكهربائية. معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل أجب عما يأتي:



الشكل (٢-٢٩): سؤال (٢).

أ هل الجهد عند النقطة (س) يساوي الجهد عند النقطة (ص) ؟ فسر إجابتك.

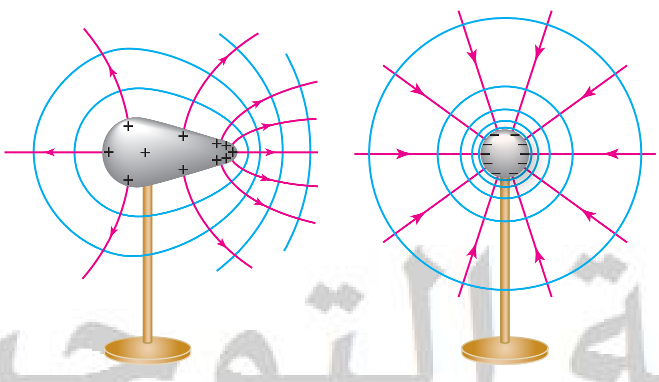
ب قارن بين مقدار المجال الكهربائي عند النقطتين (س) و(ص) مفسرًا إجابتك.

جـ احسب الشغل اللازم لنقل بروتون من النقطة (ع) إلى النقطة (ص) بسرعة ثابتة.

الجهد الكهربائي لموصل مشحون

Electric Potential due to a Charged Conductor

عند شحن موصل (كرة مثلًا) فإن الشحنات تتنافر وتتباعد، ويسمح لها الموصل بالانتقال لتستقر على سطحه الخارجي فقط، حيث تكون متباعدة أكثر ما يمكن. وللموصلات المشحونة مجالٌ كهربائيٌّ في الحيز المحيط بها يعتمد على شكل الموصل، ويبين الشكل(٢-٢٩) خطوط المجال الكهربائي وسطوح تساوي الجهد لموصلين مختلفين. أن الشحنات تتوزع على سطح الموصل الكروي بانتظام؛ إذ إن سطحه منتظم، لاحظ الشكل (٢-٢٩/أ)، بينما يكون توزيع الشحنات غير منتظم على سطح الموصل المبين في الشكل (٢-٢٩/ ب)؛ إذ تتباعد الشحنات عن بعضها قدر المتاح، وقد وجد تجريبيًا أن الكثافة السطحية للشحنة تكون أكبر عند الرؤوس المدببة مقارنة بالسطوح الأخرى.

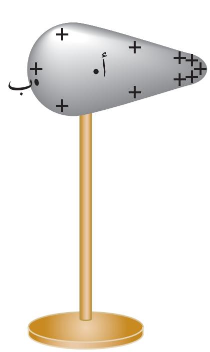


الشكل (٢-٢٩): خطوط المجال الكهربائي وسطوح تساوي الجهد للموصلات المشحونة.

وبما أن الشحنات على سطح الموصل مستقرة وساكنة، فإن الشحنات في حالة اتزان، أي أن محصلة القوى (المجالات المماسية) تكون صفرًا وبذلك يكون فرق الجهد الكهربائي بين أي نقطتين صفرًا، وجميع النقاط الواقعة على سطح الموصل متساوية في الجهد؛ **لذا يعد سطح الموصل المشحون سطح تساوي جهد.**

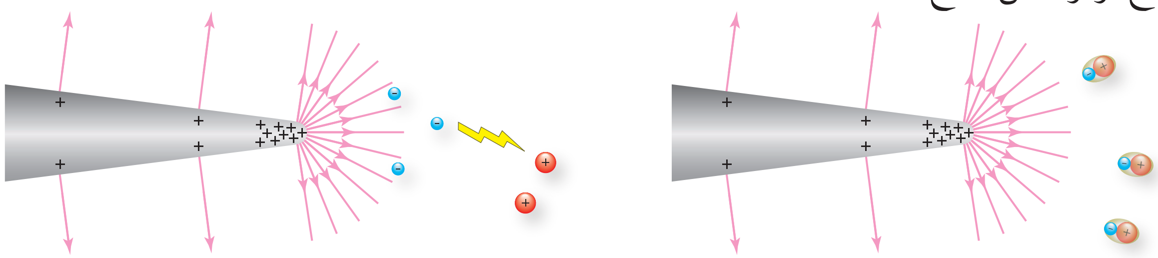
ماذا عن الجهد داخل الموصل؟ هل يوجد فرق في الجهد بين داخل الموصل وسطحه؟

أثبت العالم غاوس أن الشحنات تستقر على السطح الخارجي للموصل؛ ما يجعل المجال الكهربائي داخله صفرًا، وإذا كان المجال الكهربائي في منطقة ما صفرًا (مـ=٠)، فإنه لا يلزم بذل شغل لنقل شحنة بين نقطتين ضمن تلك المنطقة، ففي الشكل(٢-٣٠) إذا كانت (أ) نقطة داخل الموصل و(ب) نقطة على سطحه فإن ($ش_{أ←ب}$ = ٠)؛ لذلك يكون فرق الجهد بين النقطتين صفرًا. **وهذا يعني أن الجهد عند أي نقطة داخل الموصل ثابت، ويساوي قيمته عند سطح الموصل.**



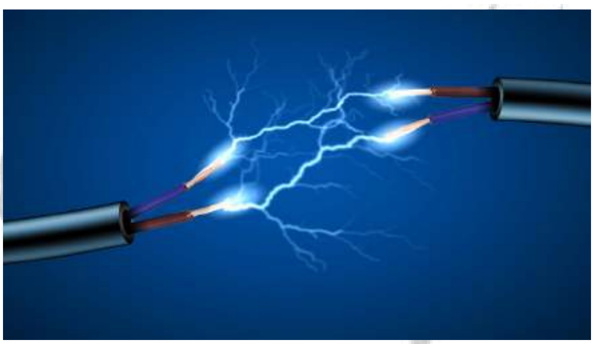
الشكل (٢-٣٠): الجهد داخل الموصل يساوي الجهد على سطحه.

وتحدث ظاهرة بالقرب من الموصلات ذات الجهد الكهربائي العالي أو بالقرب من الرؤوس المدببة؛ إذ يتولد حول الرأس المدبب مجال كهربائي قوي يعمل على تأيين جزيئات الهواء في تلك المنطقة، لاحظ الشكل (٢-٣١)، فيصبح الهواء موصلًا، فيحدث تفريغ كهربائي للشحنات؛ أي ينشأ تيار كهربائي، فيظهر توهج أو وميض لامع.



الشكل (٢-٣١): تأين جزيئات الهواء بالقرب من الرأس المدبب لموصل.

ويبين الشكل (٢-٣٢) التفريغ الكهربائي بالقرب من الرأس المدبب لسلك فلزي.



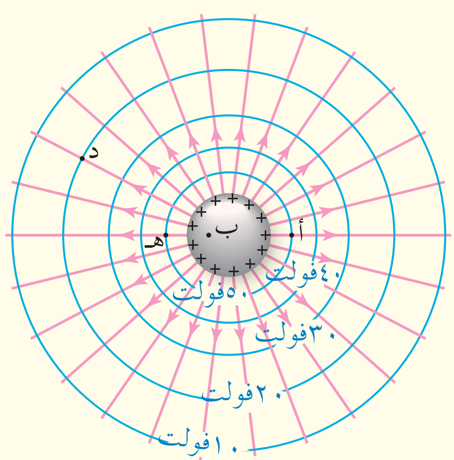
مراجعة (٢-٦)

١ معتمدًا على الشكل (٢-٣٣) الذي يبين سطوح تساوي الجهد وخطوط المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون أجب عما يأتي:

أ رتب قيم المجال الكهربائي عند النقاط (أ، ب، ه، د) تصاعديًّا.

ب رتب قيم الجهد عند النقاط (أ، ب، ه، د) تصاعديًّا.

جـ هل تتغير طاقة الوضع الكهربائية لإلكترون عند انتقاله من النقطة (ب) إلى سطح الموصل؟ فسر إجابتك.



الشكل (٢-٣٣): سؤال (١).

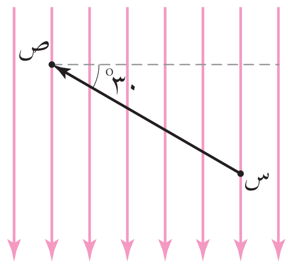
٢ لماذا يجب الحذر من الرؤوس المدببة عند التعامل مع أجسام فلزية ذات جهد كهربائي عالٍ؟

❶ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١) تقع النقطتان (س، ص) في مجال كهربائي منتظم مقداره (مـ)، والبعد بينهما (ف) كما في الشكل(٢–٣٤) وعليه فإن ($ج_{س ص}$):

أ) مـ ف جتا ١٨٠ ج) مـ ف جتا ١٢٠

ب) مـ ف جتا ٣٠ د) مـ ف جتا ٦٠

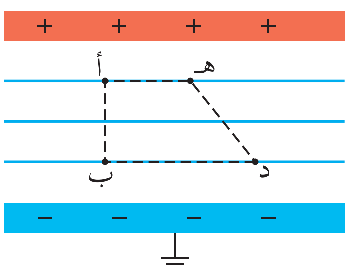


الشكل (٢–٣٤): سؤال (١) فقرة (١).

٢) يبين الشكل (٢–٣٥) صفيحتين موصلتين متوازيتين، (أ، ب، د، هـ) أربع نقاط تقع في المجال الكهربائي بين الصفيحتين. تزداد طاقة الوضع الكهربائية لشحنة نقطية موجبة عند انتقالها من:

أ) النقطة (د) إلى النقطة (هـ) ج) النقطة (د) إلى النقطة (ب)

ب) النقطة (أ) إلى النقطة (ب) د) النقطة (أ) إلى النقطة (هـ).



الشكل (٢–٣٥): سؤال (١) فقرة (٢).

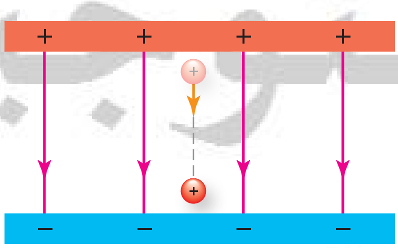
٣) عندما تتحرك شحنة موجبة حرة في مجال كهربائي منتظم كما في الشكل (٢–٣٦) فإنه القوة الكهربائية تبذل شغلاً:

أ) موجبًا، فتزداد طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

ب) سالبًا، فتقل طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

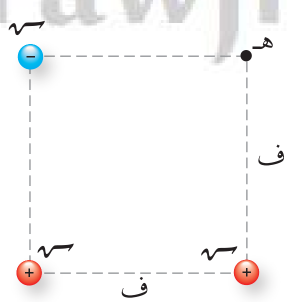
ج) موجبًا، فتقل طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

د) سالبًا، فتزداد طاقة الوضع الكهربائية للنظام.


الشكل (٢–٣٦): سؤال (١) فقرة (٣).

٤) ثلاث شحنات نقطية متساوية في المقدار وضعت عند رؤوس مربع، كما يبين الشكل (٢–٣٧). الجهد الكهربائي عند النقطة (ه) يساوي:

أ) ٢(أ $\frac{م}{ف}$) ب) ٣(أ $\frac{م}{ف}$) ج) ٢(أ $\frac{م}{ف\sqrt{٢}}$) د) (أ $\frac{م}{ف\sqrt{٢}}$)



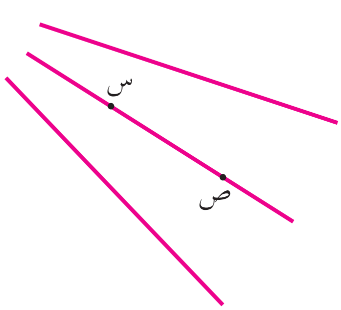
الشكل (٢–٣٧): سؤال (١) فقرة (٤).

❷ يبين الشكل (٢–٣٨) نقطتين (س، ص) في مجال كهربائي، وضعت شحنة سالبة عند النقطة (س) فتحركت بتأثير القوة الكهربائية نحو النقطة (ص).

أ) حدد اتجاه خطوط المجال الكهربائي.

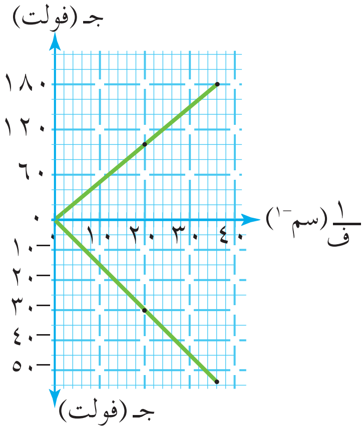
ب) هل تزداد طاقة الوضع الكهربائية للشحنة أم تقل؟

ج) هل ($ج_{س ص}$) موجب أم سالب؟



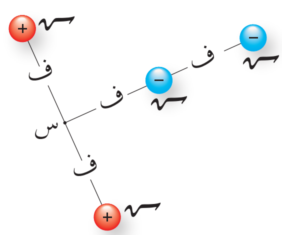
الشكل (٢–٣٨): سؤال (٢).

٣ يبين الشكل (٢-٣٩) تمثيلًا بيانيًا للعلاقة بين الجهد الناشئ عن شحنتين نقطيتين ومقلوب البعد عن كل منهما، اعتمادًا على البيانات جد مقدار كل من الشحنتين ونوعهما.



الشكل (٢-٣٩): سؤال (٣).

٤ في الشكل (٢-٤٠) احسب الجهد الكهربائي عند النقطة (س)، علمًا بأن (ش = ٥) ميكروكولوم، وف = ٤ سم.

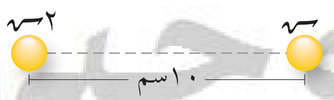


الشكل (٢-٤٠): سؤال (٤).

٥ شحنتان نقطيتان موضوعتان في الهواء، والمسافة بينهما (١٠) سم، كما في الشكل (٢-٤١). إذا كانت طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في النظام (٧٢×١٠^{-٢}) جول:

أ احسب مقدار كل من الشحنتين.

ب ما مقدار الشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لنقل الشحنة (ش) من موقعها إلى اللانهاية؟



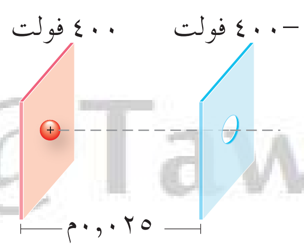
الشكل (٢-٤٠): سؤال (٤).

٦ يبين الشكل (٢-٤٢) بروتونًا أطلق من السكون في الحيز بين صفيحتين مشحونتين متوازيتين. معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل احسب:

أ المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين مقدارًا واتجاهًا.

ب القوة الكهربائية المؤثرة في البروتون مقدارًا واتجاهًا.

جـ سرعة البروتون عندما يصل إلى الصفيحة السالبة.

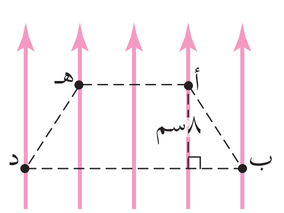


الشكل (٢-٤٠): سؤال (٤).

٧ يبين الشكل (٢-٤٣) أربع نقاط (أ، ب، د، ه) تقع في مجال منتظم مقداره ($١٠^{٣}$) فولت/ م. احسب:

أ فرق الجهد ($جـ_{هـ د}$).

ب شغل القوة الكهربائية عند نقل شحنة (١×١٠^{-٦}) كولوم من (ب) إلى (هـ) عبر المسار (ب ⟸ أ ⟸ هـ).

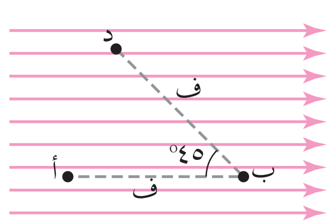


الشكل (٢-٤٠): سؤال (٤).

٨ يبين الشكل (٢- ٤٤) ثلاث نقاط (أ، ب، د) في مجال كهربائي منتظم مقداره (٦٠٠) فولت/م. إذا كانت (ف= ٥سم). احسب:

أ جـ أب .   ب جـ ب د .

جـ (جـ أ د) باستخدام إجابتك في الفرعين السابقين.



الشكل (٢-٤٠): سؤال (٤).

الفصل الثالث

المواسعة الكهربائية

Electric Capacitance

في هذا الفصل

(٣-١)
المواسع الكهربائي.

(٣-٢)
الطاقة المختزنة في مواسع.

(٣-٣)
توصيل المواسعات.

(٣-٤)
المواسعات في التطبيقات العملية.

تشكل الكهرباء جزءًا رئيسًا من حياتنا، ولا تكاد تخلو لحظات حياتنا من استخدام الأجهزة الكهربائية بأشكالها المختلفة، وتتكون الأجهزة الكهربائية من دارات كهربائية وإلكترونية متنوعة، وفي هذا الفصل ستتعرف أحد المكونات الرئيسة للدارة وهو المواسع. فما المقصود بالمواسع؟ وما مبدأ عمله؟ وكيف يمكن أن نستخدم مجموعة من المواسعات في دارة كهربائية؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

تستخدم المواسعات في الدارة الكهربائية لنظام ماسحات زجاج السيارة الأمامي والخلفي؛ إذ يحدد المواسع المستخدم في دارة نظام الماسحات عدد المرات التي تتحركها هذه الماسحات.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

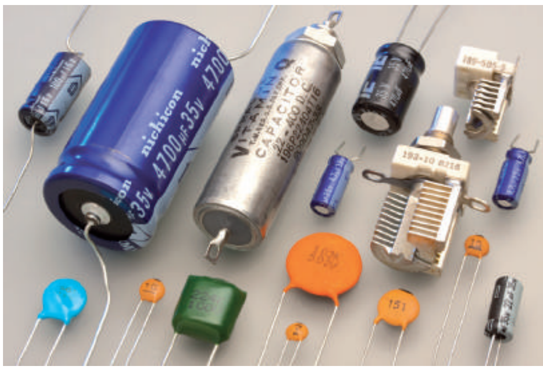
* توضح المقصود بالمواسعة الكهربائية، ووحدة قياسها، وتعبر عنها رياضيًّا.
* تتوصل إلى العلاقات الخاصة بالمواسعات وتوصيلها على التوالي والتوازي، لحساب الشحنة والجهد والمواسعة المكافئة.
* تتوصل إلى العلاقة الرياضية للطاقة المختزنة في مواسع كهربائي.
* تبحث في التطبيقات التكنولوجية التي تعتمد على المواسعات.

المواسع الكهربائي

Electric Capacitor

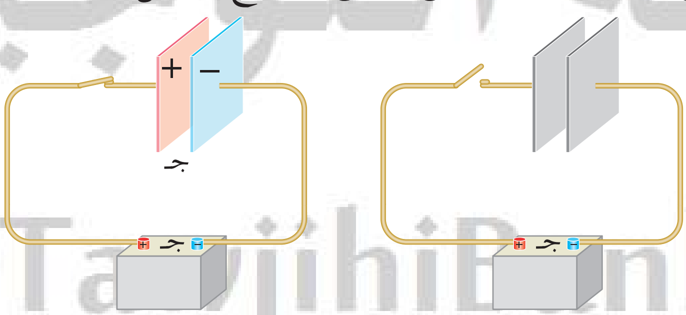
تحتاج بعض الدارات الكهربائية إلى تخزين الطاقة الكهربائية فيها؛ لذلك يوجد أداة تستخدم لتخزين الطاقة الكهربائية تسمى المواسع الكهربائي.

يتكون المواسع من موصلين تفصل بينهما مادة عازلة مثل الهواء والبلاستيك والورق. وتوجد المواسعات بأشكال وحجوم مختلفة، لاحظ الشكل (٣-١)، فمنها المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين، والمواسع الأسطواني. ويرمز عادة للمواسع في الدارات الكهربائية بخطين متوازيين (—||—).



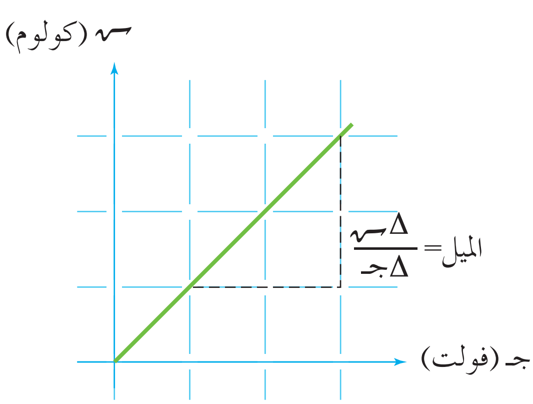
الشكل (٣-١): أشكال المواسع.

يتكون المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين بأبسط أشكاله، من صفيحتين موصلتين متوازيتين متساويتين في المساحة، تفصل بينهما طبقة من مادة عازلة. ويمكن شحن المواسع بوصل صفيحتيه مع بطارية، وتمثل البطارية مصدرًا للطاقة الكهربائية يعمل على شحن إحدى صفيحتي المواسع بشحنة موجبة، والأخرى بشحنة مساوية سالبة، والشكل (٣-٢) يوضح كيفية شحن المواسع.



الشكل (٣-٢): شحن مواسع بواسطة بطارية.

تتطلب عملية الشحن زمنًا قصيرًا تنمو خلاله الشحنة على المواسع بعد غلق المفتاح (ح)، ويزداد جهد المواسع طرديًّا مع الشحنة، وتنتهي عملية الشحن عندما يتساوى فرق الجهد بين صفيحتي المواسع مع فرق الجهد بين قطبي البطارية، وعندها تصل الشحنة على المواسع إلى قيمتها النهائية، وتكون كمية الشحنة على كل من الصفيحتين متساوية.



الشكل (٣-٣): منحنى (جـ- س)

ويبين الشكل (٣-٣) التمثيل البياني للعلاقة الخطية بين جهد المواسع وشحنته.

ويمثل ميل الخط المستقيم كمية فيزيائية تسمى المواسعة الكهربائية، ويرمز لها بالرمز(س)، أي أن:

$$س = \frac{جـ}{ـس} \quad .... \quad (٣-١)$$

حيث (ـس): شحنة المواسع في أي لحظة وتمثل القيمة المطلقة للشحنة على أي من صفيحتي المواسع، و(جـ): فرق الجهد بين صفيحتي المواسع في تلك اللحظة (جهد المواسع).

وتعرف المواسعة الكهربائية **بأنها النسبة بين التغير في كمية الشحنة المختزنة في المواسع والتغير في فرق الجهد بين طرفيه (صفيحتيه).**

وتقاس المواسعة الكهربائية بوحدة (كولوم/ فولت)، وتسمى الفاراد. ويمثل الفاراد **مواسعة مواسع يختزن شحنة مقدارها (١) كولوم عندما يكون فرق الجهد بين صفيحتيه (١) فولت.**

وتعد المواسعة مقياسًا لقدرة المواسع على تخزين الشحنات الكهربائية.

مثال (٣-١)

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، وصل مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها (١٢) فولت، فاكتسب شحنة مقدارها (٦×١٠ $^{-٦}$) كولوم:

١ احسب مواسعة المواسع.

٢ إذا وصل المواسع مع بطارية ذات فرق جهد أكبر. ماذا يحدث لكل من شحنته ومواسعته؟ فسر إجابتك.

الحل:

١ تحسب المواسعة من العلاقة:

$$س = \frac{جـ}{ـس} = \frac{٦ \times ١٠^{-٦}}{١٢}$$

$س = ٠,٥ \times ١٠^{-٦}$ فاراد.

$= ٠,٥$ ميكروفاراد

٢ عند وصل المواسع مع بطارية ذات فرق جهد أكبر يزداد فرق الجهد بين صفيحتيه ليكون مساويًا فرق الجهد بين قطبي البطارية، ويتحقق ذلك باكتساب المواسع شحنة أكبر؛ أي أن التغير في الجهد يقابله تغير في الشحنة، بحيث تبقى النسبة بينهما ثابتة (س =)، وتبقى المواسعة ثابتة.

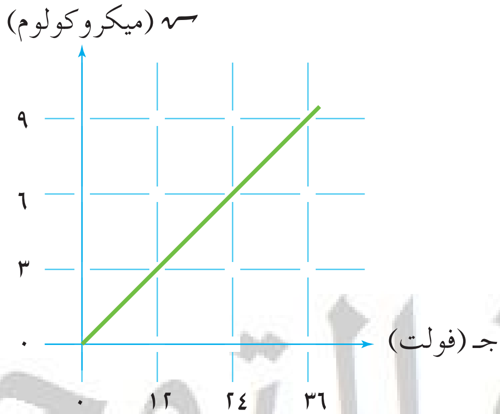
مثال (٣-٢)

مواسع كهربائي ذو صفيحتين متوازيتين وصل مع مصدر فرق جهده (٢٤) فولت حتى شحن كليًّا. مستعينًا بالشكل (٣-٤) الذي يبين العلاقة بين جهد مواسع وشحنته. احسب:

١ مواسعة المواسع.

٢ شحنة المواسع النهائية إذا وصل مع بطارية فرق جهدها (٣٠) فولت.

الحل:



الشكل (٣-٤): مثال (٣-٢).

١ نجد المواسعة من ميل الخط المستقيم:

س = (٣-٠) × ١٠^-٦ / (١٢-٠)

= ١/٤ × ١٠^-٦

= ٠,٢٥ × ١٠^-٦ فاراد.

س = ٠,٢٥ ميكروفاراد.

٢ بما أن المواسعة ثابتة، فإن:

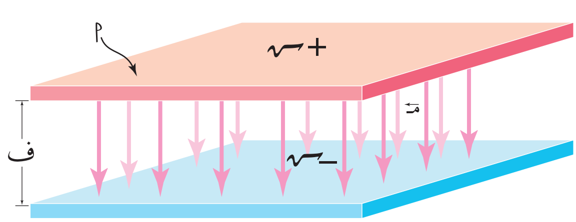
س = ش/جـ، ومنها:

ش = س جـ = ٠,٢٥ × ١٠^-٦ × ٣٠

ش = ٧,٥ × ١٠^-٦ كولوم

ش = ٧,٥ ميكروكولوم

يبين الشكل (٣-٥) مواسعًا مشحونًا مساحة كل من صفيحتيه (أ)، والبعد بينهما (ف)، ويفصل بينهما الهواء، ويختزن على إحدى صفيحتيه شحنة (ش)، وعلى الصفيحة الأخرى شحنة (-ش).



الشكل (٣-٥): المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين.

تأمل الشكل، ولاحظ أنه عند شحن المواسع فإن الشحنات تنتشر على سطحي صفيحتيه، فإذا زادت مساحة الصفيحتين فإن المواسع يصبح قادرًا على استيعاب كمية أكبر من الشحنة. **وبذلك**

نستنتج أن المواسع ذا المساحة الأكبر يختزن شحنة أكبر، فتزداد مواسعته بثبات الجهد الكهربائي (جـ) والبعد بين الصفيحتين (ف).

وينشأ في الحيز بين صفيحتي المواسع بعد شحنهما مجال كهربائي كما في الشكل (٣-٥)، فإذا كان البعد بين الصفيحتين صغيرًا جدًّا مقارنة بأبعاد الصفيحتين فإن المجال الكهربائي بين الصفيحتين يعد مجالًا منتظمًا ($\text{مـ} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$)، وفرق الجهد بينهما ($\text{جـ} = \text{م ف}$).

فإذا تغير البعد بين الصفيحتين من (ف) إلى ($\frac{\text{ف}}{٢}$) مع بقاء البطارية نفسها (ثبات الجهد) فإن العلاقة ($\text{جـ} = \text{مـ ف}$) تشير إلى أن المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع يجب أن يصبح مثلي ما كان عليه مع ثبات الجهد، وعليه فإن الشحنة على صفيحتيه يجب أن تصبح مثلي ما كانت عليه ($\text{مـ} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$)، وبذلك نستنتج أن المواسع إذا قل البعد بين صفيحتيه يصبح قادرًا على تخزين شحنة أكبر، فتزداد مواسعته مع ثبات الجهد الكهربائي (جـ).

وعليه يمكن التعبير عن المواسعة على النحو الآتي: $\text{س} = \frac{\text{ش}}{\text{جـ}} = \frac{\text{ش}}{\text{مـ ف}}$

وبتعويض ($\text{مـ} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$)، نجد أن: $\text{س} = \frac{\varepsilon_0 \, \text{ش}}{\sigma \, \text{ف}}$

وبتعويض ($\sigma = \frac{\text{ش}}{\text{أ}}$)، فإن: $\text{س} = \frac{\varepsilon_0 \, \text{ش أ}}{\text{ش ف}}$

وبذلك فإن مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين تعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{س} = \frac{\varepsilon_0 \, \text{أ}}{\text{ف}} \qquad \text{(٣-٢)}$$

ويتضح من العلاقة السابقة أن مواسعة المواسع تعتمد على أبعاده الهندسية، وعلى السماحية الكهربائية للوسط الفاصل بين الصفيحتين، وستقتصر دراستنا على المواسع الذي تكون المادة العازلة بين صفيحتيه هي الهواء أو الفراغ.

مثال (٣-٣)

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين المسافة بين صفيحتيه (٨,٨٥)مم، ومساحة كل من صفيحتيه (٢×١٠$^{-٤}$) م^{٢} وصل مع بطارية فرق الجهدبين طرفيها (٢٠) فولت حتى شحن تمامًا، ثم فصل عن البطارية.

١) احسب مواسعة المواسع وشحنته.

٢) إذا قل البعد بين صفيحتي المواسع إلى النصف، فكيف يتغير كل من مواسعته وشحنته وفرق الجهد بين طرفيه.

الحل:

١) ■ مواسعة المواسع:

$$\text{س} = \frac{\text{ε. أ}}{\text{ف}} = \frac{٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢} \times ٢ \times ١٠^{-٤}}{٨,٨٥ \times ١٠^{-٣}}$$

$$\text{س} = ٢ \times ١٠^{-١٣} \text{ فاراد}$$

■ شحنة المواسع:

$$\text{س} = \frac{\text{شـ}}{\text{جـ}}$$

$$\text{شـ} = \text{س جـ} = ٢ \times ١٠^{-١٣} \times ٢٠$$

$$\text{شـ} = ٤ \times ١٠^{-١٢} \text{ كولوم.}$$

٢) عندما يقل البعد بين الصفيحتين إلى النصف، وبعد فصل المواسع عن البطارية:

■ تصبح المواسعة مثلي ما كانت عليه حسب العلاقة $\text{س} = \frac{\text{ε. أ}}{\text{ف}}$، أي أن:

$$\text{س} = ٤ \times ١٠^{-١٣} \text{ فاراد.}$$

■ تبقى شحنة المواسع ثابتة بسبب فصل البطارية، أي أن:

$$\text{شـ} = ٤ \times ١٠^{-١٢} \text{ كولوم.}$$

■ من العلاقة س= فإن:

$$\text{جـ} = \frac{\text{شـ}}{\text{جـ}}$$

$$\text{جـ} = \frac{٤ \times ١٠^{-١٢}}{٤ \times ١٠^{-١٣}} = ١٠ \text{ فولت}$$

نستنتج أنه إذا زادت المواسعة إلى مثلي ما كانت عليه مع بقاء الشحنة ثابتة، فإن فرق الجهد يقل إلى النصف.

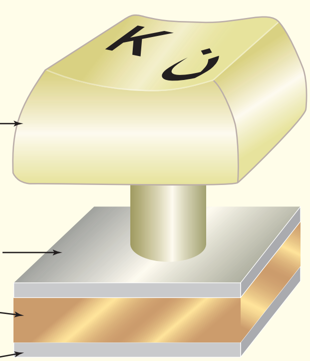
مراجعة (٣-١)

١ ماذا نعني بقولنا إن مواسعة مواسع تساوي (٣) ميكروفاراد؟

٢ وصل مواسع مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها(جـ)، فاكتسب شحنة (شـ)، ثم فصل عنها، ووصل مواسع آخر مع البطارية نفسها، فاكتسب شحنة (٣شـ)، فما النسبة بين مواسعة المواسعين؟

٣ مواسع ذو صفيحتين متوازيتين يتصل مع بطارية. إذا أصبح البعد بين صفيحتيه ثلاثة أمثال ما كان عليه مع بقائه متصلاً بالبطارية، فكيف يتغير كل من: مواسعته، وشحنته، وفرق الجهد والمجال الكهربائي بين طرفيه.

٤ تستخدم المواسعات في لوحة مفاتيح الحاسوب، كما يبين الشكل (٣-٦)، وتتكون الطبقة العازلة بين صفيحتي المواسع من مادة لينة قابلة للانضغاط. وضح ماذا يحدث لمواسعة المواسع عند الضغط على المفتاح؟



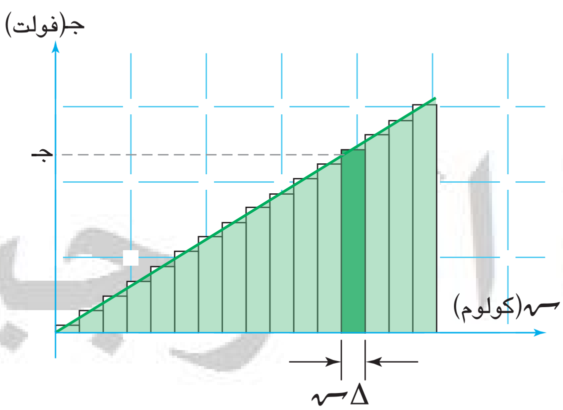
الشكل (٣-٦): سؤال (٤).

٥ مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، إذا كانت الكثافة السطحية للشحنة على صفيحتيه (٣٠) نانو كولوم/سم^2، وذلك عند وصله مع مصدر فرق جهده (١٥٠) فولت. احسب البعد بين صفيحتيه.

٣-٢ الطاقة المختزنة في المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين
Energy Stored in a Parallel-Plate Capacitor

إن تخزين شحنة في المواسع يعني تخزين طاقة كهربائية فيه، فما مصدر الطاقة التي يختزنها؟ وكيف نحسبها؟

عندما يتصل المواسع مع البطارية فإنهما يشكلان نظامًا، تقوم فيه البطارية ببذل شغل لنقل الشحنات إلى صفيحتي المواسع. وقد درست أن الشحنة على المواسع تزداد خطيًّا مع جهده والشكل (٣-٧) يبين ذلك، لاحظ أنه عند إضافة كمية من الشحنة (Δش) للمواسع عند جهد متوسط مقداره(جـ)، فإن مساحة المستطيل المظلل (جـ Δش) في الشكل تمثل جزءًا من الشغل الكلي الذي بذلته البطارية في شحن المواسع، فإذا حسبنا المساحة الكلية تحت المنحنى نكون قد حسبنا الشغل الكلي الذي بذلته البطارية لشحن المواسع. وهذا الشغل يختزن في المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع بصورة طاقة وضع كهربائية، حيث:



الشكل (٣-٧): الطاقة المختزنة في المواسع .

الطاقة المختزنة في المواسع= مساحة المثلث

$$ط = \frac{1}{2} ش\, جـ \quad .... (٣-٣)$$

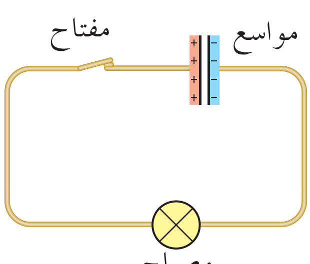
وبما أن (ش= س جـ)، إذن:

$$ط = \frac{1}{2} س\, جـ^{2} \quad .... (٣-٤)$$

كما يمكن التوصل إلى أن :

$$ط = \frac{1}{2} \frac{ش^{2}}{س} \quad .... (٣-٥)$$

وتتحول الطاقة المختزنة في المواسع إلى شكل آخر من الطاقة عند وصل طرفي المواسع بجهاز كهربائي مثل مصباح كهربائي، فعند إغلاق المفتاح في الدارة المبينة في الشكل (٣-٨) تتحرك الشحنات من الصفيحة الموجبة إلى الصفيحة السالبة عبر المصباح، ويسري في



الشكل (٣-٨) تفريغ المواسع.

الدارة تيار كهربائي يبدأ بقيمة عالية، ثم يتناقص إلى أن يؤول إلى الصفر؛ فيضيء المصباح مدة وجيزة، وتسمى هذه العملية تفريغ المواسع.

مثال (٣-٤)

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مساحة كل من صفيحتيه (٢٥)سم²، والبعد بين صفيحتيه (٨,٨٥) مم، شحن حتى أصبح فرق الجهد بين صفيحتيه (١٠٠) فولت:

١ احسب الطاقة المختزنة في المواسع.

٢ إذا زادت المسافة بين الصفيحتين حتى أصبح البعد بينهما (١٧,٧)مم، مع بقاء المواسع متصلًا مع البطارية نفسها. فاحسب الطاقة المختزنة في المواسع.

الحل:

١ نحسب المواسعة من العلاقة:

$$س = \frac{ε.أ}{ف}$$

$$= \frac{٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢} \times ٢٥ \times ١٠^{-٤}}{٨,٨٥ \times ١٠^{-٣}}$$

$س = ٢,٥ \times ١٠^{-١٢}$ فاراد.

لحساب الطاقة نستخدم العلاقة:

$$ط = \frac{١}{٢} س جـ^٢$$

$$ط = \times ٢,٥ \times ١٠^{-١٢} \times (١٠٠)^٢$$

$ط = ١,٢٥ \times ١٠^{-٨}$ جول.

٢ عندما يزداد البعد بين الصفيحتين تقل المواسعة حسب العلاقة ($س = \frac{ε.أ}{ف}$)

ولأن (ف) أصبحت مثلي ما كانت عليه فإن المواسعة تقل إلى النصف:

$س = ١,٢٥ \times ١٠^{-١٢}$ فاراد. (المواسعة تقل)

وبما أن المواسع يتصل مع البطارية، يبقى جهده ثابتًا ويساوي جهد البطارية.

ولحساب الطاقة : $ط = \frac{١}{٢} س جـ^٢ = \frac{١}{٢} \times ١,٢٥ \times ١٠^{-١٢} \times (١٠٠)^٢$

$ط = ٦,٢٥ \times ١٠^{-٩}$ جول. (الطاقة تقل)

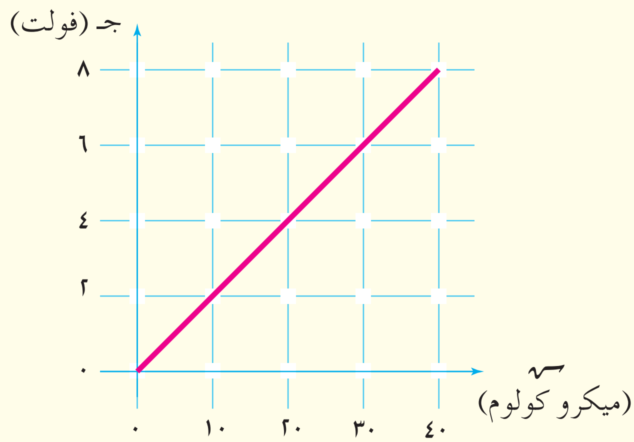
عندما تقل المواسعة مع بقاء جهد المواسع مساويًا فرق الجهد بين طرفي البطارية يحدث تفريغ لجزء من شحنة المواسع إلى البطارية؛ لذلك تقل الطاقة المختزنة فيه.

مراجعة (٣-٢)

١ مواسعان مواسعة الأول (٢) ميكروفاراد وجهده (٢٠) فولت، والثاني مواسعته (٤) ميكروفاراد وجهده (١٠) فولت. أي المواسعين يختزن طاقة أكبر؟

٢ مواسع شُحن ثم فُصل عن البطارية، إذا أصبح البعد بين صفيحتيه مثلي ما كان عليه، فماذا يحدث للطاقة المختزنة فيه؟ فسر إجابتك.

٣ مواسع كهربائي ذو صفيحتين متوازيتين، وصل مع مصدر فرق جهده (٦) فولت، ويبين الشكل (٣-٩) العلاقة بين جهد المواسع وشحنته في أثناء عملية الشحن.



الشكل (٣-٩): سؤال (٣).

احسب:

أ مواسعة المواسع.

ب الطاقة المختزنة في المواسع عندما يكون فرق الجهد بين صفيحتيه (٢) فولت.

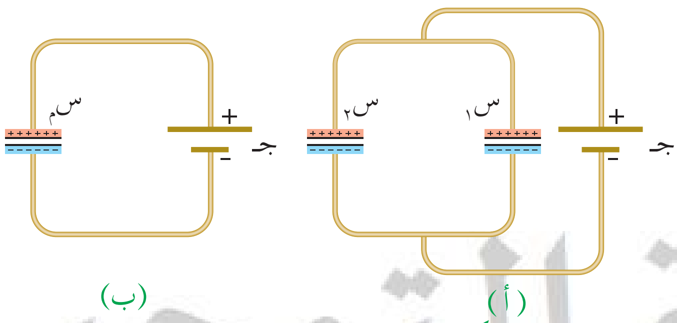
د الطاقة المختزنة في المواسع عند وصله مع مصدر فرق جهده (١٢) فولت بعد فصله عن المصدر الأول.

٣-٣ توصيل المواسعات
Combinations of Capacitors

تصنع المواسعات بحيث تكون لها مواسعة محددة، وتعمل على جهد معين، وقد يلزم في تطبيق عملي قيمة محددة للمواسعة ليست متوافرة؛ عندئذ يمكن الحصول عليها بتوصيل مجموعة من المواسعات بطرائق عدة، منها التوصيل على التوازي، والتوصيل على التوالي، أو الجمع بينهما.

(٣-٣-١) التوصيل على التوازي *Parallel Combination*

يسمى توصيل المواسعات بالطريقة المبينة في الشكل (٣-١٠/ أ) توصيلاً على التوازي، والتوصيل بهذه الطريقة يجعل كل مواسع موصول بصفيحتيه مباشرة مع البطارية.



الشكل (٣-١٠) : التوصيل على التوازي.

وبما أن المواسعين يتصلان مباشرة مع البطارية؛ فإن كل مواسع يشحن مباشرة منها، إلى أن يتساوى جهد كل مواسع مع جهد البطارية، وعندها يكون المواسعان قد اكتسبا شحنتين (شـ_1)، (شـ_2)؛ لذا **في التوصيل على التوازي تكون المواسعات متساوية في الجهد** بينما الشحنة الكلية تكون مجموع الشحنة على المواسعات:

فإذا أردنا استبدال مواسع واحد بمواسعين وله تأثيرهما معًا، لاحظ الشكل (٣-١٠/ب) فإن المواسع المكافئ ($\text{س}_\text{م}$) يكون جهده مساويًا جهد البطارية، وشحنته تساوي مجموع شحنتي المواسعين؛ أي أن:

$$\text{س}_\text{م} = \frac{\text{شـ}_{\text{الكلية}}}{\text{جـ}}$$

وحيث إن: $\text{شـ}_{\text{الكلية}} = \text{شـ}_1 + \text{شـ}_2$

$$= \text{س}_1\,\text{جـ} + \text{س}_2\,\text{جـ}$$

لذا فإن: $\text{س}_\text{م}\,\text{جـ} = \text{س}_1\,\text{جـ} + \text{س}_2\,\text{جـ}$ وباختصار (جـ)

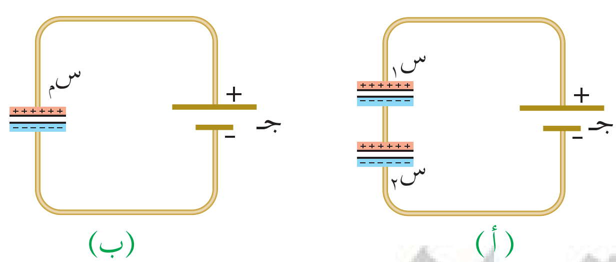
تصبح العلاقة: $\text{س}_\text{م} = \text{س}_1 + \text{س}_2$

وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المواسعات على التوازي تكون المواسعة المكافئة لها هي المجموع الجبري لتلك المواسعات أي أن:

$$\text{س}_{\text{م}} = \text{س}_{١} + \text{س}_{٢} + \text{س}_{٣} + \dots \dots \dots \dots \quad (٣-٦)$$

(٣-٣-٢) التوصيل على التوالي *Series Combination*

يسمى توصيل المواسعات بالطريقة المبينة في الشكل (٣-١١) توصيلاً على التوالي. والتوصيل بهذه الطريقة يجعل الصفيحة المتصلة بالقطب الموجب للبطارية تكتسب شحنة (+شـ)، فتشحن الصفيحة المقابلة لها بالحث بشحنة سالبة (-شـ)؛ ولأن هذه الصفيحة متصلة بإحدى صفيحتي المواسع الثاني فتشحن صفيحته بشحنة موجبة (+شـ)، وتشحن الصفيحة الأخرى بالحث بشحنة سالبة (-شـ).



الشكل (٣-١١): التوصيل على التوالي.

وفي حالة التوصيل على التوالي تكون المواسعات متساوية في الشحنة، والجهد الكلي يكون مجموع جهد المواسعات.

فإذا أردنا استبدال مواسع واحد بالمواسعين وله تأثيرهما معًا، لاحظ الشكل (٣-١١/ب) فإن المواسع المكافئ ($\text{س}_{\text{م}}$) تكون شحنته مساوية الشحنة الكلية من البطارية والتي تساوي شحنة أي من المواسعين، وجهده يساوي مجموع جهدي المواسعين؛ أي أن:

$$\text{س}_{\text{م}} = \frac{\text{شـ}}{\text{جـ}}$$

وحيث إن: $\text{جـ}_{\text{كلي}} = \text{جـ}_{١} + \text{جـ}_{٢}$

$$\text{جـ}_{\text{كلي}} = \frac{\text{شـ}}{\text{س}_{١}} + \frac{\text{شـ}}{\text{س}_{٢}}$$

فإن: $\frac{\text{شـ}}{\text{س}_{\text{م}}} = \frac{١}{\text{س}_{١}} + \frac{١}{\text{س}_{٢}}$ وباختصار (شـ)

تصبح العلاقة: $\frac{١}{\text{س}_{\text{م}}} = \frac{١}{\text{س}_{١}} + \frac{١}{\text{س}_{٢}}$

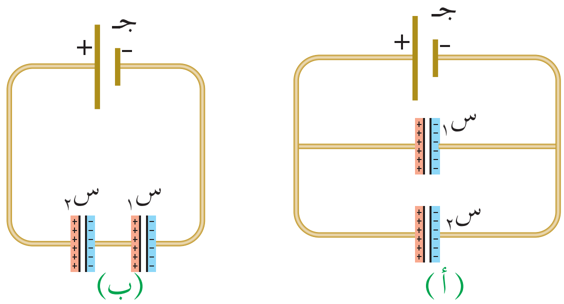
وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المواسعات على التوالي تكون المواسعة المكافئة لها:

$$\frac{١}{\text{س}_{\text{م}}} = \frac{١}{\text{س}_{١}} + \frac{١}{\text{س}_{٢}} + \frac{١}{\text{س}_{٣}} + \dots \dots \dots \dots \quad (٣-٧)$$

مواسعان ($س_١ = ٣$، $س_٢ = ٦$) ميكروفاراد وصلا مع مصدر فرق جهده (٣٠) فولت بطريقتين؛ الطريقة الأولى على التوازي كما في الشكل (٣-١٢/أ)، والطريقة الثانية على التوالي كما في الشكل (٣-١٢/ ب). احسب لكل طريقة:

١) المواسعة المكافئة.

٢) الشحنة وفرق الجهد لكل مواسع.



الشكل (٣-١٢): مثال (٣-٥).

الحل:

١) التوصيل على التوازي:

- المواسعة المكافئة: $س_م = س_١ + س_٢$

$س_م = ٣ + ٦ = ٩$ ميكروفاراد.

لاحظ أن المواسع المكافئ مواسعته أكبر من مواسعة ($س_١$) و($س_٢$)

- عند توصيل المواسعين على التوازي، فإن ($جـ_١ = جـ_٢ = جـ_{كلي} = ٣٠$ فولت)

شحنة المواسع الأول: $ش_١ = س_١ جـ = ٣ \times ١٠^{-٦} \times ٣٠ = ٩٠ \times ١٠^{-٦}$ كولوم

شحنة المواسع الثاني: $ش_٢ = س_٢ جـ = ٦ \times ١٠^{-٦} \times ٣٠ = ١٨٠ \times ١٠^{-٦}$ كولوم.

٢) التوصيل على التوالي:

- المواسعة المكافئة للتوالي: $\frac{١}{س_م} = \frac{١}{س_١} + \frac{١}{س_٢}$

$\frac{١}{س_م} = \frac{١}{٣} + \frac{١}{٦}$ ، $س_م = ٢$ ميكروفاراد.

لاحظ أن مواسعة المواسع المكافئ أقل من مواسعة كل من ($س_١$) و($س_٢$)

- عند توصيل المواسعين على التوالي فإن ($ش_١ = ش_٢ = ش$)

لحساب الشحنة الكلية: $ش = س_م جـ = ٢ \times ١٠^{-٦} \times ٣٠ = ٦٠ \times ١٠^{-٦}$ كولوم

جهد المواسع الأول: $جـ = \frac{ش}{س_١} = \frac{٦٠ \times ١٠^{-٦}}{٣ \times ١٠^{-٦}} = ٢٠$ فولت.

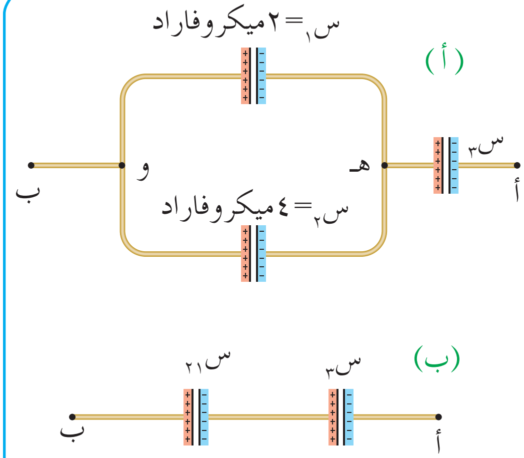
جهد المواسع الثاني: $جـ = \frac{ش}{س_٢} = \frac{٦٠ \times ١٠^{-٦}}{٦ \times ١٠^{-٦}} = ١٠$ فولت.

مثال (٣-٦)

وصلت ثلاثة مواسعات كما هو مبين في الشكل (٣-١٣) الذي يمثل جزءًا من دارة كهربائية، إذا علمت أن جـ$_{هـ و}$ = ٨ فولت، وأن جـ$_{أب}$ = ٢٠ فولت. فاحسب:

١ الشحنة على كل من المواسعين (س$_{١}$، س$_{٢}$).

٢ مواسعة المواسع (س$_{٣}$).



الشكل (٣-١٢): مثال (٣-٥).

الحل:

١ فرق الجهد بين النقطتين (هـ، و) يساوي فرق جهد المواسع الأول وفرق جهد المواسع الثاني (جـ$_{١}$ = جـ$_{٢}$ = ٨ فولت)

لحساب الشحنة : ش$_{١}$ = س$_{١}$جـ = ٢ × ١٠$^{-٦}$ × ٨ = ١٦ × ١٠$^{-٦}$ كولوم

ش$_{٢}$ = س$_{٢}$جـ = ٤ × ١٠$^{-٦}$ × ٨ = ٣٢ × ١٠$^{-٦}$ كولوم

٢ المواسعان (س$_{١}$، س$_{٢}$) يتصلان على التوازي، ويمكن استبدال مواسع مكافئ بهما (س$_{٢١}$ = ٢ + ٤ = ٦ ميكروفاراد). كما يبين الشكل (٣-١٣/ب).

جـ$_{أب}$ = جـ$_{٢١}$ + جـ$_{٣}$

٢٠ = ٨ + جـ$_{٣}$

جـ$_{٣}$ = ١٢ فولت.

وبما أن المواسع (س$_{٣}$) يتصل مع (س$_{٢١}$) على التوالي فإن ش$_{٣}$ = ش$_{٢١}$ = ش$_{١}$ + ش$_{٢}$

أي أن ش$_{٣}$ = ١٦ × ١٠$^{-٦}$ + ٣٢ × ١٠$^{-٦}$ = ٤٨ × ١٠$^{-٦}$ كولوم.

ولحساب المواسعة (س$_{٣}$):

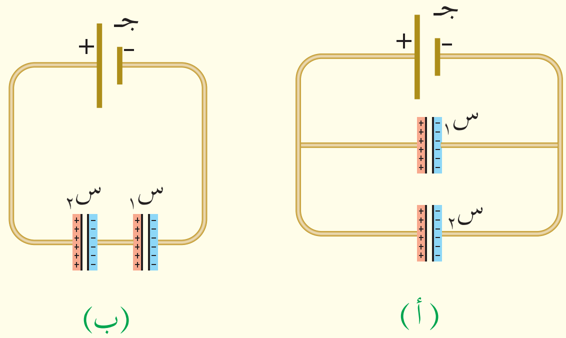
$$\text{س}_{٣} = \frac{\text{ش}_{٣}}{\text{جـ}_{٣}}$$

$$= \frac{٤٨ \times ١٠^{-٦}}{١٢}$$

= ٤ × ١٠$^{-٦}$ فاراد

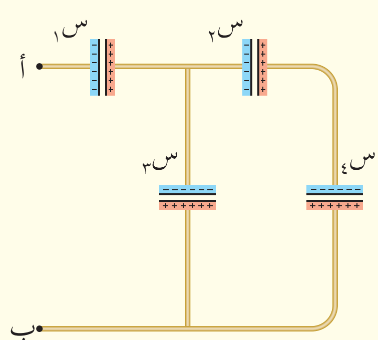
مراجعة (٣-٣)

١) معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (٣-١٤)، في أي من الحالتين يكون مقدار الطاقة المختزنة في المجموعة أكبر؟ فسر إجابتك.



الشكل (٣-١٤): سؤال (١).

٢) احسب المواسعة المكافئة لمجموعة المواسعات المبينة في الشكل (٣-١٥) علمًا بأنها متساوية في المواسعة، ومواسعة كل منها (٢) ميكروفاراد.



الشكل (٣-١٥): سؤال (٢).

٣–٤ المواسعات في التطبيقات العملية

تستخدم المواسعات في العديد من التطبيقات العملية، وتصمم بأشكال مختلفة، فمثلًا يبين الشكل (٣–١٦) مواسعًا يتكون من شريطين موصلين ملفوفين على شكل أسطوانة يفصل بينهما شريط من مادة عازلة.

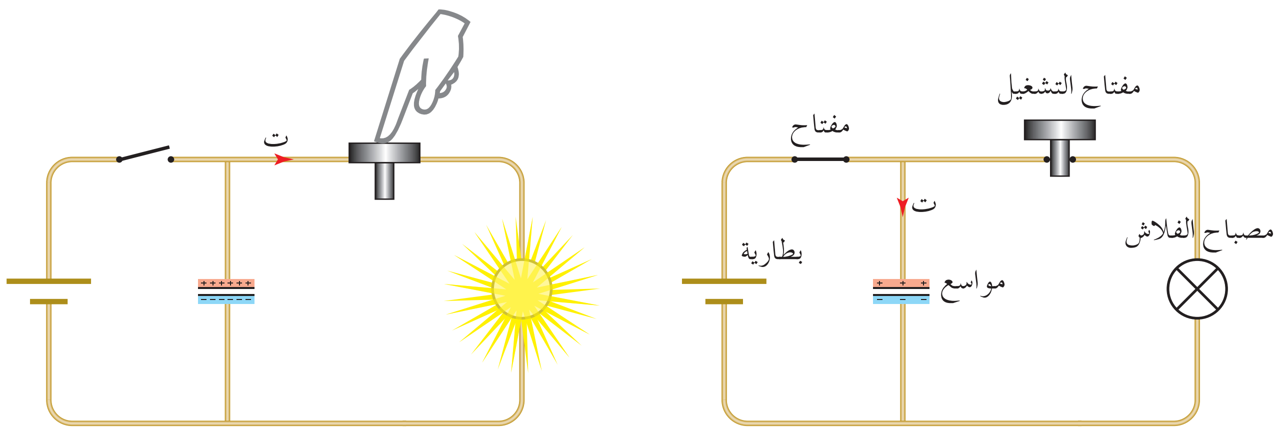
الشكل (٣–١٦) : تصميم المواسع الأسطواني.

إن تصميم المواسع بهذه الطريقة يمكننا من الحصول على مواسع مساحة صفيحتيه كبيرة، وتفصل بينهما مسافة صغيرة؛ ما يعني زيادة قدرة المواسع على تخزين الطاقة.

إلا أن المواسع له حد أعلى في تخزين الشحنة، فإذا زادت على هذا الحد يزداد الجهد، ويحدث تفريغ كهربائي عبر المادة العازلة الفاصلة بين الصفيحتين؛ لذلك يكتب على كل مواسع الحد الأعلى للجهد المسموح توصيل المواسع به (maximum working voltage)، تأمل الشكل (٣–١٧) تجد أن المواسع كتب عليه (٢٥) فولت، وهذا يعني أنه يوجد حدٌّ أقصى للشحنة أو للطاقة التي يمكن تخزينها في المواسع.

الشكل(٣–١٧): أكبر فرق جهد يمكن توصيله بين طرفي أحد المواسعات.

وتستخدم المواسعات في العديد من التطبيقات العملية، ومنها المصباح الومّاض في آلة التصوير الفوتوغرافي (فلاش كاميرا)، ويبين الشكل (٣–١٨) مخططًا بسيطًا يوضح مبدأ عمل الفلاش، فعند الضغط على مفتاح التشغيل تُغلق دارة (المواسع– الفلاش)، فيحدث تفريغ لشحنة المواسع في الفلاش، أي تتحرر الطاقة المختزنة في المواسع، وتتحول إلى طاقة ضوئية في مصباح الفلاش.



الشكل (٣-١٨): استخدام المواسع في فلاش كاميرا.

مراجعة (٣-٤)

١) فسر ما يأتي: يوجد حد أقصى للطاقة التي يمكن تخزينها في المواسع.

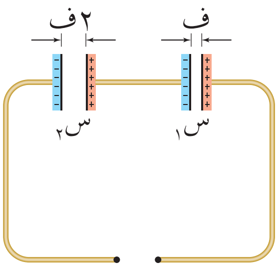
٢) يحتاج مهندس إلى مواسع مواسعته (٢٠) ميكروفاراد، يعمل على فرق جهد (٦) كيلوفولت. ولديه مجموعة من المواسعات المتماثلة كتب على كل منها (٢٠٠ ميكروفاراد، ٦٠٠ فولت)، لكي يحصل على المواسعة المطلوبة أوصل عددًا من هذه المواسعات معًا، فهل أوصل المواسعات على التوالي أم على التوازي؟ وما عدد المواسعات التي استخدمها؟ فسر إجابتك.

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١) مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مشحون، والطاقة المختزنة فيه (ط)، إذا تضاعف فرق الجهد بين صفيحتيه ثلاثة أمثال ما كان عليه، فإن الطاقة المختزنة فيه:

أ) ١/٣ط　　ب) ٣ط　　جـ) ٩ ط　　د) $\frac{١}{٢}$ ط.

٢) مواسعان متساويان في المساحة، والبعد بين صفيحتي المواسع الثاني مثلي البعد بين صفيحتي المواسع الأول، ووصلا مع بطارية على التوالي. انظر الشكل (٣-١٩)، إذا كان المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع الأول (مـ) فإن المجال بين صفيحتي المواسع الثاني:



الشكل (٣-١٩): سؤال (١) فقرة (٢).

أ) مـ　　ب) $\frac{مـ}{٢}$　　جـ) ٢ مـ　　د) ٤ مـ

شحن مواسع بواسطة بطارية، ثم فصل عنها، وتم زيادة البعد بين صفيحتيه مثلي ما كان عليه، مستعينًا بهذه المعلومات أجب عن الفرعين (٣، ٤).

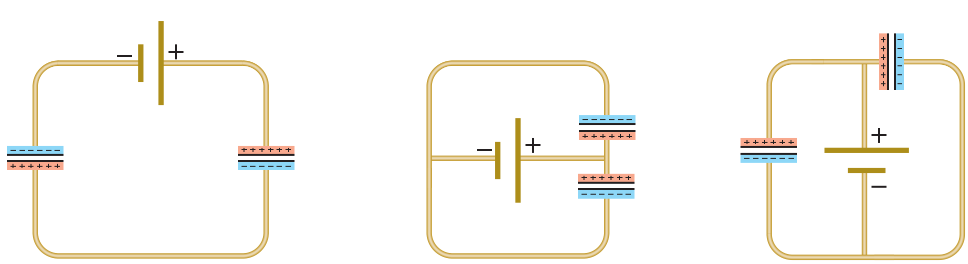
٣) إن الكمية الفيزيائية التي تبقى ثابتة للمواسع هي:

أ) الجهد الكهربائي　　ب) المواسعة　　جـ) الشحنة　　د) الطاقة

٤) إن الطاقة المختزنة في المواسع:

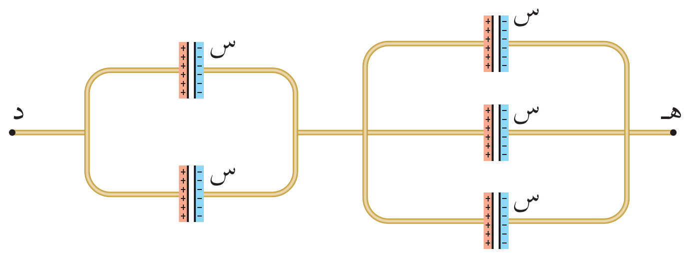
أ) تقل إلى النصف　　ب) لا تتغير　　جـ) تتضاعف　　د) تصبح أربعة أضعاف.

٢ يبين الشكل (٣-٢٠) مواسعين وصلا مع بطارية، حدد طريقة توصيل المواسعين في كل حالة.



الشكل (٣-٢٠): سؤال (٢).

٣ احسب المواسعة المكافئة لمجموعة المواسعات المبينة في الشكل (٣-٢١)، علمًا بأن المواسعات متساوية في المواسعة، ومواسعة كل مواسع (٢) ميكروفاراد.

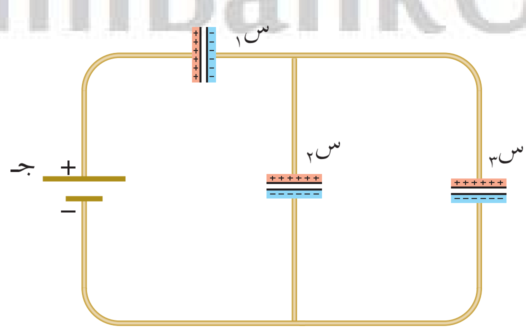


الشكل (٣-٢١): سؤال (٣).

٤ مواسعان ($س_١$ = ٢٥، $س_٢$ = ٥) ميكروفاراد وصلا على التوازي مع مصدر جهد (١٠٠) فولت، فكانت الطاقة المختزنة في المجموعة (ط). إذا أردنا للمواسعين أن يختزنا الطاقة نفسها عند توصيلهما على التوالي، فما فرق جهد المصدر الذي يحقق ذلك؟

٥ مواسعان يتصلان على التوالي مع مصدر فرق جهد. مساحة صفيحتي المواسع الثاني ضعف مساحة صفيحتي المواسع الأول، والبعد بين صفيحتي كل من المواسعين متساوٍ. إذا كانت الطاقة المختزنة في المواسع الأول (٦×١٠^{-٣}) جول فاحسب مقدار الطاقة المختزنة في المواسع الثاني.

٦ في الشكل (٣-٢٢) إذا كانت مواسعة المواسعات الثلاثة ($س_١$ =٣ س، $س_٢$ = س، $س_٣$ = ٥س).



الشكل (٣-٢٢): سؤال (٦).

أ جد المواسعة المكافئة للمجموعة.

ب رتب هذه المواسعات وفقًا للشحنة المختزنة فيها تنازليًا.

٧ يبين الجدول الآتي الأبعاد الهندسية لثلاثة مواسعات، والشكل (٣-٢٣) يمثل منحنى (الجهد-الشحنة) لهذه المواسعات. حدد لكل مواسع المنحنى الذي يناسبه.

المواسع	مساحة إحدى الصفيحتين	البعد بين الصفيحتين	رمز المنحنى
١	أ	ف	
٢	٢أ	ف	
٣	أ	٢ف	

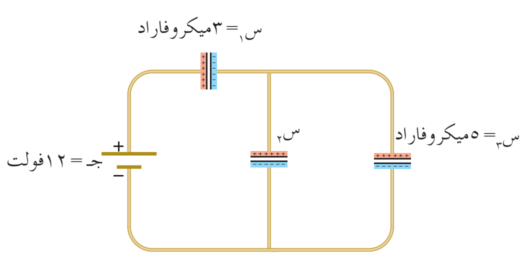
الشكل (٣-٢٣): سؤال (٧).

٨ مواسع شحنته (سـ)، ومساحة إحدى صفيحتيه (أ) والبعد بينهما (ف). أثبت أن فرق الجهد بين الصفيحتين (جـ) يعطى بالعلاقة: $\text{جـ} = \frac{\text{ف سـ}}{\varepsilon_0 \text{أ}}$

٩ في الشكل (٣-٢٤) إذا كانت الطاقة المختزنة في المجموعة (١٤٤×١٠^{-٦}) جول، وفرق الجهد بين طرفي البطارية (١٢) فولت فاحسب:

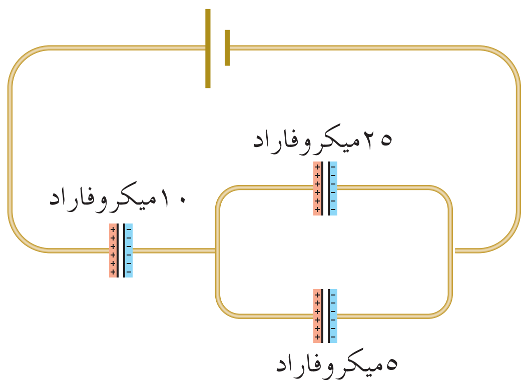
أ الطاقة المختزنة في المواسع الأول.

أ مواسعة المواسع الثاني.



الشكل (٣-٢٤): سؤال (٩).

❿ معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (٣–٢٥)، وإذا كانت الشحنة المختزنة في المواسع (٥ ميكروفاراد) تساوي (٣٠) ميكروكولوم. أجب عما يأتي:



الشكل (٣–٢٥): سؤال (١٠).

أ) املأ الفراغات في الجدول بما يناسبه.

س (ميكروفاراد)	شـ (ميكروكولوم)	جـ (فولت)	ط (ميكروجول)
٥	٣٠		
٢٥			
١٠			

ب) مستعينًا بالبيانات الواردة في الجدول بعد إكماله. احسب:

- فرق جهد المصدر.
- المواسعة المكافئة.
- الشحنة الكلية.
- الطاقة المختزنة في المجموعة.

الفصل الرابع

التيار الكهربائي ودارات التيار المباشر

Electric Current and Direct Current Circuits

في هذا الفصل

يُعد التيار الكهربائي من الموضوعات المهمة التي تدرس في أيامنا هذه، لما له من تطبيقات حياتية مهمة. وقد بدأ علم الكهرباء المتحركة (التيار الكهربائي) يشهد تقدمًا في أواخر القرن التاسع عشر، الأمر الذي أدى إلى تطور كبير في مجال صناعة مصادر القوة الدافعة الكهربائية(البطاريات والمولدات....) وإنتاج التيار الكهربائي والطاقة الكهربائية، وبدأ استخدامها في المواصلات والتدفئة والإضاءة والاتصالات والصناعة. فما المقصود بالتيار الكهربائي؟ وما المقصود بالقوة الدافعة الكهربائية؟ وكيف تعمل البطارية وهي من مصادر القوة الدافعة الكهربائية على إدامة التيار الكهربائي في الدارات الكهربائية؟ وما القوانين التي تحكم الدارات الكهربائية؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

مدينة عمان مضاءة بالمصابيح ليلًا، توصل المصابيح في الدارات الكهربائية على التوازي مع مصدر فرق الجهد الكهربائي، فيمر التيار الكهربائي عبر هذه المصابيح ناقلًا الطاقة الكهربائية لها، ولتحولها إلى طاقة ضوئية وحرارية.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضح المقصود بالمفاهيم: التيار الكهربائي، السرعة الانسياقية، القوة الدافعة الكهربائية لمصدر ما، القدرة الكهربائية، وتذكر وحدات قياسها، وتعبر عن العلاقات بينها رياضيًّا.
- تميز بين المقاومات الأومية وغير الأومية، وتطبق قانون أوم لحل المسائل المتعلقة بالمقاومات.
- تستنتج العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائية لموصل.
- تميّز بين مفهومي المقاومة الكهربائية والمقاومية الكهربائية.
- تربط بين مقاومة الموصل والعوامل التي تعتمد عليها بعلاقة رياضية.
- تتوصل إلى معادلة الدارة الكهربائية البسيطة بتتبع تغيرات الجهد فيها.
- تحلل رسومًا بيانية متعلقة بتغيرات الجهد خلال دارة كهربائية بسيطة.
- توظف معرفتك بقانوني حفظ الشحنة والطاقة للتوصل إلى قاعدتي كيرشوف.
- توظف القوانين والعلاقات الخاصة بالدارات الكهربائية في حل مسائل حسابية(عروة، عروتان).

التيار الكهربائي

Electric Current

تعمل الأجهزة الكهربائية عند مرور تيار كهربائي فيها، والذي ينشأ عن حركة الشحنات الكهربائية باتجاه واحد عبر وسط يسمح للشحنات الكهربائية بالانتقال عبره، وقد تكون الشحنات المتحركة موجبة أو سالبة وتسمى ناقلات الشحنة. وفي هذا الدرس سنتناول الموصلات التي تكون ناقلات الشحنة فيها هي الإلكترونات الحرة، مثل النحاس والفضة. إذ تحتوي هذه الموصلات على إلكترونات حرة في حالة حركة عشوائية بسرعات عالية إلا أن معدل هذه السرعات صفر، ففي داخل أي موصل يكون متوسط عدد الإلكترونات الحرة التي تعبر أي مقطع منه باتجاه ما مساويًا متوسط عدد الإلكترونات التي تعبره بالاتجاه المعاكس، وهكذا **لا ينتج تيار كهربائي عن الحركة العشوائية.**

أما إذا وصل طرفا الموصل مع بطارية فسوف ينشأ بين طرفيه فرق في الجهد الكهربائي يؤدي إلى توليد مجال كهربائي داخل الموصل، وكما درست سابقًا فإن أي شحنة تتأثر بقوة كهربائية إذا وقعت في مجال كهربائي، لذا ستتأثر الإلكترونات الحرة في الموصل بقوة كهربائية تؤدي إلى اندفاعها في اتجاه واحد. **وحركة الشحنات الكهربائية بشكل عام في اتجاه واحد تُشكل تيارًا كهربائيًّا.**

ويُعرف التيار الكهربائي **أنه كمية الشحنة التي تعبر مقطع موصل في وحدة الزمن.**

ويُعبر رياضيًا عن متوسط **التيار الكهربائي** (Average Electric Current) بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\bar{ت} = \frac{\Delta ش}{\Delta ز} \quad \text{.......} \quad (٣-٧)$$

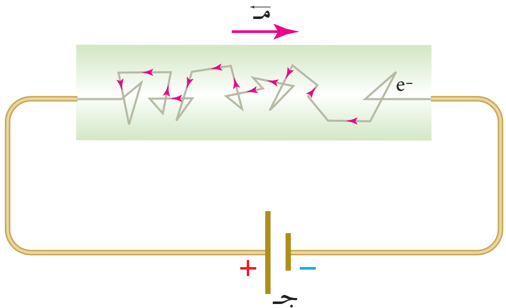
حيث ($\bar{ت}$): متوسط التيار الكهربائي، و(Δش) كمية الشحنة التي تعبر مقطع الموصل في الفترة الزمنية Δز.

ويقاس التيار الكهربائي بوحدة (كولوم/ثانية) وفي النظام العالمي للوحدات تُسمى أمبير، ويعرف الأمبير بأنه **التيار الكهربائي الذي يسري في موصل عندما يعبر مقطعه كمية من الشحنة مقدارها ١ كولوم في ثانية واحدة.**

وقد اصطلح أن يكون اتجاه التيار الكهربائي في الموصل باتجاه حركة الشحنات الموجبة، وهو عكس اتجاه حركة الإلكترونات.

في أثناء حركتها داخل الموصل تصطدم الإلكترونات الحرة مع بعضها ومع ذرات الموصل فتتناقص سرعتها، إلاّ أن وجود المجال الكهربائي يسرّع الإلكترونات باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة فيها، فتتحرك الإلكترونات بعكس اتجاه المجال الكهربائي بمتوسط سرعة تسمى **السرعة الانسياقية** (Drift Velocity).

وهي متوسط سرعة الإلكترونات الحرة داخل الموصل عندما تنساق بعكس اتجاه المجال الكهربائي المؤثر فيها. ويُبين الشكل (٤-١) نموذجًا للمسار المتعرج للإلكترونات بسبب التصادمات.



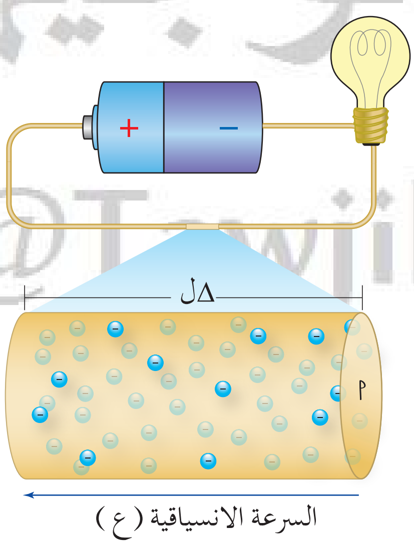
الشكل (٤-١): نموذج للمسار لمتعرج لحركة الإلكترونات نتيجة التصادمات التي تحدث في الموصل.

ولتوضيح العلاقة بين التيار الكهربائي الذي يسري في الموصل والسرعة الانسياقية للإلكترونات الحرة فيه عند ثبات درجة الحرارة، ندرس حركة الإلكترونات في موصل عدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجوم فيه (نَ) وهي ثابتة للمادة الواحدة عند ثبات درجة الحرارة، ويرمز لعدد الإلكترونات الحرة التي تعبر مقطع الموصل بالرمز (ن) حيث (ن = نَ Δح، و(Δح): حجم مقطع من الموصل طوله (Δل) ومساحة مقطعه (أ)، كما في الشكل (٤-٢)، أي أن: ن = نَ أ Δل.

إن مقدار الشحنة الموجودة في هذا الحجم: Δــ = ن ــ$_e$

حيث (ــ$_e$): شحنة الإلكترون، وبتعويض (ن)، فإن كمية الشحنة التي تعبر هذا المقطع من الموصل في فترة زمنية (Δز) تعطى بالعلاقة الرياضية الآتية: Δــ = نَ أ Δل ــ$_e$

وبقسمة طرفي العلاقة السابقة على الفترة الزمنية (Δز) نجد أن:



الشكل(٤-٢) مقطع موصل يسري فيه تيار كهربائي.

$$\frac{\Delta ــ}{\Delta ز} = ت = نَ\ أ\ ــ_e \frac{\Delta ل}{\Delta ز}$$

حيث ($\frac{\Delta ل}{\Delta ز}$): السرعة الانسياقية للإلكترونات (ع)؛ وعليه فإن التيار الكهربائي يُعطى بالعلاقة الرياضية:

ت = نَ أ ــ$_e$ ع .... (٤-٢)

وبما أن عدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجوم (نَ) في الموصلات الفلزية كبير جدًّا؛ فإن السرعة الانسياقية للإلكترونات الحرة في الموصلات الفلزية تكون صغيرة لا تتعدى بضع مليمترات في الثانية؛ بسبب العدد الهائل من التصادمات بين الإلكترونات بعضها مع بعض ومع ذرات العنصر الناقل لها. حيث تعمل هذه التصادمات على فقدان الإلكترونات لجزءٍ من طاقتها الحركية فتنتقل هذه الطاقة إلى ذرات الفلز ما يؤدي إلى زيادة اتساع اهتزازات ذرات الفلز وارتفاع درجة حرارة الموصل.

مثال (٤-١)

يسري تيار كهربائي مقداره ٤,٨ أمبير في موصل مساحة مقطعه(٠,٣مم^{٢})، إذا علمت أن عدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجوم من الموصل تساوي (١٠ × ١٠^{٢٨} إلكترون/م^{٣}) وأن سـ$_e$ = ١,٦ × ١٠$^{-١٩}$ كولوم، احسب:

١) السرعة الانسياقية للإلكترونات الحرة في هذا الموصل.

٢) عدد الإلكترونات التي تعبر مقطع الموصل في زمن مقداره ١٠ ثوان.

الحل:

١) ت = نَ أ سـ$_e$ ع

$$ع = \frac{ت}{نَ\ أ\ سـ_e}$$

$$= \frac{٤,٨}{١٠ \times ١٠^{٢٨} \times ٠,٣ \times ١٠^{-٦} \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩}}$$

ع = ١×١٠$^{-٣}$ م/ث.

٢) $$ت = \frac{\Delta سـ}{\Delta ز}$$

$$٤,٨ = \frac{\Delta سـ}{١٠} \Leftarrow \Delta سـ = ٤٨ \text{ كولوم}$$

Δسـ = ن سـ$_e$

$$ن = \frac{\Delta سـ}{سـ_e} = \frac{٤,٨}{١,٦ \times ١٠^{-١٩}} = ٣ \times ١٠^{١٨} \text{ إلكترون.}$$

مراجعة (٤-١)

١ وضح المقصود بكل من: التيار الكهربائي، والأمبير والسرعة الانسياقية.

٢ سؤال: ماذا نعني بقولنا أن التيار الذي يسري في موصل يساوي (٤) أمبير؟

٣ السرعة الانسياقية للإلكترونات الحرة في الفلزات صغيرة لا تتعدى بضعة ميليمترات في الثانية الواحدة. فسر هذه العبارة.

٤ وضح أثر التصادمات التي تحدث داخل الموصل عند مرور تيار كهربائي فيه على كل من:

أ حركة الإلكترونات.

ب ذرات الموصل.

د الموصل.

٤-٢ المقاومة الكهربائية وقانون أوم
(Electric Resistance and Ohm's Law)

يختلف التيار الكهربائي الذي يسري في موصل تبعًا لاختلاف فرق الجهد بين طرفيه، إلّا أن فرق الجهد ليس العامل الوحيد الذي يحدد قيمة التيار الكهربائي في الموصل. حيث تختلف المواد الموصلة في قابليتها لتمرير التيار الكهربائي، فالإلكترونات أثناء حركتها داخل الموصل تواجه تصادمات عدة مع بعضها ومع ذرات الموصل مما يعيق حركتها، ويُطلق على **إعاقة حركة الإلكترونات الحرة في الموصل عند مرور تيار كهربائي فيه** **المقاومة الكهربائية** (Electric Resistance).

ويمكن حساب المقاومة الكهربائية لموصل بإيجاد نسبة فرق الجهد بين طرفيه إلى التيار الكهربائي الذي يسري فيه، حسب التعريف الآتي:

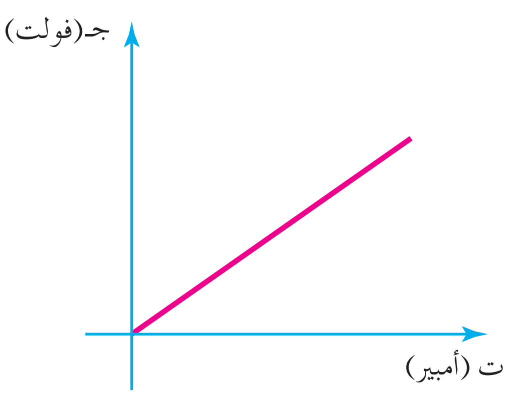
$$م = \frac{\Delta جـ}{\Delta ت} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (٤-٣).$$

حيث (م): مقاومة الموصل، و(Δجـ): فرق الجهد بين طرفي الموصل، و(Δت): التيار الكهربائي الذي يسري في الموصل.

نجد من العلاقة (٤-٣) أن المقاومة تقاس بوحدة فولت/أمبير، ووفق النظام العالمي للوحدات تسمى هذه الوحدة أوم ويُرمز لها بالرمز اللاتينيّ (Ω).

ويُعرف **الأوم** **بأنه مقاومة موصل يمر فيه تيار مقداره (١ أمبير)، عندما يكون فرق الجهد بين طرفيه (١ فولت)**.

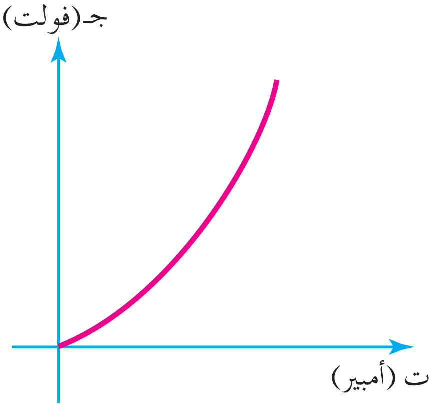
عند دراسة العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي لمقاومات فلزية مختلفة، وجد العالم (أوم) تجريبيًا أن نسبة فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة إلى التيار الكهربائي المار فيها، تبقى ثابتة بثبوت درجة حرارتها، وصاغ هذه النتيجة بقانون عُرف **بقانون أوم** (Ohm's Law) الذي ينص على **«أن التيار الكهربائي المار في موصل فلزي يتناسب طرديًّا مع فرق الجهد بين طرفيه عند ثبوت درجة حرارته»**، وتُسمى مقاومة الموصلات الفلزية التي ينطبق عليها قانون أوم **مقاومات أومية**، والشكل (٤-٣) يوضح العلاقة الخطية بين فرق الجهد والتيار الكهربائي في هذه المقاومات. لاحظ إن



الشكل(٤-٣): العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي في الموصلات الأومية.

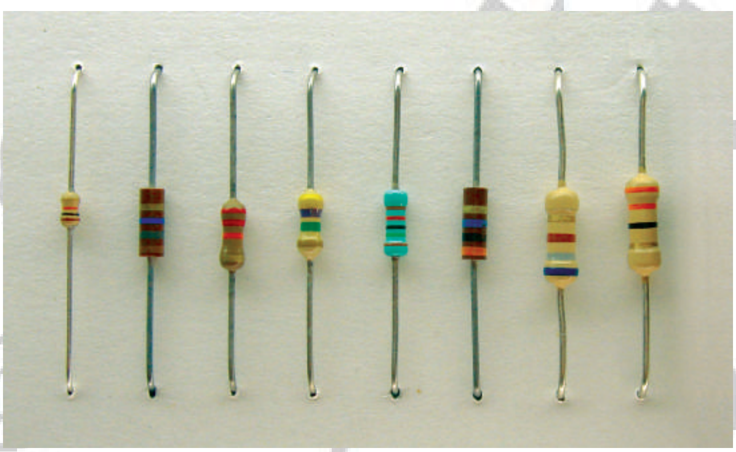
ميل المنحنى في الشكل ثابت، حيث: الميل= $\frac{\Delta \text{جـ}}{\Delta \text{ت}}$ = م وعليه تكون المقاومة ثابتة.

ويوجد مقاومات أخرى تكون نسبة فرق الجهد بين طرفيها إلى التيار الكهربائي المار فيها غير ثابتة، إذ يتغير التيار الكهربائي على نحو غير خطي بتغير فرق الجهد، وتُسمى هذه المقاومات مقاومات لا أومية، والشكل (٤-٤) يوضح أحد الأمثلة على العلاقة غير الخطية بين فرق الجهد والتيار الكهربائي لإحدى هذه المقاومات، أي أن الميل غير ثابت إذ تكون ذات مقاومة متغيرة مثل أشباه الموصلات. وستقتصر دراستنا على المقاومات الأومية.



الشكل(٤-٤):العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي في الموصلات اللاأومية

وتستخدم المقاومات بشكل كبير في الأجهزة والدارات الكهربائية للتحكم في قيمة التيار الكهربائي المار فيها وحماية بعض الأجهزة من التلف، وأكثرها استخدامًا المقاومات الكربونية التي تميّز بألوان مختلفة كما في الشكل(٤-٥) حيث تشير الألوان إلى قيمة المقاومة لكل منها ليتم اختيار المناسب منها عند الاستخدام.


الشكل(٤-٥) للمقاومات الكهربائية الكربونية ألوان مختلفة.

ومن المقاومات ما هو ثابت في المقدار ويرمز له في الدارة الكهربائية بالرمز( )، ومنها ما يُمكن تغيير مقداره في الدارة الكهربائية (ريوستات) ويُرمز له بالرمز( ).

ومن المقاومات المستخدمة في الدارات الكهربائية؛ المقاومات الفلزية وتصنع من أسلاك تختلف في الطول ومساحة المقطع، ونوع الموصل، وقد درست أن طول الموصل (ل) يؤثر في مقاومته الكهربائية فكلما زاد طول الموصل زادت فرصة حدوث تصادمات الإلكترونات الحرة فيه مع بعضها ومع ذرات الموصل، وعليه تزداد المقاومة الكهربائية؛ أي أن (م α ل)، بينما تقل مقاومة الموصل عند زيادة مساحة مقطعه (أ)؛ إذ يقل معدل حدوث التصادمات؛ أي أن (م α $\frac{1}{\text{أ}}$)، كما أن المقاومة الكهربائية تختلف باختلاف نوع مادة المقاومة الفلزية، ويمكن تلخيص هذه العوامل بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$م = \frac{\rho\, ل}{أ} \quad \text{.. .(٤−٤)}$$

حيث(ρ): المقاومية الكهربائية للمادة، وتعطى عادة عند درجة حرارة معينة للمادة؛ لأنها تتغير بتغير درجة الحرارة، وتقاس المقاومية بوحدة (Ω.م).

و**المقاومية لمادة** (Resistivity) **تساوي عدديًا مقاومة جزء من تلك المادة طولهذ(١م) ومساحة مقطعه(١م٢) عند درجة حرارة محددة.**

نشاط (٤ - ١) المقاومية الكهربائية

الهدف: ....

يبين الجدول(٤−١) قيم مقاومية بعض المواد عند درجة حرارة الغرفة (٢٠°س)، ادرس الجدول ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

- أي المواد الواردة في الجدول لها أكبر مقاومية كهربائية عند درجة حرارة ٢٠°س؟
- صنف المواد الواردة في الجدول إلى ثلاثة أنواع حسب قيم المقاومية، واعط اسماً لكل نوع.
- فسر استخدام المطاط في صناعة مقابض الأدوات المستخدمة في صيانة الأجهزة الكهربائية.

جدول(٤−١) مقاومية بعض المواد عند درجة حرارة ٢٠°س

المادة	المقاومية $\rho(\Omega \cdot m)$
فضة	1.59×10^{-8}
نحاس	1.68×10^{-8}
ذهب	2.44×10^{-8}
ألمنيوم	2.65×10^{-8}
تنجستن	5.6×10^{-8}
حديد	9.71×10^{-8}
بلاتين	10.6×10^{-8}
زئبق	98×10^{-8}
نيكروم (سبيكة Cr, Fe, Ni)	100×10^{-8}
كربون (جرافيت)	$(3-60) \times 10^{-5}$
جرمانيوم	$(1-500) \times 10^{-3}$
سيليكون	$0.1-60$
زجاج	$10^{9} - 10^{12}$
مطاط قاس	$10^{13} - 10^{15}$

تلاحظ من قيم المقاومية الكهربائية الواردة في الجدول (٤−١)، أن المواد تصنف إلى ثلاثة أنواع حسب قيم المقاومية الكهربائية، وهي المواد الموصلة ذات المقاومية الكهربائية الصغيرة (الفضة، والنحاس، والحديد)، وشبه الموصلة ذات المقاومية المتوسطة (الكربون والجرمانيوم والسيليكون)، والمواد العازلة وهي المواد ذات قيم المقاومية العالية (الخشب الجاف والزجاج والمطاط)، وأن الموصلات الفلزية لها قيم مقاومية كهربائية أقل بكثير من مقاومية أشباه الموصلات والمواد العازلة،

أي أن توصيلها للكهرباء جيد، وكذلك فإن ارتفاع مقاومية المواد العازلة يفسر استخدام بعضها كالمطاط مثلًا، في صناعة مقابض أدوات صيانة الأجهزة الكهربائية.

وقد وُجد عمليًّا أن قيم المقاومية للموصلات الفلزية تزداد بزيادة درجة حرارتها، وذلك بسبب زيادة الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة فيها مما يؤدي إلى المزيد من التصادمات. وتقل المقاومية بنقصان درجة حرارتها.

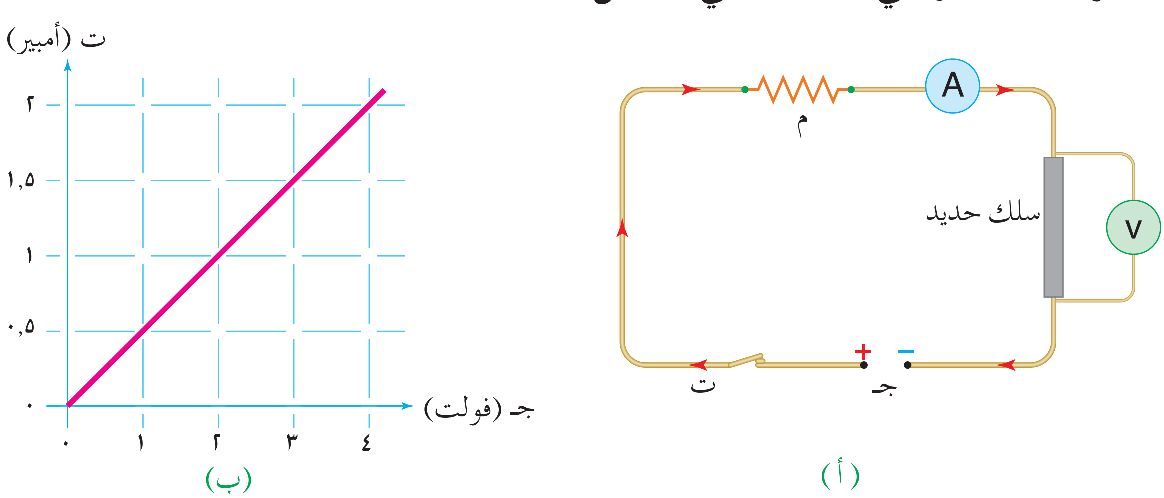
وقد تؤول قيم المقاومية والمقاومة الكهربائية لبعض المواد بشكلٍ مفاجئ إلى الصفر عند درجة حرارة منخفضة جدًّا، عندها تُصبح تلك المواد فائقة الموصلية(Super Conductors).

ومع تقدم علم المواد الفائقة الموصلية، استخدمت في نقل الطاقة وتخزينها من دون ضياع يذكر. وفي إنتاج مغانط ذات مجالات مغناطيسية قوية تُستخدم في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي (Magnetic Resonance Imaging) MRI، كما تُستخدم في القطارات السريعة.

ولصعوبة تبريد الموصلات وارتفاع التكلفة المادية لتصبح فائقة الموصلية؛ فإن بحوث العلماء ينصب على إنتاج مواد فائقة الموصلية في درجات الحرارة العادية.

مثال (٤-٢)

في تجربة لقياس مقاومة سلك من الحديد طويل وملفوف على بكرة، مساحة مقطعه ١مم^{2}، وصل طالب طرفي السلك في دارة كهربائية كما في الشكل(٤-٦/أ).
ثم قام بأخذ قراءات مختلفة لتيار الدارة وفرق الجهد بين طرفي السلك، ومثل العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي بيانيًا كما في الشكل(٤-٦/ب):



الشكل (٤-٦): مثال (٤-٢).

١) جد مقاومة السلك.

٢) إذا علمت أن مقاومية الحديد= ١٠×١٠^{-٨} Ω.م، جد طول السلك الذي استخدمه الطالب.

٣) إذا استخدم الطالب جزءًا من اللفة طوله ٢م، فجد مقاومة هذا الجزء ومقاوميته، إذا علمت أن درجة حرارته ثابتة.

الحل:

١) من الشكل (٤-٦/ب) يظهر أن ميل المنحنى = $\frac{\Delta ت}{\Delta جـ} = \frac{١}{٢}$

ميل المنحنى = $\frac{٢-١}{٤-٢} = \frac{١}{٢} \Leftarrow م = ٢\Omega$

٢) $م = \frac{\rho ل}{أ}$

$ل = \frac{م \times أ}{\rho} = \frac{٢ \times ١ \times ١٠^{-٦}}{١٠ \times ١٠^{-٨}}$

$ل = ٢٠م$

٣) بما أن المقاومية تعتمد فقط على درجة الحرارة ونوع مادة الموصل؛ فإنها تبقى ثابتة عند تغيير طول الموصل.

أما مقاومة ٢م من السلك: بما أن المقاومة تتناسب طرديًا مع طول الموصل فإن:

$\frac{ل}{م} = \frac{م}{لَ} \Leftarrow م لَ = ل مَ$

$٢ \times ٢ = ٢٠ مَ \Leftarrow مَ = ٠,٢ \ \Omega$.

مراجعة (٤-٢)

١) ما المقصود بكل من: المقاومة الكهربائية، الأوم، والمقاومية؟

٢) ماذا نعني بقولنا إن:

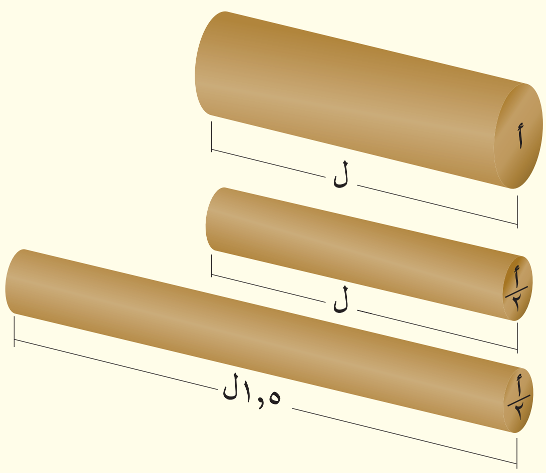
أ) مقاومة موصل تساوي (٣) أوم؟

ب) مقاومية الحديد تساوي ($٩,٧١ \times ١٠^{-٨}$ Ω.م) عند درجة حرارة (٢٠°س)؟

٣) ما أثر زيادة كل من: طول الموصل ومساحة مقطعه ودرجة حرارته على كل من:

أ) مقاومة الموصل ب) مقاومية مادته.

٤) ثلاثة موصلات نحاسية تختلف عن بعضها بمساحة المقطع (أ) والطول (ل) كما يوضح الشكل (٤-٧)، رتب الموصلات تنازليًا حسب التيار المار في كل منها، عند وصل طرفيّ كل منها بمصدر فرق جهد (جـ).

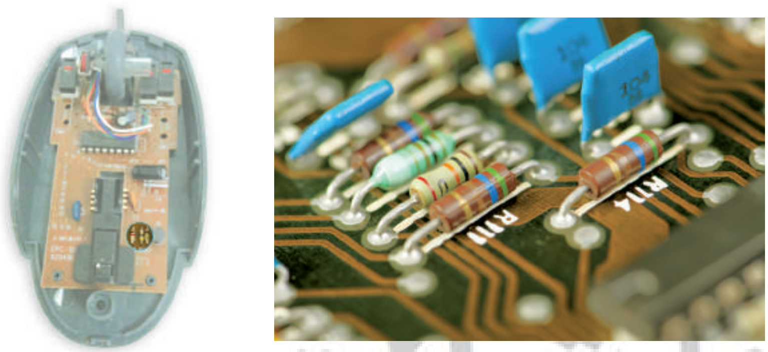


الشكل (٤-٧): سؤال (٤).

٤–٣ توصيل المقاومات الكهربائية
Combination of Electric Resistors

تستخدم المقاومات الكهربائية في الأجهزة على نطاق واسع، فإذا تمكنت من فتح جهاز كهربائي كجهاز التحكم عن بعد للتلفاز مثلًا، ستجد الكثير من المقاومات وُصلت بطرائق مختلفة كما في الشكل(٤–٨)، ويعود سبب الاختلاف في طريقة التوصيل إلى اختلاف الغاية من الاستخدام.

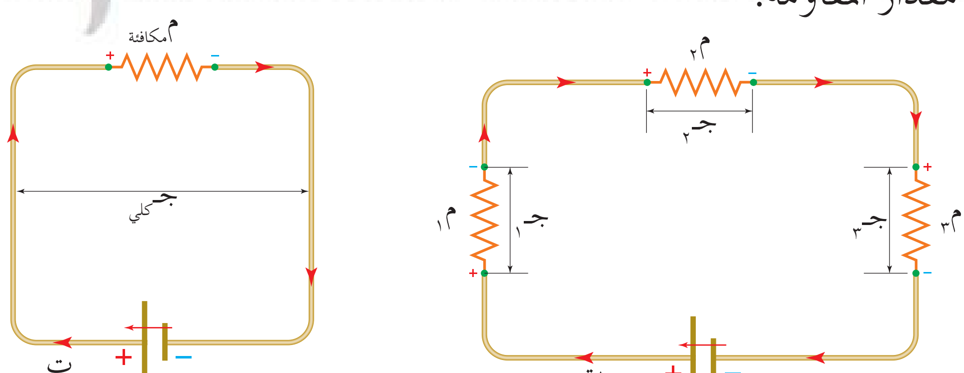
وبشكلٍ عام توصل المقاومات في الدارات الكهربائية بطريقتين، لكل منها استخدامات وخصائص مختلفة وهما:



الشكل (٤–٨): توصيل المقاومات في الأجهزة الكهربائية.

(٤–٣–١) التوصيل على التوالي Series Combination

توصل المقاومات بطريقة التوالي بحيث يمر التيار الكهربائي (ت) نفسه في المقاومات جميعها الواحدة تلو الأخرى كما في الشكل (٤–٩)، ويكون مجموع فروق الجهد للمقاومات جميعها مساويًا فرق جهد المصدر ($\text{جـ}_{\text{الكلي}} = \text{جـ}_{١} + \text{جـ}_{٢} + \text{جـ}_{٣}$)، حيث يتجزأ فرق جهد المصدر بنسبة طردية مع مقدار المقاومة.



الشكل(٤–٩) توصيل المقاومات على التوالي.

ويمكن استبدال مقاومة واحدة بالمقاومات الثلاث تسمى المقاومة المكافئة ($\text{م}_{\text{المكافئة}}$) إذ يكون لها تأثير المقاومات الثلاث معًا في الدارة. وبما أن جـ = ت م، ولأن التيار نفسه يمر في المقاومات جميعها فإن:

$$\text{جـ}_{\text{الكلي}} = \text{جـ}_{1} + \text{جـ}_{2} + \text{جـ}_{3}$$

$$\text{ت} \times \text{م}_{\text{المكافئة}} = \text{ت م}_{1} + \text{ت م}_{2} + \text{ت م}_{3}$$

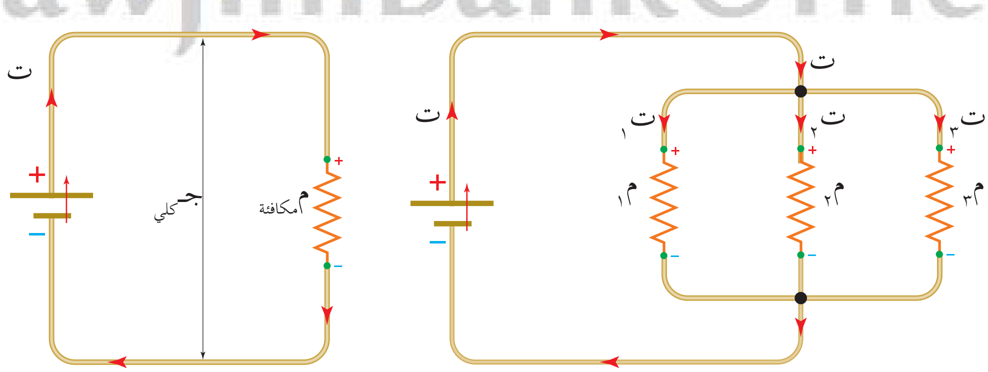
وباختصار (ت) تصبح العلاقة:

$$\text{م}_{\text{المكافئة}} = \text{م}_{1} + \text{م}_{2} + \text{م}_{3} \quad \text{.................................} \quad (\text{٤}-\text{٥})$$

نجد من العلاقة (٤–٥) أن المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة معًا على التوالي تكون أكبر من أكبر مقاومة في المجموعة. وأهم خصائص التوصيل على التوالي؛ أنه إذا قطع سلك إحدى المقاومات الموصولة على التوالي، فإن مرور التيار الكهربائي يتوقف فيها جميعًا، ويعمل التوصيل على التوالي على تقليل التيار الكهربائي المار في الدارة وتجزئة الجهد. ومن أهم الأمثلة على توصيل الأجهزة على التوالي، توصيل جهاز الأميتر ذي المقاومة الصغيرة جدًّا على التوالي في دارة ليقيس التيار الكهربائي دون أن يؤثر فيه بصورة ملموسة.

(٤–٣–٢) التوصيل على التوازي *Parallel Combination*

توصل المقاومات بطريقة التوازي بحيث تشترك المقاومات في نقطتي البداية والنهاية وتكون كل مقاومة في فرع كما في الشكل (٤–١٠)، ويكون فرق الجهد بين طرفي كل فرع مساويًا فرق الجهد بين طرفي أي فرع آخر، ويتجزأ تيار الدارة (ت) بين هذه المقاومات ويكون مجموع تيارات الفروع مساويًا تيار المصدر ($\text{ت} = \text{ت}_{1} + \text{ت}_{2} + \text{ت}_{3}$).



الشكل (٤–١٠) توصيل المقاومات على التوازي.

ويمكن استبدال مقاومة واحدة بهذه المقاومات لها يكون لها الجهد نفسه، ويمر فيها التيار نفسه، ولحساب هذه المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة على التوازي، نستخدم العلاقة الآتية:

$$ت = ت_١ + ت_٢ + ت_٣$$

$$\frac{جـ_{الكلي}}{م_{المكافئة}} = \frac{جـ_١}{م_١} + \frac{جـ_٢}{م_٢} + \frac{جـ_٣}{م_٣}$$

وبما أن فرق الجهد بين طرفي الفروع متساوٍ ($جـ_{الكلي}=جـ_١=جـ_٢=جـ_٣$) فإن:

$$\frac{١}{م_{المكافئة}} = \frac{١}{م_١} + \frac{١}{م_٢} + \frac{١}{م_٣} \quad .... \quad (٤-٦)$$

تُعطي العلاقة (٤-٦) مقلوب المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة على التوازي، لذا تكون المقاومة المكافئة أصغر من أصغر مقاومة في المجموعة، ومن خصائص توصيل المقاومات على التوازي؛ أنه إذا قطع سلك إحدى المقاومات، يتوقف مرور التيار الكهربائي في تلك المقاومة فقط، أما باقي الدارة فإنها تبقى تعمل.

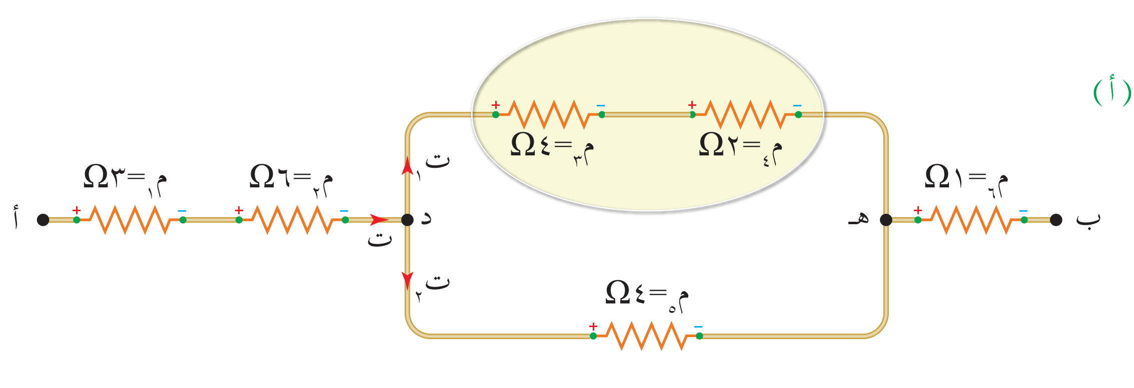
وتُتبع هذه الطريقة في التوصيل إذا أردنا تجزئة التيار الكهربائي المار في الدارة. ومن أهم تطبيقات توصيل المقاومات على التوازي، توصيل جهاز الفولتميتر الذي يمتاز بمقاومته الكبيرة جدًّا في الدارة ليقيس فرق الجهد بين طرفي أي عنصر دون أن يؤثر في التيار المار فيه. وتستخدم طريقة التوصيل على التوازي أيضًا في توصيل الأجهزة الكهربائية التي تعمل على فرق الجهد نفسه ومصابيح الإنارة في المنازل.

مثال (٤-٣)

وُصلت مجموعة من المقاومات كما في الشكل (٤-١١/أ)، اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل أجب عن الأسئلة الآتية:

١) هل يمكننا القول إن المقاومة $م_٣$ موصولة على التوازي مع $م_٥$؟ لماذا؟

٢) جد المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات بين النقطتين (أ، ب).



الشكل (٤-١١): مثال (٤-٣).

الحل:

١) لأن المقاومتان ($م_{٣}$، و$م_{٥}$) اشتركتا في نقطة البداية، و لم تشتركا في نقطة النهاية، فالمقاومة ($م_{٣}$) متصلة مع ($م_{٤}$) على التوالي من نقطة التفرع د.

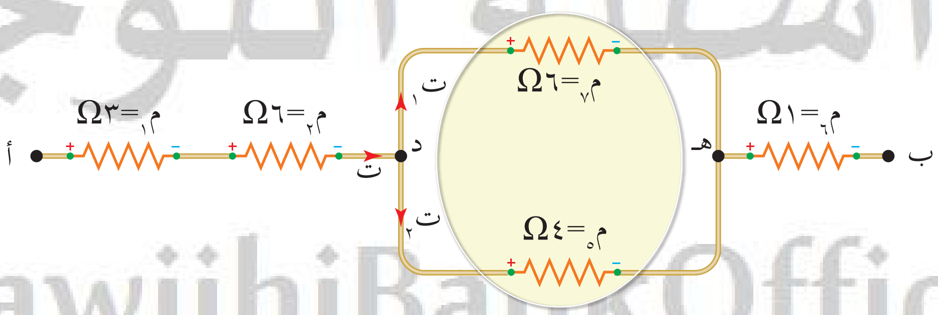
٢) لإيجاد المقاومة المكافئة يبسط الشكل فنبدأ بالفروع ومن الشكل المحاط يتبين أن ($م_{٣}$، $م_{٤}$) موصولتان على التوالي ومكافئتهما سنسميها ($م_{٧}$) أي أن:

$$م_{٧} = م_{٣} + م_{٤}$$

$$م_{٧} = ٤ + ٢ = ٦\Omega$$

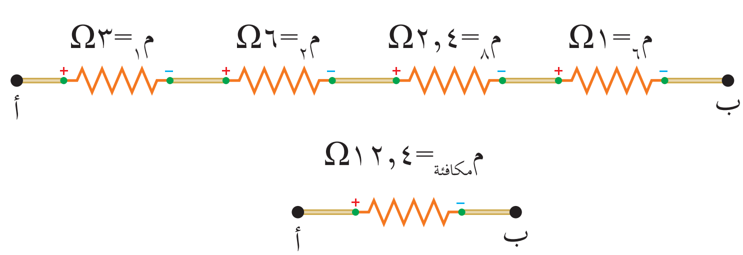
($م_{٧}$، $م_{٥}$) موصولتان على التوازي ومكافئتهما $م_{٨}$ (لاحظ أنه يسري فيهما تيار مختلف، حيث يتجزأ التيار الكهربائي عند نقطة التفرع (د) ويعود ليجتمع عن النقطة (هـ)).

$$\frac{١}{م_{٨}} = \frac{١}{٦} + \frac{١}{٤} \Leftarrow م_{٨} = \frac{٢٤}{١٠} = ٢,٤\Omega$$



(ب)

ومن الشكل (٤-١١/جـ) نلاحظ أن ($م_{١}$، $م_{٢}$، $م_{٨}$، $م_{٦}$) موصولة على التوالي ويمكن حساب المقاومة المكافئة بين النقطتين (أ، ب):



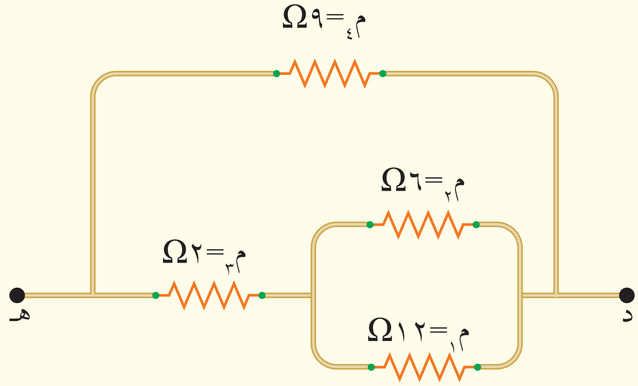
(جـ)

$$م_{مكافئة} = م١ + م٢ + م٨ + م٦$$

$$= ٣ + ٦ + ٢,٤ + ١ = ١٢,٤\Omega$$

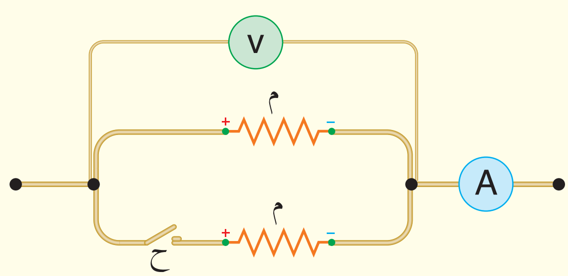
مراجعة (٤-٣)

١) احسب المقاومة المكافئة بين النقطتين (د، هـ) لمجموعة المقاومات في الشكل (٤-١٢).



الشكل (٤-١٢): سؤال (١).

٢) في الشكل(٤-١٣)، ماذا يحدث لقراءة كل من الأميتر والفولتميتر بعد إغلاق المفتاح؟



الشكل (٤-١٣): سؤال (٢).

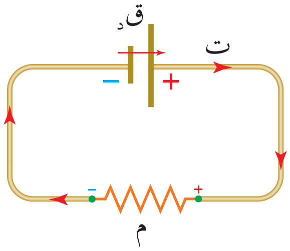
٣) فسر العبارات الآتية:

أ) توصل المصابيح في المنازل على التوازي.

ب) يكون التيار الكهربائي الكلي لدارة مقاوماتها موصولة على التوالي أقل من التيار الكلي في الدارة نفسها عند وصل المقاومات على التوازي.

٤-٤ القوة الدافعة الكهربائية
(Electromotive Force)

عند دراستك أجزاء دارة كهربائية مغلقة، تجد أن البطارية تؤدي مهمة أساسية في إدامة التيار الكهربائي فيها، فعند وصل جهاز كهربائي (مقاومة) مع بطارية كما في الشكل (٤-١٤) يسري في الدارة تيار كهربائي، ويبين الشكل اتجاه التيار الاصطلاحي الذي يعبر عن اتجاه حركة الشحنات الموجبة.



الشكل (٤-١٤): اتجاه حركة الشحنات الموجبة.

تعد البطارية مصدرًا يزود الدارة بالطاقة الكهربائية؛ إذ تعمل الطاقة الكيميائية المتحررة من التفاعلات الكيميائية داخل البطارية على جعل أحد قطبيها موجبًا والآخر سالبًا، فينشأ فرق في الجهد الكهربائي بين طرفيها يؤدي إلى دفع الشحنات الموجبة من القطب الموجب، عبر الأسلاك، مرورًا بالمقاومة ونحو القطب السالب للبطارية. وكي تتابع الشحنات حركتها داخل البطارية من القطب السالب ذي الجهد المنخفض، إلى القطب الموجب ذي الجهد المرتفع؛ تبذل البطارية شغلاً على الشحنات فتنقل إليها الطاقة على شكل طاقة وضع كهربائية، ليتم استهلاك هذه الطاقة عبر عناصر الدارة من مقاومات أو أجهزة. ومن ثم تعود الشحنات إلى القطب السالب للبطارية لتزويدها بالطاقة ودفعها نحو القطب الموجب من جديد. وتعمل البطارية على نقل كمية ثابتة من الشحنة، والمحافظة على قيمة ثابتة للتيار عند أجزاء الدارة جميعها، فالتيار لا يتلاشى أو يتوقف إلاّ عند فتح الدارة الكهربائية؛ حيث ينعدم المجال الكهربائي ويتوقف إمداد الشحنات بالطاقة، أو عندما تستهلك الطاقة المختزنة في البطارية، وهنا إمّا أن تستبدل البطارية أو أن يعاد شحنها كما في بطارية الهاتف النقال.

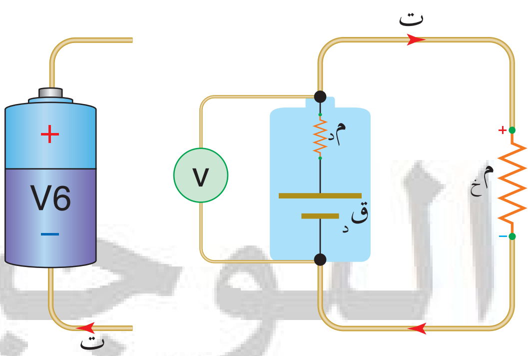
ويُعرف الشغل الذي تبذله البطارية لدفع وحدة الشحنات الموجبة من القطب السالب إلى القطب الموجب داخلها **بالقوة الدافعة الكهربائية (Electromotive Force)**، ويُرمز لها بالرمز ($ق_د$)، ويُعبر عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ق_د = \frac{ش}{سـ} \quad \text{.................................} \quad (٤-٧)$$

حيث (ش): الشغل الذي تبذله البطارية، (س): كمية الشحنة المنقولة، والقوة الدافعة الكهربائية كمية قياسية تقاس في النظام العالمي للوحدات بوحدة **فولت** والتي تكافئ (جول/كولوم)، **ويعبر عن اتجاه دفع البطارية للشحنات داخلها من قطبها السالب إلى قطبها الموجب بسهم فوق رمز البطارية في الدارات الكهربائية.** (ق$_{\text{د}}$).

وتستهلك معظم الطاقة التي تنتجها البطارية في المقاومات الخارجية (م$_{\text{خ}}$)، إلا أن جزءًا صغيرًا من الطاقة التي تنتجها البطارية يستهلك داخلها، لوجود مقاومة تعيق حركة الشحنات عند مرورها عبر البطارية وتسمى هذه المقاومة المقاومة الداخلية للبطارية ويرمز لها بالرمز (م$_{\text{د}}$).

ولتوضيح أثر المقاومة الداخلية، افترض أن لديك بطارية كتب عليها (٦) فولت، ووصلت ضمن دارة كما في الشكل (٤–١٥)، ووصل طرفا البطارية بفولتميتر، فماذا يقرأ الفولتميتر؟



الشكل(٤–١٥): فرق الجهد بين قطبي البطارية.

يمثل الرقم المكتوب على البطارية القوة الدافعة الكهربائية، وعندما تكون الدارة مغلقة نجد أن قراءة الفولتميتر تكون أقل من قيمة القوة الدافعة الكهربائية للبطارية بمقدار (ت مد)؛ بسبب استهلاك جزء من الطاقة التي تنتجها البطارية في المقاومة الداخلية للبطارية، ويعبّر عن الفرق بين قراءة الفولتميتر والقوة الدافعة الكهربائية بالهبوط في جهد البطارية، ويمكن التعبير عن فرق الجهد بين قطبي البطارية بالعلاقة الآتية:

$$\text{جـ}_{\text{أب}} = \text{ق}_{\text{د}} - \text{ت م}_{\text{د}} \quad \text{.................} \quad (\text{٤–٨})$$

حيث (ت م$_{\text{د}}$): جهد المقاومة الداخلية (جـ$_{\text{د}}$) وهو الهبوط في الجهد.

ونستنتج من العلاقة (٤–٨) أن فرق الجهد بين قطبي البطارية يكون مساويًا قوتها الدافعة الكهربائية في حالتين؛ عندما تكون المقاومة الداخلية للبطارية مهملة (م$_{\text{د}}$ = ٠)، أوعندما تكون الدارة مفتوحة (ت=٠) والبطارية موصولة مع الفولتميتر؛ إذ تعدّ مقاومة الفولتميتر كبيرة، فيؤول التيار عبرها إلى الصفر، عندئذ يقرأ الفولتميتر القوة الدافعة الكهربائية.

مراجعة (٤-٤)

١ ماذا نعني بقولنا إن القوة الدافعة الكهربائية لبطارية ١,٥ فولت ؟

٢ فسر: يتلاشى التيار الكهربائي عند فتح الدارة الكهربائية.

٣ اذكر حالتين يكون فيهما فرق الجهد بين قطبي البطارية مساويًا قوتها الدافعة الكهربائية.

٤ دارة كهربائية تتكون من بطارية ومقاومة ومفتاح، يتصل بين طرفي البطارية فولتميتر. إذا كانت قراءة الفولتميتر والمفتاح مفتوح (١٢) فولت، وعند إغلاق المفتاح تصبح (٩) فولت. فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ ماذا تمثل قراءة الفولتميتر والمفتاح مفتوح؟

ب إذا كانت المقاومة الداخلية للبطارية (١) Ω، فما مقدار التيار الكهربائي المار في الدارة؟

القدرة الكهربائية

Electric Power

تعرف **القدرة** بأنها **الشغل المبذول** (ش) **في وحدة الزمن** (ز) ويعبر عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{القدرة} = \frac{\text{ش}}{\text{ز}} \quad \text{.................} \quad (٤-٩)$$

وتقاس القدرة بوحدة (جول/ثانية) وتعرف هذه الوحدة في النظام العالمي للوحدات بالواط.

وبما أن البطارية في دارة مغلقة تبذل شغلًا لتحريك الشحنات عبر الدارة فإن المعدل الزمني للشغل الذي تبذله البطارية يعبر عن القدرة المنتجة من البطارية، ويمكن حساب هذه القدرة من العلاقة (٤-٨): $\text{ش} = \text{ق}_\text{د}\,\text{س}$

وبقسمة طرفي المعادلة على زمن نقل الشحنة ز: $\frac{\text{ش}}{\text{ز}} = \text{ق}_\text{د}\,\frac{\text{س}}{\text{ز}}$

وحيث إن القدرة = $\frac{\text{ش}}{\text{ز}}$ ، وت = $\frac{\text{س}}{\text{ز}}$ فإن القدرة الكهربائية التي تنتجها البطارية تُعطى بالعلاقة الرياضية:

$$\text{قدرة}_{\text{البطارية}} = \text{ق}_\text{د}\,\text{ت} \quad \text{.................} \quad (٤-١٠)$$

تعبر قدرة البطارية عن الطاقة المنتجة منها في وحدة الزمن. وتستهلك هذه الطاقة عبر مقاومات الدارة الداخلية والخارجية، وتظهر بأشكال مختلفة، فمثلًا في المصباح الكهربائي تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ضوئية وطاقة حرارية، وفي ملفات التسخين تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية.

وللتوصل إلى علاقة لحساب القدرة المستهلكة في مقاومة، فإننا نحسب الشغل (ش) الذي تبذله البطارية لتنقل شحنة (س) عبر مقاومة (م) فرق الجهد بين طرفيها (جـ) من العلاقة:

$\text{ش} = \text{جـ}\,\text{س}$

وبقسمة طرفي المعادلة على زمن عبور الشحنات (ز): $\frac{\text{ش}}{\text{ز}} = \text{جـ}\,\frac{\text{س}}{\text{ز}}$

ومن تعريف القدرة، والتيار الكهربائي نجد أن:

$$\text{القدرة}_{\text{المستهلكة في مقاومة}} = \text{جـ}\,\text{ت} \quad \text{.................} \quad (٤-١١)$$

وباستخدام قانون أوم (جـ = ت م) يمكن التعبير عن القدرة المستهلكة في مقاومة بصيغتين مكافئتين لهذه العلاقة كما يأتي:

القدرة = $\text{ت}^{2} \times \text{م}$

أو القدرة = $\frac{\text{جـ}^{2}}{\text{م}}$

ومن قانون حفظ الطاقة؛ فإن القدرة التي تنتجها البطارية ($\text{ق}_{\text{د}}\ \text{ت}$)، تكون مساويةً القدرة التي تستهلكها مقاومات الدارة الداخلية والخارجية أي أن: القدرة المنتجة = القدرة المستهلكة ويمكن التعبير عن هذه العلاقة بالصورة الآتية:

$$\text{ق}_{\text{د}}\ \text{ت} = \text{ت}^{2}\,\text{م}_{\text{د}} + \text{ت}^{2}\,\text{م}_{\text{خ}} \quad \text{.............................. (٤-١٢)}$$

إن معرفتنا للقدرة المستهلكة في جهاز كهربائي تمكننا من حساب الطاقة التي يستهلكها الجهاز عند تشغيله فترة من الزمن. فمثلًا إذا كتب على مصباح (٦٠واط، ١٢٠فولت) فهذا يعني أن المصباح يستهلك (١٢٠) جول من الطاقة كل ثانية وذلك عند وصله مع مصدر فرق جهد (١٢٠) فولت. وتكون الطاقة المستهلكة فيه عند تشغيله لمدة من الزمن:

$$\text{ط} = \text{القدرة} \times \text{الزمن} \quad \text{.............................. (٤-١٣)}$$

فإذا كانت القدرة مقيسة بوحدة الواط (جول/ ث) وزمن استهلاك الطاقة بالثواني فإن الطاقة تكون بوحدة الجول. أما إذا كانت القدرة بالكيلواط والزمن بالساعات فإن الطاقة المحسوبة تكون بوحدة الكيلوواط.ساعة؛ وهي الوحدة التي تستخدمها شركات الكهرباء عالميًا لقياس الطاقة المستهلكة لحساب أثمانها.

مثال (٤-٤)

وُصل مجفف شعر مع مصدر فرق جهد كهربائي مقداره ٢٠٠ فولت، إذا كانت قدرة المجفف ١كيلو واط، احسب:

١) مقاومة ملف مجفف الشعر.

٢) الطاقة الحرارية المتولدة عند تشغيله لمدة ١٥ دقيقة بوحدة كيلوواط.ساعة.

الحل:

١) القدرة = $\frac{\text{جـ}^{2}}{\text{م}}$

$1 \times 10^{3} = \frac{(200)^{2}}{\text{م}}$

$$م = \frac{٤٠٠٠٠}{١٠٠٠}$$

م = ٤٠ Ω

٢ ط = القدرة × ز ، لتحويل الدقائق إلى ساعات نقسم على ٦٠؛ حيث إن ١٥ دقيقة = ٠,٢٥ ساعة

ط = ١ × ٠,٢٥ = ٠,٢٥ كيلو واط.ساعة

مثال (٤-٥)

مدفأة كهربائية، صُنع ملف التسخين فيها من النيكروم، إذا كانت مقاومة الملف تساوي ٢٢ Ω، وكان الملف متجانسًا، فجد المعدل الزمني للطاقة المستهلكة في الملف في الحالتين الآتيتين:

١ إذا وصلت المدفأة إلى مصدر فرق جهد ٢٢٠ فولت.

٢ إذا قُطع ملف التسخين إلى نصفين، ثم وُصل أحد جزئيه إلى فرق جهد ٢٢٠ فولت.

الحل:

١ المعدل الزمني للطاقة المستهلكة يمثل القدرة

$$\text{القدرة} = \frac{\text{جـ}^{٢}}{\text{م}}$$

$$\text{القدرة} = \frac{٢٢٠^{٢}}{٢٢} = ٢٢٠٠ \text{ واط}$$

٢ عند قطع ملف التسخين إلى نصفين؛ فإن مقاومة كل جزء تصبح:

$$\text{مَ} = \frac{٢٢}{٢} = ١١\Omega$$

$$\text{القدرة} = \frac{\text{جـ}^{٢}}{\text{م}}$$

$$= \frac{٢٢٠^{٢}}{١١} = ٤٤٠٠ \text{ واط}$$ (ضعف معدل استهلاك طاقة الملف كاملًا).

أي أن المعدل الزمني لاستهلاك الطاقة (القدرة) يزداد بنقصان المقاومة، وذلك بسبب زيادة التيار الكهربائي المار في الجهاز عند ثبوت فرق الجهد بين طرفيه.

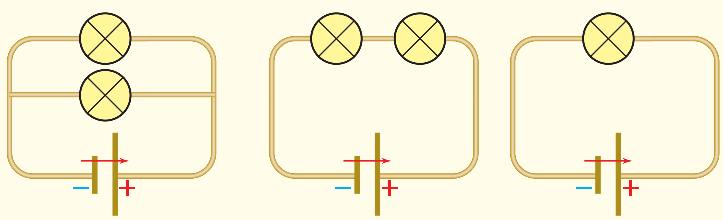
مراجعة (٤-٥)

١ ماذا نعني بقولنا إن قدرة مجفف الشعر ٢ كيلو واط؟

٢ فسر يُستهلك جزء صغير من القدرة التي تنتجها البطارية داخل البطارية نفسها.

٣ جد الطاقة المكافئة للكيلوواط.ساعة بوحدة الجول.

٤ يبين الشكل (٤-١٦) خمسة مصابيح متماثلة، وصلت مع ثلاث بطاريات متماثلة مقاومتها الداخلية مهملة. رتب المصابيح تصاعديًّا من حيث القدرة المستهلكة فيها.

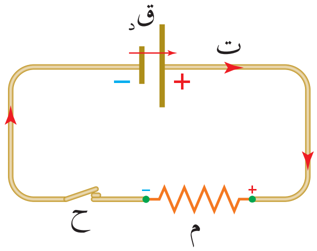


الشكل (٤-١٦): سؤال (٤).

٤-٦ معادلة الدارة الكهربائية البسيطة

Simple Electric Circuit Equation

تشكل البطارية والمقاومات والأسلاك والمفتاح أجزاء مهمة في الدارة الكهربائية، حيث يُمكن توصيل أجزاء الدارة بطرائق مختلفة حسب الغاية من الاستخدام، ويُطلق اسم الدارة الكهربائية البسيطة على الدارة الكهربائية التي يمكن تبسيطها واختصارها في عروة واحدة كما في الشكل (٤-١٧) بحيث يسري فيها تيار واحد. وفي ما يأتي سندرس معادلة الدارة الكهربائية البسيطة وتغيرات الجهد عبر أجزائها.



الشكل (٤-١٧): الأجزاء الأساسية في الدارة الكهربائية البسيطة.

توصلنا في البند السابق إلى أن القدرة التي تنتجها البطارية في الدارة المغلقة، تستهلك في مقاومات الدارة الداخلية والخارجية، ومن العلاقة: $\text{ق}_{\text{د}}\,\text{ت} = \text{ت}^2\text{م}_{\text{د}} + \text{ت}^2\text{م}_{\text{خ}}$

وبقسمة طرفي المعادلة على (ت) وإعادة ترتيب العلاقة الرياضية نجد أن: $\text{ت} = \dfrac{\text{ق}_{\text{د}}}{(\text{م}_{\text{د}} + \text{م}_{\text{خ}})}$

فإذا احتوت الدارة الكهربائية البسيطة على أكثر من بطارية وأكثر من مقاومة خارجية، فإن:

$\text{ت} = \dfrac{\sum \text{ق}_{\text{د}}}{\sum \text{م}_{\text{د}} + \sum \text{م}_{\text{خ}}}$ ، وبصورة عامة:

$$\text{ت} = \frac{\sum \text{ق}_{\text{د}}}{\sum \text{م}} \quad \text{.................................} \quad (٤-١٤)$$

ويطلق على العلاقة (٤-١٤) معادلة الدارة الكهربائية البسيطة. حيث($\sum \text{ق}_{\text{د}}$) هو المجموع الجبري للقوى الدافعة الكهربائية في الدارة.

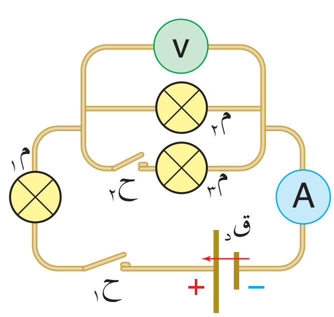
ولتعرف أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة ادرس النشاط الآتي:

نشاط (٤-٢) الدارة الكهربائية البسيطة

الهدف: أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة.

المواد والأدوات: ثلاثة مصابيح متماثلة، أميتر، فولتميتر، مصدر فرق جهد (بطارية)، مفتاحان كهربائيان، أسلاك توصيل.

خطوات تنفيذ النشاط:



الشكل (٤-١٨): نشاط (٤-٢).

- ركب الدارة المبينة في الشكل (٤-١٨).

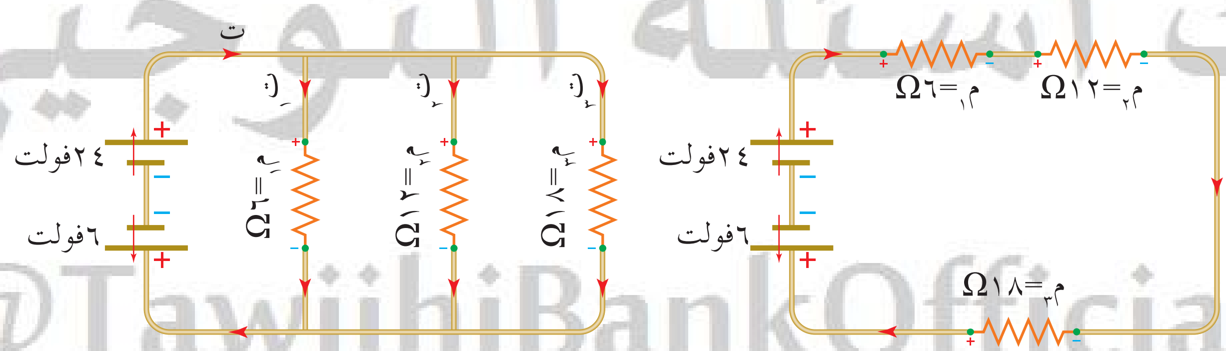
- أغلق المفتاح (ح$_{١}$) فقط، مع بقاء (ح$_{٢}$) مفتوح.
- لاحظ إضاءة المصباحين (م$_{١}$، م$_{٢}$)، هل شدة إضاءة المصباحين متماثلة؟
- سجل قراءة كل من الأميتر، والفولتميتر.
- أغلق المفتاح (ح$_{٢}$) مع بقاء (ح$_{١}$) مغلق.
- لاحظ إضاءة المصابيح الثلاثة (م$_{١}$، م$_{٢}$، م$_{٣}$)؛ ماذا حدث لشدة إضاءة المصباح (م$_{١}$)؟ ماذا عن المصباح (م$_{٢}$)؟
- سجل قراءة الاميتر، هل تغيرت؟ كيف تفسر ذلك.
- سجل قراءة الفولتميتر، هل تغيرت؟ كيف تفسر ذلك.

مثال (٤-٦)

وصلت ثلاث مقاومات على التوالي ثم وصلت على التوازي مع بطاريتين كما في الشكل (٤-١٩/أ وب)، بإهمال مقاومة أسلاك التوصيل والمقاومة الداخلية للبطاريات، جد لكل من الدارتين:

١) تيار الدارة.

٢) القدرة المستهلكة في المقاومتين (٦ ، و١٨) Ω.

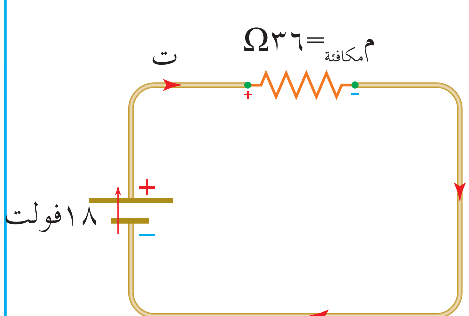


الشكل (٤-١٩): مثال (٤-٦).

الحل:

أوّلًا: الشكل(٤-١٨/أ)

يمكن تبسيط الدارة في الشكل(٤-١٩/أ) لتصبح كما في الشكل(٤-٢٠/أ)، حيث يتضح أنها دارة بسيطة، لاحظ أن اتجاه التيار الكهربائي يكون باتجاه دفع الشحنات للبطارية الأكبر(في المثال هي باتجاه دفع قد$_{٢}$= ٢٤ فولت) وبما أن اتجاه دفع الشحنات للبطارية (٢٤ فولت) بعكس اتجاهها للبطارية (٦ فولت)



الشكل(٢-٢٠/أ) مثال (٤-٦).

فإن Σ قد = قد$_{الأكبر}$ − قد$_{الأقل}$، وأن مقاومات الدارة موصولة جميعها على التوالي فإن:

١) $\text{ت} = \dfrac{\sum \text{ق د}}{\sum \text{م}}$

$= \dfrac{٢٤ - ٦}{٦ + ١٢ + ١٨}$

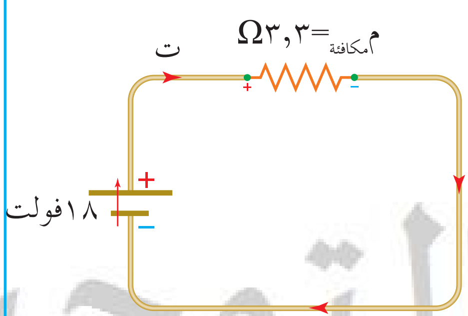
$\text{ت} = ٠{,}٥$ أمبير

٢) القدرة المستهلكة في المقاومة ٦ Ω = ت٢ م= ٠,٥ ٢ × ٦ = ١,٥ واط

القدرة المستهلكة في المقاومة ١٨ Ω = ت٢ م= ٠,٥ ٢ × ١٨ = ٤,٥ واط

ثانيًا: الشكل(٤-١٨/ب)

يمكن تبسيط الدارة في الشكل (٤-١٩/ب) لتصبح كما في الشكل (٤-٢٠/ب)، لاحظ أنها دارة بسيطة أمكن تجميع مقاوماتها المربوطة على التوازي بمقاومة واحدة وكذلك أمكن تجميع بطارياتها ببطارية واحدة (ق$_{\text{د}}$ = ٢٤ − ٦ = ١٨ فولت)



الشكل(٢-٢٠/ب) مثال (٤-٦).

١) للحصول على التيار الكهربائي في الدارة (٤-٢٠/ب) نطبق معادلة الدارة البسيطة

$\text{ت} = \dfrac{\sum \text{ق د}}{\sum \text{م}}$، (لاحظ أن المقاومات الخارجية موصولة معًا على التوازي حيث يسري في كل منها تيار كهربائي مختلف).

$\dfrac{١}{\text{م}_{\text{المكافئة}}} = \dfrac{١}{٦} + \dfrac{١}{١٢} + \dfrac{١}{١٨}$

$\text{م}_{\text{مكافئة}} = \dfrac{١٦}{١١}\,\Omega$

$\text{ت} = \dfrac{\sum \text{ق د}}{\sum \text{م}}$

$\text{ت} = \dfrac{١١ \times ١٨}{٣٦} = ٥{,}٥$ أمبير (لاحظ أنه يمكن زيادة التيار الكهربائي في دارة بوصل مقاوماتها على التوازي بدلًا من وصلها على التوالي).

٢) لحساب القدرة المستهلكة في المقاومة ٦Ω نحسب التيار المار فيها من العلاقة:

$\text{ت} = \dfrac{\text{جـ}}{\text{م}}$

$\text{ت}_{\text{المقاومة ٦}\,\Omega} = \dfrac{١٨}{٦} = ٣$ أمبير

ثم بتطبيق علاقة القدرة (ت^2 × م) نجد أن: القدرة$_{\text{المستهلكة في المقاومة ٦ }\Omega}$ = ت^2 × م

= ٣^2 × ٦ = ٥٤ واط

ويمكن حساب القدرة مباشرة من العلاقة:

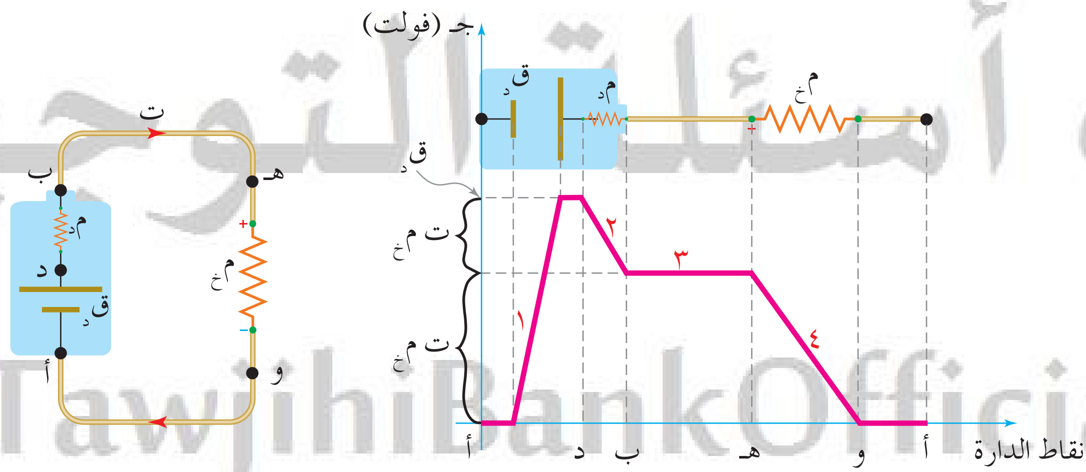
القدرة = $\frac{\text{جـ}^2}{\text{م}}$ = $\frac{١٨^2}{٦}$

القدرة = ٥٤ واط

- القدرة$_{\text{المستهلكة في المقاومة ١٨ }\Omega}$ = $\frac{\text{جـ}^2}{\text{م}}$ = $\frac{١٨^2}{١٨}$

القدرة = ١٨ واط

ويمكن تمثيل التغيرات في الجهد بيانيًا عبر أجزاء دارة كهربائية بسيطة تتكون من مقاومة خارجية وبطارية وأسلاك كما في الشكل(٤–٢٠).



الشكل(٤–٢١) تغيرات الجهد في دارة كهربائية بسيطة.

عند دراسة الشكل(٤–٢٠) تلاحظ أنه:

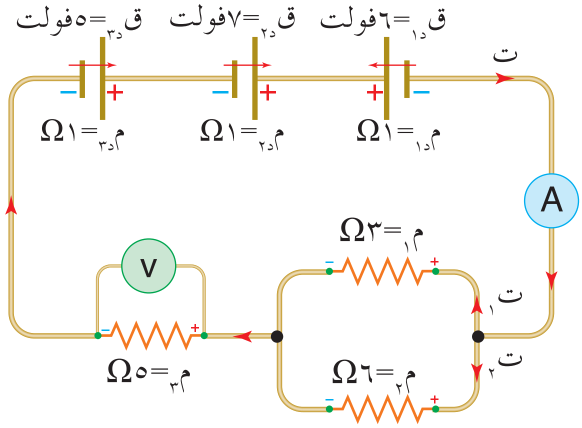
– النقطة (أ) هي الأقل جهدًا، وسنفترض أن جهدها يساوي صفرًا باعتبارها نقطة مرجعية نقيس الجهد بالنسبة إليها فإن جهد (د) أعلى من جهد (أ) بمقدار (قد) ويمثله الخط (١).

– عند الانتقال من (د) إلى(ب)، فإن الجهد ينخفض بمقدار (ت م$_د$)، ويسمى هذا المقدار الهبوط في الجهد ويمثله الخط(٢).

– إن جهد(ب) يساوي جهد(هـ) إذ إن مقاومة أسلاك التوصيل تهمل؛ لذلك يبقى الجهد ثابتًا ويُمثله الخط(٣).

– عند الانتقال من (هـ) عبر المقاومة مخ إلى(و) فإن الجهد ينخفض ثانيةً بمقدار (ت م$_{خ}$)، ويمثله الخط(٤)، وتعود قيمة الجهد ثانية إلى الصفر(جـ$_و$= جـ$_أ$).

مثال (٤-٧)



الشكل(٤-٢٢) مثال(٤-٧).

معتمدًا على بيانات الشكل (٤-٢٢) جد:

١ قراءة الأميتر (تيار الدارة).

٢ قراءة الفولتميتر (فرق الجهد بين طرفي المقاومة ٥ Ω).

٣ التيار الكهربائي المار في المقاومة ٣ Ω.

الحل:

١ تمثل قراءة الأميتر تيار الدارة وبما أن الدارة الكهربائية بسيطة يمكن حساب تيارها بتطبيق معادلة الدارة الكهربائية البسيطة (ت $= \frac{\sum \text{ق}_{\text{د}}}{\sum \text{م}}$).

لإيجاد م$_{\text{خ}}$ لاحظ أن المقاومتين (٦Ω و٣Ω) موصولتان على التوازي، ومكافئتهما(مَ) موصولة على التوالي مع(٥Ω):

$$\text{مَ} = \frac{٣ \times ٦}{٣ + ٦} = ٢\Omega$$

$$\sum \text{م}_{\text{خ}} = \text{مَ} + ٥ \Leftarrow \text{م}_{\text{خ}} = ٢ + ٥ \Leftarrow \text{م}_{\text{خ}} = ٧\Omega$$

$$\sum \text{م}_{\text{د}} = ١+١+١ \Leftarrow \text{م}_{\text{د}} = ٣\Omega.$$

$$\text{ت} = \frac{\sum \text{ق}_{\text{د}}}{\sum \text{م}_{\text{د}} + \text{م}_{\text{خ}}}$$

$$\text{ت} = \frac{(٥+٧)-٦}{٣+٧}$$ ومنها قراءة الأميتر (ت) = ٠,٦ أمبير

٢ قراءة الفولتميتر تمثل فرق الجهد بين طرفي المقاومة ٥ Ω

$$\text{جـ} = \text{ت} \times \text{م}$$

$$\text{جـ} = ٠,٦ \times ٥ = ٣ \text{ فولت}$$

٣ لحساب التيار الكهربائي المار في ٣Ω، لاحظ أن المقاومتين ٦Ω و ٣Ω موصولتان على

التوازي، فيكون لكل منهما ولمكافئتهما الجهد نفسه:

$$\text{جـ}_{\text{م مكافئة}} = \text{جـ}_{٣}$$

$$\text{ت}_{\text{كلي}} \times \text{م}_{\text{كلي توازي}} = \text{ت}_{\text{فرع}} \times \text{م}_{\text{فرع}}$$

$$٠{,}٦ \times ٢ = \text{ت}_{١} \times ٣$$

$$\text{ت}_{١} = \frac{٠{,}٦ \times ٢}{٣} = ٠{,}٤ \text{ أمبير.}$$

مراجعة (٤–٦)

مُثلت تغيرات الجهد عبر أجزاء الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل(٤–٢٣/أ) بيانيًا كما في الشكل(٤–٢٣/ب)، مستخدمًا البيانات المثبتة في الشكل، جد:

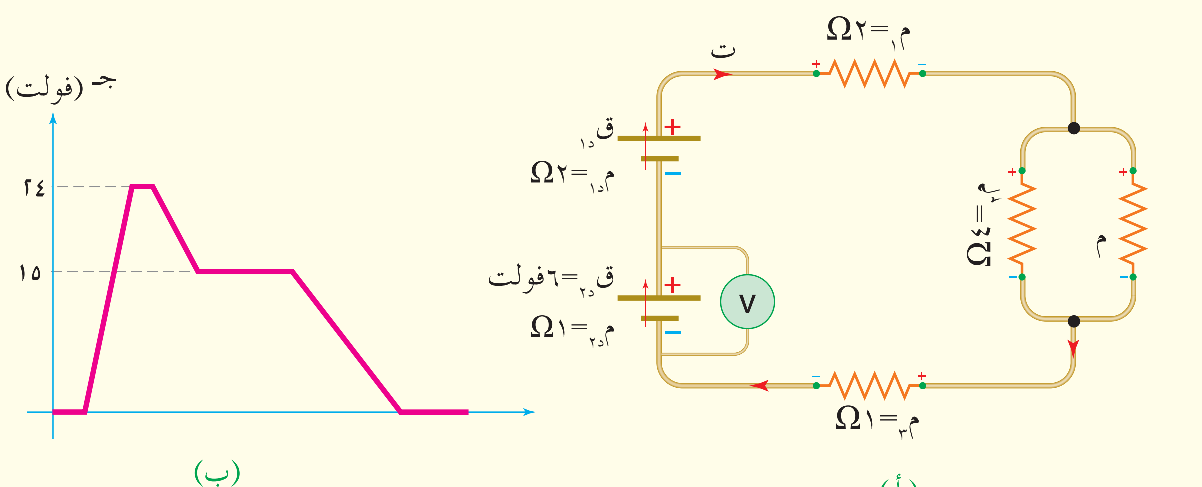
١) $\text{ق}_{\text{د١}}$

٢) تيار الدارة

٣) المقاومة م

٤) قراءة الفولتميتر

٥) قدرة المقاومة م



الشكل(٤–٢٣) سؤال المراجعة (٤–٦).

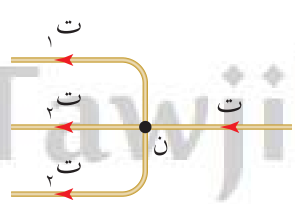
٤–٧ الدارات الكهربائية وقاعدتا كيرشوف
Electric Circuits and Kirchhoff›s Rules

تعد الدارات الكهربائية البسيطة نوعًا خاصًّا من الدارات الكهربائية، وقد تعرفت معادلة الدارة الكهربائية البسيطة وتغيرات الجهد عبر أجزائها، وعرفت أنه يمكن تطبيقها للدارات الكهربائية التي يُمكن تبسيطها لتكون عروة واحدة فقط. إلا أن كثيرًا من الدارات الكهربائية لا يمكن تبسيطها لتكون عروة واحدة، أو قد تكون جزءًا من دارة كهربائية مكونة من عروتين أو أكثر لا يمكن تبسيطها إلى عروة واحدة.

درس العالم جوستاف كيرشوف الدارات الكهربائية جميعها، ووضع قاعدتين عُرفتا بقاعدتي كيرشوف يمكن تطبيقهما لتحليل الدارات الكهربائية بأنواعها المختلفة، وسنقدم فيما يأتي توضيحًا للقاعدتين وكيفية تطبيقهما.

(٤–٧–١) قاعدة كيرشوف الأولى (قاعدة الوصلة) Kirchhoff's First Rule (Junction Rule)

عند توصيل مجموعة من الأجهزة الكهربائية على التوازي، فإن تيار الدارة الكهربائية (ت) يتجزأ كما في الشكل(٤–٢٤) إلى تيارات عدة عند وصوله إلى نقطة التفرع (ن)، واعتمادًا على مبدأ حفظ الشحنة، فإن كمية الشحنات الداخلة في النقطة (ن) مساوٍ كمية الشحنات الخارجة منها، ويمكن التعبير عن هذا رياضيًّا:



الشكل (٤–٢٤) : قاعدة كيرشوف الأول.

$$\Delta ش_{\text{الداخلة}} = \Delta ش_{\text{الخارجة}}$$

$$\Delta ش_{\text{الداخلة}} = \Delta ش_{١} + \Delta ش_{٢} + \Delta ش_{٣}$$

وبقسمة طرفي المعادلة على الزمن المستغرق لعبور الشحنات (Δز)

$$ت_{\text{كلي}} = ت_{١} + ت_{٢} + ت_{٣}$$

وبشكل عام عند أي نقطة تفرع في دارة يكون:

$$\sum ت_{\text{الكلي(عند نقطة تفرع)}} = \text{صفر} \quad ....(٤–١٥)$$

وتعد العلاقة (٤–١٥) تعبيرًا رياضيًّا لقاعدة كيرشوف الأولى التي تنص على «**أنه عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية، يكون المجموع الجبري للتيارات عند تلك النقطة يساوي صفرًا**».

ويكون التيار الذي يدخل في النقطة موجبًا والتيار الخارج منها سالبًا. أي أن مجموع

التيارات الداخلة في نقطة تفرع يساوي مجموع التيارات الخارجة منها:

$$\sum \text{ت}_{\text{الداخل}} = \sum \text{ت}_{\text{الخارج}}$$

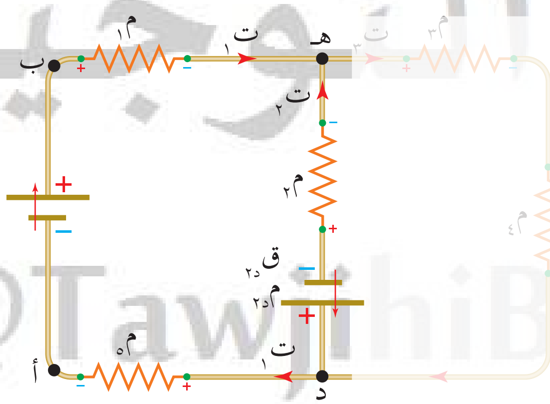
■ (٤-٧-٢) قاعدة كيرشوف الثانية (قاعدة الجهد) *Kirchhoff's Second Rule (Potential Rule)*

عند دراسة تغيرات الجهد في دارة كهربائية بسيطة، تبين لنا أن مقدار القوة الدافعة الكهربائية يساوي مجموع فروق الجهد بين أطراف المقاومات الداخلية والخارجية للدارة حسب العلاقة:

$$\text{ق}_{\text{د}} = \text{ت م}_{\text{د}} + \text{ت م}_{\text{خ}}$$

أي أن $\text{ق}_{\text{د}} - \text{ت م}_{\text{د}} - \text{ت م}_{\text{خ}} = \text{صفر}$

ويمكن تعميم هذه النتيجة عبر أي مسار مغلق من الدارة الكهربائية، أي أن «**المجموع الجبري للتغيرات في الجهد الكهربائي عبر عناصر أي مسار مغلق في دارة كهربائية يساوي صفرًا**». وهذا نص قاعدة كيرشوف الثانية، وتعد إحدى صيغ قانون حفظ الطاقة، والشغل المبذول لنقل شحنة كهربائية عبر مسار مغلق يساوي صفرًا لأن القوة الكهربائية قوة محافظة وشغلها لا يعتمد على المسار. فعند دراسة تغيرات الجهد من نقطة مثل النقطة (أ) عبر المسار المغلق (أ ب هـ د أ) من دارة كهربائية في الشكل (٤-٢٥) والعودة إلى النقطة نفسها يكون مجموع فروق الجهد صفرًا أي أن $\text{جـ}_{\text{أأ}} = \text{صفر}$.



الشكل(٤-٢٥): قاعدة كيرشوف الثانية.

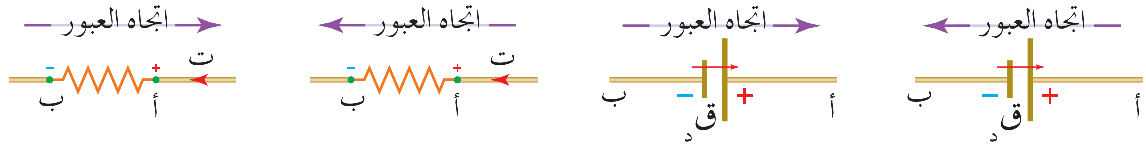
وبشكل عام يكون عبر أي مسار مغلق:

$$\sum \text{ق}_{\text{د}} + \sum \text{ت} \times \text{م} = \text{صفرًا} \quad \text{.......................} \quad (٤-١٦)$$

ولدراسة التغير في الجهد عبر المقاومات أو البطاريات في الدارة كما في الشكل(٤-٢٦)، فإنه يتعين مراعاة إشارة التغير في الجهد مع اتجاه عبورها، عند تطبيق قاعدة كيرشوف الثانية كما يأتي:

١) عند عبور البطارية من القطب السالب نحو القطب الموجب يزداد الجهد بمقدار القوة الدافعة الكهربائية، وعند عبور البطارية من القطب الموجب نحو القطب السالب يقل الجهد بمقدار القوة الدافعة الكهربائية بغض النظر عن اتجاه التيار الكهربائي.

٢ عند عبور مقاومة في فرع ما باتجاه تيار الفرع يقل الجهد بمقدار (ت × م)، وعند عبور المقاومة في فرع ما بعكس اتجاه تيار الفرع يزداد الجهد بمقدار (ت × م)، وتعامل المقاومة الداخلية معاملة المقاومة الخارجية.



$\text{جـ}_{\text{أ}} - \text{ق}_{\text{د}} = \text{جـ}_{\text{ب}}$	$\text{جـ}_{\text{ب}} + \text{ق}_{\text{د}} = \text{جـ}_{\text{أ}}$	$\text{جـ}_{\text{أ}} - \text{ت} \times \text{م} = \text{جـ}_{\text{ب}}$	$\text{جـ}_{\text{ب}} + \text{ت} \times \text{م} = \text{جـ}_{\text{أ}}$

الشكل (٤-٢٦): تغيرات الجهد.

وبشكل عام يسري التيار الكهربائي في الأسلاك من النقطة الأعلى جهدًا إلى النقطة الأقل جهدًا، ويمكن الاستفادة من قاعدتي كيرشوف في حساب فرق الجهد بين نقطتين، كما يمكن تطبيقهما عبر مسارات مغلقة ضمن دارات كهربائية بسيطة، والأمثلة الآتية توضح ذلك.

مثال (٤-٨)

وُصِلت دارة كهربائية مكونة من عروتين كما في الشكل (٤-٢٧)، معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل، أجب عن الأسئلة الآتية:

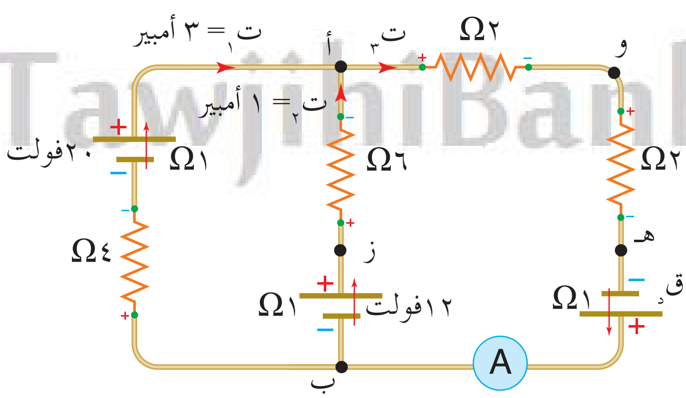
١ هل يمكن تبسيط الدارة الكهربائية لتصبح دارة بسيطة؟ لماذا؟

٢ جد كلًّا من:

أ التيار الكهربائي (ت$_{٣}$).

ب جـ$_{أب}$ عبر الفرع الأوسط.

جـ القوة الدافعة الكهربائية (ق$_{د}$).



الشكل (٤-٢٧): مثال (٤-٨).

الحل:

١ لا يمكن تبسيط الدارة لتكون عروة واحدة، وذلك لوجود أكثر من بطارية في أكثر من فرع.

٢ أ بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى عند النقطة (أ) نجد:

$$\text{ت}_{١} + \text{ت}_{٢} = \text{ت}_{٣}$$

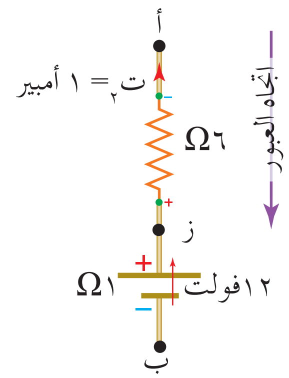
$$\text{ت}_{٣} = ٣ + ١ = ٤ \text{ أمبير}$$

ب) جـ$_{أب}$ عبر الفرع الأوسط كما في الشكل (٤–٢٨).

جـ$_{أ}$ + ت × م – ق$_{د}$ = جـ$_{ب}$

جـ$_{أ}$ + ١(٦+١) – ١٢ = جـ$_{ب}$

جـ$_{أب}$ = ١٢ – ٧ = ٥ فولت



الشكل(٤–٢٨): مثال (٤–٨).

جـ) لإيجاد ق$_{د}$ نجد جـ$_{أأ}$ عبر المسار المغلق (أ و هـ ب ز أ):

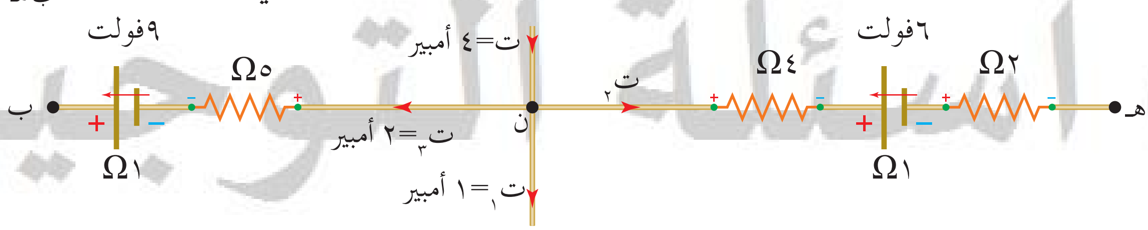
جـ$_{أ}$ + ∑ق$_{د}$ + ∑ت م = جـ$_{أ}$

جـ$_{أ}$ – ٤(٢ + ٢ + ١) – ١(١ + ٦) + ق$_{د}$ + ١٢ = جـ$_{أ}$

جـ$_{أأ}$ –٢٠ – ٧ + ق$_{د}$ + ١٢ = ٠ ⟸ ق$_{د}$ = ١٥ فولت

مثال (٤–٩)

يُمثل الشكل (٤–٢٩) جزءًا من دارة كهربائية، معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل جد جـ$_{بهـ}$.



الشكل(٤–٢٩): مثال (٤–٨).

الحل:

أوّلًا: نجد قيمة التيار الكهربائي ت$_{٢}$ بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى عند نقطة التفرع (ن)

∑ت$_{الكلي (عند ن)}$ = صفر

ت – ت$_{١}$ – ت$_{٢}$ – ت$_{٣}$ = صفر

٤ – ١ – ت$_{٢}$ – ٢ = صفر

ت$_{٢}$ = ١ أمبير

ثانيًا: نجد جـ$_{ب هـ}$ = جـ$_{ب}$ – جـ$_{هـ}$

جـ$_{ب}$ + ∑ق$_{د}$ + ∑ت م = جـ$_{هـ}$

جـ$_{ب}$ – ق$_{د١}$ – ق$_{د٢}$ – ت$_{٣}$(م$_{٥}$ + م$_{د١}$) – ت$_{٢}$(م$_{٢}$ + م$_{٣}$ + م$_{د٢}$)= جـ$_{هـ}$

جـ$_{ب}$ – ٩ – ٦ + ٢(١+ ٥) – ١(٤ + ١ + ٢) = جـ$_{هـ}$

جـ$_{ب}$ – جـ$_{هـ}$ = ٢٢ – ١٢

جـ$_{ب هـ}$ = ١٠ فولت

١ اذكر نص قاعدتي كيرشوف الأولى والثانية.

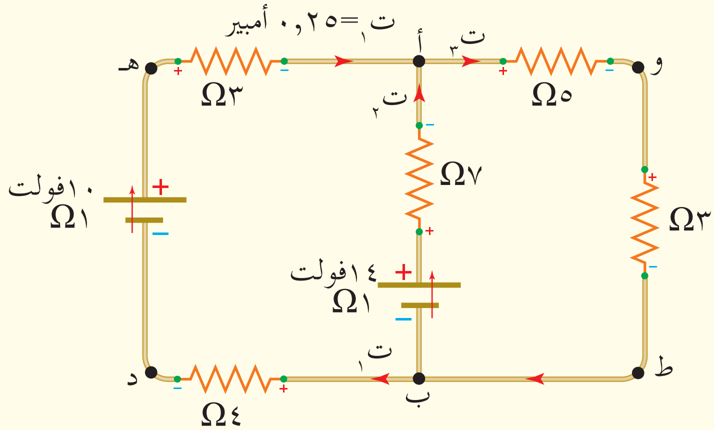
٢ مستخدمًا البيانات في الشكل(٤–٣٠) الذي يمثل دارة كهربائية، فإذا كان ت$_{١}$= ٠,٢٥ أمبير فاحسب:

أ ت$_{٢}$، ت$_{٣}$.

ب قراءة الفولتميتر.

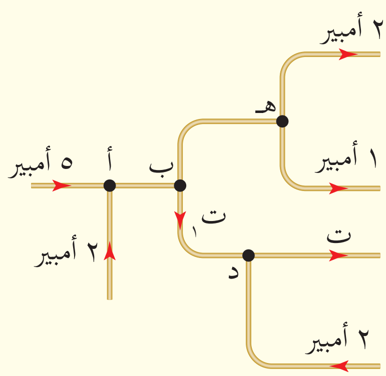
جـ القدرة الكهربائية المستهلكة في المقاومة ٥ أوم.

د جـ$_{\text{ب أ}}$



الشكل(٤–٣٠): سؤال (٢).

٣ يمثل الشكل(٤–٣١) جزء من دارة كهربائية، استخدم البيانات الواردة في الشكل واحسب ت.



الشكل(٤–٣١): سؤال (٣).

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

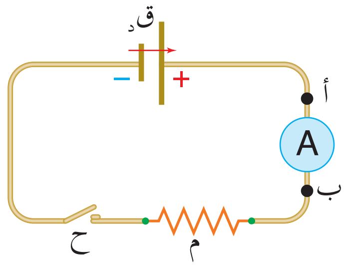
١) في الشكل(٤-٣٢) تنعدم قراءة الأميتر بين النقطتين (أ و ب) عند فتح الدارة بسبب انعدام:

أ) المجال الكهربائي بينهما

ب) المقاومة الخارجية

جـ) القوة الدافعة الكهربائية

د) مقاومة الأسلاك



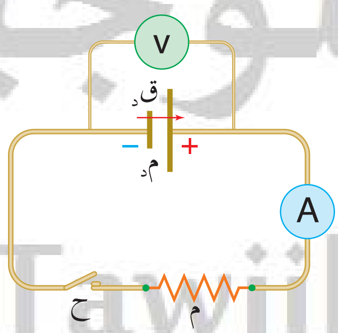
الشكل(٤-٣٢): سؤال (١) فقرة (١).

أجب عن الفقرات (٢و٣ و٤) بالاعتماد على الشكل(٤-٣٣).

٢) إذا كانت قراءة الفولتميتر قبل غلق المفتاح (١٠ فولت)، وبعد غلق المفتاح أصبحت ٨ فولت، وقراءة الأميتر ٢ أمبير فإن قيمة (مخ، مد) بالأوم على الترتيب:

أ) (٢، ٢)   ب) (٤، ٢)

جـ) (٤، ١)   د) (١، ١)



الشكل(٤-٣٣): سؤال (١) فقرة (٢،٣،٤).

٣) يكون الهبوط في جهد البطارية بالفولت:

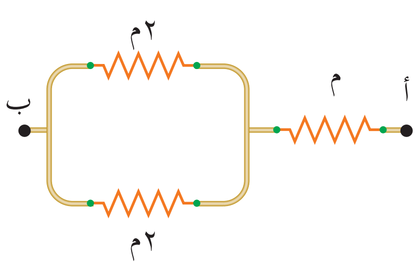
أ) ١٠   ب) ٨

جـ) ٤   د) ٢

٤) أي من الآتية تمثل قراءة الفولتميتر والمفتاح مفتوح:

أ) ت م$_{د}$ ب) ق$_{د}$

جـ) ق$_{د}$ − ٢ت م   د) ت $\frac{م}{٢}$



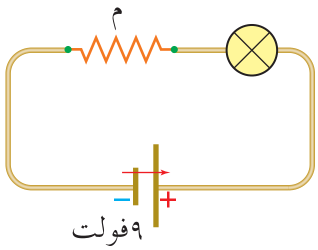
الشكل(٤-٣٤): سؤال (١) فقرة (٥).

٥) في الشكل(٤-٣٤) تكون المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات المحصورة بين النقطتين (أ و ب):

أ) $\frac{٣م}{٢}$ ب) ٥م

جـ) ٢م   د) $\frac{٥م}{٤}$

٦ مصباح كهربائي كتب عليه (٣ فولت، ٢,٥ واط)، يراد إضاءته من بطارية قوتها الدافعة الكهربائية ٩ فولت، ولحماية المصباح من التلف تضاف مقاومة خارجية (م) إلى الدارة، كما في الشكل (٤-٣٥) فإن قيمة المقاومة م بوحدة الأوم:



الشكل(٤-٣٥): سؤال (١) فقرة (٦).

أ ٧,٢ ب ٢,٥ جـ ٠,٨ د ٠,١

٧ يُعد قانون كيرشوف الأول صيغة من صيغ قانون حفظ:

أ الزخم ب الشحنة جـ الطاقة الميكانيكية د المادة

٢ فسر العبارات الآتية:

١ تزداد مقاومة الموصلات الفلزية بارتفاع درجة حرارتها.

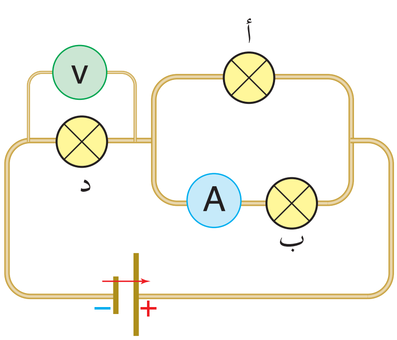
٢ عند توصيل المقاومات بطريقة التوازي، تكون المقاومة الأقل مقدارًا هي الأكثر استهلاكًا للقدرة.

٣ عند توصيل المقاومات بطريقة التوالي، تكون المقاومة الأكبر مقدارًا هي الأكثر استهلاكًا للقدرة.

٣ يمثل الجدول قيم التيار الكهربائي في مقاومتين (أ وب)، عند تغيير فرق الجهد بين طرفي كل منهما. مستخدمًا البيانات في الجدول، حدد أي المقاومتين تطيع قانون أوم، واحسب مقاومة الأومية منهما.

المقاومة (أ)		المقاومة (ب)	
جـ (فولت)	ت (أمبير)	جـ (فولت)	ت (أمبير)
٠,٢٥	٠,٥	٣	٠,٤
١	١	٦	٠,٨
٢	١,٤	٩	١,٢
٣	١,٧	١٢	١,٦
٣,٨	١,٩	١٦	٢

٤ إذا كانت المصابيح (أ، ب، د) في الشكل (٤-٣٦) متماثلة، وضح ما يحصل لكل من قراءة الأميتر والفولتميتر، إذا احترق فتيل المصباح (أ).

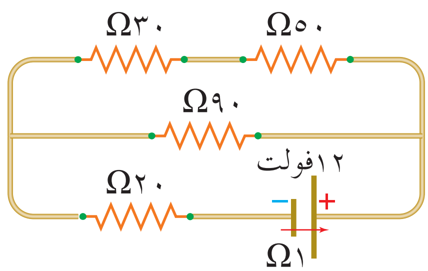


الشكل(٤-٣٦): سؤال (٤).

٥ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل(٤-٣٧)، جد:

١ المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات.

٢ التيار الكهربائي المار في المقاومة ٢٠ Ω.



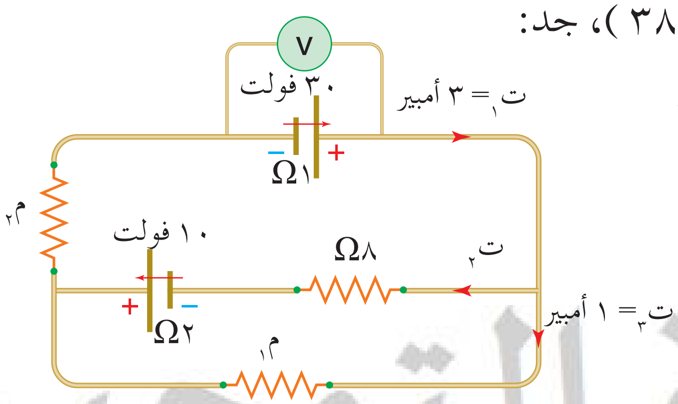
الشكل(٤–٣٧): سؤال (٥).

٣ الهبوط في جهد البطارية.

٤ جهد المقاومة Ω٦٠.

٥ القدرة المستهلكة في المقاومة Ω١٠.

٦ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٤–٣٨)، جد:



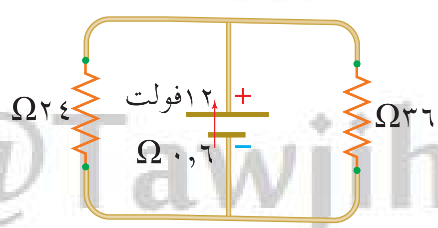
الشكل(٤–٣٨): سؤال (٦).

١ التيار الكهربائي المار في المقاومة (Ω٨).

٢ المقاومتين (م$_١$، م$_٢$).

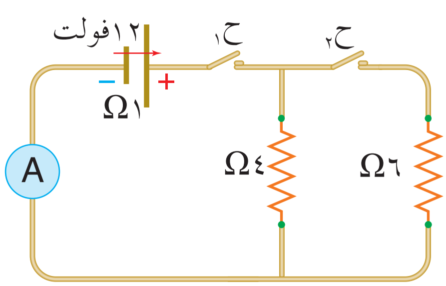
٣ قراءة الفولتميتر.

٧ مستعينًا بالبيانات المثبتة في الشكل (٤–٣٩)، احسب القدرة المستهلكة في كل مقاومة.



الشكل(٤–٣٩): سؤال (٧).

٨ احسب قراءة الأميتر في الحالات الآتية للدارة الكهربائية في الشكل (٤–٤٠) وبإهمال مقاومة الأسلاك:

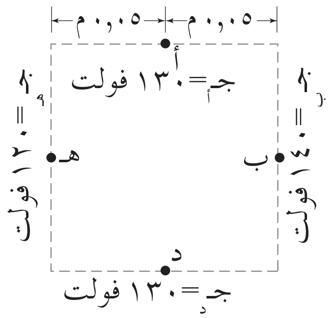


الشكل(٤–٤٠): سؤال (٨).

أ عند غلق المفتاح (ح$_١$) فقط.

ب عند غلق المفتاحين (ح$_١$ وح$_٢$) معًا.

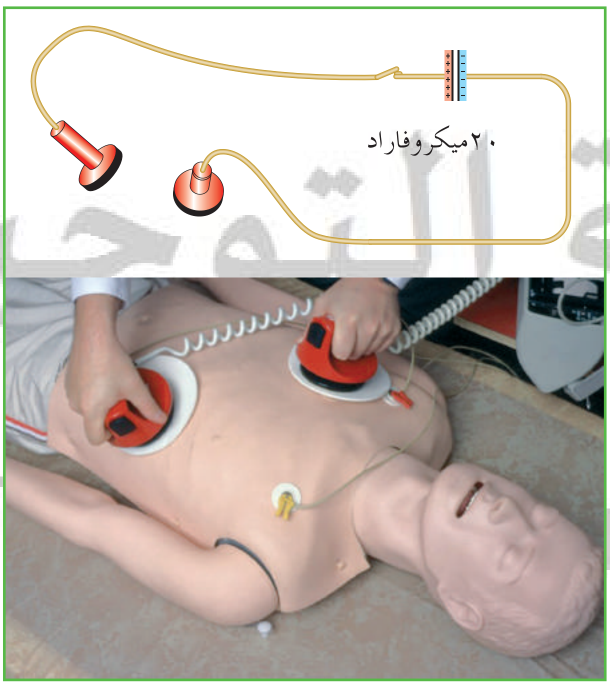
١ أربع نقاط (أ، ب، د، هـ) تقع في منطقة مجال كهربائي منتظم. معتمدًا على القيم المثبتة على الشكل المجاور أجب عما يأتي:



١ ما المقصود بسطح تساوي الجهد؟

٢ ارسم واحدًا من سطوح تساوي الجهد الكهربائي، وثلاثة من خطوط المجال الكهربائي موضحًا على هذه الخطوط اتجاه المجال.

٣ احسب مقدار المجال الكهربائي المنتظم في الحيز بين الصفيحتين.

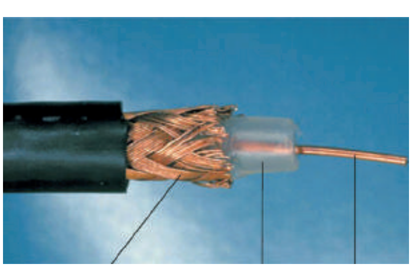


٢ في جهاز إنعاش القلب يعطى المريض شحنة « صدمة كهربائية» عن طريق السماح لمواسع كهربائي بتفريغ شحنته عبر قلب المريض كما هو مبين في الشكل الآتي. إذا كانت مواسعة المواسع (٢٠) ميكروفاراد، وشحن باستخدام مصدر فرق جهده (٦٠٠٠) فولت. فأجب عما يأتي:

١ ما أهمية المواسع؟

٢ احسب شحنة المواسع والطاقة المختزنة فيه.

٣ يحدث عادة التفريغ الكهربائي خلال فترة زمنية قصيرة ، تقريبًا ٢ ملي ثانية. احسب متوسط التيار الكهربائي المار عبر قلب المريض.



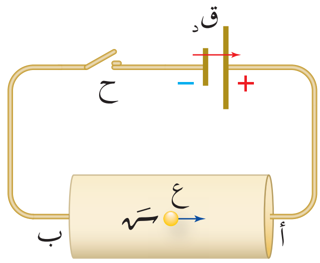
٣ تستخدم الكوابل الكهربائية لنقل الطاقة الكهربائية وتوجد بأشكال مختلفة، ويبين الشكل مقطعًا من كيبل كهربائي.

١ إذا كانت مقاومية النحاس ($1,7 \times 10^{-8}$) Ω.م فاحسب مقاومة سلك من النحاس طوله (٥٠) م، ومساحة مقطعه ($2,5 \times 10^{-6}$) م^2.

٢) يحتوي الكيبل على طبقة رقيقة من شبكة مصنوعة من مادة موصلة، فما الهدف من هذه الشبكة؟

٣) فسر ما يأتي: يلاحظ أحيانًا ظهور وميض أزرق حول كوابل الكهرباء ذات الجهد العالي.

٤ يسري تيار كهربائي (١٠أمبير) في موصل نحاسي متصل مع بطارية كما هو موضح في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل المجاور عند إغلاق المفتاح(ح)، ادرس الشكل، وأجب عن الأسئلة الآتية:



١) ما اتجاه المجال الكهربائي الناشئ في الموصل؟ وما اتجاه التيار الكهربائي الاصطلاحي فيه؟

٢) وضح كيف تتمكن الشحنات الكهربائية من الانتقال من القطب السالب للبطارية إلى القطب الموجب.

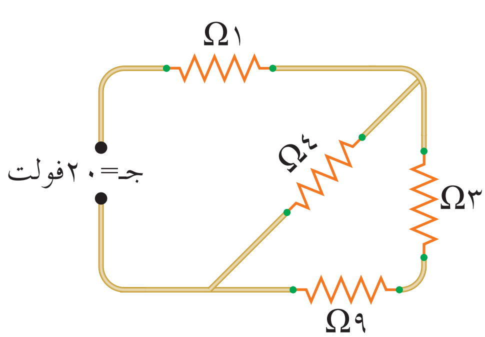
٣) إذا علمت أن الشحنات(سـَ) تتحرك بسرعة انسياقية(ع) داخل الموصل بالاتجاه المبين في الشكل، فما هي الشحنات(سـَ)؟

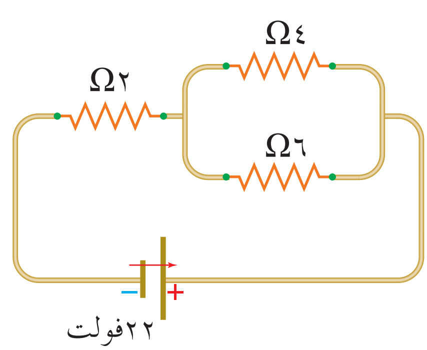
٤) احسب السرعة الانسياقية للشحنات(شَ)، إذا علمت أن مساحة مقطع الموصل تساوي (٢ مم^{٢}) وأن نَ تساوي ($٨,٥ \times ١٠^{٢٨}$ إلكترون/م^{٣}).

٥ مستعينًا بالبيانات المثبتة في الدارتين الكهربائيتين (أ، ب) المبينتين في الشكل، احسب:

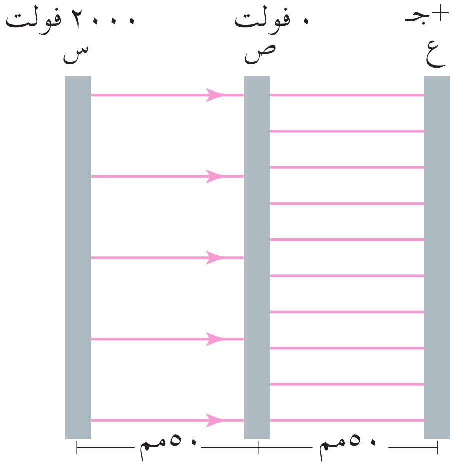
١) المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات في كل منهما.

٢) التيار الكهربائي المار في كل من الدارتين.





٦ معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل، والذي يبين ثلاث صفائح مختلفة في الجهد. أجب عن الأسئلة الآتية:



١ كيف يتناسب عدد خطوط المجال الكهربائي مع كثافة الشحنة السطحية؟

٢ احسب:

أ مقدار المجال الكهربائي بين الصفيحتين (س) و(ص).

ب المجال الكهربائي بين الصفيحتين (ص) و(ع) مقدارًا واتجاهًا.

د جهد الصفيحة (ع).

الوحدة الثانية

المغناطيسية

الفصل الخامس

المجال المغناطيسي

The Magnetic Field

في هذا الفصل

كان الاعتقاد السائد في الماضي ولمدة زمنية طويلة أن الكهرباء والمغناطيسية علمان منفصلان، حتى اكتشف أورستد الآثار المغناطيسية للتيار الكهربائي عام ١٨١٩م، وأدى اكتشافه إلى تطوير حياة الإنسان وتحسينها. ومن ثم توالت إسهامات الكثير من العلماء في هذا المجال، حتى أصبحت المغانط في عصرنا الحالي تدخل في تركيب أغلب الأجهزة الكهربائية والإلكترونية. فما العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي؟ وهل تتغير العوامل بتغير شكل الموصل؟ وكيف نحصل على مغانط يمكن التحكم في مجالها المغناطيسي؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

يعد جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) أحد أهم الأجهزة الطبية التي تستخدم في تصوير أجزاء مختلفة من الجسم كالدماغ والنخاع الشوكي، وإظهار تشريحها لمعرفة حالتها الصحية.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضّح المقصود بالمجال المغناطيسي، والمجال المغناطيسي المنتظم.
- تقارن بين تأثير المجالين الكهربائي والمغناطيسي في الشحنات الكهربائية.
- تستنتج العوامل التي تعتمد عليها القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في شحنة نقطية متحركة فيه، وفي موصل يسري فيه تيار كهربائي، وتعبر عن القوة المغناطيسية رياضيًّا.
- تستخدم قاعدة اليد اليمنى في تحديد اتجاه القوة المغناطيسية، والمجال المغناطيسي.
- تذكر العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي (قانون بيو- سافار).
- تذكر العلاقات الرياضية للمجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي في كلٍّ من: موصل مستقيم طويل، وملف دائري، وملف لولبي.
- تطبّق العلاقات الرياضية المتعلقة بالقوة المغناطيسية والمجال المغناطيسي في حلّ مسائل حسابية.
- تتعرف تطبيقات تكنولوجية لحركة الأجسام المشحونة في مجالات مغناطيسية منتظمة.
- تتوصل إلى العلاقة الرياضية للقوة المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يحملان تيارين كهربائيين.
- تذكر أنواع المواد المغناطيسية، وتقارن بينها.

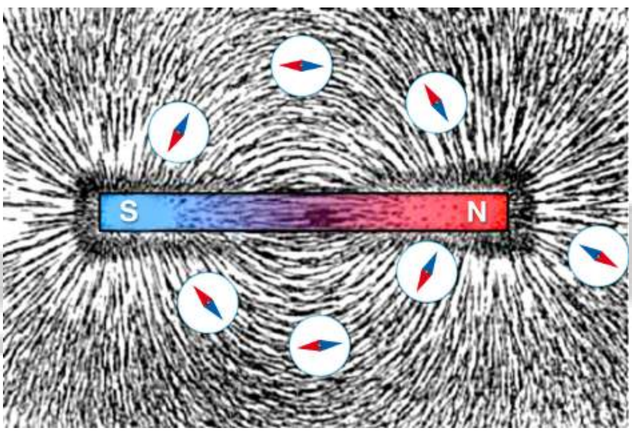
المجال المغناطيسي
The Magnetic Field

درست في الكهرباء أن الشحنة الكهربائية محاطة بمجال كهربائي، وتحيط المجالات المغناطيسية بالمغانط، فلكل مغناطيس منطقة حوله تظهر فيها آثاره المغناطيسية تسمى المجال المغناطيسي، ويعد المجال المغناطيسي خاصية للحيز المحيط بالمغناطيس. يرمز للمجال المغناطيسي بالرمز (غ).

ويُمثل المجال المغناطيسي حول المغناطيس بخطوط وهمية تسمى خطوط المجال المغناطيسي.

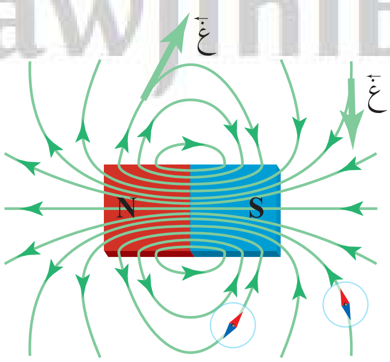
ويعرف **خط المجال المغناطيسي بأنه المسار الذي يسلكه قطب شمالي مفرد (افتراضي) عند وضعه حرًّا في أي نقطة داخل المجال المغناطيسي.**

ويمكن استخدام برادة الحديد أو الإبرة المغناطيسية لتخطيط المجال المغناطيسي كما في الشكل (٥-١)، إذ نلاحظ أن خطوط المجال المغناطيسي خارج المغناطيس تخرج من القطب الشمالي وتدخل في القطب الجنوبي.



الشكل (٥-١): تخطيط المجال المغناطيسي حول مغناطيس مستقيم باستخدام برادة الحديد والإبرة المغناطيسية.

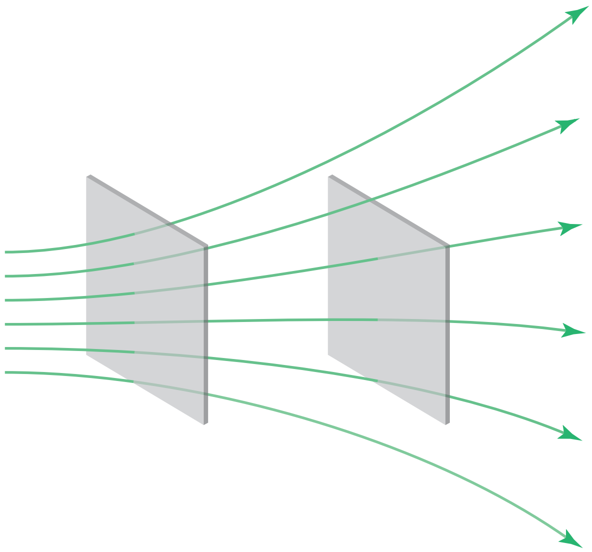
وتمتاز خطوط المجال المغناطيسي عن خطوط المجال الكهربائي بأنها مقفلة حيث تخرج من القطب الشمالي للمغناطيس وتدخل في القطب الجنوبي خارج المغناطيس، مكملة مسارها داخل المغناطيس من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي كما يتضح في الشكل (٥-٢)، ويفسر ذلك عدم وجود قطب مغناطيسي مفرد.



الشكل (٥-٢): خطوط المجال المغناطيسي مقفلة، تتجه من القطب الشمالي إلى الجنوبي خارج المغناطيس، وتكمل دورتها داخله.

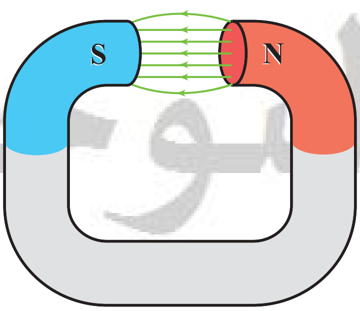
ويعبر عن مقدار المجال المغناطيسي في منطقة ما بكثافة خطوط المجال المغناطيسي في تلك المنطقة كما يوضح الشكل (٥-٣). ويحدد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة ما باتجاه المماس لخط المجال عند تلك النقطة، وعمليًّا فإن اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة فيه يتحدد باستخدام

إبرة مغناطيسية توضع عند تلك النقطة، حيث يشير القطب الشمالي للإبرة المغناطيسية إلى اتجاه المجال المغناطيسي عندها. والمجال المغناطيسي بوصفه كمية متجهة فإن له اتجاهًا واحدًا عند كل نقطة؛ لذلك فخطوطه لا تتقاطع.



الشكل (٥-٣): كثافة خطوط المجال المغناطيسي .

وقد يكون المجال المغناطيسي منتظمًا أو غير منتظم، ويظهر من الشكل (٥-٢) أن المجال المغناطيسي الناتج عن المغناطيس المستقيم ليس منتظمًا، فخطوط المجال المغناطيسي تشير إلى اتجاهاتٍ مختلفة، بينما يكون منتظمًا تقريبًا في المنطقة المحصورة بين قطبي المغناطيس بعيدًا عن الأطراف كما في الشكل (٥-٤). ويعرف **المجال المغناطيسي المنتظم** في منطقة ما بأنه **المجال المغناطيسي الثابت مقدارًا واتجاهًا عند نقاطه جميعها**. ويُمثل بخطوط مستقيمة متوازية، المسافات بينها متساوية.



الشكل (٥-٤): خطوط المجال المغناطيسي المنتظم بين قطبي مغناطيس.

مراجعة (٥-١)

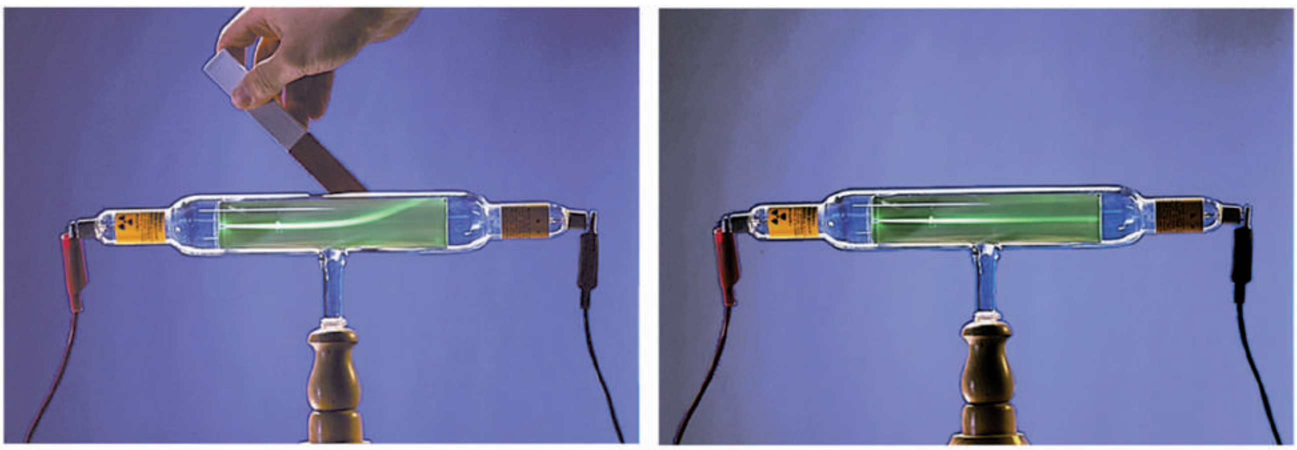
١) اذكر ثلاثًا من خصائص خطوط المجال المغناطيسي.

٢) عرف كلًّا من خط المجال المغناطيسي، والمجال المغناطيسي المنتظم.

القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة نقطية متحركة في مجال مغناطيسي منتظم

(Magnetic Force on a Moving Point Charge in a Uniform Magnetic Field)

إذا قربت مغناطيسًا من أنبوب أشعة المهبط ، فسوف تلاحظ أن حزمة الإلكترونات السالبة– انحرفت عن مسارها، لاحظ الشكل (٥-٥)، يدل ذلك على أن المجال المغناطيسي أثر بقوة مغناطيسية في هذه الشحنات، وأجبرها على تغيير مسارها. فكيف تحسب القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة كهربائية؟ وما العوامل المؤثرة في القوة المغناطيسية؟



الشكل (٥-٥): انحراف حزمة الإلكترونات في أنبوب أشعة المهبط بتأثير المغناطيس.

وجد تجريبيًا أن القوة المغناطيسية ($\text{ق}_{\text{غ}}$) المؤثرة في جسيم مشحون متحرك في مجال مغناطيسي عند نقطة ما يتناسب طرديًا مع شحنة الجسيم الكهربائية ($\text{سـه}_{\circ}$)، والمجال المغناطيسي ($\vec{\text{غ}}$)، وسرعة الجسيم ($\vec{\text{ع}}$) التي يتحرك بها داخل المجال المغناطيسي عند تلك النقطة، وتتناسب القوة المغناطيسية طرديًا مع (جاθ)؛ حيث(θ): الزاوية المحصورة بين اتجاه كل من ($\vec{\text{ع}}$) و($\vec{\text{غ}}$). وعليه، تكون العلاقة الرياضية لحساب القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة متحركة داخل مجال مغناطيسي، هي:

$$\vec{\text{ق}}_{\text{غ}} = \text{سـه}_{\circ}\, \vec{\text{ع}} \times \vec{\text{غ}}$$

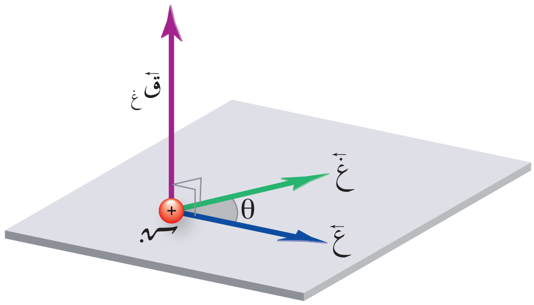
ويحسب مقدار القوة المغناطيسية من العلاقة الآتية:

$$\text{ق}_{\text{غ}} = \text{سـه}_{\circ}\ \text{ع غ جا}\theta \quad .... \quad (\text{٥-١})$$

ولتعريف المجال المغناطيسي تكتب العلاقة السابقة على الصورة الآتية:

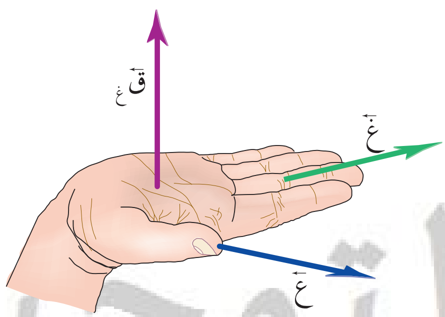
$$\text{غ} = \frac{\text{ق}_{\text{غ}}}{\text{سـه}_{\circ}\ \text{ع}}$$

وعليه يعرف **المجال المغناطيسي** عند نقطة بأنه مقدار **القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة لحظة مرورها بتلك النقطة بسرعة ١م/ث عموديًا على اتجاه المجال المغناطيسي عند تلك النقطة**، ويكون اتجاه القوة المغناطيسية دائمًا عموديًا على المستوى الذي يتشكل من المتجهين (عَ) و(غَ) كما يظهر في الشكل (٥-٦).



الشكل (٥-٦): القوة المغناطيسية عمودية دائمًا على كل من (عَ) و(غَ).

ويمكن تحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الشحنة الموجبة باستخدام قاعدة اليد اليمنى كما في الشكل (٥-٧)، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي، عندها يشير المتجه العمودي على باطن الكف والخارج منه إلى اتجاه القوة المغناطيسية. وعندما تكون الشحنة (س) سالبة، فإننا نطبق قاعدة اليد اليمنى، ثم يكون اتجاه القوة المغناطيسية عكس الاتجاه الناتج.



الشكل (٥-٧): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة موجبة متحركة داخل مجال مغناطيسي.

ونستنتج من العلاقة (٥-١) أن القوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم مشحون في مجال مغناطيسي تنعدم في حالتين:

الحالة الأولى: إذا كان الجسيم المشحون ساكنًا (ع = ٠).

الحالة الثانية: إذا كان اتجاه السرعة موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي (θ = ٠، أو ١٨٠°). أي أن المجال لا يؤثر في الشحنة إلا إذا قطعت خطوط مجاله، في حين تكون القوة المغناطيسية أكبر ما يمكن عندما يكون اتجاه السرعة (عَ) عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي (θ = ٩٠°)، وفي النظام العالمي للوحدات يقاس المجال المغناطيسي بوحدة تسمى تسلا. ويمكن اشتقاقها من العلاقة:

$$[\text{غ}] = \frac{[\text{ق}_{\text{غ}}]}{[\text{س}][\text{ع}]} \Leftarrow [\text{غ}] = \frac{\text{نيوتن.ث}}{\text{كولوم.م}} = \text{تسلا}$$

وتُعرّف التسلا بأنها **المجال المغناطيسي الذي يؤثر بقوة ١ نيوتن في شحنة ١ كولوم تتحرك بسرعة ١ م/ث باتجاه يعامد اتجاه المجال المغناطيسي.**

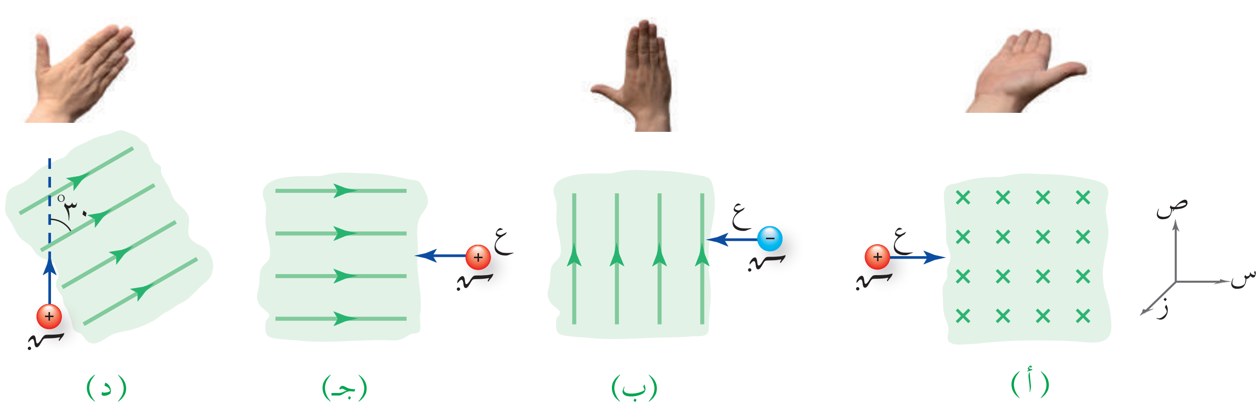
وتوجد وحدة قياس قديمة لا تزال تستخدم في قياس المجال المغناطيسي وهي (غاوس)، إذ أن (١) غاوس تعادل ($١٠^{-٤}$) تسلا. وتعد التسلا وحدة قياسٍ كبيرةً من الناحية العملية، ويبين الجدول (٥-١) بعض قيم المجال المغناطيسي الناشئ عن بعض المصادر المختلفة.

جدول (٥-١): بعض القيم التقريبية للمجال المغناطيسي.

مصدر المجال المغناطيسي	مقدار المجال المغناطيسي (تسلا)
مغناطيس قوي فائق التوصيل (في المختبر البحثي)	٣٠
مغناطيس قوي عادي (في المختبر البحثي)	٢
وحدة التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)	١,٥
مغناطيس مستقيم (في المختبر المدرسي)	$١,٠ \times ١٠^{-٢}$
المجال المغناطيسي على سطح الشمس	$١,٠ \times ١٠^{-٢}$
المجال المغناطيسي على سطح الأرض	$٥,٠ \times ١٠^{-٥}$
المجال المغناطيسي داخل دماغ الإنسان (الناتج عن السيالات العصبية)	$١,٠ \times ١٠^{-١٣}$

مثال (٥-١)

قذف جسيم شحنته ٤ ميكروكولوم، بسرعة ٦×١٠^{٦} م/ث، داخل مجال مغناطيسي منتظم مقداره ٠,٠١ تسلا. جد القوة المغناطيسية مقدارًا واتجاهًا في الحالات المبينة في الشكل (٥-٨) لحظة دخول الجسيم منطقة المجال المغناطيسي المنتظم.



الشكل (٥-٨): مثال (٥-١).

الحل:

بتطبيق العلاقة الرياضية ($ق_{غ} = \text{سـ}_{\circ}\ ع\ غ\ جا\theta$)، نجد أن:

١) $ق_{غ} = ٤ \times ١٠^{-٦} \times ٦ \times ١٠^{٦} \times ١ \times ١٠^{-٢} \times جا٩٠ = ٢,٤ \times ١٠^{-١}$ نيوتن

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى، يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة نحو المحور السيني الموجب، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي نحو المحور الزيني السالب ويمكن أن نعبر عن اتجاهه بالرمز (×)، فيكون اتجاه القوة المغناطيسية باتجاه المحور الصادي الموجب (+ص).

٢) $ق_{غ} = ٤ \times ١٠^{-٦} \times ٦ \times ١٠^{٦} \times ١ \times ١٠^{-٢} \times جا٩٠ = ٢,٤ \times ١٠^{-١}$ نيوتن

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى ومن ثم عكس الاتجاه الناتج لأن الشحنة سالبة نجد أن ($ق_{غ}$) تكون باتجاه المحور الزيني الموجب ويمكن أن نعبر عن اتجاهه بالرمز (•) .

٣) $ق_{غ} = ٤ \times ١٠^{-٦} \times ٦ \times ١٠^{٦} \times ١ \times ١٠^{-٢} \times جا١٨٠ =$ صفر نيوتن

٤) $ق_{غ} = ٤ \times ١٠^{-٦} \times ٦ \times ١٠^{٦} \times ١ \times ١٠^{-٢} \times جا٣٠ = ١,٢ \times ١٠^{-١}$ نيوتن باتجاه المحور الزيني السالب(×).

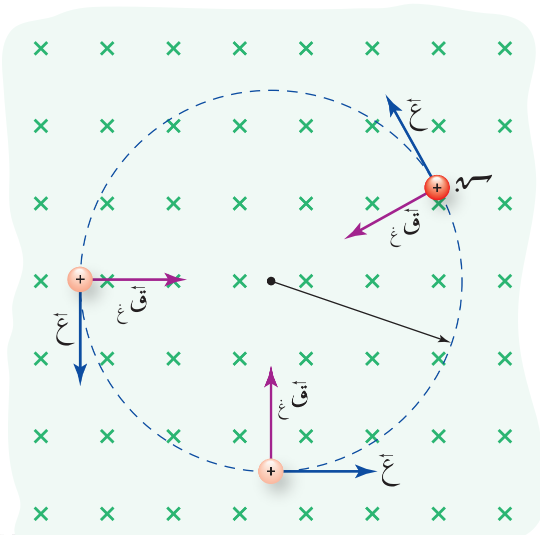
مراجعة (٥-٢)

١) كيف يمكن لشحنة كهربائية أن تتحرك في مجال مغناطيسي ولا تتأثر بقوة مغناطيسية؟

٢) عند قذف نيوترون في مجال مغناطيسي، فإنه لا يتأثر بقوة مغناطيسية. فسر ذلك.

٣) ماذا نعني بقولنا إن المجال المغناطيسي لمغناطيس يساوي ٥×١٠^{-٣} تسلا؟

درست سابقًا أن الجسم المتحرك بسرعة ثابتة في مسار دائري تؤثر فيه قوة باتجاه عمودي على اتجاه سرعته؛ ما يؤدي إلى تغير اتجاه سرعته باستمرار كما في حركة القمر الصناعي، ويكون اتجاه القوة باستمرار نحو مركز المسار الدائري؛ لذا تسمى القوة في هذه الحالة قوة مركزية. وتعلمت أن الجسيم المشحون عندما يتحرك داخل مجال مغناطيسي، فإنه يتأثر بقوة مغناطيسية اتجاهها دائمًا عمودي على اتجاه كل من المجال المغناطيسي وسرعة الجسيم المشحون كما يظهر في الشكل (٥-٩)، لذا تعد القوة المغناطيسية قوة مركزية. وستقتصر دراستنا على الحالة التي يكون فيها متجه السرعة عموديًّا على متجه المجال المغناطيسي.



الشكل (٥-٩): القوة المغناطيسية قوة مركزية عمودية دائمًا على كل من ($\vec{ع}$) و($\vec{غ}$)، وتجبر الجسيم على الحركة في مسار دائري إذا كان متجه السرعة عموديًّا على متجه المجال المغناطيسي.

ولكن كيف يمكن حساب نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه الجسيم المشحون؟ وما العوامل التي يعتمد عليها نصف قطر المسار الدائري؟

بإهمال قوة الجاذبية المؤثرة في الجسيم المشحون فإن القوة المغناطيسية هي القوة المحصلة المؤثرة في الجسيم كما في الشكل (٥-٩)، وبتطبيق قانون نيوتن الثاني:

$$\sum \vec{ق}_{\text{مركزية}} = ك\, ت_{\text{مركزية}} = ك \frac{ع^{٢}}{نق}$$

حيث (ت): التسارع المركزي للجسيم، و(ع): مقدار سرعة الجسيم، و(نق): نصف قطر المسار الدائري، و(ك): كتلة الجسيم المشحون.

وبما أن القوة المركزية المؤثرة في الجسيم هي القوة المغناطيسية ($ق_{غ}$)، فإن:

$$س\, ع\, غ\, جا ٩٠ = ك \frac{ع^{٢}}{نق}$$

وعليه، فإن نصف قطر (نق) مسار الجسيم الدائري يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{نق} = \frac{\text{ك ع}}{\text{سـ}_\circ\ \text{غ}} \quad \text{.......................} \quad (٥-٢)$$

وتكمن أهمية هذه العلاقة في إمكانية التحكم في نصف قطر مسار الجسيم المشحون المتحرك في المجال المغناطيسي عن طريق التحكم في كميات يمكن قياسها كالسرعة والمجال المغناطيسي، أو اختيارها كالشحنة والكتلة.

ولأن اتجاه القوة المغناطيسية عمودي باستمرار على اتجاه الإزاحة التي يحققها الجسيم المشحون المتحرك في المجال المغناطيسي، فإن الشغل الذي تبذله القوة المغناطيسية يساوي صفرًا، وحسب مبرهنة الشغل–الطاقة الحركية ($\text{ش} = \Delta \text{ط}_\text{ح}$)، فإن الطاقة الحركية للجسيم لا تتغير ما يعني أن مقدار سرعته سيبقى ثابتًا، فالمجال المغناطيسي وإن كان يغير اتجاه حركة الجسيم باستمرار ويجبره على الحركة في مسار دائري إلا أنه لا يكسب الجسيم طاقة حركية ولا يسحبها منه، فتبقى سرعته ثابتة، ولهذا يستخدم المجال المغناطيسي في المسارعات النووية وغيرها من الأجهزة الكهربائية في توجيه الجسيمات المشحونة والتحكم في مسارها دون تغيير مقدار سرعتها، في حين يستخدم المجال الكهربائي في تسريع هذه الجسيمات. راجع مثال (١–٧).

مثال (٥-٢)

دخل جسيم مشحون كتلته ٢×١٠^{-١٠} كغ وشحنته ٤ ميكروكولوم مجالًا مغناطيسيًا مقداره ٠,٢ تسلا بسرعة مقدارها $١٠^{٣}$ م/ث باتجاه عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي، احسب:

١) مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم.

٢) التسارع المركزي الذي اكتسبه هذا الجسيم.

٣) نصف قطر مسار الجسيم.

٤) مقدار سرعة الجسيم بعد مرور ٣ ثوان على وجوده داخل المجال المغناطيسي.

الحل:

١) $\text{ق}_\text{غ} = \text{سـ}_\circ\ \text{ع غ جا}\theta$

$= ٤ \times ١٠^{-٦} \times ١ \times ١٠^{٣} \times ٠,٢ \times \text{جا}٩٠$

$\text{ق}_\text{غ} = ٠,٨ \times ١٠^{-٣}$ نيوتن

٢) $\text{ق}_{\text{مركزية}} = \text{ق}_{\text{غ}} = \text{ك}\ \text{ت}_{\text{مركزية}}$

$$٠,٨ \times ١٠^{-٣} = ٢ \times ١٠^{-١٠}\ \text{ت}$$

$$\text{ت} = ٠,٤ \times ١٠^{-٧}\ \text{م/ث}$$

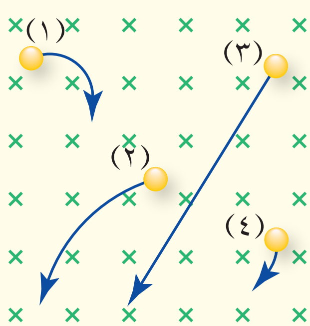
٣) $$\text{نق} = \frac{\text{ك ع}}{\text{ش غ}}$$

$$= \frac{٢ \times ١٠^{-١٠} \times ١٠^{-٣}}{٤ \times ١٠^{-٦} \times ٠,٢}$$

$$\text{نق} = ٠,٢٥\ \text{م}$$

٤) القوة المغناطيسية لا تغير مقدار سرعة الجسيم، ولكن تغير اتجاه السرعة فقط، ولذلك فإن مقدار سرعة الجسيم سيبقى ($\text{ع} = ١٠^{٣}$ م/ث).

مراجعة (٥-٣)

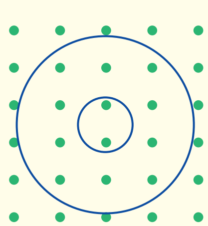


الشكل (٥-١٠): سؤال (١).

١) أدخلت أربعة جسيمات متماثلة في الكتلة والسرعة وبشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم، فاتخذت المسارات الموضحة في الشكل (٥-١٠)، أجب عما يأتي:

أ) حدد نوع شحنة الجسيمات الأربعة، موضحًا ذلك.

ب) رتب الجسيمات تنازليًا حسب مقدار شحنة كل منها.


الشكل (٥-١١): سؤال (٢).

٢) يمثل الشكل (٥-١١) مسارًا دائريًا لكل من إلكترون وبروتون، إذا علمت أن كتلة البروتون أكبر من كتلة الإلكترون، ويتحركان داخل مجال مغناطيسي بالسرعة نفسها، حدد أي المسارين للإلكترون وأيهما للبروتون، ثم حدد على الرسم اتجاه الدوران.

٣) دخل بروتون مجالًا منتظمًا، وكان اتجاه حركته عموديًا على اتجاه المجال المنتظم، كيف تحدد نوع المجال إذا كان كهربائي أم مغناطيسي عن طريق تتبع حركة البروتون؟

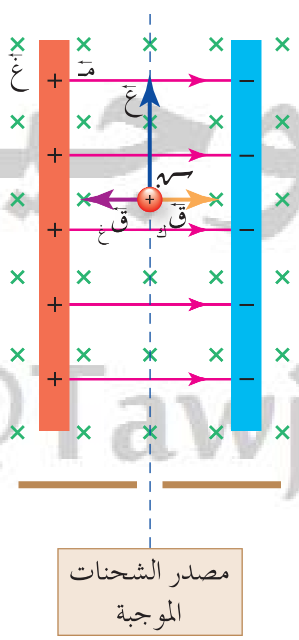
٥-٤ قوة لورنتز
(Lorentz Force)

تحتوي العديد من الأجهزة المستخدمة في الطب والصناعة على مجالين متعامدين؛ مجال كهربائي منتظم ومجال مغناطيسي منتظم، وفي هذه الحالة فإن **الجسيمات المشحونة المتحركة في المجالين المتعامدين تتأثر بقوتين معًا إحداهما كهربائية والأخرى مغناطيسية، وتسمى القوة المحصلة للقوتين الكهربائية والمغناطيسية** **قوة لورنتز**، وتحسب من العلاقة الآتية:

$$\vec{\text{ق}}_{\text{لورنتز}} = \vec{\text{ق}}_{\text{ك}} + \vec{\text{ق}}_{\text{غ}} \quad \text{.......................................} \quad (٥-٣)$$

مثال (٥-٣)

في الشكل (٥-١٢) صفيحتان متوازيتان مشحونتان، إذا كان جهد الصفيحة الموجبة (٧,٥) فولت، وجهد الصفيحة السالبة (-٧,٥) فولت، والبعد بينهما (١٠) سم. ويمر بينهما جسيم مشحون شحنته(+٤) ميكروكولوم باتجاه المحور الصادي الموجب وبسرعة مقدارها ٣٠٠ م/ث، وكانت الصفيحتان مغمورتين في مجال مغناطيسي (٠,٥) تسلا اتجاهه نحو المحور الزيني السالب (⊗).



الشكل(٥-١٢): مثال (٥-٣).

١) جد القوة المحصلة (لورنتز) المؤثرة في الشحنة مقدارًا واتجاهًا.

٢) إذا كانت سرعة الجسيم أكبر من ٣٠٠ م/ث، فماذا سيحدث لحركة الجسيم؟

الحل:

١) نحسب القوة الكهربائية والقوة المغناطيسية مقدارًا واتجاهًا ثم نجد القوة المحصلة الناتجة منهما كما يأتي:

- نحسب المجال الكهربائي، باستخدام العلاقة (٢-٩):

$$\text{جـ} = \text{مـ} \times \text{ف}$$

$$(٧,٥ - (-٧,٥)) = \text{مـ} \times ١٠ \times ١٠^{-٢}$$

مـ = ١٥٠ فولت/م

ثم نجد القوة الكهربائية من العلاقة (١-٣):

$ق_{ك} = مـ \times سـ_{\circ}$

$ق_{ك} = ١٥٠ \times ٤ \times ١٠^{-٦}$

$= ٠,٦ \times ١٠^{-٣}$ نيوتن نحو (+س).

- نحسب القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم المشحون:

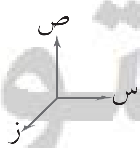
$ق_{غ} = سـ_{\circ}\ ع\ غ\ جا\theta$

$= ٤ \times ١٠^{-٦} \times ٣٠٠ \times ٠,٥ \times جا٩٠$

$= ٠,٦ \times ١٠^{-٣}$ نيوتن نحو (-س).

- نجد محصلة القوتين الكهربائية والمغناطيسية (قوة لورنتز):

$ق_{لورنتز} = ق_{ك} - ق_{غ}$



$= ٠,٦ \times ١٠^{-٣} - ٠,٦ \times ١٠^{-٣}$

$ق_{لورنتز} =$ صفر

بما أن القوة المحصلة المؤثرة في الجسيم تساوي صفرًا؛ فإن الجسيم يكمل حركته بسرعة ثابتة وفي خط مستقيم.

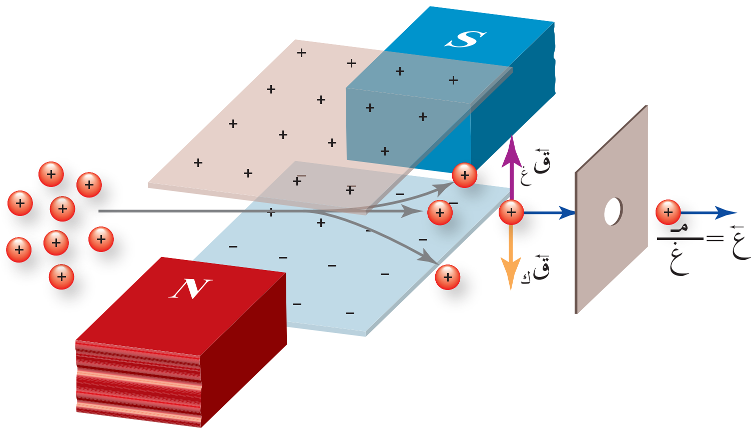
٢) إذا كانت سرعة الجسيم أكبر فإن القوة المغناطيسية المؤثرة فيه ستكون أكبر من القوة الكهربائية؛ لذلك سينحرف الجسيم باتجاه محور السينات السالب.

وتستخدم قوة لورنتز في الأجهزة البحثية، وفي ما يأتي توضيح لعمل كل من جهاز منتقي السرعة، وجهاز مطياف الكتلة.

(٥-٤-١) جهاز منتقي السرعة (*Velocity Selector*)

تبين لك من المثال السابق أنه إذا كانت قوة لورنتز المؤثرة في جسيم مشحون تساوي صفرًا؛ فإن الجسيم يكمل حركته بسرعة ثابتة وفي خطٍّ مستقيم. وبالاعتماد على هذه الفكرة صمم العلماء جهازًا يسمى منتقي السرعة، يستخدم في التجارب العلمية للحصول على حزمة من الجسيمات المشحونة المتحركة بسرعة ثابتة في خط مستقيم، ففي جهاز منتقي السرعة يستخدم مجالان كهربائي

ومغناطيسي يؤثر كل منهما بقوة في الجسيمات المشحونة كما في الشكل (٥–١٣)، فإذا أدخلت شحنة إلى المجالين، وأكملت حركتها دون انحراف فهذا يعني أن:



الشكل (٥–١٣): التأثير بقوة كهربائية وقوة مغناطيسية في الجسيمات المشحونة.

ق ك = ق غ

سـ مـ = سـ ع غ جا ٩٠

مـ = ع غ

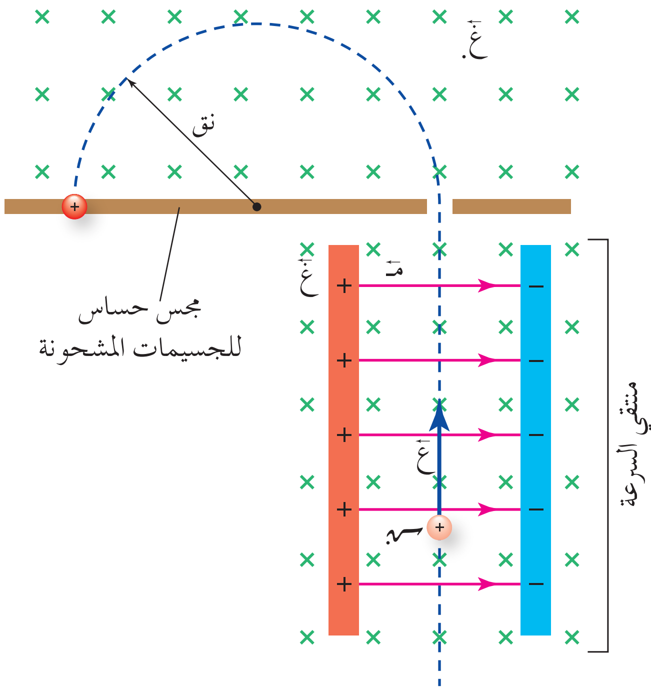
ع = مـ / غ .... (٥–٤)

تشير هذه المعادلة أنه إذا أدخلت حزمة من الجسيمات المشحونة المتحركة بسرعات مختلفة إلى جهاز منتقي السرعة، فإن الجسيمات التي تكون سرعتها مساوية النسبة (مـ / غ) تكمل حركتها دون انحراف. أما التي تكون سرعتها أكبر أو أقل من هذه النسبة فسوف تنحرف عن مسارها كما يبين الشكل (٥–١٣)، وعمليًّا يمكن التحكم بمقدار كل من (مـ) و(غ) لتكون نسبة (مـ / غ) مساوية السرعة المطلوبة في التجربة.

■ (٥–٤–٢) مطياف الكتلة (*The Mass Spectrometer*)

مطياف الكتلة هو جهاز يستخدم لفصل الأيونات المشحونة عن بعضها بحسب نسبة شحنة كل منها إلى كتلتها، ما يتيح معرفة كتلتها ونوع شحنتها، بالإضافة إلى دراسة مكونات بعض المركبات الكيميائية. ويظهر الشكل (٥–١٤) مبدأ عمل مطياف الكتلة، حيث يستخدم فيه منتقيًا للسرعة في البداية لانتقاء الأيونات المشحونة التي لها السرعة نفسها، وبعد خروج هذه الجسيمات من منطقة المجال الكهربائي (مـ) والمغناطيسي (غ)، تدخل منطقةً أخرى فيها مجال مغناطيسي آخر ($غ_{o}$) باتجاه المجال المغناطيسي (غ)، يجبر الجسيمات المشحونة على الحركة في مسار دائري يتناسب نصف قطره طرديًّا مع كتلة هذه الجسيمات. وفي نهاية

المسار الذي يشكل نصف دائرة، تصطدم هذه الجسيمات بمجس خاص حسّاس للجسيمات المشحونة، حيث تُحدَّد نسبة الشحنة إلى الكتلة اعتمادًا على نصف قطر المسار الدائري، وإذا كانت شحنة الجسيم معلومة، يمكن عندها حساب كتلته. وتجدر الإشارة إلى أن العالم ثومسون (Thomson) استخدم مطيافًا للكتلة في عام ١٨٩٧ لقياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته.



الشكل (٥-١٤): مطياف الكتلة.

مراجعة (٥-٤)

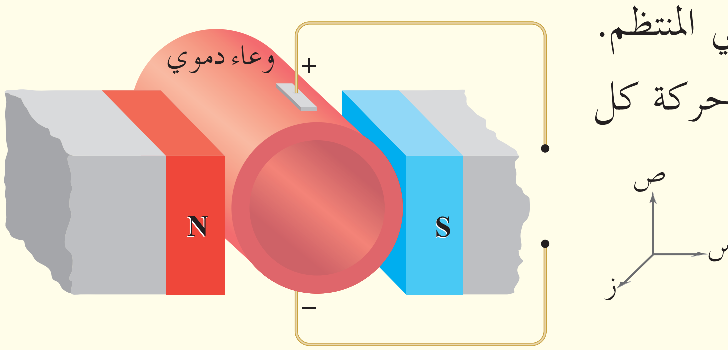
١) ما الشرط اللازم لكي يعمل المجالان الكهربائي والمغناطيسي بوصفهما جهازًا منتقيًا للسرعة؟

٢) اذكر اثنين من استخدامات مطياف الكتلة.

٣) وضح دور المجال المغناطيسي (غ)، والمجال المغناطيسي ($غ_0$) في جهاز مطياف الكتلة.

٤) يمثل الشكل (٥-١٥) مبدأ عمل مضخة كهرمغناطيسية في جهاز القلب الصناعي تستعمل في سحب السوائل التي تحتوي على أيونات مثل أيونات الصوديوم وضخها في الأوعية الدموية؛ حيث يؤثر مجال كهربائي نحو محور الصادات السالب فيكون عموديًّا على كل من الوعاء الدموي والمجال المغناطيسي المنتظم.

اعتمادًا على الشكل، حدد اتجاه حركة كل من الأيونات الموجبة والسالبة.



الشكل (٥-١٥): سؤال (٤).

٥–٥ القوة المغناطيسية التي يؤثر بها مجال مغناطيسي في موصل مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًا

(Magnetic Force Acting on a Current-Carrying Conductor)

درست أن حركة الشحنات الكهربائية باتجاه واحد تشكل تيارًا كهربائيًّا، فإذا كانت الشحنات الكهربائية المتحركة داخل مجال مغناطيسي تتأثر بقوة مغناطيسية فمن المتوقع أن يتأثر التيار الكهربائي المار في موصل مغمور في مجال مغناطيسي منتظم بقوة مغناطيسية أيضًا.

فالقوة المغناطيسية المؤثرة في مجموعة شحنات (س) تتحرك بسرعة (ع) في موصل مغمور في مجال مغناطيسي طوله (ل):

$$ق_{غ} = س\ ع\ غ\ جا\theta$$

$$ق_{غ} = س \frac{ل}{ز} غ\ جا$$

ومنها يمكن التوصل إلى القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في موصل مستقيم يمر فيه تيارٌ كهربائيٌّ كما يأتي:

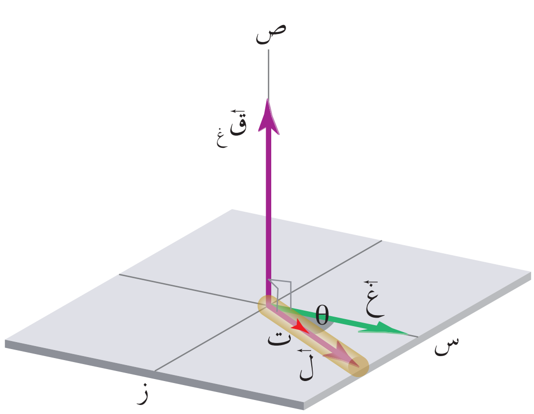
$$ق_{غ} = ت\ ل\ غ\ جا\theta \quad ....\ (٥–٥)$$

وتكتب العلاقة (٥–٥) بصورتها الاتجاهية كما يأتي:

$$\vec{ق}_{غ} = ت \vec{ل} \times \vec{غ}$$

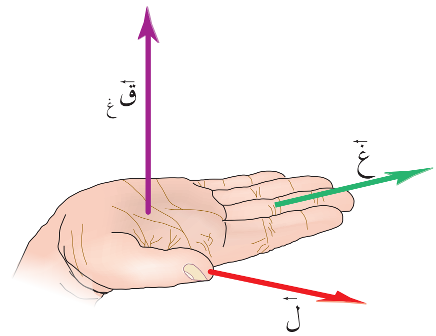
ومتجه طول الموصل ($\vec{ل}$) مقداره يساوي طول الموصل الموجود في المجال المغناطيسي واتجاهه باتجاه سريان التيار الكهربائي فيه، و(θ): الزاوية التي يصنعها متجه طول الموصل مع متجه المجال المغناطيسي.

نلاحظ من العلاقة السابقة أن القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل تنعدم إذا كان التيار المار فيه صفرًا، أو إذا كان متجه طول الموصل على امتداد ($\vec{غ}$). في حين تكون القوة المغناطيسية أكبر ما يمكن عندما يتعامد متجه طول الموصل ($\vec{ل}$) مع متجه المجال المغناطيسي ($\vec{غ}$). ويكون اتجاه القوة المغناطيسية عموديًّا على المستوى الذي يضم كلًّا من ($\vec{ل}$) و($\vec{غ}$) مهما كانت الزاوية بين اتجاهي ($\vec{ل}$)، و($\vec{غ}$) كما يبين الشكل (٥–١٦). ويُحدد اتجاه القوة المغناطيسية



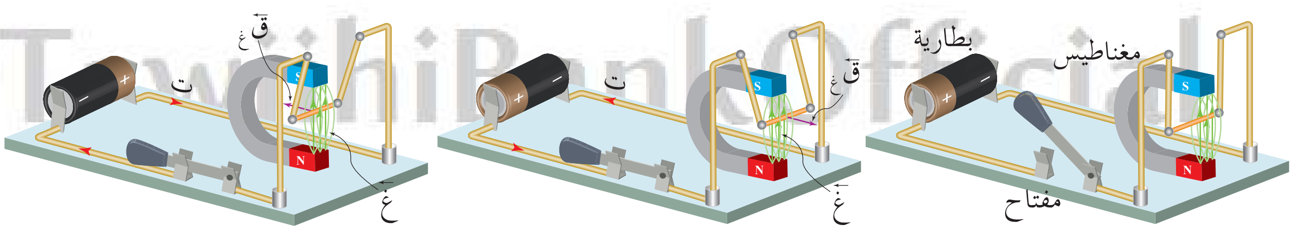
الشكل (٥–١٦): القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يمر فيه تيارًا.

المؤثرة في الموصل باستخدام قاعدة اليد اليمنى الموضحة في الشكل (٥-١٧).



الشكل (٥-١٧): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا.

وعمليًا يستدل على اتجاه القوة المغناطيسية من اتجاه انحناء الموصل، ويبين الشكل(٥-١٨) موصلًا مثبتًا من طرفيه موضوعًا بين قطبي مغناطيس. عند انعدام التيار الكهربائي في الموصل، لا يتأثر الموصل بقوة مغناطيسية من المجال المغناطيسي المغمور فيه، انظر الشكل (٥-١٨/أ، ب)، في حين يكون اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل باتجاه (+س) عندما يكون اتجاه سريان التيار الكهربائي نحو (-ص) كما في الشكل (٥-١٨/ج)، بينما يكون اتجاه القوة المغناطيسية نحو (-س) إذا انعكس اتجاه سريان التيار الكهربائي وأصبح نحو (+ص) كما يظهر في الشكل (٥-١٨/د).

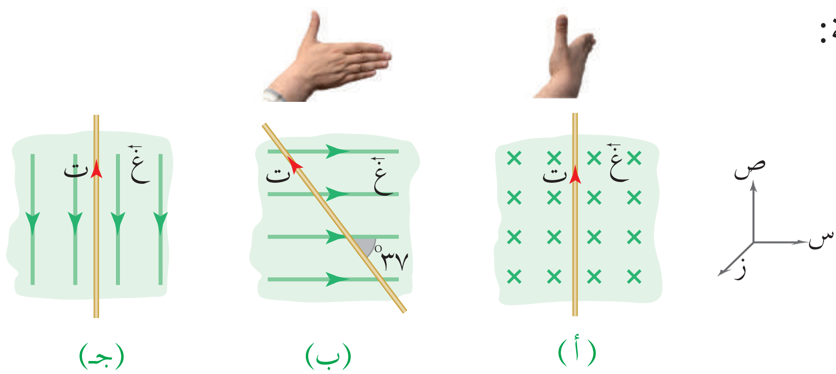


الشكل (٥-١٨): انحناء الموصل يكون باتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة فيه.

وقد صُمِّمت أجهزة كهربائية عدة تعتمد في عملها على القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا كهربائيًا داخل مجال مغناطيسي، مثل مكبرات الصوت، والغلفانوميتر المستخدم للكشف عن التيارات الكهربائية الصغيرة، والمحرك الكهربائي الذي يعد جزءًا أساسيًا في العديد من الأجهزة مثل المراوح والسيارات الهجينة.

مثال (٥-٤)

موصل مستقيم طوله ٢٠سم يمر فيه تيار كهربائي مقدار ه ٤ أمبير مغمور في مجال مغناطيسي منتظم مقداره ١,٠ تسلا كما في الشكل (٥-١٩)، جد القوة المغناطيسية مقدارًا واتجاهًا في الحالات الآتية:



الشكل (٥-١٩): مثال (٥-٤).

الحل:

لحساب القوة المغناطيسية نستخدم العلاقة:

١) $ق_غ = ٤ \times ٢٠ \times ١٠^{-٢} \times ١,٠ \times جا ٩٠° = ٠,٠٨$ نيوتن، نحو (–س)

٢) $ق_غ = ٠,٠٨ \times جا ١٤٣ = ٠,٠٨ \times ٠,٦$

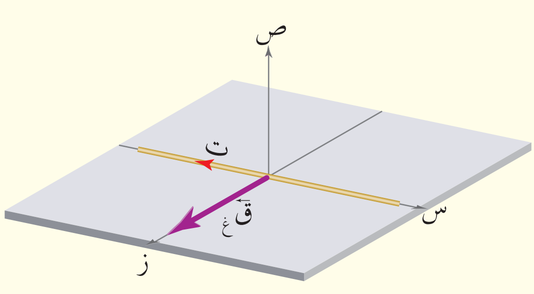
$ق_غ = ٤,٨ \times ١٠^{-٢}$ نيوتن، نحو(–ز).

٣) $ق_غ = ٠,٠٨ \times جا ١٨٠° =$ صفر

مراجعة (٥-٥)

١) اذكر العوامل التي تعتمد عليها القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا كهربائيًا ومغمور في مجال مغناطيسي.

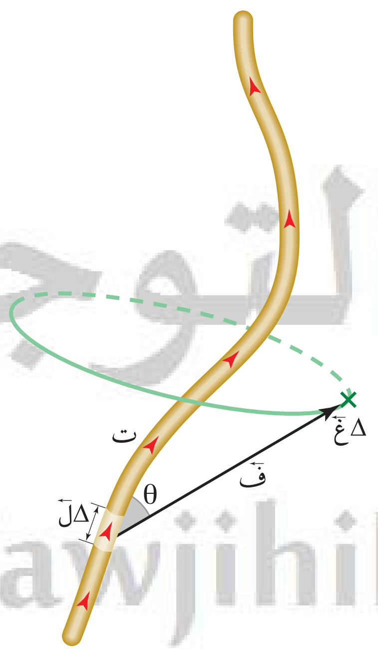
٢) يبين الشكل (٥-٢٠) موصلًا مستقيمًا يمر فيه تيار كهربائيّ باتجاه المحور السيني السالب، فإذا كان الموصل مغمورًا في مجال مغناطيسي منتظم وأثر فيه بقوة مغناطيسية بالاتجاه المبين في الشكل. فحدد اتجاه المجال المغناطيسي.



الشكل (٥-٢٠): سؤال (٢).

٥-٦ المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي
(Magnetic Field due to an Electric Current)

توصل العالم الدنماركي أورستد (Orsted) إلى أن التيار الكهربائي هو أحد أهم مصادر المجال المغناطيسي حين لاحظ انحراف إبرة مغناطيسية عن اتجاهها الأصلي عند وضعها بالقرب من موصل معزول يمر فيه تيار كهربائي، وفسر ذلك بتولد مجال مغناطيسي حول ذلك الموصل. ثم توالت أبحاث العلماء في دراسة العلاقة بين التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي الناشئ عنه، فتمكن العالمان الفرنسيان جان بيو (J.Biot) وفيليكس سافار (F. Savart) من التوصل تجريبيًّا إلى علاقة رياضية لحساب المجال المغناطيسي الناشئ حول موصلٍ يحمل تيارًا كهربائيًّا عرفت بقانون بيو- سافار، حيث يتناسب مقدار المجال المغناطيسي (Δغ) عند نقطة تبعد مسافة (ف) عن موصل يمر فيه تيار كهربائي (ت) والناشئ عن (Δل) من طوله طرديًّا مع كل من مقدار التيار الكهربائي وطول الموصل و(جاθ)؛ حيث (θ) الزاوية بين اتجاه ($\vec{ف}$) واتجاه ($\overrightarrow{\Delta ل}$) الذي يكون باتجاه التيار الكهربائي، وعكسيًّا مع مربع بعد النقطة عن الموصل (ف^2) انظر الشكل (٥-٢١). وتمثل العلاقة (٥-٦) إحدى صيغ قانون بيو- سافار:



الشكل (٥-٢١): قانون بيو- سافار.

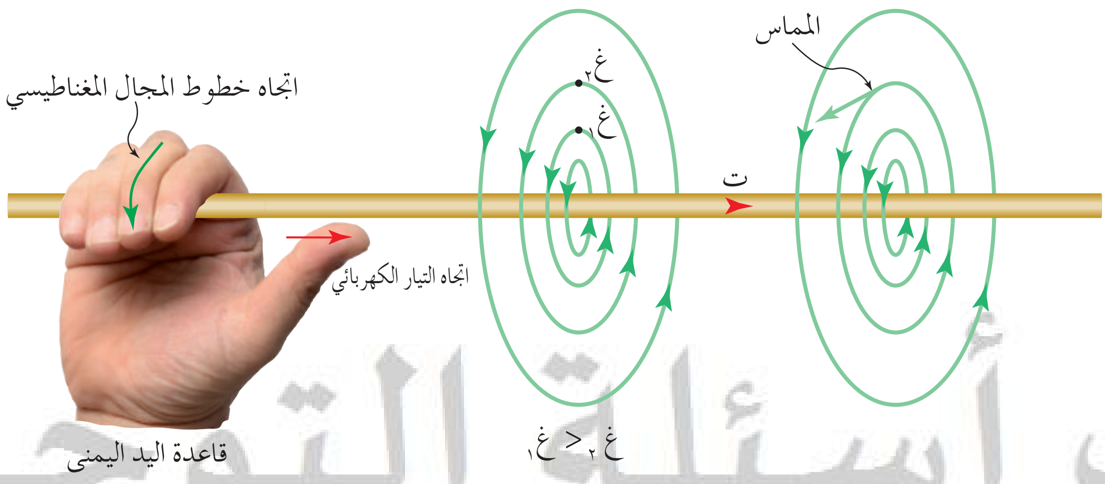
$$\Delta غ = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{\Delta ل \, جا\theta}{ف^2} \quad \text{.............................. (٥-٦)}$$

حيث (μ): ثابت يسمى النفاذية المغناطيسية (Magnetic Permeability) للوسط المحيط بالموصل، وإذا كان الوسط هواءً أو فراغًا، فإن ($\mu_\circ = 4\pi \times 10^{-7}$) تسلا .م/ أمبير).

وفي ما يأتي سندرس المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم طويل، وملف دائري، وملف لولبي.

■ (٥-٦-١) المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي يمر في موصل مستقيم طويل
(Magnetic Field Due to a Long Straight Wire Carrying a Current)

بينت التجارب العملية أن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم طويل يولد حوله مجالًا مغناطيسيًّا، ويكون هذا المجال على شكل دوائر متحدة في المركز ويقع مركزها عند نقطة على محور الموصل ويكون مستواها عموديًا على الموصل كما في الشكل (٥-٢٢).



الشكل (٥-٢٢): المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم طويل.

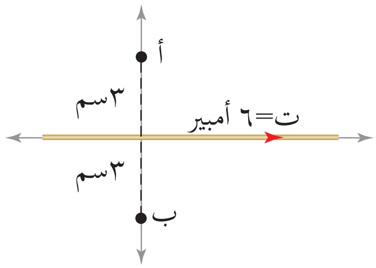
وباستخدام قانون بيو-سافار وإجراء بعض العمليات الرياضية نحصل على المجال المغناطيسي (غ) الناشئ عن تيار كهربائي (ت) يمر في موصل مستقيم طويل عند نقطة تبعد مسافة (ف) عن محوره ممثلاً بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$غ = \frac{\mu_0 ت}{٢\pi ف} \quad \text{.............................} \quad (٥-٧)$$

وتبعًا لقانون بيو-سافار، فإن المجال المغناطيسي على امتداد الموصل المستقيم يساوي صفرًا؛ حيث تكون (θ) بين (Δل) و(ف) تساوي صفرًا. ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي حول الموصل المستقيم، نستخدم قاعدة اليد اليمنى؛ فإذا قبضنا على السلك باليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه مرور التيار الكهربائي في الموصل المستقيم، فإن الأصابع الأربعة تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي كما في الشكل (٥-٢٢). أما اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة بالقرب من الموصل يكون باتجاه المماس لخط المجال المغناطيسي عند تلك النقطة.

مثال (٥-٥)

يبين الشكل (٥-٢٣) موصلًا مستقيمًا طويلًا يحمل تيارًا كهربائيًا مقداره (٦) أمبير، جد المجال المغناطيسي الناشئ عن هذا التيار مقدارًا واتجاهًا عند النقطتين (أ) و(ب).



الشكل (٥-٢٣): مثال (٥-٥).

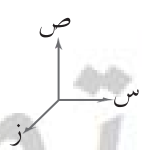
الحل:

بما أن النقطتين (أ) و(ب) لهما البعد نفسه عن الموصل المستقيم فإن مقدار المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار المار في الموصل المستقيم عند كل منهما (غأ)، و(غب) متساويان، ويحسب من العلاقة:

$$غ = \frac{\mu_{\circ} ت}{٢\pi ف}$$

$$غ_{أ} = غ_{ب} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٦}{٢\pi \times ٣ \times ١٠^{-٢}}$$

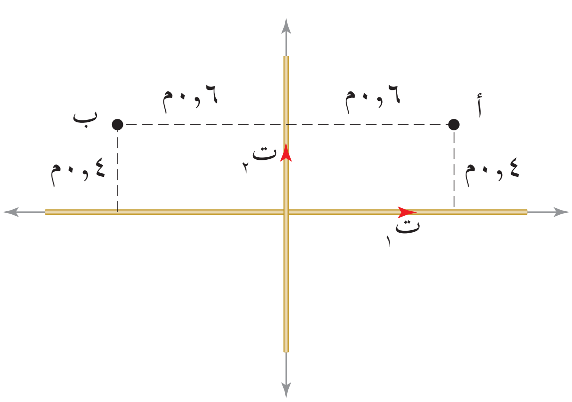
$$= ٤,٠ \times ١٠^{-٥} \text{ تسلا}$$



ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (أ) نطبق قاعدة اليد اليمنى، وبأخذ اتجاه المماس لخط المجال المغناطيسي عند النقطة (أ)، يكون اتجاهه عندها نحو (+ز). أما عند النقطة (ب) نحو (-ز).

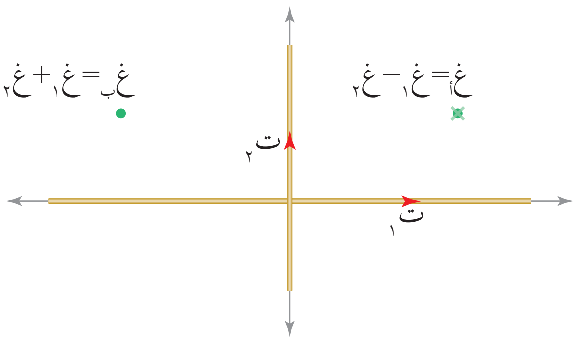
مثال (٥-٦)

يبين الشكل (٥-٢٤) موصلين مستقيمين طويلين متعامدين يقعان في مستوى الصفحة، يمر في كل منهما تيار مقداره ١٢ أمبير. اعتمادًا على القيم المبينة في الشكل، جد المجال المغناطيسي المحصل مقدارًا واتجاهًا عند كل من النقطتين (أ)، (ب).



الشكل (٥-٢٤): مثال (٥-٦).

الحل:



الشكل (٥–٢٥): مثال (٥–٦).

يوجد عند النقطة (أ) مجالان مغناطيسيان كما يوضح الشكل (٥–٢٥)، ($غ_١$) الناشئ عن التيار الأول، و($غ_٢$) الناشئ عن التيار الثاني.

$$غ_١ = \frac{\mu_٠ ت_١}{٢\pi ف_١} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٢}{٢\pi \times ٠,٤}$$

= $٠,٦ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه (+ز).

$$غ_٢ = \frac{\mu_٠ ت_٢}{٢\pi ف_٢} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٢}{٢\pi \times ٠,٦}$$

= $٠,٤ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه (−ز).

∴ $غ_{أ\,(المحصلة)} = غ_١ - غ_٢ = ٠,٢ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه (+ز).

أما عند النقطة (ب) فإن المجالين بالاتجاه نفسه، ولهذا يكون المجال المغناطيسي المحصل:

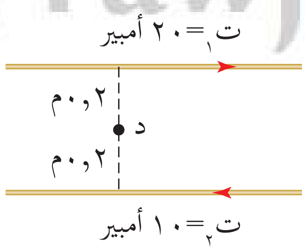
$غ_{ب\,(المحصلة)} = غ_١ - غ_٢ = ١,٠ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه (+ز).

مثال (٥–٧)

موصلان مستقيمان متوازيان طويلان يحملان تيارين متعاكسين ($ت_١$، $ت_٢$)، كما في الشكل (٥–٢٦)، أجب عما يأتي:

١) جد المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د) مقدارًا واتجاهًا.

٢) حدد موقع النقطة أو النقاط التي ينعدم عندها المجال المغناطيسي.



الشكل (٥–٢٦): مثال (٥–٧).

الحل:

١) يوجد عند النقطة (د) مجالان، ($غ_١$) الناشئ عن ($ت_١$)، و($غ_٢$) الناشئ عن ($ت_٢$).

$$غ_١ = \frac{\mu_٠ ت_١}{٢\pi ف_١} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٢٠}{٢\pi \times ٠,٢} = ٢,٠ \times ١٠^{-٥}$$ تسلا، باتجاه (+ز).

$$غ_٢ = \frac{\mu_٠ ت_٢}{٢\pi ف_٢} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٠}{٢\pi \times ٠,٢} = ١,٠ \times ١٠^{-٥}$$ تسلا، باتجاه (+ز).

وعليه، يكون المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د) حاصل جمع المجالين:

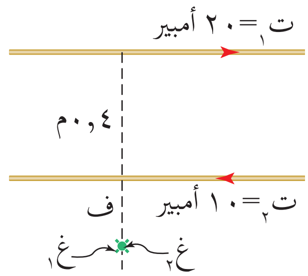
$غ_{د\,(المحصلة)} = غ_1 - غ_2 = ٣,٠ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه (−ز).

٢ لكي ينعدم المجال المغناطيسي ($غ_{محصلة}$ = صفر)، يجب أن يكون المجالان متساويين مقدارًا ومتعاكسين اتجاهًا، ويتحقق ذلك في المنطقة الواقعة خارج الموصلين على امتداد الخط العمودي عليهما، من جهة التيار الأصغر، وعلى بعد (ف) منه كما في الشكل (٥−٢٧):

$$غ_1 = غ_2$$

$$\frac{\mu_0 ت_1}{2\pi ف_1} = \frac{\mu_0 ت_2}{2\pi ف_2}$$

$$\frac{٢٠}{(٠,٤ + ف)} = \frac{١٠}{ف}$$



الشكل (٥−٢٧): مثال (٥−٧).

ومنه نجد أن ٢٠ف = ٤+١٠ف

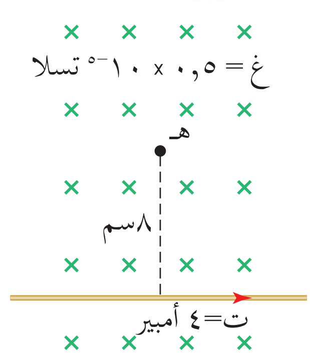
∴ ف = ٠,٤ م. (ينعدم المجال المغناطيسي عند النقاط جميعها الواقعة على خط مستقيم يوازي الموصلين وعلى بعد (٠,٤) م عن الموصل الثاني، و(٠,٨) م عن الموصل الأول).

مثال (٥−٨)

مجال مغناطيسي منتظم باتجاه (−ز) مغمور فيه موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي. إذا كانت النقطة (هـ) تبعد عن الموصل ٨سم كما يوضح الشكل (٥−٢٨)، فجد:

١ المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.

٢ القوة المغناطيسية مقدارًا واتجاهًا المؤثرة في شحنة كهربائية مقدارها ٢ نانوكولوم في أثناء مرورها من النقطة (هـ) بسرعة مقدارها ٤٠٠م/ث باتجاه محور الصادات السالب (−ص).

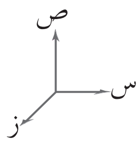


الشكل (٥−٢٨): مثال (٥−٨).

الحل:

١ يوجد عند النقطة (هـ) مجالان مغناطيسيان، أحدهما المجال المنتظم باتجاه (−ز)، والآخر

المجال المغناطيسي الناشئ عن الموصل المستقيم الطويل، ولحسابه نستخدم العلاقة (٥-٧):



$$\text{غ}_{\text{مستقيم}} = \frac{\mu_{\circ}\text{ت}}{\text{٢}\pi\text{ف}}$$

$$\text{غ}_{\text{مستقيم}} = \frac{\text{٤}\pi \times \text{١٠}^{-\text{٧}} \times \text{٤}}{\text{٢}\pi \times \text{٨} \times \text{١٠}^{-\text{٢}}}$$

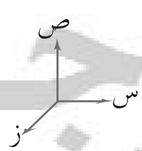
$\text{غ}_{\text{مستقيم}} = \text{١} \times \text{١٠}^{-\text{٥}}$ تسلا، باتجاه (+ز).

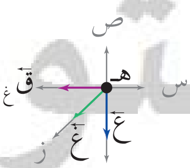
ولأن المجالين متعاكسان في الاتجاه عند النقطة (هـ):

$$\text{غ}_{\text{هـ (المحصلة)}} = \text{غ}_{\text{مستقيم}} - \text{غ}_{\text{منتظم}} = \text{١} \times \text{١٠}^{-\text{٥}} - \text{٠,٥} \times \text{١٠}^{-\text{٥}}$$

$= \text{٠,٥} \times \text{١٠}^{-\text{٥}}$ تسلا، باتجاه (+ز).

٢ تمر الشحنة الكهربائية من النقطة (هـ) فيؤثر فيها المجال المغناطيسي المحصل ($\text{غ}_{\text{هـ}}$)، وعليه تكون القوة المغناطيسية المؤثرة فيها:





$\text{ق}_{\text{غ}} = \text{سـ}_{\circ}\ \text{ع غ جا}\theta$ $(\theta = \text{٩٠}^{\circ})$

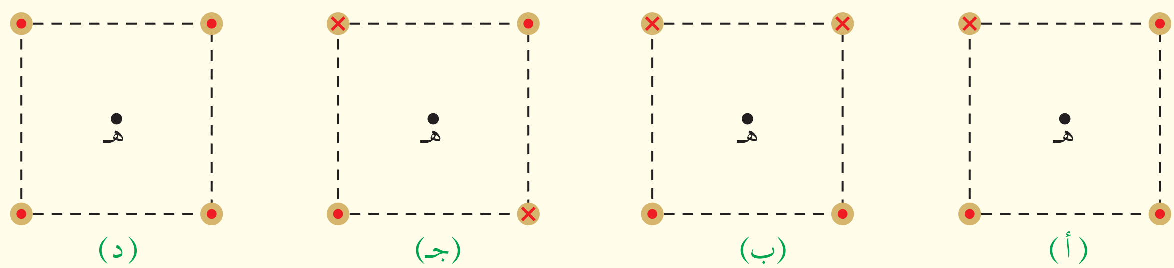
$\text{ق}_{\text{غ}} = \text{٢} \times \text{١٠}^{-\text{٩}} \times \text{٤} \times \text{١٠}^{\text{٢}} \times \text{٠,٥} \times \text{١٠}^{-\text{٥}} \times \text{جا٩٠}^{\circ} = \text{٤} \times \text{١٠}^{-\text{١٢}}$ نيوتن نحو محور السينات السالب(−س).

مراجعة (٥-٦-١)

١ صف خطوط المجال المغناطيسي الناشئ حول موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي.

٢ ما العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي عند نقطة قرب موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي؟

٣ يمثل الشكل(٥-٢٩) أربعة توزيعات لموصلات مستقيمة طويلة يمر فيها التيار في اتجاه المحور الزيني وموزعة عند رؤوس مربع، إذا كانت قيم التيار فيها متساوية، رتب هذه التوزيعات تصاعديًّا حسب مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة ه.

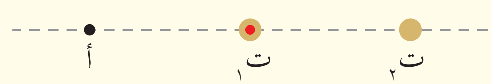


الشكل (٥-٢٩): سؤال (٣).

٤ في الشكل (٥-٣٠)، إذا انعدم المجال المغناطيسي عند النقطة (أ)، أجب عما يأتي:

أ جد اتجاه التيار (ت٢).

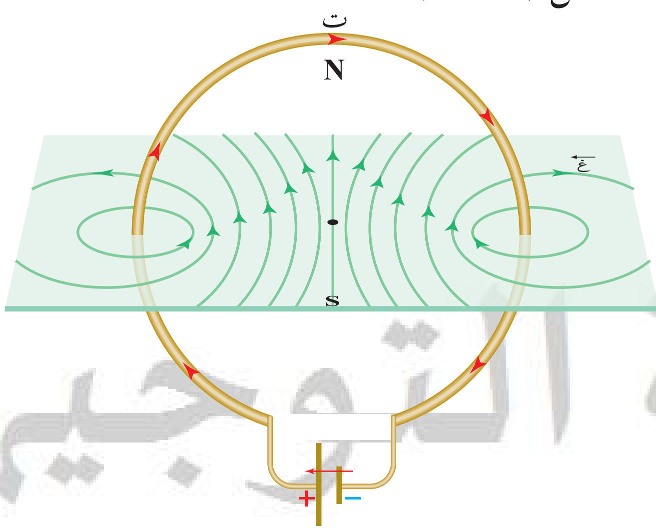
ب أيهما أكبر مقدارًا التيار (ت١) أم (ت٢)؟ فسر إجابتك.



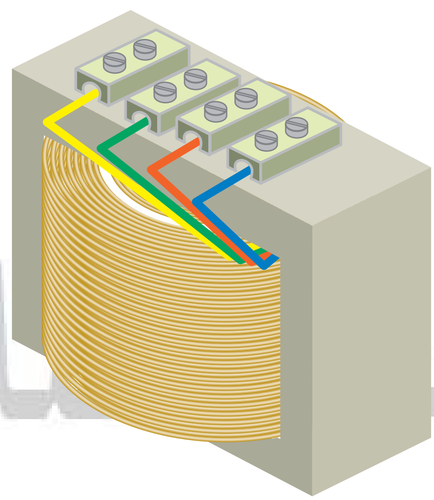
الشكل (٥-٣٠): سؤال (٤).

■ **(٥–٦–٢) المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي يمر في ملف دائري** *(Magnetic Field of a Circular Current Loop)*

تدخل الملفات الدائرية في تركيب بعض الأجهزة الكهربائية مثل المحول الكهربائي، حيث تولد كل لفة من لفات الموصل النحاسي المعزول في المحول مجالًا مغناطيسيًّا عندما يمر فيها تيار كهربائي، انظر الشكل (٥–٣١). ويكون المجال المغناطيسي في مركز الملف الدائري عموديًّا على مستوى الملف، يمكن تمثيله بخط مستقيم، بينما تنحني هذه الخطوط ويزداد انحناؤها كلما ابتعدنا عن مركز الملف الدائري كما يظهر في الشكل (٥–٣٢).



الشكل (٥–٣٢): المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في ملف دائري.

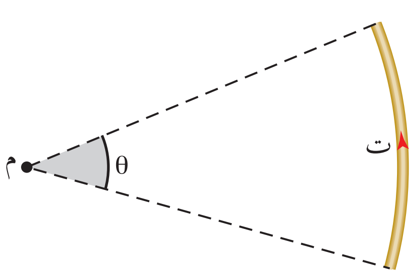


الشكل (٥–٣١): أحد أشكال المحولات.

وقد وجد تجريبيًّا أن مقدار المجال المغناطيسي (غ) المتولد في مركز ملف دائري عدد لفاته (ن)، ونصف قطره (نق)، ويمر فيه تيار كهربائي (ت) يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية التي يمكن اشتقاقها بسهولة من قانون بيو–سافار:

$$غ = \frac{\mu_{\circ}\,ت\,ن}{٢نق} \quad ....\quad (٥–٨)$$

إذا كان الملف الدائري مكونًا من لفة واحدة، فإن (ن=١)، أما إذا كان الموصل جزءًا من لفة دائرية ، أي أن شكله قوس كما في الشكل (٥–٣٣)، فإن نسبة هذا الجزء من اللفة تُحسب من العلاقة الرياضية الآتية:

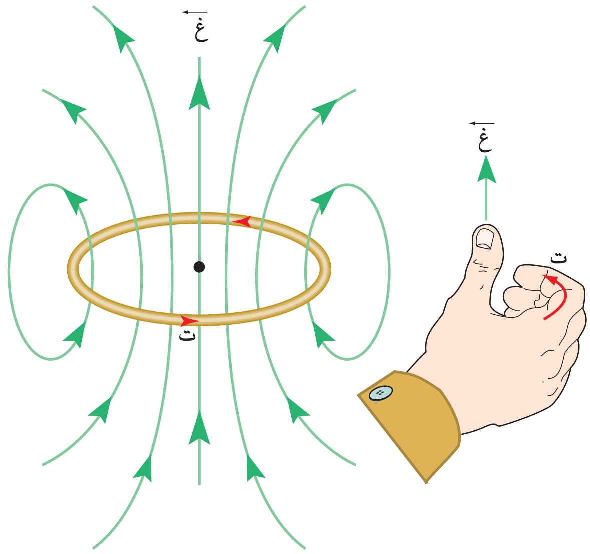


الشكل (٥–٣٣): جزء من لفة دائرية على شكل قوس.

$$ن = \frac{\theta}{٣٦٠^{\circ}} \quad ....\quad (٥–٩)$$

حيث (θ): الزاوية المركزية بالدرجات التي تقابل القوس.

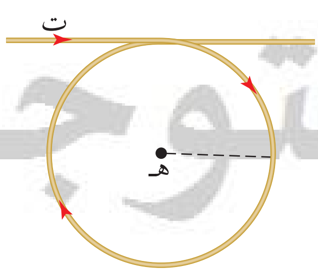
ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي الناشئ في مركز الملف الدائري، نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث توضع الأصابع الأربعة باتجاه دوران التيار في الملف الدائري، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي (القطب الشمالي) كما في الشكل (٥-٣٤).



الشكل (٥-٣٤): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي في مركز الملف الدائري.

مثال (٥-٩)

يبين الشكل (٥-٣٥) موصلًا مستقيمًا طويلًا يمر فيه تيار كهربائي مقداره ١٢ أمبير، صنع من جزء منه ملف دائري مكون من ٧ لفات ونصف قطره ٤ سم، فإذا كان الموصل يقع في مستوى الصفحة، فجد المجال المغناطيسي المحصل في مركز الملف الدائري (ه) مقدارًا واتجاهًا.

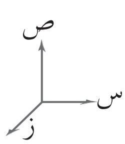


الشكل (٥-٣٥): مثال (٥-٩).

الحل:

يوجد عند النقطة (هـ) مركز الملف الدائري مجالان مغناطيسيّان، أحدهما ناشئ عن التيار الكهربائي المار في الموصل المستقيم الطويل ($غ_١$)، والآخر عن التيار المار في الملف الدائري ($غ_٢$). والتيار المار في الموصلين متساوٍ، وبعد النقطة (هـ) عن الموصل المستقيم يساوي نصف قطر الملف الدائري (ف=نق).

$$غ_١ = \frac{\mu_٠ ت}{٢\pi ف} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٢}{٢\pi \times ٤ \times ١٠^{-٢}}$$



$= ٦ \times ١٠^{-٥}$ تسلا، باتجاه محور (−ز).

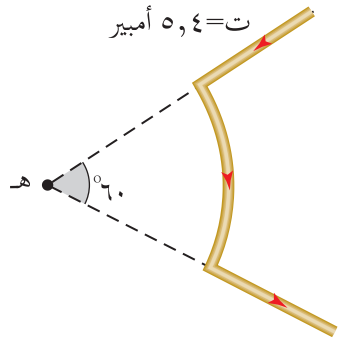
$$غ_٢ = \frac{\mu_٠ ت ن}{٢ نق} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٢ \times ٧}{٢\pi \times ٤ \times ١٠^{-٢}}$$ (وبتعويض قيمة $\pi = \frac{٢٢}{٧}$)

$غ_٢ = ١٣٢ \times ١٠^{-٥}$ تسلا، باتجاه محور (−ز).

$\therefore غ_{(المحصلة)} = غ_١ + غ_٢ = ١٣٨ \times ١٠^{-٥}$ تسلا، باتجاه محور (−ز).

مثال (٥-١٠)

يمثل الشكل (٥-٣٦) جزءًا من ملف دائري نصف قطره ٩ سم، اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل.
جد المجال المغناطيسي مقدارًا واتجاهًا عند النقطة (هـ) مركز الملف الدائري.



الشكل (٥-٣٦): مثال (٥-١٠).

الحل:

تقع النقطة (هـ) على امتداد الموصلين المستقيمين، ولهذا يكون المجال المغناطيسي الناتج من كل موصل عندالنقطة (هـ) يساوي صفرًا حسب قانون بيو-سافار. ولإيجاد (ن) نستخدم العلاقة:

$$ن = \frac{\theta}{٣٦٠°} = \frac{٦٠}{٣٦٠} = \frac{١}{٦} \text{ لفة.}$$

وعليه، فإن المجال المغناطيسي عند النقطة (هـ):

$$غ_{هـ} = \frac{\mu_{\circ} ت ن}{٢ نق} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٥,٤ \times \frac{١}{٦}}{٢ \times ٩ \times ١٠^{-٢}} = ٢,٠\pi \times ١٠^{-٥} \text{ تسلا، باتجاه (-ز).}$$

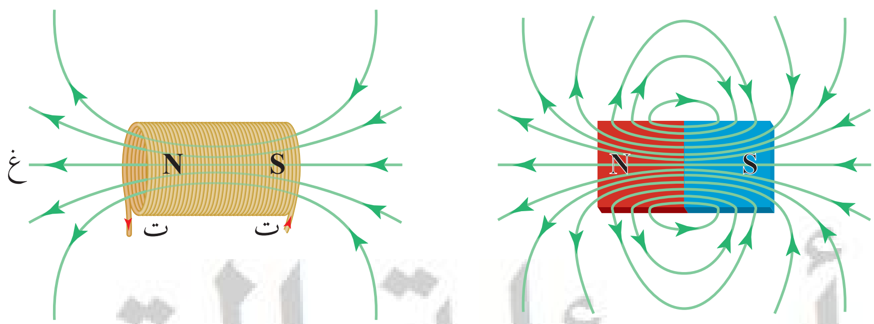
مراجعة (٥-٦-٢)

١) اذكر العوامل المؤثرة في المجال المغناطيسي الناشئ في مركز ملف دائري يمر فيه تيار كهربائي.

٢) هل المجال المغناطيسي المتولد في مركز ملف دائري يمر فيه تيار كهربائي، منتظم أم لا؟ فسر إجابتك.

(٥-٦-٣) المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار المار في ملف لولبي *(The Magnetic Field of a Solenoid)*

يتكون الملف اللولبي من عدد من الحلقات الدائرية، بحيث يكون المجال المغناطيسي الناشئ داخله هو ناتج الجمع الاتجاهي للمجالات المغناطيسية الناشئة عن التيار الكهربائي المار في الحلقات الدائرية المكونة له. ويشبه المجال المغناطيسي الناشئ في الملف اللولبي المجال المغناطيسي للمغناطيس المستقيم كما يوضحه الشكل (٥-٣٧)، إلا أنه يمتاز عنه بإمكانية التحكم في مقداره واتجاهه عن طريق التحكم في التيار المار فيه.



الشكل (٥-٣٧): الملف اللولبي مغناطيس كهربائي عند مرور تيار فيه.

يعد المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا بعيدًا عن طرفي الملف؛ إذ تكون خطوط المجال المغناطيسي متوازية داخله وبالاتجاه نفسه. وكلما زاد تراص حلقات الملف اللولبي زاد انتظام مجاله، ولذلك نستخدم أسلاكًا رفيعة ومتراصة للحصول على مجال مغناطيسي منتظم تمامًا داخل الملف اللولبي.

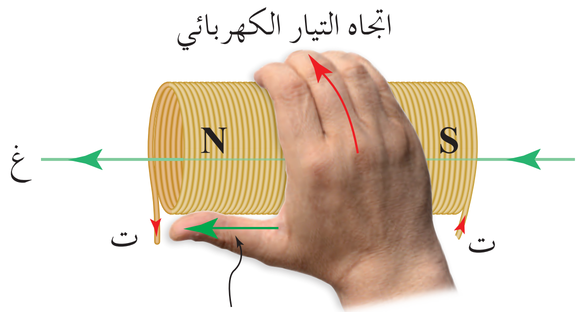
يعتمد مقدار المجال المغناطيسي المتولد داخل الملف اللولبي على التيار الكهربائي المار فيه (ت)، وعدد لفاته (ن)، وطوله (ل). ويعتمد المجال المغناطيسي الناشئ داخل الملف اللولبي على نوع مادة قلب الملف، فإذا أدخلنا قلبًا من الحديد داخل الملف اللولبي مثلًا؛ يزداد المجال المغناطيسي داخل الملف بشكل كبير حيث ($\mu_{\text{الحديد}} > \mu_\circ$)، ويحسب المجال المغناطيسي المتولد عند نقطة تقع داخل الملف اللولبي وبعيدًا عن طرفيه من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{غ} = \frac{\mu \, \text{ت} \, \text{ن}}{\text{ل}} \quad \text{.......................................} \quad (١٠-٥)$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة الرياضية بدلالة عدد اللفات في وحدة الأطوال (نَ)، حيث ($\text{نَ} = \frac{\text{ن}}{\text{ل}}$) بوحدة (لفة/م) كما يأتي:

$غ = \mu\, ت\, نَ$ .... (٥-١٠)

ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي المنتظم داخل الملف اللولبي وبعيدًا عن طرفيه، فإنّنا نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث توضع الأصابع الأربعة باتجاه دوران التيار الكهربائي في الملف اللولبي، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي (القطب الشمالي)، كما في الشكل (٥-٣٨).

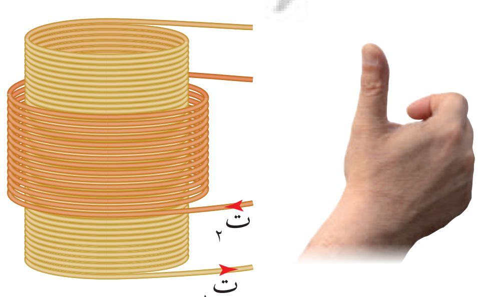


الشكل (٥-٣٨): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي.

وعليه يعد الطرف الذي تخرج منه خطوط المجال المغناطيسي قطبًا شماليًا، والطرف الذي تدخل فيه خطوط المجال المغناطيسي قطبًا جنوبيًا كما هو الحال في المغناطيس المستقيم.

مثال (٥-١١)

ملف لولبي طويل عدد لفاته ١٥ لفة لكل ١سم من طوله، يمر فيه تيار ($ت_١$) مقداره ٨ أمبير، ويحيط به ملف لولبي آخر عدد لفاته ٢٠٠٠ لفة، وطوله ٢٤سم، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره ٣ أمبير باتجاه معاكس لاتجاه تيار الملف اللولبي الأول، إذا علمت أن الملفين متحدين في المحور كما في الشكل (٥-٣٩)، فجد:



الشكل (٥-٣٩): مثال (٥-١١).

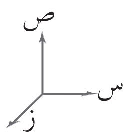
١) المجال المغناطيسي المحصل مقدارًا واتجاهًا الناشئ في المحور المشترك.

٢) التيار الكهربائي المار في الملف اللولبي الثاني لكي ينعدم المجال المغناطيسي في المحور.

الحل:

١) يوجد عند المحور المشترك مجالان مغناطيسيّان، أحدهما ناشئ عن التيار المار في الملف اللولبي الأول (غ١)، والآخر عن التيار المار في الملف اللولبي الثاني (غ٢).

بما أن عدد لفات الملف اللولبي الأول ١٥ لفة لكل ١سم، فإن:



$$\text{ن} = \frac{\text{ن}}{\text{ل}} = \frac{١٥}{١ \times ١٠^{-٢}} = ١٥ \times ١٠^{-٢} \text{لفة/م.}$$

وعليه، فإن:

$$\text{غ}_{\text{هـ}} = \mu_{\circ}\text{ت}_{١}\text{ن} = ٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٨ \times ١٥ \times ١٠^{-٢}$$

$$= ٤٨\pi \times ١٠^{-٤} \times ٨ \times ١٥ \times ١٠^{-٢} \text{ تسلا، باتجاه } (+\text{ص}).$$

$$\text{غ}_{٢} = \frac{\mu_{\circ}\text{ت}_{٢}\text{ن}_{٢}}{\text{ل}_{٢}} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٣ \times ٢٠٠٠}{٢٤ \times ١٠^{-٢}}$$

$$= ١٠٠\pi \times ١٠^{-٤} \text{ تسلا، باتجاه } (-\text{ص}).$$

وعليه، فإن المجال المغناطيسي عند محورهما:

$$\therefore \text{غ}_{\text{(المحصلة)}} = \text{غ}_{٢} - \text{غ}_{١} = ٥٢\pi \times ١٠^{-٤} \text{ تسلا، باتجاه محور } (+\text{ص}).$$

٢) لكي ينعدم المجال المغناطيسي في المحور، يجب أن يتساوى المجالان في المقدار، ويتعاكسا في الاتجاه، وبما أن اتجاهيهما متعاكسان، فإن:

$$\text{غ}_{١} = \text{غ}_{٢}$$

$$\mu_{\circ}\text{ت}_{١}\text{ن}_{١} = \frac{\mu_{\circ}\text{ت}_{٢}\text{ن}_{٢}}{\text{ل}_{٢}}$$

$$٨ \times ١٥ \times ١٠^{٢} = \frac{\text{ت}_{٢} \times ٢٠٠٠}{٢٤ \times ١٠^{-٢}}$$

$$\text{ت}_{٢} = ١{,}٤٤ \text{ أمبير}$$

مراجعة (٥-٦-٣)

١ هل تتغير قيمة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي عند التحرك من منتصف محور الملف اللولبي نحو طرفيه؟ فسر إجابتك.

٢ ثلاثة ملفات لولبية، طول الأول (ل) وعدد لفاته (ن)، وطول الثاني (٢ل) وعدد لفاته (ن)، وطول الثالث (٠,٥ ل) وعدد لفاته (٢ن). يمر في كل منها التيار الكهربائي نفسه، رتب هذه الملفات تنازليًا حسب المجال المغناطيسي المتولد في محورها.

٣ كيف سيتأثر المجال المغناطيسي المتولد عند نقطة تقع في محور الملف اللولبي وبعيدًا عن طرفيه في الحالات الآتية:

أ زيادة قطر كل لفة إلى مثلي ما كانت عليه.

ب تغيير مادة قلب الملف اللولبي لتصبح حديدًا.

جـ مضاعفة طول الملف اللولبي مرتين مع مضاعفة عدد لفاته مرتين أيضًا.

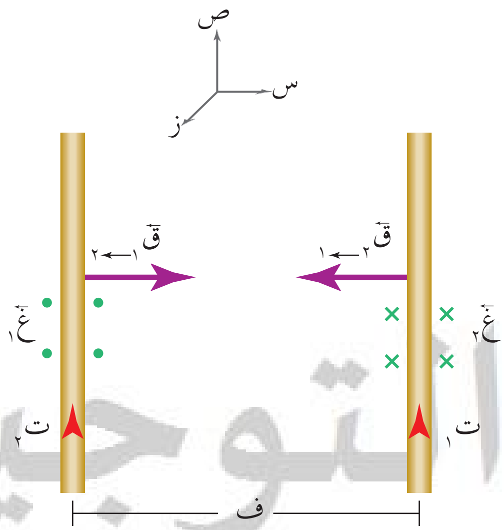
٤ ملف لولبي طوله (٠,٣١٤) م، نشأ داخله مجال مغناطيسي مقداره ٦ تسلا عندما مر فيه تيار كهربائي مقداره ٧٥ أمبير، احسب عدد لفاته.

القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يمر فيهما تياران كهربائيان

(The Magnetic Force between Two Long Parallel Conductors Carrying Currents)

درست أن الموصل المستقيم الذي يحمل تيارًا كهربائيًا ومغمور في مجال مغناطيسي يتأثر بقوة مغناطيسية. فكيف تحسب القوة المغناطيسية المؤثرة فيه إذا كان المجال المغناطيسي الخارجي المؤثر ناتجًا من موصل مستقيم آخر طويل مجاور له؟ وكيف يمكن تحديد اتجاه هذه القوة؟ وما العوامل التي تعتمد عليها هذه القوة؟

عند وضع موصلين طويلين مستقيمين متوازيين البعد بينهما (ف)، ويمر في كل منهما تيار كهربائي كما في الشكل (٥–٤٠)، تنشأ قوة مغناطيسية متبادلة بين الموصلين، وذلك حسب قانون نيوتن الثالث، حيث يؤثر الموصل الأول في الثاني بقوة مغناطيسية ($\vec{\text{ق}}_{1\leftarrow 2}$) باتجاه معين، وفي الوقت ذاته، يؤثر الموصل الثاني في الأول بقوة مغناطيسية ($\vec{\text{ق}}_{2\leftarrow 1}$) مساوية القوة الأولى في المقدار ومعاكسة لها في الاتجاه ($\vec{\text{ق}}_{2\leftarrow 1}$، $\vec{\text{ق}}_{1\leftarrow 2}$).



الشكل (٥–٤٠): القوة المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين.

عند مرور تيار كهربائي وليكن ت_1 في الموصل الأيمن باتجاه (+ص)، سينشأ عنه مجال مغناطيسي (غ_1) على بعد (ف) منه يعطى بالعلاقة (٥–٧): $\text{غ}_1 = \frac{\mu_0 \text{ت}_1}{2\pi \text{ف}}$

وحسب قاعدة اليد اليمنى، يكون اتجاه المجال المغناطيسي (غ_1) نحو محور (+ز) في المنطقة الواقعة على يسار الموصل. فإذا تواجد موصل مستقيم آخر يمر فيه تيار وليكن ت٢ باتجاه (+ص) أيضًا في تلك المنطقة، فإنه سيتأثر بقوة مغناطيسية حسب العلاقة (٥–٥):

$\vec{\text{ق}}_{1\leftarrow 2} = \text{ت}_2 \text{ل}_2 \text{غ}_1 \text{جا}\theta$ ($\theta = ٩٠°$) بين اتجاه $\vec{\text{ل}}_2$ واتجاه ($\vec{\text{غ}}_1$)، فإذا عوضنا قيمة (غ_1) في العلاقة السابقة، سنحصل على العلاقة الآتية:

$$\vec{\text{ق}}_{1\leftarrow 2} = \frac{\mu_0 \text{ت}_1 \text{ت}_2 \text{ل}_2}{2\pi \text{ف}} \quad \text{.......................... (٥–١٢)}$$

وحسب قاعدة اليد اليمنى، فإن اتجاه القوة المؤثرة في (ت_2) سيكون نحو (+س)، أي سينجذب

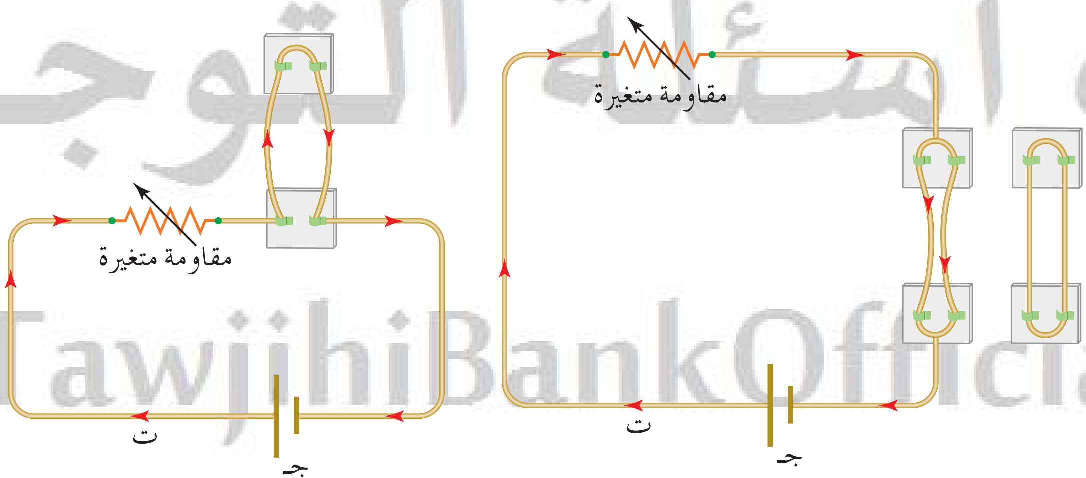
الموصل الثاني نحو الأول.

ولأن الموصلين طويلان، فإن القوة التي يؤثر بها الموصل الأول في وحدة الأطوال من الموصل الثاني، تحسب من العلاقة الآتية:

$$\frac{ق_{متبادلة}}{ل} = \frac{\mu_{0}\, ت_{1}\, ت_{2}}{2\pi ف} \quad \text{.........................} \quad (٥-١٣)$$

حيث $\left(\frac{ق}{ل}\right)$: القوة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل.

ويشترط لتطبيق العلاقة الرياضية (٥–١٣) بين موصلين مستقيمين أن يكونا متوازيين، أي أن التيارين المارّين فيهما إما أن يكونا بالاتجاه نفسه أو متعاكسين. وبالنظر إلى اتجاه القوتين، نجد أن الموصلين ينجذبان نحو بعضهما إذا كان التياران بالاتجاه نفسه، بينما يتنافران إذا كان التياران متعاكسين كما يظهر في الشكل (٥–٤١) .



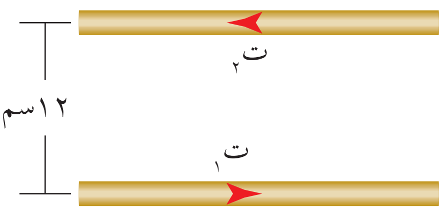
الشكل (٥–٤١): القوة المتبادلة بين موصلين مستقيمين متوازيين يحملان تيارين:
(أ): بنفس الاتجاه (بينهما قوة تجاذب) (ب): متعاكسين (بينهما قوة تنافر).

ومن العلاقة (٥–١٣) نستنتج أن القوة لكل وحدة طول المتبادلة بين موصلين مستقيمين متوازيين تعتمد على النفاذية المغناطيسية للوسط المحيط بالموصلين (μ)، ومقدار التيار المار في كل منهما($ت_1$، $ت_2$) والبعد بين الموصلين (ف).

ومن التطبيقات العملية على القوة المتبادلة بين موصلين مستقيمين متوازيين جهاز يسمى ميزان أمبير؛ وهو جهاز يستخدم لقياس التيار المار في موصل بدقة .

مثال (٥-١٢)

موصلان مستقيمان متوازيان طويلان كما في الشكل (٥-٤٢)، يمر في الأول تيار كهربائي مقداره ٤ أمبير باتجاه محور السينات الموجب، فيما يمر في الثاني تيار كهربائي مقداره ٦ أمبير نحو محور السينات السالب، جد:



الشكل (٥-٤٢): مثال (٥-١٢).

١) القوة المتبادلة بين الموصلين لوحدة الأطوال منهما.

٢) القوة المغناطيسية التي يؤثر بها الموصل الأول على جزء طوله ٢سم من الموصل الثاني مقدارًا واتجاهًا.

الحل:

١) تحسب القوة المتبادلة لكل وحدة طول من العلاقة (٥-١٣):

$$\frac{ق_{\text{متبادلة}}}{ل} = \frac{\mu_{٠}\, ت_{١}\, ت_{٢}}{٢\pi\, ف} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٤ \times ٦}{٢\pi \times ١٢ \times ١٠^{-٢}}$$

$\frac{ق_{\text{متبادلة}}}{ل} = ٤ \times ١٠^{-٥}$ نيوتن/م، وهي قوة تنافر لأن التارين متعاكسان.

٢) تحسب القوة المؤثرة في طول محدد من الموصل من العلاقة (٥-١٢):

$$ق_{١\leftarrow٢} = \frac{\mu_{٠}\, ت_{١}\, ت_{٢}\, ل_{٢}}{٢\pi\, ف} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٤ \times ٦ \times ٢ \times ١٠^{-٢}}{٢\pi \times ١٢ \times ١٠^{-٢}}$$

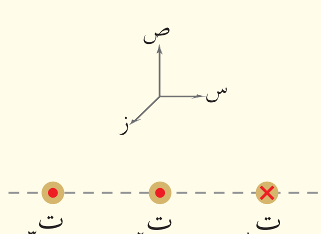
$ق_{١\leftarrow٢} = ٨ \times ١٠^{-٧}$ نيوتن، نحو (+ص).

مراجعة (٥-٧)

١) اذكر العوامل التي تعتمد عليها القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يمر فيهما تياران كهربائيان.

٢) ما الشرط اللازم لتطبيق قانون القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين مستقيمين طويلين يمر فيهما تيار كهربائي؟

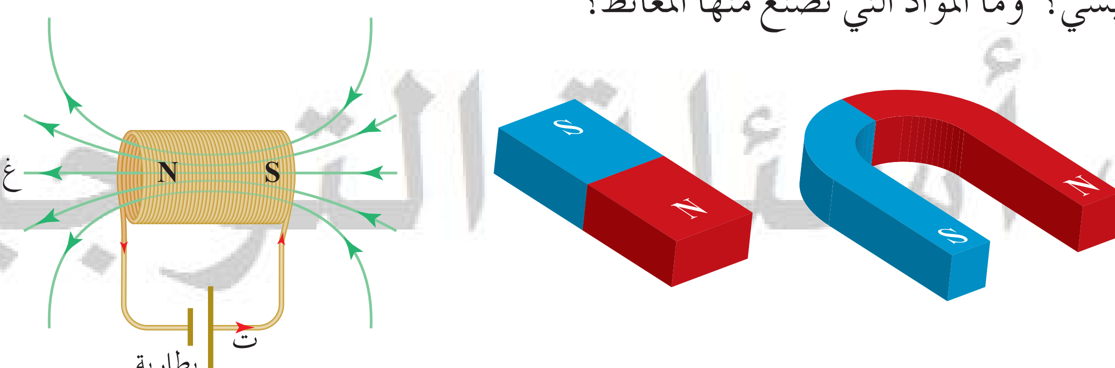
٣) يظهر الشكل (٥-٤٣) ثلاثة موصلات طويلة مستقيمة متوازية تقع في مستوًى واحد تحمل تيارات متساوية والمسافات بينها متماثلة. رتب الموصلات الثلاثة تصاعديًا حسب القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في كل منها.



الشكل (٥-٤٣): سؤال (٣).

٥-٨ المواد المغناطيسية
(Magnetic Materials)

الكثير منا تعرّف على المغناطيسية عن طريق اللعب بالقضبان المغناطيسية وكيف تؤثر على أدوات مصنوعة من الحديد مثل مشابك الورق والمسامير. وتلعب المغانط (Magnets) أدوارًا حيويَّةً في حياة المجتمعات الحديثة، تمتد من دور الأقطاب في المغانط الكهربائية في المحركات والمولدات إلى الطبقة الّتي تغطي الأقراص الممغنطة في الحاسوب، وإلى الثلاجة والميكروفون والراديو، والكثير من الأجهزة العملية والعلمية. وللمغانط أشكال عدة، منها المغناطيس المستقيم وحدوة الفرس، والمغانط الكهربائية وجميعها تولد مجالات مغناطيسية انظر الشكل (٥-٤٤)، فما منشأ هذا المجال المغناطيسي؟ وما المواد التي تصنع منها المغانط؟



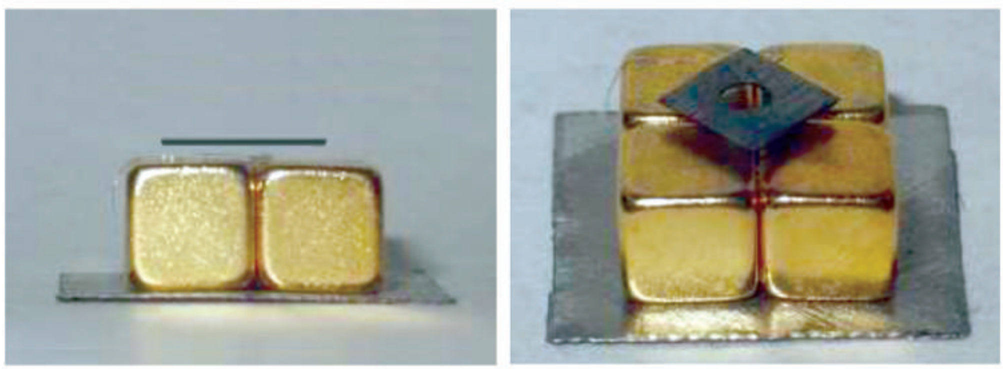
الشكل (٥-٤٤): بعض أشكال المغانط.

يكمن أصل الخصائص المغناطيسية للمادة في أصلها الذريّ؛ فالمادة تتألف من ذرات، وتدور الإلكترونات في مدارات حول النواة الموجبة للذرة. وبالإضافة إلى حركتها الدائرية فإن للإلكترونات حركة دورانية إذ كل إلكترون يدور حول محوره الذاتي، وهذه الحركة للإلكترون بمثابة تيار كهربائي، وقد تبين من تجربة أورستد أن التيار الكهربائي هو أحد مصادر المجال المغناطيسي، واتجاه المجال المغناطيسي يحدده اتجاه حركة الإلكترون؛ ولذلك فإن كل إلكترون يولد مجالًا مغناطيسيًّا ذاتيًّا. والمجال الناتج من حركة الإلكترون يشبه المجال الناتج من مغناطيس صغير جدًّا، وله قطبان أحدهما شمالي والآخر جنوبي، وفي الذرة الواحدة قد تكون هذه المجالات في صورة أزواج متعاكسة فتكون محصلتها صفرًا، وفي حالات أخرى قد تكون هذه المجالات باتجاه واحد فينشأ للذرة مجال مغناطيسي صغير دائم.

إن محصلة المجالات الذرية في قطعة من المادة هي التي تحدد خصائص المادة المغناطيسية وسلوك

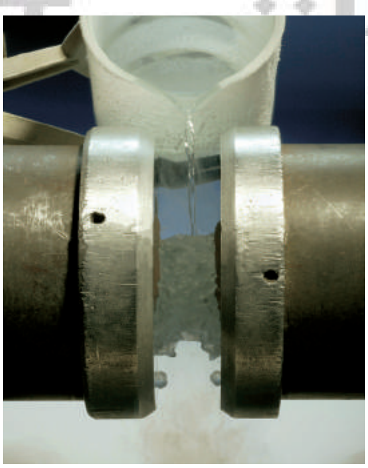
المادة عند خضوعها وتأثرها بمجال مغناطيسي خارجي؛ لذلك تصنف المواد من حيث خصائصها المغناطيسية وسلوكها المغناطيسي إلى ثلاثة أصناف رئيسة: مواد دايامغناطيسية (diamagnetic)، ومواد بارامغناطيسية (paramagnetic)، ومواد فرّومغناطيسية (ferromagnetic).

فالمواد الدايامغناطيسية ليس لها أثر مغناطيسي، وعند تعرضها إلى مجال مغناطيسي خارجي تكون استجابتها ضعيفة، إلا أنها تتمغنط بعكس المجال المؤثر، وإذا قُربت من مغناطيس دائم فإنها تتنافر معه، وقد لاحظ العالم فارادي هذا الأثر في البزموث والماء والفضة والمواد فائقة التوصيل. وتكون استجابة هذه المواد للمجال المغناطيسي الخارجي ضعيفة. ويظهر الشكل (٥-٤٥) مادة دايامغناطيسية تتنافر مع مغناطيس قويّ موضوع أسفلها.



الشكل (٥-٤٥) : مادة دايامغناطيسية تتنافر مع مغناطيس أسفلها.

وفي المواد البارامغناطيسية تكون محصلة المجالات المغناطيسية الذرية الناتجة من حركة الإلكترونات تساوي صفرًا؛ لذلك لا يتولد حول المادة مجال مغناطيسي، ومن الأمثلة عليها الألمنيوم والصوديوم والأكسجين السائل. لكن عند وضع هذه المواد في مجال مغناطيسي خارجي تترتب مغانطها الذرية الصغيرة بقدر محدود باتجاه المجال المغناطيسي المؤثر، إذ تبدي استجابة ضعيفة للمجال المؤثر، أي أنها تتمغنط وتتأثر بقوة جذب عند تقريب مغناطيس خارجي منها. ويظهر الشكل (٥-٤٦) الأكسجين السائل منجذبًا إلى مغناطيس.

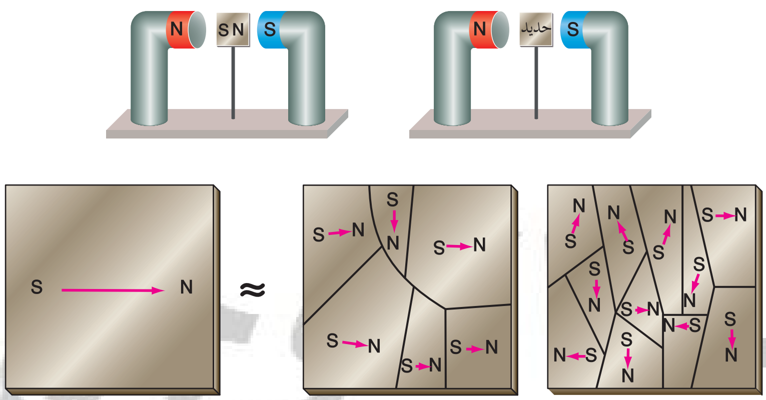


الشكل (٥-٤٦): الأكسجين السائل منجذبًا إلى مغناطيس.

وأما المواد الفرومغناطيسية فتمتاز باحتوائها على مغانط صغيرة ذرية تتفاعل مع بعضها بصورة قوية، وهذا التفاعل القوي يؤدي بهذه المغانط إلى ترتيب أو اصطفاف تلقائي حتى بغياب مجال

مغناطيسي خارجي، وتشكل مجموعة المغانط الصغيرة المرتبة باتجاه واحد ما يعرف **بالمناطق المغناطيسية (magnetic domains)**، ويتراوح حجم المنطقة المغناطيسية بين (١٠^{-٦} – ١٠^{-٢}) سم^٣، وتحتوي على عدد من الذرات بين (١٠^{١٧} – ١٠^{٢١}) ذرة. وقد يختلف اتجاه الاصطفاف في المناطق المتجاورة وعند وضع قطعة من مادة فرّومغناطيسية تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي فإن المناطق المغناطيسية ذات الاتجاه الواحد والتي تكون باتجاه المجال المغناطيسي المؤثر تكبر وتزداد على حساب المناطق الأخرى؛ وبهذا تصبح القطعة كلها مغناطيسًا، أي تتصرف كمغناطيس مستقيم له قطبان، وبذلك تكون استجابة هذه المواد للتمغنط كبيرة وباتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. لاحظ الشكل (٥–٤٧).

وتشمل المواد الفرومغناطيسية الحديد والنيكل والكوبالت وبعض السبائك المصنوعة منها. فهي تشكل كل ما نطلق عليه مغناطيس دائم.



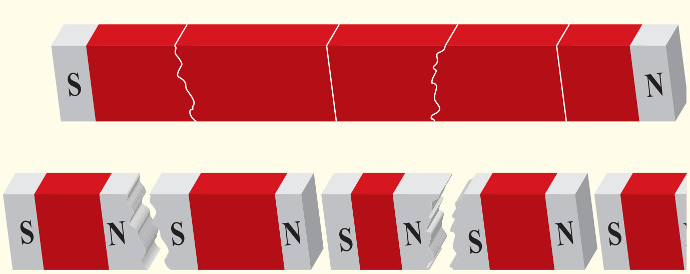
الشكل (٥–٤٨): مادة دايامغناطيسية تتنافر مع مغناطيس أسفلها.

مراجعة (٥–٨)

١ اذكر أنواع المواد المغناطيسية، ثم قارن بينها من حيث استجابتها لمغناطيس قريب منها.

٢ فسر انجذاب برادة الحديد إلى مغناطيس.

٣ من الخصائص التي تميز المغناطيس أنه لا يمكن فصل قطبيه الشمالي والجنوبي عن بعضهما. مستعينًا بالشكل (٥–٤٨) وبالاعتماد على مفهوم المناطق المغناطيسية فسر هذه الخاصية.



الشكل (٥–٤٨): سؤال (٣) .

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

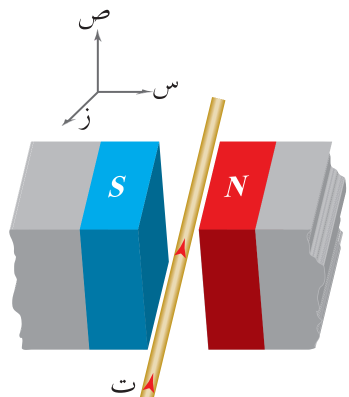
١ في الشكل (٥–٤٩)، اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل سيكون:

أ نحو (+س)

ب نحو (–س)

جـ عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي نحو (–ص).

د عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي نحو (+ص).

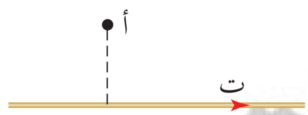


الشكل(٥–٤٩): سؤال (١) فقرة (١).

٢ موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي باتجاه (+س) كما في الشكل (٥–٥٠)، عند مرور بروتون من النقطة (أ) باتجاه (–ص)، فإن اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في البروتون سيكون باتجاه:

أ +ز   ب +س

جـ –س   د –ص



الشكل(٥–٥٠): سؤال (١) فقرة (٢).

٣ جسيم مشحون يتحرك عموديًّا على اتجاه مجال مغناطيسي منتظم، فيصنع مسارًا دائريًّا نصف قطره (نق$_١$). إذا دخل إلى المجال مغناطيسي نفسه جسيم مشحون آخر له كتلة الجسيم الأول نفسها بينما كانت شحنته تساوي ثلاثة أمثال شحنة الجسيم الأول، وبسرعة تساوي مثلي سرعة الجسيم الأول، فإن نصف قطر المسار الدائري للجسيم الثاني (نق$_٢$) يساوي:

أ $\frac{١}{٢}$ نق$_١$ ب $\frac{٣}{٢}$ نق$_١$

جـ $\frac{٢}{٣}$ نق$_١$ د ٢ نق$_١$

٤ يعتمد مبدأ عمل جهاز منتقي السرعة على انعدام قوة لورنتز. وتنعدم قوة لورنتز عندما:

أ يتساوى المجالان الكهربائي والمغناطيسي في المقدار ويتعاكسان في الاتجاه.

ب يكون المجال الكهربائي والمغناطيسي بالاتجاه نفسه.

جـ) ينحرف الجسيم المشحون باتجاه القوة الكهربائية.

د) تتساوى القوتان الكهربائية والمغناطيسية في المقدار وتتعاكسان في الاتجاه.

٥) ملف لولبي متصل ببطارية ومقاومة. يمكن مضاعفة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي بإحدى الطرائق الآتية:

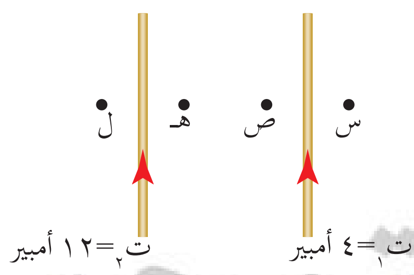
أ) بمضاعفة طوله.

ب) بمضاعفة القوة الدافعة الكهربائية للمصدر.

جـ) بإنقاص عدد لفاته إلى النصف.

د) بمضاعفة المقاومة المتصل بها.

اعتمادًا على الشكل (٥-٥١)، أجب عن الفقرتين (٦،٧).



الشكل(٥-٥١): سؤال (١) فقرة (٦،٧).

٦) إذا كانت $ق_١$ هي القوة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الأول، و$ق_٢$ هي القوة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الثاني، فإن العلاقة بين مقداريهما:

أ) $ق_١ = ١٢ ق_٢$

ب) $ق_١ = ٣ ق_٢$

جـ) $ق_١ = ق_٢$

د) $ق_١ = \frac{١}{٣} ق_٢$

٧) النقطة المحتمل أن ينعدم عندها المجال المغناطيسي المحصل هي:

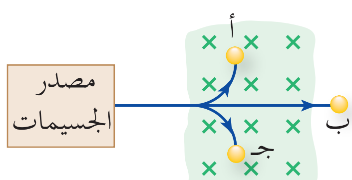
أ) (ل)

ب) (هـ)

جـ) (ص)

د) (س)

٢ يبين الشكل (٥-٥٢)، مسار ثلاثة جسيمات (أ، ب، جـ) تعبر مجالًا مغناطيسيًا. فإذا كانت هذه الجسيمات تتحرك بالسرعة نفسها، فأجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل(٥-٥٢): سؤال (٢).

أ) أي الجسيمات متعادل؟

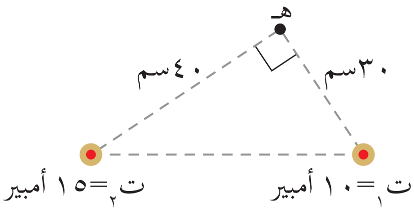
ب) أي الجسيمات سالب الشحنة؟

جـ) أيهما أكبر كتلة (أ) أم (جـ)؟

٣ موصلان طويلان مستقيمان متوازيــان كما في الشكل (٥-٥٣)، يمر في الأول تيار كهربائي ١٠ أمبير باتجاه (+ز)، ويمر في الثاني تيار كهربائي ١٥ أمبير بالاتجاه نفسه. جد:

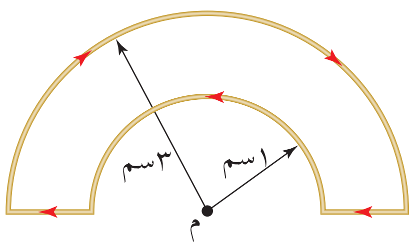
أ موقع النقطة أو النقاط التي ينعدم عندها المجال المغناطيسي المحصل.

ب المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.



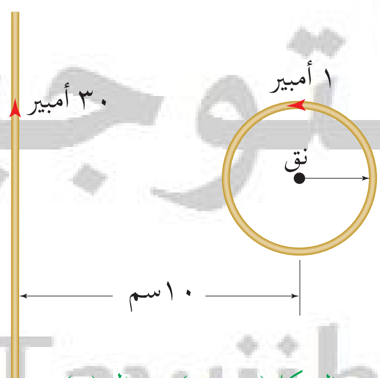
الشكل(٥-٥٣): سؤال (٣).

٤ في الشكل (٥-٥٤)، حدد مقدار التيار الكهربائي المار في الملف إذا كان مقدار المجال المغناطيسي المحصل في النقطة (م) يساوي $\frac{٨٨}{٧}$ × ١٠$^{-٥}$ تسلا. وما اتجاه المجال المغناطيسي المحصل عند تلك النقطة؟



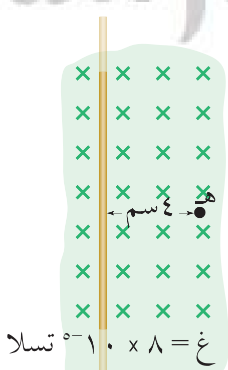
الشكل(٥-٥٤): سؤال (٤).

٥ في الشكل (٥-٥٥)، حدد نصف قطر الملف الدائري كي ينعدم المجال المغناطيسي في مركزه، علمًا بأنه يتكون من ٢ لفة.



الشكل(٥-٥٥): سؤال (٥).

٦ في الشكل (٥-٥٦)، أثرت قوة مغناطيسية مقدارها (١) ملي نيوتن نحو (+ص) في شحنة مقدارها -٢ ميكروكولوم لحظة مرورها في النقطة (هـ)، بسرعة مقدارها ٥×١٠^{٦} م/ث باتجاه (-س). جد التيار الكهربائي المار في الموصل المستقيم مقدارًا واتجاهًا.



الشكل(٥-٥٦): سؤال (٦).

٧ قذف جسيم شحنته ١ بيكوكولوم، وكتلته ٢×١٠$^{-٧}$ كغ بسرعة مقدارها ٩×١٠^{٦} م/ث نحو (+س) عموديًا على مجال مغناطيسي، فاكتسب تسارعًا مركزيًا مقداره ٠,٩ م/ث٢ (+ز) عند مروره في نقطة ما، جد المجال المغناطيسي عند تلك النقطة مقدارًا واتجاهًا.

٨ يتحرك بروتون بسرعة ١,٦ × $١٠^{٤}$م/ث نحو محور السينات الموجب فيدخل إلى منطقة مجال كهربائي مقداره ٢× $١٠^{٣}$ نيوتن/ كولوم واتجاهه نحو محور الصادات السالب.

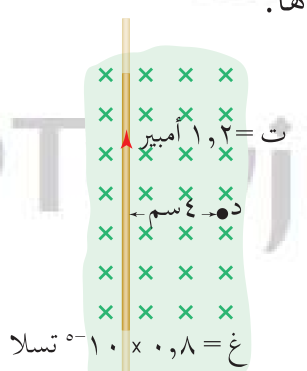
أ) جد القوة الكهربائية المؤثرة في البروتون مقدارًا واتجاهًا.

ب) عند إضافة مجال مغناطيسي إلى المنطقة نفسها، وإدخال بروتون آخر يتحرك بالسرعة نفسها إلى منطقة المجالين الكهربائي والمغناطيسي لوحظ أن البروتون أكمل حركته دون انحراف. احسب مقدار المجال المغناطيسي وحدد اتجاهه.

جـ) إذا أدخل جسيم ألفا له السرعة نفسها، إلى منطقة المجالين الكهربائي والمغناطيسي، فهل يكمل حركته دون انحراف؟ فسر إجابتك.

(ملاحظة: جسيم ألفا شحنته موجبة وتساوي ضعفي شحنة البروتون، وكتلته أربعة أضعاف كتلة البروتون تقريبًا)

٩ قذف جسيم شحنته ٠,٤ ميكروكولوم بسرعة مقدارها ١٠٠ م/ث نحو (+ص) إلى منطقة مجالين، أحدهما مجال كهربائي مقداره ٥٠٠ نيوتن/كولوم متجه نحو (+س) والآخر مجال مغناطيسي مقداره ٢ تسلا نحو (–ز)، جد قوة لورنتز المؤثرة في هذا الجسيم مقدارًا واتجاهًا.



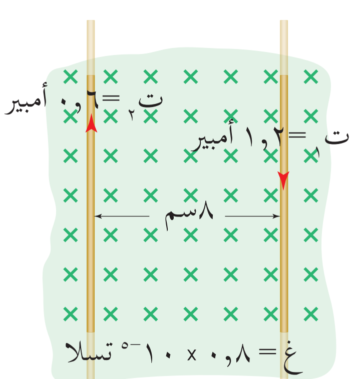
الشكل (٥–٥٧): سؤال (١٠).

١٠ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٥–٥٧)، احسب:

أ) المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د).

ب) القوة المغناطيسية المؤثرة في بروتون أثناء مروره من النقطة (د) باتجاه المحور الزيني الموجب.

جـ) القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل.



الشكل (٥–٥٨): سؤال (١١).

١١ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٥–٥٨)، احسب:

أ) القوة المتبادلة بين الموصلين لوحدة الأطوال.

ب) القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الثاني.

الفصل الدراسي الثاني

الفصل السادس

الحث الكهرمغناطيسي

Electromagnetic Induction

في هذا الفصل

بقيت الخلايا الكهربائية حتى بداية القرن التاسع عشر الميلادي مصدرًا وحيدًا لإنتاج الطاقة الكهربائية بالرغم من أنها لا تنتج إلا كمية قليلة منها، ولما أصبحت الحاجة ماسة لإنتاج المزيد من الطاقة الكهربائية لتزويد المصانع والمنازل؛ جاء اكتشاف فارادي للعلاقة بين المغناطيسية والكهرباء، وهو ما يعرف بظاهرة الحث الكهرمغناطيسي، وأصبح بالإمكان توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الحركية بالحث الكهرمغناطيسي.

فما المقصود بالحث الكهرمغناطيسي؟ وكيف يتولد التيار الكهربائي الحثي؟ وكيف تنشأ القوة الدافعة الكهربائية الحثية في موصل من مجالات مغناطيسية؟ وعلى ماذا تعتمد القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل أو ملف؟ وما التطبيقات العملية للحث الكهرمغناطيسي؟ هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

تعد ظاهرة الحث الكهرمغناطيسي المبدأ الأساسي في العديد من التطبيقات الحديثة مثل مولدات الكهرباء، والاتصالات، والبطاقات الممغنطة، ووحدات التخزين.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضح المقصود بالتدفق المغناطيسي وتحدد وحدة قياسه، وتعبر عنه رياضيًّا.
- تذكر نص قانون فارادي في الحث، وتعبر عنه رياضيًّا.
- تحلل رسومًا بيانية متعلقة بقانون فارادي في الحث.
- تستقصي عمليًّا تولد تيار حثي في حالات مختلفة.
- تفسر تولد قوة دافعة كهربائية حثية عند حركة موصل في مجال مغناطيسي منتظم.
- تذكر العلاقة الخاصة بالقوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم.
- تذكر نص قانون لنز وتطبقه لتحديد اتجاه التيار الحثي.
- تتحقق عمليًّا من قانون لنز.
- توظف العلاقات والقوانين الخاصة بالقوة الدافعة الكهربائية الحثية في حل مسائل حسابية.
- توضح المقصود بالحث الذاتي ووحدة المحاثة، وتعبر عنها رياضيًّا.
- توظف علاقات الحث الذاتي في حل مسائل حسابية.
- تتوصل إلى العوامل التي تعتمد عليها محاثة المحث اللولبي .
- تعبر رياضيًّا عن الطاقة المختزنة في محث لولبي، وتحل مسائل حسابية تتعلق بها.

٦-١ التدفق المغناطيسي
(Electromagnetic Flux)

تعد البطارية أحد مصادر التيار الكهربائي، فهل يمكن توليد تيار كهربائي في دارة دون بطارية؟ توصل العالم فارادي أنه يمكن توليد تيار كهربائي باستخدام المجال المغناطيسي، ومن المهم أن نبدأ بدراسة التدفق المغناطيسي بوصفه كمية فيزيائية ترتبط بتوليد التيار الكهربائي من المجال المغناطيسي فماذا نعني بالتدفق المغناطيسي؟

الشكل (٦-١): مفهوم التدفق المغناطيسي عبر سطح معين.

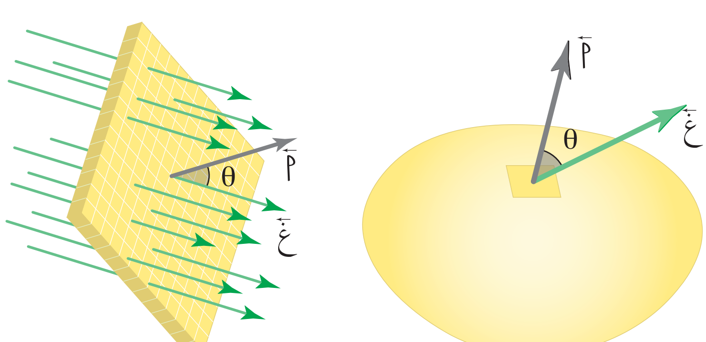
درست سابقًا أن للمغناطيس مجالًا مغناطيسيًا، يمكن تمثيله بخطوط تسمى خطوط المجال المغناطيسي ويعرف **التدفق المغناطيسي** (Magnetic flux) بأنه **عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق سطحًا ما عموديًا عليه**، لاحظ الشكل (٦-١).

ويعطى التدفق المغناطيسي لمجال مغناطيسي منتظم عبر سطح معين بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\varnothing = \vec{غ} \cdot \vec{أ} = غ\ أ\ جتا\ \theta \quad .... \quad (٦-٥)$$

حيث (Ø): التدفق المغناطيسي، و(غ): المجال المغناطيسي، و(أ): متجه المساحة هو متجه مقداره يساوي مساحة السطح الذي تخترقه خطوط المجال المغناطيسي، واتجاهه عموديٌّ على السطح خارجٌ منه كما يوضح الشكل (٦-٢)، و(θ): الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي ومتجه المساحة.

يزداد التدفق المغناطيسي الذي يعبر سطحًا ما بزيادة كل من: مقدار المجال المغناطيسي، والمساحة التي يخترقها المجال المغناطيسي، وجيب تمام الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي ومتجه المساحة.



الشكل (٦-٢): متجه المساحة.

تبين العلاقة (٦–١) أن التدفق المغناطيسي كمية قياسية، ويقاس بوحدة (تسلا.م^{٢}) تسمى ويبر نسبة للعالم ويبر (Weber).

ويُعرف **الويبر** بأنه **التدفق المغناطيسي عبر وحدة المساحة من سطح ما عندما يخترقه عموديًّا مجالٌ مغناطيسيٌّ مقداره ١ تسلا.**

مثال (٦–١)

احسب التدفق المغناطيسي عبر سطح مساحته (٠,٢) م^{٢} مغمور في مجال مغناطيسي مقداره (٠,٤) تسلا في كل من الحالات الآتية:

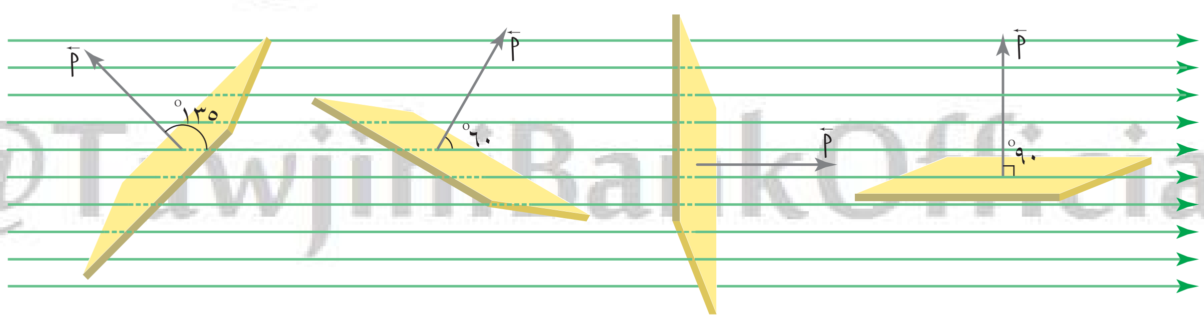
١ إذا كان متجه المساحة عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي.

٢ إذا كان متجه المساحة موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي، (θ = صفر).

٣ إذا كان مقدار الزاوية المحصورة بين اتجاه المجال المغناطيسي ومتجه المساحة ٦٠°.

٤ إذا كان متجه المساحة يصنع زاوية ١٣٥° مع اتجاه المجال المغناطيسي.

الحل:



الشكل (٦–٣): مثال (٦–١).

نحسب التدفق المغناطيسي بتطبيق العلاقة الرياضية:

$\varnothing$ = غ أ جتاθ

١. بما أن متجه المساحة عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي فإن (θ = ٩٠°)، كما في الشكل الموضح، لذا فإن:

$\varnothing$ = غ أ جتا ٩٠ = ٠,٤ × ٠,٢ × صفر

= صفر .

٢ بما أن متجه المساحة موازٍ لاتجاه المجال المغناطيسي فإن (θ = صفرًا)، كما في الشكل الموضح، لذا فإن:

Ø = غ أ جتا صفر = ٠,٤ × ٠,٢ × ١ = ٠,٠٨ ويبر.

٣ الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي (θ = ٦٠°) كما في الشكل الموضح، لذا فإن:

Ø = غ أ جتا٦٠ = ٠,٤ × ٠,٢ × ٠,٥ = ٠,٠٤ ويبر.

٤ الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي (θ = ١٣٥°) كما في الشكل الموضح، لذا فإن:

Ø = غ أ جتا١٣٥ = ٠,٤ × ٠,٢ × −٠,٧ = −٠,٠٥٦ ويبر.

لاحظ أن التدفق المغناطيسي سالب، وهذا يعني أن خطوط المجال المغناطيسي تخترق السطح داخلة فيه.

مراجعة (٥-٨)

١ ما المقصود بالتدفق المغناطيسي؟ وما وحدة قياسه؟

٢ ماذا يعني أن التدفق المغناطيسي عبر سطح مغمور في مجال مغناطيسي يساوي ٥ ويبر؟

٣ اذكر ثلاث طرائق لتغيير التدفق المغناطيسي عبر سطحٍ ما مغمور في مجال مغناطيسي.

٦-٢ قانون فارادي في الحث الكهرمغناطيسي

(Faraday>s Law of Electromagnetic Induction)

اكتشف كل من العالمين مايكل فارادي (M. Faraday) في بريطانيا، وجوزيف هنري (J.Henry) في الولايات المتحدة، من خلال تجارب أجرياها بمعزل عن بعضهما أنه يمكن توليد تيار كهربائي عن طريق تغيير التدفق المغناطيسي مع الزمن. ولتعرّف كيفية توليد التيار الكهربائي ادرس النشاط الآتي.

نشاط (٦-١) قانون فارادي

الهدف: استقصاء تولد تيار حثي عمليًا في حالات مختلفة.

المواد والأدوات: ملفان دائريان مختلفان في عدد اللفات، غلفانوميتر، مغناطيس مستقيم قوي، مغناطيس مستقيم ضعيف.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ صل أحد الملفين بطرفي غلفانوميتر.

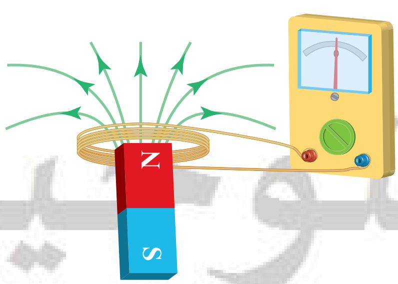
٢ حرك المغناطيس الضعيف نحو الملف، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر كما في الشكل (٦-٤ /أ).

٣ أبعد المغناطيس عن الملف، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر كما في الشكل (٦-٤/ب)، ثم استمر في حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف قربًا وبعدًا مع ملاحظة التغير على مؤشر الغلفانوميتر.

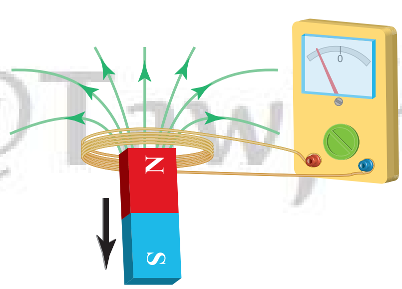
٤ توقف عن حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف كما في الشكل (٦-٤/ج). هل يتحرك مؤشر الغلفانوميتر الآن؟ ماذا تستنتج؟

٥ كرر الخطوات من ٢ إلى ٤، بتثبيت المغناطيس وتحريك الملف بالنسبة إلى المغناطيس قربًا وبعدًا، ولاحظ التغير على مؤشر الغلفانوميتر.

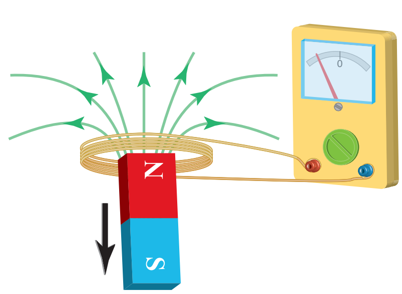
٦ كرر الخطوات من ٢ إلى ٤، ولاحظ التغير على مقدار انحراف مؤشر الغلفانوميتر بتغيير **ما يأتي:**



(أ) كل من المغناطيس والملف ساكنان



(ب) حركة المغناطيس مبتعدًا عن الملف



(ب) حركة المغناطيس مبتعدًا عن الملف

الشكل(٦-٤): توليد تيار حثي في ملف.

- الملف؛ واستخدام الملف الثاني.
- المغناطيس؛ واستخدام المغناطيس القوي.
- سرعة الحركة (حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف أو حركة الملف بالنسبة إلى المغناطيس).

لا بد أنك استنتجت من إجراء النشاط السابق أن حركة مؤشر الغلفانوميتر تدل على مرور تيار كهربائي في الملف فقط في أثناء الحركة (حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف أو حركة الملف بالنسبة إلى المغناطيس)، بحيث يتغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف بالنسبة إلى الزمن، ويتغير اتجاه هذا التيار بتغير اتجاه الحركة، بينما ينعدم التيار الكهربائي عند توقف الحركة (أي عدم تغير التدفق المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن)، وأن انحراف مؤشر الغلفانوميتر يكون أكبر بزيادة سرعة الحركة قربًا كان أو بعدًا، وزيادة عدد لفات الملف.

إن التيار المتولد في الملف نتيجة التغير في التدفق المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن يسمى **تيارًا حثيًا (Induced Current)**، وهذا التيّار لحظيٌّ ينتج عن قوة دافعة كهربائية تسمى قوة دافعة كهربائية حثية تتولد في الملف للسبب نفسه، وتسمى **ظاهرة توليد التيار الحثي بسبب تغير التدفق المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن ظاهرة الحث الكهرمغناطيسي Electromagnetic Induction**.

استطاع العالم فارادي بعد إجراء تجارب عدة أن يعبر عن نتائجها بقانون رياضي سمي باسمه فيما بعد. وينص **قانون فارادي (Faraday's Law)** على أن **متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف تتناسب طرديًا مع المعدل الزمني لتغيّر التدفق المغناطيسي الذي يخترقه**. ويعبر عن قانون فارادي بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ق_{د} = -ن \frac{\Delta Ø}{\Delta ز} \quad \text{.................................} \quad (٦-٢)$$

حيث ($ق_{د}$): متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف، و(ن): عدد اللفات، و($\Delta Ø$): التغير في التدفق المغناطيسي في اللفة الواحدة في الفترة الزمنية (Δز).

ويجدر الانتباه إلى أن الإشارة السالبة في العلاقة (٦-٢)، ستُفسَّر لاحقًا عند دراسة قانون لنز.

مثال (٦-٢)

ملف عدد لفاته (٥٠٠) لفة مغمور في مجال مغناطيسي منتظم فكان التدفق المغناطيسي عبره (٠,٦) ويبر، كما في الشكل (٦-٥/أ)، فاحسب:

١ متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف عندما ينعكس اتجاه المجال المغناطيسي المؤثر فيه خلال (٠,٢) ثانية.

٢ متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف إذا تلاشى المجال المغناطيسي خلال (٠,١) ثانية.

٣ المعدل الزمني للتغير في التدفق المغناطيسي عندما يصبح متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية (-١٠٠٠) فولت.

الحل:

١ لاحظ الشكل (٦-٥/أ) والشكل (٦-٥/ب)، إن خطوط المجال المغناطيسي كانت تخترق سطح الملف داخلة فيه، فأصبحت تخرج منه وبهذا فإن التدفق المغناطيسي الذي يعبر الملف ($\varnothing_{١}$ = -٠,٦) ويبر، وعندما ينعكس اتجاه المجال المغناطيسي فإن ($\varnothing_{١}$ = ٠,٦) ويبر، أي أن متجه المساحة أصبح مع اتجاه خطوط المجال المغناطيسي، لذا فإن:

$$\Delta\varnothing = \varnothing_{٢} - \varnothing_{١}$$

$$= ٠,٦ - {}^{-}٠,٦ = ١,٢ \text{ ويبر}$$

$$\text{قَ}_{\text{د}} = -\text{ن}\frac{\Delta\varnothing}{\Delta\text{ز}} = -\frac{٥٠٠ \times ١,٢}{٠,٢}$$

$$\text{قَ}_{\text{د}} = -٣٠٠٠٠ \text{ فولت}$$

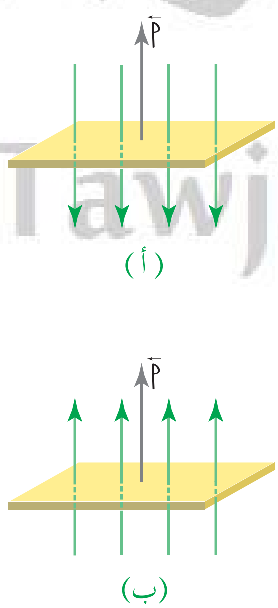
٢ $$\Delta\varnothing = \text{صفر} - {}^{-}٠,٦ = ٠,٦ \text{ ويبر}$$

$$\text{قَ}_{\text{د}} = -\text{ن}\frac{\Delta\varnothing}{\Delta\text{ز}} = -\frac{٥٠٠ \times ٠,٦}{٠,١}$$

$$\text{قَ}_{\text{د}} = ٣٠٠٠٠ \text{ فولت}$$

٢ $$\frac{\Delta\varnothing}{\Delta\text{ز}} = -\frac{\text{قَ}_{\text{د}}}{\text{ن}}$$

$$\frac{\Delta\varnothing}{\Delta\text{ز}} = -\frac{-١٠٠٠}{٥٠٠} = ٠,٢ \text{ ويبر/ث}$$



الشكل (٦-٥): مثال (٦-٢).

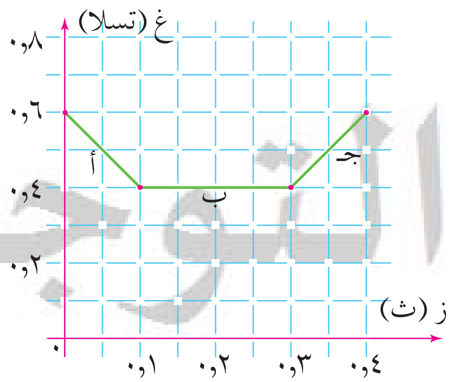
مثال (٦-٣)

عند سحب مغناطيس من ملف، ثم ثباته مدة قصيرة من الزمن، ثم إرجاعه داخل الملف، يتغير المجال المغناطيسي الذي يخترق الملف مع الزمن كما في الشكل (٦-٦)، فإذا علمت أن عدد لفات الملف ٢٠٠٠ لفة، ومساحة مقطع اللفة الواحدة (٨٠) سم^{٢}، واتجاه المجال المغناطيسي يوازي متجه المساحة فادرس الشكل جيّدًا، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

١ احسب التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في الفترات الزمنية (أ، ب، ج).

٢ احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف في الفترات الزمنية (أ، ب، ج).

٣ مثل بيانيًا العلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن في كل من الفترات الزمنية (أ، ب، ج).



الشكل (٦-٦): مثال (٦-٣).

الحل:

١ نحسب التغير في التدفق المغناطيسي بمعرفة التغير في مقدار المجال المغناطيسي الذي يخترق الملف في كل فترة.

الفترة (أ)

$$\Delta\varnothing = \varnothing_{٢} - \varnothing_{١}$$

$$= \text{غ}_{٢} \times \text{أ} \times \text{جتا}\theta - \text{غ}_{١} \times \text{أ} \times \text{جتا}\theta$$

$= \Delta$ غ (أ × جتاصفر) حيث Δ غ = غ$_{٢}$ − غ$_{١}$ = ٠,٤ − ٠,٦ = −٠,٢ تسلا

$\Delta\varnothing$ = −٠,٢ × ٨٠ × ١٠$^{-٤}$ × ١ = −١,٦ × ١٠$^{-٣}$ ويبر.

الفترة (ب)

لا يوجد تغير في المجال المغناطيسي في الفترة الزمنية (ب)؛ لذا فإن Δ غ = صفرًا.

ومنها $\Delta\varnothing$ = صفرًا.

الفترة (ج)

$$\Delta\varnothing = \varnothing_{٢} - \varnothing_{١}$$

$$= \text{غ}_{٢} \times \text{أ} \times \text{جتا}\theta - \text{غ}_{١} \times \text{أ} \times \text{جتا}\theta$$

$= \Delta$ غ (أ × جتاصفر) حيث Δ غ = غ$_{٢}$ − غ$_{١}$ = ٠,٦ − ٠,٤ = ٠,٢ تسلا

$\Delta\varnothing$ = ٠,٢ × ٨٠ × ١٠$^{-٤}$ × ١ = ١,٦ × ١٠$^{-٣}$ ويبر.

٢ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية بتطبيق قانون فارادي:

الفترة (أ)

$$ق_{د} = -ن \frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = -\frac{٣٠٠٠ \times -١,٦ \times ١٠^{-٤}}{٠,١}$$

$ق_{د} = ٣٢$ فولت

الفترة (ب)

$$ق_{د} = -ن \frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = -\frac{٢٠٠٠ \times \text{صفر}}{٠,١}$$

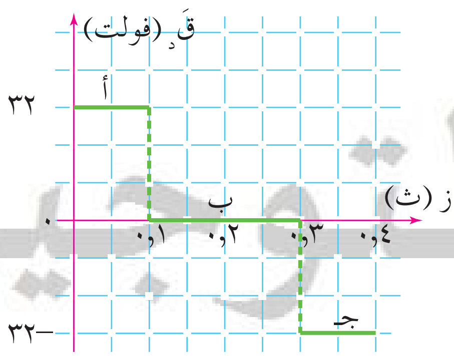
$ق_{د} =$ صفرًا

الفترة (ج)

$$ق_{د} = -ن \frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = -\frac{٢٠٠٠ \times ١,٦ \times ١٠^{-٣}}{٠,١}$$

$ق_{د} = -٣٢$ فولت

٣ التمثيل البياني: يمثل الشكل (٦-٧) التمثيل البياني للعلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن في كل من الفترات الزمنية (أ، ب، ج).



الشكل (٦-٧): التمثيل البياني لعلاقة متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية مع الزمن.

مراجعة (٦-٢)

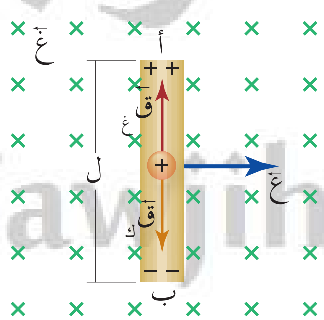
١ اذكر نص قانون فارادي في الحث الكهرمغناطيسي.

٢ وضع مغناطيس مقابل ملف على سطح مستوٍ، ثم حُرِّكا معًا بحيث بقيا في المستوى نفسه في أثناء حركتهما، وبقي البعد بينهما ثابتًا. هل تتولد في الملف قوة دافعة كهربائية حثية؟ لماذا؟

٣ ملف عدد لفاته (ن) لفة، ومساحة اللفة الواحدة (أ) $سم^{٢}$ مغمور في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (غ) تسلا. إذا زاد المجال المغناطيسي عبر الملف إلى مثلي قيمته الأولى في الفترة الزمنية (Δز) ثانية، فما متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف بدلالة كل من (غ، أ).

٦–٣ القوة الدافعة الكهربائية الحثية
المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم
Motion Induced Electromotive Force

في الدرس السابق توصلنا إلى توليد قوة دافعة كهربائية حثية عن طريق تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق ملف، ويوجد طريقة أخرى تتولد فيها قوة دافعة كهربائية حثية، فعندما يغمر موصل مستقيم طوله (ل) في مجال مغناطيسي منتظم (غَ) اتجاهه نحو المحور الزيني السالب، ويسحب بسرعة ثابتة (ع) باتجاه محور السينات الموجب كما في الشكل (٦–٨) بتأثير قوة خارجية، فإن الشحنات الموجبة (سـ) الموجودة في الموصل ستتأثر بقوة مغناطيسية (ق$_{غ}$ = سـ ع غ جاθ)، اتجاهها عمودي على اتجاه كل من (ع) و(غ)؛ ما يجعل هذه الشحنات تتحرك داخل الموصل من (ب) إلى (أ) حسب قاعدة اليد اليمنى، فتتراكم الشحنات الموجبة عند الطرف(أ) وتظهر عند الطرف(ب) للموصل شحنة سالبة، وتبعًا لذلك ينشأ مجالٌ كهربائي (مَ) داخل الموصل يؤثر في الشحنات الموجبة بقوة كهربائية باتجاه محور الصادات السالب؛ أي بعكس اتجاه القوة المغناطيسية، وباستمرار حركة الموصل يستمر تراكم الشحنات الكهربائية على طرفي الموصل؛ ما يزيد في المجال الكهربائي، ومن ثم تزداد القوة الكهربائية، وهكذا حتى تتساوى القوة المغناطيسية باتجاه محور الصادات الموجب مع القوة الكهربائية باتجاه محور الصادات السالب كما هو موضح في الشكل (٦–٨)؛ نتيجة لذلك يتولد فرق جهد كهربائي بين طرفي الموصل؛ ما يعني نشوء **قوة دافعة كهربائية حثية** (Induced electromotive force).



الشكل (٦–٨): حركة موصل مستقيم بسرعة ثابتة في مجال مغناطيسي منتظم بتأثير قوة خارجية.

وبما أن **الشغل** = **القوة.الإزاحة**، فإن الشغل الذي تبذله القوة المغناطيسية لنقل الشحنة الموجبة من الطرف (ب) إلى الطرف (أ) للموصل:

ش = (سـ ع غ) × ل × جتا صفر

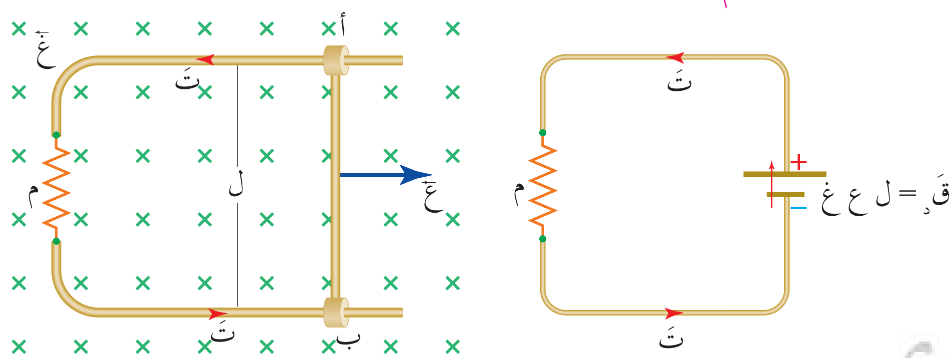
لكن القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة (فرق الجهد) = $\frac{\text{ش}}{\text{سـ}}$،

قَ$_{د}$ = $\frac{\text{سـ ع غ ل}}{\text{سـ}}$، لذا فإن:

قَ$_{د}$ = ل ع غ .... (٦–٣)

وإذا كان الموصل (ل) جزءًا من مسار مغلق وموصول بمقاومة (م)، فإن القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة تصبح مصدرًا للطاقة الكهربائية، فيمر عبر مقاومة الدارة تيار كهربائي حثي كما في الشكل (٦–٩)، ويمكن حساب التيار الحثي من العلاقة الرياضية الآتية: $\text{تَ} = \frac{\text{قد}}{\text{م}}$

$$\text{تَ} = \frac{\text{ل ع غ}}{\text{م}} \quad \text{(٦–٤)}$$

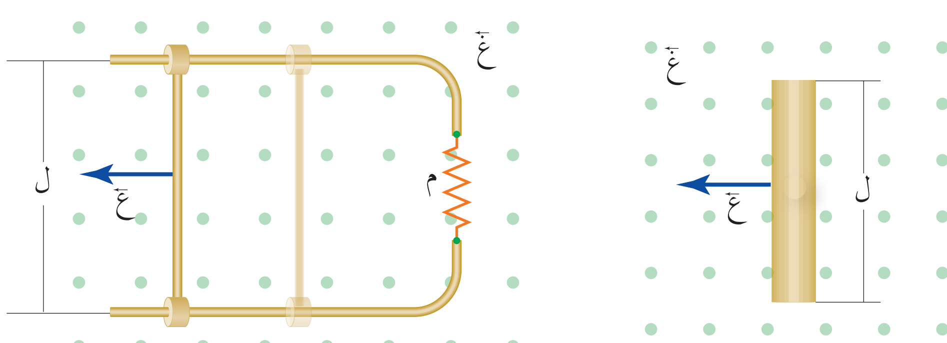


الشكل (٦–٩): القوة الدافعة الكهربائية الحثية واتجاه التيار الحثي.

كيف نحدد اتجاه التيار الحثي في الدارة الكهربائية في الشكل (٦–٩)؟ بما أن الطرف (أ) اكتسب شحنة موجبة، والطرف (ب) اكتسب شحنة سالبة، فإن اتجاه التيار عبر الدارة في المسار المغلق من الطرف (القطب) الموجب إلى الطرف (القطب) السالب؛ أي بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة كما هو موضح في الشكل (٦–٩).

مثال (٦–٤)

يوضح الشكل (٦–١٠/أ) موصلًا مستقيمًا طوله (٤٠) سم؛ ويتعامد طوله مع مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٢) تسلا، إذا تحرك الموصل بسرعة ثابتة مقدارها (٨٠) سم/ث عموديًّا على طوله وعلى المجال المغناطيسي. فأجب عما يأتي:



الشكل (٦–١٠): مثال (٦–٤).

١ احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الموصل.

٢ احسب التيار الكهربائي الحثي المار في الموصل إذا كان جزءًا من دارة كهربائية مقاومتها (٠,٨) أوم كما في الشكل (٦-١٠/ب).

٣ هل يتغير متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية إذا كان طول الموصل موازٍ لاتجاه المجال المغناطيسي؟ وضح إجابتك.

الحل:

١ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية في موصل مستقيم من العلاقة (= ل ع غ)، مع تحويل وحدة قياس الطول من(سم) إلى (م).

$$\text{قَ}_{\text{د}} = \text{ل ع غ}$$

$$\text{قَ}_{\text{د}} = ٠,٤ \times ٠,٨ \times ٢ = ٠,٦٤ \ \text{فولت}$$

٢ $$\text{تَ} = \frac{\text{قَ}_{\text{د}}}{\text{م}}$$

$$\text{تَ} = \frac{٠,٦٤}{٠,٨} = ٠,٨ = ٠,٨ \ \text{أمبير}$$

٣ نعم يصبح صفرًا، لأن الموصل في هذه الحالة لا يقطع خطوط المجال المغناطيسي فلا يحدث أي تغير في التدفق المغناطيسي، أي أن $\text{قَ}_{\text{د}}$ = صفرًا.

مراجعة (٦-٣)

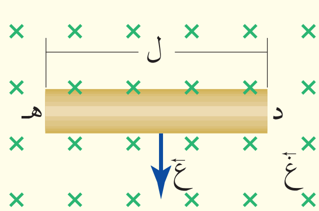
١ عندما يتحرك موصل مستقيم بسرعة محددة في مجال مغناطيسي منتظم، قد تتولد في الملف قوة دافعة كهربائية حثية وقد لا تتولد. وضح كيف يتم ذلك.

٢ ما العوامل التي يعتمد عليها متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي، موضحًا العلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة وكل عامل من تلك العوامل.

٣ يتحرك موصل مستقيم في مجال مغناطيسي منتظم كما هو موضح في الشكل (٦-١١)، إذا علمت أن قوة دافعة كهربائية حثية تولدت بين طرفي الموصل، فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ) حدد أي طرفي الموصل المتحرك (هـ) أم (د) يكون أعلى جهدًا.

ب) حدد اتجاه المجال الكهربائي داخل الموصل.



الشكل (٦-١١): سؤال (٣).

٦-٤ قانون لنز
Lenz>s Law

تعلمت أن تيارًا كهربائيًا حثيًا يتولد في دارة مغلقة عندما يتغير التدفق المغناطيسي عبرها، وقمت بحساب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف نتيجة للتغير في التدفق المغناطيسي عبره. كما لاحظت أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية سالبة في أثناء زيادة التدفق المغناطيسي، وموجبة في أثناء تناقصه. فما دلالة ذلك؟ وكيف نحدد اتجاه التيار الحثي في الملف؟ هذه الأسئلة أجاب عنها العالم لنز من خلال توصله لقانون سمي باسمه. ولتعرف القانون وأهميته وكيفية استخدامه في تحديد اتجاه التيار الحثي الذي يتولد في ملف نفذ النشاط الآتي.

نشاط (٦ - ٢) قانون لنز

الهدف: استقصاء التحقق عمليًا من قانون لنز.

المواد والأدوات: ملف، غلفانوميتر، مغناطيس مستقيم، أسلاك توصيل.

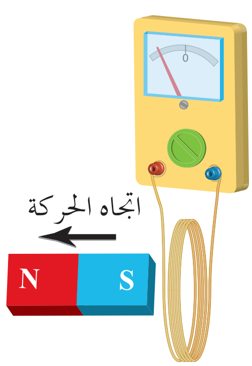
خطوات تنفيذ النشاط:

١ صل طرفي الملف بغلفانوميتر.

٢ قرب قطبًا مغناطيسيًا وليكن جنوبيًا من الملف كما في الشكل (٦-١٢/أ)، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر ولحركة المغناطيس في أثناء اقترابه من الملف.

٣ أبعد القطب الجنوبي عن الملف كما في الشكل (٦-١٢/ب). ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر، ولحركة المغناطيس، في أثناء ابتعاده عن الملف.

(أ)



(ب)

الشكل (٦-١٢): حركة مغناطيس بالنسبة إلى ملف.

هل لاحظت عند تنفيذك للنشاط وجود مقاومة لحركة المغناطيس في أثناء اقترابه من الملف وابتعاده عنه؟ وهل لاحظت أن اتجاه حركة مؤشر الغلفانوميتر قد تغيرت في أثناء اقتراب المغناطيس من الملف وفي أثناء ابتعاد المغناطيس عنه؟ فما تفسير ذلك؟

في أثناء اقتراب القطب الجنوبي للمغناطيس من الملف يزداد التدفق المغناطيسي الذي يخترقه، فتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية تولد تيارًا كهربائيًا حثيًا في الملف ينتج عنه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه معاكس لاتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف؛ ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًا جنوبيًا، فتتولد قوة تنافر بينهما تقاوم اقتراب المغناطيس منه. ولتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحثي المتولد في الملف نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه التيار الحثي في لفات الملف، لاحظ الأسهم الموضحة في الشكل(٦-١٢/أ).

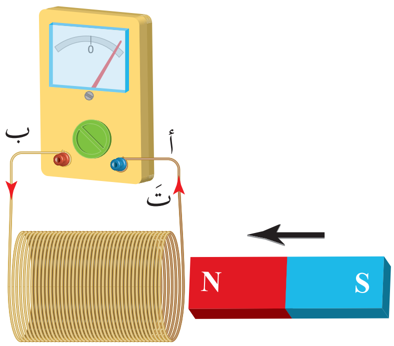
أما في أثناء ابتعاد القطب الجنوبي عن الملف فيقل التدفق المغناطيسي عبره، فتنشأ قوة دافعة كهربائيّة حثية تولد تيارًا كهربائيًّا حثيًّا في الملف ينتج عنه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه مع اتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف؛ ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًا شماليًا فتتولد قوة تجاذب بينهما تقاوم ابتعاد المغناطيس عنه. وينعكس اتجاه التيار الحثي المتولد في الملف، لاحظ الأسهم الموضحة في الشكل(٦-١٢/ب)، وهذا يفسر انحراف مؤشر الغلفانوميتر في الاتجاه المعاكس عند ابتعاد المغناطيس عن الملف.

يتبين مما سبق أن المجال المغناطيسي الحثي الناتج عن تولد التيار الحثي في الملف يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له، ويمكن التعبير عن هذا الاستنتاج عن طريق **قانون لنز** (Lenz›s Law) الذي ينص على أن:

يكون اتجاه التيار الكهربائي الحثي في ملف؛ بحيث ينتج عنه مجال مغناطيسي حثي يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له.

مثال (٦-٥)

حدد اتجاه التيار الحثي المتولد في لفات الملف نتيجة حركة المغناطيس بالاتجاه الموضح في الشكل (٦-١٣).



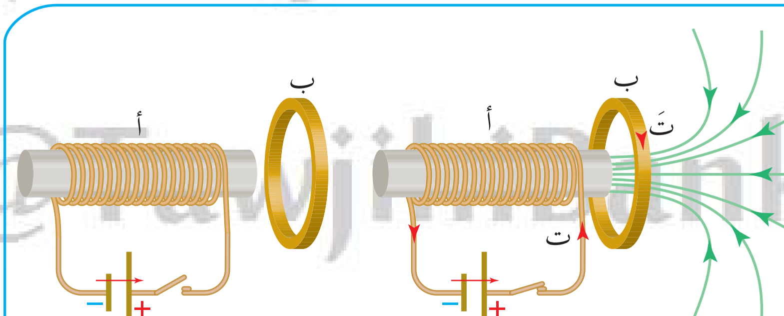
الشكل (٦-١٣): مثال (٦-٥).

الحل:

لاحظ حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف، فأثناء اقتراب المغناطيس من الملف يزداد التدفق المغناطيسي عبره، وبحسب قانون لنز فإن قوة دافعة كهربائية حثية تنشأ في الملف تولد تيارًا حثيًا ينتج عنه مجال مغناطيسي حثي يقاوم الزيادة في التدفق المغناطيسي، ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الشمالي للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًا شماليًا. وباستخدام قاعدة اليد اليمنى، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف، وتشير باقي الأصابع لاتجاه التيار الحثي في لفات الملف فيكون اتجاه التيار الحثي في لفات الملف إلى الأسفل عند النظر إليها من الأمام على النحو المبين في الشكل (٦-١٣) أي من النقطة أ إلى النقطة ب بين طرفي الغلفانوميتر.

مثال (٦-٦)

حدد اتجاه التيار الحثي المتولد في لفات الملف الدائري (ب) لحظة إغلاق المفتاح في دارة المغناطيس الكهربائي كما في الشكل (٦-١٤).



الشكل (٦-١٤): توليد تيار حثي في ملف لحظة إغلاق دارة مغناطيس كهربائي مجاور له.

الحل:

لحظة إغلاق مفتاح دارة المغناطيس الكهربائي (أ) يتولد في لفاته تيار كهربائي في الاتجاه المبين، وينتج عنه مجال مغناطيسي يخترق الملف (ب)، فيزداد التدفق المغناطيسي داخل الملف (ب)، وحسب قانون لنز تنشأ قوة دافعة كهربائية حثية في الملف (ب) تولد تيارًا حثيًا ينتج عنه مجال مغناطيسي حثي يعاكس المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي، بحيث يقاوم الزيادة في التدفق المغناطيسي ما يجعل طرف الملف (ب) المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس الكهربائي قطبًا مغناطيسيًا جنوبيًا. وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال

المغناطيسي وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه التيار الحثي في الملف حيث يكون مع اتجاه دوران عقارب الساعة عند النظر للملف الدائري من اليسار كما في الشكل (٦–١٤).

إن ما طُبِّقَ في المثالين السابقين ينطبق على الحالات جميعها التي تتولد فيها قوة دافعة كهربائية حثية؛ حيث إن أي زيادة في التدفق المغناطيسي ناتجة عن اقتراب مغناطيس عادي أو مغناطيس كهربائي من ملف يشكل دارة مغلقة، أو زيادة التيار الكهربائي فيه أو لحظة إغلاق دارته، أو إنقاص مقاومته، أو إدخال قلب حديد فيه، أو غير ذلك من العوامل التي تزيد التدفق المغناطيسي الذي يخترق ملفًّا تنشأ في الملف قوة دافعة كهربائية حثية تجعل المجالات المغناطيسية المتقابلة متعاكسة.

وعلى العكس من ذلك فإن أي نقصان في التدفق المغناطيسي ناتجة عن ابتعاد مغناطيس عادي أو مغناطيس كهربائي من ملف يشكل دارة مغلقة، أو تناقص التيار الكهربائي فيه أو لحظة فتح دارته، أو زيادة مقاومته، أو إخراج قلب حديد منه، أو غير ذلك من العوامل التي تقلل التدفق المغناطيسي تؤدي إلى تولد قوة دافعة كهربائية حثية تجعل المجالات المغناطيسية المتقابلة في اتجاه واحد.

مراجعة (٦–٤)

١ اذكر نص قانون لنز، وبين أهميته؟

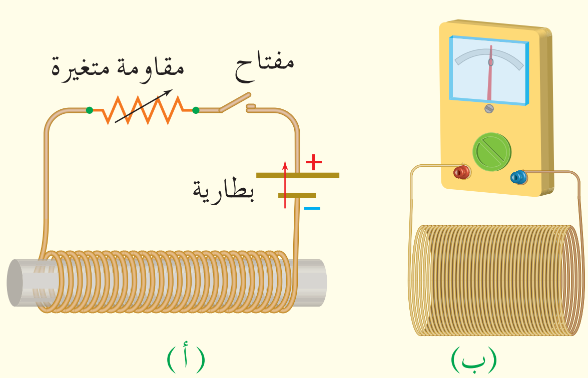
٢ حدد نوع كل من القطبين المتقابلين، واتجاه التيار الحثي في الملف (ب) في الشكل (٦–١٥) في الحالات الآتية:

أ لحظة إغلاق دارة الملف (أ).

ب في أثناء زيادة المقاومة في الملف (أ).

جـ في أثناء إدخال قلب حديد في الملف (أ).

٣ إذا دفعت مغناطيس داخل ملف، فستشعر بمقاومة لدفعك. لماذا تكون المقاومة لهذا الدفع أكبر في ملف عدد لفاته أكبر؟

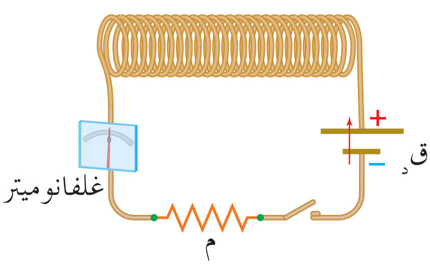


الشكل (٦–١١): سؤال (٣).

٦–٥ الحث الذاتي
(Self-Inductance)

درست أن التغير في التدفق المغناطيسي عبر ملف ينتج عن تغير في المجال المغناطيسي، أو تغير في المساحة، أو تغير في الزاوية بين اتجاهي المساحة والمجال المغناطيسي، وهذا التغير كان من مسبب خارجي في الحالات جميعها التي درستها. فهل يمكن توليد قوة دافعة كهربائية حثية في دارة ملف ذاتيًا دون مسبب خارجي للتغير في التدفق المغناطيسي عبره؟

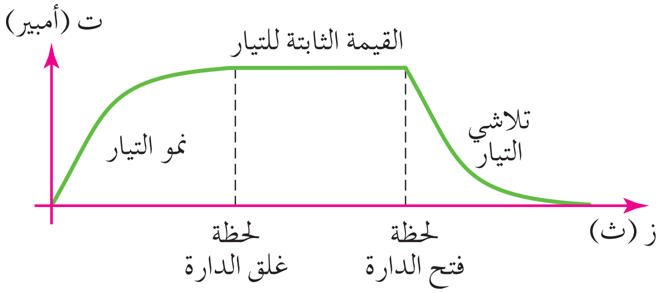
عند تركيب دارة كهربائية تحوي ملفًا لولبيًا وتوصيلها مع غلفانوميتر كما في الشكل (٦–١٦)، لحظة إغلاق الدارة الكهربائية يلاحظ من حركة مؤشر الغلفانوميتر أن التيار الكهربائي لا ينمو من الصفر إلى قيمته العظمى لحظيًا في الدارة، بل يحتاج إلى مدة زمنية قصيرة يتزايد فيها التيار ليصل إلى قيمته العظمى (نمو التيار)؛ ويعزى ذلك إلى ظاهرة الحث الذاتي؛ إذ إن المجال المغناطيسي الناتج عن التيار الكهربائي الذي يمر في الملف اللولبي يزيد التدفق المغناطيسي عبر الملف اللولبي، فتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في الملف تقاوم الزيادة في التيار، وتسمى **قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية عكسية.**



الشكل (٦–١٦): دارة تحتوي على محث.

ويسمى الملف اللولبي في هذه الحالة محثًا. وظاهرة **الحث الذاتي** (Self–Inductance) تعرف **بأنها تولّد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في ملف بسبب تغير التدفق المغناطيسي من الملف ذاته.**

ويمكن تمثيل علاقة التيار الكهربائي المار في دارة تحوي محثًّا مع الزمن بيانيًّا كما في الشكل (٦–١٧) ففي اللحظة التي تغلق فيها الدارة يبدأ التيار الكهربائي بالنمو إلى أن يصل إلى قيمته العظمى، فيصبح المجال المغناطيسي الناتج عنه ثابت المقدار، وعندها ينعدم التغير في التدفق المغناطيسي؛ ما يؤدي إلى تلاشي القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في المحث، وتثبت قيمة التيار الكهربائي.



الشكل (٦–١٧): نمو التيار وتلاشيه في المحث.

أما لحظة فتح الدارة الكهربائية فإن قيمة التيار الأصلي في الدارة لا تصل إلى الصفر لحظيًا، بل تحتاج إلى مدة زمنية قصيرة يتناقص فيها التيار ليصل إلى الصفر (تلاشي التيار)، ما يؤدي إلى تناقص المجال المغناطيسي الناتج عنه تدريجيًا، فيسبب تناقصًا في التدفق المغناطيسي عبر المحث، وتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في المحث تقاوم النقصان في التدفق المغناطيسي الناشئ عن تناقص التيار فيه، وتسمى **قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية طردية.**

وقد أثبتت التجارب أن التغير في التدفق المغناطيسي الناشئ في لفة واحدة من المحث $\Delta\varnothing$ يتناسب طرديًا مع التغير في التيار الكهربائي المسبب له Δت أي أن:

$\Delta\varnothing \,\alpha\, \Delta$ت $\Leftarrow \Delta\varnothing =$ ثابت $\times \Delta$ت

ويسمى الثابت في الطرف الأيسر محاثة المحث، ويرمز له بالرمز(ح)، أي أن:

$$\Delta\varnothing \quad = \quad \text{ح} \times \Delta\text{ت}$$

ولعدد ن من لفات المحث، يكون التدفق المغناطيسي الناتج من اللفات جميعها:

$$\text{ن} \times \Delta\varnothing \quad = \quad \text{ح} \times \Delta\text{ت}$$

وبقسمة الطرفين على الفترة الزمنية التي حصل فيها التغير (Δز):

$$\text{ن} \times \frac{\Delta\varnothing}{\Delta\text{ز}} = \text{ح} \times \frac{\Delta\text{ت}}{\Delta\text{ز}}$$

يمثل الطرف الأيمن متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية من قانون فارادي، وبما أنها متولدة في المحث فإنها تمثل متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية حسب العلاقة الرياضية الآتية:

$$\bar{\text{ق}}_{\text{د}} = -\text{ح} \times \frac{\Delta\text{ت}}{\Delta\text{ز}} \quad \text{.......................} \quad (\text{٦–٥})$$

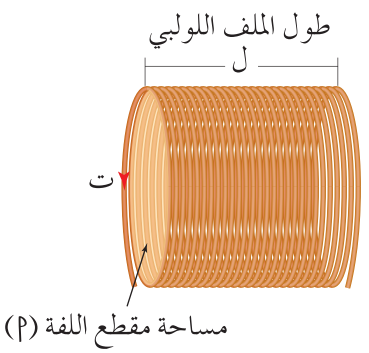
حيث ($\bar{\text{ق}}_{\text{د}}$): متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية، و($\frac{\Delta\text{ت}}{\Delta\text{ز}}$): المعدل الزمني للتغير في التيار الكهربائي.

وتشير الإشارة السالبة إلى أن متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية تقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب لها حسب قانون لنز.

وتمثل محاثة المحث (ح) نسبة متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية إلى المعدل الزمني

للتغير في التيار الكهربائي، وتسمى أيضًا معامل الحث الذاتي للمحث، ومن العلاقة السابقة يمكن استنتاج أن محاثة المحث تقاس بوحدة (فولت.ث/ أمبير)، وتعرف هذه الوحدة في النظام العالمي للوحدات باسم (هنري).

ويُعرف **الهنري** **بأنه محاثة محث تتولد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية مقدارها ١ فولت عندما يكون المعدل الزمني لتغيّر التيار المار فيه (١ أمبير/ث).**



الشكل (٦–١٨): العوامل التي تعتمد عليها محاثة المحث.

تعد المحاثة ثابتة للمحث فهي تعتمد على أبعاده الهندسية، والنفاذية المغناطيسية للمادة التي تشكل قلب المحث، ويمكن التوصل إلى هذه العوامل لمحث إذا كان طوله (ل)، ومساحة مقطعه (أ)، وعدد لفاته (ن) كما في الشكل (٦–١٨).

عندما يتغير التيار الكهربائي من (صفر) إلى (ت) في المحث يتغير التدفق المغناطيسي الناتج منه من (صفر) إلى (Ø) في الفترة الزمنية ذاتها، أي أن:

$$ح \times \Delta ت = ن \times \Delta Ø$$

$$ح \times ت = ن \times Ø$$

ونعبر عن التدفق المغناطيسي عبر اللفة الواحدة من المحث بالعلاقة: (Ø = غ × أ).

وبتعويض قيمة المجال المغناطيسي في الملف اللولبي ($غ = \frac{\mu \times ن \times ت}{ل}$)، يكون التدفق المغناطيسي:

$$Ø = \frac{\mu \times ن \times ت}{ل} \times أ$$

وعليه تكون المحاثة:

$$ح = أ \times \frac{ن^{2} \times \mu}{ل} \quad \text{......................} \quad (٦-٦)$$

أي أن محاثة المحث تعتمد على طوله (ل)، ومساحة مقطعه (أ)، وعدد لفاته (ن)، والنفاذية المغناطيسية لمادة قلب المحث، فإذا كانت هواء تكون النفاذية المغناطيسية (μ).

مثال (٦-٧)

محث محاثته ٠,٤ هنري وعدد لفاته ٢٠٠ لفة، أغلقت دارته فاستغرق التيار ٠,٠٤ ثانية للوصول إلى قيمته العظمى، وخلال هذه المدة تولدت قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية عكسية مقدارها ٢ فولت.

١ احسب القيمة العظمى للتيار الذي يمر فيه.

٢ المعدل الزمني للتغير في التدفق المغناطيسي خلال تلك المدة.

الحل:

١ $ق_{د\ عكسية} = - \frac{ح\Delta ت}{\Delta ز}$

$$-٢ = -٠,٤ \times \frac{\Delta ت}{٠,٠٤}$$

(لاحظ أن متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية العكسية تكون إشارتها سالبة)

$$\Delta ت = \frac{٢}{١٠} = ٠,٢ \text{ أمبير}$$

$$\Delta ت = ت_٢ - ت_١$$

$$٠,٢ = ت_٢ - \text{صفر ومنها فإن } ت_٢ = ٠,٢ \text{ أمبير}$$

٢ $ق_د = - \frac{ن\ \Delta \text{Ø}}{\Delta ز}$

$$\frac{\Delta \text{Ø}}{\Delta ز} = - \frac{ق_د}{ن}$$

$$\frac{\Delta \text{Ø}}{\Delta ز} = - \frac{-٢}{٢٠٠} = ٠,٠١ \text{ ويبر / ث}$$

مراجعة (٦-٥)

١ محث مكون من لفة واحدة محاثته ٠,٣ هنري، يمر فيه تيار كهربائي مقداره ٣ أمبير. احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في المحث في الحالات الآتية:

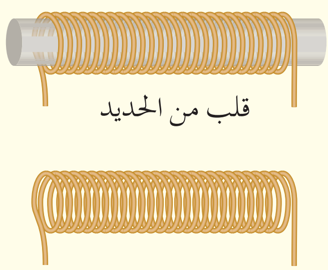
أ إذا انعكس اتجاه التيار في مدة زمنية مقدارها ٠,١ ثانية.

ب إذا فتحت دارته وتلاشى التيار في مدة زمنية مقدارها ٠,١ ثانية.

جـ إذا ازداد التيار الذي يمر فيه إلى ٥ أمبير في مدة زمنية مقدارها ٠,٢ ثانية.

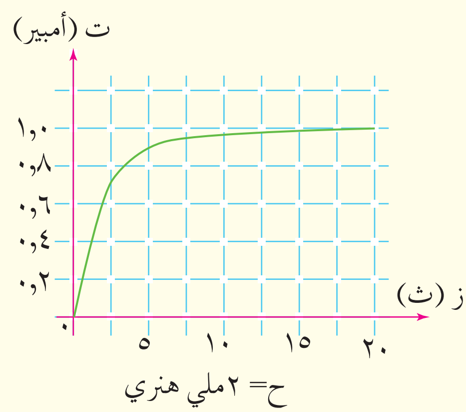
٢ فسر عدم وصول التيار إلى قيمته العظمى فور إغلاق الدارة التي تحوي محثًا. وعدم تلاشيه لحظيًا فور فتحها.

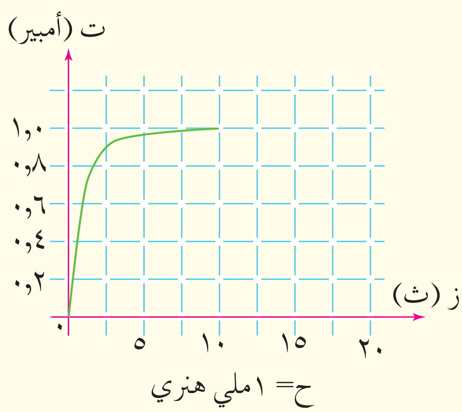
٣ لديك ملفان لولبيان متماثلان، لفات أحدهما لفت حول قلب من الحديد، انظر الشكل (٦-١٩)، بين أثر نوع مادة القلب في مقدار محاثة المحث علمًا بأن ($\mu_{\text{الحديد}} = ٥٠٠\mu$).



الشكل (٦-١٩): سؤال (٣).

٤ يبين الشكل (٦-٢٠) تمثيلًا بيانيًا لتغير التيار الكهربائي بالنسبة إلى الزمن في دارة تحوي محثًا، بين أثر محاثة المحث في المعدل الزمني لتغير التيار فيه.





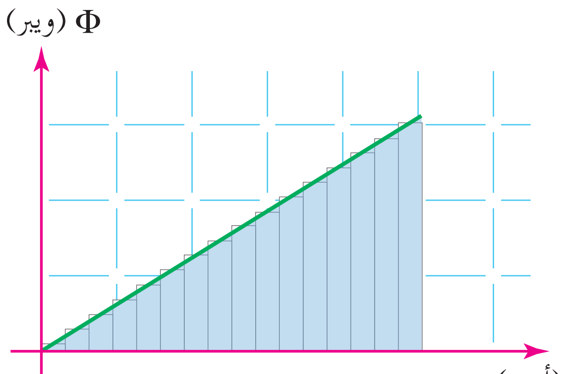
الشكل (٦-٢٠): سؤال (٤).

٥ ماذا نعني بقولنا إن محاثة المحث تساوي ٢ هنري

٦-٦ الطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث

Energy Stored in an Inductor

تعرفت مما سبق أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في المحث تمانع نمو التيار لحظة إغلاق الدارة، وعليه فإن البطارية مصدر القوة الدافعة الكهربائية في الدارة ستقاوم هذه الممانعة فتبذل شغلًا يختزن كله على شكل طاقة مغناطيسية في المجال المغناطيسي الحثي للمحث إذا أهملت مقاومته الكهربائية (المحث مثاليّ). ولحساب الطاقة المغناطيسية المختزنة في المجال المغناطيسي للمحث لاحظ الشكل (٦-٢١) الذي يبين العلاقة بين التدفق المغناطيسي عبر المحث بوحدة ويبر، والتيار الكهربائي المار في الدارة بوحدة أمبير، حيث تمثل المساحة تحت المنحنى البياني الطاقة المغناطيسية المختزنة في المجال المغناطيسي الحثي، تأمل الشكل، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٦-٢١): منحنى (ت- Φ).

- ما نوع العلاقة البيانية في الشكل السابق؟
- جد ميل الخط المستقيم بالرموز. ما الكمية الفيزيائية التي يمثلها الميل؟
- أثبت أن الطاقة المغناطيسية تعطى بالعلاقة الرياضية:

($ط_{مغناطيسية} = \frac{١}{٢}$ ح ت^{٢}).

لا بد من أنك لاحظت أن العلاقة البيانية في الشكل (٦-٢١) خطية، ويمكن حساب ميل الخط المستقيم الذي يمثل محاثة المحث إذا علمت أن ($\Phi = ن\varnothing$).

والمساحة تحت منحنى(ت - Φ) تمثل الطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث، وتمثل مساحة مثلث طول قاعدته (ت) وارتفاعه (Φ) أي أن:

$$\text{مساحة المثلث} = \frac{١}{٢} \times \text{القاعدة} \times \text{الارتفاع}$$

$$ط_{مغناطيسية} = \frac{١}{٢} (\text{ت}-\text{صفر}) \times (\Phi - \text{صفر})$$

$$ط_{مغناطيسية} = \frac{١}{٢} \text{ت} \times \Phi$$

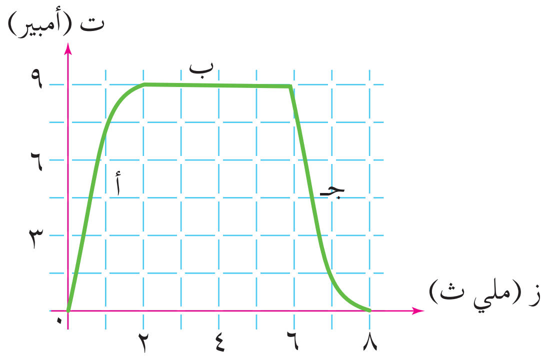
ومن الميل نجد أن (ح = $\frac{\Phi}{ت}$) أي أن (Φ=ح ت) ومنها:

$$ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{١}{٢} ح ت^{٢} \quad .... \quad (٦-٧)$$

وعمليًّا لحظة فتح الدارة تتحول الطاقة المغناطيسية في المحث إلى طاقة كهربائية تظهر على شكل شرارة كهربائية بسبب تولد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية طردية تقاوم النقص في التيار الكهربائي.

مثال (٦-٨)

يتغير التيار الكهربائي في دارة محث محاثته ٠,٢ هنري من لحظة غلق دارته حتى تلاشي التيار فيها بعد فتح الدارة حسب المنحنى الموضح في الشكل أدناه. مستعينًا بالشكل (٦-٢٢)، أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٦-٢٢): مثال (٦-٨).

١) ماذا تمثل كل من الفترات (أ، ب، ج)؟

٢) احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في كل من الفترات (أ، ب، ج).

٣) احسب الطاقة المغناطيسية العظمى المختزنة في نظام (المجال المغناطيسي الحثّي–المحث).

٤) احسب الطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث عندما يكون التيار الكهربائي في المحث ثُلث قيمته العظمى.

الحل:

١) الفترة (أ) تمثل مرحلة نمو التيار، الفترة (ب) تمثل ثبات التيار، بينما الفترة (ج) تمثل تلاشي التيار.

٢) الفترة (أ) $قَ_{د} = - \frac{ح \Delta ت}{\Delta ز}$

$$قَ_{د} = - \frac{٠,٢ \times (٩ - ٠)}{٢ \times ١٠^{-٣}}$$

$$قَ_{د} = - ٩٠٠ \text{ فولت}$$

الفترة (ب) $قَ_{د} = \text{صفر لأن } \Delta ت = \text{صفر}$

الفترة (ج) $قَ_{د} = - \frac{ح \Delta ت}{\Delta ز}$

$$قَ_{د} = - \frac{٠,٢ \times (٠ - ٩)}{٢ \times ١٠^{-٣}}$$

$ق_د = ٩٠٠$ فولت

٣) تكون للطاقة المغناطيسية المختزنة في المجال المغناطيسي الحثي قيمة عظمى عندما يصل التيار إلى قيمته العظمى:

$ط_{\text{مغناطيسية عظمى}} = \frac{١}{٢} ح ت^٢_{\text{عظمى}}$ (من الشكل تظهر القيمة العظمى للتيار=٩ أمبير)

$= \frac{١}{٢} \times ٠,٢ \times ٩^٢$

$= ٨,١$ جول

٤) $ت = \frac{١}{٣} ت_{\text{عظمى}}$

$ت = \frac{١}{٣} \times ٣ = ٣$ أمبير.

$ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{١}{٢} ح ت^٢$

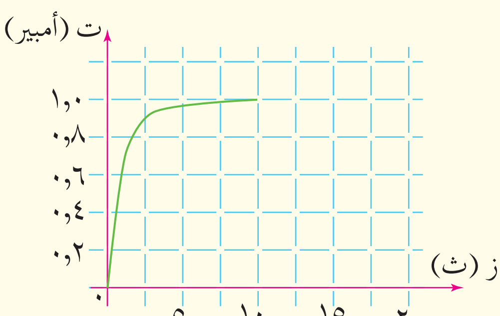
$= \frac{١}{٢} \times ٠,٢ \times ٣^٢$

$= ٠,٩$ جول

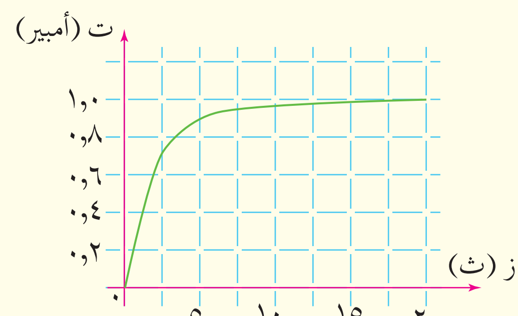
مراجعة (٦-٦)

١) لماذا لا تظهر شرارة كهربائية لحظة إغلاق دارة محث بينما تظهر الشرارة الكهربائية لحظة فتح الدارة؟

٢) مستعينًا بالتمثيل البياني في الشكل (٦-٢٣) الذي يبين تغير التيار بالنسبة إلى الزمن في دارة تحوي محثًا، احسب الطاقة المغناطيسية العظمى المختزنة في المجال المغناطيسي لمحث كل دارة.



ح= ١ملي هنري



ح= ٢ملي هنري

الشكل (٦-٢٣): سؤال (٢).

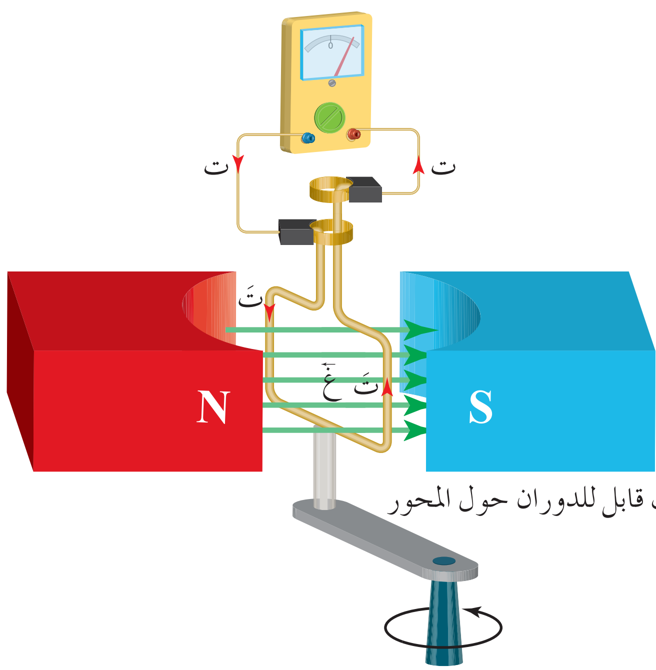
٦-٧ تطبيقات الحث الكهرمغناطيسي

Electromagnetic Induction Application

تعد المولدات الكهربائية من التطبيقات المهمة على ظاهرة الحث الكهرمغناطيسي التي لولاها لما حدث التقدم العلمي والصناعي والتكنولوجي الذي نشهده في وقتنا الحاضر. ويعتمد مبدأ عمل المولد الكهربائي على توليد تيار كهربائي حثي نتيجة للتغير في التدفق المغناطيسي الذي يعبره، فالمولد الكهربائي يحول الطاقة المغناطيسية إلى طاقة كهربائية.

يتكون نموذج المولد الكهربائي البسيط من ملف ثابت المساحة يدور في مجال مغناطيسي منتظم كما في الشكل (٦-٢٤)

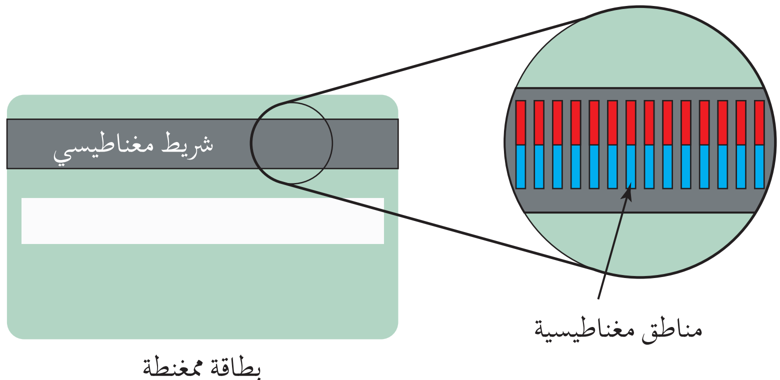
فعندما يدور الملف يتغير مقدار التدفق المغناطيسي بسبب تغير الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي المنتظم، فتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية تولد تيارًا كهربائيًا حثيًا يصل إلى فرشاتين موصلتين تلامسان حلقتين موصلتين تدوران مع الملف وحول محوره، حيث تتصل كل حلقة بأحد طرفي الملف، ويشكلان دارة كهربائية مغلقة عند وصلهما بغلفانوميتر.



الشكل (٦-٢٤): نموذج مولد كهربائي.

ومن التطبيقات الأخرى الحديثة المهمة على ظاهرة الحث الكهرمغناطيسي البطاقات الممغنطة مثل، بطاقة الصراف الآلي. تتكون البطاقة الممغنطة من شريط مغناطيسي حديدي مثبت على البطاقة البلاستيكية. حيث تُشكَّل المناطق المغناطيسية على الشريط لتنتج مجالات مغناطيسية متغيرة حسب المعلومات المراد تخزينها عليها كما في الشكل (٦-٢٥). وعند سحب البطاقة أو إدخالها داخل القارئ الخاص بها والذي يحتوي على ملفات لاقطة يتغير التدفق المغناطيسي داخلها، وتنشأ قوة دافعة

كهربائية حثية تولد نبضات كهربائية متغيرة ينتج عنها ترتيب المناطق المغناطيسية في القارئ لتتوافق مع الترتيب المبرمج مسبقًا على البطاقة، وبذلك يتم التعرف على البطاقة وصلاحيتها وقراءة معلوماتها.



الشكل (٦-٢٥): البطاقة الممغنطة.

مراجعة (٦-٧)

١ وضح كيف يعمل المولد الكهربائي على تحويل الطاقة المغناطيسية إلى طاقة كهربائية.

٢ اذكر تطبيقين على الحث الكهرمغناطيسي؟

٣ اشرح كيف يتعرف قارئ البطاقات الممغنطة معلومات البطاقة.

أسئلة الفصل

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١) محاثة المحث الذي تتولد فيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية مقدارها فولت واحد عندما يتغير فيه التيار بمعدل أمبير واحد كل ثانية تسمى:

أ) تسلا ب) هنري جـ) فولت د) قانون لنز

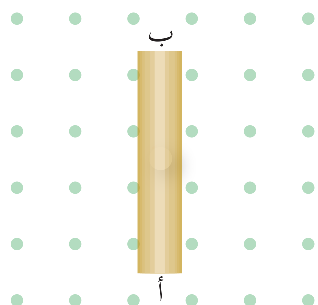
٢) لحظة فتح دارة تحتوي على محثّ ستنشأ فيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية:

أ) طردية، فينمو التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.

ب) عكسية، فيتلاشى التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.

جـ) طردية، فيتلاشى التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.

د) عكسية، فينمو التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.



الشكل(٦–٢٦): سؤال (١) فقرة (٣).

٣) موصل مستقيم (أب) موضوع في مجال مغناطيسي منتظم كما في الشكل (٦–٢٦)، إذا أردنا أن يكون الطرف (أ) أعلى جهدًا بالنسبة إلى الطرف (ب)، فإنه يتعين التأثير بقوة خارجية لتحريك الموصل باتجاه:

أ) (+س). ب) (–س). جـ) (+ص). د) (–ص).

٤) في أثناء اقتراب قطب مغناطيسي جنوبي من طرف ملف في دارة مغلقة، يتولد في الملف تيار كهربائي حثي ينشأ عنه مجال مغناطيسي يقاوم:

أ) زيادة التدفق المغناطيسي، ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا.

ب) نقصان التدفق المغناطيسي، ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا.

جـ) زيادة التدفق المغناطيسي، ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًّا جنوبيًّا.

د) نقصان التدفق المغناطيسي، ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًّا جنوبيًّا.

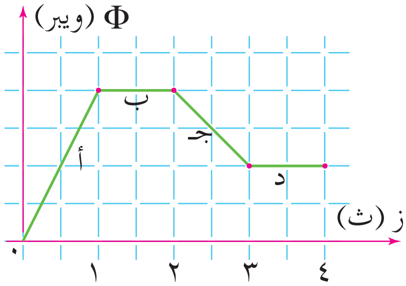
٥) الطاقة المغناطيسية المختزنة في المجال المغناطيسي للمحث تتناسب تناسبًا:

أ) طرديًّا مع مربع التيار المار فيه. ب) طرديًّا مع التيار المار فيه.

جـ) عكسيًّا مع مربع التيار المار فيه. د) عكسيًّا مع التيار المار فيه.

٦ مُثّل التغير في التدفق المغناطيسي مع الزمن بيانيًا كما في الشكل (٦–٢٧). عند تقريب مغناطيس من ملف، ثم ثباته، نستنتج من التمثيل البياني أن قوة دافعة كهربائية حثية ستتولد في أثناء:

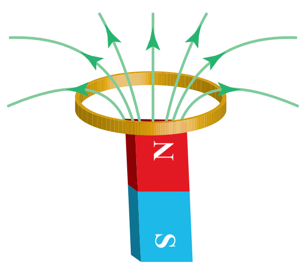
أ الفترتين (أ) و(ب).
ب الفترتين (ب) و(د).
جـ الفترتين (أ) و(جـ).
د الفترتين (جـ) و(د).



الشكل(٦–٢٧): سؤال (١) فقرة (٦).

٢ دارة كهربائية تحوي محثًّا ومقاومة متغيرة، فإذا أنقص تيار الدارة الكهربائي إلى النصف، فكيف تتغير الطاقة المغناطيسية المختزنة في المجال المغناطيسي للمحث في أثناء ذلك؟

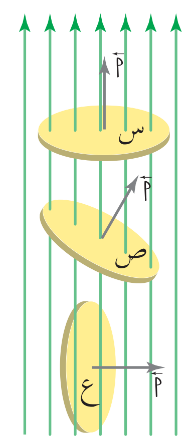
٣ حدد اتجاه التيار الكهربائي الحثي المتولد في الحلقة المبينة في الشكل (٦–٢٨) في أثناء اقتراب المغناطيس منها. ما العوامل التي يعتمد عليها التيار الحثي المتولد في الحلقة؟



الشكل(٦–٢٨): سؤال (٣).

٤ ثلاثة أسطح (س،ص،ع) متماثلة مساحة كل منها ٠,٦ سم٢ مغمورة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره ٠,٨ تسلا، لاحظ الشكل (٦–٢٩)، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

أ أي الأسطح الثلاثة يكون التدفق المغناطيسي عبره أكبر؟ علل إجابتك.
ب أي الأسطح الثلاثة يكون التدفق المغناطيسي عبره صفرًا؟ علل إجابتك.
جـ احسب التدفق المغناطيسي الذي يخترق السطح (ص) إذا كانت الزاوية بين متجه المساحة والمجال المغناطيسي ٦٠°.

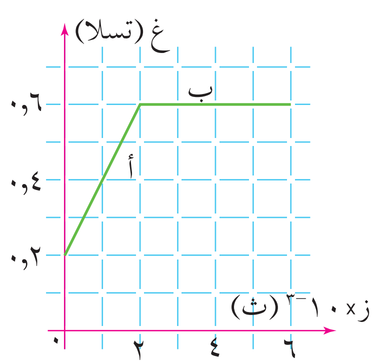


الشكل(٦–٢٩): سؤال (٤).

٥ قضيب فلزي أفقيٌّ طوله ٠,٥ م، يتحرك باتجاه المحور الصادي السالب بسرعة ٢٠ سم/ث في مجال مغناطيسي منتظم مقداره ٠,٨ تسلا باتجاه المحور الزيني الموجب. احسب:

أ مقدار متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة فيه.
ب إذا كان القضيب جزءًا من دارة كهربائية مغلقة مقاومتها ٢ أوم. فاحسب التيار الحثي الذي يسري فيها.

٦ يمثل الشكل (٦–٣٠) الرسم البياني لتغير المجال المغناطيسي



الشكل(٦–٣٠): سؤال (٦).

بالنسبة إلى الزمن، فإذا كان هذا المجال يخترق ملفًا عدد لفاته ٢٠٠ لفة، ومساحة اللفة الواحدة(٤×١٠^{-٢}) م٢، بحيث يكون متجه المساحة موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي. فاحسب:

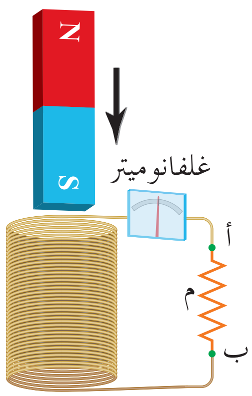
أ) التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في كل من المرحلتين (أ، ب).

ب) متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في كل من المرحلتين (أ، ب).

٧ أسقط طالب مغناطيسًا داخل ملف كما في الشكل (٦-٣١)، فتحرك المغناطيس بتسارع أقل من تسارع السقوط الحر، فاعتقد الطالب أنه توجد قوة معاكسة لقوة الجاذبية الأرضية تؤثر في حركة المغناطيس.

أجب عن الأسئلة الآتية:

أ) ما اتجاه التيار الحثي المتولد في الملف إذا كان القطب الجنوبي للمغناطيس هو القطب المتجه نحو الأسفل؟



الشكل(٦-٣١): سؤال (٧).

ب) كيف يعمل التيار الحثي على تقليل تسارع المغناطيس الساقط؟

جـ) ما اتجاه التيار الحثي المار في المقاومة (أ ب) في أثناء اقتراب القطب الشمالي للمغناطيس من الملف؟

٨ تغير التيار المار في دارة محث من ٣ أمبير إلى ٧ أمبير خلال ٠,٠٢ ثانية. فإذا كانت محاثة المحث ٢٠هنري، وعدد لفاته ١٠٠٠ لفة. فاحسب في أثناء المدة الزمنية التي تغير فيها التيار الكهربائي:

أ) القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في المحث.

ب) التغير في الطاقة المغناطيسية المختزنة في المجال المغناطيسي للمحث.

جـ) التغير في التدفق المغناطيسي عبر المحث.

٩ ملف عدد لفاته ٢٠٠ لفة، ومساحة مقطع كل لفة من لفاته ٠,٨ سم٢، موضوع في مجال مغناطيسي مقداره ٢٠ تسلا، فإذا كان متجه المساحة باتجاه المجال المغناطيسي فاحسب:

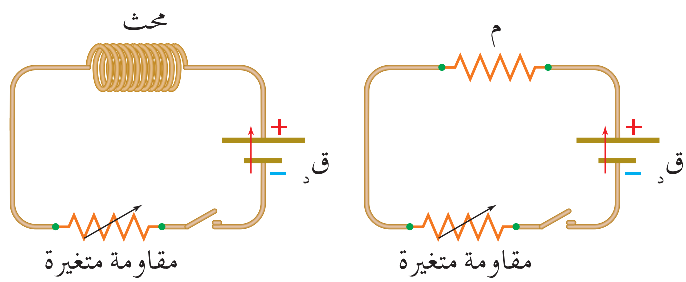
أ) التدفق المغناطيسي عبره.

ب) متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة فيه إذا تلاشى المجال المغناطيسي في مدة زمنية مقدارها ٠,٠٢ ثانية.

١٠ يبين الشكل (٦-٣٢) دارتين كهربائيتين، اعتمادًا على مكونات كل دارة، صف إضاءة المصباح في كل من الدارتين مفسّرًا إجابتك في الحالات الآتية:

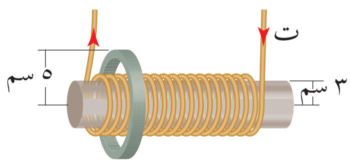
أ لحظة إغلاق الدارتين.

ب بعد مرور مدة زمنية كافية على إغلاق الدارتين.



الشكل(٦-٣٢): سؤال (١٠) .

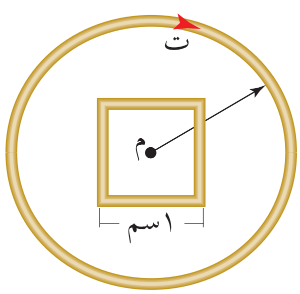
١ حلقة من الألمنيوم نصف قطرها ٥ سم ومقاومتها ٠,٣ ملي أوم، موضوعة حول أحد طرفي ملف لولبي عدد لفاته ١٠٠٠ لفة/م ونصف قطر مقطعه ٣ سم كما في الشكل. فإذا كان مقدار المجال المغناطيسي المتولد عند أحد طرفي الملف اللولبي يساوي نصف مقدار المجال المغناطيسي المتولد داخله، وكان المعدل الزمني لتغير التيار الكهربائي عبره ٢٧٠ أمبير/ث، فجد:



١) التيار الحثي المتولد في الحلقة مقدارًا واتجاهًا.

٢) المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الحثي في مركز الحلقة الدائرية مقدارًا واتجاهًا.

٢ يبين الشكل مقطعًا لملف لولبي مكون من ١٠٠ لفة، طوله ٢٠سم، ومساحة مقطعه ٣٠ سم^{2}، ويمر فيه تيار كهربائي ٣ أمبير باتجاه دوران عقارب الساعة، وُضع في مركزه ملف مربع الشكل طول ضلعه ١ سم وعدد لفاته لفة واحدة. جد:



١) المجال المغناطيسي الناشئ داخل الملف اللولبي، مقدارًا واتجاهًا.

٢) مقدار التدفق المغناطيسي عبر الملف المربع في مركز الملف اللولبي.

٣) متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف المربع، إذا تلاشى التيار الكهربائي في الملف اللولبي خلال ٣ ثوان.

٤) التيار الكهربائي الحثي المتولد في الملف المربع مقدارًا واتجاهًا، إذا كانت مقاومته٠,٢ أوم.

٣ ملف لولبي يتكون من ٤٥٠ لفة، ومساحة مقطعه ١٥٠ سم^{2}، وطوله ٢٠ سم، يمر فيه تيار كهربائي مقداره ٤٠ ملي أمبير. أجب عما يأتي:

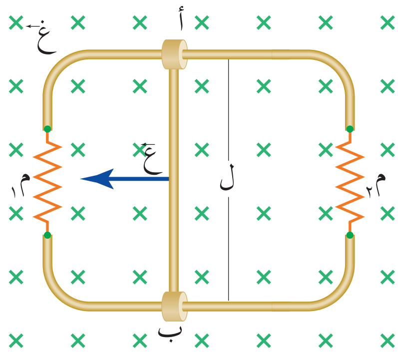
١) احسب مقدار المجال المغناطيسي الناشئ في الملف اللولبي.

٢) إذا كان المجال المغناطيسي داخل الملف منتظمًا، فاحسب مقدار التدفق المغناطيسي عبر

إحدى لفات الملف.

٣ احسب محاثة الملف اللولبي.

٤ أثبت أن الطاقة المختزنة في الملف اللولبي يمكن أن تعطى بالعلاقة الآتية:

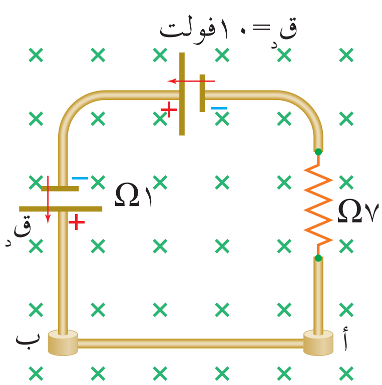


٤ في الشكل المجاور، موصل مستقيم طوله ٣٥سم، قابل للانزلاق دون احتكاك على مجرى فلزي، مغمور داخل مجال مغناطيسي مقداره ٢,٥ تسلا باتجاه (−ز)، فإذا كان طرفا المجرى متصلين بمقاومتين (م١ = ٢Ω، م٢ = ٥Ω)، وسحب الموصل باتجاه (−س) بسرعة ثابتة مقدارها ٨م/ث، فاحسب:

١ فرق الجهد الكهربائي بين طرفي الموصل. ما علاقته بجهد كل من المقاومتين؟

٢ التيار الحثي في كل من المقاومتين.

٣ القدرة الكهربائية المستهلكة في كل من المقاومتين.



٥ مجال مغناطيسي منتظم مقداره ١٠ تسلا، يخترق دارة كهربائية باتجاه المحور الزيني السالب كما في الشكل، فإذا كان الموصل (أب) في الدارة قابلًا للانزلاق على امتداد محور الصادات دون احتكاك، وكتلة وحدة الأطوال منه (٢٠ غ/سم)، فاحسب القوة الدافعة الكهربائية ($ق_{د}$) التي تجعل الموصل (أب) متزنًا.

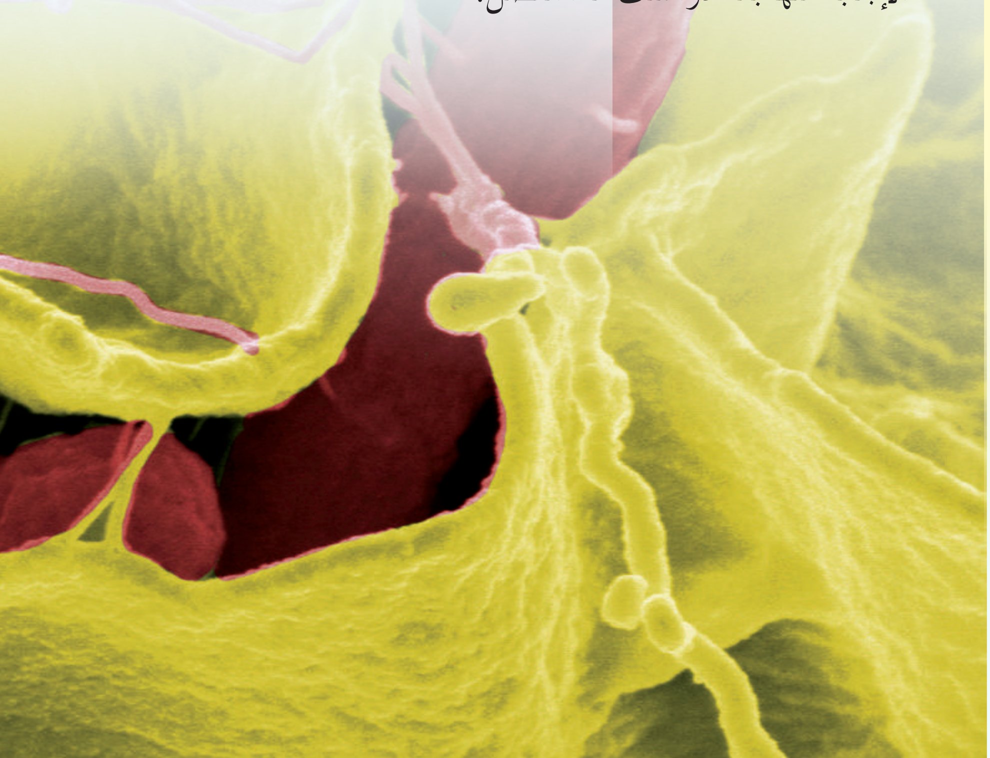
الفصل السابع

مقدمة إلى فيزياء الكم

Introduction to Quantum Physics

في هذا الفصل

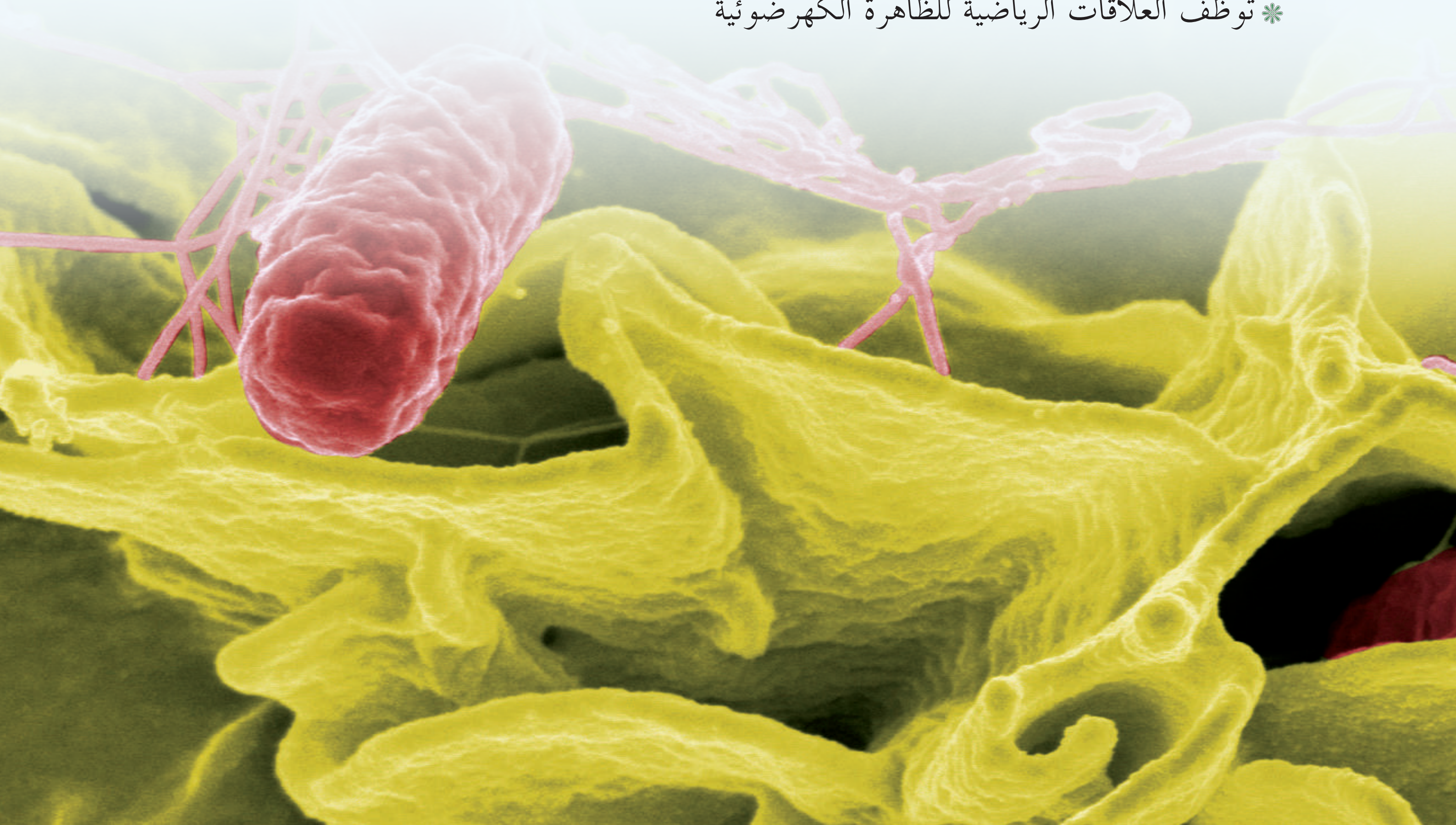
قدّمت الفيزياء الكلاسيكية، ممثلة بالميكانيكا، والحرارة، والكهرمغناطيسية، التي طُورت على مدى ما يقرب من قرنين من الزمان، العديد من القوانين والنظريات التي أسهمت إلى حدّ كبير في فهم الظواهر الطبيعية المختلفة وتفسيرها، والتي كان لها أثر في ظهور الكثير من الاكتشافات العلمية. وقد اعتقد العلماء في نهاية القرن التاسع عشر أنهم توصلوا إلى معظم ما عليهم معرفته في الفيزياء. ثم بدأت نتائج التجارب التي أجريت على المادة وعلاقتها بالإشعاع تَكشف عن ظواهر جديدة لم تنجح الفيزياء الكلاسيكية في تفسيرها، ومع بداية القرن العشرين توصل ماكس بلانك إلى فرضه الشهير في تكمية الطاقة، الذي كان بداية لحقبة جديدة حوّلت أنظار العلماء نحو مفاهيم وطرائق جديدة في معالجة النتائج التجريبية، أدى إلى ظهور فيزياء الكم. فما المقصود بتكمية الطاقة؟ وما أهم الظواهر التي شكلت تحديًا للفيزياء الكلاسيكية؟ ولماذا لم تنجح في تفسيرها؟ وبماذا تختلف الفيزياء الكلاسيكية عن فيزياء الكم؟ هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.



ينتج المجهر الإلكتروني الماسح صورًا ثلاثية الأبعاد، تبين الصورة التي التقطت بالمجهر الإلكتروني بكتيريا السالمونيلا المسببة للتسمم الغذائي.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضّح مبدأ تكمية الطاقة لبلانك، وتعبّر عنه رياضيًّا.
- تَتعرّف الظواهر التي لم تتمكن الفيزياء الكلاسيكية من تفسيرها.
- تُوضّح الظاهرة الكهرضوئية، والخلية الكهرضوئية وعناصرها.
- تُوضّح مفاهيم: اقتران الشغل، وتردّد العتبة، وتيار الإشباع، وجهد القطع.
- تُقارن بين الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم من حيث تفسيرهما للظاهرة الكهرضوئية.
- تُحلّل علاقات بيانية بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترون الضوئي وتردد الضوء الساقط.
- تَذكر العلاقات الرياضيّة المرتبطة بمفاهيم: جهد القطع، والطاقة الحركية العظمى، واقتران الشغل.
- تُوظّف العلاقات الرياضية للظاهرة الكهرضوئية في حل مسائل حسابية.
- تَستقصي تردّد العتبة.
- تَصف ظاهرة كومتون.
- تَذكر فروض بور الأربعة المتعلقة بذرّة الهيدروجين (نموذج بور الذري).
- تُطبّق فروض بور لذرّة الهيدروجين في حساب: (نصف قطر مدار الإلكترون، طاقة المستوى، طاقة التأين، فرق الطاقة بين مستويين).
- تَذكر نص فرض دي بروي، وتمثل علاقة طول الموجة المصاحبة للإلكترون بزخمه الخطّي رياضيًّا، وتطبّقها في حلّ المسائل.
- تُوضّح أن طول محيط المدار يساوي عددًا صحيحًا من طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون.



٧–١ تكميـة الطـاقـة

Quantization of Energy

تبعث الأجسام في الطبيعة إشعاعات كهرمغناطيسية عندما تكون درجة حرارتها فوق الصفر المطلق، ويعتمد إشعاع الجسم على درجة حرارته وعلى طبيعة سطحه، وهذا الإشعاع من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية يتألف من موجات كهرمغناطيسية يصدر عن الأجسام على هيئة سيل متصل (مستمر) من الطاقة؛ نتيجة اهتزازات جسيمات مشحونة داخلها، ويمكن للجسيم المهتز عند تردد اهتزازة معين أن يشع أو يمتص مقدارًا غير محدد من الطاقة عندما يتغير اتساع اهتزازته. وتتناسب طاقة الإشعاع مع شدته، التي تتناسب مع اتساع اهتزازات الجسيمات المهتزة. هذه النظرة لطبيعة الإشعاع جعلت الفيزياء الكلاسيكية تواجه صعوبة في تفسير ظواهر فيزيائية عديدة، مثل: الظاهرة الكهرضوئية، وظاهرة كومتون، وغيرهما من الظواهر.

في العام (١٩٠٠) قدّم العالم ماكس بلانك (Max Planck) تصوّرًا جديدًا للإشعاع؛ إذ افترض أن الإشعاع هو وحدات منفصلة ليست متصلة تسمى كمّات مفردها كمّة، لكل منها طاقة محددة مكمّاة تتناسب طرديًّا مع تردد الإشعاع؛ أي أن:

ط = هـ تد .... (٧–١)

حيث (ط): طاقة الكمّة الواحدة، و(تد): تردد الإشعاع، و(ه): ثابت بلانك ويساوي تقريبًا (٦,٦٣×١٠ ^-٣٤^ جول. ثانية).

وفرضية بلانك للإشعاع باتت تعرف بمبدأ **تكمية الطاقة** وبناءً على هذه الفرضية؛ فإن **الطاقة الإشعاعية المنبعثة أو الممتصة تساوي عددًا صحيحًا من مضاعفات الكمية (ه تد).**

مثال (٧-١)

سخن جسم حتى توهج باللون الأحمر، إذا كان أحد الترددات الإشعاعية الصادرة عنه يساوي ٤×١٠^{١٤} هيرتز، فاحسب طاقة الكمّة الواحدة لهذا الإشعاع.

الحل:

$$ط = هـ ت_د$$

$$= ٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ٤ \times ١٠^{١٤}$$

$$= ٢,٦٥ \times ١٠^{-١٩} \text{ جول}$$

وهذا المقدار من الطاقة صغير جدًّا مقارنة بوحدة قياس الطاقة في النظام العالمي (جول)، لذلك استخدمت وحدة أخرى لقياس الطاقة تسمى الإلكترون فولت (eV)، وهي الطاقة الحركية التي يكتسبها إلكترون عندما يتسارع عبر فرق جهد كهربائي مقداره (١) فولت. ومن العلاقة (٢-٢):

$$ط = سـ_e جـ$$

يمكن التوصل إلى أن الإلكترون فولت يساوي $١,٦ \times ١٠^{-١٩}$ جول، وعليه فإن طاقة الكمة الواحدة في المثال السابق:

$$ط = \frac{٢,٦٥ \times ١٠^{-١٩}}{١,٦ \times ١٠^{-١٩}}$$

$$= ١,٦٦ \text{ إلكترون فولت.}$$

مراجعة (٧-١)

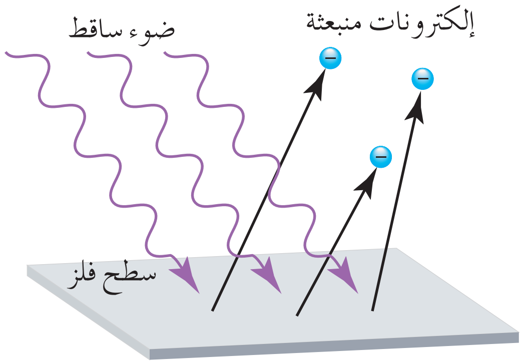
١) وضح المقصود بتكمية الطاقة، والإلكترون فولت.

٢) ما الفرضية التي وضعها بلانك لتفسير الإشعاع الصادر عن الأجسام؟

٣) كيف تتعارض فرضية بلانك لتفسير الإشعاع مع قوانين الفيزياء الكلاسيكية؟

٧-٢ الظاهرة الكهرضوئية
Photoelectric Effect

دلت التجارب أن **سقوط ضوء على سطح فلز يؤدي أحيانًا إلى انبعاث إلكترونات منه**، وقد أطلق على هذه الظاهرة اسم **الظاهرة الكهرضوئية**، وأطلق على الإلكترونات المنبعثة اسم **إلكترونات ضوئية** (photoelectrons)، أي إلكترونات تنبعث بفعل الضوء، كما في الشكل (٧-١). ولتعرّف الظاهرة الكهرضوئية ادرس النشاط الآتي.

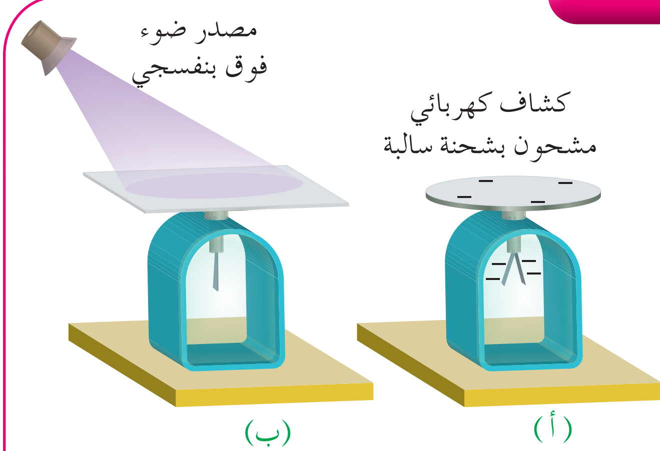


الشكل (٧-١): الظاهرة الكهرضوئية.

نشاط (٧-١) الظاهرة الكهرضوئية

الهدف: توضيح الظاهرة الكهرضوئية.

المواد والأدوات: صفيحة خارصين، وكشاف كهربائي، ومصدر ضوء فوق بنفسجي (القوس الكربوني)، وقضيب زجاج، وقطعة حرير، وورق زجاج (سنفرة).



الشكل (٧-٢): نشاط (٧-١).

خطوات تنفيذالنشاط:

١ اصقل صفيحة الخارصين مستخدمًا ورق الزجاج.

٢ اشحن الكشاف الكهربائي بالحث بشحنة سالبة مستخدما قضيب الزجاج وقطعة الحرير، ولاحظ انفراج ورقتي الكشاف كما في الشكل (٧-٢/أ).

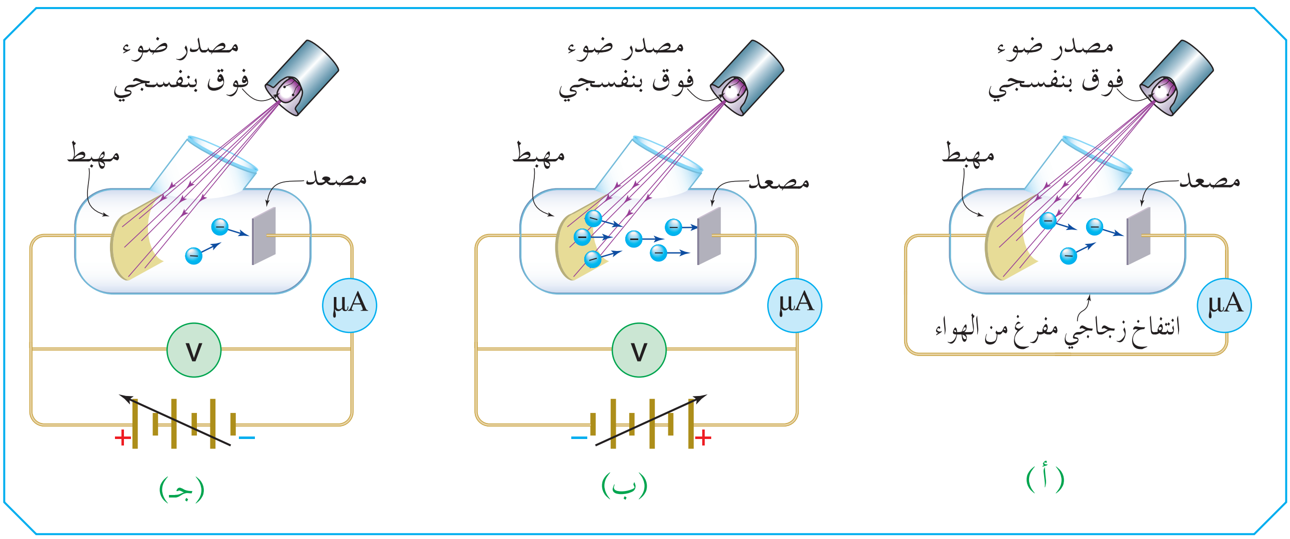
٣ صل صفيحة الخارصين بالكشاف الكهربائي، أو ضعها على قرص الكشاف.

٤ سلّط مصدر الضوء فوق البنفسجي على صفيحة الخارصين، كما في الشكل (٧-٢/ب). وراقب ما يحدث لورقتي الكشاف، ماذا تلاحظ؟

لا شكّ أنك شاهدت انطباق ورقتي الكشاف عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على سطح الخارصين، ما يعني فَقْد الكشاف شحنته السالبة عن طريق انبعاث إلكترونات من سطح الخارصين.

■ (٧-٢-١) تجربة لينارد (*Lenard*)

يعد العالم لينارد (Lenard) أول من درس هذه الظاهرة تجريبيًا، مستخدمًا الدارة المبينة في الشكل (٧-٣)، التي تحتوي على خلية كهرضوئية تتكوّن من انتفاخ زجاجي مفرغ من الهواء؛ كي لا تعيق جزيئات الهواء حركة الإلكترونات المنبعثة، ويوجد داخل الانتفاخ صفيحتان فلزيّتان، الأولى تنبعث منها الإلكترونات عند سقوط الضوء عليها تسمى المهبط، والثانية تجمع الإلكترونات المنبعثة تسمى المصعد.



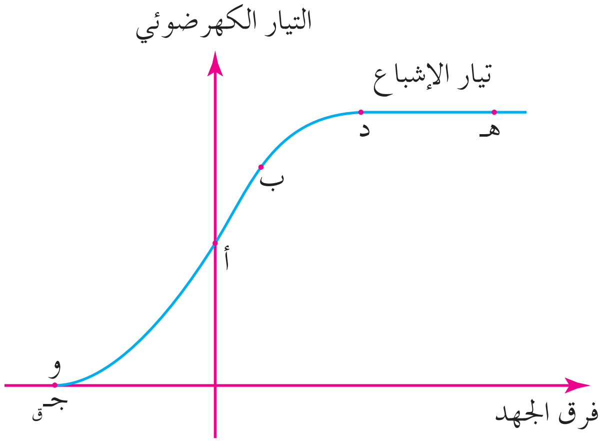
الشكل (٧-٣): تجربة لينارد.

بداية وصل لينارد الخلية الكهرضوئية مع ميكروأميتر بغياب مصدر فرق جهد كهربائي، كما في الشكل (٧-٣/أ)، فلاحظ عند سقوط ضوء بتردد مناسب على المهبط أن الميكروأميتر يكشف عن مرور تيار كهربائي، ومثّل العلاقة البيانية للنتائج التجريبية بين التيار وفرق الجهد بين المهبط والمصعد انظر الشكل (٧-٤) النقطة (أ)، فاستنتج أن مصدر هذا التيار هو إلكترونات ضوئية تحررت من المهبط ووصلت إلى المصعد، ما يدل على أن هذه الإلكترونات تمتلك قدرًا كافيًا من الطاقة الحركية مكّنتها من الوصول إلى المصعد، ويسمى **التيار الناتج عن حركة الإلكترونات المنبعثة من المهبط والمتجهة إلى المصعد** تيّارًا كهرضوئيًّا.

ثم وصل لينارد الخلية الكهرضوئية مع مصدر فرق جهد كهربائي متغيّر كما في الشكل (٧-٣/ب)، حيث كان جهد المصعد موجبًا والمهبط سالبًا، وهذا الفرق في الجهد بين المصعد والمهبط سيبذل شغلًا موجبًا على الإلكترونات، ويجذب المزيد منها نحو المصعد؛ ما يزيد التيار

الكهرضوئي، انظر النقطة (ب) في الشكل (٧-٤).

ومع زيادة فرق الجهد الموجب يزداد التيار الكهرضوئي إلى أن يصل إلى قيمة معيّنة يثبت عندها، انظر النقطة (د) في الشكل (٧-٤)، ثم لاحظ ثبات التيار الكهرضوئي بين النقطتين (د، هـ)، بالرغم من الاستمرار في زيادة فرق الجهد بين المصعد والمهبط، وهذا يعني أن جميع الإلكترونات المتحرّرة من المهبط قد وصلت إلى المصعد، وتسمى القيمة العظمى للتيار الكهرضوئي **تيار الإشباع**، وهو **التيار الكهرضوئي الناتج عن حركة الإلكترونات الضوئية جميعها المتحرّرة من المهبط والواصلة إلى المصعد.**



الشكل (٧-٤): العلاقة البيانيّة بين التيار الكهرضوئي وفرق الجهد بين المهبط والمصعد في الخلية الكهرضوئية .

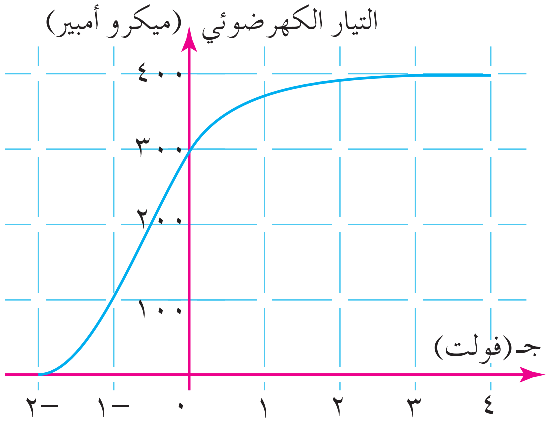
أعاد لينارد وصل مهبط الخليّة الكهرضوئية بالقطب الموجب والمصعد بالقطب السالب، فأصبح فرق الجهد الكهربائي عكسيًا، كما في الشكل (٧-٣/ج)، وهذا الفرق في الجهد يبذل شغلًا سالبًا يعيق وصول بعض الإلكترونات المنبعثة إلى المصعد؛ ما يسبب تناقص عدد الإلكترونات التي تمتلك قدرًا كافيًا من الطاقة الحركية يمكنها من التغلب على قوة التنافر مع المصعد السالب، لذا لاحظ لينارد أن التيار يتناقص تدريجيًا مع الاستمرار في زيادة فرق الجهد العكسي، انظر الشكل (٧-٤) بين النقطتين (أ، و)، وهذا يدل على أن الإلكترونات تنبعث ممتلكة طاقات حركية مختلفة؛ إذ كلما زادت الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة احتاجت إلى فرق جهد عكسي أكبر لإيقافها، لذا ينعدم التيار عندما يكون فرق الجهد العكسي كافيًا لإيقاف الإلكترونات الضوئية التي تمتلك أكبر طاقة حركية ($ط_{ح\ عظمى}$)، ويسمى **أقل فرق جهد عكسي يلزم لجعل التيار الكهرضوئي صفرًا، (أو فرق الجهد العكسي اللازم لإيقاف أسرع الإلكترونات الضوئية)** **فرق جهد القطع (Cutoff Potential)**، ويرمز له بالرمز ($جـ_{ق}$) وتمثله النقطة (و) في الشكل (٧-٤)، ويرتبط جهد القطع بالطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ط_{ح\ عظمى} = شـ_{e}\ جـ_{ق} \quad .... (٧-٢)$$

حيث ($شـ_{e}$): شحنة الإلكترون.

مثال (٧-٢)

يبين الشكل (٧-٥) تمثيلًا بيانيًا للعلاقة بين فرق الجهد في خلية كهرضوئية والتيار الكهرضوئي. مستعينًا بالبيانات على الشكل، أجب عما يأتي:



الشكل (٧-٥): مثال (٧-٢).

١ ما قيمة تيار الإشباع؟

٢ ما قيمة أقل فرق جهد بين طرفي الخلية الكهرضوئية عندما يصل التيار إلى قيمته العظمى؟

٣ ما قيمة جهد القطع؟

٤ احسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بوحدة إلكترون فولت.

٥ احسب السرعة العظمى للإلكترونات الضوئية.

الحل:

١ نرسم امتدادًا نحو اليسار من النقطة التي أصبح عندها المنحنى أفقيًا، فنجد أنه يتقاطع مع محور التيار الكهرضوئي عند القيمة ٤٠٠ ميكروأمبير، أي أن تيار الإشباع = ٤٠٠ ميكروأمبير.

٢ ننزل عمودًا على محور فرق الجهد من النقطة التي أصبح عندها التيار مشبعًا، حتى يتقاطع العمود مع المحور عند النقطة ٣ فولت، أي أن جـ = ٣ فولت.

٣ جهد القطع هو الجهد الذي ينعدم عنده التيار الكهرضوئي، وهي نقطة تقاطع المنحنى مع محور فرق الجهد (ت = صفرًا) ومن الرسم البياني $جـ_{ق} = -٢$ فولت.

٤ $ط_{ح\ عظمى} = ـسـ_e\ جـ_{ق}$

$= -١,٦ \times ١٠^{-١٩} \times -٢ = ٣,٢ \times ١٠^{-١٩}$ جول

$=$ ٢ إلكترون فولت.

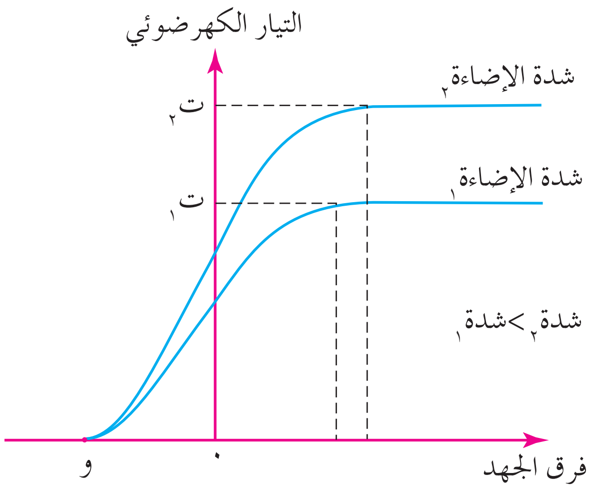
يُلاحظ أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بوحدة إلكترون فولت تساوي عدديًا القيمة المطلقة لجهد القطع بوحدة فولت.

٥ $ط_{ح\ عظمى} = \frac{١}{٢} ك\ ع^{٢}_{عظمى}$

$٣,٢ \times ١٠^{-١٩} = \times ٩,١١ \times ١٠^{-٣١}\ ع^{٢}_{عظمى}$

$ع^{٢}_{عظمى} = ٧,٠٣ \times ١٠^{١١} \Leftarrow ع_{عظمى} = ٨,٣٨ \times ١٠^{٥}$ م/ث.

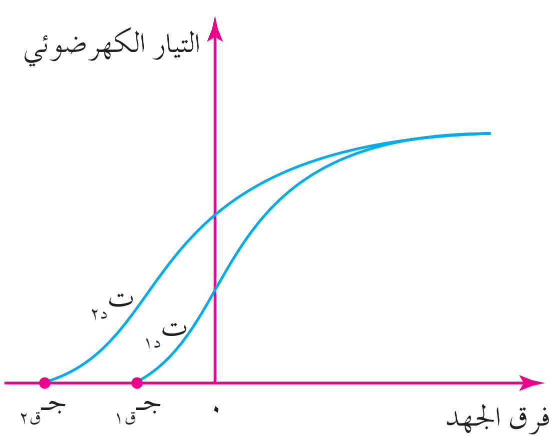
وعند تكرار تجربة لينارد بعد زيادة شدة الضوء الساقط على المهبط عن طريق إضافة مصباح آخر (مع ثبات تردد الضوء الساقط)، وتمثيل العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهرضوئي بيانيًّا، والحصول على منحنى آخر كما يبين الشكل (٧–٦). بينت النتائج التجريبية أن جهد القطع الذي تمثله النقطة (و) في الشكل لم يتغير، وهذا يعني أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لم تتغير حسب العلاقة (٧–٢)، ونستنتج من ذلك أن **الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لا تعتمد على شدّة الضوء الساقط.**



الشكل (٧–٦): أثر شدّة الضوء عند تردد معين على الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.

ويظهر المنحنيان في الشكل (٧–٦) أن التيار الكهرضوئي الناتج من شدة الضوء الثاني أكبر من التيار الكهرضوئي الناتج من شدة الضوء الأول، بما في ذلك تيار الإشباع عند ثبوت فرق الجهد بين المهبط والمصعد؛ وهذا يعني زيادة العدد الكلي للإلكترونات الضوئية الواصلة إلى المصعد. ونستنتج من ذلك أن **التيار الكهرضوئي يزداد بزيادة شدة الضوء الساقط عند ثبوت فرق الجهد بين المهبط والمصعد.**

وعند زيادة تردد الضوء الساقط مع ثبات شدّته في تجربة لينارد، وتمثيل العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهرضوئي بيانيًّا كما في الشكل (٧–٧)، فإن التجارب بينت أن جهد القطع تزداد قيمته المطلقة بزيادة تردد الضوء الساقط، وهذا يعني زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية، ونستنتج من ذلك أن **الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية تزداد بزيادة تردد الضوء الساقط،** في حين أن تيار الإشباع لم يتغير؛ ما يدل على أن العدد الكلي للإلكترونات المنبعثة لا يعتمد على تردد الضوء الساقط.



الشكل (٧–٧): أثر تردد الضوء عند شدة معينة في الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.

ومن الملاحظات المهمة الأخرى في الظاهرة الكهرضوئية أن الإلكترونات تنبعث فور سقوط الضوء على المهبط.

وأن الإلكترونات لا تنبعث من المهبط إذا كان تردّده أقل من قيمة معينة مهما بلغت شدّة الضوء الساقط عليه، **وأقل تردد للضوء يلزم لتحرير إلكترونات من سطح فلز** يسمى **تردّد العَتَبة** (Threshold Frequency)، ويرمز له بالرمز (**تد₀**)، ولكل فلز تردّد عتبة خاص أي أنه خاصية مميزة للفلز. فمثلًا تردد العتبة للصوديوم يساوي (٥,٥ × ١٠^١٤) هيرتز، فإذا كان تردد الضوء الساقط على الصوديوم أقل من هذه القيمة فإنه لن يتمكن من تحرير أي إلكترونات من الصوديوم.

(٧-٢-٢) تفسير الظاهرة الكهرضوئية

لفهم الظاهرة الكهرضوئية لجأ العلماء إلى محاولة تفسير النتائج التي رُصِدت من الظاهرة الكهروضوئية.

أوّلًا: تفسير الفيزياء الكلاسيكية

تفترض الفيزياء الكلاسيكية أن الضوء موجات كهرمغناطيسية تحمل طاقة، وأن هذه الطاقة تزداد بزيادة شدة الضوء، ولا تعتمد على تردد الضوء.

وفي ما يأتي مقارنة بين تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية وفق النموذج الموجي للضوء والنتائج التجريبية للظاهرة الكهرضوئية:

١) وفقًا للفيزياء الكلاسيكية فإن الإلكترونات تمتص الطاقة من الموجات الكهرمغناطيسية على نحو مستمر فمن المتوقع أن زيادة شدة الضوء الساقط تعني زيادة معدل امتصاص الإلكترونات للطاقة؛ ما يكسبها طاقة حركية أكبر، ولا علاقة بين تردد الضوء الساقط والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة. وهذا ما نقضته نتائج التجربة؛ إذ تبين أن الطاقة الحركية العظمى تعتمد على تردد الضوء الساقط ولا تعتمد على شدته.

٢) وفقًا للفيزياء الكلاسيكية من المتوقع أن يحتاج الإلكترون إلى بعض الوقت لامتصاص الطاقة الكافية وتجميعها ليتحرّر من الفلز، خاصة عند سقوط ضوء خافت (شدته قليلة). إلا أن التجربة أثبتت أن الإلكترونات تنبعث فور سقوط الضوء على الفلز.

٣) وفقًا للفيزياء الكلاسيكية فإن طاقة الضوء تعتمد على شدته؛ فمن المتوقع عند سقوط ضوء ذي شدة عالية على فلز ستتحرر إلكترونات، بغض النظر عن تردد الضوء الساقط عليه. وهذا لا يتفق مع التجربة إذ تبين أنه لا تتحرر إلكترونات من الفلز إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من تردد العتبة لهذا الفلز مهما بلغت شدة الضوء.

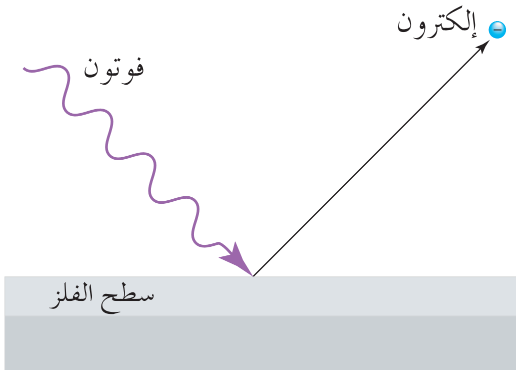
وبذا نلاحظ أن النتائج التجريبية للظاهرة الكهرضوئية تتعارض مع تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية وفق النموذج الموجي للضوء.

ثانيًا: تفسير فيزياء الكم

في عام ١٩٠٥ قدّم أينشتين (Einstein) تفسيرًا للظاهرة الكهرضوئية، مؤكدًا على مفهوم تكمية الطاقة الذي افترضه بلانك؛ إذ وسّع هذا المفهوم ليشمل جميع الموجات الكهرمغناطيسية.

فافترض أينشتين أن طاقة الضوء تتركز في حزم (bundles) منفصلة، أي كمّات، سميت فيما بعد فوتونات (photons)، كل فوتون يحمل طاقة مقدارها (هـ ت$_{د}$).

وعند سقوط الضوء على سطح فلز، فإن الفوتون الواحد يعطي طاقته كاملة إلى إلكترون واحد فقط، فيتحرر من ارتباطه بذرات الفلز بجزء من هذه الطاقة، وينطلق بما تبقى على صورة طاقة حركية عظمى، انظر الشكل (٧-٨)، أي أن:



الشكل (٧-٨): آلية انبعاث الإلكترون من سطح الفلز.

$$\text{هـ ت}_{\text{د}} = \Phi + \text{ط}_{\text{ح عظمى}} \quad \text{..........} \quad (٧-٣)$$

حيث (هـ ت$_{د}$): طاقة الفوتون الواحد، و(Φ): **أقل طاقة يمتلكها فوتون الضوء تلزم لتحرير إلكترون من سطح الفلز دون إكسابه طاقة حركية**، ويطلق عليها اسم **اقتران الشغل** للفلز (Work Function).

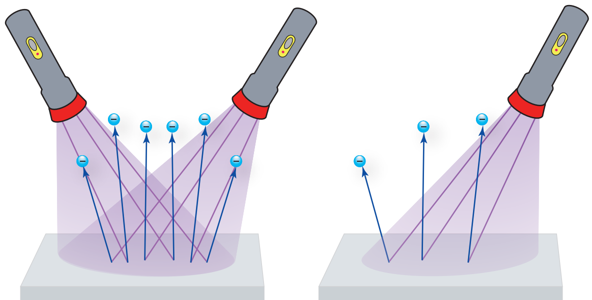
والفوتون الذي تكون طاقته مساوية اقتران الشغل للفلز يحرر إلكترون من السطح ولا يكسبه طاقة حركية، فيكون تردده مساويًا تردد العتبة، أي أن:

$$\Phi = \text{هـ ت}_{\text{د}٠} \quad \text{..........} \quad (٧-٤)$$

وتسمى العلاقة (٧-٣) معادلة أينشتين الكهرضوئية، إذ عن طريقها فسر أينشتين ما عجزت عنه الفيزياء الكلاسيكية، كما يأتي:

١) زيادة شدة الضوء الساقط على سطح فلز، مع بقاء تردده ثابتًا، تعني أن عدد الفوتونات الساقطة في الثانية على وحدة المساحة يزداد، وحيث إن كل إلكترون يتحرر يمتص فوتونًا واحدا فقط، فإن عدد الإلكترونات الضوئية المتحررة في الثانية يزداد كما في الشكل (٧-٩) فيزداد تبعًا لذلك

التيار الكهرضوئي ويزداد تيار الإشباع. إلا أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لا تتغير؛ لأن تردد الضوء الساقط (تد) لم يتغير، بسبب عدم تغير جهد القطع (جـق) في العلاقة (٧–٢).



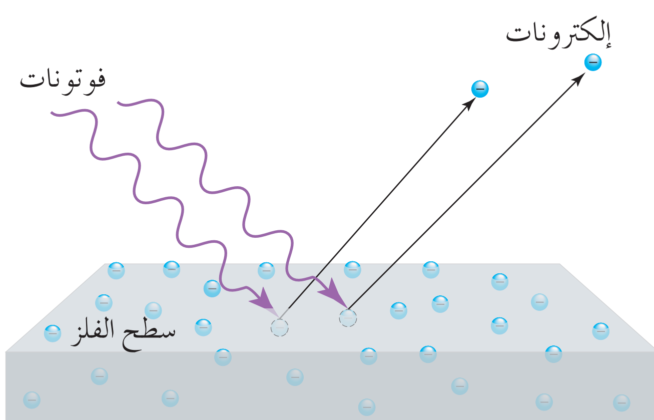
الشكل (٧–٩): علاقة عدد الإلكترونات الضوئية بشدة الضوء.

أما زيادة تردد الضوء الساقط على سطح الفلز مع بقاء شدته ثابتة تعني أن طاقة الفوتون الواحد تزداد ($ط_{فوتون}$ = هـ تد)، أي أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية تزداد، فيزداد جهد القطع، إلا أن العدد الكلي للإلكترونات المتحررة لا يتغير، فلا يتغير تيار الإشباع؛ لأن عدد الفوتونات لم يتغير.

٢ فسر أينشتين الانبعاث الفوري للإلكترونات الضوئية بأنه إذا كانت طاقة الفوتون تساوي اقتران الشغل للفلز ($ط_{الفوتون} = \Phi$) فإن الإلكترون يتحرر فقط، وإذا كانت طاقة الفوتون أكبر من اقتران الشغل للفلز ($ط_{الفوتون} > \Phi$) فإن الإلكترون يتحرر وينبعث ممتلكًا طاقة حركية فور سقوط الفوتون، وإلا فإنه سيبقى مرتبطًا بالفلز مهما كان عدد الفوتونات الساقطة عليه، أي؛ مهما بلغت شدة الضوء.

٢ حسب معادلة أينشتين فإن أقل طاقة يمتلكها فوتون تلزم لتحرير إلكترون من سطح فلز، يجب أن تساوي اقتران الشغل للفلز؛ لذا وحسب العلاقة (٧–٤)، لن يتحرر إلكترونات من سطح الفلز إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من تردد العتبة للفلز.

وفسر أينشتين انبعاث الإلكترونات الضوئية بسرعات مختلفة من سطح الفلز، مستندًا إلى أن معظم حجم الذرة فراغ، وأن سطح الفلز ينتهي على عمق مئات من الذرات، لذا تتفاوت ذرات السطح في العمق داخل السطح، انظر الشكل (٧–١٠)، وعند سقوط الضوء على سطح الفلز فإن بعض



الشكل (٧–١٠): اختلاف الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية تبعًا للعمق الذي تنبعث منه.

الفوتونات يصطدم بذرات السطح الخارجية، وبعضها الآخر يصل إلى الذرات الأعمق داخل السطح، وحيث إن الفوتونات تحمل المقدار نفسه من الطاقة (هـ تد) عند تردد معين للضوء، واقتران الشغل متساوٍ لذرات السطح جميعها ، فإن الإلكترونات المتحررة من ذرات السطح الخارجية جميعها تتحرر ممتلكة الطاقة الحركية نفسها (طح عظمى) حسب العلاقة (٧-٣)، أما الإلكترونات الأخرى التي تتحرر من داخل السطح فإنها تصطدم بالذرات التي تقع في طريق خروجها فاقدة جزءًا من طاقتها الحركية، ويعتمد الجزء المفقود من الطاقة الحركية على العمق الذي تتحرر منه الإلكترونات، لذا تتفاوت الإلكترونات الضوئية في سرعة انبعاثها من سطح الفلز، والسرعة التي تُحدَّد تجريبيًا هي فقط السرعة العظمى ($ع_{عظمى}$)، عن طريق قياس جهد القطع، كما تقدّم في تجربة لينارد.

مثال (٧-٣)

يبين الجدول (٧-١) قيم اقتران الشغل لبعض العناصر بوحدة إلكترون فولت، مستعينًا بالجدول، احسب تردد العتبة للحديد، ثم احسب طول موجة العتبة.

الجدول (٧-١): اقتران الشغل لبعض العناصر.

Metal	(in eV)
Na	٢,٢٨
Al	٤,٠٨
Cu	٤,٧٠
Zn	٤,٣١
Ag	٤,٧٣
Pt	٦,٣٥
Pb	٤,١٤
Fe	٤,٥٠

الحل:

بما أن اقتران الشغل للحديد يساوي (٤,٥) إلكترون فولت، يجب تحويل وحدة الإلكترون فولت إلى وحدة جول:

$$\Phi \quad = \quad ٤,٥ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩} = ٧,٢ \times ١٠^{-١٩} \text{ جول}$$

ومن العلاقة (٧-٥):

$$ت_{د} \quad = \quad \frac{\Phi}{هـ}$$

$$= \frac{٧,٢ \times ١٠^{-١٩}}{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}} = ١,١ \times ١٠^{١٥} \text{ هيرتز}$$

يمكن حساب الطول الموجي (λ) لضوء تردده ($ت_{د}$) من العلاقة الآتية: $ت_{د} = \frac{س}{\lambda}$

حيث (س): سرعة الضوء في الفراغ أو الهواء وتساوي ٣ × ١٠^٨ م/ث.

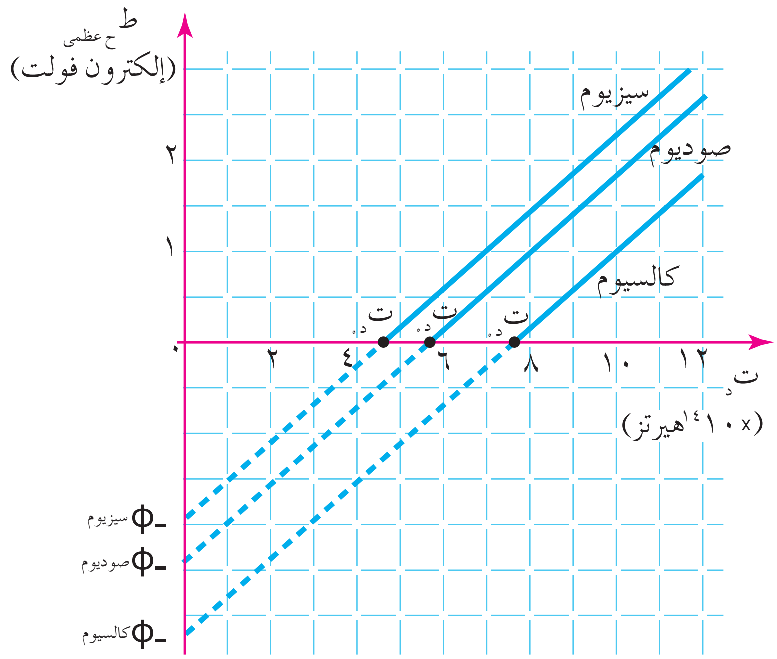
Φ

وعليه فإن:

$$\text{طول موجة العتبة } (\lambda) = \frac{\text{س}}{\text{ت}_{\text{د}}}.$$

$$\lambda = \frac{٣ \times ١٠^{-٨}}{١{,}١ \times ١٠^{-١٥}} = ٢٧٢ \times ١٠^{-٩} \text{ م} = ٢٧٢ \text{ نم}$$

لم يتوقف أينشتين عند تفسير العلاقة بين تردد الضوء والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات، بل تعداه إلى التنبؤ بنوع العلاقة بينهما، فتبعًا للعلاقة (٧-٣) نلاحظ أن العلاقة خطية. وقد أجرى ميليكان تجربة للتحقق من فرض أينشتين واستطاع إثبات صحته مستخدمًا فلزات أخرى مختلفة، فحصل على المنحنيات الموضحة في الشكل (٧-١١)، وكان الفضل لميليكان في قياس ثابت بلانك تجريبيًا.



الشكل (٧-١١): العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لثلاثة فلزات مختلفة.

نلاحظ أن الخطوط المستقيمة المرسومة متوازية، وهذا يعني أن ميلها متساوٍ، وهذا الميل مساوٍ لثابت بلانك (هـ)، ومن معادلة أينشتين يمكن التوصل إلى أن نقطة تقاطع أي من هذه الخطوط مع المحور السيني تمثل تردد العتبة للفلز ($\text{ت}_{\text{د}}$)، وأن نقطة تقاطع الخط نفسه مع محور الصادات تمثل اقتران الشغل للفلز (Φ)، كما في العلاقة (٧-٣) إذا وضعناها على الصورة الآتية:

$$\text{ط}_{\text{ح عظمى}} = \text{هـ ت}_{\text{د}} - \Phi$$

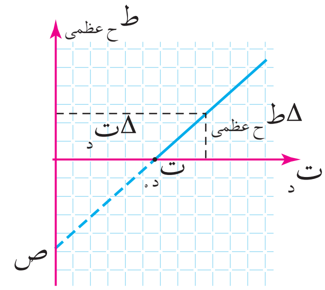
وهي على صورة العلاقة الرياضية الخطية ص = أس + ب، حيث (أ): الميل، و(ب): المقطع الصادي.

مثال (٧-٤)

مستعينًا بمعادلة أينشتين الكهرضوئية وبيانات الشكل (٧-١٢)، بيّن:

١ أن ميل الخط المستقيم يساوي ثابت بلانك.

٢ ما يمثله تقاطع الخط مع محور الطاقة الحركية العظمى.



الشكل (٧-١٢): العلاقة البيانية بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية، وتردد الضوء الساقط على سطح فلز.

الحل:

١ الميل $= \dfrac{ص_٢ - ص_١}{س_٢ - س_١}$

$= \dfrac{\Delta ط_{ح عظمى}}{\Delta ت_د}$

$= \dfrac{(ط_{ح عظمى} - ٠)}{(ت_د - ت_{د٠})}$

$ط_{ح عظمى} =$ الميل $(ت_د - ت_{د٠})$ ، وبالمقارنة مع معادلة (٧-٤)، فإن الميل = هـ

٢ من الشكل (٧-١٢)، وعلى فرض أن المنحنى يتقاطع مع محور $ط_{ح عظمى}$ عند النقطة ص:

الميل $=$ هـ $= \dfrac{ص_٢ - ص_١}{س_٢ - س_١}$

هـ $= \dfrac{٠ - ص}{ت_{د٠} - ٠}$

فإن ص = − هـ $ت_{د٠}$ ، وحسب العلاقة (٧-٤) فإن هذا المقدار يمثل $(- \Phi)$.

مثال (٧-٥)

سقط ضوء فوق بنفسجي طول موجته (٢٤٠) نم على مهبط خلية كهرضوئية، فانطلقت منه إلكترونات باتجاه المصعد مكونة تيارًا كهرضوئيًا، وعند تطبيق فرق جهد عكسي مقداره (١,٤) فولت انقطع التيار في الخلية. احسب ما يأتي:

١ طاقة فوتون الضوء الساقط .

٢ الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.

٣ اقتران الشغل لفلز المهبط.

الحل:

١ $ط_{فوتون} = هـ ت_د = \frac{هـ س}{\lambda}$

$= \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ٣ \times ١٠^{٨}}{٢٤٠ \times ١٠^{-٩}} = ٨,٢٩ \times ١٠^{-١٩}$ جول

٢ $ط_{ح عظمى} = ســ_e جـ_ق$

$= -١,٦ \times ١٠^{-١٩} \times -١,٤$

$= ٢,٢٤ \times ١٠^{-١٩}$ جول

٣ $ط_{ح عظمى} = هـ ت_د - \Phi \Leftarrow \Phi = هـ ت_د - ط_{ح عظمى}$

$\Phi = ٨,٢٩ \times ١٠^{-١٩} - ٢,٢٤ \times ١٠^{-١٩} = ٦,٠٥ \times ١٠^{-١٩}$ جول

مثال (٧-٦)

سقط ضوء على سطح صوديوم، فتحررت منه إلكترونات طاقتها الحركية العظمى (٠,٨٢) إلكترون فولت. أجب عما يأتي:

١ احسب تردد الضوء الساقط.

٢ إذا سقط ضوء طول موجته (٦٠٠) نم على سطح الفلز نفسه فهل تتحرر منه إلكترونات؟ وضح إجابتك.

الحل:

١ من الجدول (٧-١): $\Phi_{الصوديوم} = ٢,٢٨$ إلكترون فولت

ومن معادلة أينشتين الكهرضوئية:

$هـ ت_د = \Phi + ط_{ح عظمى}$

$هـ ت_د = ٢,٢٨ + ٠,٨٢ = ٣,١$ إلكترون فولت

$= ٣,١ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩}$

$هـ ت_د = ٤,٩٦ \times ١٠^{-١٩}$ جول

$ت_د = \frac{٤,٩٦ \times ١٠^{-١٩}}{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}$

$= ٧,٤٨ \times ١٠^{١٤}$ هيرتز

٢ نحسب أوّلًا تردد العتبة للصوديوم، ونقارنه بتردد الضوء الساقط، كما يأتي:

$$ت_{د_٥} = \frac{\Phi}{هـ}$$

$$= \frac{٢,٢٨ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩}}{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}$$

$= ٥,٥ \times ١٠^{١٤}$ هيرتز

$$ت_د = \frac{س}{\lambda} = \frac{٣ \times ١٠^{٨}}{٦٠٠ \times ١٠^{-٩}}$$

$= ٥ \times ١٠^{١٤}$ هيرتز

بما أن $ت_د < ت_{د_٥}$، فإنه لن تتحرر أي إلكترونات من سطح فلز الصوديوم.

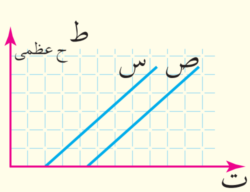
مراجعة (٧-٦)

١ إذا كان جهد القطع بين المهبط والمصعد في خلية كهرضوئية يساوي (١,٥) فولت، فما مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة في الخلية بوحدة الإلكترون فولت؟

٢ سقطت حزمتان من الضوء بترددين مختلفين ($ت_{د_١}$، $ت_{د_٢}$) على سطحين فلزيّين مختلفين (س، ص) على الترتيب، بحيث $\Phi_س < \Phi_ص$، فإذا كانت الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة منهما متساوية، فأي الحزمتين ترددها أكبر؟ وضح إجابتك.

٣ سقط ضوء تردده $١٠^{١٥}$ هيرتز على سطحين فلزيّين مختلفين (أ، ب)، فتحررت إلكترونات ضوئية من السطح (أ) بدون طاقة حركية بينما لم تتحرر من السطح (ب) أي إلكترونات. ناقش هذه النتائج مستندًا إلى معادلة أينشتين الكهرضوئية، ثمّ بين كيف تتغيّر النتيجة المتعلقة بالسطح (أ) إذا سقط عليه ضوء طول موجته أقصر.

٤ يوضح الشكل (٧-١٣) العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط على فلزين مختلفين (س، ص) والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة. أجب عمّا يأتي:



الشكل (٧-١٣): سؤال (٤).

أ أي الفلزين (س، ص) طول موجة العتبة له أكبر؟ فسّر إجابتك.

ب إذا سقط ضوء له التردد نفسه على الفلزين، وانبعثت إلكترونات من كل منهما، فأي الفلزين تنبعث منه إلكترونات ممتلكة طاقة حركية أكبر؟ فسر إجابتك.

جـ فسر: يتساوى ميل المنحنيين الممثلين للفلزين.

٥ استخدمت الخلية الكهرضوئية في إجراء تجربة لقياس اقتران الشغل لفلز الكالسيوم، بإسقاط ضوء على سطح الفلز بأطوال موجية مختلفة، ثم تحديد فرق الجهد اللازم لقطع تيار الخلية في كل مرّة يتم فيها تغيير الطول الموجي (لون الضوء الساقط)، فتم الحصول على البيانات الآتية:

معتمدًا على البيانات الواردة في الجدول أجب عما يأتي:

λ (نم)	٢٥٣,٦	٣١٣,٢	٣٦٥,٠	٤٠٤,٧
$جـ_ق$ (فولت)	١,٩٥	٠,٩٨	٠,٥٠	٠,١٤

أ ارسم العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط (على محور السينات) وجهد القطع (على محور الصادات).

ب من الرسم البياني جد كلًّا من: ثابت بلانك، وتردد العتبة، واقتران الشغل لفلز الكالسيوم.

جـ قارن بين قيمة اقتران الشغل التي حصلت عليها وقيمة اقتران الشغل للكالسيوم من الجدول (٧-١).

٧-٣ ظاهرة كومتون
Compton Effect

تعامل أينشتين مع الضوء بوصفه سيلٌ من الجسيمات النقطية، لذا وتأكيدًا لتصوّراته هذه؛ أدخل أينشتين بعد عام من تفسيره للظاهرة الكهرضوئية مفهوم الزخم الخطي على الفوتونات؛ إذ افترض أن الفوتون الواحد الذي طاقته (هـ تد) يحمل زخمًا خطيًّا (خ) باتجاه حركته يعطى بالعلاقة الآتية:

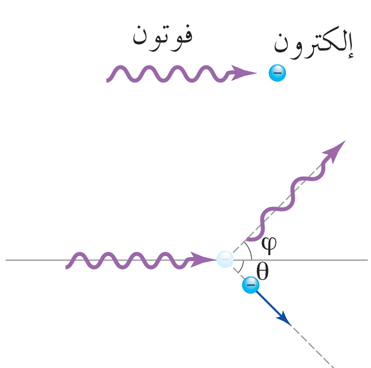
$$خ = \frac{هـ}{\lambda} \qquad (٧-٥)$$

لاحظ أن الزخم مفهوم يرتبط بالأجسام المادية.

وقد أثبتت التجارب التي أجراها كومتون Compton فيما بعد أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات المادية كما افترض أينشتين. وتعد ظاهرة كومتون من الظواهر التي لم تنجح قوانين الفيزياء الكلاسيكية في تفسيرها.

في عام ١٩٢٣م لاحظ كومتون أن سقوط أشعة سينية ذات تردد عالٍ على هدف من الغرافيت (الكربون) يؤدي إلى انطلاق إلكترون يمتلك طاقة حركية، وظهور أشعة سينية متشتتة ذات طاقة أقل، وطول موجي أكبر من الطول الموجي للأشعة السينية الساقطة على الهدف.

وقد فسر كومتون ذلك، بأن الأشعة السينية تتكون من فوتونات، كل منها يحمل طاقة وزخمًا خطيًّا، ولغايات دراسة تفاعل الفوتون مع إلكترون ذرة كربون، تعامل كومتون مع الإلكترون كما لو كان حرًّا ساكنًا، لأن طاقة فوتون الأشعة السينية عالية جدًّا إذا ما قورنت باقتران الشغل للكربون (٥ إلكترون فولت من الجدول (٧-١)). وعندما يصطدم الفوتون بالإلكترون يحدث بينهما تصادم تام المرونة، كالذي يحدث بين الأجسام، حيث تبقى طاقة النظام (فوتون- إلكترون) وزخمه محفوظين في هذا التصادم. وينتج عن ذلك فوتون جديد يتشتت باتجاه يصنع زاوية (φ) مع اتجاه سير الفوتون الساقط، بينما ينطلق الإلكترون بزاوية (θ)، كما في الشكل (٧-١٤).



الشكل (٧-١٤): ظاهرة كومتون.

وبما أن الطول الموجي للفوتون المتشتت أكبر منه للفوتون الساقط، فإن طاقته تكون أقل. وحيث إن الطاقة محفوظة في أثناء التصادم، فإن الطاقة الحركية التي اكتسبها الإلكترون بعد التصادم تساوي فرق طاقة الفوتونين الساقط والمتشتت، أي أن:

$$(ط_{ح})_{إلكترون} = هـ ت_{د} - هـ ت_{د}' \qquad ....(٧-٦)$$

حيث$(ط_{ح})$: الطاقة الحركية للإلكترون بعد التصادم، و$(هـ ت_{د})$: طاقة الفوتون الساقط، و$(هـ ت_{د}')$: طاقة الفوتون المتشتت.

وانطلاق الإلكترون ممتلكًا طاقة حركية بعد التصادم يدل على أنه قد اكتسب زخمًا خطيًّا باتجاه حركته؛ وقد برهن كومتون من قانون حفظ الزخم وعن طريق القياسات التجريبية أن الزخم الخطي للنظام محفوظ في التصادم، ما يؤكد فرض أينشتين بأن الفوتون يحمل زخمًا.

مثال (٧-٧)

في الشكل (٧-١٤)، وعلى فرض أن الإلكترون ساكن قبل التصادم، إذا كان طول موجة الفوتون الساقط (٠,٢٤) نم وطاقة حركة الإلكترون بعد التصادم (٢٦) إلكترون فولت، فاحسب ما يأتي:

١) الزخم الخطي للفوتون الساقط.

٢) طاقة الفوتون الساقط بوحدة إلكترون فولت.

٣) طول موجة الفوتون المتشتت.

الحل:

١) من العلاقة (٧-٦) ينتج:

$$خ = \frac{هـ}{\lambda}$$

$$= \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}{٠,٢٤ \times ١٠^{-٩}} \Leftarrow خ = ٢,٧٦ \times ١٠^{-٢٤} \text{ نيوتن.ث.}$$

٢) $$ط_{فوتون} = هـ ت_{د}$$

$$= \frac{هـ س}{\lambda}$$

$$= \frac{٦٫٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ٣ \times ١٠^{٨}}{٠٫٢٤ \times ١٠^{-٩}}$$

$= ٨٢٫٨٨ \times ١٠^{-١٧}$ جول $\Leftarrow$ $ط_{\text{الفوتون الساقط}} = ٥١٨٠$ إلكترون فولت.

قارن بين طاقة الفوتون مع اقتران الشغل للكربون.

٣) $(ط_{ح})_{\text{إلكترون}} = ط_{\text{فوتون الساقط}} - ط_{\text{فوتون المتشتت}}$

$٢٦ = ٥١٨٠ - ط_{\text{فوتون المتشتت}} \Leftarrow ط_{\text{فوتون المتشتت}} = ٥١٥٤$ إلكترون فولت.

٤) ومن العلاقة $\left(ط_{\text{فوتون}} = هـ\, ت_{د} = \frac{هـ\, س}{\lambda}\right)$ نحسب طول موجة الفوتون المتشتت:

$$ط_{\text{فوتون المتشتت}} = \frac{هـ\, س}{\lambda'} \Leftarrow = \frac{هـ\, س}{ط_{\text{فوتون المتشتت}}}$$

$$\lambda' = \frac{٦٫٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ٣ \times ١٠^{٨}}{٥١٥٤ \times ١٫٦ \times ١٠^{-١٩}} \Leftarrow \lambda' = ٢٤١ \times ١٠^{-٩}\ \text{م} = ٢٤١\ \text{نم}$$

مراجعة (٧-١)

١) صف ظاهرة كومتون.

٢) كيف فسر كومتون ظهور الأشعة السينية المتشتتة عندما يحدث تصادم فوتون مع إلكترون حر ساكن؟

٣) قارن بين الفوتون الساقط والفوتون المتشتت في ظاهرة كومتون من حيث: الطاقة، الزخم الخطي، التردد، الطول الموجي، السرعة.