المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم
إدارة المناهج والكتب المدرسية

الفيزياء

الصف الثاني عشر

للفرعين
العلمي والصناعي

الفيزياء
الصف الثاني عشر
للفرعين العلمي والصناعي
١٤٤٠هـ / ٢٠١٩م

ISBN 978-9957-84-774-6

المطابع المركزية

المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم
إدارة المناهج والكتب المدرسية

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 ٤/ ٢٠١٧، تاريخ ٢٠١٧/١/١٧م، بدءًا من العام الدراسي ٢٠١٧ / ٢٠١٨م.

الحقوق جميعها محفوظة لوزارة التربية والتعليم

ص . ب (١٩٣٠) عمّان – الأردن

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(٢٠١٧/٣/١٥٧٢)
ISBN: 978 - 9957 - 84 - 774 - 6

أشرف على تأليف هذا الكتاب كل من:

أ.دمعروف خليل عبدالله (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: د. عبد الرحمن سليمان أبو صعيليك

دقق الطباعة وراجعها : شفاء طاهر عباس

الطبعة الأولى — **١٤٣٨ هـ/ ٢٠١٧ م**
أعيدت طباعته — **٢٠١٨ – ٢٠١٩ م**

المحتويـات

الموضوع | الصفحة

المقدمة ٥

الفصل الدراسي الأول

الوحدة الأولى: الكهرباء

الفصل الأول: المجال الكهربائي ٦

الفصل الثاني: الجهد الكهربائي ٣٠

الفصل الثالث: المواسعة الكهربائية ٥٨

الفصل الرابع: التيار الكهربائي ودارات التيار المباشر ٨٠

الفصل الدراسي الثاني

الوحدة الثانية: المغناطيسية

الفصل الخامس: المجال المغناطيسي ١٢٤

الفصل السادس: الحث الكهرمغناطيسي ١٦٦

الوحدة الثالثة: الفيزياء الحديثة

الفصل السابع: مقدمة إلى فيزياء الكم ١٩٦

الفصل الثامن: الفيزياء النووية ٢٣٨

الملاحق ٢٧٣

المراجع ٢٧٨

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 حسابية 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 على أربعة فصول هي المجال الكهربائي، والجهد الكهربائي، والمواسعة الكهربائية، والتيار الكهربائي ودارات التيار المباشر، وتحتوي الوحدة الثانية على فصلي المجال المغناطيسي، والحث الكهرمغناطيسي، أما الوحدة الثالثة فتحتوي على فصلي مقدمة إلى فيزياء الكم، والفيزياء النووية. وجاء في نهاية الكتاب بعض الملاحق التي تفيد الطلبة في عملية التعلّم.

ولأن عملية تطوير المناهج والكتب المدرسية عملية مستمرة؛ فنرجو زملاءنا المعلمين وأولياء الأمور تزويدنا بأية ملحوظات تغني الكتاب وتسهم في تحسينه، بما يلبّي حاجات الطلبة وطموحات المجتمع الأردني.

الفصل الدراسي الأول

الفصل الأول

المجال الكهربائي

Electric Field

في هذا الفصل

(١-١)
القوة الكهربائية والمجال الكهربائي.

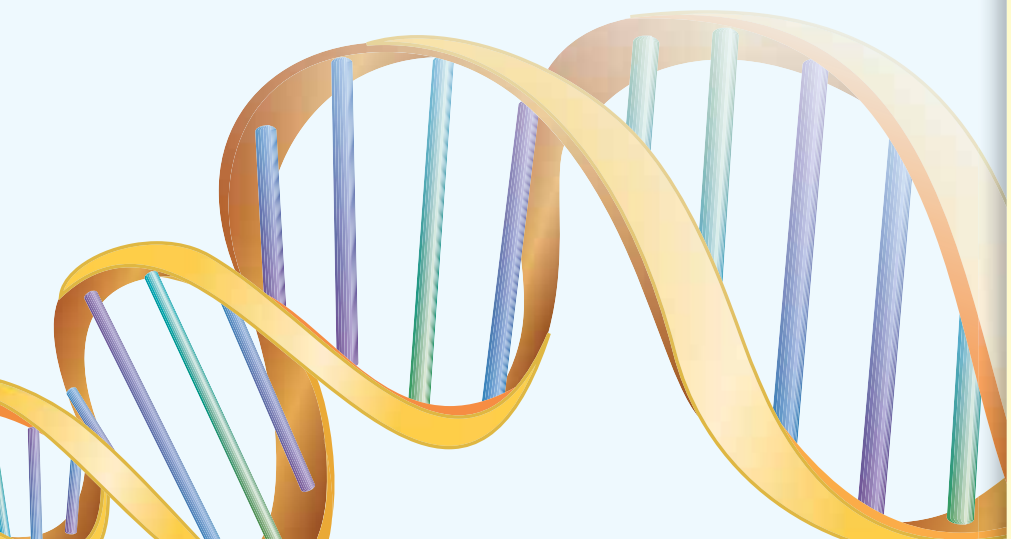
(١-٢)
المجال الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية.

(١-٣)
المجال الكهربائي المنتظم.

(١-٤)
حماية الأجهزة الإلكترونية من المجالات الكهربائية الخارجية.

يعود تاريخ اكتشاف الكهرباء السكونية إلى القرن السادس قبل الميلاد على يد الفيلسوف طاليس. وعبر التاريخ درس العديد من العلماء الظواهر الكهربائية المرتبطة بالشحنات الساكنة. وفي هذا الفصل سنبدأ دراستنا لعلم الكهرباء السكونية بدراسة المجال 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 حماية الأجهزة الإلكترونية من المجالات الكهربائية الخارجية.

١-١ القوة الكهربائية والمجال الكهربائي
Electric Force and Electric Field

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:

$$ش = ن\, ش_e \quad ....\quad (١-١)$$

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

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

تنشأ بين الأجسام المشحونة قوى كهربائية تكون تنافرًا أو تجاذبًا، وقد تمكن العالم كولوم من تحديد العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة الكهربائية المتبادلة بين شحنتين نقطيتين؛ حيث توصّل إلى أن مقدار القوة الكهربائية ($ق_ك$) يتناسب طرديًا مع مقدار كل من الشحنتين النقطيتين ($ش_١$، $ش_٢$) وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما، وتعتمد القوة الكهربائية أيضًا على طبيعة الوسط الذي توجد فيه الشحنات. ويُعبّر عن مقدار القوة الكهربائية بالعلاقة الرياضية الآتية والتي تعرف **بقانون كولوم**:

$$ق_ك = \frac{أ\, ش_١\, ش_٢}{ف^٢} \quad ....\quad (١-٢)$$

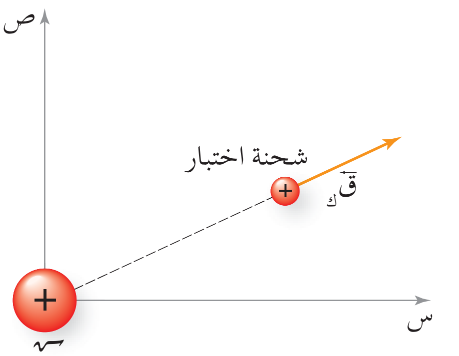
حيث (ف): المسافة بين الشحنتين النقطيتين، و(أ): ثابت كولوم، ويعتمد فقط على طبيعة الوسط الذي توجد فيه الشحنات، ويُعَبَّر عن هذا الثابت بالمقدار ($\frac{١}{٤\pi\varepsilon}$)؛ حيث (ε): السماحية الكهربائية للوسط، فإذا كان الوسط فراغًا أو هواءً فإنه يُعَبَّر عن السماحية الكهربائية بالرمز ($\varepsilon_٠$) وتساوي ($٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢}$) كولوم^٢/ نيوتن.م^٢. وعليه فإن قيمة الثابت ($\frac{١}{٤\pi\varepsilon_٠} = ٩ \times ١٠^{٩}$)نيوتن.م^٢/ كولوم^٢ تقريبًا، وستقتصر دراستنا على الشحنات الكهربائية التي توضع في الهواء.

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

$$ق_ك = \frac{أ\,شـ_١\,شـ_٢}{ف^٢} \Leftarrow [أ] = \frac{[ق][ف^٢]}{[شـ_١][شـ_٢]} = \frac{نيوتن.م^٢}{كولوم^٢}$$

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

تُعد القوة الكهربائية ذات تأثير عن بعد، وقد تمكن العالم فارادي من تفسير تأثيرها بافتراض مفهوم المجال الكهربائي، إذ يُعد المجال الكهربائي خاصية للحيز المحيط بالشحنة الكهربائية (شـ) يظهر تأثيره على شكل قوة كهربائية تؤثر في شحنة أخرى (شـ.) توضع في هذا الحيز، لذلك تصنف القوة الكهربائية بأنها قوة مجال مثل قوة الجاذبية الأرضية والقوة المغناطيسية.



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

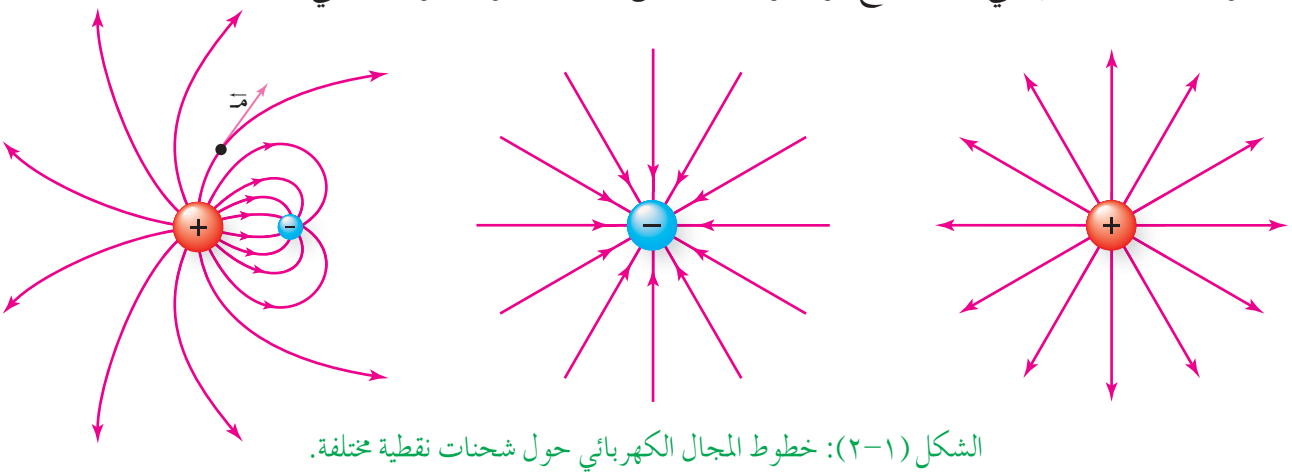
وتستخدم في الكشف عن المجال الكهربائي شحنة نقطية صغيرة موجبة تسمى شحنة الاختبار، فإذا وضعت شحنة اختبار عند نقطة ضمن مجال كهربائي فإنها تتأثر بقوة كهربائية، انظر الشكل (١-١)، ويكون مقدار المجال الكهربائي عند النقطة مساويًا مقدار القوة الكهربائية مقسومًا على مقدار شحنة الاختبار.

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

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

والمجال الكهربائي كمية متجهة، يحدد اتجاهه عند نقطة باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة الاختبار الموجبة الموضوعة عند تلك النقطة. ومن المهم الانتباه إلى 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 ($ق_ك = م\,شـ.$)، وفي النظام العالمي للوحدات يقاس المجال الكهربائي بوحدة (نيوتن/ كولوم).

ولتعرّف المجال الكهربائي ووصفه مقدارًا واتجاهًا، فإنّه يُخطّط برسم خطوط وهمية تسمى خطوط المجال الكهربائي، إذ يمثل **خط المجال الكهربائي المسار الذي تسلكه شحنة الاختبار الموجبة حرة الحركة عند وضعها في المجال الكهربائي**. ويبين الشكل (١-٢) خطوط المجال الكهربائي حول شحنات نقطية مختلفة. لاحظ أن خطوط المجال الكهربائي 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 عموديًّا) 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، ويُحدَّد اتجاه المجال الكهربائي عند نقطة ما برسم مماس لخط المجال الكهربائي عند تلك النقطة كما في الشكل (١-٢).

مراجعة (١-١)

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

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

٣) بيّن كيف يمكن الإفادة من خطوط المجال الكهربائي في معرفة كل من:

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

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

أ) ما اتجاه المجال عند تلك النقطة؟

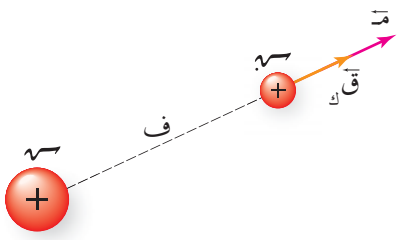
ب) إذا وضع إلكترون بدلًا من شحنة الاختبار، فهل يتغير مقدار المجال الكهربائي أو اتجاهه عند تلك النقطة؟ فسر إجابتك.

١-٢ المجال الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية

Electric field due to point charges

تستخدم العلاقة (مـ = $\frac{ق_ك}{س_.}$) 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) على بعد (ف) منها، فإذا وضعت شحنة نقطية (س.) عند تلك النقطة فإن المجال الكهربائي يؤثر فيها بقوة كهربائية ($ق_ك$). وبما أن الشحنة الكهربائية المولدة للمجال الكهربائي نقطية، وكذلك الشحنة الكهربائية المتأثرة (س.) فإنه طبقًا لقانون كولوم؛ العلاقة (١-٢)، تكون القوة الكهربائية المؤثرة في (س.):



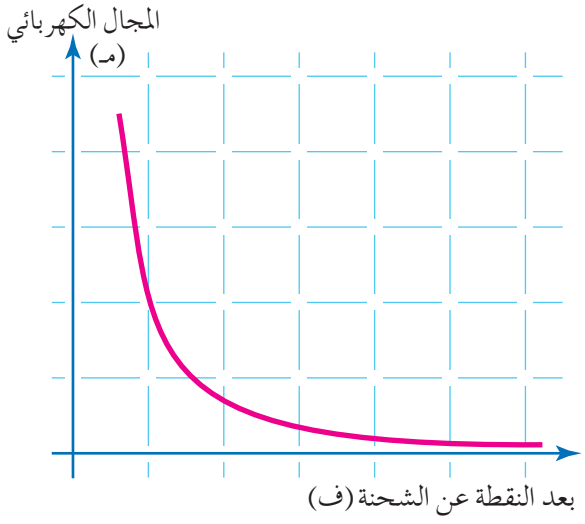
الشكل (١-٣): المجال الكهربائي عند نقطة في مجال شحنة نقطية.

$ق_ك = \frac{أ\ س\ س_.}{ف^٢}$ وبتعويض ($ق_ك$) في العلاقة (١-٣)؛ فإن:

$\overleftarrow{مـ} = \frac{أ\ س\ س_.}{ف^٢\ س_.}$ وباختصار(س.) فإن:

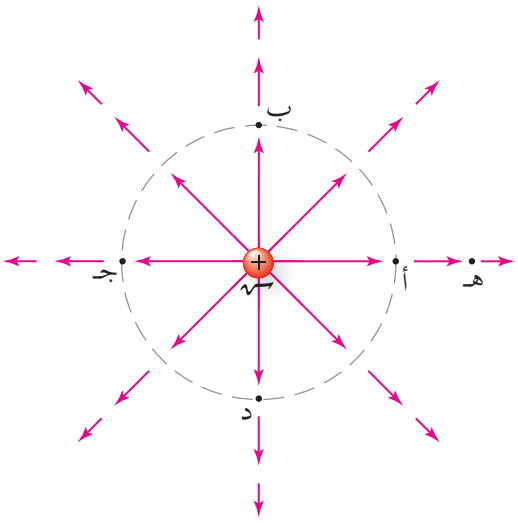
$$\overleftarrow{مـ} = \frac{أ\ س}{ف^٢} \quad \text{.....} \quad (١-٤)$$

تبين العلاقة الرياضية (١-٤) أن مقدار المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية عند نقطة في الهواء يتناسب طرديًّا مع مقدار الشحنة الكهربائية المولدة للمجال الكهربائي (المصدر)، وعكسيًّا مع مربع المسافة بين الشحنة الكهربائية والنقطة المراد حساب المجال عندها. ويبين الشكل (١-٤) التمثيل البياني للعلاقة بين المجال الكهربائي عند نقطة، وبعد هذه النقطة عن الشحنة.



الشكل (١-٤): منحنى (ف – مـ).

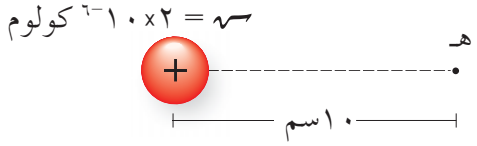
ويعد المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية **مجالًا غير منتظم**؛ أي أنه غير ثابت في المقدار والاتجاه. ففي الشكل (١-٥) يكون مقدار المجال الكهربائي عند النقاط (أ، ب، جـ، د) متساويًا؛ لأن لهذه النقاط البعد نفسه عن الشحنة النقطية (ﺳ)، إلا أن اتجاه المجال الكهربائي عند كل منها مختلف، وكذلك فإن مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) أقل من مقداره عند النقطة (أ) بالرغم من أن للمجال الكهربائي الاتجاه نفسه عند هاتين النقطتين.



الشكل (١-٥): المجال الكهربائي لشحنة نقطية موجبة.

مثال (١-١)

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



الشكل (١-٦/أ): مثال (١-١).

١) المجال الكهربائي مقدارًا واتجاهًا.

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

الحل:

١) نحسب مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) من العلاقة:

$$\text{مـ} = \frac{\text{أ ﺳ}}{\text{ف}^{٢}}$$

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

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

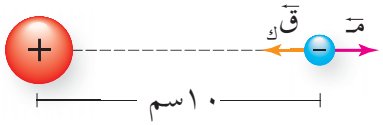
ونحدد اتجاه المجال الكهربائي باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة اختبار موجبة نفترض وجودها عند النقطة (هـ)، فيكون اتجاه المجال الكهربائي باتجاه المحور السيني الموجب.

٢ يحسب مقدار القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة توضع عند النقطة (هـ) من العلاقة:

ق$_{ك}$ = مـ سـ.

= ١٨ × ١٠^{٥} × ٢ × ١٠$^{-٩}$

= ٣٦ × ١٠$^{-٤}$ نيوتن.



الشكل (١-٦/ب): مثال (١-١) .

لاحظ أن مقدار الشحنة الكهربائية يعوض من غير الإشارة، وإذا كانت الشحنة المتأثرة سالبة، فإن اتجاه القوة الكهربائية يكون بعكس اتجاه المجال الكهربائي؛ أي باتجاه المحور السيني السالب، لاحظ الشكل (١-٦/ب).

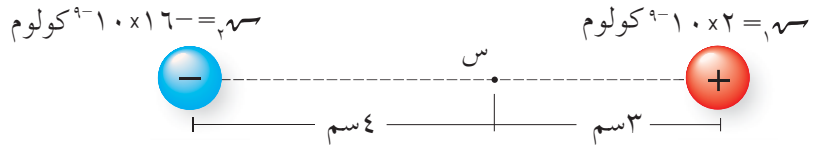
إذا كانت النقطة تقع في مجالات كهربائية عدة ناشئة عن مجموعة من الشحنات النقطية فكيف نحسب المجال الكهربائي عند تلك النقطة؟ في هذه الحالة يحسب المجال الكهربائي بإيجاد المجال الكهربائي المحصل الناشئ عن هذه الشحنات عند تلك النقطة. والأمثلة الآتية توضح ذلك.

مثال (١-٢)

يبين الشكل (١-٧/أ) شحنتين نقطيتين موضوعتين في الهواء. بالاعتماد على البيانات المثبتة في الشكل، 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/ أ): مثال (١-٢) .

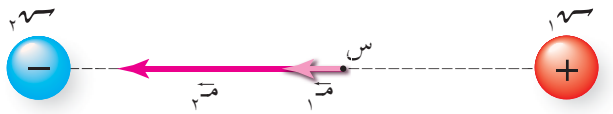
الحل:

١ نحسب مقدار المجالين الكهربائيين (مـ$_{١}$ ، مـ$_{٢}$) عند النقطة (س) الناشئين عن الشحنتين (سـ$_{١}$ ، سـ$_{٢}$) على الترتيب من العلاقة (١-٤):

$$مـ_{١} = \frac{أ\,سـ_{١}}{ف_{١}^{٢}} = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٢ \times ١٠^{-٩}}{(٣ \times ١٠^{-٢})^{٢}} \Leftarrow \overrightarrow{مـ_{١}} = ٢ \times ١٠^{٤}$$ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.

$مـ_٢ = \frac{أ\ شـ_٢}{ف_٢^٢} = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ١٦ \times ١٠^{-٩}}{(٤ \times ١٠^{-٢})^٢} \Leftarrow مـ_٢ = ٩ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.

بما أن المجالين الكهربائيين ($مـ_١$، $مـ_٢$) بالاتجاه نفسه كما في الشكل (١-٧/ب)، فإن المجال الكهربائي المحصل يساوي حاصل جمعهما:



الشكل (١-٧/ ب): مثال (١-٢) .

$مـ = مـ_١ + مـ_٢$

$= ٢ \times ١٠^{٤} + ٩ \times ١٠^{٤}$

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

٢ تتأثر الشحنة الكهربائية (٢) بيكوكولوم الموضوعة عند النقطة (س) في المجال الكهربائي المحصل (مـ)، بقوة كهربائية محصلة تحسب من العلاقة:

$ق_ك = مـ\ شـ$.

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

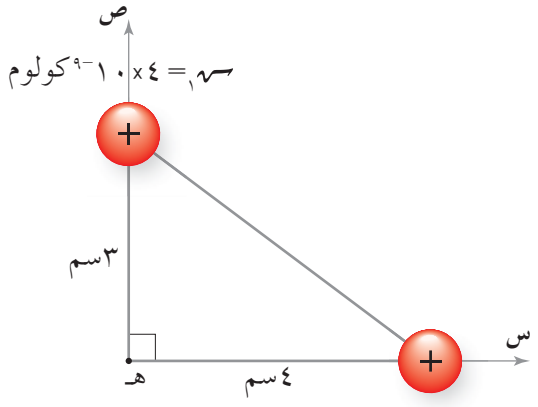
ويكون اتجاه القوة الكهربائية مع اتجاه المجال الكهربائي المحصل؛ أي باتجاه المحور السيني السالب؛ لأن الشحنة الكهربائية المتأثرة موجبة.

مثال (١-٣)

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

الحل:

نحسب مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) والناشئ عن كل من الشحنتين ($شـ_١$، $شـ_٢$) بتطبيق العلاقة (١-٤):



الشكل (١-٨/ أ): مثال (١-٣) .

$$م_{١} = \frac{أ\,ش_{١}}{ف_{١}^{٢}} = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٤ \times ١٠^{-٩}}{(٣ \times ١٠^{-٢})^{٢}}$$

$\overrightarrow{م_{١}}$ = ٤ × ١٠^{٤} نيوتن/كولوم، باتجاه المحور الصادي السالب.

$$م_{٢} = \frac{أ\,ش_{٢}}{ف_{٢}^{٢}} = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ١٦ \times ١٠^{-٩}}{(٤ \times ١٠^{-٢})^{٢}}$$

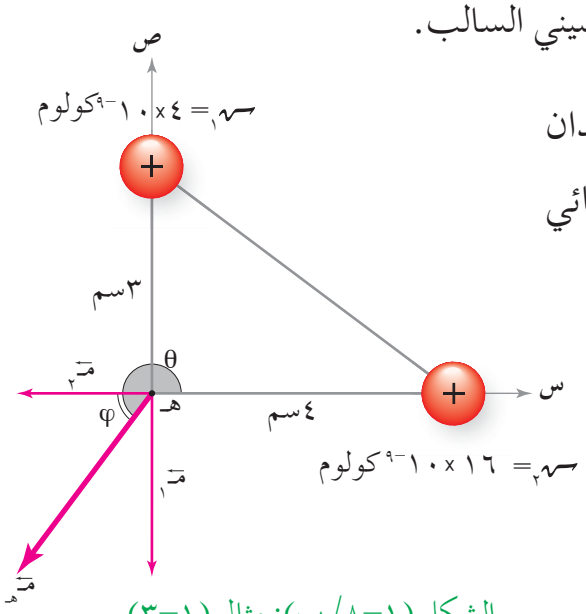
$\overrightarrow{م_{٢}}$ = ٩ × ١٠^{٤} نيوتن/كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.

وبما أن المجالين الكهربائيين ($\overrightarrow{م_{١}}$ ، $\overrightarrow{م_{٢}}$) متعامدان لاحظ الشكل (١–٨/ ب)، فإن المجال الكهربائي المحصل يحسب من قاعدة فيثاغورس:

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

$$= \sqrt{(٤ \times ١٠^{٤})^{٢} + (٩ \times ١٠^{٤})^{٢}}$$

≈ ٩,٨ × ١٠^{٤} نيوتن/كولوم.



الشكل (١–٨/ ب): مثال (١–٣) .

ويبين الشكل (١–٨/ب) أن المجال الكهربائي المحصل يصنع زاوية (φ) مع المحور السيني السالب، حيث ظا φ = $\frac{م_{١}}{م_{٢}} = \frac{٤}{٩}$ ، فتكون φ ≈ ٢٤°.

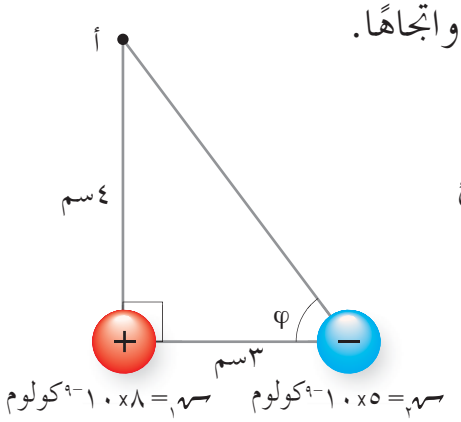
ويحدد اتجاه المجال الكهربائي المحصل بالزاوية المحصورة بين المحور السيني الموجب والمجال الكهربائي المحصل (θ)؛ بعكس دوران عقارب الساعة، وعليه تكون:

θ = (١٨٠ + ٢٤) = ٢٠٤°.

$\overrightarrow{م_{هـ}}$ = ٩,٨ × ١٠^{٤} نيوتن/كولوم، ٢٠٤°.

مثال (١-٤)

شحنتان نقطيتان موضوعتان في الهواء، كما هو مبين في الشكل (١-٩/أ). ادرس الشكل ثم جد المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (أ) مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (١-٩/أ): مثال (١-٤).

الحل:

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

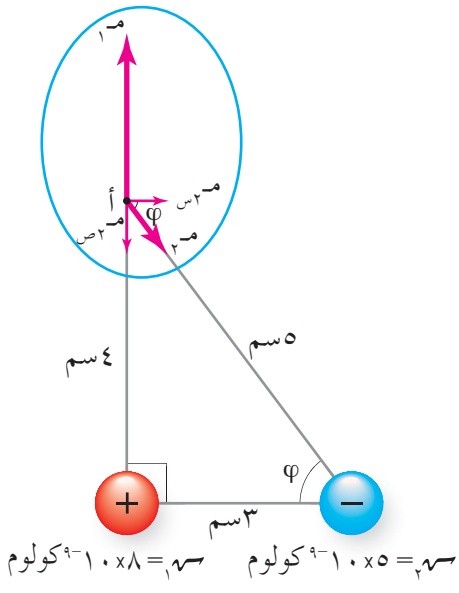
$$\text{مـ} = \frac{\text{ش}}{\text{ف}^2}$$

$$\text{مـ}_1 = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٨ \times ١٠^{-٩}}{١٦ \times ١٠^{-٤}}$$

$\vec{\text{مـ}}_1 = ٤,٥ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/ كولوم، باتجاه المحور الصادي الموجب.

$$\text{مـ}_2 = \frac{٩ \times ١٠^{٩} \times ٥ \times ١٠^{-٩}}{٢٥ \times ١٠^{-٤}}$$

$\vec{\text{مـ}}_2 = ١,٨ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/ كولوم، باتجاه يصنع زاوية (φ) مع المحور السيني الموجب. كما يبين الشكل (١-٩/ب) .



الشكل (١-٩/ب): مثال (١-٤).

ولإيجاد محصلة المجالين الكهربائيين، نحلل (مـ٢) إلى مركبتين، لاحظ الشكل (١-٩/ب):

$\text{مـ}_{٢س} = \text{مـ}_2 \text{ جتا}\varphi$

$= ١,٨ \times ١٠^{٤} \times \frac{٣}{٥} = ١,٠٨ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم.

$\text{مـ}_{٢ص} = \text{مـ}_2 \text{ جا}\varphi$

$= ١,٨ \times ١٠^{٤} \times \frac{٤}{٥} = ١,٤٤ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/كولوم.

نجد مجموع المركبات السينية:

$\text{مـ}_{س} = ١,٠٨ \times ١٠^{٤} \approx ١ \times ١٠^{٤}$ نيوتن/ كولوم، باتجاه المحور السيني الموجب.

نجد مجموع المركبات الصادية:

$$م_{ص} = م_{١} - م_{٢ص} = ٤,٥ \times ١٠^{٤} - ١,٤٤ \times ١٠^{٤}$$

$$م_{ص} = ٣,٠٦ \times ١٠^{٤} \approx ٣ \times ١٠^{٤} \text{ نيوتن/ كولوم، باتجاه المحور الصادي الموجب.}$$

ولإيجاد المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (أ):

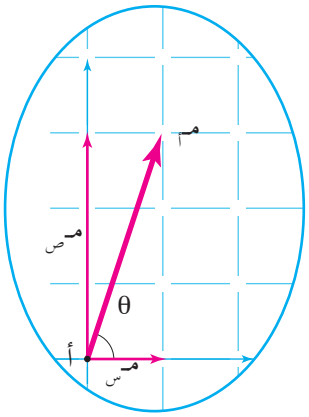
$$م_{أ} = \sqrt{(١ \times ١٠^{٤})^{٢} + (٣ \times ١٠^{٤})^{٢}} = \sqrt{١٠} \times ١٠^{٤} \text{ نيوتن/ كولوم.}$$

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

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

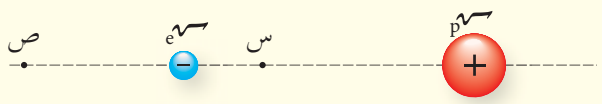
فتكون $\theta = ٧٢^{\circ}$، وعليه فإن:

$$\vec{م}_{أ} = \sqrt{١٠} \times ١٠^{٤} \text{ نيوتن/كولوم، } ٧٢^{\circ}.$$



الشكل (١-٩/جـ): مثال (١-٤).

١ يبين الشكل (١-١٠) إلكترونًا وبروتونًا موضوعين على المحور السيني. حدد اتجاه المجال الكهربائي المحصل عند النقطتين (س)، (ص).



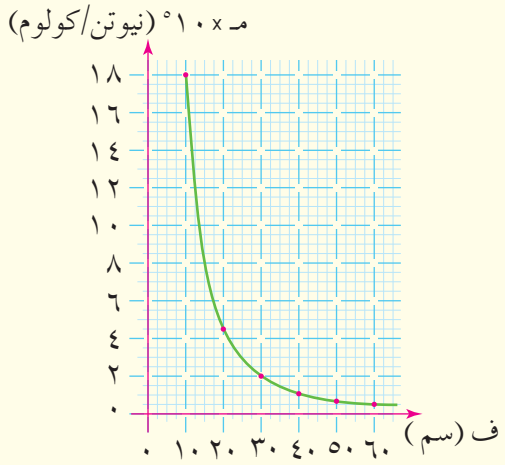
الشكل (١-١٠): سؤال (١).

٢ يبين الشكل (١-١١) منحنى 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.

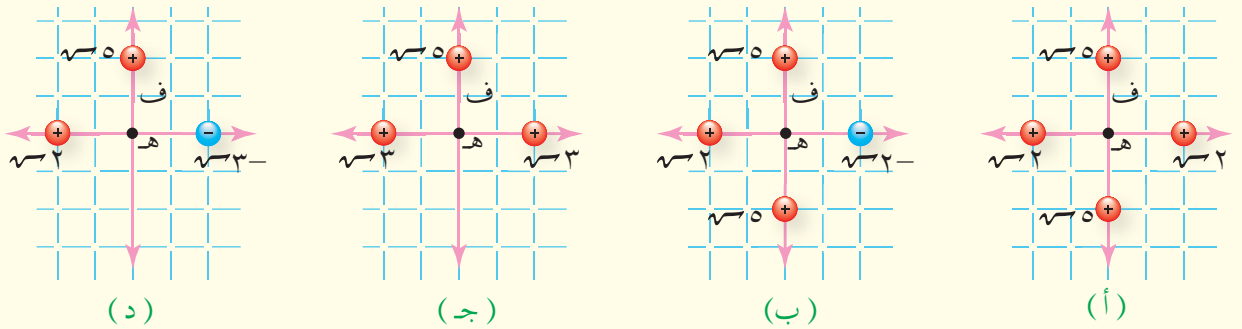
ب القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (١×١٠^{-٩}) كولوم توضع عند نقطة تبعد (٢٠) سم عن الشحنة.

جـ الشحنة الكهربائية المولدة للمجال.



الشكل (١-١١): سؤال (٢).

٣ يبين الشكل (١-١٢) توزيعات مختلفة من الشحنات النقطية، إذا كان (ف) يمثل بعد كل شحنة عن النقطة (هـ)، فجد المجال الكهربائي المحصل مقدارًا واتجاهًا عند النقطة (هـ) بدلالة كل من (ـــ، ف).



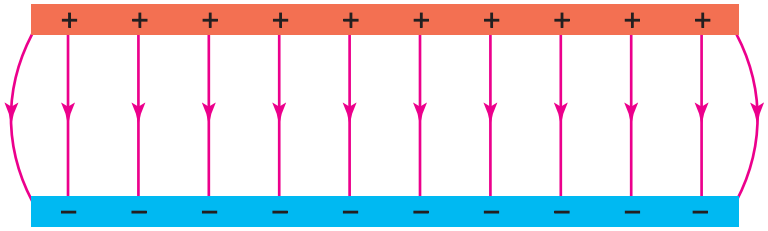
الشكل (١-١٢): سؤال (٣).

١-٣ المجال الكهربائي المنتظم
Uniform Electric Field

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

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

ويمثَّل المجال الكهربائي المنتظم بخطوط مستقيمة متوازية والبعد بينها متساوٍ، اتجاهها يمثل اتجاه المجال الكهربائي، وكثافتها تعبّر عن مقداره.



الشكل (١-١٣): المجال الكهربائي المنتظم.

لاحظ أن مصدر المجال الكهربائي في هذه الحالة 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).

يتناسب مقدار المجال الكهربائي المنتظم 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 المنتظم يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$م = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\circ}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١-٥)$$

عندما يوضع جسيم مشحون كتلته (ك) في مجال كهربائي منتظم فإنه يتأثر بقوة كهربائية ثابتة مقدارًا واتجاهًا. فإذا تحرك الجسيم تحت تأثير هذه القوة فإنه سيكتسب تسارعًا (ت) 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 $ق_{المحصلة}$. أي أن:

$$ق_{محصلة} = ك\ ت$$

$$ق_{ك} = ك\ ت$$

$$م_{ـ س ـ}. = ك\ ت$$

وبذلك فإن التسارع :

$$ت = \frac{م_{ـ س ـ}.}{ك} \quad \ldots\ldots (١-٦)$$

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

$$ع = ع_{ب} + ت\ ز \quad \ldots\ldots (١-٧)$$

$$\Delta س = ع_{ب}\ ز + \frac{١}{٢}\ ت\ ز^{٢} \quad \ldots\ldots (١-٨)$$

$$ع^{٢} = ع_{ب}^{٢} + ٢\ ت\ \Delta س \quad \ldots\ldots (١-٩)$$

حيث (ع): السرعة النهائية للجسيم، ($ع_{ب}$): 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.

إذا علمت أن ($ε_{.} = ٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢}$) كولوم^{٢}/ نيوتن.م^{٢}. فاحسب مقدار:

١ المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين.

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

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

الحل:

١ أوّلًا: نحسب الكثافة السطحية للشحنة بتطبيق العلاقة:

$$\sigma = \frac{\text{ش}}{\text{م}}$$

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

ثانيًا: نحسب المجال الكهربائي بتطبيق العلاقة:

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

$$= \frac{١٠ \times ١,٧٧^{-٧}}{١٠ \times ٨,٨٥^{-١٢}} \Leftarrow \text{مـ} = ٢ \times ١٠^{٤} \text{ نيوتن/ كولوم}.$$

٢ نحسب القوة الكهربائية المؤثرة في الشحنة الكهربائية بتطبيق العلاقة:

$$\text{ق}_{\text{ك}} = \text{مـ ش}.$$

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

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

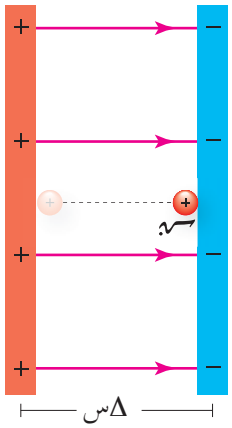
مثال (١-٦)

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(١-١٤)، وأصبحت سرعة البروتون ($١,٢ \times ١٠^{٥}$) م/ث بعد قطعه إزاحة Δس، إذا علمت أن كتلة البروتون ($١,٦٧ \times ١٠^{-٢٧}$) كغ، وشحنته ($١,٦ \times ١٠^{-١٩}$) كولوم فاحسب:

١ تسارع البروتون.

٢ الزمن الذي يحتاجه البروتون لكي يصل إلى الصفيحة السالبة.

٣ الإزاحة التي قطعها.



الشكل (١-١٤): مثال (١-٦).

الحل:

١ يحسب التسارع من العلاقة:

$$ت = \frac{م_{ب}}{ك}$$

$$= \frac{٥٠١ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩}}{١,٦٧ \times ١٠^{-٢٧}}$$

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

٢ يحسب الزمن من العلاقة:

$$ع = ع_{ب} + ت ز$$

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

$$ز = ٢,٥ \times ١٠^{-٦} \text{ ث}.$$

٣ يمكن حساب الإزاحة من العلاقة:

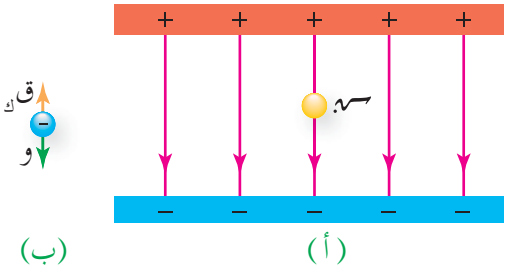
$$\Delta س = ع_{ب} ز + \frac{١}{٢} ت ز^{٢}$$

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

$\Delta س = ١٥ \times ١٠^{-٢}$ م، باتجاه المحور السيني الموجب.

مثال (١-٧)

يبين الشكل (١-١٥/أ) مجالًا كهربائيًا منتظمًا اتجاهه نحو المحور الصادي السالب، وضع فيه جسيم شحنته (٣) نانوكولوم وكتلته (٣×١٠^{-٥}) كغ، فاتزن. إذا علمت أن تسارع الجاذبية الأرضية (جـ = ١٠ م/ث^{٢}) فأجب عما يأتي:



الشكل (١-١٥): مثال (١-٧).

١ ما نوع شحنة الجسيم؟

٢ احسب مقدار المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين.

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

الحل:

١ بما أن الجسيم متزن، واتجاه الوزن نحو المحور الصادي السالب، فإن اتجاه القوة الكهربائية يجب أن يكون نحو المحور الصادي الموجب. انظر الشكل (١-١٥/ب)، وبما أن اتجاه القوة الكهربائية بعكس اتجاه المجال الكهربائي فإن شحنة الجسيم سالبة.

٢ بما أن الجسيم متزن، فإن:

$$ق_ك = و$$

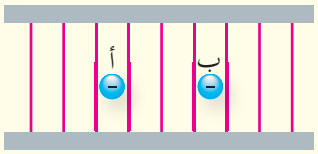
$$م_{ص} = ك\ جـ$$

$$م = \frac{ك\ جـ}{ص} = \frac{٣ \times ١٠^{-٥} \times ١٠}{٣ \times ١٠^{-٩}}$$

$$م = ١ \times ١٠^{٤}\ \text{نيوتن/كولوم}.$$

٣ لبقاء الجسيم متزنًا يجب الحفاظ على المجال الكهربائي مقدارًا واتجاهًا ($م = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\circ}}$)، وبما أن ($\sigma = \frac{ك}{أ}$) فإنه عندما تقل مساحة الصفيحتين إلى النصف يجب أن تقل الشحنة الكهربائية إلى النصف لكي تبقى (σ) ثابتة.

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



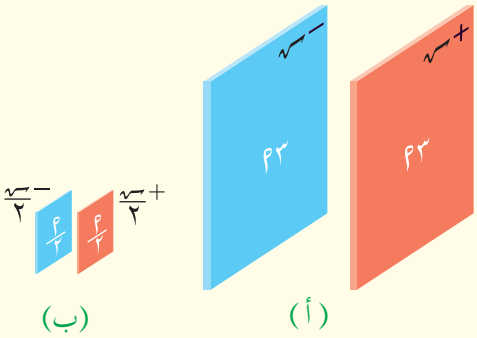
الشكل (١-١٦): سؤال (١).

أ حدد نوع الشحنة الكهربائية على الصفيحتين.

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

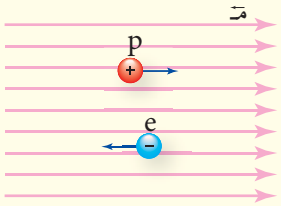
جـ إذا زادت الشحنة الكهربائية على الصفيحتين فهل يبقى الجسيم (أ) محافظًا على اتزانه؟ فسر ذلك.

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 (١-١٧): سؤال (٢).

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



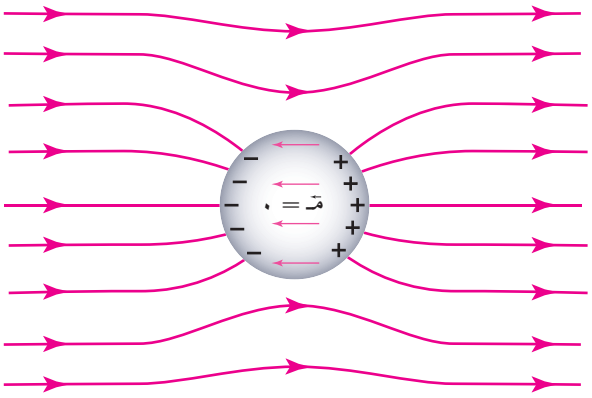
الشكل (١-١٨): سؤال (٣).

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

ب أيهما أكبر مقدارًا تسارع البروتون أم تسارع الإلكترون؟ فسر إجابتك.

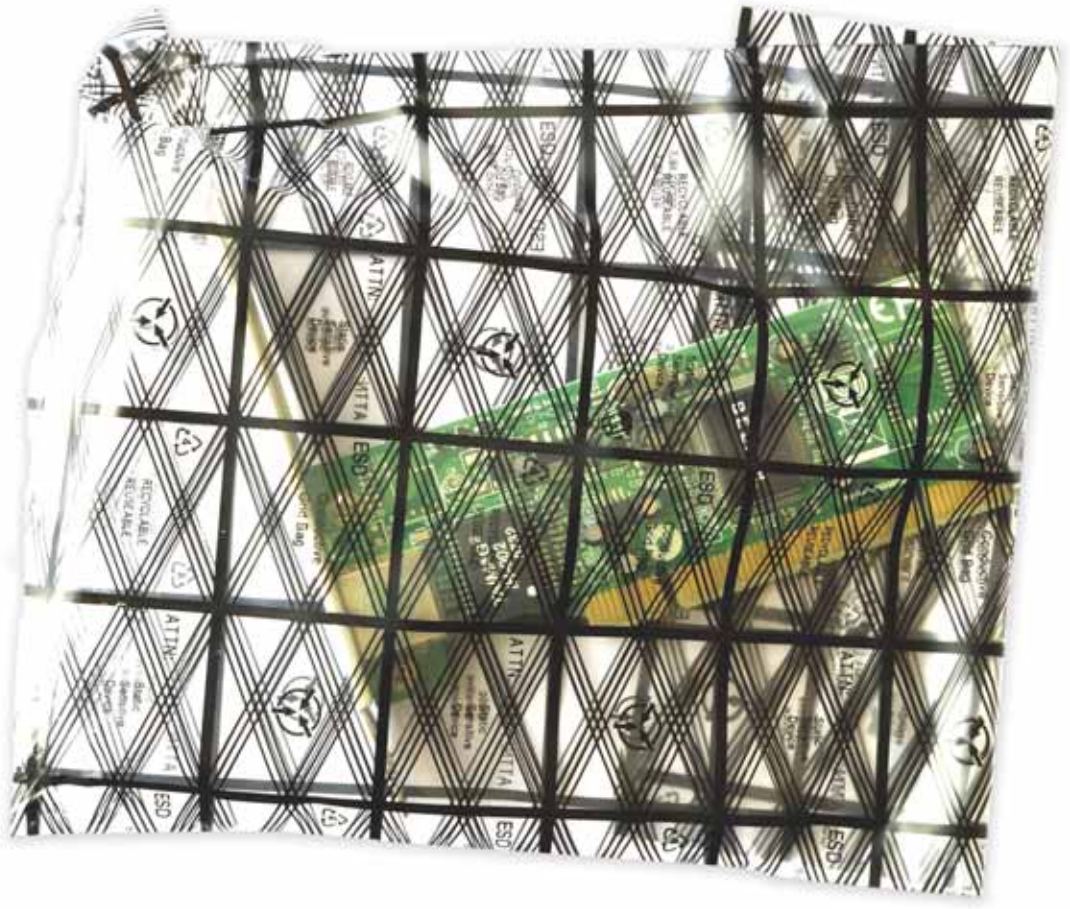
نعتمد في حياتنا على الكهرباء بشكل أساسي، وحيثما وجدت شحنات كهربائية توجد مجالات كهربائية. وقد تسبب هذه المجالات الكهربائية ضررًا للأجهزة الإلكترونية الحساسة، فكيف نحمي جهازًا ما من مجال كهربائي خارجي؟

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 ما سبق، فإن الموصلات تستخدم لتغليف الأجهزة الإلكترونية، وتشكل درعًا واقيًا لحمايتها من المجالات الكهربائية الخارجية، ويبين الشكل (١-٢٠) أكياسًا مصنوعة من مادة موصلة لحماية الأجهزة الإلكترونية.



الشكل (١-٢٠): أكياس مصنوعة من مادة موصلة لحماية الأجهزة الإلكترونية.

مراجعة (١-٤)

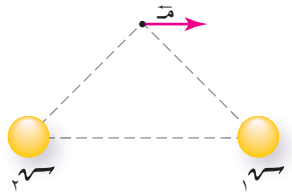
١ عند وضع هاتف داخل إناء فلزي كما في الشكل (١-٢١)، يلاحظ أنه لا يمكن الاتصال مع الهاتف في هذه الحالة. كيف تفسر ذلك؟ (يمكنك أن تجرب بنفسك)

الشكل (١-٢١): سؤال (١).

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

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

١ يبين الشكل (١-٢٢) اتجاه المجال الكهربائي المحصل عند نقطة تبعد عن الشحنتين ($ش_١$، $ش_٢$) المسافة نفسها. إذا علمت أن الشحنتين متساويتان في المقدار فإن:



الشكل (١-٢٢): سؤال (١) فقرة (١).

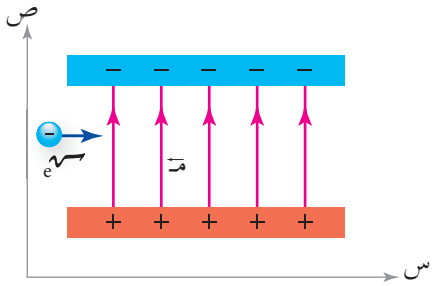
أ) $ش_١$ موجبة، $ش_٢$ موجبة.
ب) $ش_١$ موجبة، $ش_٢$ سالبة.
جـ) $ش_١$ سالبة، $ش_٢$ موجبة.
د) $ش_١$ سالبة، $ش_٢$ سالبة.

٢ يبين الشكل (١-٢٣) شحنة نقطية (ش) عند النقطة (أ) تولد حولها مجالًا كهربائيًّا. عندما وضعت شحنة ($-ش$) عند النقطة (ب) تأثرت بقوة كهربائية باتجاه المحور السيني الموجب. يكون (اتجاه المجال الكهربائي عند النقطة (ب)، ونوع الشحنة الكهربائية (ش)) على الترتيب:

الشكل (١-٢٣): سؤال (١) فقرة (٢).

أ) (+س، سالبة)
ب) (+س، موجبة)
جـ) (-س، سالبة)
د) (-س، موجبة)

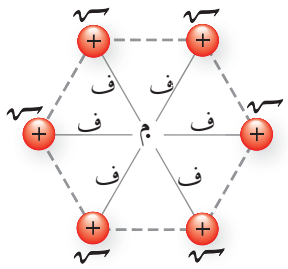
٣ عندما يدخل إلكترون متحركٌ بالاتجاه السيني الموجب إلى منطقة مجال كهربائي منتظم، كما يبين الشكل (١-٢٤)، فإن هذا الإلكترون يكتسب تسارعًا بالاتجاه:



الشكل (١-٢٤): سؤال (١) فقرة (٣).

أ) الصادي الموجب
ب) الصادي السالب
جـ) السيني الموجب
د) السيني السالب.

٤ وزعت شحنات نقطية مقدار كل منها ($+ش$) على رؤوس مضلع سداسي كما في الشكل (١-٢٥). إذا أزيلت شحنة نقطية واحدة فإن مقدار المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (م) يساوي:



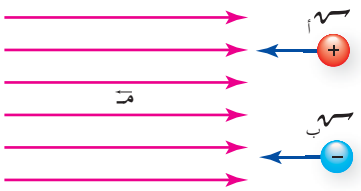
الشكل (١-٢٥): سؤال (١) فقرة (٤).

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

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

أ يقل إلى النصف
ب يتضاعف مرتين
جـ يقل إلى الربع
د يتضاعف أربع مرات.

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:

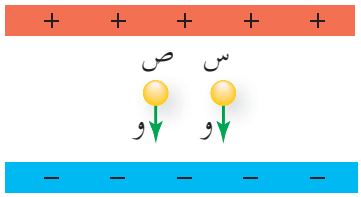


الشكل (١-٢٦): سؤال (٢).

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 ومتساويان في الوزن، وُضِعا ساكنين في مجال كهربائي منتظم كما يبين الشكل (١-٢٧)، ولوحظ أن الجسيم (س) بقي ساكنًا، بينما تحرك الجسيم (ص) باتجاه محور الصادات الموجب. أجب عما يأتي:

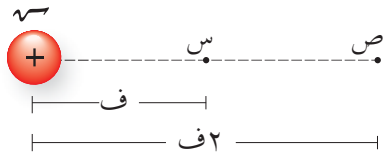


الشكل (١-٢٧): سؤال (٣).

أ ما نوع شحنة كل من الجسيمين؟

ب كيف تفسر اختلاف الحالة الحركية للجسمين (س) و (ص) بالرغم من أنهما 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:

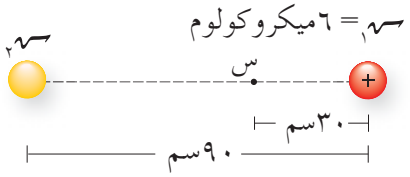


الشكل (١-٢٨): سؤال (٤).

أ المجال الكهربائي عند النقطة (س) مقدارًا واتجاهًا.

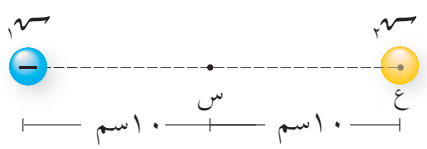
ب القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة نقطية مقدارها (-١×١٠^{-٦}) كولوم توضع عند النقطة (ص)، مقدارًا واتجاهًا.

٥ شحنتان نقطيتان ($ش_١$، $ش_٢$) موضوعتان في الهواء، والبعد بينهما (٩٠) سم، إذا علمت أن المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (س) يساوي صفرًا، ومعتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (١-٢٩) فجد مقدار الشحنة ($ش_٢$) ونوعها.



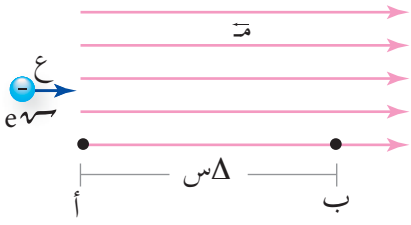
الشكل (١-٢٩): سؤال (٥).

٦ وضعت شحنة ($ش_١ = -٢ \times ١٠^{-٦}$) كولوم على بعد (١٠) سم من النقطة (س) كما في الشكل (١-٣٠). 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 ويكون اتجاهه نحو النقطة (ع).



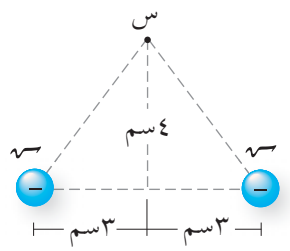
الشكل (١-٣٠): سؤال (٦).

٧ إلكترون يتحرك باتجاه المحور السيني الموجب بسرعة ($\frac{٨}{٣} \times ١٠^{٦}$) م/ث، أُدخل هذا الإلكترون مجالًا كهربائيًا منتظمًا مقداره (١×١٠^{٣}) نيوتن/كولوم، وبالاتجاه المبين في الشكل (١-٣١). إذا بدأ الإلكترون الحركة تحت تأثير المجال الكهربائي من النقطة (أ) وتوقف عند النقطة (ب) فاحسب الإزاحة التي قطعها.



الشكل (١-٣١): سؤال (٧).

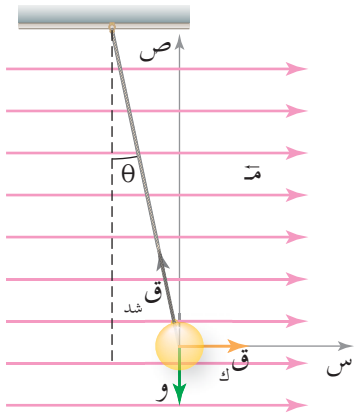
٨ شحنتان نقطيتان متماثلتان ($ش = -٥ \times ١٠^{-٦}$) كولوم، موضوعتان في الهواء. معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (١-٣٢)، احسب المجال الكهربائي عند النقطة (س) مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (١-٣٢): سؤال (٨).

٩ كرة صغيرة مشحونة شحنتها (ش)، ووزنها (و) علقت بخيط داخل مجال كهربائي منتظم، فاتزنت كما هو مبين في الشكل (١-٣٣)، أثبت أن مقدار المجال الكهربائي يعطى بالعلاقة:

$$م = \frac{و \ ظا \ \theta}{ش}$$



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؟ وما العلاقة بين الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي؟ وكيف نحسب فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي؟

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 إلى أكثر من مليون فولت.

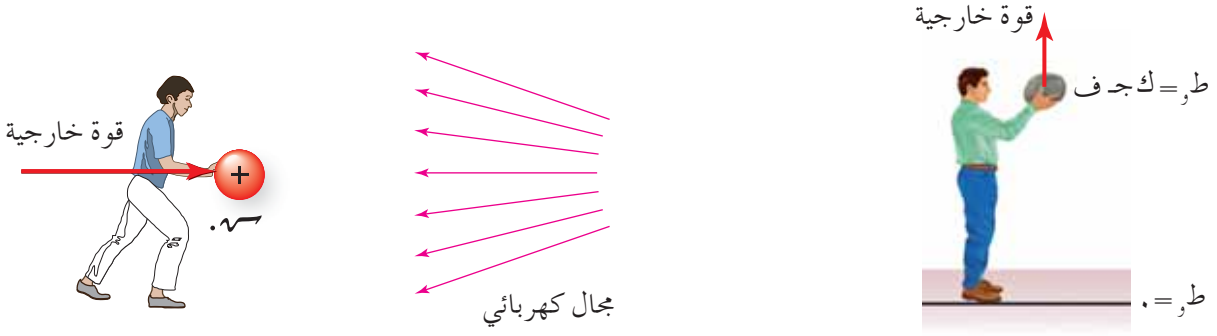
ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- 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 حسابية.
- تعرف سطح تساوي الجهد، وتذكر خصائصه.
- تصف سطح تساوي الجهد لموصلات مختلفة مشحونة.
- تصف الجهد الكهربائي لموصل مشحون.

١-٢ الجهد الكهربائي
Electric Potential

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

في مجال الجاذبية الأرضية، لكي 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 سطح الأرض يمثل الموقع المرجعيّ.



(أ): طاقة الوضع في مجال الجاذبية الأرضية. (ب): طاقة الوضع الكهربائية في المجال الكهربائي.

الشكل (٢-١): طاقة الوضع.

في المجال الكهربائي اصطلح على أن اللانهاية (∞) هي النقطة المرجعية التي تكون طاقة الوضع عندها صفرًا؛ ($ط_{\infty} = ٠$). ولبناء النظام المبين في الشكل (٢-١/ب)، نفترض أن الشحنة الكهربائية (ـــ٨.) في اللانهاية، ولنقلها إلى نقطة ضمن المجال الكهربائي بسرعة ثابتة نؤثر فيها بقوة خارجية تساوي القوة الكهربائية في المقدار وتعاكسها في الاتجاه، وعندئذ تبذل القوة الخارجية شغلًا يختزن في الشحنة الكهربائية على شكل طاقة وضع كهربائية (ط)، حيث تبقى طاقتها الحركية ثابتة ($\Delta ط_{ح} = ٠$).

ويمثل مقدار طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة موضوعة عند نقطة في مجال كهربائي **الجهدَ الكهربائيَّ** عند تلك النقطة، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{جـ} = \frac{\text{ط}_\text{و}}{\text{ش}_\text{.}} \quad \ldots\ldots (٢-١)$$

والجهد الكهربائي كمية قياسية، يقاس في النظام العالمي للوحدات 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، فإنها ستختزن طاقة وضع كهربائية مقدارها (١) جول.** ويتخذ الجهد الكهربائي عند نقطة ما قيمة محددة، ولا يعتمد على (ش.). فإذا تغيرت (ش.) فإن طاقة الوضع (ط$_\text{و}$) تتغير بحيث تبقى النسبة ($\frac{\text{ط}_\text{و}}{\text{ش}_\text{.}}$) 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.

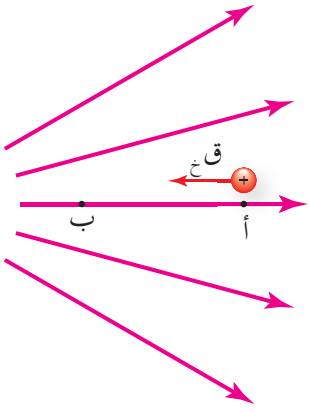
ويعرف **فرق الجهد الكهربائي** **بين نقطتين بأنه التغير في طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة عند انتقالها بين هاتين النقطتين في مجال كهربائي**، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\Delta\text{جـ} = \frac{\Delta\text{ط}_\text{و}}{\text{ش}_\text{.}} \quad \ldots\ldots (٢-٢)$$

حيث (Δجـ = جـ$_{\text{نهائية}}$ − جـ$_{\text{ابتدائية}}$)، و(جـ$_{\text{نهائية}}$): جهد النقطة النهائية التي نُقلت إليها الشحنة، و(جـ$_{\text{ابتدائية}}$): جهد النقطة الابتدائية التي نُقلت منها الشحنة.

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

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



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

وبالرجوع إلى العلاقة (٢-٢) فإن:

$$\text{جـ}_{\text{نهائية}} - \text{جـ}_{\text{ابتدائية}} = \frac{\Delta\text{ط}_\text{و}}{\text{ش}_\text{.}} = \frac{(\text{ش}_\text{خ})}{\text{ش}_\text{.}}$$

وعليه يمكن التعبير عن شغل القوة الخارجية بالعلاقة الرياضية الآتية:

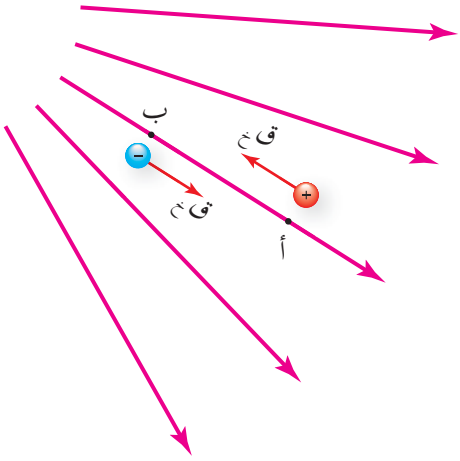
$$\text{ش}_{\text{خ}} = \text{ـــ}\cdot(\text{جـ}_{\text{نهائية}} - \text{جـ}_{\text{ابتدائية}}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٢-٣)$$

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)، إذا بذلت القوة الخارجية شغلًا (١٤×١٠^{-٩}) جول فاحسب:

١ فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين ب وأ ($\text{جـ}_{\text{ب}} - \text{جـ}_{\text{أ}}$)

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 ($\text{جـ}_{\text{ب}} - \text{جـ}_{\text{أ}}$) نطبق العلاقة (٢-٣)، وبما أن الشحنة انتقلت من النقطة (أ) إلى النقطة (ب)، فإن:

$$\text{ش}_{\text{أ}\leftarrow\text{ب}} = \text{ـــ}\cdot(\text{جـ}_{\text{ب}} - \text{جـ}_{\text{أ}})$$

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

$$\text{جـ}_{\text{ب}} - \text{جـ}_{\text{أ}} = ٧ \text{ فولت}.$$

ويمكن التعبير عن فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين بالرمز ($\text{جـ}_{\text{أ}}$)، أي أن $\text{جـ}_{\text{أ}} = ٧$ فولت.

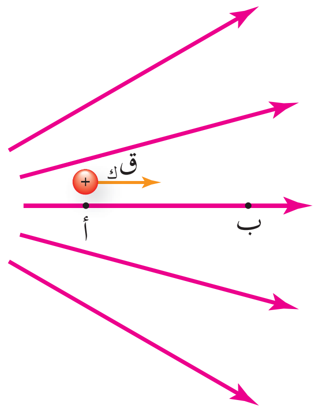
٢ لحساب الشغل اللازم لنقل شحنة كهربائية من النقطة (ب) إلى النقطة (أ):

$$\text{ش}_{\text{ب}\leftarrow\text{أ}} = \text{ـــ}\cdot(\text{جـ}_{\text{أ}\text{ب}}) = -٢\times١٠^{-٩} \times -٧ = ١٤\times١٠^{-٩} \text{ جول}$$

حيث ($\text{جـ}_{\text{ب}\text{أ}} = -\text{جـ}_{\text{أ}\text{ب}}$).

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

افترض أن شحنة موجبة (سـ.) 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).



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

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

$$\Delta ط_م = \Delta ط_و + \Delta ط_ح = صفر$$

$$\Delta ط_ح = -\Delta ط_و$$

تؤدي حركة الشحنة الحرة الموجبة تحت تأثير القوة الكهربائية فقط إلى نقصان طاقة الوضع الكهربائية المختزنة فيها، ويقابل ذلك زيادة مساوية في الطاقة الحركية، فالقوة الكهربائية تبذل شغلًا ($ش_ك$) على الشحنة تحول طاقة الوضع الكهربائية المختزنة فيها إلى طاقة حركية أي أن:

$$ش_ك = -\Delta ط_و = \Delta ط_ح$$

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، ويقابل ذلك زيادة مساوية في طاقتها الحركية.

وبالرجوع إلى العلاقة (٢-٢) فإن:

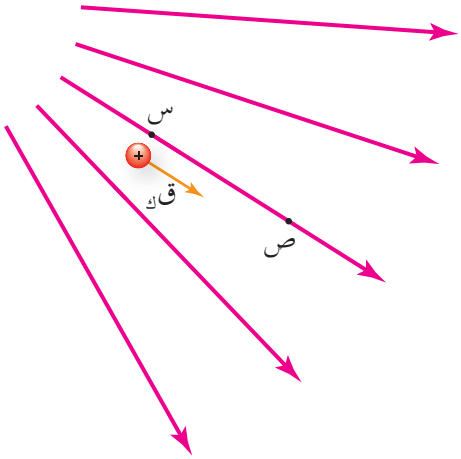
$$جـ_{نهائية} - جـ_{ابتدائية} = \frac{\Delta ط_و}{سـ.} = \frac{-ش_ك}{سـ.}$$

وعليه يمكن التعبير عن شغل القوة الكهربائية بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ش_ك = -سـ.(جـ_{نهائية} - جـ_{ابتدائية}) \quad \text{.......... (٢-٤)}$$

مثال (٢-٢)

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



الشكل (٢-٥): مثال (٢-٢).

الحل:

لحساب فرق الجهد بين النقطتين (س، ص) نطبق العلاقة (٢-٤)، وبما أن البروتون انتقل من النقطة (س) إلى النقطة (ص)، فإن:

$$ش_{س \leftarrow ص} = -\text{ـــ}_{ك} (جـ_{ص} - جـ_{س})$$

$$٨ \times ١٠^{-١٩} = -١,٦ \times ١٠^{-١٩} \times (جـ_{صس})$$

$$(جـ_{صس}) = \frac{-٨ \times ١٠^{-١٩}}{١,٦ \times ١٠^{-١٩}}$$

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

مراجعة (٢-١)

١ ماذا نعني بقولنا إن فرق الجهد بين نقطتين يساوي (١٢) فولت.

٢ نقطتان (د)، (هـ) ضمن مجال كهربائي. انظر الشكل (٢-٦)، إذا كان ($جـ_{دهـ} = -٤$) فولت و($جـ_{هـ} = ٨$) فولت فاحسب:

الشكل (٢-٦): سؤال (٢).

أ شغل القوة الكهربائية المبذول لنقل إلكترون من النقطة (د) إلى النقطة (هـ).

ب شغل القوة الخارجية المبذول لنقل بروتون من اللانهاية إلى النقطة (د) بسرعة ثابتة.

جـ مقدار التغير في طاقة الوضع الكهربائية للإلكترون والبروتون 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 هذه الشحنة؟

وجد تجريبيًّا أن الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية (ـــ)، موضوعة في الهواء، عند نقطة على بعد (ف) من الشحنة يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$جـ = أ \frac{ـــ}{ف} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٢-٥)$$

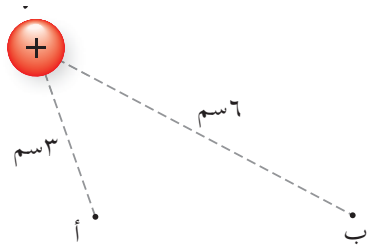
ومن هذه العلاقة نلاحظ أن الجهد الكهربائي يعتمد على مقدار الشحنة المولدة للمجال الكهربائي (ـــ) ونوعها، وبعد النقطة عن الشحنة المولدة للمجال الكهربائي (ف)، والسماحية الكهربائية للهواء. وقد يكون هذا الجهد الكهربائي موجبًا أو سالبًا تبعًا لنوع الشحنة (ـــ) المولّدة للمجال الكهربائي.

مثال (٢-٣)

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

١ فرق الجهد ($جـ_{أ ب}$)

٢ فرق الجهد ($جـ_{أ ب}$) إذا كانت (ـــ = -٣) نانوكولوم؟



الشكل (٢-٧): مثال (٢-٣).

الحل:

١ لحساب الجهد عند نقطة نطبق العلاقة:

$$جـ = أ \frac{ـــ}{ف}$$

$$جـ_{أ} = ٩ \times ١٠^{٩} \frac{٣ \times ١٠^{-٩}}{٣ \times ١٠^{-٢}}$$

$$= ٩٠٠ \text{ فولت}$$

$$جـ_{ب} = ٩ \times ١٠^{٩} \frac{٣ \times ١٠^{-٩}}{٦ \times ١٠^{-٢}}$$

$$= ٤٥٠ \text{ فولت}$$

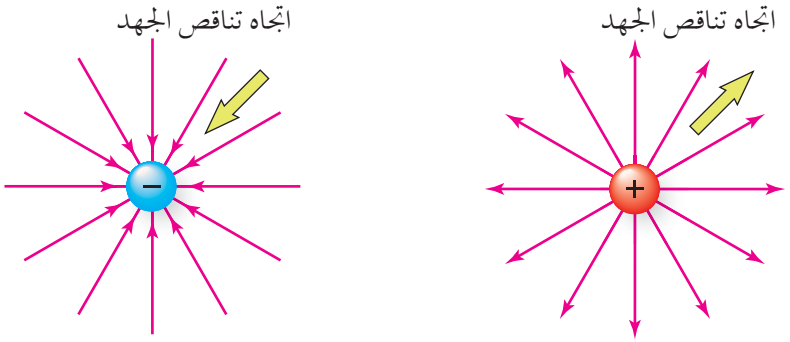
جـ$_{أب}$ = جـ$_{أ}$ − جـ$_{ب}$ = ٩٠٠ − ٤٥٠ = +٤٥٠ فولت. (أي أن جـ$_{أ}$ > جـ$_{ب}$).

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، إن **اتجاه المجال الكهربائي يكون دائمًا باتجاه تناقص الجهد الكهربائي**. انظر الشكل (٢−٨).

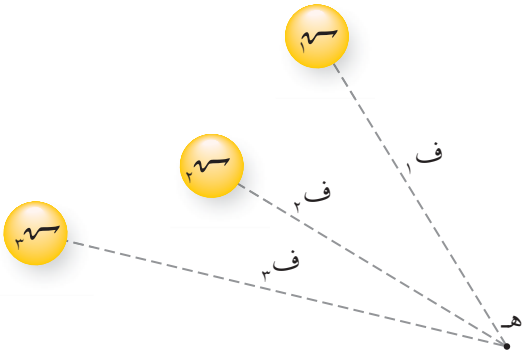


الشكل (٢−٨): العلاقة بين تغير الجهد الكهربائي واتجاه خطوط المجال الكهربائي.

ماذا يحدث لجهد النقطة إذا وقعت في مجال شحنات نقطية عدة؟

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

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



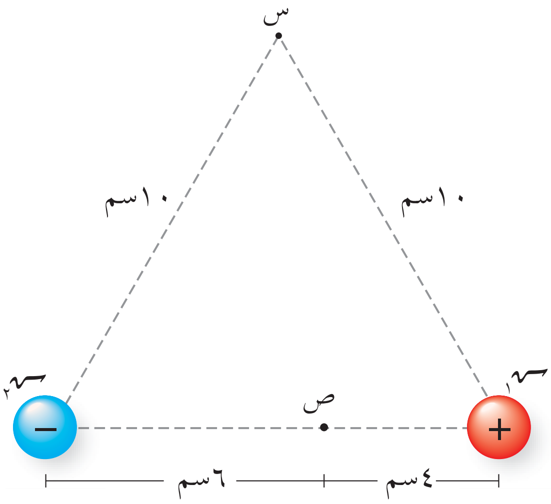
الشكل (٢−٩) : الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية عدة.

وهذا يعني أنه يمكن حساب الجهد عند نقطة تقع في مجال شحنات نقطية عدة من العلاقة:

$$\text{جـ} = \text{أ} \left(\frac{\text{س}_{١}}{\text{ف}_{١}} + \frac{\text{س}_{٢}}{\text{ف}_{٢}} + \frac{\text{س}_{٣}}{\text{ف}_{٣}} + \dots \right) \quad \text{......................} \quad (٢-٦)$$

مثال (٢-٤)

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



الشكل (٢-١٠): مثال (٢-٤).

الحل:

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

$$\text{جـ}_{\text{س}} = \text{أ} \left(\frac{\text{س}_{١}}{\text{ف}_{١}} + \frac{\text{س}_{٢}}{\text{ف}_{٢}} \right)$$

$$\text{جـ}_{\text{س}} = ٩ \times ١٠^{٩} \left(\frac{٤ \times ١٠^{-٦}}{١٠ \times ١٠^{-٢}} + \frac{-٤ \times ١٠^{-٦}}{١٠ \times ١٠^{-٢}} \right) = \text{صفر}$$

وهذا يعني أن طاقة الوضع الكهربائية لوحدة الشحنات عند النقطة (س) تساوي صفرًا؛ فلا يلزم بذل شغل لنقل شحنة من اللانهاية (∞) إلى النقطة (س).

$$\text{جـ}_{\text{ص}} = \text{جـ}_{١} + \text{جـ}_{٢}$$

$$\text{جـ}_{\text{ص}} = \text{أ} \left(\frac{\text{س}_{١}}{\text{ف}_{١}} + \frac{\text{س}_{٢}}{\text{ف}_{٢}} \right)$$

$$= ٩ \times ١٠^{٩} \left(\frac{٤ \times ١٠^{-٦}}{٤ \times ١٠^{-٢}} + \frac{-٤ \times ١٠^{-٦}}{٦ \times ١٠^{-٢}} \right)$$

$$\text{جـ}_{\text{ص}} = ٩ \times ١٠^{٩} \times ١٠^{-٦} \times ١٠^{٢} \left(١ - \frac{٢}{٣} \right)$$

$$\text{جـ}_{\text{ص}} = ٣ \times ١٠^{٥} \text{ فولت.}$$

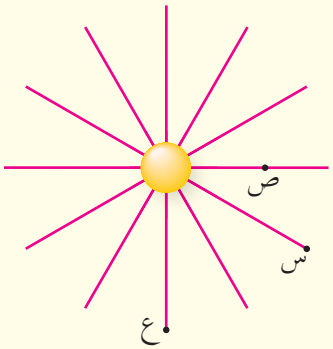
١ يبين الشكل (٢-١١) ثلاث نقاط (س، ص، ع) تقع ضمن المجال الكهربائي لشحنة نقطية، بُعد النقطة (س) عن الشحنة يساوي بُعد النقطة (ع). و($جـ_{س ص}$ = ٣ فولت). أجب عما يأتي:

أ أي النقطتين (س، ص) يكون الجهد عندها أعلى؟

ب ما نوع الشحنة المولدة للمجال الكهربائي؟

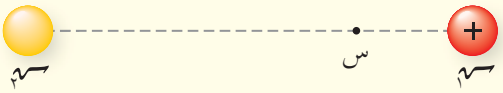
جـ حدد اتجاه المجال الكهربائي.

د قارن بين ($جـ_{س ص}$) و($جـ_{ص ع}$).



الشكل (٢-١١): سؤال (١).

٢ يبين الشكل (٢-١٢) نقطة (س) تقع على الخط الواصل بين شحنتين نقطيتين، إذا كانت ($ش_{١}$) موجبة و($جـ_{س}$ = صفر). فأجب عما يأتي:



الشكل (٢-١٢): سؤال (٢).

أ ما نوع الشحنة ($ش_{٢}$)؟

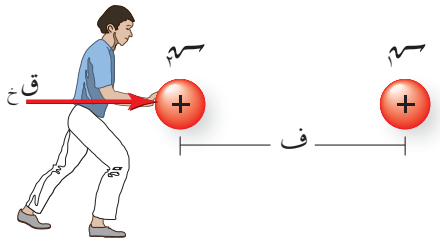
ب أيهما أكبر مقدارًا ($ش_{١}$) أم ($ش_{٢}$)؟

٢-٣ طاقة الوضع الكهربائية لنظام يتألف من شحنتين نقطيتين

The Electic Potential Energy of a System of Two Point Charges

عندما توضع شحنة نقطية في مجال كهربائي خارجي فإنهما يشكلان نظامًا، 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 فقط. ولتشكيل نظام مكون من شحنتين موجبتين($س_١$، $س_٢$) بعيدتين جدًّا عن بعضهما؛ فإنهما تنقلان من اللانهاية إلى منطقة يكون البعد بينهما(ف).

إن نقل الشحنة الأولى ($س_١$) لا يتطلب بذل شغل لأنها منقولة إلى منطقة لا يوجد فيها مجال كهربائي، أما نقل الشحنة الثانية ($س_٢$) من اللانهاية إلى نقطة على بعد (ف) من الشحنة ($س_١$) بسرعة ثابتة فيتطلب التأثير بقوة خارجية تبذل شغلًا كما في الشكل(٢-١٣)؛ لأنها ستدخل مجالًا كهربائيًّا، ويحسب هذا الشغل من العلاقة (٢-٤):



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

$$ش_{خ} = س_٢ (جـ_{نهائية} - جـ_{ابتدائية})$$

وبما أن الشحنة ($س_٢$) نقلت من اللانهاية حيث ($جـ_{\infty} = ٠$) إلى نقطة في المجال الكهربائي للشحنة ($س_١$)، فإن:

$$ش_{خ \infty \leftarrow النقطة} = س_٢ (جـ_{النقطة} - جـ_{\infty}) = س_٢ جـ$$

حيث (جـ): جهد نقطة في مجال الشحنة ($س_١$)، ويحسب من العلاقة (٢-٥):

$$جـ = أ \frac{س_١}{ف}$$

لذا فإن:

$$ش_{خ} = أ \frac{س_١}{ف} س_٢ .$$

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:

$$ط_و = أ \frac{س_١}{ف} س_٢ \quad \text{.....} \quad (٢-٧)$$

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

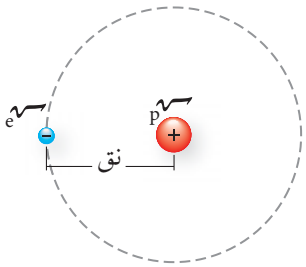
الشحنتين كانتا بعيدتين جدًّا، وتقريبهما على بعد (ف) من بعضهما بسرعة ثابتة يتطلّب التأثير بقوة خارجية في إحداهما فتبذل شغلًا للتغلب على قوة التنافر الكهربائية، وهذا الشغل يظهر على شكل زيادة في طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في النظام.

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

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:

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

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

$$ط_و = -أ \frac{ش_e^٢}{ف}$$

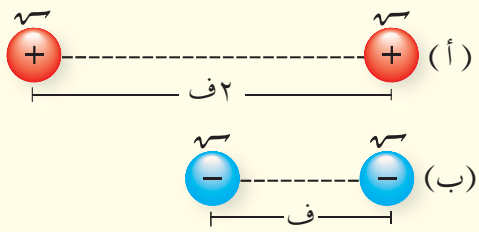
$$= -٩ \times ١٠^{٩} \frac{(١,٦ \times ١٠^{-١٩})^٢}{٥,٢٩ \times ١٠^{-١١}}$$

$$ط_و = -٤,٣٦ \times ١٠^{-١٨} \text{ جول.}$$

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).

تناولنا في ما سبق كيفية حساب الجهد الكهربائي الناشئ عن الشحنات النقطية. ماذا يحدث إذا أصبح مصدر المجال الكهربائي صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين، إحداهما موجبة والأخرى سالبة؟ سنحصل عندئذ على مجال كهربائي منتظم بإهمال تأثير الأطراف، فكيف يمكن حساب فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم؟

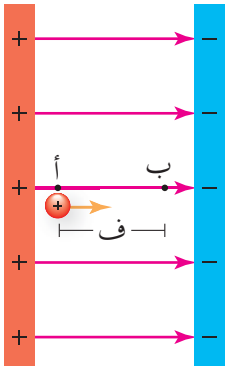
يبين الشكل(٢-١٦) شحنة موجبة وضعت ضمن مجال كهربائي منتظم (مـ)، فتحركت بفعل القوة الكهربائية ($\overleftarrow{ق}_ك$)، وقطعت إزاحة (ف) من النقطة (أ) إلى النقطة (ب)؛ فإن القوة الكهربائية تبذل شغلًا يمكن أن نعبر عنه بالعلاقة:

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

وبتعويض ($\overleftarrow{ق}_ك = \text{مـ}\ \overleftarrow{س}$) فإن:

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

$$= \text{مـ}\ س\ \text{ف}_{أ\leftarrow ب}\ \text{جتا}\ \theta$$



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

ومن العلاقة (٢-٤) يمكن أن نعبر عن شغل القوة الكهربائية كما يأتي:

$$ش_{ك\ أ\leftarrow ب} = -س\ (\text{جـ}_ب - \text{جـ}_أ)$$

أي أن :

$$-س\ (\text{جـ}_ب - \text{جـ}_أ) = س\ \text{مـ ف}_{أ\leftarrow ب}\ \text{جتا}\ \theta$$

وباختصار(س) من الطرفين: $-(\text{جـ}_ب - \text{جـ}_أ) = \text{مـ ف}_{أ\leftarrow ب}\ \text{جتا}\ \theta$

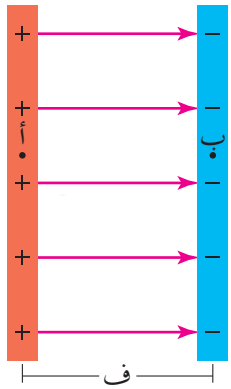
أي أن :

$$\text{جـ}_{أب} = \text{مـ ف}_{أ\leftarrow ب}\ \text{جتا}\ \theta \quad \ldots\ (٢-٨)$$

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

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

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 ($جـ_{أب}$) في هذه الحالة يساوي **فرق الجهد بين الصفيحتين**، ويرمز له بالرمز(جـ). أي أن:



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

$$جـ_{أب} = مـ ف_{أ \leftarrow ب} \text{ جتا} \theta$$

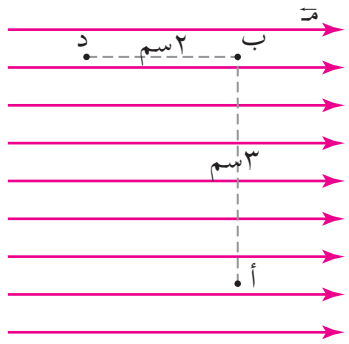
$$جـ = مـ ف \text{ جتا } ٠$$

$$جـ = مـ ف \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (٢–٩)$$

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

مثال (٢–٦)

يبين الشكل (٢–١٨) ثلاث نقاط (أ، ب، د) ضمن مجال كهربائي منتظم مقداره (٣١٠) نيوتن/ كولوم. معتمدًا على الشكل، احسب: ($جـ_{بد}$)، ($جـ_{أب}$).



الشكل (٢–١٨): مثال (٢–٦).

الحل:

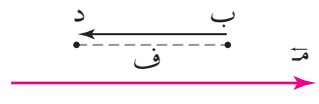
١ لحساب ($جـ_{بد}$) نطبق العلاقة:

$$جـ_{بد} = مـ ف_{ب \leftarrow د} \text{ جتا} \theta$$

ويبين الشكل (٢– ١٩/أ)، اتجاه الإزاحة من(ب) إلى(د)، والزاوية بين اتجاهي الإزاحة والمجال الكهربائي المنتظم ($\theta = ١٨٠^\circ$).

$$جـ_{بد} = ٣١٠ \times ٢ \times ١٠^{-٢} \times \text{جتا } ١٨٠$$

$$= -٢٠ \text{ فولت.}$$



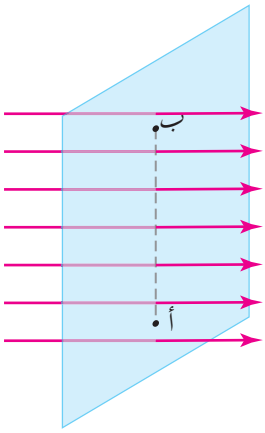
الشكل (٢–١٩/أ): مثال (٢–٦).

٢ $جـ_{أب} = مـ ف_{أ \leftarrow ب} \text{ جتا} \theta$.

$$جـ_{أب} = ٣١٠ \times ٣ \times ١٠^{-٢} \times \text{جتا } ٩٠ = ٠$$

$جـ_{أ} - جـ_{ب} = ٠$. 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.



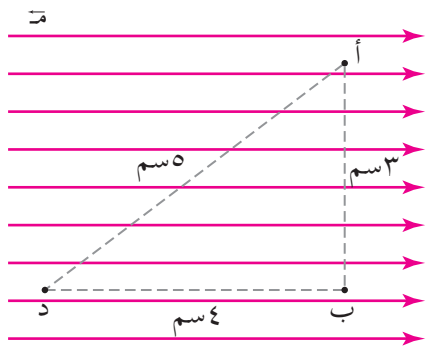
الشكل (٢-١٩/ب): مثال (٢-٦).

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 ($جـ_{أد}$) في حالتين:

١ عبر المسار (أ ← د).

٢ عبر المسار (أ ← ب ← د).



الشكل (٢-٢٠/أ): مثال (٢-٧).

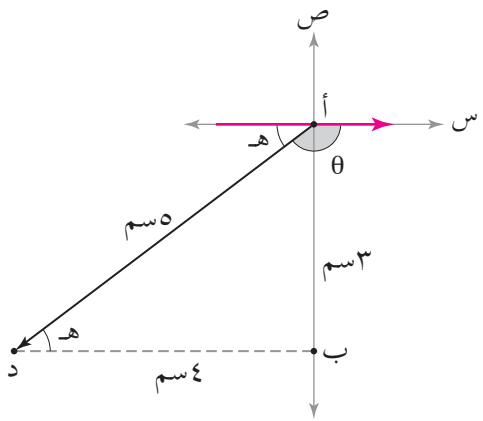
الحل:

١ لحساب فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين (أ، د) عبر المسار أ ← د، نحتاج إلى تحديد الزاوية (θ)، لاحظ الشكل (٢-٢٠/ب). حيث جتاθ = − جتا هـ = $-\frac{٤}{٥}$

$جـ_{أد} = مـ ف_{أ←د} \times$ جتاθ

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

$جـ_{أد} = -٨$ فولت.



الشكل (٢-٢٠/ب): مثال (٢-٧).

٢ لحساب فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين (أ، د) عبر المسار أ ← ب ← د:

$جـ_{أد} = جـ_{أب} + جـ_{ب د}$

$جـ_{أد} = مـ ف_{أب}$ جتا ٩٠ + $مـ ف_{ب د}$ جتا ١٨٠

$= ٢ \times ١٠^{٢} \times ٣ \times ١٠^{-٢} \times ٠ + ٢ \times ١٠^{٢} \times ٤ \times ١٠^{-٢} \times -١$

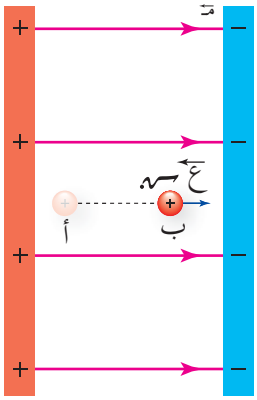
$جـ_{أد} = -٨$ فولت.

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

مثال (٢-٨)

يتحرك بروتون شحنته (ـــ) 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 (جـ) بين النقطتين (أ، ب)، فأثبت أن سرعة البروتون بعد قطعه الإزاحة بين الصفيحتين تعطى بالعلاقة الآتية:

$$ع = \sqrt{\frac{٢ ـــ جـ}{ك}}$$



الشكل (٢-٢١): مثال (٢-٨).

الحل:

يتحرك البروتون تحت تأثير القوة الكهربائية، ويحسب ($ش_ك$) من العلاقة:

$$ش_{ك\ أ \leftarrow ب} = - ـــ (جـ_ب - جـ_أ)$$

وبما أن النظام محافظ فإن: $ش_ك = \Delta ط_ح = ط_{ح\ ب} - ط_{ح\ أ}$

ولأن البروتون تحرك من السكون فإن: $- ـــ (جـ_ب - جـ_أ) = ط_{ح\ ب} - ٠$

وبتعويض ($ط_ح = \frac{١}{٢} ك ع^٢$) وبإعادة ترتيب الحدود:

$$ـــ (جـ_أ - جـ_ب) = \frac{١}{٢} ك ع_ب^٢$$

$$ع^٢ = \frac{٢ ـــ جـ_{أ ب}}{ك}$$

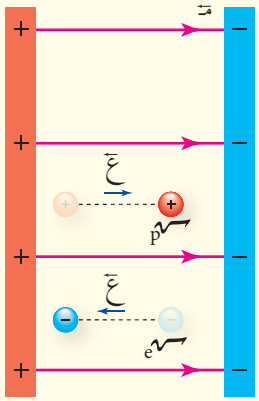
$$ع = \sqrt{\frac{٢ ـــ جـ}{ك}}$$

بتطبيق العلاقة التي توصلنا إليها في المثال السابق يمكن حساب سرعة الجسيمات الذرية المتحركة عبر فرق جهد كهربائي عالٍ، حيث تتحرك هذه الجسيمات بسرعة كبيرة يصعب قياسها عمليًّا.

مراجعة (٢-٤)

١ يقاس المجال الكهربائي بوحدة (نيوتن/كولوم) وتبين المعادلة ($م = \frac{جـ}{ف}$) 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 كل مما يأتي في نهاية الإزاحة:



الشكل (٢-٢٢): سؤال (٢).

أ سرعة الإلكترون وسرعة البروتون.

ب الطاقة الحركية لكل منهما.

٢–٥ سطوح تساوي الجهد

Equipotential Surfaces

يسمى **السطح الذي يكون الجهد عند نقاطه جميعها متساويًا ويساوي قيمة ثابتة** سطح تساوي الجهد.

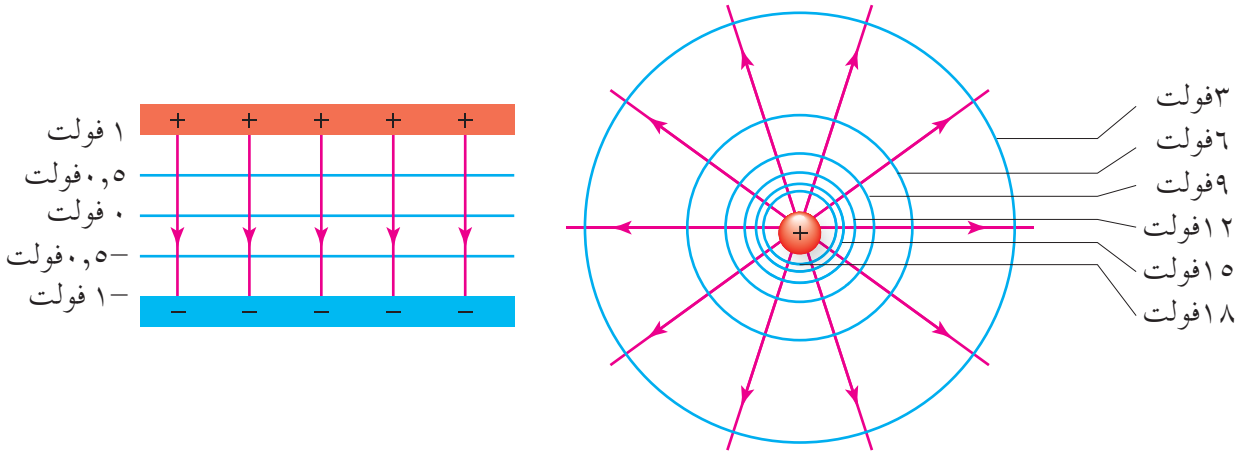
وتسهم سطوح تساوي الجهد في فهم توزيع قيم الجهد وتصورها حول شحنة كهربائية أو توزيع من الشحنات.

نشاط (٢ - ١) سطوح تساوي الجهد

الهدف: وصف سطوح تساوي الجهد.

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

ادرس الشكل وأجب عن الأسئلة الآتية:



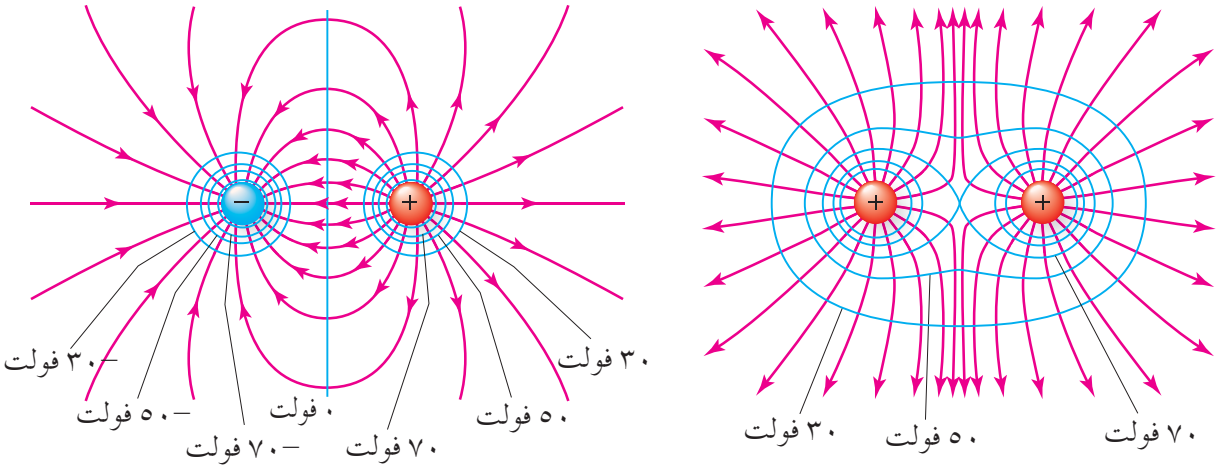
الشكل (٢–٢٣): سطوح تساوي الجهد.

١ صف سطوح تساوي الجهد في الشكلين.

٢ في أي منطقة تتقارب سطوح تساوي الجهد في الشكل (٢–٢٣/ أ)، أبعيدًا عن الشحنة أم بالقرب منها؟ ما علاقة ذلك بمقدار المجال الكهربائي؟

٣ ما الزاوية التي تصنعها سطوح تساوي الجهد مع خطوط المجال الكهربائي؟

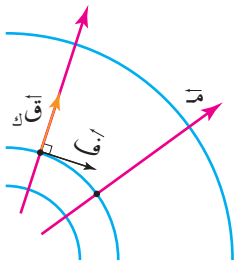
لا شك في أنك لاحظت أن سطوح تساوي الجهد للشحنة النقطية تبدو كروية الشكل، وتكون أكثر تقاربًا بالقرب من الشحنة؛ لأن المجال الكهربائي للشحنة النقطية مجال غير منتظم، يقل كلما ابتعدنا عن الشحنة وحيثما تقاربت سطوح تساوي الجهد دل ذلك على قيمة كبيرة للمجال الكهربائي. أما سطوح تساوي الجهد في الحيز بين الصفيحتين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



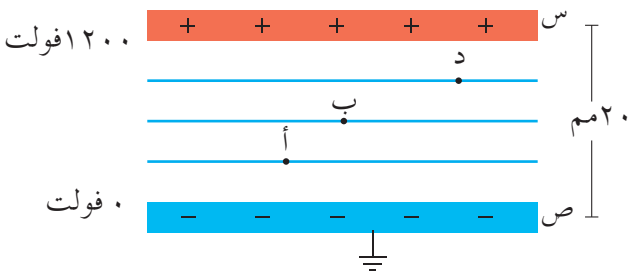
الشكل (٢-٢٥): سطوح تساوي الجهد عمودية على خطوط المجال.

مثال (٢-٩)

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

١ المجال الكهربائي بين الصفيحتين مقدارًا واتجاهًا.

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



الشكل (٢-٢٦): مثال (٢-٩).

الحل:

١ لحساب المجال الكهربائي بين الصفيحتين نطبق العلاقة :(جـ = مـ ف)، وبما أن الصفيحة (ص) تتصل بالأرض، فإن جهدها يساوي صفرًا. ويكون فرق الجهد بين الصفيحتين:

جـ = ٠ - ١٢٠٠ = 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:

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

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

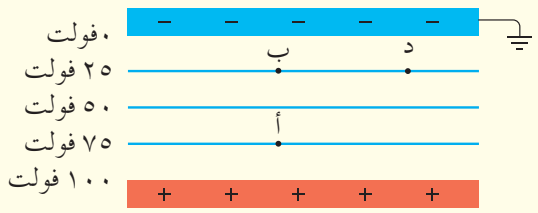
$$\text{جـ}_{\text{أ}} - ٠ = ٦ \times ١٠^{٤} \times ٥ \times ١٠^{-٣} \Leftarrow \text{جـ}_{\text{أ}} = ٣٠٠ \text{ فولت}.$$

وبالمثل نتوصل إلى أن:

$\text{جـ}_{\text{ب}} = ٦٠٠$ فولت.

$\text{جـ}_{\text{د}} = ٩٠٠$ فولت.

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

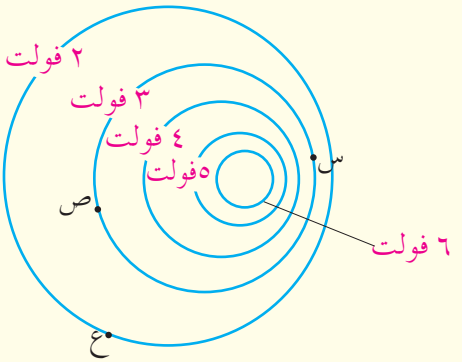


الشكل (٢–٢٧): سؤال (١).

أ فرق الجهد ($جـ_{أب}$).

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

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



الشكل (٢–٢٨): سؤال (٢).

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

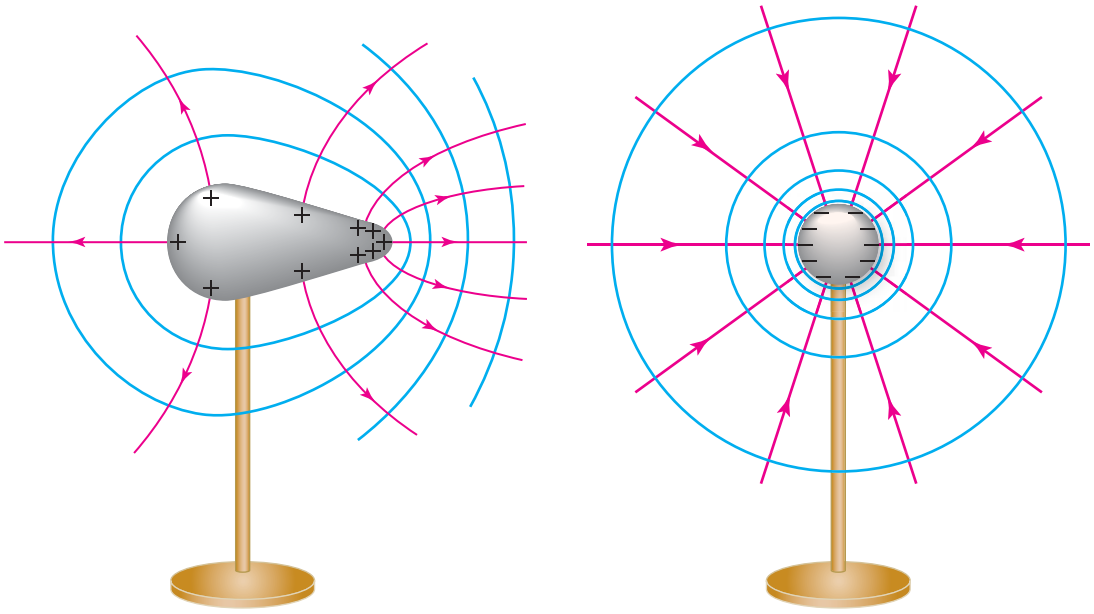
ب قارن بين مقدار المجال الكهربائي عند النقطتين (س) و(ص) مفسرًا إجابتك.

جـ احسب شغل القوة الخارجية اللازم لنقل بروتون من النقطة (ع) إلى النقطة (ص) بسرعة ثابتة.

٦-٢ 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. إن 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 تجريبيًّا أن الكثافة السطحية للشحنة تكون أكبر عند الرؤوس المدببة مقارنة بالمناطق الأخرى الأقل تحدبًا على الموصل نفسه.

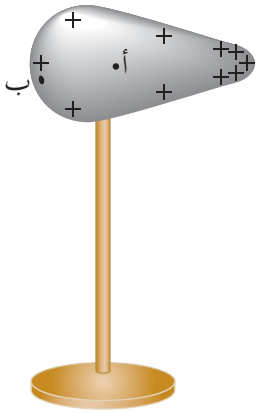


(ب) (أ)

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

وبما أن الشحنات على سطح الموصل مستقرة وساكنة، فإنها تكون في حالة اتزان، أي أن القوة المحصلة المؤثرة في كل شحنة 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.**

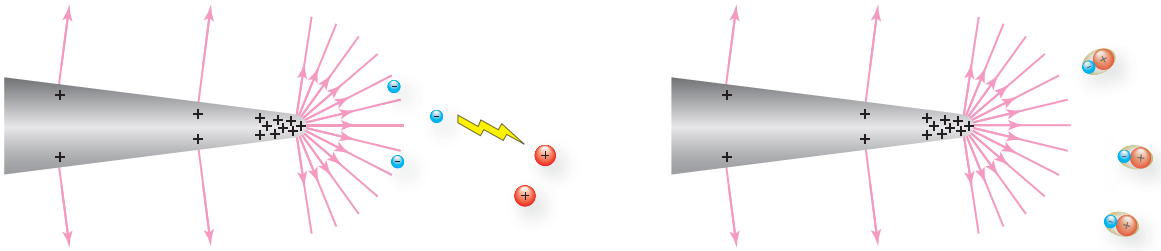
ماذا عن الجهد داخل الموصل؟ هل يوجد فرق في الجهد بين داخل الموصل وسطحه؟



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

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 قيمة جهد سطح الموصل.**

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، ويحدث تفريغ كهربائي للشحنات في الهواء؛ أي ينشأ تيار كهربائي، فتظهر شرارة تشبه البرق.



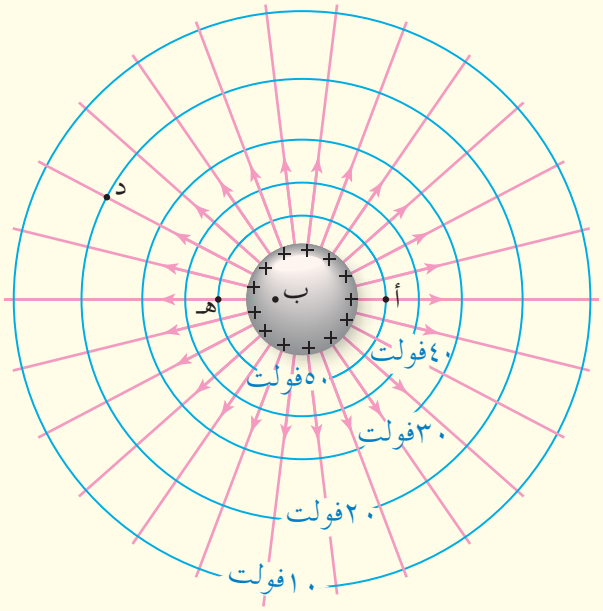
الشكل (٢-٣١): تأين جزيئات الهواء بالقرب من الرأس المدبب لموصل.

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

الشكل (٢-٣٢): التفريغ الكهربائي بالقرب من رأس مدبب.

مراجعة (٢-٦)

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



الشكل (٢-٣٣): سؤال (١).

أ رتب النقاط (أ، ب، هـ، د) تصاعديًّا وفق قيم المجال الكهربائي عندها.

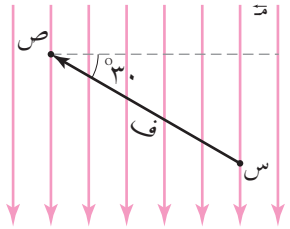
ب رتب النقاط (أ، ب، هـ، د) تصاعديًّا وفق قيم الجهد عندها.

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

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

١ 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 (جـ س ص):

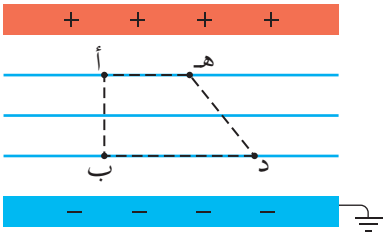


الشكل (٢-٣٤): سؤال (١) فقرة (١).

أ) مـ ف جتا ١٨٠ ب) مـ ف جتا ١٢٠

جـ) مـ ف جتا ٣٠ د) مـ ف جتا ٦٠

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:



الشكل (٢-٣٥): سؤال (١) فقرة (٢).

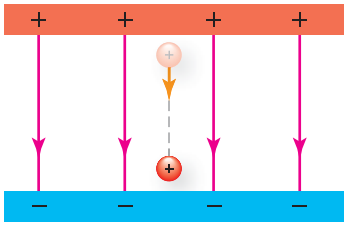
أ) النقطة (د) إلى النقطة (هـ)

ب) النقطة (د) إلى النقطة (ب)

جـ) النقطة (أ) إلى النقطة (ب)

د) النقطة (أ) إلى النقطة (هـ)

٣ عندما تتحرك شحنة موجبة حرة في مجال كهربائي منتظم كما في الشكل (٢-٣٦) فإن القوة الكهربائية تبذل عليها شغلًا:



الشكل (٢-٣٦): سؤال (١) فقرة (٣).

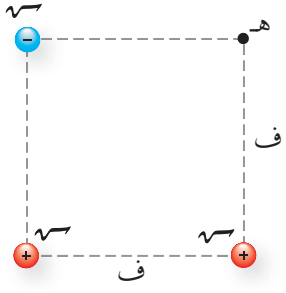
أ) موجبًا، فتزداد طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

ب) سالبًا، فتقل طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

جـ) موجبًا، فتقل طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

د) سالبًا، فتزداد طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

٤ عند وضع ثلاث شحنات نقطية متساوية في المقدار عند رؤوس مربع، كما يبين الشكل (٢-٣٧). فإن الجهد الكهربائي عند النقطة (هـ) يساوي:

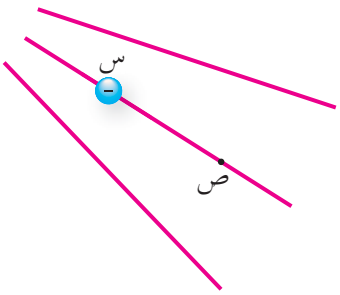


الشكل (٢-٣٧): سؤال (١) فقرة (٤).

أ) $٢(\frac{أ}{ف})$ ب) $٣(\frac{أ}{ف})$

جـ) $٢(\frac{أ}{٢٧ ف})$ د) $(\frac{أ}{٢٧ ف})$

٢ يبين الشكل (٢–٣٨) نقطتين (س، ص) في مجال كهربائي، وضعت شحنة سالبة عند النقطة (س) فتحركت بتأثير القوة الكهربائية نحو النقطة (ص)، ادرس الشكل وأجب عما يأتي:



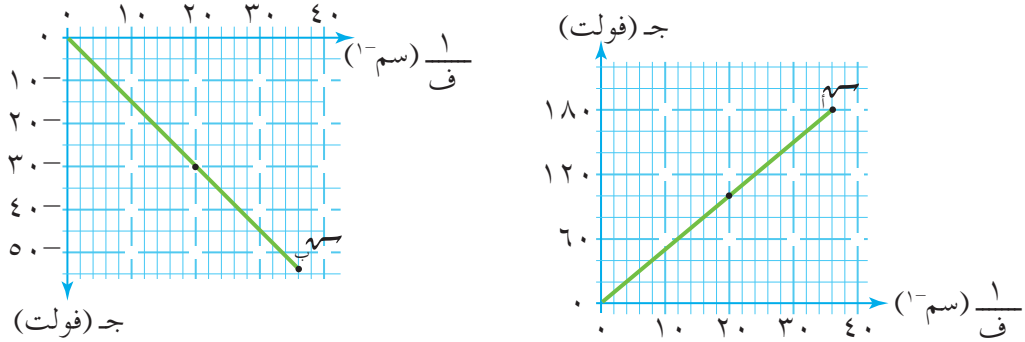
الشكل (٢–٣٨): سؤال (٢).

أ حدد اتجاه المجال الكهربائي.

ب هل تزداد طاقة الوضع الكهربائية للشحنة أم تقل؟

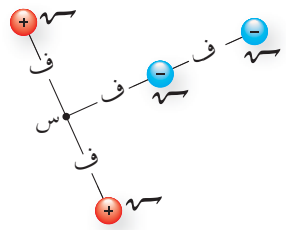
جـ هل ($جـ_{س ص}$) موجب أم سالب؟

٣ يبين الشكل (٢–٣٩) تمثيلًا بيانيًّا للعلاقة بين الجهد الناشئ عن كل من شحنتين نقطيتين (ـــ$_{أ}$، ـــ$_{ب}$) ومقلوب البعد عن كل منهما، اعتمادًا على البيانات جد مقدار كل من الشحنتين ونوعهما.



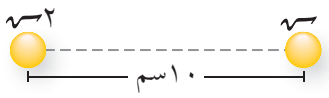
الشكل (٢–٣٩): سؤال (٣).

٤ في الشكل(٢–٤٠) احسب الجهد الكهربائي عند النقطة (س)، علمًا بأن (ـــ=٥) ميكروكولوم، و(ف=٤) سم.



الشكل (٢–٤٠): سؤال (٤).

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

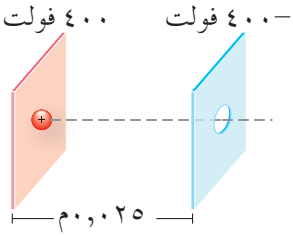


الشكل (٢–٤١): سؤال (٥).

أ مقدار كل من الشحنتين.

ب الشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لنقل الشحنة (ـــ) من موقعها إلى اللانهاية؟

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



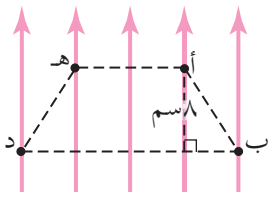
الشكل (٢–٤٢): سؤال (٦).

أ المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين مقدارًا واتجاهًا.

ب القوة الكهربائية المؤثرة في البروتون مقدارًا واتجاهًا.

جـ سرعة البروتون لحظة خروجه من الثقب في الصفيحة السالبة.

٧ يبين الشكل (٢–٤٣) أربع نقاط (أ، ب، د، هـ) تقع في مجال كهربائي منتظم مقداره (٣١٠) فولت/م. احسب:

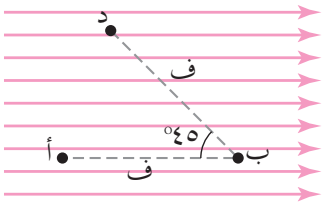


الشكل (٢–٤٣): سؤال (٧).

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).

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



الشكل (٢–٤٤): سؤال (٨).

أ $جـ_{أ ب}$.

ب $جـ_{ب د}$.

جـ ($جـ_{أ د}$) عبر المسار (أ ← ب ← د).

الفصل الثالث

المواسعة الكهربائية

Electric Capacitance

في هذا الفصل

(٣-١)
المواسع الكهربائي.

(٣-٢)
الطاقة المختزنة في المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين.

(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. تتكون الأجهزة الكهربائية من دارات كهربائية وإلكترونية متنوعة، وفي هذا الفصل سنتعرف أحد المكونات الرئيسة للدارة وهو المواسع الكهربائي. فما المقصود بالمواسع؟ وما مبدأ عمله؟ وكيف يمكن استخدام مجموعة من المواسعات في دارة كهربائية؟

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

تستخدم المواسعات في الدارة الكهربائية لماسحات زجاج السيارة عند عملها وفق نظام توقيت؛ إذ يحدد المواسع المستخدم في دارة الماسحات الفترة الزمنية بين كل مسحتين متتاليتين.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضح المقصود بالمواسعة الكهربائية، ووحدة قياسها، وتعبر عنها رياضيًّا.
- تتوصل إلى العوامل المؤثرة في مواسعة مواسع ذي صفيحتين متوازيتين.
- تتوصل إلى العلاقة الرياضية لحساب الطاقة المختزنة في مواسع كهربائي.
- تتوصل إلى العلاقات الخاصة بالمواسعات وتوصيلها على التوالي والتوازي، لحساب الشحنة والجهد والمواسعة المكافئة.
- تبحث في التطبيقات العملية التي تعتمد على المواسعات.

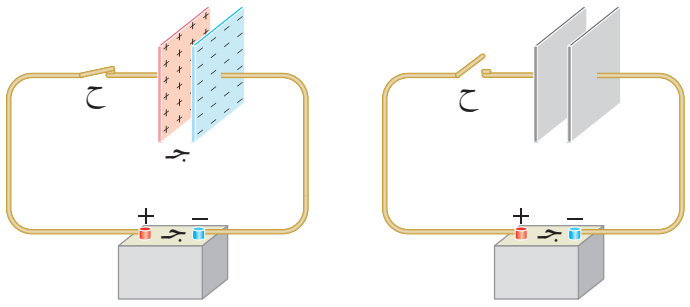
٣-١ المواسع الكهربائي
Electric Capacitor

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.

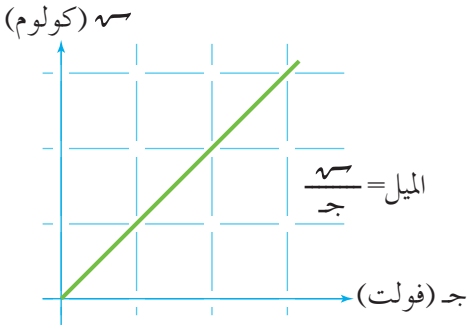
ويمكن شحن المواسع بوصل صفيحتيه مع بطارية، لاحظ الشكل (٣-٢) إذ تمثل البطارية مصدرًا للطاقة الكهربائية تعمل على شحن إحدى صفيحتي المواسع بشحنة موجبة، والأخرى بشحنة مساوية سالبة.



الشكل (٣-٢): شحن مواسع بوساطة 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 طرفي البطارية، وعندها تصل الشحنة على المواسع إلى قيمتها النهائية، وتكون كمية الشحنة على كل من الصفيحتين متساوية في المقدار.

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



الشكل (٣-٣): منحنى (جـ- ش).

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

$$س = \frac{ش}{جـ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٣-١)$$

حيث (ش): شحنة المواسع عند أي لحظة، ويعبر عنها بالقيمة المطلقة للشحنة على أي من صفيحتي المواسع، و(جـ): فرق الجهد بين صفيحتي المواسع عند تلك اللحظة (جهد المواسع).

وتعرف **المواسعة الكهربائية** **بأنها النسبة بين كمية الشحنة المختزنة في المواسع وفرق 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:

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

$$س = ٠,٥ \times ١٠^{-٦} \text{ فاراد.}$$

$$= ٠,٥ \text{ ميكروفاراد}$$

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

مثال (٣-٢)

يبين الشكل (٣-٤) التمثيل البياني للعلاقة بين جهد مواسع ذي صفيحتين متوازيتين وشحنته. مستعينًا بالشكل احسب:

١ مواسعة المواسع.

٢ شحنة المواسع النهائية إذا وصل مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها (٣٠) فولت.

الحل:

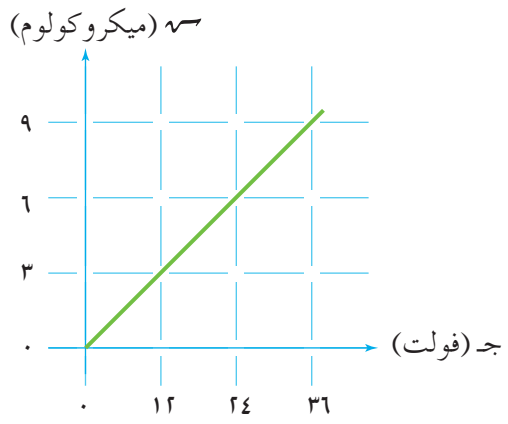
١ نجد المواسعة من ميل الخط المستقيم:

$$\text{س} = \frac{(٠-٣) \times ١٠^{-٦}}{(٠-١٢)}$$

$$= \frac{١}{٤} \times ١٠^{-٦}$$

$$= ٠,٢٥ \times ١٠^{-٦} \text{ فاراد.}$$

$$\text{س} = ٠,٢٥ \text{ ميكروفاراد.}$$



الشكل (٣-٤): مثال (٣-٢).

٢ بما أن المواسعة ثابتة، فإن:

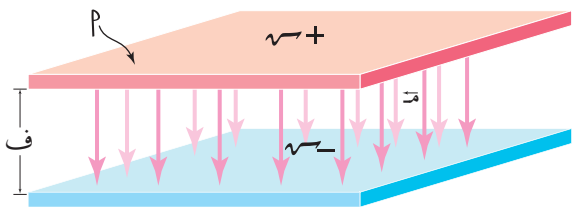
$$\text{ش} = \text{س جـ} = ٠,٢٥ \times ١٠^{-٦} \times ٣٠$$

$$\text{ش} = ٧,٥ \times ١٠^{-٦} \text{ كولوم}$$

$$\text{ش} = ٧,٥ \text{ ميكروكولوم}$$

والسؤال الآن؛ ما هي العوامل التي تعتمد عليها مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين؟

يبين الشكل (٣–٥) مواسعًا مشحونًا مساحة كل من صفيحتيه (أ)، والبعد بينهما (ف)، ويفصل بينهما الهواء، شحنة إحدى صفيحتيه (+ش)، وشحنة الصفيحة الأخرى (–ش).



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

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 كل من: 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 يعطى مقداره بالعلاقة ($م = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\circ}}$)، ويكون فرق الجهد بين الصفيحتين ($جـ = م ف$).

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

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

وبتعويض ($م = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\circ}}$)، نجد أن: $س = \frac{ش \varepsilon_{\circ}}{\sigma ف}$

وبتعويض ($\sigma = \frac{ش}{أ}$)، فإن: $س = \frac{أ ش \varepsilon_{\circ}}{ش ف}$

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

$$س = \frac{أ \varepsilon_{\circ}}{ف} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٣-٢)$$

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

مثال (٣-٣)

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

١ احسب كلًّا من 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:

$$س = \frac{٤ \pi ف}{ع} = \frac{٢ \times ١٠^{-٤} \times ٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢}}{١٠ \times ٨,٨٥ \times ١٠^{-٣}}$$

$س = ٢ \times ١٠^{-١٣}$ فاراد

■ شحنة المواسع:

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

$ش = ٤ \times ١٠^{-١٢}$ كولوم.

٢ عندما يقل البعد بين الصفيحتين إلى النصف، والمواسع مفصول عن البطارية:

■ تصبح المواسعة ضعفي ما كانت عليه وفق العلاقة: $س = \frac{٤ \pi ف}{ع}$، أي أن:

$س = ٤ \times ١٠^{-١٣}$ فاراد.

■ تبقى شحنة المواسع ثابتة لأنه غير موصول مع البطارية، أي أن:

$ش = ٤ \times ١٠^{-١٢}$ كولوم.

■ يحسب جهد المواسع من العلاقة:

$$جـ = \frac{ش}{س}$$

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

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

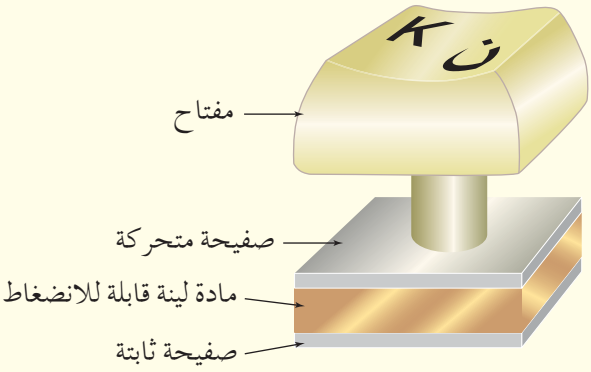
مراجعة (٣-١)

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

٢ وصل مواسعان مختلفان مع مصدري فرق جهد متماثلين، جهد كل منهما (جـ)، فاكتسب المواسع الأول شحنة (ش)، واكتسب المواسع الثاني شحنة (٣ش). ما النسبة بين مواسعة المواسعين؟

٣ مواسع ذو صفيحتين متوازيتين يتصل مع بطارية. إذا أصبح البعد بين صفيحتيه ثلاثة أضعاف ما كان عليه مع بقائه متصلًا 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.

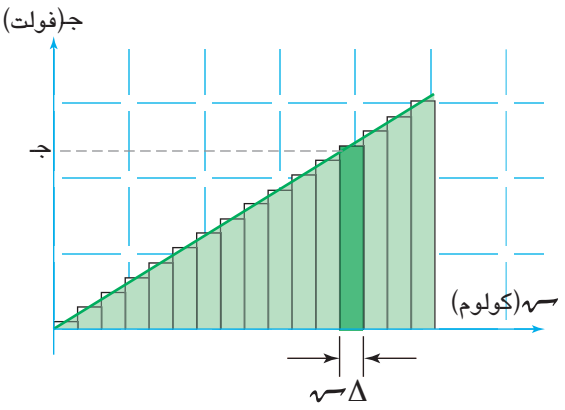


الشكل (٣-٦): سؤال (٤).

٥ مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، وصل مع مصدر فرق جهد (١٥٠) فولت، فكانت الكثافة السطحية للشحنة على صفيحته (٣٠) نانو كولوم/ سم^{٢}، احسب البعد بين صفيحته.

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 معزولًا، تبذل فيه البطارية شغلًا 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 متوسط جهد مقداره (جـ)، فإن مساحة المستطيل المظلل (جـ Δ ش) 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

$$ط = \frac{١}{٢} ش جـ \quad \ldots\ldots (٣-٣)$$

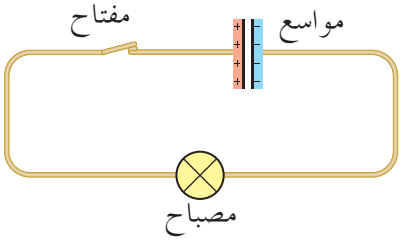
وبما أن (ش= س جـ)، فإن:

$$ط = \frac{١}{٢} س جـ^{٢} \quad \ldots\ldots (٣-٤)$$

كما يمكن التوصل إلى أن:

$$ط = \frac{١}{٢} \frac{ش^{٢}}{س} \quad \ldots\ldots (٣-٥)$$

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



الشكل (٣-٨): تفريغ المواسع.

السالبة عبر المصباح، ويمر في الدارة تيار كهربائي يبدأ بقيمة معينة، 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)سم^{٢}، والبعد بينهما (٨,٨٥) مم، شحن حتى أصبح جهده (١٠٠) فولت:

١ احسب الطاقة المختزنة في المواسع.

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

الحل:

١ نحسب المواسعة من العلاقة:

$$س = \frac{٤ \cdot ف}{ف}$$

$$= \frac{٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢} \times ٢٥ \times ١٠^{-٤}}{٨,٨٥ \times ١٠^{-٣}} \Leftarrow س = ٢,٥ \times ١٠^{-١٢} \text{ فاراد.}$$

لحساب الطاقة نطبق العلاقة:

$$ط = \frac{١}{٢} س جـ^{٢}$$

$$= \frac{١}{٢} \times ٢,٥ \times ١٠^{-١٢} \times (١٠٠)^{٢} \Leftarrow ط = ١,٢٥ \times ١٠^{-٨} \text{ جول.}$$

٢ عندما يزداد البعد بين الصفيحتين تقل المواسعة وفق العلاقة: $(س = \frac{٤ \cdot ف}{ف})$

ولأن (ف) أصبحت ضعفي ما كانت عليه فإن المواسعة تقل إلى النصف؛ أي أن:

$س = ١,٢٥ \times ١٠^{-١٢}$ فاراد.

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

ولحساب الطاقة:

$$ط = \frac{١}{٢} س جـ^{٢}$$

$$= \frac{١}{٢} \times ١,٢٥ \times ١٠^{-١٢} \times (١٠٠)^{٢} \Leftarrow ط = ٦,٢٥ \times ١٠^{-٩} \text{ جول.}$$

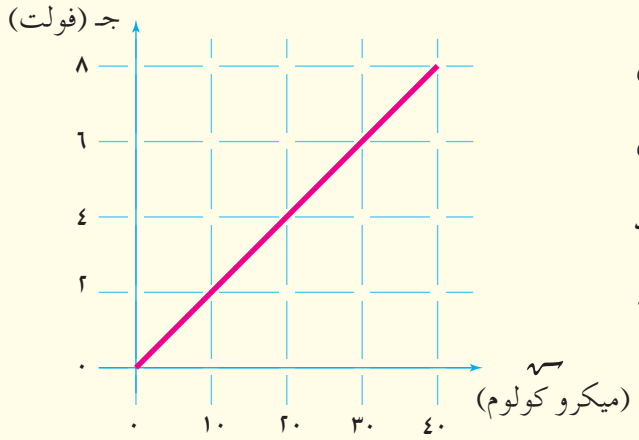
عندما تقل المواسعة مع بقاء جهد المواسع ثابتًا يحدث تفريغ لجزء من شحنة المواسع إلى البطارية؛ لذلك تقل الطاقة المختزنة فيه.

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، ثم أصبح البعد بين صفيحتيه ضعفي ما كان عليه، فماذا يحدث للطاقة المختزنة فيه؟ فسر إجابتك.

٣ مواسع كهربائي ذو صفيحتين متوازيتين، وصل مع مصدر فرق جهد (٨) فولت، ويبين الشكل (٣-٩) العلاقة بين جهد المواسع وشحنته في أثناء عملية الشحن. احسب:



الشكل (٣-٩): سؤال (٣).

أ مواسعة المواسع.

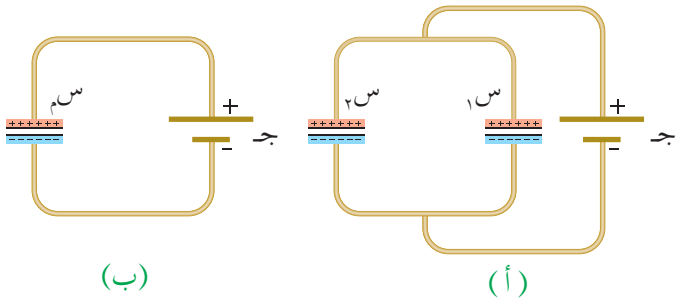
ب الطاقة المختزنة في المواسع عندما يكون فرق الجهد بين صفيحتيه (٢) فولت.

جـ الطاقة المختزنة في المواسع عند رفع جهده إلى (١٢) فولت.

تصنع المواسعات بحيث تكون لها مواسعة محددة، وتعمل على جهد معين، وقد يلزم في تطبيق عملي ما قيمة محددة للمواسعة ليست متوافرة؛ عندئذ يمكن الحصول على هذه القيمة 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) توصيلًا على التوازي، والتوصيل بهذه الطريقة يجعل كل مواسع موصول بصفيحتيه مباشرة مع البطارية.



الشكل (٣-١٠): التوصيل على التوازي.

وبما أن كلًّا من المواسعين يتصل بصورة مباشرة مع البطارية؛ فإن كل مواسع يشحن مباشرة منها، إلى أن يتساوى جهد كل مواسع مع جهد البطارية، وعندها يكون المواسعان قد اكتسبا شحنتين ($ش_1$)، ($ش_2$)؛ لذا **في التوصيل على التوازي تكون المواسعات متساوية في الجهد بينما الشحنة الكلية تكون مساويةً مجموع شحنة المواسعات.**

فإذا أردنا استبدال مواسع واحد بمواسعين له تأثيرهما معًا، لاحظ الشكل (٣-١٠/ب) فإن المواسع المكافئ ($س_م$) يكون جهده مساويًا جهد البطارية، وشحنته تساوي مجموع شحنتي المواسعين؛ أي أن:

$$س_م = \frac{ش_{الكلية}}{جـ}$$

وحيث إن: $ش_{الكلية} = ش_1 + ش_2$

فإن: $س_م جـ = س_1 جـ + س_2 جـ$

وباختصار (جـ) تصبح العلاقة: $س_م = س_1 + س_2$

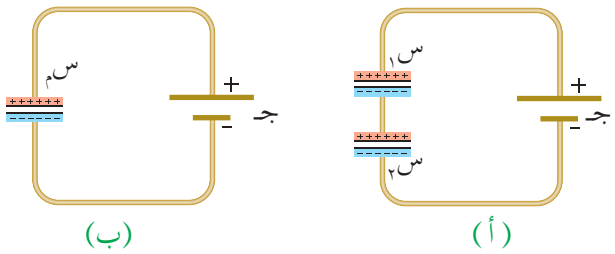
وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المواسعات على التوازي فإن المواسعة المكافئة لها تساوي

المجموع الجبري لتلك المواسعات؛ أي أن:

$$س_م = س_1 + س_2 + س_3 + \cdots \quad (٣-٦)$$

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

يسمى توصيل المواسعات بالطريقة المبينة في الشكل (٣-١١/أ) توصيلًا على التوالي. والتوصيل بهذه الطريقة يجعل صفيحة المواسع الأول المتصلة بالقطب الموجب للبطارية تكتسب شحنة موجبة (+ش)، فتشحن الصفيحة المقابلة لها بالحث بشحنة سالبة (−ش)؛ أما المواسع الثاني فتكتسب صفيحته المتصلة بالقطب السالب للبطارية شحنة سالبة (−ش) وتشحن الصفيحة المقابلة لها بالحث بشحنة موجبة (+ش).



الشكل (٣-١١): التوصيل على التوالي.

وفي حالة التوصيل على التوالي تكون المواسعات متساوية في الشحنة، بينما الجهد الكلي (جهد البطارية) يكون مساويًا مجموع جهد المواسعات.

فإذا أردنا استبدال مواسع واحد بمواسعين له تأثيرهما معًا، لاحظ الشكل (٣-١١/ب) فإن المواسع المكافئ (س م) تكون شحنته مساوية الشحنة الكلية المستمدة من البطارية والتي تساوي شحنة أي من المواسعين، وجهده يساوي مجموع جهدي المواسعين؛ أي أن:

$$س_م = \frac{ش}{جـ}$$

وحيث إن: $جـ = جـ_1 + جـ_2$

فإن: $$\frac{ش}{س_م} = \frac{ش}{س_1} + \frac{ش}{س_2}$$

وباختصار (ش)، تصبح العلاقة: $$\frac{١}{س_م} = \frac{١}{س_1} + \frac{١}{س_2}$$

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

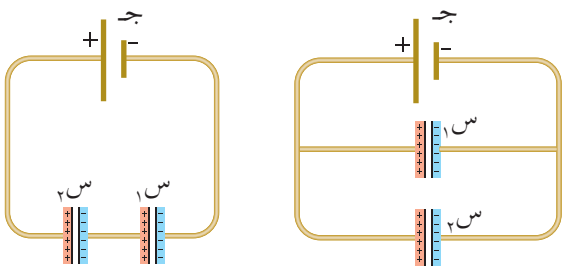
$$\frac{١}{س_م} = \frac{١}{س_1} + \frac{١}{س_2} + \frac{١}{س_3} + \cdots \quad (٣-٧)$$

مثال (٣-٥)

مواسعان (س$_{١}$ = ٣، س$_{٢}$ = ٦) ميكروفاراد وصلا بطريقتين مع مصدر فرق جهد (٣٠) فولت؛ 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.



(ب) (أ)

الشكل (٣-١٢): مثال (٣-٥).

الحل:

■ التوصيل على التوازي:

١ المواسعة المكافئة: س$_{م}$ = س$_{١}$ + س$_{٢}$

س$_{م}$ = ٣ + ٦ = ٩ ميكروفاراد.

لاحظ أن المواسع المكافئ مواسعته أكبر من مواسعة كل من (س$_{١}$) و(س$_{٢}$).

٢ عند توصيل المواسعين على التوازي، فإن (جـ$_{١}$ = جـ$_{٢}$ = جـ = ٣٠ فولت)

شحنة المواسع الأول: ش$_{١}$ = س$_{١}$ جـ = ٣ × ١٠$^{-٦}$ × ٣٠ = ٩٠ × ١٠$^{-٦}$ كولوم

شحنة المواسع الثاني: ش$_{٢}$ = س$_{٢}$ جـ = ٦ × ١٠$^{-٦}$ × ٣٠ = ١٨٠ × ١٠$^{-٦}$ كولوم.

■ التوصيل على التوالي:

١ المواسعة المكافئة: $\frac{١}{س_{م}} = \frac{١}{س_{١}} + \frac{١}{س_{٢}}$

$\frac{١}{س_{م}} = \frac{١}{٣} + \frac{١}{٦}$، س$_{م}$ = ٢ ميكروفاراد.

لاحظ أن مواسعة المواسع المكافئ أقل من مواسعة كل من (س$_{١}$) و(س$_{٢}$).

٢ عند توصيل المواسعين على التوالي، فإن (ش$_{١}$ = ش$_{٢}$ = ش$_{الكلية}$)

لحساب الشحنة الكلية: ش$_{الكلية}$ = س$_{م}$ جـ = ٢ × ١٠$^{-٦}$ × ٣٠ = ٦٠ × ١٠$^{-٦}$ كولوم

جهد المواسع الأول: جـ$_{١}$ = $\frac{ش}{س_{١}}$ = $\frac{٦٠ \times ١٠^{-٦}}{٣ \times ١٠^{-٦}}$ = ٢٠ فولت

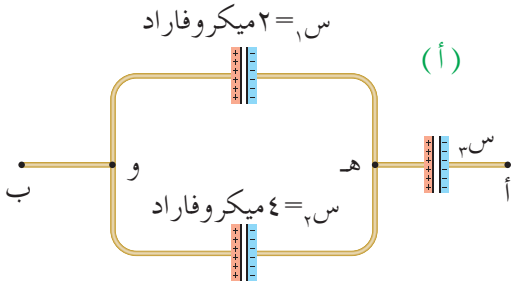
جهد المواسع الثاني: جـ$_{٢}$ = $\frac{ش}{س_{٢}}$ = $\frac{٦٠ \times ١٠^{-٦}}{٦ \times ١٠^{-٦}}$ = ١٠ فولت.

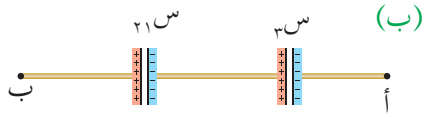
مثال (٣-٦)

يمثل الشكل (٣-١٣/أ) جزءًا من دارة كهربائية يحتوي على ثلاثة مواسعات، إذا علمت أن $جـ_{هـ\,و} = ٨$ فولت، وأن $جـ_{أ\,ب} = ٢٠$ فولت. فاحسب:

١ الشحنة على كل من المواسعين ($س_١$، $س_٢$).

٢ مواسعة المواسع ($س_٣$).





الشكل (٣-١٣): مثال (٣-٦).

الحل:

١ فرق الجهد بين النقطتين (هـ، و) يساوي فرق جهد المواسع الأول ويساوي فرق جهد المواسع الثاني ($جـ_١ = جـ_٢ = ٨$ فولت)

لحساب الشحنة على كل مواسع: $ش_١ = س_١ جـ_١ = ٢ \times ١٠^{-٦} \times ٨ = ١٦ \times ١٠^{-٦}$ كولوم

$ش_٢ = س_٢ جـ_٢ = ٤ \times ١٠^{-٦} \times ٨ = ٣٢ \times ١٠^{-٦}$ كولوم

٢ المواسعان ($س_١$، $س_٢$) يتصلان على التوازي، ويمكن استبدال مواسع مكافئ بهما مواسعته ($س_{٢١}$).

وبما أن المواسع ($س_٣$) يتصل مع ($س_{٢١}$) على التوالي كما يبين الشكل (٣-١٣/ب) فإن:

$ش_٣ = ش_{٢١} = ش_١ + ش_٢$

$ش_٣ = ١٦ \times ١٠^{-٦} + ٣٢ \times ١٠^{-٦} = ٤٨ \times ١٠^{-٦}$ كولوم.

$جـ_{أ\,ب} = جـ_{٢١} + جـ_٣$

$٢٠ = ٨ + جـ_٣$

$جـ_٣ = ١٢$ فولت.

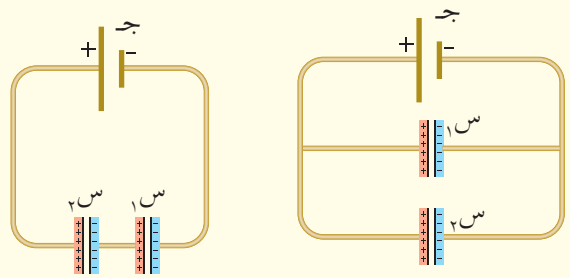
ولحساب المواسعة ($س_٣$) نطبق العلاقة:

$$س_٣ = \frac{ش_٣}{جـ_٣}$$

$$= \frac{٤٨ \times ١٠^{-٦}}{١٢}$$

$= ٤ \times ١٠^{-٦}$ فاراد

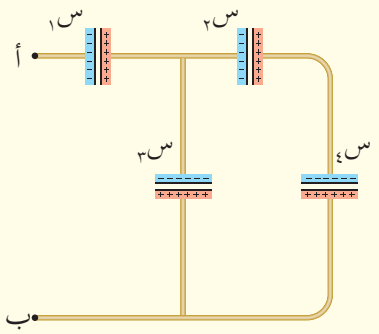
١ معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (٣-١٤)، في أي من الحالتين (أ، ب) يكون مقدار الطاقة المختزنة في المواسعة المكافئة أكبر؟ فسر إجابتك.



(أ) (ب)

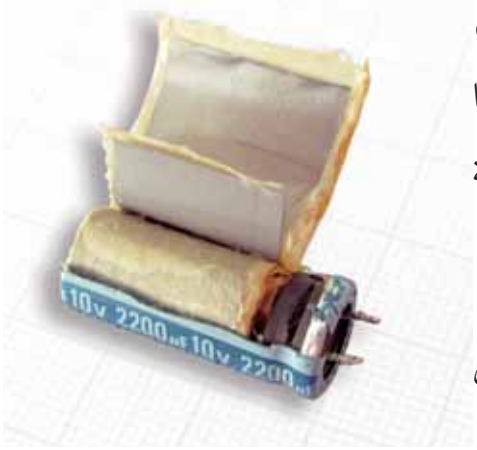
الشكل (٣-١٤): سؤال (١).

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).

تستخدم المواسعات في الكثير 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.

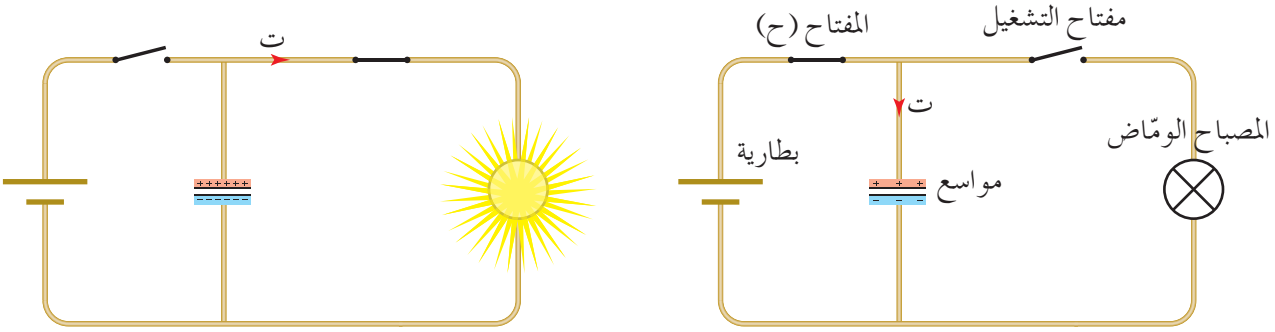


الشكل (٣-١٦) : تصميم أحد المواسعات.

إن تصميم المواسع بهذه الطريقة يمكننا من الحصول على مواسع صغير الحجم مساحة صفيحتيه كبيرة، وتفصل بينهما مسافة صغيرة؛ ما يعني زيادة قدرة المواسع على تخزين الشحنة. 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؛ ما يؤدي إلى تلف المواسع، 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.

ومن التطبيقات العملية للمواسعات دارة المصباح الومّاض في آلة التصوير الفوتوغرافي (Flash Camera)، ويبين الشكل (٣-١٨) مخططًا بسيطًا يوضح مبدأ عمل المصباح الومّاض، فعند توصيل البطارية مع المواسع بإغلاق المفتاح (ح) تبدأ عملية الشحن، وعند الضغط على مفتاح التشغيل تُغلق دارة (المواسع- المصباح) ويفتح المفتاح (ح)، فيحدث تفريغ لشحنة المواسع في المصباح، أي تتحرر الطاقة المختزنة في المواسع، وتتحول إلى طاقة ضوئية في المصباح في فترة زمنية وجيزة.



الشكل (٣–١٨): استخدام المواسع في دارة المصباح الومّاض في آلة التصوير الفوتوغرافي.

مراجعة (٣–٤)

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

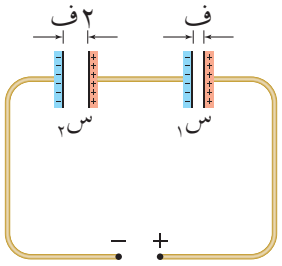
٢ يحتاج مهندس إلى مواسع مواسعته (٢٠) ميكروفاراد، يعمل على فرق جهد (٦) كيلوفولت. ولديه مجموعة من المواسعات المتماثلة كتب على كل منها (٢٠٠ ميكروفاراد، ٦٠٠ فولت)، لكي يحصل على المواسعة المطلوبة وصل عددًا من هذه المواسعات معًا، فهل وصلها على التوالي أم على التوازي؟ وما عدد المواسعات التي استخدمها؟ فسر إجابتك.

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

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

أ $\frac{١}{٣}$ ط　　ب ٣ط　　جـ ٩ ط　　د $\frac{١}{٩}$ ط

٢ مواسعان متساويان في المساحة، البعد بين صفيحتي المواسع الثاني ضعفي البعد بين صفيحتي المواسع الأول، وصلا 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 ٢مـ　　د ٤مـ

شحن مواسع بواسطة بطارية، ثم فصل عنها فكانت الطاقة المختزنة فيه (ط)، إذا زاد البعد بين صفيحتيه إلى ضعفي ما كان عليه، ومستعينًا بهذه المعلومات أجب عن الفقرتين (٣، ٤).

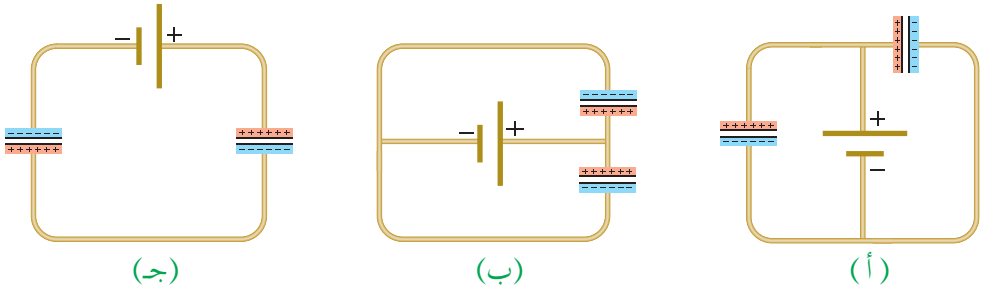
٣ إن الكمية الفيزيائية التي تبقى ثابتة للمواسع هي:

أ الجهد الكهربائي　　ب المواسعة　　جـ الشحنة　　د الطاقة

٤ إن الطاقة المختزنة في المواسع تصبح:

أ $\frac{ط}{٢}$　　ب ط　　جـ ٢ط　　د ٤ط

٢ يبين الشكل (٣-٢٠) ثلاث حالات لمواسعين موصولين مع بطارية، حدد طريقة توصيل المواسعين في كل حالة مع بيان السبب.



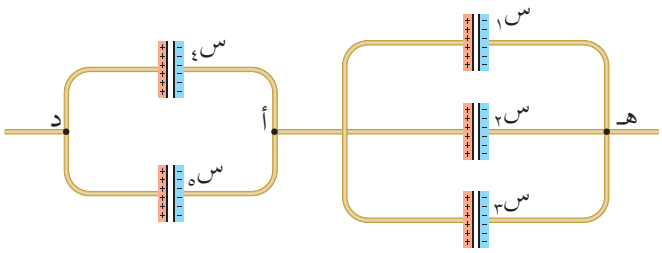
(أ)　　(ب)　　(جـ)

الشكل (٣-٢٠): سؤال (٢).

٣ يبين الشكل (٣-٢١) مجموعة من المواسعات بين النقطتين (هـ، د)، إذا علمت أن المواسعات متساوية في المواسعة، ومواسعة كل منها (٣) ميكروفاراد و(جـ$_{أ}$ = ٦) فولت، احسب:

أ الشحنة الكلية لمجموعة المواسعات.

ب جـ$_{هـ د}$.

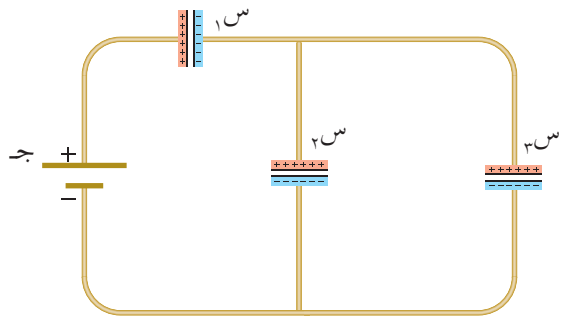


الشكل (٣-٢١): سؤال (٣).

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 أن يختزن المواسعان 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 ضعفا 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).



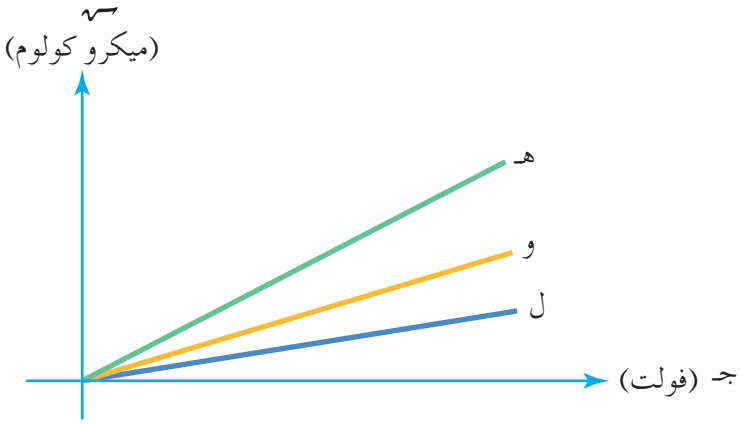
الشكل (٣-٢٢): سؤال (٦).

أ جد المواسعة المكافئة للمجموعة بدلالة (س).

ب رتب هذه المواسعات وفقًا لشحنتها تنازليًا.

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

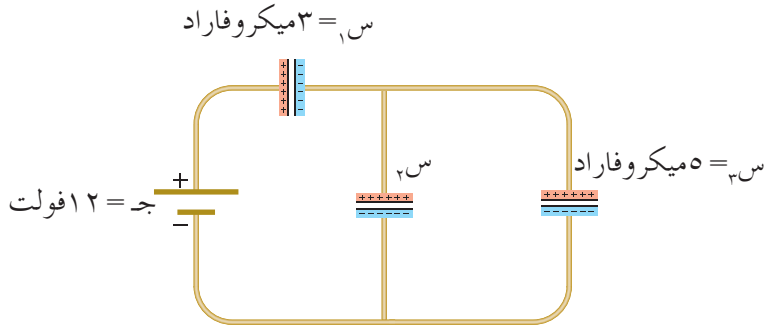
المواسع	مساحة الصفيحة الواحدة	البعد بين الصفيحتين	رمز المنحنى
١	أ	ف	
٢	أ٢	ف	
٣	أ	٢ف	



الشكل (٣-٢٣): سؤال (٧).

٨ مواسع شحنته (ش)، ومساحة كل من صفيحتيه (أ) والبعد بينهما(ف). أثبت أن فرق الجهد بين الصفيحتين (جـ) يعطى بالعلاقة: $جـ = \frac{ف\ ش}{أ\ ٤\pi}$

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

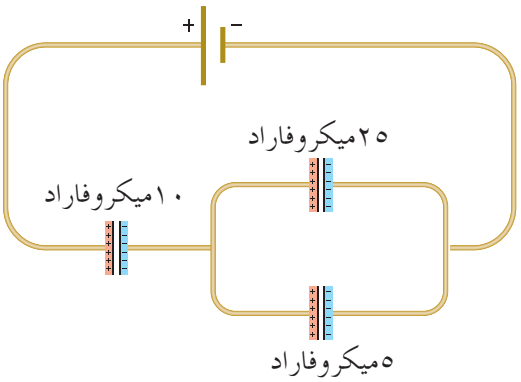


الشكل (٣-٢٤): سؤال (٩).

أ الطاقة المختزنة في المواسع الأول.

ب مواسعة المواسع الثاني.

١٠ 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)	ـــه (ميكروكولوم)	جـ (فولت)	ط (ميكروجول)
٥	٣٠		
١٠			
٢٥			

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

- فرق جهد المصدر.
- المواسعة المكافئة لمجموعة المواسعات.
- الشحنة الكلية في الدارة.
- الطاقة المختزنة في مجموعة المواسعات.

التيار الكهربائي ودارات التيار المباشر

Electric Current and Direct Current Circuits

الفصل الرابع

في هذا الفصل

(٤-١)
التيار الكهربائي.

(٤-٢)
المقاومة الكهربائية وقانون أوم.

(٤-٣)
توصيل المقاومات الكهربائية.

(٤-٤)
القوة الدافعة الكهربائية.

(٤-٥)
القدرة الكهربائية.

(٤-٦)
معادلة الدارة الكهربائية البسيطة.

(٤-٧)
الدارات الكهربائية وقاعدتا كيرشوف.

يُعد التيار الكهربائي من الموضوعات المهمة التي تدرس في أيامنا هذه، لما له من تطبيقات حياتية واسعة. وقد بدأ علم الكهرباء المتحركة (التيار الكهربائي) يشهد تقدمًا في أواخر القرن التاسع عشر، الأمر الذي أدى إلى تطور كبير في مجال صناعة مصادر للطاقة الكهربائية (البطاريات والمولدات...) تزودنا بالتيار الكهربائي، وبدأ استخدامها في مجالات كثيرة منها المواصلات والتدفئة والإضاءة والاتصالات والصناعة. فما المقصود بالتيار الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية؟ وما القوانين التي تحكم الدارات الكهربائية؟

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

تضاء مدينة عمان بالمصابيح ليلًا، وتوصل المصابيح في الدارات الكهربائية على التوازي مع مصدر لفرق الجهد الكهربائي، فيمر التيار الكهربائي عبر هذه المصابيح ناقلًا الطاقة الكهربائية لها، لتحولها إلى طاقة ضوئية وحرارية.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضح المقصود بالمفاهيم: التيار الكهربائي، السرعة الانسياقية، القوة الدافعة الكهربائية، القدرة الكهربائية، وتذكر وحدات قياسها، وتعبر عن العلاقات بينها رياضيًّا.
- تميّز 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.
- تتحقق عمليًّا من قاعدتي كيرشوف.
- تطبق القوانين والعلاقات الخاصة بالدارات الكهربائية في حل مسائل حسابية (عروة، عروتان).

٤–١ التيار الكهربائي
Electric Current

تعمل الأجهزة الكهربائية عند مرور تيار كهربائي فيها، ينشأ عن حركة الشحنات الكهربائية باتجاه واحد عبر وسط يسمح للشحنات الكهربائية بالانتقال عبره، وسواء كانت الشحنات المتحركة موجبة أو سالبة فإنها تسمى ناقلات الشحنة. وفي هذا الدرس سنتناول الموصلات التي تكون ناقلات الشحنة فيها هي الإلكترونات الحرة، مثل النحاس والفضة والفلزات جميعها. إذ تحتوي هذه الموصلات على إلكترونات حرة في حالة حركة عشوائية بسرعات مختلفة مقدارًا واتجاهًا، إلا أن معدل هذه السرعات صفر؛ لأن متوسط عدد الإلكترونات الحرة التي تعبر أي مقطع من الموصل باتجاه ما يساوي 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 في اتجاه واحد تُشكل تيارًا كهربائيًا.**

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

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

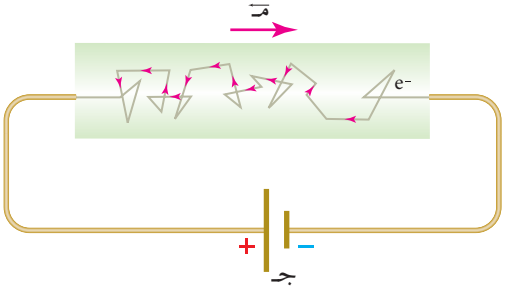
$$\bar{ت} = \frac{\Delta ش}{\Delta ز} \quad \text{.................................} \quad (٤-١)$$

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

ويقاس التيار الكهربائي في النظام العالمي للوحدات بوحدة (كولوم/ثانية) وتُسمى أمبير، ويعرف **الأمبير** **بأنه التيار الكهربائي المار في موصل عندما يعبر مقطع هذا الموصل شحنة مقدارها (١) كولوم في ثانية واحدة.**

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

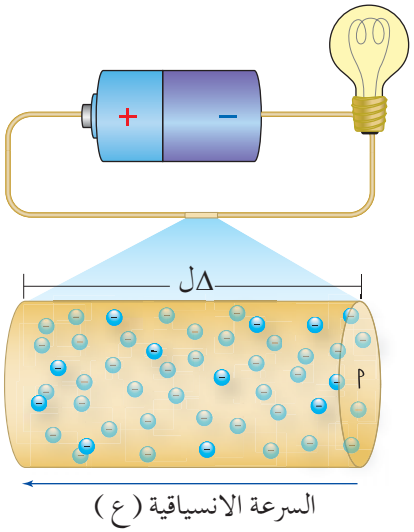
في أثناء حركتها داخل الموصل تصطدم الإلكترونات الحرة مع بعضها بعضًا ومع ذرات الموصل فتفقد جزءًا من طاقتها الحركية وتقل سرعتها، إلا أن وجود المجال الكهربائي يسرّع الإلكترونات من جديد باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة فيها، فتكمل الإلكترونات حركتها بعكس اتجاه المجال الكهربائي. ونتيجة لهذه التصادمات فإن الإلكترونات تتحرك بسرعات متفاوتة وتسلك مسارات متعرجة، ويُبين الشكل (٤-١) نموذجًا للمسار المتعرج لحركة أحد الإلكترونات. ويسمى **متوسط سرعة الإلكترونات الحرة داخل الموصل عندما تنساق بعكس اتجاه المجال الكهربائي المؤثر فيها** **السرعة الانسياقية** (Drift Velocity).



الشكل (٤-١): نموذج للمسار المتعرج لحركة أحد الإلكترونات.

ولتوضيح العلاقة بين التيار الكهربائي الذي يمر في الموصل والسرعة الانسياقية للإلكترونات الحرة في هذا الموصل عند ثبات درجة الحرارة، سندرس حركة الإلكترونات في مقطع موصل طوله (Δل) ومساحته (أ)، فيكون حجمه (Δح = أ Δل) كما في الشكل (٤-٢).

يرمز لعدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجوم من الموصل بالرمز (نَ) وهو ثابت للمادة الواحدة عند ثبات درجة الحرارة، وبذلك فإن عدد الإلكترونات الحرة الكلي الذي يعبر هذا الحجم من الموصل (ن)؛ حيث (ن = نَ Δح)، أي أن: ن = نَ أ Δل.



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

فتكون كمية الشحنة التي تعبر هذا الحجم من الموصل في فترة زمنية (Δز): Δش = ن $ش_e$

وبتعويض (ن)، فإن كمية الشحنة تصبح: Δش = نَ أ Δل $ش_e$

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

$$ت = \frac{\Delta ش}{\Delta ز} = نَ أ\ ش_e \frac{\Delta ل}{\Delta ز}$$

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

$$ت = نَ أ\ ش_e ع \quad \ldots\ldots (٤-٢)$$

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 بضعة ملي مترات في الثانية؛ بسبب العدد الهائل من التصادمات بين الإلكترونات بعضها مع بعض ومع ذرات العنصر الناقل لها. حيث تفقد الإلكترونات جزءًا من طاقتها الحركية بفعل هذه التصادمات فتنتقل هذه الطاقة إلى ذرات الفلز ما يؤدي إلى زيادة اتساع اهتزازات ذرات الفلز وارتفاع درجة حرارة الموصل.

مثال (٤-١)

يمر تيار كهربائي مقداره (٤,٨) أمبير في موصل مساحة مقطعه (٠,٣) مم^{٢}، إذا علمت أن عدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجوم من الموصل تساوي (١٠×١٠^{٢٨}) إلكترون/م^{٣} فاحسب:

١ السرعة الانسياقية للإلكترونات الحرة في هذا الموصل.

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

الحل:

١ $ت = نَ ف_{e} ع$

$$ع = \frac{ت}{نَ ف_{e}}$$

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

$ع = ١ \times ١٠^{-٣}$ م/ث $= ١$ مم/ث.

٢ $ت = \frac{\Delta ش}{\Delta ز}$

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

$\Delta ش = ن_{e} ش$

$$ن = \frac{\Delta ش}{ش_{e}} = \frac{٤٨}{١,٦ \times ١٠^{-١٩}} = ٣ \times ١٠^{٢٠} \text{ إلكترون.}$$

مراجعة (٤-١)

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

٢ ماذا نعني بقولنا إن التيار الكهربائي الذي يمر في موصل يساوي (٦) أمبير؟

٣ فسر: السرعة الانسياقية للإلكترونات الحرة في الفلزات صغيرة لا تتعدى بضعة ملي مترات في الثانية الواحدة.

٤ وضح أثر التصادمات التي تحدث داخل الموصل في كل مما يأتي عند مرور تيار كهربائي فيه:

أ حركة الإلكترونات.

ب ذرات الموصل.

جـ درجة حرارة الموصل.

٤—٢ المقاومة الكهربائية وقانون أوم
Electric Resistance and Ohm's Law

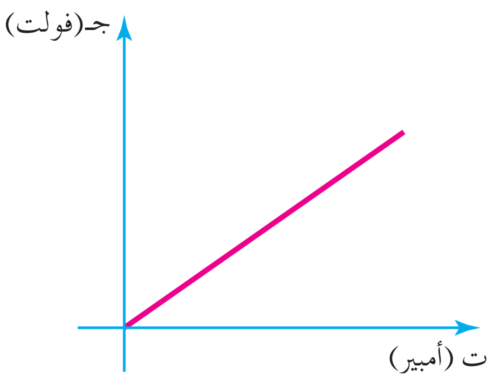
يختلف التيار الكهربائي الذي يمر في موصل تبعًا لاختلاف فرق الجهد بين طرفيه، إلّا أن فرق الجهد ليس العامل الوحيد الذي يحدد قيمة التيار الكهربائي في الموصل. حيث تختلف المواد الموصلة في قابليتها لمرور التيار الكهربائي، فالإلكترونات في أثناء حركتها داخل الموصل تواجه تصادمات عدة مع بعضها بعضًا ومع ذرات الموصل؛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

ويمكن حساب المقاومة الكهربائية لموصل (م) بإيجاد نسبة فرق الجهد بين طرفيه (Δجـ) إلى التيار الكهربائي الذي يمر فيه (Δت)، وفق العلاقة الآتية:

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

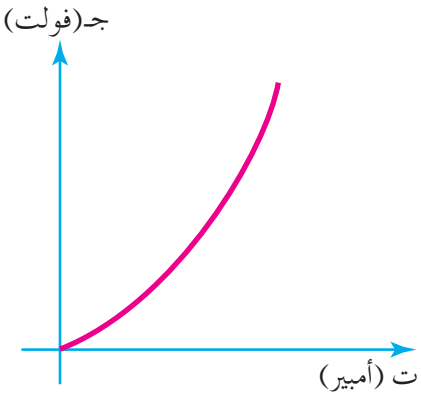
نجد من العلاقة (٤—٣) أن المقاومة تقاس بوحدة فولت/أمبير، ووفق النظام العالمي للوحدات تسمى هذه الوحدة أوم، ويُرمز لها بالرمز اللاتينيّ (Ω). ويُعرف **الأوم بأنه مقاومة موصل يمر فيه تيار مقداره (١) أمبير، عندما يكون فرق الجهد بين طرفيه (١) فولت.**

عند دراسة العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي لمقاومات فلزية مختلفة، وجد العالم أوم تجريبيًّا أن نسبة فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة إلى التيار الكهربائي المار فيها تبقى ثابتة مع ثبات 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 ثبات 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 أن ميل المنحنى في الشكل ثابت، حيث: الميل = $\frac{\Delta جـ}{\Delta ت}$ = م، وعليه تكون المقاومة ثابتة.



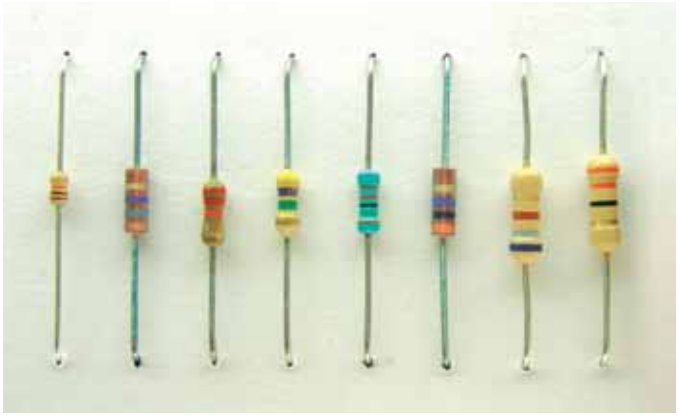
الشكل(٤—٣): العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي في المقاومات الأومية.

توجد 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، إذ يكون الميل غير ثابت أي أن المقاومة متغيرة مثل مقاومة أشباه الموصلات. وستقتصر دراستنا على المقاومات الأومية.



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

وتستخدم المقاومات بشكل كبير في الأجهزة والدارات الكهربائية للتحكم في قيمة التيار الكهربائي المار فيها، ولحماية بعض الأجهزة من التلف، وأكثرها استخدامًا المقاومات الكهربائية الكربونية التي يبينها الشكل (٤-٥)، وتتميز هذه المقاومات بألوان معينة وترتيب معين يمكن من خلالها مَعرفة مقدار كل مقاومة؛ ليتم اختيار المناسب منها عند الاستخدام.


الشكل(٤-٥) المقاومات الكهربائية الكربونية.

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 المادة، وقد درست أن طول الموصل (ل) يؤثر في مقاومته الكهربائية؛ فكلما زاد طول الموصل زادت فرصة حدوث تصادمات الإلكترونات الحرة فيه مع بعضها بعضًا 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 $\frac{١}{أ}$)، وتختلف المقاومة الكهربائية باختلاف نوع المادة التي يصنع منها الموصل. وبناء على ما سبق يمكن حساب المقاومة الكهربائية وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$م = \frac{ρ ل}{أ} \quad (٤-٤)$$

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 عدديًّا مقاومة جزء من تلك المادة طوله (١)م ومساحة مقطعه (١)م^{٢} عند درجة حرارة محددة.**

نشاط (٤-١) المقاومية الكهربائية

الهدف: تصنيف المواد وفق قيم المقاومية الكهربائية .

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

١) أي المواد الواردة في الجدول لها أكبر مقاومية كهربائية عند درجة حرارة ٢٠ °س؟

٢) صنف المواد الواردة في الجدول إلى ثلاثة أنواع وفق قيم المقاومية، وأعط اسمًا لكل نوع.

٣) فسر استخدام المطاط في صناعة مقابض أدوات صيانة الأجهزة الكهربائية.

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

المادة	المقاومية (Ω.م)
الفضة	$١,٥٩ \times ١٠^{-٨}$
النحاس	$١,٧ \times ١٠^{-٨}$
الذهب	$٢,٤٤ \times ١٠^{-٨}$
الألمنيوم	$٢,٨٢ \times ١٠^{-٨}$
التنغستن	$٥,٦ \times ١٠^{-٨}$
الحديد	١٠×١٠^{-٨}
البلاتين	١١×١٠^{-٨}
الزئبق	٩٨×١٠^{-٨}
النيكروم	١٠٠×١٠^{-٨}
الكربون	$٣,٥ \times ١٠^{-٥}$
السيليكون	٠,١ - ٦٠
الجرمانيوم	٠,٤٦
الزجاج	$١٠^{١٠} - ١٠^{١٤}$
المطاط القاسي	$١٠^{١٣}$
الكوارتز	٧٥×١٠^{١٦}

تلاحظ من قيم المقاومية الكهربائية الواردة في الجدول (٤-١)، أن المواد تصنف إلى ثلاثة أنواع وفق قيم المقاومية الكهربائية لكل منها؛ مواد موصلة ذات مقاومية كهربائية صغيرة جدًّا مثل: (الفضة والنحاس والحديد)، ومواد شبه موصلة ذات مقاومية متوسطة مثل: (الكربون والجرمانيوم والسيليكون)، ومواد عازلة ذات مقاومية عالية مثل: (الزجاج والمطاط والكوارتز)، وتلاحظ أن الموصلات الفلزية لها قيم مقاومية كهربائية أقل بكثير من مقاومية أشباه الموصلات

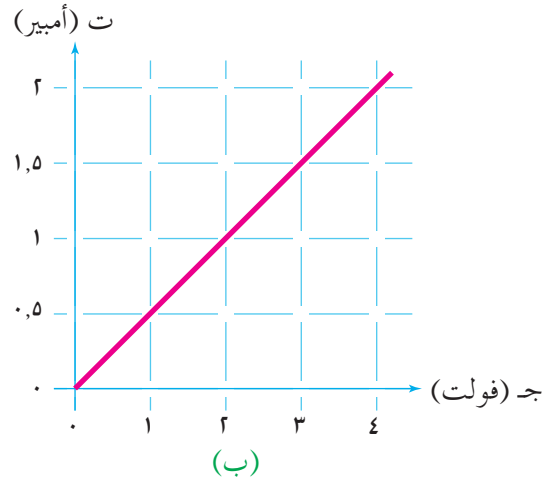
والمواد العازلة، أي أنها موصلة جيدة للكهرباء، ويفسر ارتفاع مقاومية المواد العازلة استخدام بعضها كالمطاط مثلًا في صناعة مقابض أدوات صيانة الأجهزة الكهربائية، مثل مقبض المفك.

وقد وُجد عمليًّا أن قيم المقاومية للموصلات الفلزية تزداد بزيادة درجة حرارتها؛ بسبب زيادة الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة فيها؛ ما يؤدي إلى المزيد من التصادمات. وتقل المقاومية للموصلات بنقصان درجة حرارتها. وقد وجد تجريبيًّا أن المقاومية والمقاومة الكهربائية لبعض المواد تهبط بشكلٍ مفاجئ إلى الصفر عند درجة حرارة منخفضة جدًّا، عندها تُصبح تلك المواد **فائقة الموصلية** (Super Conductors).

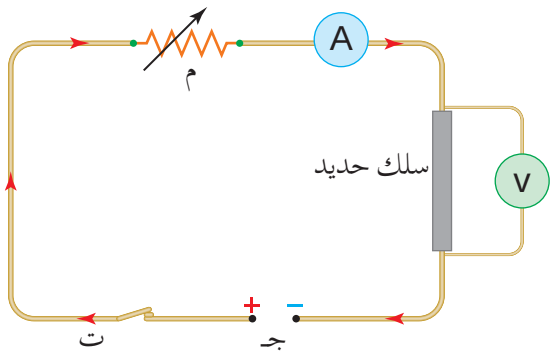
ومع تقدم علم المواد فائقة الموصلية، استخدمت هذه المواد في نقل الطاقة وتخزينها من غير ضياع يذكر، وفي إنتاج مجالات مغناطيسية قوية تُستخدم في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي MRI (Magnetic Resonance Imaging)، وفي القطارات السريعة جدًّا. ولصعوبة تبريد الموصلات وارتفاع التكلفة المادية لتصبح فائقة الموصلية؛ فإن بحوث العلماء تنصب على إنتاج مواد فائقة الموصلية في درجات الحرارة العادية.

مثال (٤-٢)

في تجربة لقياس مقاومة سلك طويل من الحديد ملفوف على بكرة، مساحة مقطعه (١) مم^{٢}، وصل طالب طرفي السلك في دارة كهربائية كما في الشكل (٤-٦/ أ)، ثم أخذ قراءات مختلفة لتيار الدارة وفرق الجهد بين طرفي السلك، ومثّل العلاقة بينهما بيانيًّا كما في الشكل (٤-٦/ب)، إذا علمت أن درجة حرارته بقيت ثابتة. ومعتمدًا على الشكل:



(ب)



(أ)

الشكل (٤-٦): مثال (٤-٢).

١ جد مقاومة السلك (م).

٢ إذا علمت أن ($\rho_{\text{الحديد}}$ = ١٠×١٠$^{-٨}$) Ω.م، جد الطول الكلي للسلك الذي استخدمه الطالب.

٣ إذا استخدم الطالب جزءًا من اللفة طوله (لَ = ٢) م، فجد مقاومة هذا الجزء (مَ) ومقاوميته.

الحل:

١ من الشكل (٤-٦/ب) الميل = $\frac{\Delta ت}{\Delta جـ} = \frac{١}{م}$

$\frac{١}{م} = \frac{١-٢}{٢-٤} = \frac{١}{٢}$ ⇐ م = ٢ Ω

٢ $م = \frac{ل\rho}{أ}$

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

ل = ٢٠ م

٣ بما أن المقاومية تعتمد فقط على درجة الحرارة ونوع مادة الموصل؛ فإنها تبقى ثابتة عند تغيير طول الموصل، وبما أن المقاومة تتناسب طرديًّا مع طول الموصل عند ثبات كل من (أ، ρ) فإن:

$\frac{م}{مَ} = \frac{ل}{لَ}$

م لَ = ل مَ

٢×٢ = ٢٠ مَ ⇐ مَ = ٠,٢ Ω .

مراجعة (٤-٢)

١ ما المقصود بكل من: المقاومة الكهربائية، والأوم، والمقاومية الكهربائية؟

٢ ماذا نعني بقولنا إن:

أ مقاومة موصل تساوي (٣) أوم؟

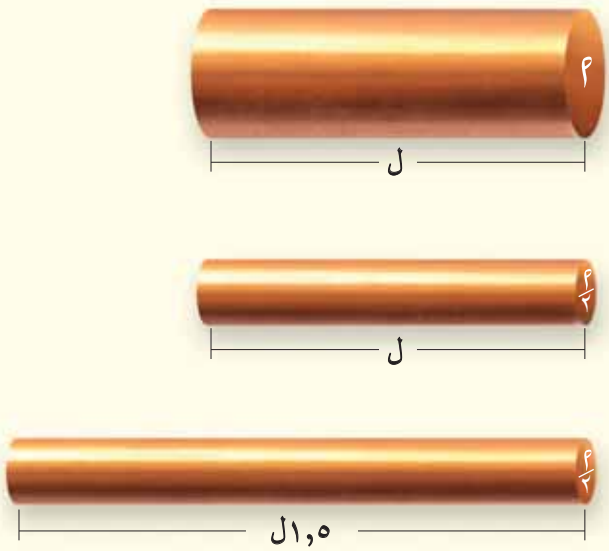
ب مقاومية النحاس تساوي ($١,٧ \times ١٠^{-٨}$) Ω.م عند درجة حرارة (٢٠°) س؟

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

أ مقاومة الموصل؟

ب مقاومية مادة الموصل؟

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

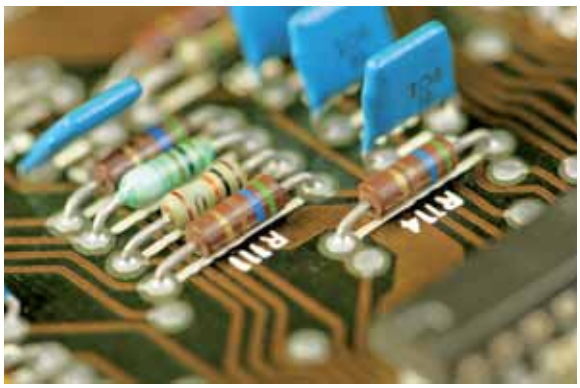


الشكل (٤-٧): سؤال (٤).

٤-٣ توصيل المقاومات الكهربائية

Combination of Electric Resistors

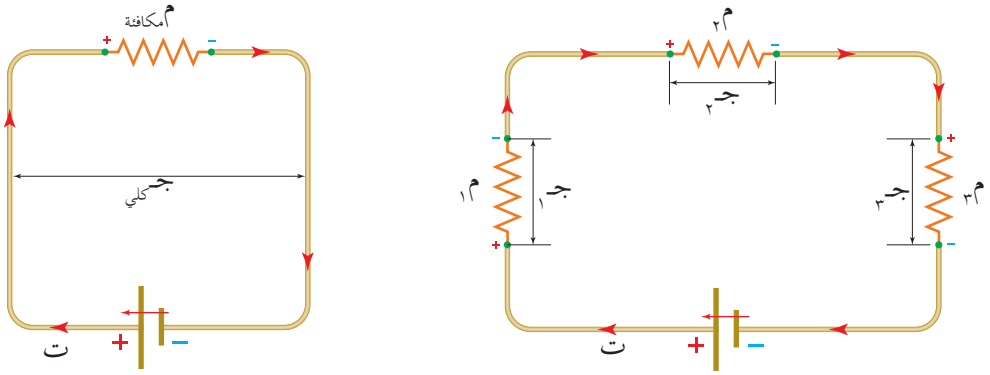
تستخدم المقاومات الكهربائية في الأجهزة على نطاق واسع، فإذا تمكنت من فتح جهاز كهربائي كجهاز التحكم عن بعد للتلفاز مثلًا، ستجد الكثير من المقاومات وُصلت بطرائق مختلفة كما في الشكل (٤-٨)، منها التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي، أو الجمع بينهما للحصول على المقاومة المطلوبة. ويعود سبب الاختلاف في طريقة التوصيل إلى اختلاف الغاية من الاستخدام.



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/أ)، بينما يتجزأ فرق جهد المصدر بنسبة طردية مع مقدار المقاومة، ويكون مجموع فروق الجهد للمقاومات جميعها مساويًا فرق جهد المصدر ($جـ_{الكلي} = جـ_{١} + جـ_{٢} + جـ_{٣}$).



(أ) (ب)

الشكل(٤-٩): توصيل المقاومات على التوالي.

ويمكن استبدال مقاومة واحدة بهذه المقاومات تسمى المقاومة المكافئة ($م_{المكافئة}$) يكون لها الجهد الكلي نفسه، ويمر فيها التيار نفسه كما يبين الشكل (٤-٩/ب)، ولحساب المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة على التوالي، نستخدم العلاقة الآتية: $جـ_{الكلي} = جـ_{١} + جـ_{٢} + جـ_{٣}$

وبما أن (جـ = ت م) فإن: ت م$_{المكافئة}$ = ت م$_{١}$ + ت م$_{٢}$ + ت م$_{٣}$

وباختصار (ت) تصبح العلاقة: م$_{المكافئة}$ = م$_{١}$ + م$_{٢}$ + م$_{٣}$

وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المقاومات على التوالي تكون المقاومة المكافئة لها هي المجموع الجبري لتلك المقاومات؛ أي أن:

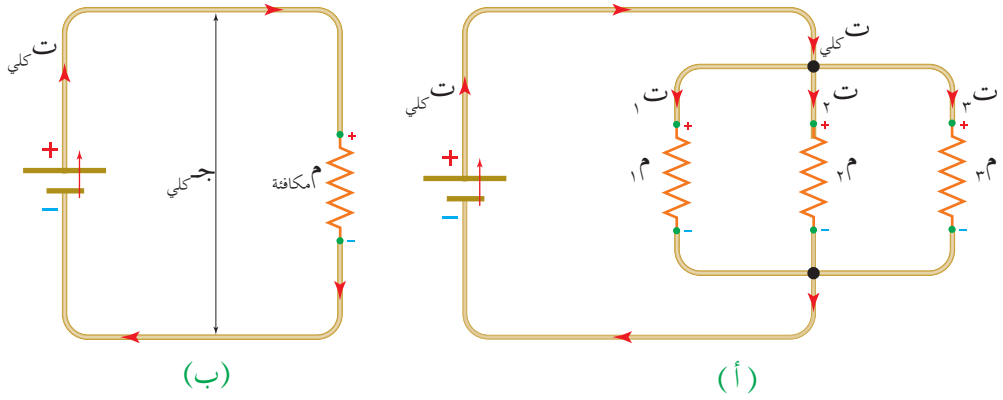
$$م_{المكافئة} = م_{١} + م_{٢} + م_{٣} + \cdots \quad (٤-٥)$$

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، 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 من غير أن يؤثر في تيار الدارة 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/أ)، ويكون فرق الجهد بين طرفي كل فرع مساويًا فرق الجهد بين طرفي المصدر، ويتجزأ تيار الدارة (ت$_{كلي}$) عند نقطة التفرع بين هذه المقاومات بنسبة عكسية مع مقدار المقاومة، ويكون مجموع تيارات الفروع مساويًا تيار المصدر (ت$_{كلي}$ = ت$_{١}$ + ت$_{٢}$ + ت$_{٣}$).

ويمكن استبدال مقاومة واحدة بهذه المقاومات تسمى المقاومة المكافئة (م$_{المكافئة}$) يكون لها الجهد نفسه، ويمر فيها التيار الكلي نفسه كما يبين الشكل (٤-١٠/ب)، ولحساب المقاومة



الشكل(٤-١٠) توصيل المقاومات على التوازي.

المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة على التوازي، نستخدم العلاقة الآتية:

$$ت_{الكلي} = ت_{١} + ت_{٢} + ت_{٣}$$

$$\frac{جـ_{الكلي}}{م_{المكافئة}} = \frac{جـ_{١}}{م_{١}} + \frac{جـ_{٢}}{م_{٢}} + \frac{جـ_{٣}}{م_{٣}}$$

وبما أن فرق الجهد بين طرفي الفروع متساوٍ (جـ$_{الكلي}$ = جـ$_{١}$ = جـ$_{٢}$ = جـ$_{٣}$) فإن العلاقة تصبح:

$$\frac{١}{م_{المكافئة}} = \frac{١}{م_{١}} + \frac{١}{م_{٢}} + \frac{١}{م_{٣}}$$

وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المقاومات على التوازي تكون المقاومة المكافئة لها:

$$\frac{١}{م_{المكافئة}} = \frac{١}{م_{١}} + \frac{١}{م_{٢}} + \frac{١}{م_{٣}} + \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٤-٦)$$

تُعطي العلاقة (٤-٦) مقلوب المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة معًا 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.

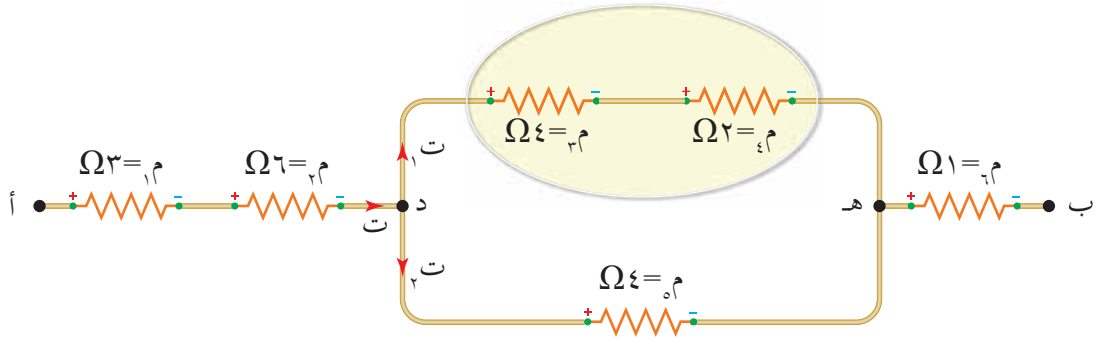
وتُتبع هذه الطريقة في التوصيل إذا أردنا تجزئة التيار الكهربائي المار في الدارة. ومن أهم تطبيقات توصيل المقاومات على التوازي، توصيل جهاز الفولتميتر الذي يمتاز بمقاومته الكبيرة جدًّا في الدارة ليقيس فرق الجهد بين طرفي أي عنصر من غير أن يؤثر في التيار المار فيه. وتستخدم طريقة التوصيل على التوازي أيضًا في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

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/ أ): مثال (٤-٣).

الحل:

١ لا؛ لأن المقاومتين (م٣، م٥) ليس لهما فرق الجهد نفسه، فهما اشتركتا في نقطة البداية، و لم تشتركا في نقطة النهاية، فالمقاومة (م٣) متصلة مع (م٤) على التوالي من نقطة التفرع (د) إلى نقطة التفرع (هـ).

٢ لإيجاد المقاومة المكافئة يبسط الشكل، فنبدأ بالفروع، ومن الشكل المحاط يتبين أن المقاومتين (م٣، م٤) موصولتان على التوالي، وسنرمز لمكافئتهما بالرمز (م٧)؛ أي أن:

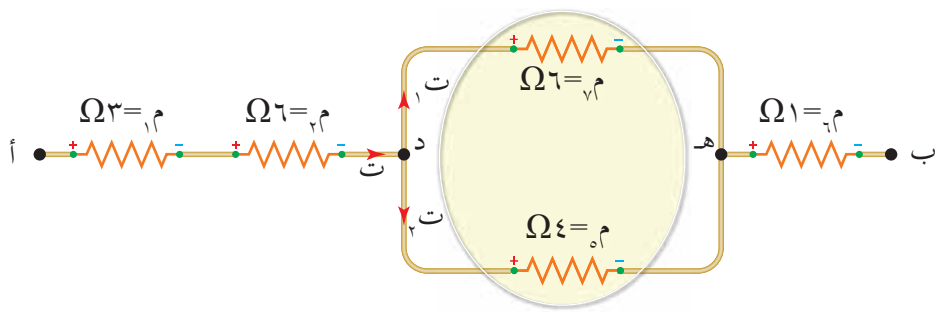
$$م_{٧} = م_{٣} + م_{٤}$$

$$م_{٧} = ٤ + ٢ = ٦\ \Omega$$

أما (م٧، م٥) فموصولتان على التوازي ومكافئتهما (م٨) كما يبين الشكل (٤-١١/ب) (لاحظ أنه يمر فيهما تيار مختلف، حيث يتجزأ التيار الكهربائي عند نقطة التفرع (د)، ويعود ليجتمع عند النقطة (هـ)).

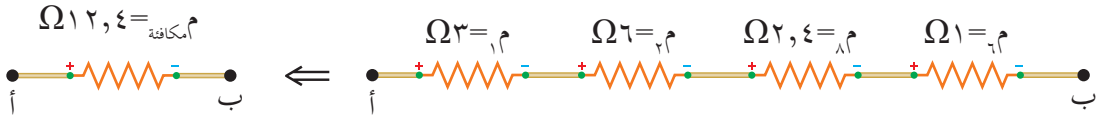
$$\frac{١}{م_{٨}} = \frac{١}{م_{٧}} + \frac{١}{م_{٥}}$$

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



الشكل (٤-١١/ ب): مثال (٤-٣).

ومن الشكل (٤-١١/جـ) نلاحظ أن المقاومات (م١، م٢، م٨، م٦) موصولة معًا على التوالي، ويمكن حساب المقاومة المكافئة بين النقطتين (أ، ب):



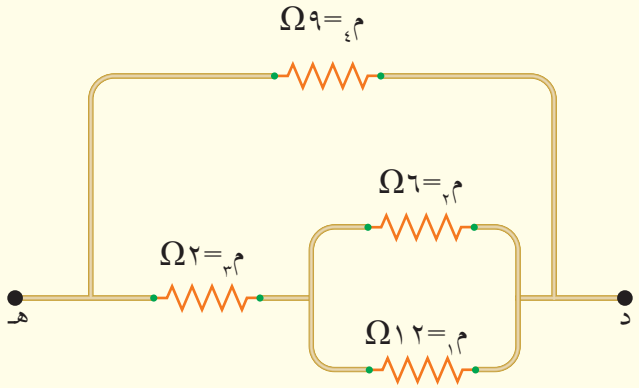
الشكل (٤-١١/ جـ): مثال (٤-٣).

$$م_{مكافئة} = م_{١} + م_{٢} + م_{٨} + م_{٦}$$

$$= ٣ + ٦ + ٢,٤ + ١ = ١٢,٤\ \Omega$$

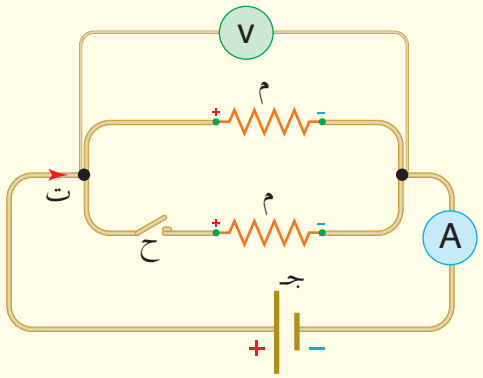
مراجعة (٤-٣)

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



الشكل (٤-١٢): سؤال (١).

٢ يبين الشكل (٤-١٣)، دارة كهربائية. ماذا يحدث لقراءة كل من الأميتر والفولتميتر بعد إغلاق المفتاح؟



الشكل (٤-١٣): سؤال (٢).

٣ فسر العبارات الآتية:

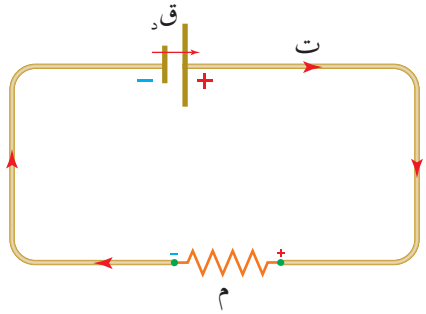
أ توصل المصابيح في المنازل على التوازي.

ب يكون التيار الكهربائي الكلي لدارة فيها ثلاث مقاومات موصولة معًا على التوالي أقل من التيار الكلي في الدارة نفسها عند وصل المقاومات نفسها 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) يمر في الدارة تيار كهربائي، ويبين الشكل اتجاه التيار الاصطلاحي الذي يعبر عن اتجاه حركة الشحنات الموجبة.



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

تُعدُّ البطارية مصدرًا يزود الدارة بالطاقة الكهربائية؛ إذ تعمل الطاقة المتحررة من التفاعلات الكيميائية داخل البطارية على جعل أحد قطبيها موجبًا والآخر سالبًا، فينشأ فرق في الجهد الكهربائي بين طرفيها ويتولد مجال كهربائي في الأسلاك يؤدي إلى دفع الشحنات الموجبة من القطب الموجب، عبر الأسلاك، مرورًا بالمقاومة، نحو القطب السالب للبطارية. ولكي تتابع الشحنات حركتها داخل البطارية من القطب السالب ذي الجهد المنخفض، إلى القطب الموجب ذي الجهد المرتفع؛ تبذل البطارية شغلًا على الشحنات فتنقل إليها الطاقة المتحررة من التفاعلات، 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 في الدارة، فالتيار لا يتلاشى أو يتوقف إلّا 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.

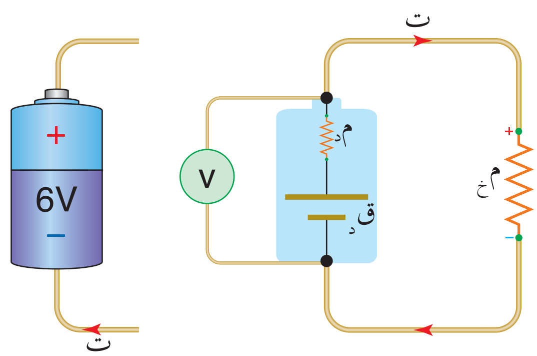
ويُعرف **الشغل الذي تبذله البطارية لدفع وحدة الشحنات الموجبة من القطب السالب إلى القطب الموجب داخلها** **بالقوة الدافعة الكهربائية** (Electromotive Force)، ويُرمز لها بالرمز ($ق_د$)، ويُعبر عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

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

حيث (ش): الشغل الذي تبذله البطارية، (سـ): 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.** ($ق_د$).

وتستهلك معظم الطاقة التي تنتجها البطارية في المقاومات الخارجية ($م_خ$)، إلا أن جزءًا صغيرًا من هذه الطاقة يستهلك داخل البطارية، لوجود مقاومة تعيق حركة الشحنات عند مرورها عبر البطارية، وتسمى هذه المقاومة **المقاومة الداخلية للبطارية** ويرمز لها بالرمز ($م_د$).

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 في الشكل القوة الدافعة الكهربائية لها، وعندما تكون الدارة مغلقة نجد أن قراءة الفولتميتر التي تمثل فرق الجهد بين قطبي البطارية تكون أقل من قيمة القوة الدافعة الكهربائية للبطارية بمقدار ($ت م_د$)؛ بسبب استهلاك جزء من الطاقة التي تنتجها البطارية في المقاومة الداخلية للبطارية، ويمكن التعبير عن فرق الجهد بين قطبي البطارية (جـ) بالعلاقة الآتية:

$$جـ = ق_د - ت م_د \quad .... (٤-٨)$$

حيث ($ت م_د$): جهد المقاومة الداخلية ($جـ_{م_د}$) وهو الهبوط في جهد البطارية.

ونستنتج من العلاقة (٤−٨) أن فرق الجهد بين قطبي البطارية يكون مساويًا قوتها الدافعة الكهربائية في حالتين؛ عندما تكون المقاومة الداخلية للبطارية مهملة ($م_د = ٠$)، أوعندما تكون الدارة مفتوحة (ت=٠) والبطارية موصولة مع الفولتميتر؛ فمقاومة الفولتميتر كبيرة جدًّا، فيؤول التيار عبرها إلى الصفر، عندئذ يقرأ الفولتميتر القوة الدافعة الكهربائية.

مراجعة (٤-٤)

١ ماذا نعني بقولنا إن القوة الدافعة الكهربائية لبطارية تساوي (٣) 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 طرفا البطارية بفولتميتر. 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؟

٤–٥ القدرة الكهربائية
Electric Power

تعرف **القدرة الكهربائية** بأنها **الشغل المبذول (ش) لنقل شحنة بين نقطتين بينهما فرق في الجهد في وحدة الزمن** (ز)، ويعبر عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

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

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 (٤–٧): ش = ق$_{د}$ ـــ

وبقسمة طرفي المعادلة على زمن نقل الشحنة (ز)، فإن: $\frac{\text{ش}}{\text{ز}} = \text{ق}_{د} \frac{\text{ـــ}}{\text{ز}}$

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

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

وتعبر قدرة البطارية أيضًا 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 رياضية لحساب القدرة المستهلكة في مقاومة (م)، فرق الجهد بين طرفيها (جـ) فإننا نحسب الشغل (ش) الذي تبذله البطارية لنقل شحنة (ـــ) عبر هذه المقاومة من العلاقة:

ش = جـ ـــ

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

ومن تعريف القدرة، والتيار الكهربائي نجد أن:

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

وباستخدام العلاقة (جـ= ت م) يمكن التعبير عن القدرة المستهلكة في مقاومة بصيغتين مكافئتين للعلاقة (٤-١١) كما يأتي:

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

ومن قانون حفظ الطاقة؛ فإن القدرة التي تنتجها البطارية (ق$_{ت}$) في الدارة المغلقة، تكون مساويةً القدرة التي تستهلكها مقاومات الدارة الداخلية والخارجية جميعها؛ أي أن:

القدرة المنتجة = القدرة المستهلكة

ويمكن التعبير عن هذه العلاقة بالصورة الآتية:

$$\text{ق}_{ت} = \text{ت}^{٢}\,\text{م}_{د} + \text{ت}^{٢}\,\text{م}_{خ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٤-١٢)$$

إن معرفتنا قدرة جهاز كهربائي تمكننا من حساب الطاقة التي يستهلكها الجهاز عند تشغيله فترة من الزمن. فمثلًا إذا كتب على مصباح (٨٠واط، ١٢٠فولت) فهذا يعني أن المصباح يستهلك (٨٠) جول من الطاقة كل ثانية، وذلك عند وصله مع مصدر فرق جهد (١٢٠) فولت.

تكون الطاقة المستهلكة في أي جهاز عند تشغيله لمدة من الزمن من العلاقة الرياضية الآتية:

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

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

مثال (٤-٤)

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

١ مقاومة ملف مجفف الشعر.

٢ الطاقة الكهربائية المستهلكة عند تشغيل المجفف لمدة (١٥) دقيقة بوحدة (كيلوواط.ساعة).

الحل:

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

$$١ \times ١٠^{٣} = \frac{(٢٠٠)^{٢}}{\text{م}} \Leftarrow \text{م} = \frac{٤٠٠٠٠}{١٠٠٠} = ٤٠\ \Omega$$

٢ ط = القدرة × ز (لتحويل الدقائق إلى ساعات نقسم على ٦٠؛ وعليه فإن ١٥ دقيقة = ٠,٢٥ ساعة).

ط = ١ × ٠,٢٥ = ٠,٢٥ كيلو واط.ساعة

مثال (٤-٥)

مدفأة كهربائية، صُنع ملف التسخين فيها من سبيكة 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 مصدر فرق جهد (٢٢٠) فولت.

الحل:

١ المعدل الزمني للطاقة المستهلكة يمثل القدرة، ويمكن حسابها من العلاقة:

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

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

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

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

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

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

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

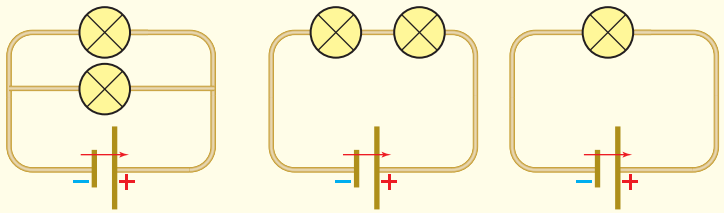
مراجعة (٤-٥)

١ ماذا نعني بقولنا إن قدرة مجفف شعر كهربائي تساوي (٢) كيلو واط؟

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

٣ جد الطاقة المكافئة للكيلوواط.ساعة بوحدة الجول.

٤ يبين الشكل (٤-١٦) خمسة مصابيح متماثلة في ثلاث دارات، وصلت مع ثلاث بطاريات متماثلة مقاوماتها الداخلية مهملة. رتب الدارات تصاعديًّا وفق القدرة المستهلكة في كل منها.

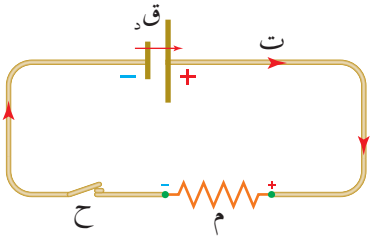


الشكل (٤-١٦): سؤال (٤).

٤-٦ معادلة الدارة الكهربائية البسيطة

Simple Electric Circuit Equation

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



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

(٤-٦-١) معادلة الدارة الكهربائية البسيطة (Simple Electric Circuit Equation)

توصلنا في البند السابق إلى أن القدرة التي تنتجها البطارية في الدارة المغلقة، تستهلك في مقاومات الدارة الداخلية والخارجية، ومن العلاقة: $ق_د ت = ت^2 م_د + ت^2 م_خ$

وبقسمة طرفي المعادلة على (ت) وإعادة ترتيب العلاقة الرياضية نجد أن: $ت = \frac{ق_د}{(م_د + م_خ)}$

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

$ت = \frac{\Sigma ق_د}{\Sigma م_د + \Sigma م_خ}$ ، وبصورة عامة:

$$ت = \frac{\Sigma ق_د}{\Sigma م} \quad \ldots\ldots (٤-١٤)$$

ويطلق على العلاقة (٤-١٤) **معادلة الدارة الكهربائية البسيطة**. حيث($\Sigma ق_د$) هو المجموع الجبري للقوى الدافعة الكهربائية في الدارة.

ولتعرف أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة ادرس النشاط الآتي.

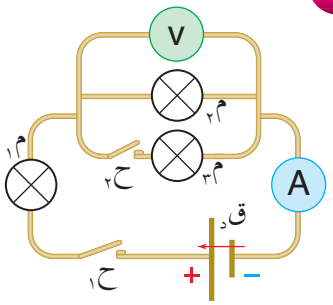
نشاط (٤ - ٢) أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة البسيطة

الهدف: دراسة أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة.

المواد والأدوات: ثلاثة مصابيح متماثلة، وأميتر، وفولتميتر، ومصدر فرق جهد (بطارية)، ومفتاحان كهربائيان، وأسلاك توصيل.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ ركب الدارة المبينة في الشكل (٤-١٨).



الشكل (٤-١٨): نشاط (٤-٢).

٢ أغلق المفتاح (ح١) فقط، مع بقاء (ح٢) مفتوحًا.

٣ لاحظ إضاءة المصباحين (م١، م٢)، هل شدة إضاءة المصباحين متماثلة؟

٤ سجل قراءة كل من الأميتر، والفولتميتر.

٥ أغلق المفتاح (ح٢) مع بقاء (ح١) مغلقًا.

٦ لاحظ إضاءة المصابيح الثلاثة (م١، م٢، م٣)؛ ماذا حدث لشدة إضاءة المصباحين (م١) و (م٢)؟

٧ سجل قراءة الأميتر، هل تغيرت؟ كيف تفسر ذلك.

٨ سجل قراءة الفولتميتر، هل تغيرت؟ كيف تفسر ذلك.

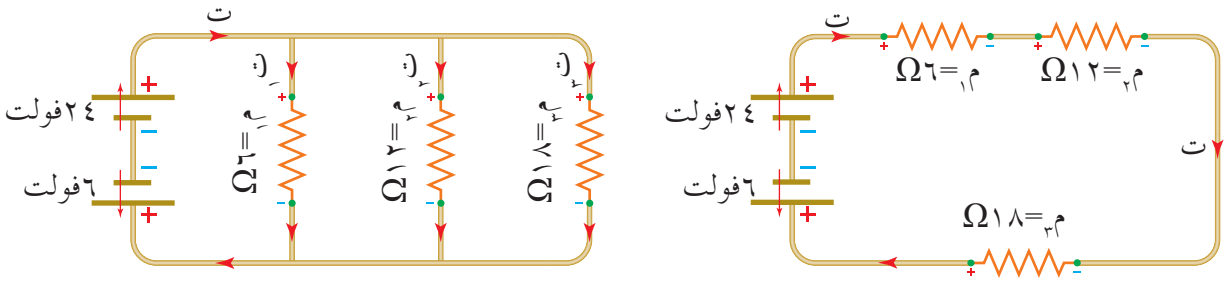
يتبين لك من إجراء النشاط أنه عند إغلاق المفتاح (ح١) فقط، فإن شدة إضاءة المصباحين (م١، م٢) تكون متماثلة، فكلاهما يمر فيه التيار نفسه. وعند إغلاق المفتاح (ح٢) يضاف إلى الدارة مقاومة ثالثة على التوازي، فتقل المقاومة الكلية في الدارة، ووفقًا لمعادلة الدارة البسيطة ($ت = \frac{\sum ق_د}{\sum م}$) فإن نقصان المقاومة الكلية يؤدي إلى زيادة التيار الكلي، وهذا يفسر زيادة قراءة الأميتر، وزيادة شدة إضاءة المصباح الأول، لاحظ أن مجموع فرق جهد كل من المصباحين (م١، م٢) يجب أن يساوي جهد البطارية. أما زيادة التيار المار في المصباح (م١) عند إغلاق المفتاحين فتدل على زيادة جهده وفق العلاقة (جـ = ت م)، وهذا يعني نقصان جهد المصباح (م٢)؛ ما يفسر نقصان قراءة الفولتميتر وانخفاض شدة إضاءة المصباح (م٢).

مثال (٤-٦)

وصلت ثلاث مقاومات على التوالي مع بطاريتين كما في الشكل (٤-١٩/أ)، ثم وصلت هذه المقاومات على التوازي مع بطاريتين كما في الشكل (٤-١٩/ب) بإهمال المقاومة الداخلية للبطاريات، جد لكل من الدارتين:

١ تيار الدارة.

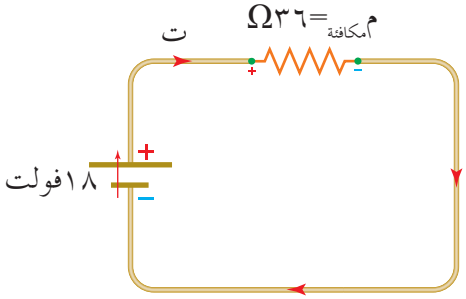
٢ القدرة المستهلكة في المقاومتين (٦، ١٨) Ω.



(أ) الشكل (٤-١٩): مثال (٤-٦). (ب)

الحل:

أوّلًا: الشكل(٤-١٩/أ)



الشكل (٤-٢٠/أ): مثال (٤-٦).

يمكن تبسيط الدارة في الشكل (٤-١٩/أ) بإيجاد المقاومة المكافئة وجمع البطاريتين معًا لتصبح كما في الشكل (٤-٢٠/أ)، حيث يتضح أنها دارة بسيطة أمكن تجميع مقاوماتها الموصولة على التوالي بمقاومة واحدة، لاحظ أن اتجاه التيار الكهربائي يكون باتجاه دفع الشحنات للبطارية الأكبر، وبما أن اتجاه دفع الشحنات للبطارية (٢٤ فولت) بعكس اتجاهها للبطارية (٦ فولت) فإن:

$$\Sigma ق_د = ق_{د\ الأكبر} - ق_{د\ الأقل}$$

١ لحساب التيار الكهربائي في الدارة (٤-٢٠/أ) نطبق معادلة الدارة البسيطة:

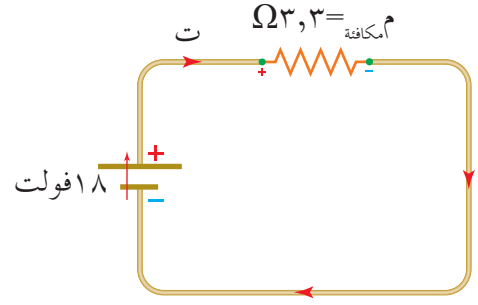
$$ت = \frac{\Sigma ق_د}{\Sigma م}$$

$$= \frac{٢٤ - ٦}{٦ + ١٢ + ١٨} = ٠,٥ \text{ أمبير}$$

٢ القدرة المستهلكة في المقاومة ٦ Ω $= ت^٢ م_١ = (٠,٥)^٢ \times ٦ = ١,٥$ واط

القدرة المستهلكة في المقاومة ١٨ Ω $= ت^٢ م_٢ = (٠,٥)^٢ \times ١٨ = ٤,٥$ واط

ثانيًا: الشكل(٤-١٩/ب)



الشكل (٤-٢٠/ب): مثال (٤-٦).

يمكن تبسيط الدارة في الشكل (٤-١٩/ب) بإيجاد المقاومة المكافئة وجمع البطاريتين معًا، لتصبح كما في الشكل (٤-٢٠/ب)، لاحظ أنها دارة بسيطة أمكن تجميع مقاوماتها الموصولة على التوازي بمقاومة واحدة وكذلك أمكن تجميع بطارياتها ببطارية واحدة.

١ للحصول على التيار الكهربائي في الدارة (٤-٢٠/ب) نطبق معادلة الدارة البسيطة، فنجد المقاومة المكافئة للمقاومات الموصولة على التوازي كمايأتي:

$$\frac{١}{\text{م}_{\text{المكافئة}}} = \frac{١}{٦} + \frac{١}{١٢} + \frac{١}{١٨} \Leftarrow \text{م}_{\text{المكافئة}} = \frac{٣٦}{١١} = ٣,٣\ \Omega$$

$$\text{ت} = \frac{\Sigma\ \text{ق}_{\text{د}}}{\Sigma\ \text{م}}$$

$$\text{ت} = \frac{١١ \times ١٨}{٣٦} = ٥,٥ \text{ أمبير}$$

(لاحظ أنه يمكن زيادة التيار الكهربائي في دارة بوصل مقاوماتها على التوازي بدلًا من وصلها على التوالي).

٢) القدرة المستهلكة في المقاومة ٦ Ω $= \frac{\text{جـ}^{٢}}{\text{م}_{١}} = \frac{١٨^{٢}}{٦} = ٥٤$ واط

القدرة المستهلكة في المقاومة ١٨ Ω $= \frac{\text{جـ}^{٢}}{\text{م}_{٣}} = \frac{١٨^{٢}}{١٨} = ١٨$ واط

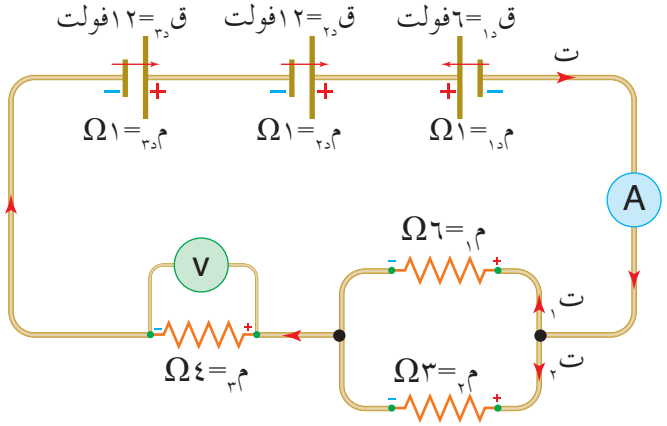
مثال (٤-٧)

معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (٤-٢١) جد:

١) قراءة الأميتر.

٢) قراءة الفولتميتر.

٣) التيار الكهربائي المار في كل مقاومة.



الشكل (٤-٢١): مثال (٤-٧).

الحل:

١) تمثل قراءة الأميتر تيار الدارة، وبما أن الدارة الكهربائية بسيطة يمكن حساب تيارها بتطبيق معادلة الدارة الكهربائية البسيطة.

لإيجاد $\Sigma\ \text{م}_{\text{خ}}$ لاحظ أن المقاومتين ($\text{م}_{١}$ و $\text{م}_{٢}$) موصولتان على التوازي، ومكافئتهما (مَ) موصولة على التوالي مع ($\text{م}_{٣}$):

$$\frac{١}{\text{مَ}} = \frac{١}{\text{م}_{١}} + \frac{١}{\text{م}_{٢}} = \frac{١}{٦} + \frac{١}{٣}$$

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

$$\Sigma\ \text{م}_{\text{خ}} = \text{مَ} + \text{م}_{٣} = ٢ + ٤ \Leftarrow \Sigma\ \text{م}_{\text{خ}} = ٦\ \Omega$$

$$\Sigma\ \text{م}_{\text{د}} = \text{م}_{\text{د}١} + \text{م}_{\text{د}٢} + \text{م}_{\text{د}٣} = ١ + ١ + ١ \Leftarrow \Sigma\ \text{م}_{\text{د}} = ٣\ \Omega.$$

$$ت = \frac{\Sigma ق_د}{\Sigma م_د + \Sigma م_خ}$$

$$ت = \frac{٦ - (١٢ + ١٢)}{٦ + ٣} \Leftarrow ت = ٢ \text{ أمبير}.$$

٢ قراءة الفولتميتر تمثل فرق الجهد بين طرفي المقاومة ٤ Ω

$$جـ = ت \times م \Leftarrow جـ = ٢ \times ٤ = ٨ \text{ فولت}$$

٣ لحساب التيار الكهربائي المار في المقاومة (٦)Ω، لاحظ أن المقاومتين ($م_١$ و $م_٢$) موصولتان على التوازي، فيكون لكل منهما ولمكافئتهما الجهد نفسه:

$$جـ_{م\ مكافئة} = جـ_{م_١}$$

$$ت_{كلي} \times م_{مكافئة\ توازي} = ت_١ \times م_١$$

$$٢ \times ٢ = ت_١ \times ٦$$

$$ت_١ = \frac{٢ \times ٢}{٦} = \frac{٢}{٣} \text{ أمبير}.$$

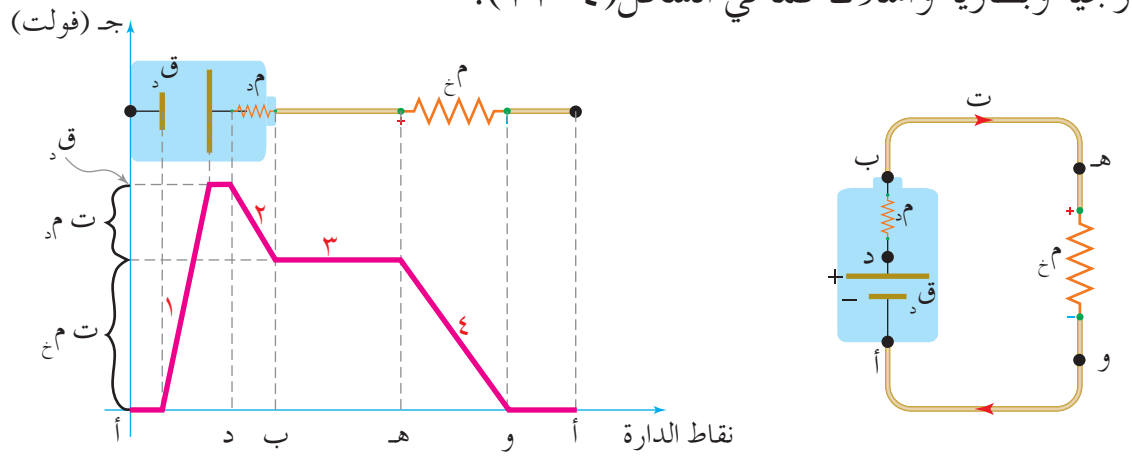
وبالطريقة نفسها نحسب تيار المقاومة (٣)Ω

$$ت_٢ = \frac{٢ \times ٢}{٣} = \frac{٤}{٣} \text{ أمبير}.$$

أما المقاومة (٤) Ω فيمر فيها تيار الدارة كاملًا، أي أن ت = ٢ أمبير.

(٤-٦-٢) تمثيل التغيرات في الجهد بيانيًّا عبر أجزاء دارة كهربائية بسيطة

يمكن تمثيل التغيرات في الجهد بيانيًّا عبر أجزاء دارة كهربائية بسيطة تتكون من مقاومة خارجية وبطارية وأسلاك كما في الشكل(٤-٢٢).



الشكل(٤-٢٢): تغيرات الجهد في دارة كهربائية بسيطة.

عند دراسة الشكل (٤-٢٢) تلاحظ أن:

- النقطة (أ) هي الأقل جهدًا، أما جهد النقطة (د) فأعلى من جهد النقطة (أ) بمقدار ($ق_{د}$) ويمثله الخط (١).
- عند الانتقال من (د) إلى (ب)، فإن الجهد ينخفض بمقدار ($ت م_{د}$)، وهذا مقدار الهبوط في جهد البطارية، 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 ($م_{خ}$) إلى (و) فإن الجهد ينخفض ثانيةً بمقدار ($ت م_{خ}$)، ويمثله الخط (٤)، وتعود قيمة الجهد ثانية إلى الصفر ($جـ_{و} = جـ_{أ}$).

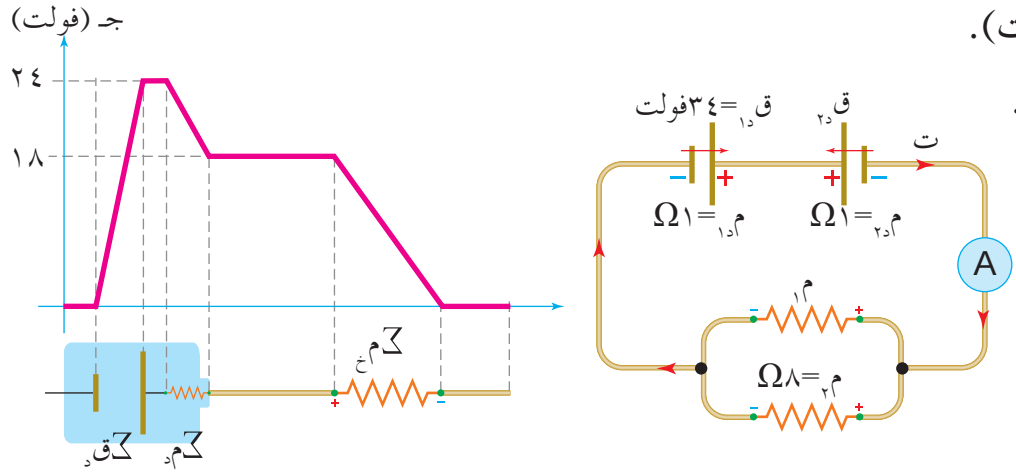
مثال (٤-٨)

يبين الشكل (٤-٢٣) دارة كهربائية بسيطة والتمثيل البياني للتغيرات في الجهد عبر أجزاء الدارة الكهربائية، مستعينًا بالبيانات الواردة في كل منهما احسب:

١ القوة الدافعة الكهربائية ($ق_{د_{٢}}$).

٢ تيار الدارة (ت).

٣ المقاومة ($م_{١}$).



الشكل (٤-٢٣): مثال (٤-٨).

الحل:

١ $\Sigma ق_{د} = ق_{د_{١}} - ق_{د_{٢}}$

$٢٤ = ٣٤ - ق_{د_{٢}} \Leftarrow ق_{د_{٢}} = ١٠$ فولت

٢ من التمثيل البياني لتغيرات الجهد في الدارة نحسب الهبوط في جهد البطاريات:

$ت \Sigma م_{د} = ٢٤ - ١٨$

$ت (١+١) = ٦ \Leftarrow ت = ٣$ أمبير

٣) $ت = \frac{\Sigma ق_د}{\Sigma م_د + \Sigma م_خ}$

$٣ = \frac{٢٤}{٢ + م_خ}$

$م_خ = \frac{٢٤}{٣} - ٢ = ٦\Omega$

نلاحظ أن المقاومتين ($م_١$، $م_٢$) موصولتان على التوازي، ومكافئتهما ($م_خ = ٦\Omega$)

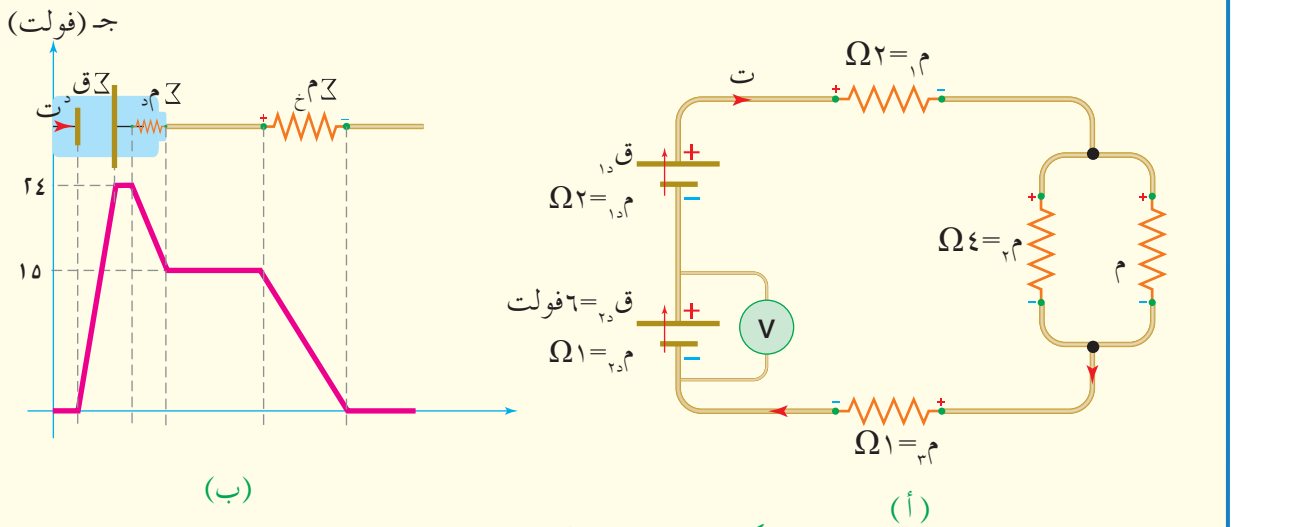
$$\frac{١}{م_خ} = \frac{١}{م_١} + \frac{١}{م_٢}$$

$$\frac{١}{٦} = \frac{١}{م_١} + \frac{١}{٨} \Leftarrow \frac{١}{م_١} = \frac{١}{٦} - \frac{١}{٨} \Leftarrow م_١ = ٢٤\Omega$$

مراجعة (٤-٦)

مُثلت تغيرات الجهد عبر أجزاء الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل (٤-٢٤/أ) بيانيًّا كما في الشكل (٤-٢٤/ب)، مستخدمًا البيانات المثبتة في الشكل، جد:

١) القوة الدافعة الكهربائية ($ق_{د١}$).
٢) تيار الدارة (ت).
٣) المقاومة (م).
٤) قراءة الفولتميتر.
٥) القدرة المستهلكة في المقاومة (م).



الشكل (٤-٢٤): سؤال المراجعة (٤-٦).

تعد الدارات الكهربائية البسيطة نوعًا خاصًّا من الدارات الكهربائية، وقد تعرفت معادلة الدارة الكهربائية البسيطة وتغيرات الجهد عبر أجزائها، وعرفت أنه يمكن تطبيقها في الدارات الكهربائية التي يُمكن تبسيطها لتكون عروة واحدة فقط. إلا أن كثيرًا من الدارات الكهربائية لا يمكن تبسيطها إلى عروة واحدة.

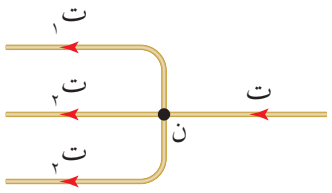
درس العالم جوستاف كيرشوف الدارات الكهربائية، ووضع قاعدتين عُرفتا بقاعدتي كيرشوف يمكن تطبيقهما لتحليل الدارات الكهربائية بأنواعها المختلفة، وسنقدم فيما يأتي توضيحًا لهاتين القاعدتين وكيفية تطبيقهما.

(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(٤-٢٥) إلى تيارات عدة عند وصوله إلى نقطة التفرع (ن)، واعتمادًا على مبدأ حفظ الشحنة، فإن كمية الشحنات الداخلة في النقطة (ن) تساوي كمية الشحنات الخارجة منها، ويمكن التعبير عن هذا رياضيًّا:

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

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



الشكل (٤-٢٥): قاعدة كيرشوف الأولى.

وبقسمة طرفي المعادلة على الزمن المستغرق لعبور الشحنات (Δز) نتوصل إلى:

$$ت = ت_{١} + ت_{٢} + ت_{٣}$$

وبشكل عام عند أي نقطة تفرع في دارة يكون:

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

وتعد العلاقة (٤-١٥) تعبيرًا رياضيًّا **لقاعدة كيرشوف الأولى** التي تنص على "**أن المجموع الجبري للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية يساوي صفرًا**".

ويكون التيار الذي يدخل في نقطة التفرع موجبًا والتيار الخارج منها سالبًا. أي أن مجموع التيارات الداخلة في نقطة تفرع يساوي مجموع التيارات الخارجة منها.

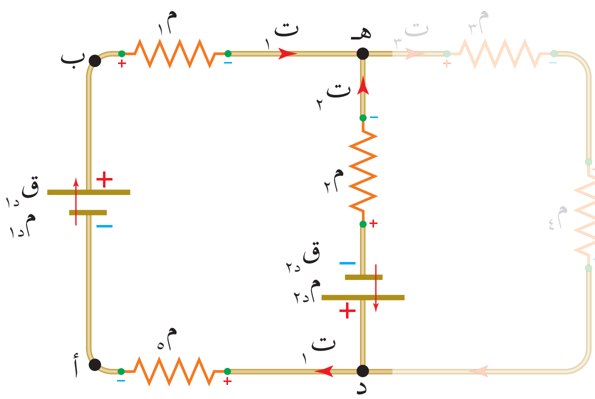
(٤–٧–٢) قاعدة كيرشوف الثانية (قاعدة الجهد) *Kirchhoff's Second Rule (Potential Rule)*

درست سابقًا أن القدرة التي تنتجها البطارية (ق$_{د}$ت) في الدارة المغلقة، تكون مساوية القدرة التي تستهلكها المقاومات في الدارة وبالرجوع إلى العلاقة (٤–١٢)، وباختصار (ت) من طرفي العلاقة يتبين لنا أن مقدار القوة الدافعة الكهربائية يساوي مجموع فروق الجهد بين أطراف المقاومات الداخلية والخارجية للدارة وفق العلاقة:

$$ق_{د} = ت\,م_{د} + ت\,م_{خ}$$

أي أن: $ق_{د} - ت\,م_{د} - ت\,م_{خ} = صفر$

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 هذه القاعدة إحدى صيغ قانون حفظ الطاقة. فعند دراسة تغيرات الجهد عبر المسار المغلق (أ ب هـ د أ) في الدارة الكهربائية في الشكل (٤–٢٦)، ابتداءً من النقطة (أ) والعودة إلى النقطة نفسها يكون مجموع فروق الجهد صفرًا؛ أي أن **جـ$_{أأ}$ = صفر**.



الشكل (٤–٢٦): قاعدة كيرشوف الثانية.

وبشكل عام، عبر أي مسار مغلق تتحقق العلاقة:

$$\sum ق_{د} + \sum ت \times م = صفر \quad .... (٤–١٦)$$

للتحقق عمليًا من قاعدتي كيرشوف نفذ النشاط الآتي.

نشاط (٤ – ٣) قاعدتا كيرشوف

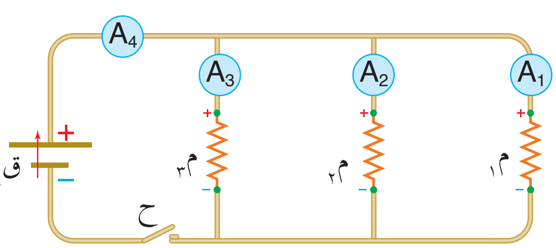
الهدف: التحقق عمليًا من قاعدتي كيرشوف.

المواد والأدوات: مصدر قوة دافعة كهربائية عدد (٢)، ومقاومات ثابتة المقدار عدد (٣)، وأميتر عدد (٤)، ومفتاح كهربائي، وفولتميتر، وأسلاك توصيل.

خطوات تنفيذ النشاط:

- التحقق من قاعدة كيرشوف الأولى

١) ركب الدارة المبينة في الشكل (٤–٢٧/أ).



الشكل (٤–٢٧/أ): قاعدة كيرشوف الأولى.

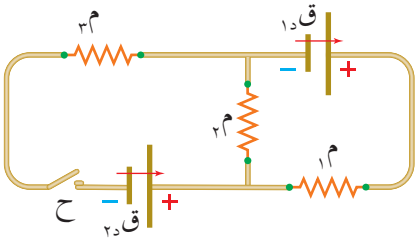
٢ أغلق الدارة وسجل قراءة كل أميتر (A_1، A_2، A_3، A_4).

٣ ما العلاقة بين قراءة الأميتر (A_4) ومجموع قراءات كل من (A_1، A_2، A_3). ماذا تستنتج؟

■ التحقق من قاعدة كيرشوف الثانية

١ ركب الدارة المبينة في الشكل (٤-٢٧/ب).

٢ قس فرق الجهد بين طرفي كل عنصر من عناصر الدارة (ق$_{د_1}$، ق$_{د_2}$، م$_1$، م$_2$، م$_3$) باستخدام الفولتميتر وسجل النتائج.



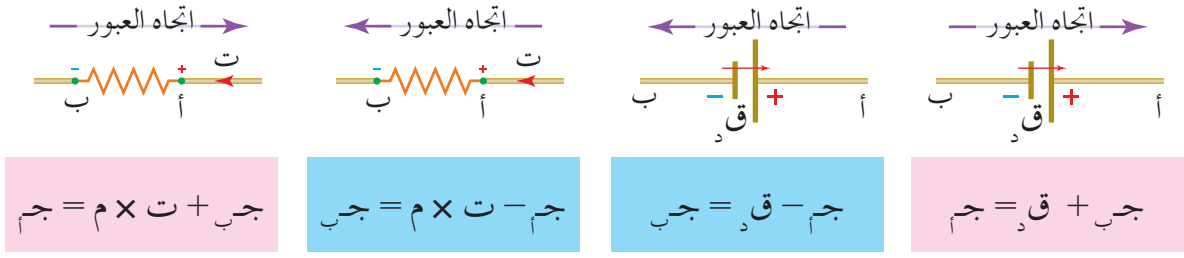
الشكل(٤-٢٧/ب): قاعدة كيرشوف الثانية.

٣ اختر مسارًا مغلقًا عبر الدارة، واجمع فروق الجهد بين طرفي العناصر جميعها في هذا المسار، مع مراعاة توحيد اتجاه الحركة عند الانتقال من عنصر إلى آخر، ماذا تستنتج؟

ولدراسة التغير في الجهد عبر المقاومات أو البطاريات بين نقطتين في دارة، 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 لها، وعند عبور البطارية من القطب الموجب نحو القطب السالب يقل الجهد بمقدار القوة الدافعة الكهربائية لها، 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 لاحظ الشكل (٤-٢٨).

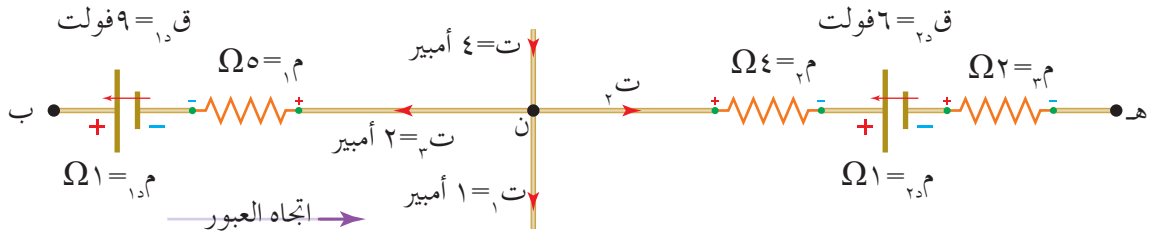


الشكل(٤-٢٨): التغيرات في الجهد عبر المقاومات أو البطاريات.

وبشكل عام يمر 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 تطبيق القاعدتين عبر مسارات مغلقة ضمن دارات كهربائية، والأمثلة الآتية توضح ذلك.

مثال (٤-٩)

يُمثل الشكل (٤-٢٩) جزءًا من دارة كهربائية، معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل جد $جـ_{بهـ}$.



الشكل(٤-٢٩): مثال (٤-٩).

الحل:

أوّلًا: نجد قيمة التيار الكهربائي $ت_٢$ بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى عند نقطة التفرع (ن)

$$\Sigma ت_{\text{الكلي (عند ن)}} = \text{صفر}$$

$$ت - ت_١ - ت_٢ - ت_٣ = ٠$$

$$٤ - ١ - ت_٢ - ٢ = ٠ \Leftarrow ت_٢ = ١ \text{ أمبير}$$

ثانيًا: $جـ_{بهـ} = جـ_ب - جـ_{هـ}$

$$جـ_ب + \Sigma ق_د + \Sigma ت م = جـ_{هـ}$$

$$جـ_ب - ق_{د١} - ق_{د٢} + ت_٣(م_١ + م_{د١}) - ت_٢(م_٢ + م_٣ + م_{د٢}) = جـ_{هـ}$$

$$جـ_ب - ٩ - ٦ + ٢(٥ + ١) - ١(٤ + ٢ + ١) = جـ_{هـ}$$

$$جـ_ب - جـ_{هـ} = ٢٢ - ١٢ \Leftarrow جـ_{بهـ} = ١٠ \text{ فولت}.$$

مثال (٤-١٠)

وُصِلت دارة كهربائية كما في الشكل(٤-٣٠)، معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل، أجب عن الأسئلة الآتية:

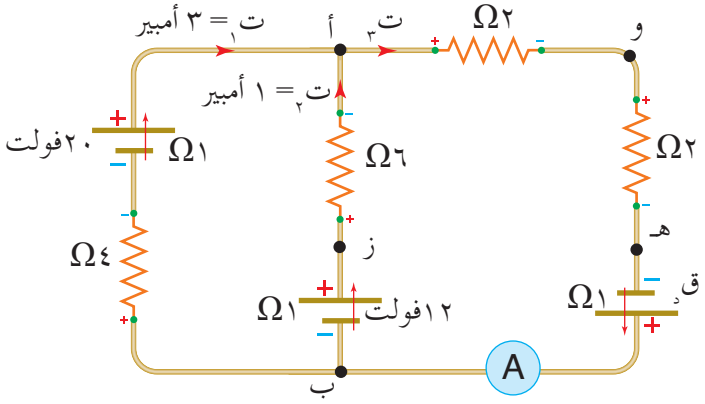
١ هل يمكن تبسيط الدارة الكهربائية لتصبح دارة بسيطة؟ لماذا؟

٢ جد كلًّا من:

أ التيار الكهربائي ($ت_{٣}$).

ب $جـ_{أ ب}$ عبر الفرع الأوسط.

جـ القوة الدافعة الكهربائية ($ق_{د}$).



الشكل(٤-٣٠): مثال (٤-١٠).

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:

$\Sigma ت_{\text{الكلي (عند أ)}} =$ صفر.

$ت_{١} + ت_{٢} - ت_{٣} = ٠$

$٣ + ١ - ت_{٣} = ٠ \Leftarrow ت_{٣} = ٤$ أمبير

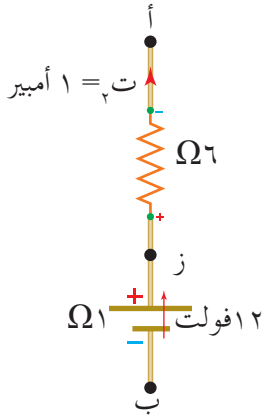
ب $جـ_{أ ب} = جـ_{أ} - جـ_{ب}$

$جـ_{أ ب}$ عبر الفرع الأوسط كما في الشكل (٤-٣١).

$جـ_{أ} + \Sigma ق_{د} + \Sigma ت م = جـ_{ب}$

$جـ_{أ} - ١٢ + ١(١+٦) = جـ_{ب}$

$جـ_{أ ب} = ١٢ - ٧ = ٥$ فولت



الشكل(٤-٣١): مثال (٤-١٠).

جـ لإيجاد $ق_{د}$ نجد $جـ_{أأ}$ عبر المسار المغلق (أ و هـ ب ز أ):

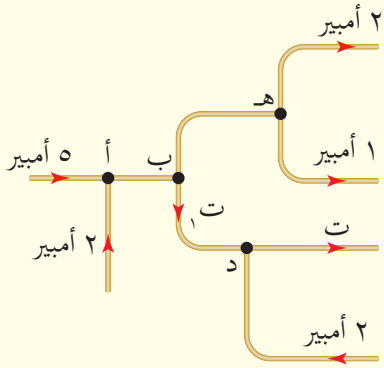
$جـ_{أ} + \Sigma ق_{د} + \Sigma ت م = جـ_{أ}$

$جـ_{أ} + ق_{د} + ١٢ - ٤(٢ + ٢ + ١) - ١(١ + ٦) = جـ_{أ}$

$جـ_{أأ} + ق_{د} + ١٢ - ٢٠ - ٧ = ٠ \Leftarrow ق_{د} = ١٥$ فولت

١ اذكر نص قاعدتي كيرشوف الأولى والثانية.

٢ يمثل الشكل (٤-٣٢) جزءًا من دارة كهربائية، مستعينًا بالبيانات المثبتة في الشكل احسب مقدار التيار الكهربائي (ت).



الشكل(٤-٣٢): سؤال (٢).

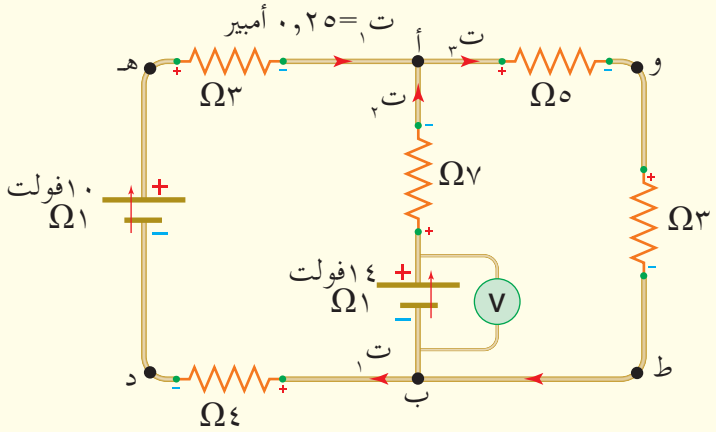
٣ مستخدمًا البيانات المثبتة في الشكل(٤-٣٣) احسب:

أ ت٢، ت٣.

ب قراءة الفولتميتر.

جـ القدرة الكهربائية المستهلكة في المقاومة (٥) أوم.

د جـ أ ب



الشكل(٤-٣٣): سؤال (٣).

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

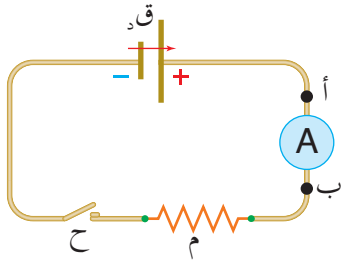
١ في الشكل(٤-٣٤) تنعدم قراءة الأميتر بين النقطتين (أ، ب) عند فتح الدارة بسبب انعدام:

أ المجال الكهربائي بينهما

ب المقاومة الخارجية

جـ القوة الدافعة الكهربائية

د مقاومة الأسلاك



الشكل(٤-٣٤): سؤال (١) فقرة (١).

أجب عن الفقرات (٢، ٣، ٤) بالاعتماد على الشكل(٤-٣٥).

٢ إذا كانت قراءة الفولتميتر قبل غلق المفتاح (١٠) فولت، وبعد غلق المفتاح (٨) فولت، وقراءة الأميتر (٢) أمبير فإن قيمة كل من ($م_{غ}$، $م_{د}$) بالأوم على الترتيب:

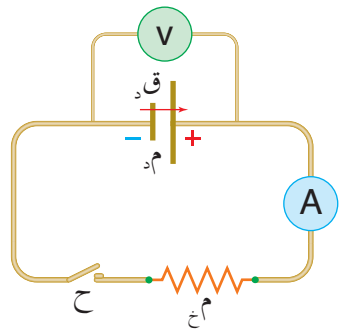
أ (٢، ٢)　　ب (٤، ٢)

جـ (٤، ١)　　د (١، ١)

٣ يكون الهبوط في جهد البطارية بالفولت:

أ ١٠　　ب ٨

جـ ٤　　د ٢



الشكل(٤-٣٥): سؤال (١) الفقرات (٢،٣،٤).

٤ أي من الآتية تمثل قراءة الفولتميتر والمفتاح مفتوح:

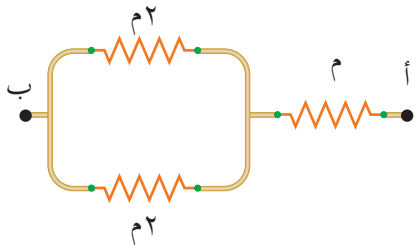
أ ت $م_{د}$　　ب $ق_{د}$

جـ $ق_{د}$ − ٢ت م　　د ت $\frac{م}{٢}$

٥ في الشكل(٤-٣٦) تكون المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات بين النقطتين (أ، ب):

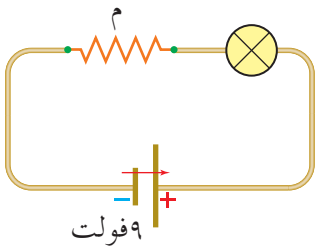
أ $\frac{٣م}{٢}$　　ب ٥م

جـ ٢م　　د $\frac{٥م}{٤}$



الشكل(٤-٣٦): سؤال (١) فقرة (٥).

٦ مصباح كهربائي كتب عليه (٣ فولت، ٢,٥ واط)، يراد إضاءته من بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (٩) فولت، ولحماية المصباح من التلف أضيفت مقاومة خارجية (م) إلى الدارة، كما في الشكل (٤ – ٣٧)، فإن قيمة المقاومة (م) بوحدة الأوم:



الشكل (٤–٣٧): 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:

أ تزداد مقاومة الموصلات الفلزية بارتفاع درجة حرارتها.

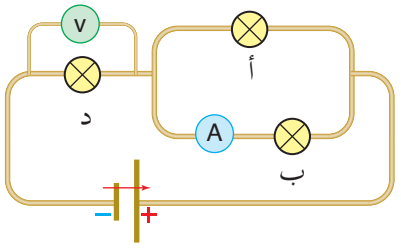
ب عند توصيل المقاومات بطريقة التوازي، تكون المقاومة الأقل مقدارًا هي الأكثر استهلاكًا للقدرة.

جـ عند توصيل المقاومات بطريقة التوالي، تكون المقاومة الأكبر مقدارًا هي الأكثر استهلاكًا للقدرة.

٣ يمثل الجدول المجاور قيم التيار الكهربائي في مقاومتين (أ، ب)، عند تغيير فرق الجهد بين طرفي كل منهما. مستخدمًا البيانات الواردة في الجدول، حدد أي المقاومتين أومية، واحسب مقدارها.

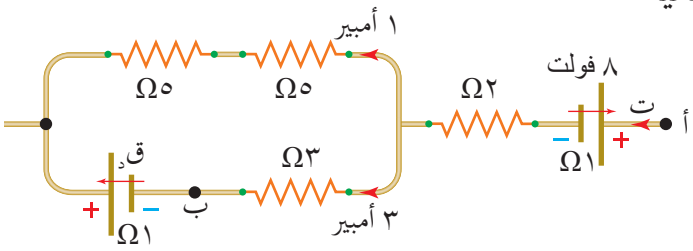
المقاومة (أ)		المقاومة (ب)	
جـ (فولت)	ت (أمبير)	جـ (فولت)	ت (أمبير)
٠,٢٥	٠,٥	٣	٠,٤
١	١	٦	٠,٨
٢	١,٤	٩	١,٢
٣	١,٧	١٢	١,٦
٣,٨	١,٩	١٥	٢

٤ إذا كانت المصابيح (أ، ب، د) في الشكل (٤–٣٨) متماثلة، وضح ما يحصل لكل من قراءة الأميتر والفولتميتر، إذا احترق فتيل المصباح (أ).



الشكل (٤–٣٨): سؤال (٤).

٥ يمثل الشكل (٤–٣٩) جزءًا من دارة كهربائية مستعينًا بالبيانات المثبتة في الشكل جد:



الشكل (٤–٣٩): سؤال (٥).

أ جـ أ ب.

ب ق د.

٦ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٤–٤٠)، جد:

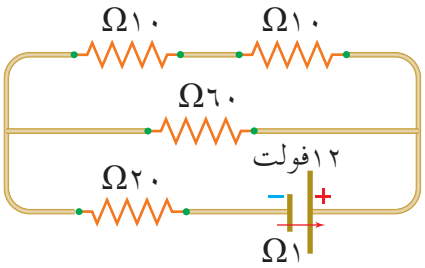
أ المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات.

ب التيار الكهربائي المار في المقاومة (٢٠) Ω.

جـ الهبوط في جهد البطارية.

د جهد المقاومة (٦٠) Ω.

هـ القدرة المستهلكة في المقاومة (١٠) Ω.



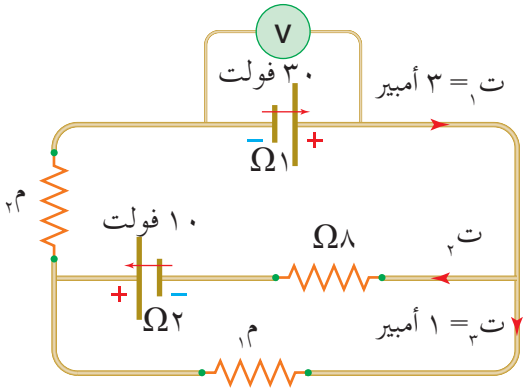
الشكل (٤–٤٠): سؤال (٦).

٧ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٤–٤١)، جد:

أ التيار الكهربائي المار في المقاومة (٨) Ω.

ب مقدار كل من المقاومتين (م١، م٢).

جـ قراءة الفولتميتر.



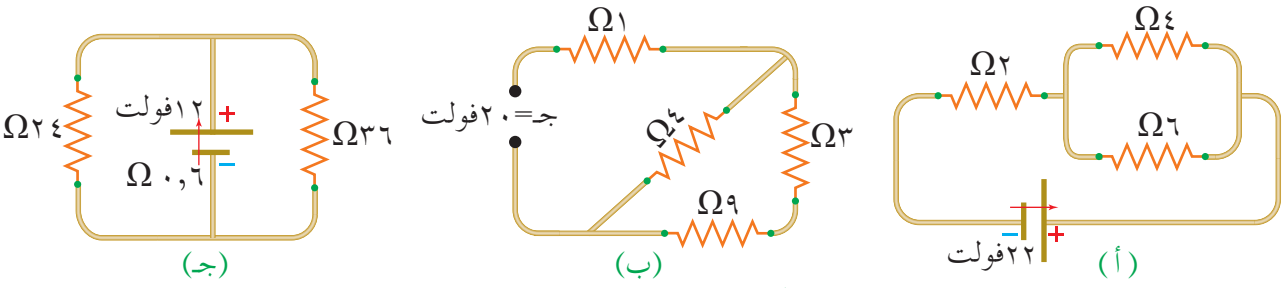
الشكل (٤–٤١): سؤال (٧).

٨ مستعينًا بالبيانات المثبتة في الدارات الكهربائية (أ، ب، جـ) في الشكل (٤–٤٢)، احسب:

أ المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات في كل دارة.

ب التيار الكهربائي المار في كل دارة.

جـ القدرة المستهلكة في كل مقاومة من الدارة (جـ).

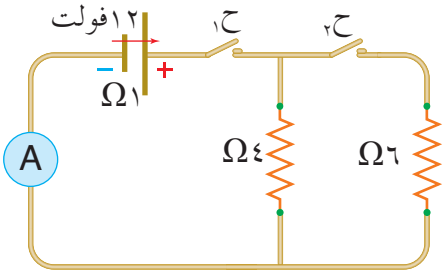


الشكل (٤–٤٢): سؤال (٨).

٩ احسب قراءة الأميتر في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل (٤–٤٣) في الحالتين الآتيتين:

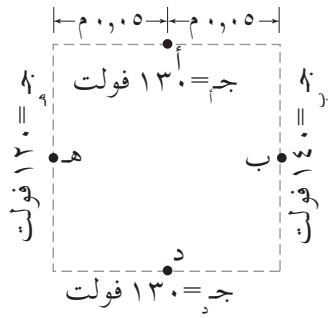
أ عند غلق المفتاح (ح١) فقط.

ب عند غلق المفتاحين (ح١ و ح٢) معًا.



الشكل (٤–٤٣): سؤال (٩).

١ تقع أربع نقاط (أ، ب، د، هـ) في منطقة مجال كهربائي منتظم. معتمدًا على القيم المثبتة في الشكل المجاور أجب عما يأتي:



أ ما المقصود بسطح تساوي الجهد؟

ب ارسم واحدًا من سطوح تساوي الجهد الكهربائي، وثلاثة من خطوط المجال الكهربائي محدّدًا على هذه الخطوط اتجاه المجال.

جـ احسب مقدار المجال الكهربائي المنتظم.

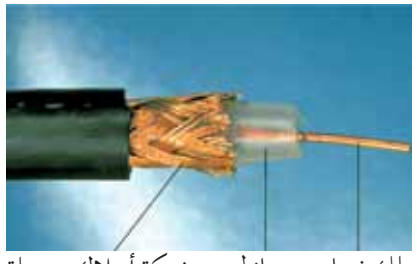
٢ في جهاز إنعاش القلب يعطى المريض شحنة «صدمة كهربائية» عن طريق السماح لمواسع كهربائي بتفريغ شحنته عبر منطقة قلب المريض كما هو مبين في الشكل. إذا كانت مواسعة المواسع (٢٠) ميكروفاراد، وشحن باستخدام مصدر فرق جهده (٦٠٠٠) فولت. فأجب عما يأتي:

أ ما أهمية المواسعات؟

ب احسب شحنة المواسع والطاقة المختزنة فيه.

جـ يحدث عادة التفريغ الكهربائي خلال مدة زمنية قصيرة، تقريبًا (٢) ملي ثانية. احسب متوسط التيار الكهربائي المار عبر منطقة قلب المريض.

٣ تستخدم الأكبالُ الكهربائية لنقل الطاقة الكهربائية وتوجد بأشكال مختلفة، ويبين الشكل مقطعًا من كبل كهربائي.

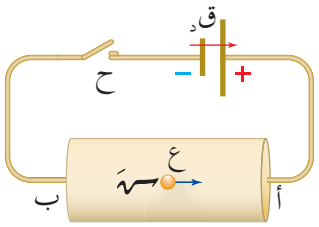


أ يحتوي الكبل على طبقة رقيقة من شبكة مصنوعة من مادة موصلة، ما الهدف من هذه الشبكة؟

ب فسر: يلاحظ أحيانًا ظهور وميض أزرق حول أكبال الكهرباء ذات الجهد العالي.

جـ إذا كانت مقاومية النحاس ($١,٧ \times ١٠^{-٨}$ Ω.م) فاحسب مقاومة كبل من النحاس طوله (٥٠) م، ومساحة مقطعه ($٢,٥ \times ١٠^{-٦}$) م^{٢}.

٤ يمر تيار كهربائي (١٠) أمبير في موصل نحاسي متصل مع بطارية كما هو موضح في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل المجاور عند إغلاق المفتاح (ح)، ادرس الشكل، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:



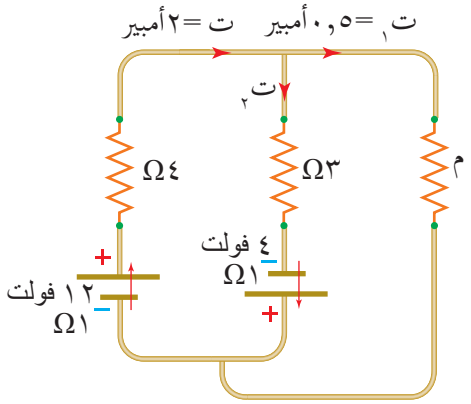
أ ما اتجاه المجال الكهربائي الناشئ في الموصل؟ وما اتجاه التيار الكهربائي فيه؟

ب إذا علمت أن الشحنة (ـهَ) تتحرك بسرعة انسياقية (ع) داخل الموصل بالاتجاه المبين في الشكل، فما نوع الشحنة (ـهَ)؟

جـ احسب السرعة الانسياقية للشحنات(ـهَ)، إذا علمت أن مساحة مقطع الموصل تساوي (٢) مم^{٢} وأن (نَ = ٨,٥ × ١٠^{٢٨}) إلكترون/م^{٣}.

د ما دور البطارية في الدارات الكهربائية المغلقة؟

٥ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل جد:



أ التيار الكهربائي (ت$_{٢}$).

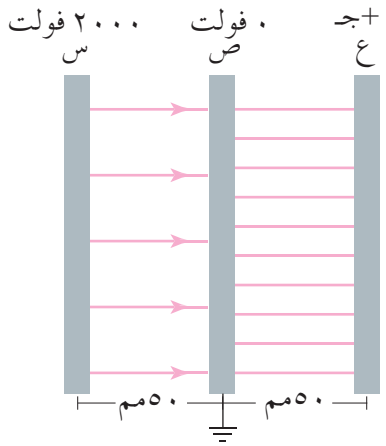
ب المقاومة (م).

جـ المقاومية (ρ) لمادة المقاومة (م) إذا علمت أن طولها (٠,٨) م ومساحة مقطعها (٧ × ١٠$^{-٧}$) م^{٢}.

٦ معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل، والذي يبين ثلاث صفائح موصلة مختلفة في الجهد. أجب عن الأسئلة الآتية:

أ كيف يتناسب عدد خطوط المجال الكهربائي مع الكثافة السطحية للشحنة؟

ب احسب:



١ مقدار المجال الكهربائي بين الصفيحتين (س) و(ص).

٢ المجال الكهربائي بين الصفيحتين (ص) و(ع) مقدارًا واتجاهًا.

٣ جهد الصفيحة (ع).

الفصل الدراسي الثاني

الفصل الخامس

المجال المغناطيسي

The Magnetic Field

في هذا الفصل

(٥-١)
المجال المغناطيسي.

(٥-٢)
القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة نقطية متحركة في مجال مغناطيسي منتظم.

(٥-٣)
حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم.

(٥-٤)
قوة لورنتز.

(٥-٥)
القوة المغناطيسية التي يؤثر بها مجال مغناطيسي في موصل مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًّا.

(٥-٦)
المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي.

(٥-٧)
القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يمر فيهما تياران كهربائيان.

(٥-٨)
المواد المغناطيسية.

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 هذه 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 يمر فيه تيار كهربائي، وتعبر عن القوة المغناطيسية رياضيًّا.
- تتوصل بالتجربة إلى أثر المجال المغناطسي في موصل يحمل تيارًا كهربائيًّا.
- 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 يمر فيهما تياران كهربائيان.
- تذكر أنواع المواد المغناطيسية، وتقارن بينها.

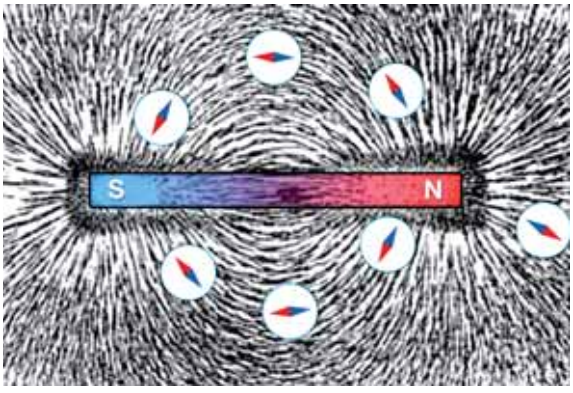
٥–١ المجال المغناطيسي
The Magnetic Field

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، ويرمز للمجال المغناطيسي بالرمز ($\vec{غ}$).

يُمثَّلُ المجال المغناطيسي حول المغناطيس بخطوط وهمية تسمى خطوط المجال المغناطيسي.

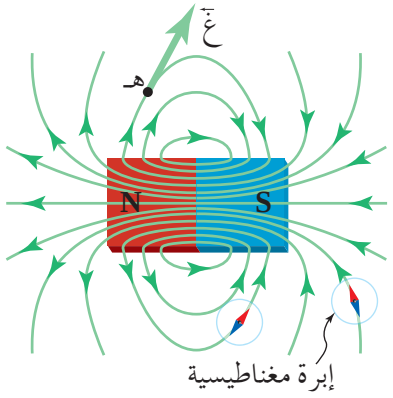
ويعرف **خط المجال المغناطيسي** **بأنه المسار الذي يسلكه قطب شمالي مفرد (افتراضي) عند وضعه حرًّا في أي نقطة داخل المجال المغناطيسي.**

ويمكن استخدام برادة الحديد أو الإبرة المغناطيسية لتخطيط المجال المغناطيسي كما في الشكل (٥–١).



الشكل (٥–١): تخطيط المجال المغناطيسي.

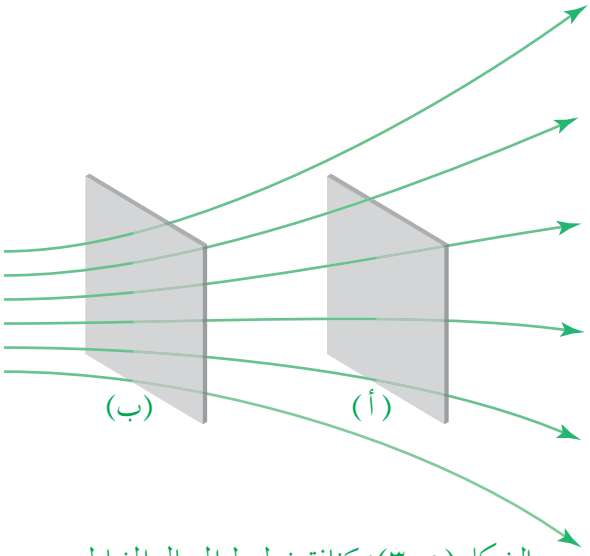
تمتاز خطوط المجال المغناطيسي عن خطوط المجال الكهربائي بأنها مقفلة حيث تخرج من القطب الشمالي للمغناطيس وتدخل في القطب الجنوبي خارج المغناطيس، مكملة مسارها داخل المغناطيس من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي كما يتضح في الشكل (٥–٢)، ويفسر ذلك عدم وجود قطب مغناطيسي مفرد.



الشكل (٥–٢): خطوط المجال المغناطيسي مقفلة.

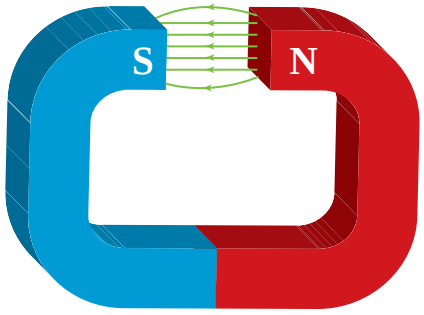
يحدد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة ما باتجاه المماس لخط المجال عند تلك النقطة، لاحظ ذلك عند النقطة (هـ) في الشكل (٥–٢)، وعمليًّا يتحدد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة فيه باستخدام إبرة مغناطيسية توضع عند تلك النقطة، حيث يشير القطب الشمالي للإبرة المغناطيسية إلى اتجاه المجال المغناطيسي عندها. والمجال المغناطيسي له اتجاه واحد عند كل نقطة؛ لذلك فخطوطه لا تتقاطع.

ويعبر عن مقدار المجال المغناطيسي في منطقة ما بكثافة خطوط المجال المغناطيسي في تلك المنطقة كما يوضح الشكل (٥–٣).



الشكل (٥–٣): كثافة خطوط المجال المغناطيسي .

وقد يكون المجال المغناطيسي منتظمًا أو غير منتظم، ويظهر من الشكل (٥–٢) أن المجال المغناطيسي الناتج من المغناطيس المستقيم ليس منتظمًا، فخطوط المجال المغناطيسي تشير إلى اتجاهاتٍ مختلفةٍ، بينما يكون منتظمًا تقريبًا في المنطقة المحصورة بين قطبي مغناطيس على شكل حرف (C) بعيدًا عن الأطراف كما في الشكل (٥–٤). ويعرف **المجال المغناطيسي المنتظم** في منطقة ما بأنه **المجال المغناطيسي الثابت مقدارًا واتجاهًا عند نقاطه جميعها**. ويُمثَّلُ بخطوط مستقيمة متوازية، المسافات بينها متساوية.



الشكل (٥–٤): المجال المغناطيسي المنتظم بين قطبي مغناطيس.

مراجعة (٥–١)

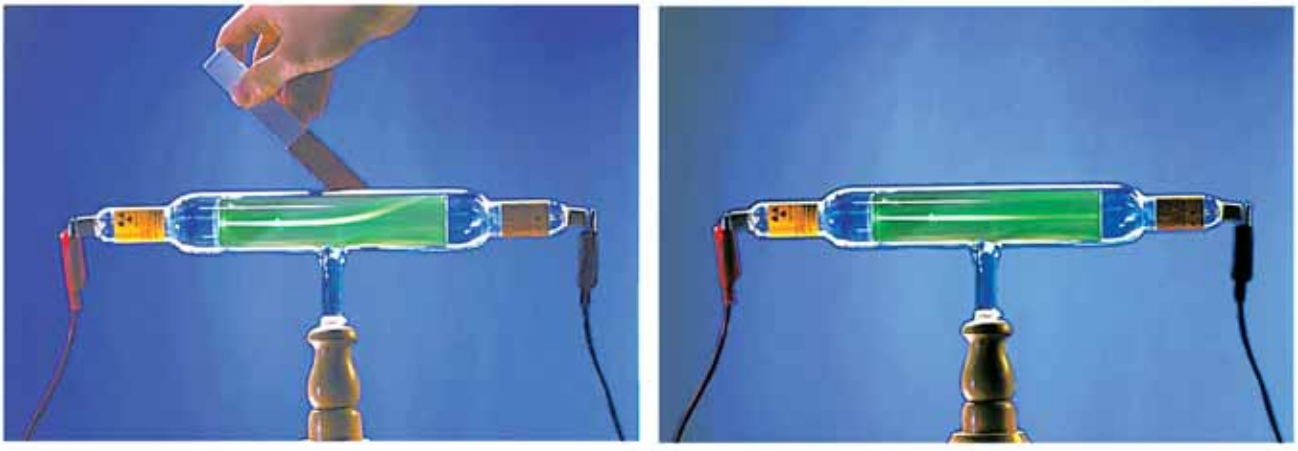
١ اذكر ثلاثًا من خصائص خطوط المجال المغناطيسي.

٢ عرف كلًّا من خط المجال المغناطيسي، والمجال المغناطيسي المنتظم.

٣ إذا علمت أن السطحين (أ، ب) في الشكل (٥–٣) لهما المساحة نفسها فأي منهما يكون مقدار المجال المغناطيسي عنده أكبر؟ وضح إجابتك.

٤ فسر: تعد خطوط المجال المغناطيسي مقفلة.

إذا قربت مغناطيسًا من أنبوب أشعة المهبط، فسوف تلاحظ أن حزمة الإلكترونات انحرفت عن مسارها، لاحظ الشكل (٥-٥)، يدل ذلك على أن المجال المغناطيسي أثر بقوة مغناطيسية في هذه الشحنات المتحركة، وأجبرها على تغيير مسارها. ما العوامل المؤثرة في القوة المغناطيسية؟ وكيف تحسب القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة كهربائية؟



الشكل (٥-٥): انحراف حزمة الإلكترونات في أنبوب أشعة المهبط بتأثير المغناطيس.

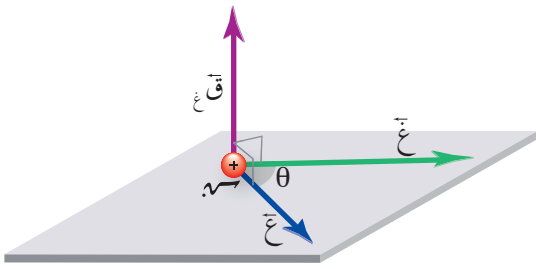
وجد تجريبيًّا أن القوة المغناطيسية ($\vec{ق}_غ$) المؤثرة في جسيم مشحون متحرك في مجال مغناطيسي عند نقطة ما تتناسب طرديًّا مع كل من شحنة الجسيم الكهربائية ($س$)، والمجال المغناطيسي ($\vec{غ}$)، وسرعة الجسيم ($\vec{ع}$) التي يتحرك بها داخل المجال المغناطيسي عند تلك النقطة، وتتناسب القوة المغناطيسية طرديًّا أيضًا مع (جاθ)؛ حيث(θ): الزاوية المحصورة بين اتجاه كل من ($\vec{ع}$) و($\vec{غ}$). وعليه فإن القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة متحركة داخل مجال مغناطيسي يعبر عنها بالعلاقة:

$$\vec{ق}_غ = س \vec{ع} \times \vec{غ}$$

ويحسب مقدار القوة المغناطيسية من العلاقة الرياضية الآتية:

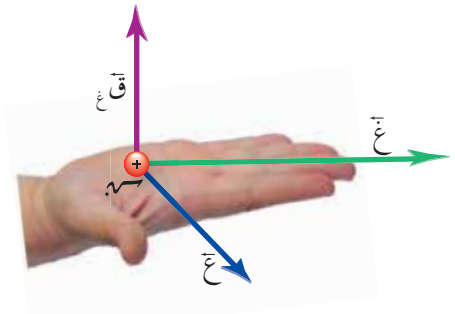
$$ق_غ = س ع غ \text{ جا}\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥-١)$$

وبالاعتماد على العلاقة (٥–١) يمكن تعريف **المجال المغناطيسي** عند نقطة ما بأنه **القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة لحظة مرورها بسرعة (١) م/ث عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي عند تلك النقطة**. ويكون اتجاه القوة المغناطيسية دائمًا عموديًّا على المستوى الذي يتشكل من المتجهين ($\vec{ع}$) و($\vec{غ}$) مهما كانت الزاوية بين اتجاهيهما كما يبين الشكل (٥–٦).



الشكل (٥–٦): القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة متحركة عمودية دائمًا على المستوى الذي يتشكل من المتجهين ($\vec{ع}$) و($\vec{غ}$).

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 (ش) 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.

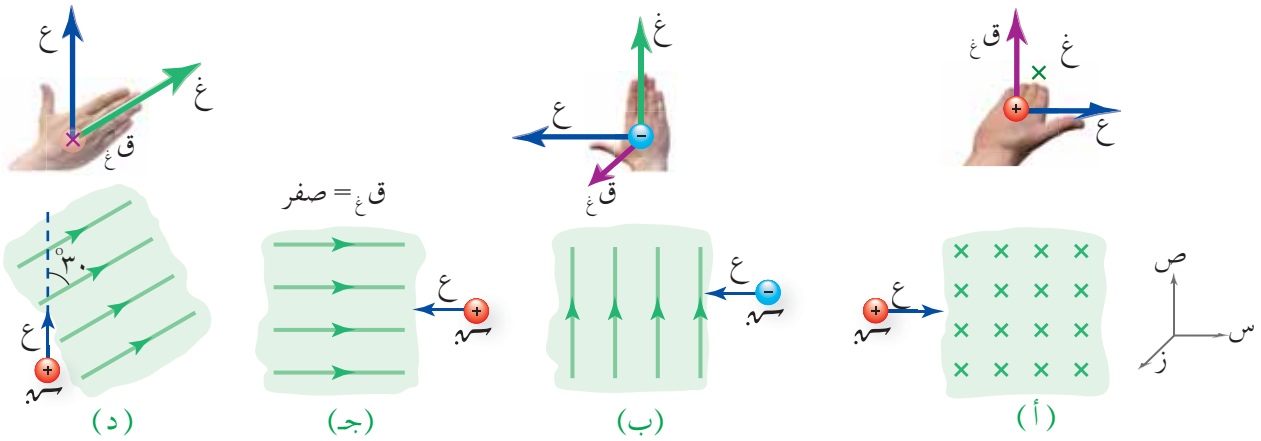
ونستنتج من العلاقة (٥–١) أن القوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم مشحون في مجال مغناطيسي تنعدم في حالتين؛ إذا كان الجسيم المشحون ساكنًا (ع = ٠)، وإذا كان اتجاه السرعة موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي (θ = ٠، أو ١٨٠°). ونستنتج من ذلك أن المجال المغناطيسي لا يؤثر في الشحنة المتحركة إلا إذا قطعت خطوطه. وتكون القوة المغناطيسية أكبر ما يمكن عندما يكون اتجاه السرعة ($\vec{ع}$) عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي (θ = ٩٠°). وفي النظام العالمي للوحدات يقاس المجال المغناطيسي بوحدة تسمى تسلا، ويمكن اشتقاقها من العلاقة (٥–١) عندما تكتب بالصورة الآتية:

$$[غ] = \frac{[ق_غ]}{[ع][ش]} \quad \Leftarrow \quad [غ] = \frac{\text{نيوتن.ث}}{\text{كولوم.م}} = \text{تسلا}$$

وتُعرف **التسلا** بأنها **المجال المغناطيسي الذي يؤثر بقوة (١) نيوتن في شحنة (١) كولوم تتحرك بسرعة (١) م/ث باتجاه يعامد اتجاه المجال المغناطيسي.**

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 المؤثرة في الجسيم لحظة دخوله منطقة المجال المغناطيسي المنتظم في الحالات المبينة في الشكل (٥-٨).



الشكل (٥-٨): مثال (٥-١).

الحل:

بتطبيق العلاقة الرياضية (ق غ = ش ع غ جا θ)، نجد أن:

أ) ق غ = ٤ × ١٠^-٦ × ٦ × ١٠^٦ × ١ × ١٠^-٢ × جا ٩٠ = ٠,٢٤ 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). لاحظ اليد فوق الشكل (٥-٨/أ).

ب) ق غ = ٤ × ١٠^-٦ × ٦ × ١٠^٦ × ١ × ١٠^-٢ × جا ٩٠ = ٠,٢٤ نيوتن

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى ومن ثم عكس الاتجاه الناتج لأن الشحنة سالبة نجد أن اتجاه (ق غ) يكون باتجاه المحور الزيني الموجب ويمكن أن نعبر عن اتجاهه بالرمز ⊙. لاحظ اليد فوق الشكل (٥-٨/ب).

جـ) ق غ = ٤ × ١٠^-٦ × ٦ × ١٠^٦ × ١ × ١٠^-٢ × جا ١٨٠ = صفر

د) ق غ = ٤ × ١٠^-٦ × ٦ × ١٠^٦ × ١ × ١٠^-٢ × جا ٣٠ = ٠,١٢ نيوتن باتجاه المحور الزيني السالب ⊗. لاحظ اليد فوق الشكل (٥-٨/د).

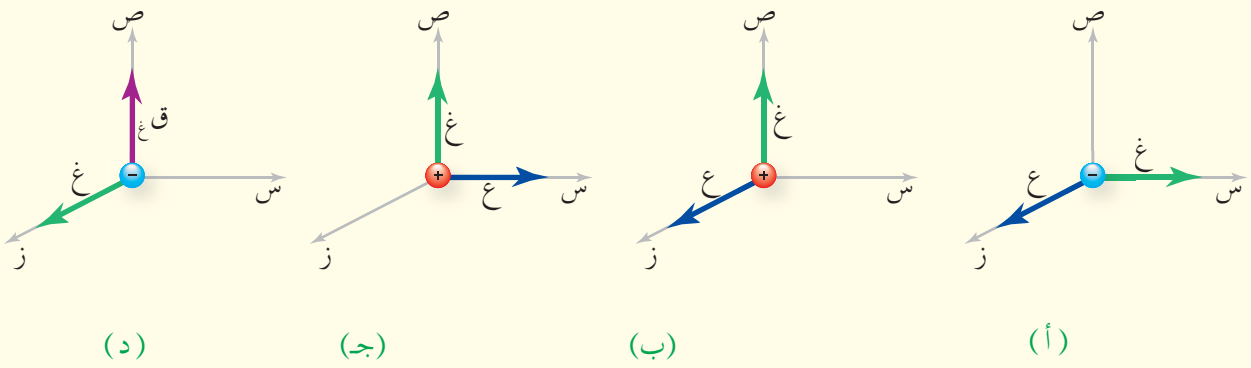
مراجعة (٥–٢)

١ كيف يمكن لشحنة كهربائية أن تتحرك في مجال مغناطيسي ولا تتأثر بقوة مغناطيسية؟

٢ فسر: عند قذف نيوترون في مجال مغناطيسي، فإنه لا يتأثر بقوة مغناطيسية.

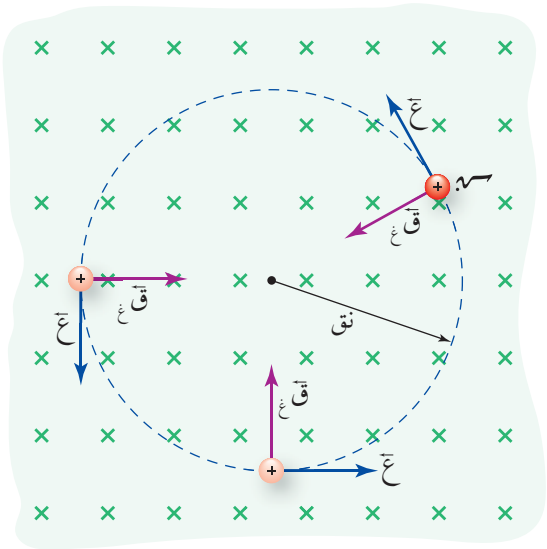
٣ ماذا نعني بقولنا إن المجال المغناطيسي لمغناطيس يساوي (٥×١٠^{-٣}) تسلا؟

٤ باستخدام قاعدة اليد اليمنى حدد اتجاه الكمية الفيزيائية المجهولة في الشكل (٥–٩).



الشكل (٥–٩): سؤال (٤).

تعلمت في الدرس السابق أن الجسيم المشحون عندما يتحرك داخل مجال مغناطيسي باتجاه لا يوازي اتجاه المجال، فإنه يتأثر بقوة مغناطيسية اتجاهها دائمًا عمودي على اتجاه كل من المجال المغناطيسي وسرعة الجسيم المشحون. وإذا كان متجه السرعة عموديًّا على متجه المجال المغناطيسي ($\theta = ٩٠°$) كما يظهر في الشكل (٥-١٠) فإن القوة المغناطيسية تجبر الجسيم على الحركة في مسار دائري، وستقتصر دراستنا على هذه الحالة.



الشكل (٥-١٠): القوة المغناطيسية قوة مركزية.

لاحظ أن اتجاه القوة المغناطيسية باستمرار نحو مركز المسار الدائري، لذلك تعد القوة المغناطيسية قوة مركزية تكسب الجسيم المشحون تسارعًا مركزيًّا باتجاهها يمكن حسابه من العلاقة : $(ت_{مركزي} = \frac{ع^٢}{نق})$، ويمكن حساب نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه الجسيم المشحون في هذه الحالة بتطبيق القانون الثاني لنيوتن:

$$\Sigma ق_{مركزية} = ك\ ت_{مركزي} = ك \frac{ع^٢}{نق}$$

حيث ($ت_{مركزي}$): التسارع المركزي للجسيم، و(ع): سرعة الجسيم، و(نق): نصف قطر المسار الدائري، و(ك): كتلة الجسيم المشحون.

بإهمال قوة الجاذبية المؤثرة في الجسيم المشحون، فإن القوة المغناطيسية ($ق_غ$) هي القوة المحصلة المركزية المؤثرة في الجسيم كما في الشكل (٥-١٠):

$$ش ع غ جا ٩٠ = ك \frac{ع^٢}{نق}$$

وعليه، فإن نصف قطر مسار الجسيم الدائري يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$نق = \frac{ك\,ع}{ســـ\,غ} \quad .... \quad (٥-٢)$$

وتكمن أهمية هذه العلاقة في إمكانية التحكم في مقدار نصف قطر مسار الجسيم المشحون المتحرك في المجال المغناطيسي عن طريق التحكم في كميات فيزيائية يمكن قياسها مثل السرعة والمجال المغناطيسي، أو تحديدها مثل الشحنة والكتلة، كما ستتعلم لاحقًا.

ولأن اتجاه القوة المغناطيسية عمودي باستمرار على اتجاه الإزاحة التي يحققها الجسيم المشحون المتحرك في المجال المغناطيسي، فإن القوة المغناطيسية لا تبذل شغلًا عليه، ووفق مبرهنة (الشغل–الطاقة الحركية) (ش= Δط$_{ح}$)، فإن الطاقة الحركية للجسيم لا تتغير؛ ما يعني أن مقدار سرعته يبقى 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 لتوجيه الجسيمات المشحونة والتحكم في مسارها دون تغيير مقدار سرعتها، في حين يستخدم المجال الكهربائي لتسريع هذه الجسيمات.

مثال (٥-٢)

دخل جسيم مشحون كتلته (٢×١٠$^{-١٠}$) كغ وشحنته (٢) ميكروكولوم مجالًا مغناطيسيًّا 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 الجسيم.

٣) نصف قطر مسار الجسيم.

٤) مقدار سرعة الجسيم بعد مرور (٣) ثوان على وجوده داخل المجال المغناطيسي.

الحل:

١) ق$_{غ}$ = ســـ ع غ جاθ

= ٢ × ١٠$^{-٦}$ × ١٠^{٣} × ٠,٢ × جا٩٠ ⟸ ق$_{غ}$ = ٠,٤ × ١٠$^{-٣}$ نيوتن

٢ ق مركزية = ق غ = ك ت مركزي

٠,٤ × ١٠^-٣ = ٢ × ١٠^-١٠ ت مركزي ⇐ ت مركزي = ٠,٢ × ١٠^٧ م/ث^٢

٣ نق = ك ع / ب غ

= (٢ × ١٠^-١٠ × ١٠^٣) / (٢ × ١٠^-٦ × ٠,٢) ⇐ نق = ٠,٥ م

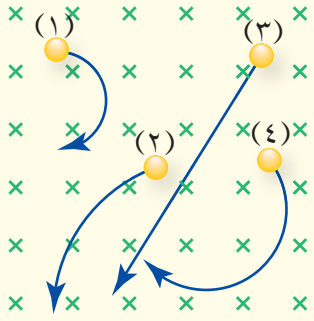
٤ القوة المغناطيسية لا تغير مقدار سرعة الجسيم، ولكن تغير اتجاه السرعة فقط، ولذلك فإن مقدار سرعة الجسيم سيبقى (١٠^٣) م/ث.

مراجعة (٥-٣)

١ أدخلت أربعة جسيمات متماثلة في الكتلة والسرعة بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم، فاتخذت المسارات الموضحة في الشكل (٥-١١)، أجب عما يأتي:

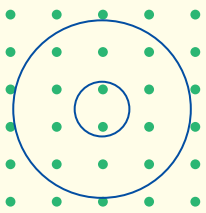
أ حدد نوع شحنة كل من الجسيمات الأربعة، موضحًا ذلك.

ب رتب الجسيمات تنازليًا وفق مقدار شحنة كل منها.



الشكل(٥-١١): سؤال (١).

٢ يمثل الشكل (٥-١٢) مسارًا دائريًا لكل من إلكترون وبروتون، يتحركان داخل مجال مغناطيسي بالسرعة نفسها، إذا علمت أن كتلة البروتون أكبر من كتلة الإلكترون، فحدد أي المسارين للإلكترون وأيهما للبروتون، ثم حدد على المسار اتجاه الحركة لكل منهما.



الشكل(٥-١٢): سؤال (٢).

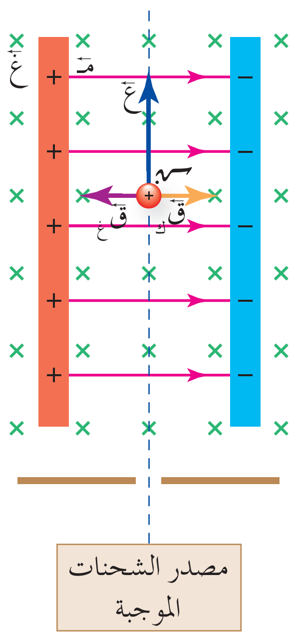
٥-٤ قوة لورنتز
Lorentz Force

تحتوي بعض الأجهزة الكهربائية المستخدمة في الطب والصناعة والأبحاث العلمية 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:

$$\vec{\text{ق}}_{\text{لورنتز}} = \vec{\text{ق}}_{\text{ك}} + \vec{\text{ق}}_{\text{غ}} \quad \text{.......................................} \quad (\text{٥-٣})$$

مثال (٥-٣)

في الشكل (٥-١٣) صفيحتان متوازيتان مشحونتان، جهد الصفيحة الموجبة (٧,٥) فولت، وجهد الصفيحة السالبة (−٧,٥) فولت، والبعد بينهما (١٠) سم. ويمر بينهما جسيم مشحون شحنته (+٤) ميكروكولوم، وبسرعة مقدارها (٣٠٠) م/ث باتجاه المحور الصادي الموجب، والصفيحتان مغمورتان في مجال مغناطيسي منتظم (٠,٥) تسلا اتجاهه نحو المحور الزيني السالب (⊗).



الشكل(٥-١٣): مثال (٥-٣).

١) جد القوة المحصلة (لورنتز) المؤثرة في الشحنة مقدارًا واتجاهًا، وصف حركة الجسيم.

٢) إذا كانت سرعة الجسيم أكبر من (٣٠٠) م/ث، فماذا سيحدث لحركته؟

الحل:

١) لإيجاد القوة المحصلة فإننا نحسب القوة الكهربائية والقوة المغناطيسية مقدارًا واتجاهًا:

- نحسب المجال الكهربائي، بتطبيق العلاقة (٢-٩):

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

$$(\text{٧,٥} - (-\text{٧,٥})) = \text{مـ} \times \text{١٠} \times \text{١٠}^{-\text{٢}}$$

$$\text{مـ} = \text{١٥٠ فولت/م}$$

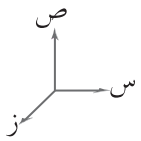
- نحسب القوة الكهربائية من العلاقة (١–٣):

$ق_ك = مـ \times ســ$

$= ١٥٠ \times ٤ \times ١٠^{-٦}$

$= ٠,٦ \times ١٠^{-٣}$ نيوتن باتجاه المحور السيني الموجب.

- نحسب القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم المشحون:



$ق_غ = ســ ع غ$ جاθ

$= ٤ \times ١٠^{-٦} \times ٣٠٠ \times ٠,٥ \times$ جا٩٠

$= ٠,٦ \times ١٠^{-٣}$ نيوتن باتجاه المحور السيني السالب.

- نجد القوة المحصلة (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.

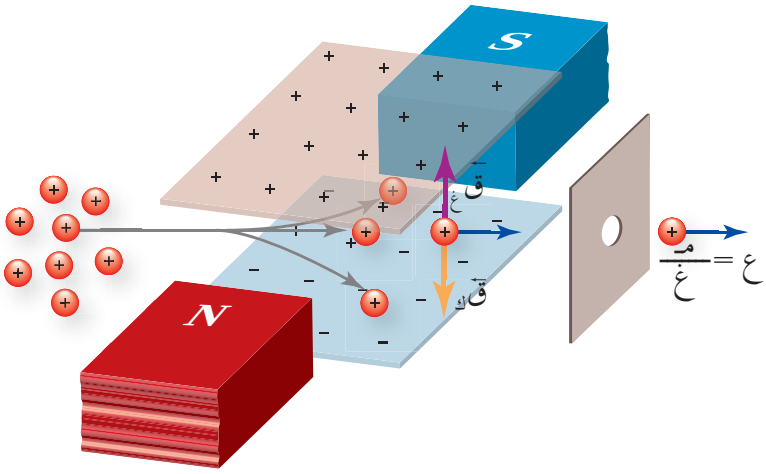
٢ إذا كانت سرعة الجسيم أكبر من (٣٠٠) م/ث فإن القوة المغناطيسية المؤثرة فيه ستكون أكبر من القوة الكهربائية؛ لذلك سينحرف الجسيم باتجاه محور السينات السالب.

وتستخدم قوة لورنتز في الأجهزة البحثية، وفي ما يأتي توضيح لعمل كل من جهاز منتقي السرعة، وجهاز مطياف الكتلة.

(٥–٤–١) 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 لاختيار جسيمات ذات سرعة محددة 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 متعامدان؛ كهربائي ومغناطيسي يؤثر كل منهما بقوة في

الجسيمات المشحونة المتحركة كما في الشكل (٥-١٤)، فإذا أدخلت شحنة إلى المجالين، وأكملت حركتها بلا انحراف فهذا يعني أن:



الشكل (٥-١٤): جهاز منتقي السرعة.

$$ق_ك = ق_غ$$

$$ك م ـ = ك ع غ جا ٩٠$$

$$م ـ = ع غ$$

وبإعادة ترتيب الكميات:

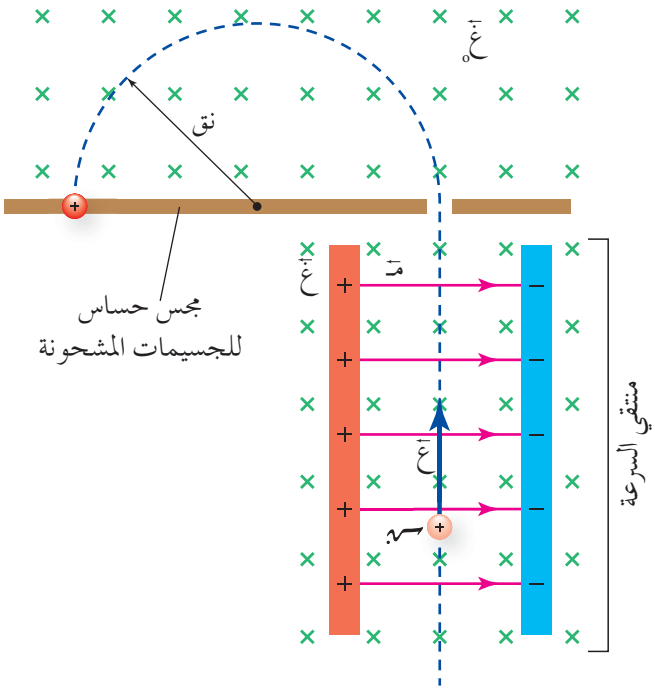
$$ع = \frac{م ب}{غ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥-٤)$$

تشير هذه العلاقة إلى أنه إذا أدخلت حزمة من الجسيمات المشحونة المتحركة بسرعات مختلفة إلى جهاز منتقي السرعة، فإن الجسيمات التي تكون سرعتها مساوية النسبة ($\frac{م ب}{غ}$) تكمل حركتها بلا انحراف. أما التي تكون سرعتها أكبر أو أقل من هذه النسبة فسوف تنحرف عن مسارها كما يبين الشكل (٥-١٤)، وعمليًّا يمكن التحكم بمقدار كل من (مـ) و(غ) لتكون نسبة ($\frac{م ب}{غ}$) مساوية السرعة المطلوبة في التجربة.

(٥-٤-٢) مطياف الكتلة (The Mass Spectrometer)

مطياف الكتلة جهاز يستخدم لفصل الأيونات المشحونة بعضها عن بعض وفق نسبة شحنة كل منها إلى كتلته، ما يتيح معرفة كتلتها ونوع شحنتها، بالإضافة إلى دراسة مكونات بعض المركبات الكيميائية. يوضح الشكل (٥-١٥) مبدأ عمل مطياف الكتلة، حيث يستخدم فيه منتقي السرعة في البداية لانتقاء الجسيمات المشحونة التي لها السرعة نفسها، وبعد أن تخرج هذه الجسيمات من منطقة المجالين الكهربائي (مـ) والمغناطيسي (غ)، تدخل منطقةً أخرى فيها مجال مغناطيسي آخر ($غ_o$) اتجاهه باتجاه المجال المغناطيسي (غ)، يجبر الجسيمات المشحونة على الحركة في مسار دائري. وفي نهاية المسار الذي يشكل نصف دائرة، تصطدم هذه الجسيمات بمجس خاص حسّاس للجسيمات المشحونة، وفي هذا الجهاز تُحدَّد نسبة الشحنة إلى الكتلة

اعتمادًا على نصف قطر المسار الدائري، وفق العلاقة (٥–٢)وإذا كانت شحنة الجسيم معلومة، يمكن عندها حساب كتلته. وتجدر الإشارة إلى أن العالم ثومسون (Thomson) استخدم مطيافًا للكتلة في عام (١٨٩٧) م لقياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته.



الشكل (٥–١٥): مطياف الكتلة.

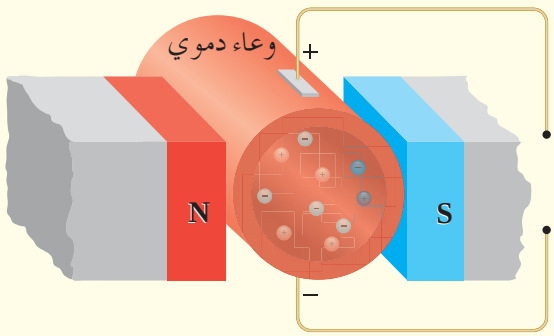
مراجعة (٥–٤)

١ ما الشرط اللازم تحققه لكي يعمل المجالان الكهربائي والمغناطيسي معًا لانتقاء سرعة محددة للجسيمات المتحركة؟

٢ اذكر اثنين من استخدامات مطياف الكتلة.

٣ وضح دور كل من المجال المغناطيسي (غ)، والمجال المغناطيسي ($غ_0$) في جهاز مطياف الكتلة.

٤ يمثل الشكل (٥–١٦) مبدأ عمل مضخة كهرمغناطيسية في جهاز القلب الصناعي تستخدم في ضخ الدم الذي يحتوي على أيونات موجبة وأيونات سالبة 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 والأيونات السالبة داخل الوعاء الدموي.



الشكل (٥–١٦): سؤال (٤).

٥–٥ القوة المغناطيسية التي يؤثر بها مجال مغناطيسي في موصل مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًّا

Magnetic Force Acting on a Current-Carrying Conductor

درست أن حركة الشحنات الكهربائية باتجاه واحد تشكل تيارًا كهربائيًّا، وحيث إن 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 (ن) تتحرك بسرعة (ع) في موصل طوله (ل) مغمور في مجال مغناطيسي:

$$ق_غ = ن\ ع\ غ\ جا\theta$$

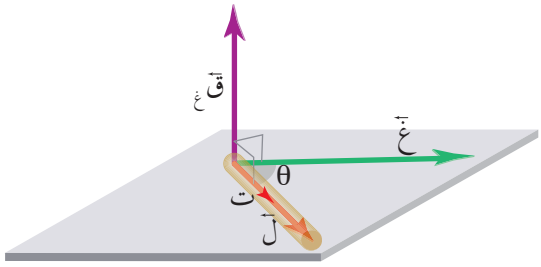
$$ق_غ = ن \frac{ل}{ز}\ غ\ جا\theta$$

وعليه يمكن حساب القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في موصل مستقيم يمر فيه تيارٌ كهربائيٌّ من العلاقة الرياضية الآتية:

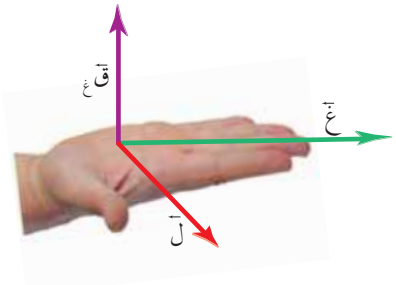
$$ق_غ = ت\ ل\ غ\ جا\theta \quad \text{.....} \quad (٥–٥)$$

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 مرور التيار الكهربائي فيه، و(θ): الزاوية التي يصنعها متجه طول الموصل مع متجه المجال المغناطيسي. ويكون اتجاه القوة المغناطيسية عموديًّا على المستوى الذي يتشكّل من المتجهين ($\vec{ل}$) و($\vec{غ}$) مهما كانت الزاوية بين اتجاهيهما كما يبين الشكل (٥–١٧). ويُحدد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل باستخدام قاعدة اليد اليمنى الموضحة في الشكل (٥–١٨).



الشكل (٥–١٧): القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يمر فيه تيار عمودية دائمًا على المستوى الذي يتشكل من المتجهين ($\vec{ل}$) و ($\vec{غ}$).



الشكل (٥–١٨): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا.

وللتوصل إلى أثر المجال المغناطيسي في موصل يحمل تيارًا كهربائيًّا نفذ النشاط الآتي.

نشاط (٥ – ١) القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا عندما يغمر في مجال مغناطيسي

الهدف: استقصاء أثر المجال المغناطيسي في موصل يحمل تيارًا كهربائيًّا.

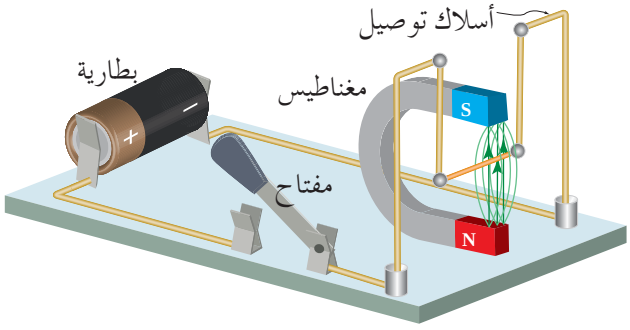
المواد والأدوات: مغناطيس على شكل حرف (U)، وأسلاك توصيل، وبطارية، ومفتاح كهربائي.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ ركب الدارة المبينة في الشكل (٥–١٩).

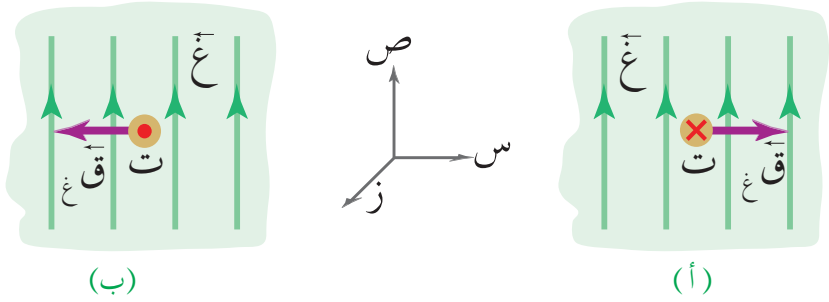
٢ أغلق مفتاح الدارة وراقب الجزء من السلك بين قطبي المغناطيس. ماذا تلاحظ؟

٣ اعكس قطبي البطارية لتغيير اتجاه مرور التيار الكهربائي في الدارة، ثم أغلقها وراقب الجزء من السلك بين قطبي المغناطيس. ماذا تلاحظ؟



الشكل (٥–١٩): نشاط (٥ – ١).

عمليًّا يستدل على اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا من اتجاه انحناء الموصل أو إزاحته إذا كان قابلًا للانزلاق أو الحركة، ويبين الشكل(٥–١٩) موصلًا مثبّتًا من طرفيه موضوعًا بين قطبي مغناطيس. عند انعدام التيار الكهربائي في الموصل، لا يتأثر الموصل بقوة مغناطيسية من المجال المغناطيسي المغمور فيه، في حين يكون اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل باتجاه (+س) عندما يكون اتجاه مرور التيار الكهربائي نحو (–ز) كما في الشكل (٥–٢٠/أ)، بينما يكون اتجاه القوة المغناطيسية نحو (–س) إذا انعكس اتجاه مرور التيار الكهربائي وأصبح نحو (+ز) كما يظهر في الشكل (٥–٢٠/ب).



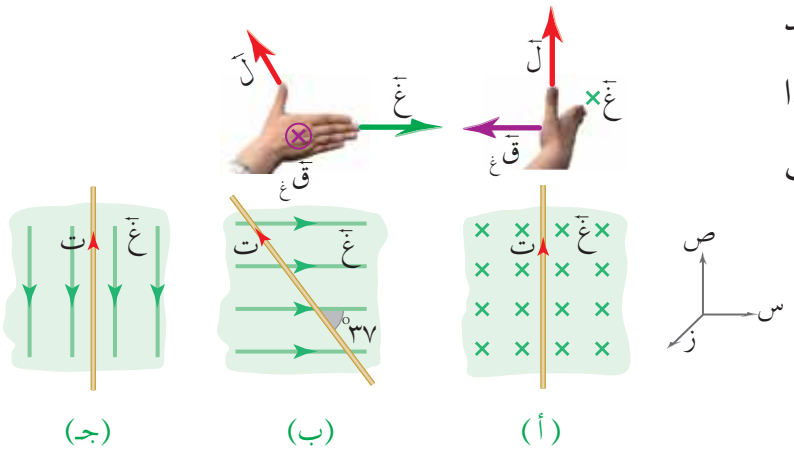
(ب) (أ)

الشكل (٥–٢٠): أثر القوة المغناطيسية في موصل.

وقد صُمِّمت أجهزة كهربائية متنوعة تعتمد في عملها على القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا كهربائيًّا داخل مجال مغناطيسي، مثل مكبرات الصوت، والغلفانوميتر المستخدم للكشف عن التيارات الكهربائية الصغيرة، والمحرك الكهربائي الذي يعد جزءًا أساسيًّا في العديد من الأجهزة مثل المراوح والسيارات الهجينة.

مثال (٥-٤)

موصل مستقيم طوله (٢٠) سم يمر فيه تيار كهربائي مقداره (٤) أمبير مغمور في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٠,١) تسلا. جد القوة المغناطيسية المؤثرة في هذا الموصل مقدارًا واتجاهًا في الحالات المبينة في الشكل (٥-٢١).



الشكل (٥-٢١): مثال (٥-٤).

الحل:

نحسب القوة المغناطيسية بتطبيق العلاقة:

ق غ = ت ل غ جا θ

أ) ق غ = ٤ × ٢٠ × ١٠$^{-٢}$ × ٠,١ × جا ٩٠

ق غ = ٠,٠٨ نيوتن، باتجاه المحور السيني السالب.

ب) ق غ = ٠,٠٨ × جا ١٤٣ = ٠,٠٨ × ٠,٦

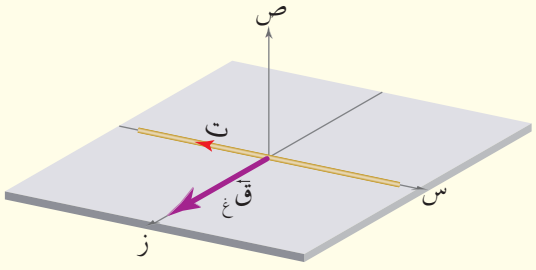
ق غ = ٤,٨ × ١٠$^{-٢}$ نيوتن، باتجاه المحور الزيني السالب.

جـ) ق غ = ٠,٠٨ × 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 (٥-٢٢) 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.

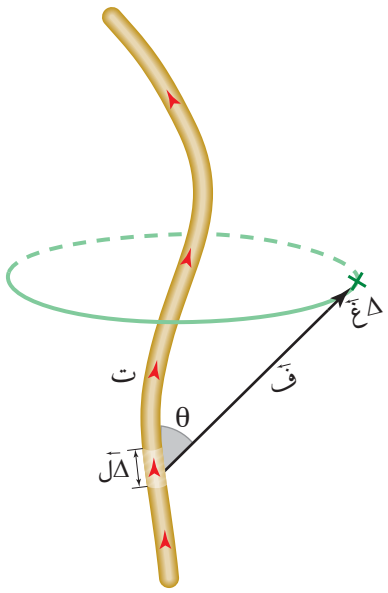


الشكل (٥-٢٢): سؤال (٢).

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 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، إذ إن مقدار المجال المغناطيسي (Δغ) عند نقطة تبعد مسافة (ف) عن (Δل) من طول موصل يمر فيه تيار كهربائي (ت) والناشئ عنه يتناسب طرديًّا مع كل من مقدار التيار الكهربائي وطول الموصل و(جاθ)؛ حيث (θ) الزاوية بين اتجاه ($\overrightarrow{ف}$) واتجاه ($\overrightarrow{\Delta ل}$) الذي يكون باتجاه التيار الكهربائي، وعكسيًّا مع مربع بعد النقطة عن الموصل انظر الشكل (٥–٢٣). وتمثل العلاقة (٥–٦) إحدى صيغ قانون بيو– سافار:



الشكل (٥–٢٣): قانون بيو– سافار.

$$\Delta غ = \frac{\mu}{4\pi} \frac{ت \Delta ل \, جا\theta}{ف^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥–٦)$$

حيث (μ): ثابت النفاذية المغناطيسية (Magnetic Permeability) للوسط المحيط بالموصل، فإذا كان الوسط هواءً أو فراغًا، فإن ($\mu_{\circ} = 4\pi \times ١٠^{-٧}$) تسلا .م/ أمبير.

وفي ما يأتي سندرس المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في كل من 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)

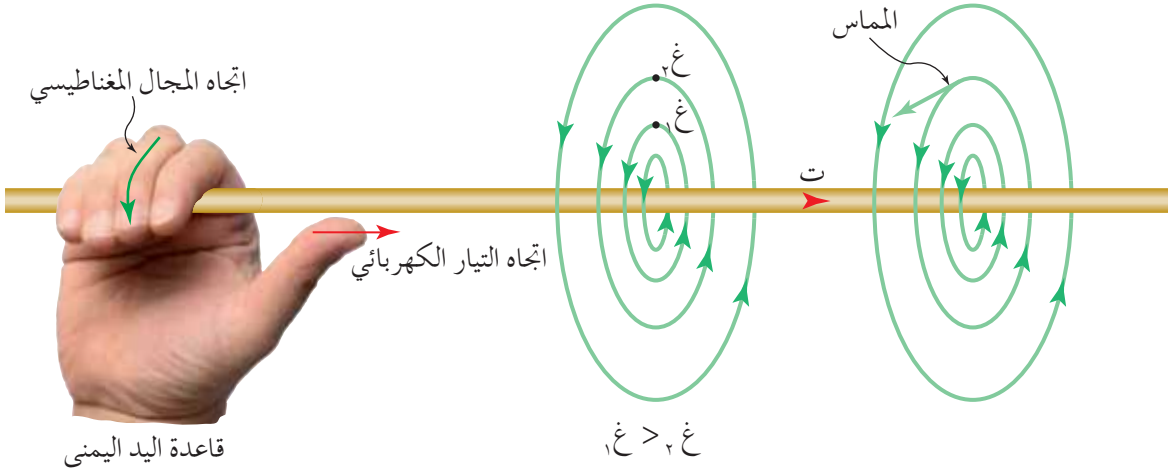
بينت التجارب العملية أن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم طويل يولد حوله مجالًا مغناطيسيًّا، ويكون هذا المجال على شكل دوائر متحدة في المركز، ويقع مركزها عند نقطة على محور الموصل ويكون مستواها عموديًّا على الموصل كما في الشكل (٥-٢٤).

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 ممثلًا بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$غ = \frac{\mu_{\circ} ت}{٢\pi ف} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥-٧)$$

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 بقية الأصابع تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي كما في الشكل (٥-٢٤). وبوجه عام فإن اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة بالقرب من الموصل يكون باتجاه المماس لخط المجال المغناطيسي عند تلك النقطة.

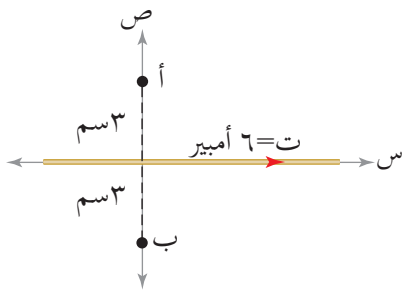
وتبعًا لقانون بيو-سافار، فإن المجال المغناطيسي على امتداد الموصل المستقيم يساوي صفرًا؛ حيث تكون (θ) بين (Δل) و(ف) تساوي صفرًا.



الشكل (٥-٢٤): المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم طويل.

مثال (٥-٥)

يبين الشكل (٥-٢٥) موصلًا مستقيمًا طويلًا يحمل تيارًا كهربائيًّا مقداره (٦) أمبير، جد المجال المغناطيسي الناشئ عن هذا التيار مقدارًا واتجاهًا عند النقطتين (أ) و(ب).

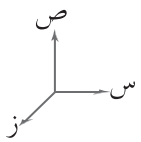


الشكل (٥-٢٥): مثال (٥-٥).

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 ($غ_أ$)، و($غ_ب$) متساوٍ، ويحسب من العلاقة:

$$غ = \frac{\mu_{\circ} ت}{ف \pi ٢}$$



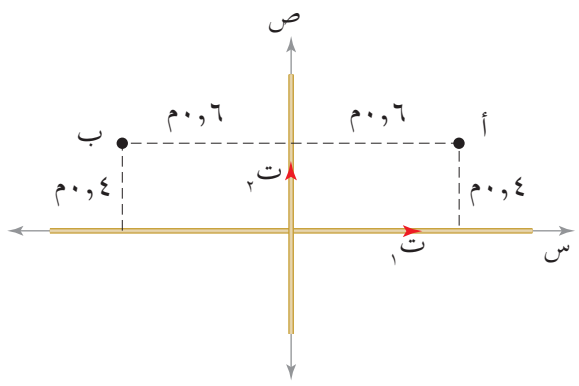
$$غ_أ = غ_ب = \frac{٦ \times ^{-٧}١٠ \times \pi ٤}{^{-٢}١٠ \times ٣ \times \pi ٢}$$

$$= ٤ \times ^{-٥}١٠ \text{ تسلا}$$

ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (أ) نطبق قاعدة اليد اليمنى، وبأخذ اتجاه المماس لخط المجال المغناطيسي عند النقطة (أ)، يكون اتجاهه نحو المحور الزيني الموجب ⊙. أما عند النقطة (ب) فيكون نحو المحور الزيني السالب ⊗.

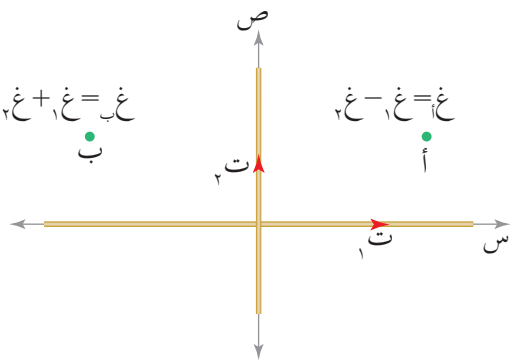
مثال (٥-٦)

يبين الشكل (٥-٢٦/أ) موصلين مستقيمين طويلين متعامدين، 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 (٥-٢٦/أ): مثال (٥-٦).

الحل:



الشكل (٥–٢٦/ب): مثال (٥–٦).

- يوجد عند النقطة (أ) مجالان مغناطيسيان كما يوضح الشكل (٥–٢٦/ب)، ($غ_١$) الناشئ عن التيار الأول، و($غ_٢$) الناشئ عن التيار الثاني.

$$غ_١ = \frac{\mu_٠ ت_١}{٢\pi ف_١} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٢}{٢\pi \times ٠,٤}$$

$\vec{غ}_١ = ٦ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه المحور الزيني الموجب ⊙.

$$غ_٢ = \frac{\mu_٠ ت_٢}{٢\pi ف_٢} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٢}{٢\pi \times ٠,٦}$$

$\vec{غ}_٢ = ٤ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب ⊗.

$\vec{غ}_{أ\,(المحصلة)} = غ_١ - غ_٢ = ٢ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه المحور الزيني الموجب ⊙.

- أما عند النقطة (ب) والتي لها بعد النقطة (أ) نفسه عن السلكين فإن المجالين بالاتجاه نفسه، ولهذا يكون المجال المغناطيسي المحصل:

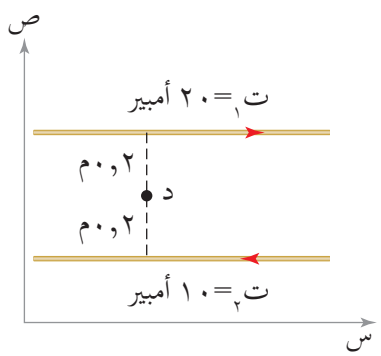
$\vec{غ}_{ب\,(المحصلة)} = غ_١ + غ_٢ = ١٠ \times ١٠^{-٦}$ تسلا، باتجاه المحور الزيني الموجب ⊙.

مثال (٥–٧)

موصلان مستقيمان متوازيان طويلان يحملان تيارين متعاكسين ($ت_١$ ، $ت_٢$)، كما في الشكل (٥–٢٧/أ)، معتمدًا على الشكل 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 (٥–٢٧/أ): مثال (٥–٧).

الحل:

١ يوجد عند النقطة (د) مجالان مغناطيسيان، ($غ_١$) الناشئ عن ($ت_١$)، و($غ_٢$) الناشئ عن ($ت_٢$).

$$\vec{غ}_١ = \frac{\mu_٠ ت_١}{٢\pi ف_١} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٢٠}{٢\pi \times ٠,٢} = ٢ \times ١٠^{-٥}$$ تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب.

$\overleftarrow{غ}_{٢} = \frac{\mu_{٠} ت_{٢}}{٢\pi ف_{٢}} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ١٠}{٢\pi \times ٠,٢} = ١ \times ١٠^{-٥}$ تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب.

وعليه، يكون المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د) حاصل جمع المجالين:

$\overleftarrow{غ}_{د\ (المحصلة)} = غ_{١} + غ_{٢} = ٣ \times ١٠^{-٥}$ تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب.

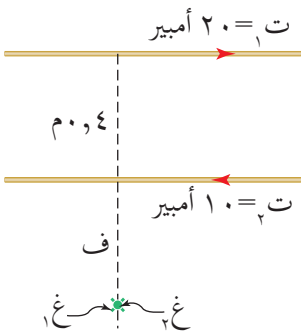
٢ لكي ينعدم المجال المغناطيسي ($غ_{محصلة}$ = صفر)، يجب أن يكون المجالان الناشئان عن الموصلين متساويين مقدارًا ومتعاكسين اتجاهًا، ويتحقق ذلك في المنطقة الواقعة خارج الموصلين من جهة التيار الأصغر، وعلى بعد (ف) منه كما في الشكل (٥-٢٧/ب):

$$غ_{١} = غ_{٢}$$

$$\frac{\mu_{٠} ت_{١}}{٢\pi ف_{١}} = \frac{\mu_{٠} ت_{٢}}{٢\pi ف_{٢}}$$

$$\frac{٢٠}{(٠,٤ + ف)} = \frac{١٠}{ف}$$

$٢٠ ف = ٤ + ١٠ ف \Leftarrow ف = ٠,٤$ م

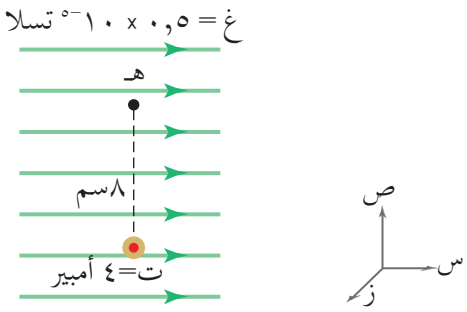


الشكل (٥-٢٧/ب): مثال (٥-٧).

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 المحور السيني الموجب مغمور فيه موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي. إذا كانت النقطة (هـ) تبعد عن الموصل (٨) سم كما يوضح الشكل (٥-٢٨)، فجد:



الشكل (٥-٢٨): مثال (٥-٨).

١ المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.

٢ القوة المغناطيسية مقدارًا واتجاهًا المؤثرة في شحنة كهربائية مقدارها (٢) نانوكولوم في أثناء مرورها بالنقطة (هـ) بسرعة مقدارها (٤٠٠) م/ث باتجاه المحور الزيني الموجب.

الحل:

١ يوجد عند النقطة (هـ) مجالان مغناطيسيان، أحدهما المجال المنتظم باتجاه المحور السيني الموجب، والآخر المجال المغناطيسي الناشئ عن الموصل المستقيم الطويل، ولحسابه نطبق العلاقة:

$$غ_{مستقيم} = \frac{\mu_{0} ت}{ف \pi ٢}$$

$$= \frac{٤ \times ^{-٧}١٠ \times \pi ٤}{^{-٢}١٠ \times ٨ \times \pi ٢}$$

$\overleftarrow{غ}_{مستقيم} = ١ \times ١٠^{-٥}$ تسلا، باتجاه المحور السيني السالب.

ولأن المجالين متعاكسان في الاتجاه عند النقطة (هـ):

$$غ_{هـ\,(المحصلة)} = غ_{مستقيم} - غ_{منتظم} = ١ \times ١٠^{-٥} - ٠,٥ \times ١٠^{-٥}$$

$\overleftarrow{غ}_{هـ\,(المحصلة)} = ٠,٥ \times ١٠^{-٥}$ تسلا، باتجاه المحور السيني السالب.

٢ تمر الشحنة الكهربائية بالنقطة (هـ) فيؤثر فيها المجال المغناطيسي المحصل ($غ_{هـ}$) بقوة مغناطيسية يمكن حسابها من العلاقة:

$$ق_{غ} = ش ع غ \text{ جا} \theta \quad (\theta = ٩٠^{\circ})$$

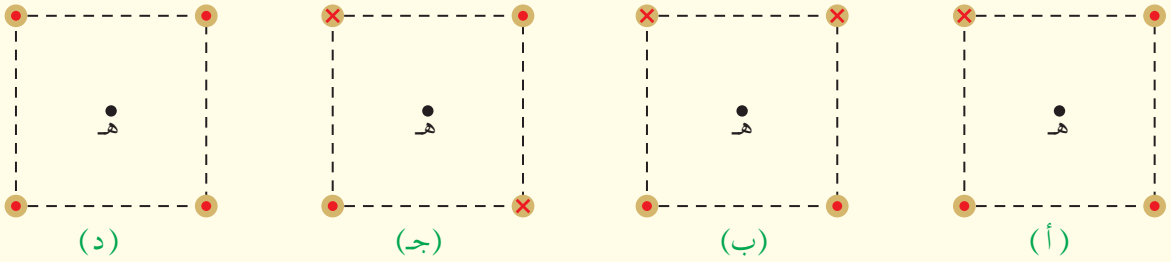
$$= ٢ \times ١٠^{-٩} \times ٤ \times ١٠^{٢} \times ٠,٥ \times ١٠^{-٥} \times \text{جا}٩٠$$

$\overleftarrow{ق}_{غ} = ٤ \times ١٠^{-١٢}$ نيوتن نحو المحور الصادي السالب.

١ صف 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 تيار في اتجاه المحور الزيني موضوعة عند رؤوس مربع، إذا كانت قيم التيار في الموصلات متساوية، رتب هذه التوزيعات تصاعديًّا وفق مقدار المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ).



الشكل (٥-٢٩): سؤال (٣).

٤ في الشكل (٥-٣٠)، إذا انعدم المجال المغناطيسي عند النقطة (أ)، أجب عما يأتي:

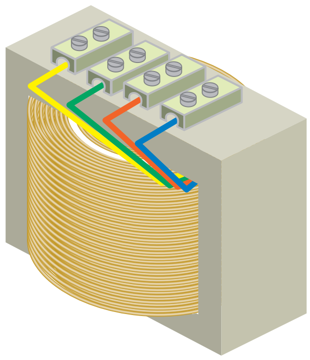
أ جد اتجاه التيار ($ت_٢$).

ب أيهما أكبر مقدارًا التيار ($ت_١$) أم ($ت_٢$)؟ 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).

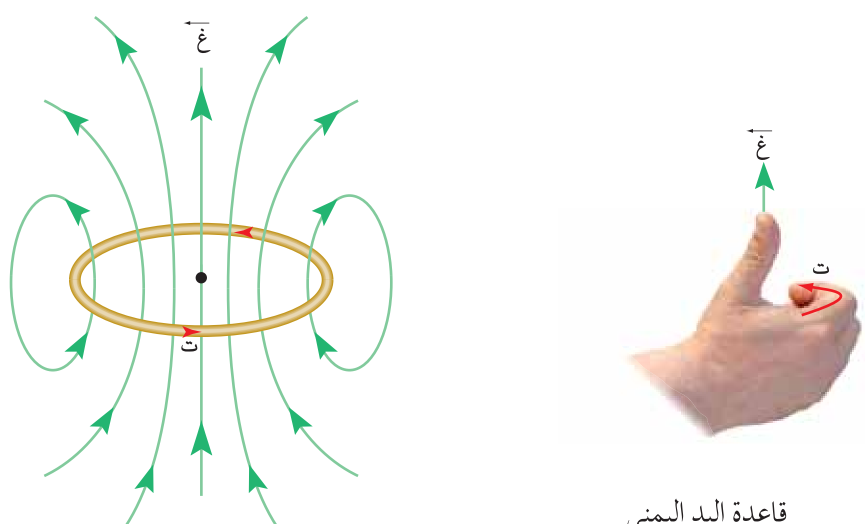

الشكل (٥-٣١): أحد أشكال المحولات.

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).

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:

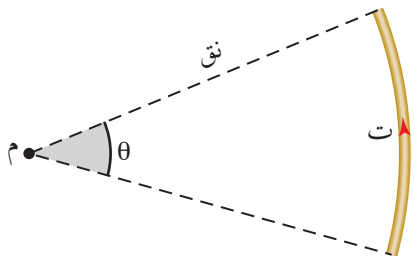
$$\text{غ} = \frac{\mu_{\circ}\,\text{ت}\,\text{ن}}{\text{٢نق}} \quad \text{.............................. (٥-٨)}$$

ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي الناشئ في مركز الملف الدائري، نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث توضع الأصابع الأربعة باتجاه التيار في الملف الدائري، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي (القطب الشمالي) في مركز الملف الدائري كما في الشكل (٥-٣٢).



الشكل (٥-٣٢): المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في ملف دائري.

وإذا 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 مقدار هذا الجزء من اللفة يُحسب من العلاقة الرياضية الآتية:



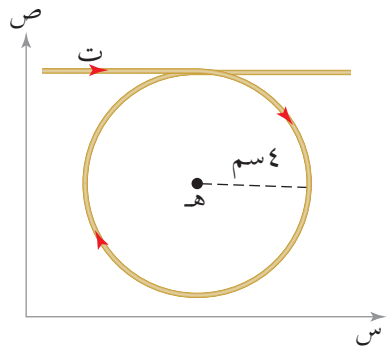
الشكل (٥-٣٣): الموصل جزء من لفة دائرية على شكل قوس.

$$\text{ن} = \frac{\theta}{٣٦٠^\circ} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥-٩)$$

حيث (θ): الزاوية المركزية التي تقابل القوس بالدرجات.

مثال (٥-٩)

يبين الشكل (٥-٣٤) موصلًا مستقيمًا طويلًا يمر فيه تيار كهربائي مقداره (١٢) أمبير، صنع من جزء منه ملف دائري مكون من (٧) لفات نصف قطره (٤) سم. جد المجال المغناطيسي المحصل في مركز الملف الدائري (هـ) مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (٥-٣٤): مثال (٥-٩).

الحل:

تمثل النقطة (هـ) مركز الملف الدائري، ويوجد عندها مجالان مغناطيسيّان، أحدهما ناشئ عن التيار الكهربائي المار في الموصل المستقيم الطويل ($غ_١$)، والآخر عن التيار المار في الملف الدائري ($غ_٢$). التيار المار في الموصلين متساوٍ، وبعد النقطة (هـ) عن الموصل المستقيم يساوي نصف قطر الملف الدائري (ف=نق).

$$غ_١ = \frac{\mu_٠ ت}{٢\pi ف} = \frac{١٢ \times ١٠^{-٧} \times ٤\pi}{٢ \times ٤ \times ١٠^{-٢} \times \pi ٢}$$

$$\overleftarrow{غ_١} = ٦ \times ١٠^{-٥} \text{ تسلا، باتجاه } (-ز).$$

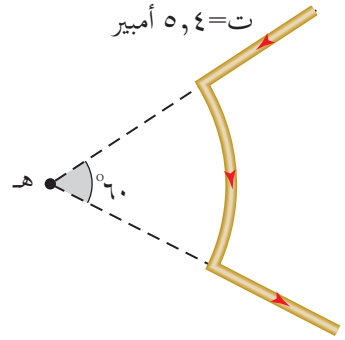
$$غ_٢ = \frac{\mu_٠ ت\ ن}{٢ نق} = \frac{٧ \times ١٢ \times ١٠^{-٧} \times ٤\pi}{٢ \times ٤ \times ١٠^{-٢}} \quad \left(\text{وبتعويض قيمة } \pi = \frac{٢٢}{٧}\right)$$

$$\overleftarrow{غ_٢} = ١٣٢ \times ١٠^{-٥} \text{ تسلا، باتجاه } (-ز).$$

$$\overleftarrow{غ_{هـ\ (المحصلة)}} = غ_١ + غ_٢ = ١٣٨ \times ١٠^{-٥} \text{ تسلا، باتجاه } (-ز).$$

مثال (٥–١٠)

يمثل الشكل (٥–٣٥) موصلًا نصف قطر الجزء الدائري منه (٩) سم، اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل جد المجال المغناطيسي مقدارًا واتجاهًا عند النقطة (هـ).



الشكل (٥–٣٥): مثال (٥–١٠).

الحل:

تقع النقطة (هـ) على امتداد الموصلين المستقيمين، ولهذا يكون المجال المغناطيسي الناتج من كل موصل مستقيم عند النقطة (هـ) يساوي صفرًا وفق قانون بيو–سافار. أما القوس فيمثل جزءًا من لفة دائرية، ولإيجاد (ن) نستخدم العلاقة:

$$\text{ن} = \frac{\theta}{٣٦٠^\circ} = \frac{٦٠}{٣٦٠} = \frac{١}{٦} \text{ لفة.}$$

وعليه، فإن المجال المغناطيسي عند النقطة (هـ):

$$\text{غ}_{\text{هـ}} = \frac{\mu_{\circ} \text{ت ن}}{٢ \text{نق}} = \frac{\frac{١}{٦} \times ٥,٤ \times ١٠^{-٧} \times \pi ٤}{٢ \times ٩ \times ١٠^{-٢}}$$

$$\overleftarrow{\text{غ}}_{\text{هـ}} = \pi ٠,٢ \times ١٠^{-٥} \text{ تسلا، باتجاه (–ز).}$$

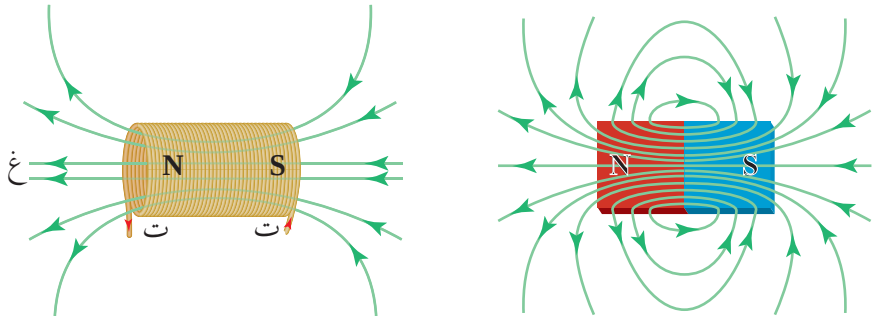
مراجعة (٥–٦–٢)

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 المتماثلة في نصف القطر وتقع مراكزها على خط مستقيم يمثل محور الملف، 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 (٥-٣٦)، إلا أنه يمتاز عنه بإمكانية التحكم في مقداره واتجاهه عن طريق التحكم في التيار المار فيه.



الشكل (٥-٣٦): الملف اللولبي مغناطيس كهربائي عند مرور تيار فيه.

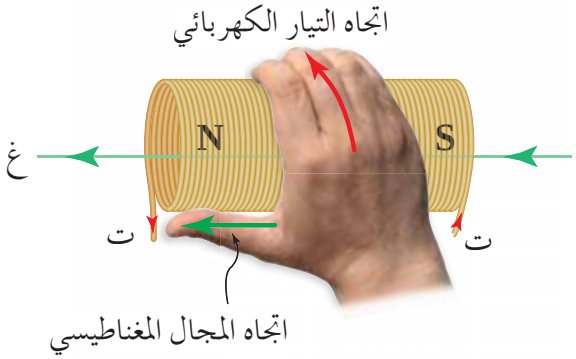
يعد المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي بعيدًا عن طرفي الملف مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا؛ إذ تكون خطوط المجال المغناطيسي متوازية داخله وبالاتجاه نفسه. وكلما زاد تراص حلقات الملف اللولبي زاد انتظام مجاله، ولذلك نستخدم أسلاكًا رفيعة ومتراصة للحصول على مجال مغناطيسي منتظم تمامًا داخل الملف اللولبي.

يعتمد مقدار المجال المغناطيسي المتولد داخل الملف اللولبي على التيار الكهربائي المار فيه (ت)، وعدد لفاته (ن)، وطوله (ل)، وعلى 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:

$$\text{غ} = \frac{\mu \, \text{ت} \, \text{ن}}{\text{ل}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥-١٠)$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة بدلالة عدد اللفات في وحدة الأطوال (نَ)، حيث ($\text{نَ} = \frac{\text{ن}}{\text{ل}}$) بوحدة (لفة/م) كما يأتي:

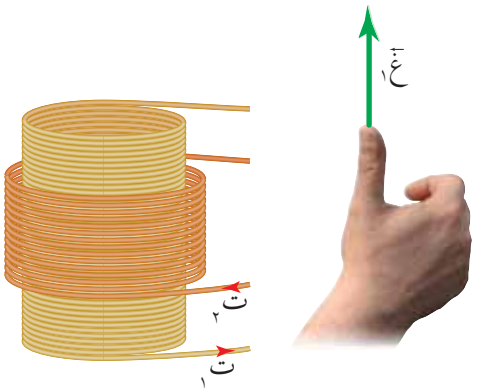
ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي المنتظم داخل الملف اللولبي وبعيدًا عن طرفيه، فإنّنا نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث تشير الأصابع الأربعة إلى اتجاه التيار الكهربائي في الملف اللولبي، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي (القطب الشمالي)، كما في الشكل (٥-٣٧). وعليه يعد الطرف الذي تخرج منه خطوط المجال المغناطيسي قطبًا شماليًّا، والطرف الذي تدخل فيه خطوط المجال المغناطيسي قطبًا جنوبيًّا كما هو الحال في المغناطيس المستقيم.



الشكل (٥-٣٧): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي.

مثال (٥-١١)

ملف لولبي طويل عدد لفاته (١٥) لفة لكل (١) سم من طوله، يمر فيه تيار ($ت_١$) مقداره (٨) أمبير، يحيط به ملف لولبي آخر عدد لفاته (٢٠٠٠) لفة، وطوله (٢٤) سم، يمر فيه تيار ($ت_٢$) مقداره (٣) أمبير باتجاه معاكس لاتجاه تيار الملف اللولبي الأول، إذا علمت أن الملفين متحدين في المحور كما في الشكل (٥-٣٨)، فجد:



الشكل (٥-٣٨): مثال (٥-١١).

١ المجال المغناطيسي المحصل مقدارًا واتجاهًا الناشئ في المحور المشترك.

٢ التيار الكهربائي المار في الملف اللولبي الخارجي لكي ينعدم المجال المغناطيسي في المحور المشترك.

الحل:

١ يوجد عند المحور المشترك مجالان مغناطيسيّان، أحدهما ناشئ عن التيار المار في الملف اللولبي الأول ($غ_١$)، والآخر عن التيار المار في الملف اللولبي الثاني ($غ_٢$).

بما أن عدد لفات الملف اللولبي الأول (١٥) لفة لكل (١) سم، فإن:

$$نَ_١ = \frac{ن_١}{ل_١} = \frac{١٥}{١ \times ١٠^{-٢}} = ١٥ \times ١٠^{٢} \text{ لفة/م.}$$

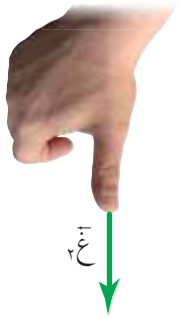
وعليه، فإن:

$$غ_١ = \mu_٠ ت_١ نَ_١ = ٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٨ \times ١٥ \times ١٠^{٢}$$

$$\overrightarrow{غ_١} = ٤٨\pi \times ١٠^{-٤} \text{ تسلا، باتجاه (+ص).}$$

$$غ_٢ = \frac{\mu_٠ ت_٢ ن_٢}{ل_٢} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٣ \times ٢٠٠٠}{٢٤ \times ١٠^{-٢}}$$

$$\overrightarrow{غ_٢} = ١٠٠\pi \times ١٠^{-٤} \text{ تسلا، باتجاه (−ص).}$$



وعليه، فإن المجال المغناطيسي المحصل عند المحور المشترك:

$$غ_{(المحصلة)} = غ_٢ - غ_١ = ١٠٠\pi \times ١٠^{-٤} - ٤٨\pi \times ١٠^{-٤}$$

$$\overrightarrow{غ}_{(المحصلة)} = ٥٢\pi \times ١٠^{-٤} \text{ تسلا، باتجاه (−ص).}$$

٢ لكي ينعدم المجال المغناطيسي في المحور، يجب أن يتساوى المجالان في المقدار، ويتعاكسا في الاتجاه، وبما أن اتجاهيهما متعاكسان، فإن:

$$غ_١ = غ_٢$$

$$\mu_٠ ت_١ نَ_١ = \frac{\mu_٠ ت_٢ ن_٢}{ل_٢}$$

$$٨ \times ١٥ \times ١٠^{٢} = \frac{ت_٢ \times ٢٠٠٠}{٢٤ \times ١٠^{-٢}}$$

$$ت_٢ = ١,٤٤ \text{ أمبير}$$

مراجعة (٥-٦-٣)

١ هل تتغير قيمة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي عند الانتقال 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 (٠,٥ل) وعدد لفاته (٢ن). يمر في كل منها التيار الكهربائي نفسه، رتب هذه الملفات تنازليًا وفق المجال المغناطيسي المتولد في محور كل منها.

٣ كيف سيتأثر المجال المغناطيسي المتولد عند نقطة تقع على محور الملف اللولبي وبعيدًا عن طرفيه في الحالات الآتية:

أ زيادة قطر كل لفة إلى ضعفي ما كان عليه.

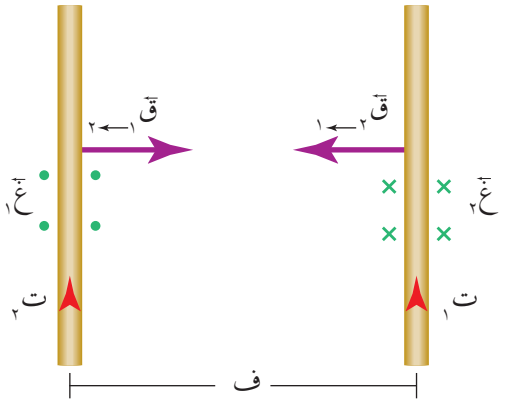
ب تغيير مادة قلب الملف اللولبي لتصبح حديدًا.

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.

درست أن الموصل المستقيم الذي يحمل تيارًا كهربائيًّا يتأثر بقوة مغناطيسية عند غمره في مجال مغناطيسي. 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؟

عند وضع موصلين طويلين مستقيمين متوازيين البعد بينهما (ف)، ويمر في كل منهما تيار كهربائي كما في الشكل (٥–٣٩)، تنشأ قوة مغناطيسية متبادلة بين الموصلين، وفقًا للقانون الثالث لنيوتن، حيث يؤثر الموصل الأول في الثاني بقوة مغناطيسية ($\vec{ق}_{١\leftarrow٢}$) باتجاه معين، وفي الوقت ذاته، يؤثر الموصل الثاني في الأول بقوة مغناطيسية ($\vec{ق}_{٢\leftarrow١}$) مساوية القوة الأولى في المقدار ومعاكسة لها في الاتجاه ($\vec{ق}_{٢\leftarrow١} = -\vec{ق}_{١\leftarrow٢}$).



الشكل (٥–٣٩): القوة المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين.

عند مرور تيار كهربائي وليكن (ت١) في الموصل الأيمن باتجاه (+ص)، سينشأ عنه مجال مغناطيسي (غ١) على بعد (ف) منه يعطى بالعلاقة (٥–٧): $غ_١ = \frac{\mu_٠ ت_١}{٢\pi ف}$

وفق قاعدة اليد اليمنى، يكون اتجاه المجال المغناطيسي (غ١) نحو محور (+ز) في المنطقة الواقعة على يسار الموصل. فإذا كان موصل مستقيم آخر يمر فيه تيار وليكن(ت٢) باتجاه (+ص) في تلك المنطقة، فإن هذا الموصل سيتأثر بقوة مغناطيسية وفق العلاقة (٥–٥): $ق_{١\leftarrow٢} = ت_٢ ل_٢ غ_١ \text{ جا}\theta$

حيث ($\theta = ٩٠°$) بين اتجاه (ل٢) واتجاه (غ١)، فإذا عوضنا (غ١) في العلاقة السابقة، سنحصل على العلاقة الآتية:

$$ق_{١\leftarrow٢} = \frac{\mu_٠ ت_١ ت_٢ ل_٢}{٢\pi ف} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥–١٢)$$

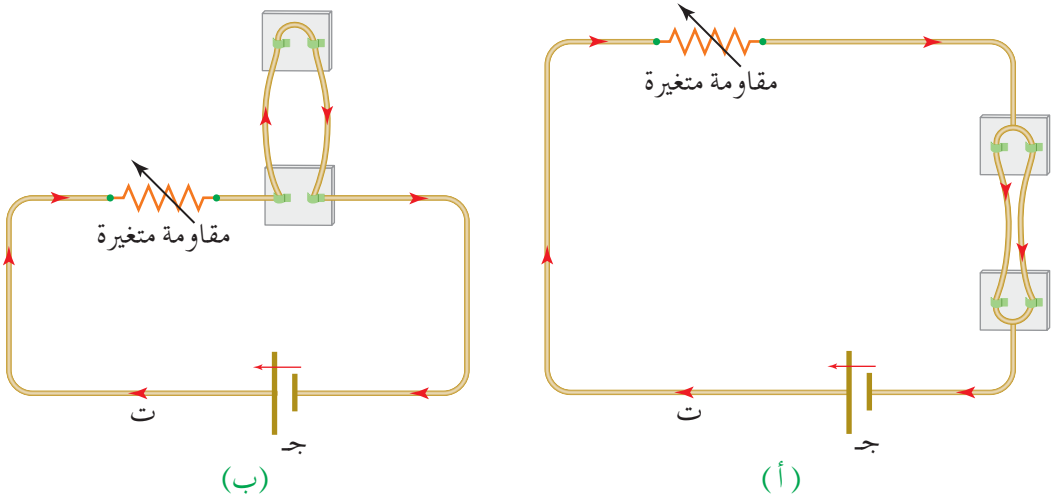
ووفق قاعدة اليد اليمنى، فإن اتجاه القوة المؤثرة في (ت٢) سيكون نحو (+س)، أي سينجذب

الموصل الثاني نحو الأول، ويمكن بالطريقة ذاتها إيجاد ($ق_{٢←١}$).

ويمكن حساب القوة المتبادلة لكل وحدة طول من الموصل من العلاقة الآتية:

$$\frac{ق_{متبادلة}}{ل} = \frac{\mu_{\circ} ت_{١} ت_{٢}}{ف \pi ٢} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (٥-١٣)$$

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 (٥–٤٠) .



الشكل (٥–٤٠): القوة المتبادلة بين موصلين مستقيمين متوازيين يحملان تيارين:
(أ): بالاتجاه نفسه (بينهما قوة تجاذب) (ب): متعاكسين (بينهما قوة تنافر).

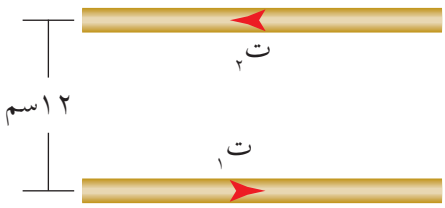
ومن التطبيقات العملية على القوة المتبادلة بين موصلين مستقيمين متوازيين جهاز يستخدم لقياس التيار الكهربائي المار في موصل بدقة، يسمى ميزان أمبير.

مثال (٥-١٢)

موصلان مستقيمان متوازيان طويلان كما في الشكل (٥-٤١)، يمر في الأول تيار كهربائي مقداره (٤) أمبير باتجاه محور السينات الموجب، ويمر في الثاني تيار كهربائي مقداره (٦) أمبير باتجاه محور السينات السالب، جد:

١ القوة المتبادلة بين الموصلين لوحدة الأطوال منهما.

٢ القوة المغناطيسية التي يؤثر بها الموصل الأول في جزء طوله ٢سم من الموصل الثاني مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (٥-٤١): مثال (٥-١٢).

الحل:

١ نحسب القوة المتبادلة لكل وحدة طول من العلاقة (٥-١٣):

$$\frac{\text{ق}_{\text{متبادلة}}}{\text{ل}} = \frac{\mu_{\circ} \text{ت}_١ \text{ت}_٢}{٢\pi \text{ف}} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٤ \times ٦}{١٢ \times ١٠^{-٢} \times ٢\pi}$$

$$\frac{\text{ق}_{\text{متبادلة}}}{\text{ل}} = ٤ \times ١٠^{-٥} \text{ نيوتن/م، وهي قوة تنافر لأن التيارين متعاكسان.}$$

٢ نحسب القوة المؤثرة في طول محدد من الموصل من العلاقة (٥-١٢):

$$\text{ق}_{١\leftarrow ٢} = \frac{\mu_{\circ} \text{ت}_١ \text{ت}_٢ \text{ل}_٢}{٢\pi \text{ف}} = \frac{٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٤ \times ٦ \times ٢ \times ١٠^{-٢}}{١٢ \times ١٠^{-٢} \times ٢\pi}$$

$$\overleftarrow{\text{ق}}_{١\leftarrow ٢} = ٨ \times ١٠^{-٧} \text{ نيوتن، نحو (+ص).}$$

مراجعة (٥-٧)

١ اذكر العوامل التي تعتمد عليها القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يمر فيهما تياران كهربائيان.

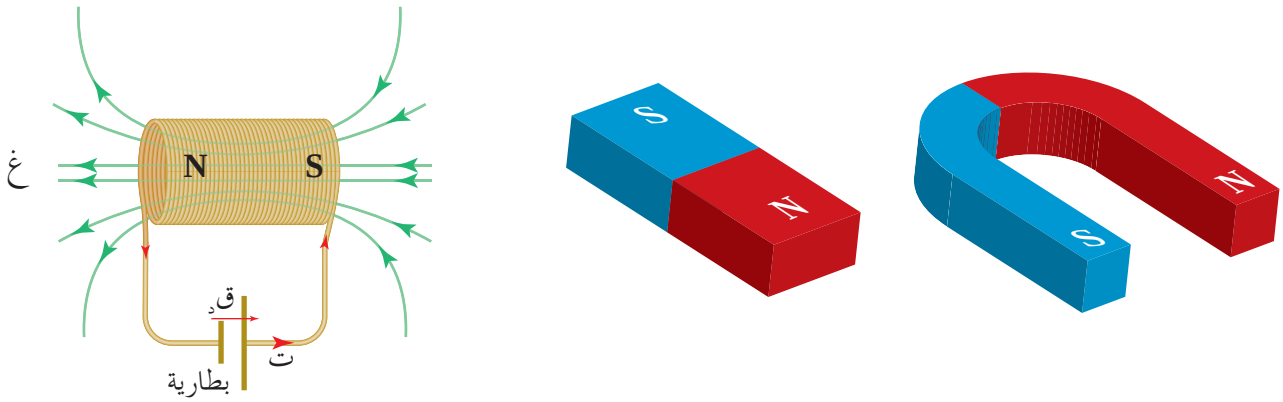
٢ ما الشرط اللازم لتطبيق علاقة القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين مستقيمين طويلين يمر فيهما تيار كهربائي؟

٣ يظهر الشكل (٥-٤٢) ثلاثة موصلات طويلة مستقيمة متوازية تقع في مستوًى واحد تحمل تيارات متساوية والمسافات بينها متماثلة. رتب الموصلات الثلاثة تصاعديًّا وفق القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في كل منها.

الشكل (٥-٤٢): سؤال (٣).

٥–٨ المواد المغناطيسية
Magnetic Materials

كثير منا تعرّف المغناطيسية عن طريق استخدام مغانط مختلفة ضمن أدوات المطبخ أو القرطاسية أو الألعاب، وللمغانط (Magnets) أهمية كبيرة في التكنولوجيا التي تقوم عليها حياة المجتمعات الحديثة، فالمغانط الكهربائية في المحركات والمولدات، والطبقة الّتي تغطي الأقراص الممغنطة في الحاسوب، والكثير من الأجهزة العملية والعلمية تعد أمثلة على استخدام المغانط. وللمغانط أشكال عدة، منها المغناطيس المستقيم وحدوة الفرس، والمغناطيس الكهربائي. انظر الشكل (٥–٤٣)، وتولد المغانط جميعها مجالات مغناطيسية حولها، فما منشأ هذا المجال المغناطيسي؟ وما المواد التي تصنع منها المغانط؟

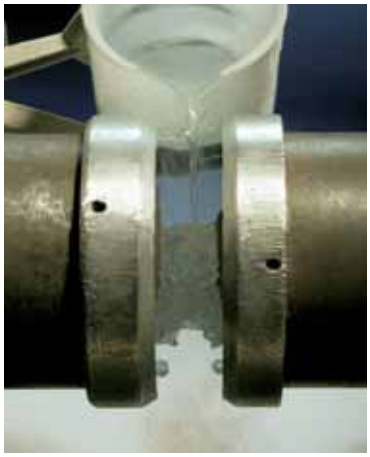


الشكل (٥–٤٣): بعض أشكال المغانط.

يكمن أصل الخصائص المغناطيسية للمادة في بنائها الذريّ؛ فالمادة تتألف من ذرات، وتدور الإلكترونات في مدارات حول النواة الموجبة للذرة. وبالإضافة إلى حركتها الدائرية فإن للإلكترونات حركة دورانية؛ إذ يدور كل إلكترون حول محوره الذاتي، وهذه الحركة للإلكترون بمثابة تيار كهربائي، وقد تبين من تجربة أورستد أن التيار الكهربائي هو أحد مصادر المجال المغناطيسي؛ ولذلك فإن كل إلكترون يولد حوله مجالًا مغناطيسيًّا ذاتيًّا. والمجال المغناطيسي الناتج من حركة الإلكترون يشبه المجال المغناطيسي الناتج من مغناطيس صغير جدًّا، له قطبان أحدهما شمالي والآخر جنوبي، وفي الذرة الواحدة قد تكون هذه المجالات في صورة أزواج متعاكسة، فتكون محصلتها صفرًا، أو تكون هذه المجالات في ذرة أخرى باتجاه واحد فينشأ لها مجال مغناطيسي صغير دائم.

إن محصلة المجالات المغناطيسية الذرية في قطعة من المادة هي التي تحدد خصائص المادة المغناطيسية

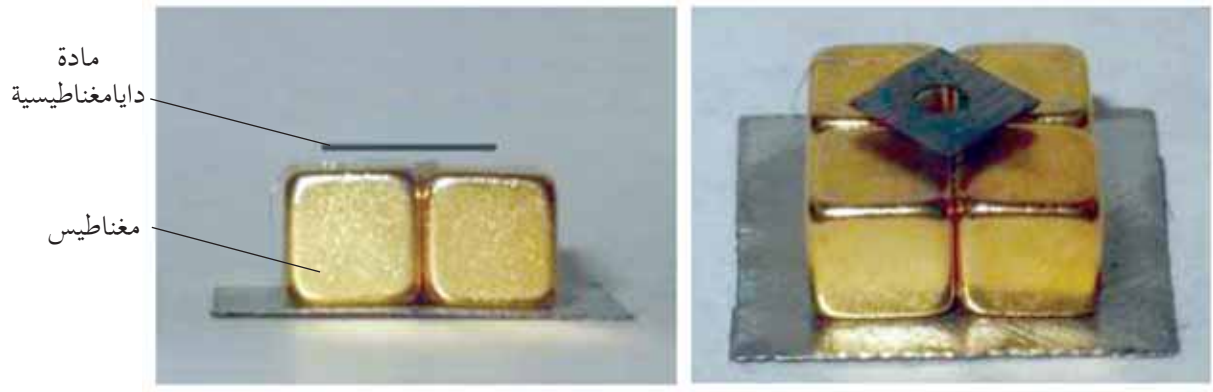
وسلوكها عند وضعها في مجال مغناطيسي خارجي وتأثرها به؛ لذلك تصنف المواد وفق خصائصها المغناطيسية وسلوكها المغناطيسي إلى ثلاثة أصناف رئيسة: مواد بارامغناطيسية (paramagnetic)، ومواد دايامغناطيسية (diamagnetic)، ومواد فرّومغناطيسية (ferromagnetic).



الشكل (٥-٤٤): انجذاب الأكسجين السائل إلى مغناطيس.

ففي المواد **البارامغناطيسية** فإن محصلة المجالات المغناطيسية الذرية الناتجة من حركة الإلكترونات تساوي صفرًا؛ لذلك لا يتولد حول المادة مجال مغناطيسي، إلا أنه عند وضع هذه المواد في مجال مغناطيسي خارجي تترتب مغانطها الذرية الصغيرة بقدر محدود باتجاه المجال المغناطيسي المؤثر، وتبدي استجابة ضعيفة للمجال المؤثر، أي أنها تتمغنط وتتأثر بقوة جذب عند تقريب مغناطيس خارجي منها. ومن الأمثلة على المواد البارامغناطيسية الألمنيوم والصوديوم والأكسجين السائل. ويظهر الشكل (٥-٤٤) انجذاب الأكسجين السائل إلى مغناطيس.

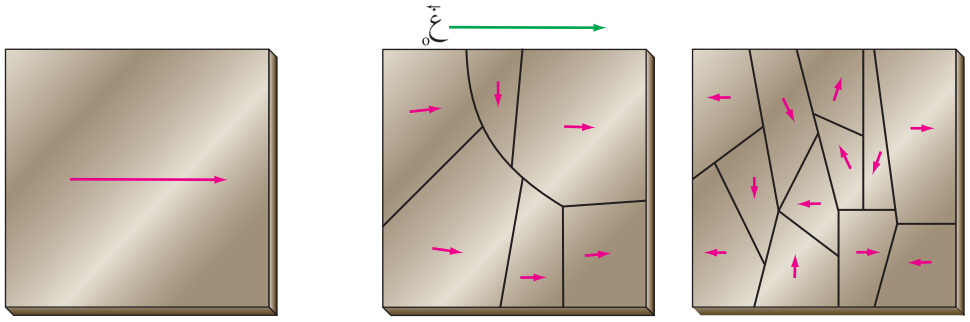
أما المواد **الدايامغناطيسية** ليس لها أثر مغناطيسي، وعند تعرضها إلى مجال مغناطيسي خارجي تكون استجابتها ضعيفة، إلا أنها تتمغنط بعكس اتجاه المجال المغناطيسي المؤثر، وإذا قُربت من مغناطيس دائم فإنها تتنافر معه، وقد لاحظ العالم فارادي هذا الأثر في البزموث والماء والفضة، وحديثًا لوحظ هذا الأثر في المواد فائقة التوصيل. ويظهر الشكل (٥-٤٥) مادة دايامغناطيسية تتنافر مع مغناطيس موضوع أسفلها.



الشكل (٥-٤٥): مادة دايامغناطيسية تتنافر مع مغناطيس أسفلها.

وأما **المواد الفرومغناطيسية** فتمتاز باحتوائها على مغانط ذرية تتفاعل مع بعضها بعضًا بصورة قوية، وهذا التفاعل القوي يؤدي بهذه المغانط إلى ترتيب أو اصطفاف تلقائي حتى بغياب المجال

المغناطيسي الخارجي، وتشكل مجموعة المغانط الذرية المرتبة باتجاه واحد ما يعرف **بالمناطق المغناطيسية** (magnetic domains)، ويتراوح حجم المنطقة المغناطيسية بين ($١٠^{-٦} - ١٠^{-٢}$) سم^{٣}، وتحتوي المنطقة على عدد من الذرات بين ($١٠^{١٧} - ١٠^{٢١}$) ذرة. وقد يختلف اتجاه الاصطفاف في المناطق المتجاورة،لاحظ الشكل (٥–٤٦)، وعند وضع قطعة من مادة فرّومغناطيسية مثل الحديد تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي($\vec{غ}_{o}$) فإن المناطق المغناطيسية ذات الاتجاه الواحد والتي تكون باتجاه المجال المغناطيسي المؤثر تكبر وتزداد على حساب المناطق الأخرى؛ وبهذا تصبح القطعة كلها مغناطيسًا له قطبان، وبذلك تكون استجابة هذه المواد للتمغنط كبيرة وباتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. وتشمل المواد الفرومغناطيسية إضافة إلى الحديد، النيكل والكوبالت وبعض السبائك المصنوعة منها، فهي تستخدم لصناعة كل ما نطلق عليه مغناطيس دائم.



قطعة حديد غير ممغنطة. قطعة حديد تعرضت لمجال مغناطيسي. قطعة حديد أصبحت مغناطيسًا.

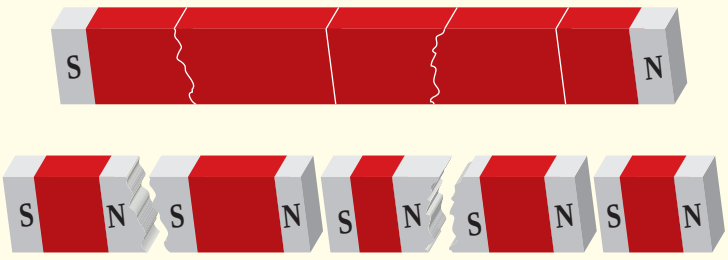
الشكل (٥–٤٦): مغنطة قطعة حديد.

مراجعة (٥–٨)

١ اذكر أنواع المواد المغناطيسية، ثم قارن بينها من حيث استجابتها لمغناطيس قريب منها.

٢ فسر انجذاب برادة الحديد إلى مغناطيس.

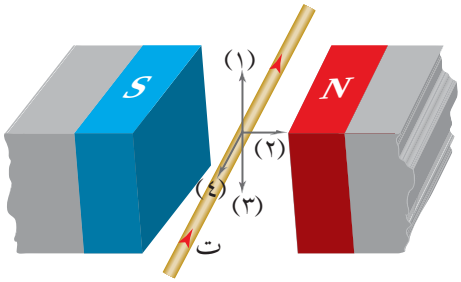
٣ من الخصائص التي تميز المغناطيس أنه لا يمكن فصل قطبيه الشمالي والجنوبي عن بعضهما. مستعينًا بالشكل (٥–٤٧) وبالاعتماد على مفهوم المناطق المغناطيسية فسر هذه الخاصية.



الشكل (٥–٤٧): سؤال (٣) .

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

١ في الشكل (٥–٤٨)، السهم الذي يمثل اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل:

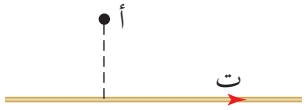


الشكل(٥–٤٨): سؤال (١) فقرة (١).

أ (١)　　ب (٢)

جـ (٣)　　د (٤)

٢ موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي باتجاه (+س) كما في الشكل (٥–٤٩)، عند مرور بروتون بالنقطة (أ) باتجاه (–ص)، فإن اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في البروتون سيكون باتجاه:



الشكل(٥–٤٩): سؤال (١) فقرة (٢).

أ (+ز)　　ب (+س)　　جـ (–س)　　د (–ص)

٣ جسيم مشحون يتحرك عموديًّا على اتجاه مجال مغناطيسي منتظم، فيصنع مسارًا دائريًّا نصف قطره ($نق_١$). إذا دخل إلى المجال المغناطيسي نفسه جسيم مشحون آخر له كتلة الجسيم الأول بينما شحنته تساوي ثلاثة أضعاف شحنة الجسيم الأول، وبسرعة تساوي ضعفي 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 المجالان الكهربائي والمغناطيسي بالاتجاه نفسه.

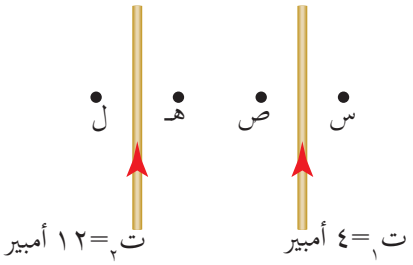
جـ ينحرف الجسيم المشحون باتجاه القوة الكهربائية.

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 مضاعفة طوله.
ب مضاعفة القوة الدافعة الكهربائية للمصدر.
جـ إنقاص عدد لفاته إلى النصف.
د مضاعفة المقاومة المتصلة به.

اعتمادًا على الشكل (٥-٥٠)، أجب عن الفقرتين (٦، ٧).



الشكل (٥-٥٠): سؤال (١) فقرة (٦، ٧).

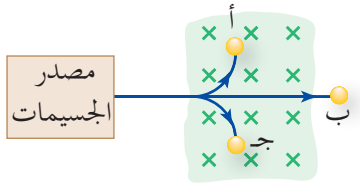
٦ إذا كانت (ق١) هي القوة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الأول، و(ق٢) هي القوة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الثاني، فإن العلاقة بين مقداريهما:

أ ق١ = ١٢ ق٢
ب ق١ = ٣ ق٢
جـ ق١ = ق٢
د ق١ = $\frac{١}{٣}$ ق٢

٧ النقطة المحتمل أن ينعدم عندها المجال المغناطيسي المحصل هي:

أ (ل)
ب (هـ)
جـ (ص)
د (س)

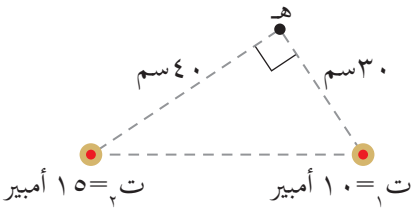
٢ يبين الشكل (٥-٥١)، مسار ثلاثة جسيمات (أ، ب، جـ) تعبر مجالًا مغناطيسيًّا. فإذا كانت هذه الجسيمات تتحرك بالسرعة نفسها، فأجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٥-٥١): سؤال (٢).

أ أي الجسيمات متعادل؟
ب أي الجسيمات سالب الشحنة؟
جـ إذا كان مقدار شحنة الجسيمان (أ) ، (جـ) متساوي، أيهما أكبر كتلة (أ) أم (جـ)؟

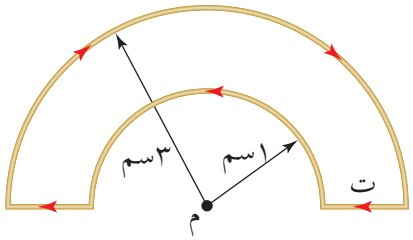
٣ موصلان طويلان مستقيمان متوازيان كما في الشكل (٥-٥٢)، يمر في الأول تيار كهربائي (١٠) أمبير باتجاه (+ز)، ويمر في الثاني تيار كهربائي (١٥) أمبير بالاتجاه نفسه. جد:



الشكل (٥-٥٢): سؤال (٣).

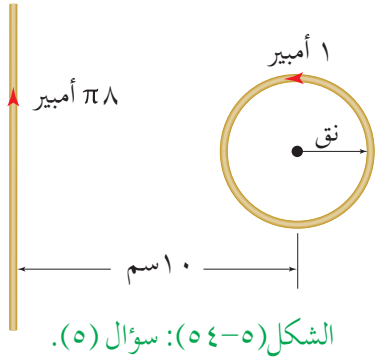
أ موقع النقطة أو النقاط التي ينعدم عندها المجال المغناطيسي المحصل.
ب المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.

٤ في الشكل (٥–٥٣)، حدد مقدار التيار الكهربائي (ت) المار في الملف إذا كان مقدار المجال المغناطيسي المحصل في النقطة (م) يساوي ($\frac{٨٨}{٧} \times ١٠^{-٥}$) تسلا. وما اتجاه المجال المغناطيسي المحصل عند تلك النقطة؟



الشكل (٥–٥٣): سؤال (٤).

٥ في الشكل (٥–٥٤)، حدد نصف قطر الملف الدائري لكي ينعدم المجال المغناطيسي في مركزه، علمًا بأنه يتكون من لفتين اثنتين فقط.



الشكل (٥–٥٤): سؤال (٥).

٦ في الشكل (٥–٥٥)، أثرت قوة مغناطيسية مقدارها (١) ملي نيوتن نحو (+ص) في شحنة مقدارها (–٢) ميكروكولوم لحظة مرورها بالنقطة (هـ)، بسرعة مقدارها (٥×١٠^{٦})م/ث باتجاه (–س). جد التيار الكهربائي المار في الموصل المستقيم مقدارًا واتجاهًا.

الشكل (٥–٥٥): سؤال (٦).

٧ قذف جسيم شحنته (١) بيكوكولوم، وكتلته (٢×١٠^{-٧}) كغ بسرعة مقدارها (٩×١٠^{٦})م/ث نحو (+س) عموديًّا على مجال مغناطيسي، فاكتسب تسارعًا مركزيًّا مقداره (٠,٩)م/ث^{٢} نحو (+ز) لحظة مروره بنقطة ما، جد المجال المغناطيسي عند تلك النقطة مقدارًا واتجاهًا.

٨ يتحرك بروتون بسرعة ($١,٦ \times ١٠^{٤}$) 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، وفي لحظة ما أُدخل بروتون آخر يتحرك بالسرعة نفسها إلى منطقة المجالين الكهربائي والمغناطيسي لوحظ أن البروتون الثاني أكمل

حركته بلا انحراف. احسب مقدار المجال المغناطيسي وحدد اتجاهه.

جـ إذا أدخل جسيم ألفا بالسرعة نفسها، إلى منطقة المجالين الكهربائي والمغناطيسي، فهل يكمل حركته بلا انحراف؟ فسر إجابتك.

(ملاحظة: جسيم ألفا شحنته موجبة وتساوي ضعفي شحنة البروتون، وكتلته أربعة أضعاف كتلة البروتون تقريبًا).

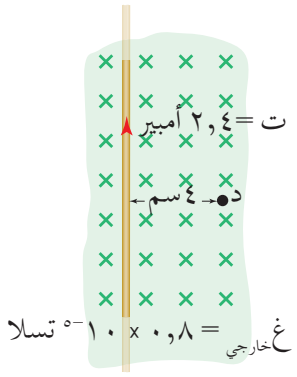
٩ قذف جسيم شحنته (٠,٤) ميكروكولوم بسرعة مقدارها (١٠٠) م/ث نحو (+ص) إلى منطقة مجالين، أحدهما كهربائي مقداره (٥٠٠) نيوتن/كولوم متجه نحو (+س) والآخر مغناطيسي مقداره (٢) تسلا نحو (–ز)، جد قوة لورنتز المؤثرة في هذا الجسيم لحظة دخوله منطقة المجالين مقدارًا واتجاهًا.

١٠ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٥–٥٦)، احسب:

أ المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د).

ب القوة المغناطيسية المؤثرة في بروتون لحظة مروره بالنقطة (د) باتجاه المحور الزيني الموجب.

جـ القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل.



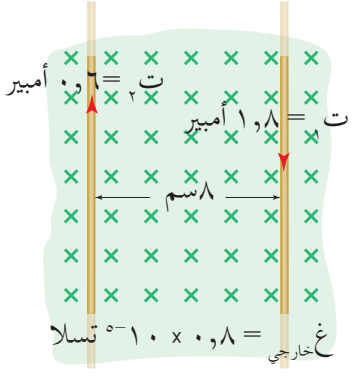
الشكل (٥–٥٦): سؤال (١٠).

١١ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٥–٥٧)، احسب:

أ القوة المتبادلة بين الموصلين لوحدة الأطوال.

ب المجال المغناطيسي المحصل عند الموصل الثاني مقدارًا واتجاهًا.

جـ القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الثاني.



الشكل (٥–٥٧): سؤال (١١).

الفصل السادس

الحث الكهرمغناطيسي

Electromagnetic Induction

في هذا الفصل

(٦-١)
التدفق المغناطيسي.

(٦-٢)
قانون فارادي في الحث الكهرمغناطيسي.

(٦-٣)
القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم.

(٦-٤)
قانون لنز.

(٦-٥)
الحث الذاتي.

(٦-٦)
الطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث.

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، وهذا 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 يتأثر بمجالات مغناطيسية؟ وعلام تعتمد القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل أو ملف؟

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

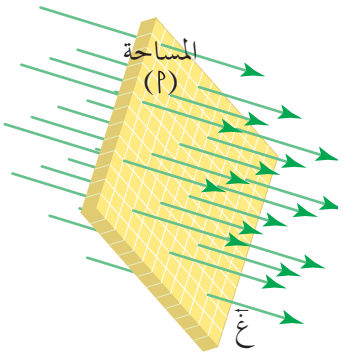
تعد ظاهرة الحث الكهرمغناطيسي المبدأ الأساسي في العديد من التطبيقات الحديثة مثل مولدات الكهرباء، والبطاقات الممغنطة، ووحدات التخزين في الأجهزة الإلكترونية.

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 كهربائي 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
magnetic Flux

تعد البطارية أحد مصادر التيار الكهربائي، فهل يمكن توليد تيار كهربائي في دارة من غير بطارية؟ توصل العالم فارادي إلى أنه يمكن توليد تيار كهربائي باستخدام المجال المغناطيسي، ومن المهم أن نبدأ بدراسة كمية فيزيائية ترتبط بتوليد التيار الكهربائي من المجال المغناطيسي تسمى التدفق المغناطيسي، فماذا نعني بالتدفق المغناطيسي؟



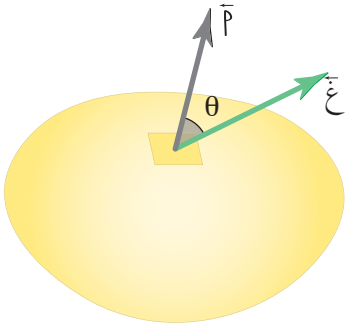
الشكل (٦-١): التدفق المغناطيسي عبر سطح معين.

درست سابقًا أن للمغناطيس مجالًا مغناطيسيًّا، يمكن تمثيله بخطوط تسمى خطوط المجال المغناطيسي، ويعرف **التدفق المغناطيسي** (Magnetic flux) بأنه **عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق سطحًا ما عموديًّا عليه**، لاحظ الشكل (٦-١).

ويعبر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\Phi = \vec{غ} \cdot \vec{م} = غ\, م \,جتا\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (٦-١)$$

حيث (Φ): التدفق المغناطيسي، و($\vec{غ}$): المجال المغناطيسي، و($\vec{م}$): متجه المساحة، وهو 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.



الشكل (٦-٢): متجه المساحة.

تبين العلاقة (٦-١) أن التدفق المغناطيسي كمية قياسية، يقاس بوحدة (تسلا.م^٢)ووفق النظام العالمي للوحدات تسمى هذه الوحدة 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 إذا كان متجه المساحة:

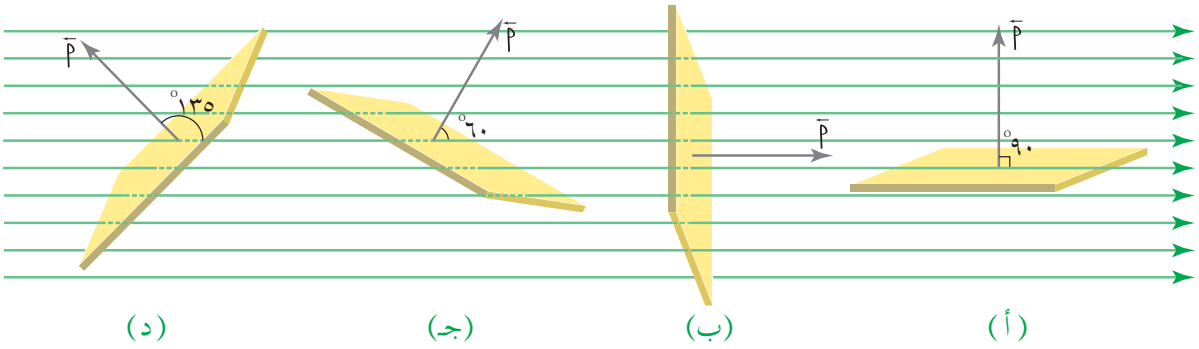
١ عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي.

٢ موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي.

٣ يصنع زاوية (٦٠°) مع اتجاه المجال المغناطيسي.

٤ يصنع زاوية (١٣٥°) مع اتجاه المجال المغناطيسي.

الحل:



الشكل (٦-٣): مثال (٦-١).

نحسب التدفق المغناطيسي بتطبيق العلاقة:

$$\Phi = \text{غ م جتا}\theta$$

١ بما أن متجه المساحة عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي فإن ($\theta = ٩٠°$)، كما في الشكل (٦-٣/أ)، لذا فإن:

$$\Phi = \text{غ م جتا}٩٠ = ٠,٤ \times ٠,٢ \times \text{صفر}$$

$$= \text{صفر}.$$

٢ بما أن متجه المساحة موازٍ لاتجاه المجال المغناطيسي فإن (θ = صفر)، كما في الشكل (٦-٣/ب)، لذا فإن:

$$\Phi = \text{غ م جتا صفر} = ٠,٤ \times ٠,٢ \times ١$$

$$= ٠,٠٨ \text{ ويبر}.$$

٣ عندما تكون الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي ($\theta = ٦٠^\circ$) كما في الشكل (٦-٣/جـ)، فإن:

$$\Phi = \text{غ}_م \text{ جتا } ٦٠ = ٠,٤ \times ٠,٢ \times ٠,٥$$

$$= ٠,٠٤ \text{ ويبر.}$$

٤ عندما تكون الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي ($\theta = ١٣٥^\circ$) كما في الشكل (٦-٣/د)، فإن:

$$\Phi = \text{غ}_م \text{ جتا } ١٣٥ = ٠,٤ \times ٠,٢ \times -٠,٧$$

$$= -٠,٠٥٦ \text{ ويبر.}$$

لاحظ أن التدفق المغناطيسي سالب، وهذا يعني أن خطوط المجال المغناطيسي تخترق السطح داخلة فيه.

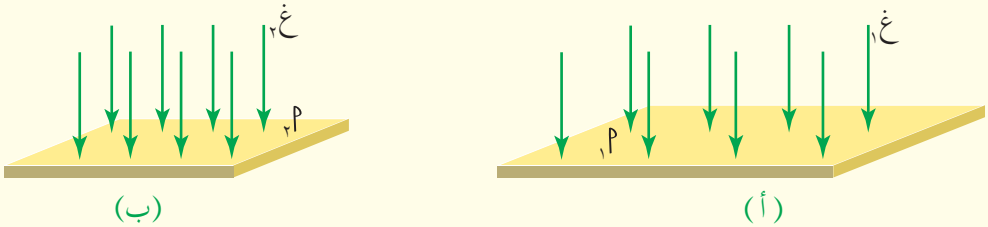
مراجعة (٦-١)

١ ما المقصود بالتدفق المغناطيسي؟ وما وحدة قياسه؟

٢ ماذا نعني بقولنا إن 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.

٤ سطحان (أ، ب) يخترق كل منهما مجال مغناطيسي منتظم كما في الشكل(٦-٤). في أي الحالتين يكون المجال المغناطيسي أكبر مقدارًا؟ قارن بين التدفق المغناطيسي عبر السطحين.



الشكل(٦-٤): سؤال (٤).

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، عن طريق تجارب أجرياها بمعزل عن بعضهما أنه يمكن توليد تيار كهربائي عن طريق تغيير التدفق المغناطيسي. ولتعرّف كيفية توليد هذا التيار الكهربائي ادرس النشاط الآتي.

نشاط (٦ - ١) قانون فارادي

الهدف: استقصاء تولد تيار حثي عمليًّا في حالات مختلفة.

المواد والأدوات: ملفان دائريان مختلفان في عدد اللفات، وغلفانوميتر، ومغناطيس مستقيم قوي، ومغناطيس مستقيم ضعيف.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ صل طرفي أحد الملفين بطرفي غلفانوميتر.

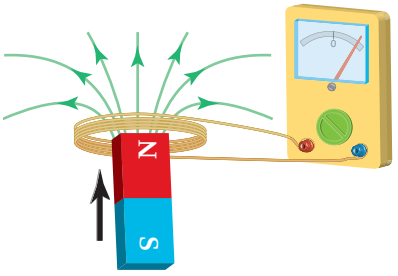
٢ حرك المغناطيس الضعيف نحو الملف كما في الشكل (٦-٥ /أ)، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر.

٣ أبعد المغناطيس عن الملف كما في الشكل (٦-٥/ب)، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر، ثم استمر في تحريك المغناطيس بالنسبة إلى الملف قربًا وبعدًا مع ملاحظة التغير على مؤشر الغلفانوميتر.

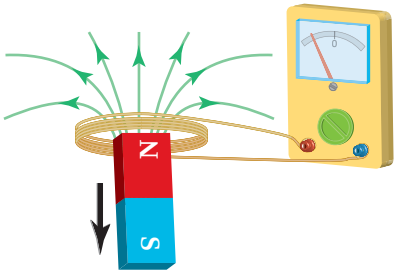
٤ توقف عن تحريك المغناطيس بالنسبة إلى الملف كما في الشكل (٦-٥/جـ). هل يتحرك مؤشر الغلفانوميتر الآن؟ ماذا تستنتج؟

٥ كرر الخطوات من ٢ إلى ٤، بتثبيت المغناطيس وتحريك الملف بالنسبة إلى المغناطيس قربًا وبعدًا، ولاحظ التغير على مؤشر الغلفانوميتر.

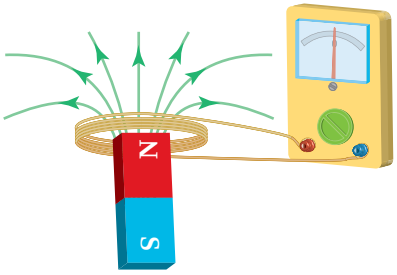
٦ كرر الخطوات من ٢ إلى ٤، ولاحظ التغير على مقدار انحراف مؤشر الغلفانوميتر بتغيير ما يأتي:



(أ) حركة المغناطيس مقتربًا من الملف.



(ب) حركة المغناطيس مبتعدًا عن الملف.



(جـ) المغناطيس والملف ساكنان.

الشكل(٦-٥): 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 من أنك استنتجت من إجراء النشاط السابق أن حركة مؤشر الغلفانوميتر تدل على مرور تيار كهربائي في الملف فقط في أثناء حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف أو حركة الملف بالنسبة إلى المغناطيس، بحيث يتغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف. ويتغير اتجاه هذا التيار بتغير اتجاه الحركة، بينما ينعدم التيار الكهربائي عند توقف الحركة، أي عندما يكون التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف ثابتًا، وأن انحراف مؤشر الغلفانوميتر يكون أكبر بزيادة سرعة الحركة قربًا كانت أو بعدًا، وزيادة عدد لفات الملف.

إن التيار المتولد في ملف نتيجة التغير في التدفق المغناطيسي عبره يسمى **تيارًا حثيًّا** (Induced Current)، وهذا التيّار لحظيٌّ ينتج من قوة دافعة كهربائية تسمى قوة دافعة كهربائية حثية تتولد في الملف للسبب نفسه، وتسمى **ظاهرة توليد التيار الحثي بسبب تغير التدفق المغناطيسي عبر ملف ظاهرة الحث الكهرمغناطيسي** (Electromagnetic Induction).

استطاع العالم فارادي بعد إجراء تجارب عدة أن يعبر عن نتائجها بقانون سمي باسمه في ما بعد. وينص **قانون فارادي** (Faraday's Law) على أن "**متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف يتناسب طرديًّا مع المعدل الزمني لتغيّر التدفق المغناطيسي الذي يخترقه**". ويعبر عن قانون فارادي بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ق}_{\text{د}} = -\text{ن}\frac{\Delta\text{Ø}}{\Delta\text{ز}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٦-٢)$$

حيث ($\text{ق}_{\text{د}}$): متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف، و(ن): عدد لفات الملف، و($\Delta\text{Ø}$): التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في الفترة الزمنية ($\Delta\text{ز}$).

ويجدر الانتباه إلى أن الإشارة السالبة في العلاقة (٦-٢)، ستُفسَّر لاحقًا عند دراسة قانون لنز.

مثال (٦-٢)

غُمِر ملف عدد لفاته (٥٠٠٠) لفة في مجال مغناطيسي منتظم، كما في الشكل (٦-٦/أ)، فكان التدفق المغناطيسي عبره (٠,٦) ويبر، احسب:

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 (٦-٦/أ) والشكل (٦-٦/ب)، إن خطوط المجال المغناطيسي كانت تخترق سطح الملف خارجة منه، ولما انعكس اتجاه المجال المغناطيسي أصبحت خطوط المجال المغناطيسي داخلة فيه، وبهذا فإن التدفق المغناطيسي الذي كان يعبر الملف ($Ø_١ = ٠,٦$) ويبر، أصبح ($Ø_٢ = -٠,٦$) ويبر، أي أن متجه المساحة أصبح بعكس اتجاه المجال المغناطيسي، لذا فإن:

$$\Delta Ø = Ø_٢ - Ø_١$$

$$= -٠,٦ - ٠,٦ = -١,٢ \text{ ويبر}$$

$$ق_د = -ن \frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = -\frac{٥٠٠٠ \times -١,٢}{٠,٢}$$

$$ق_د = ٣٠٠٠٠ \text{ فولت}$$

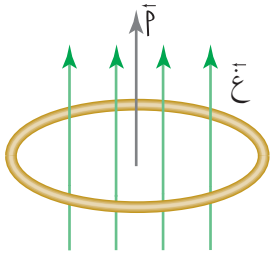
٢ $\Delta Ø$ = صفر - ٠,٦ = -٠,٦ ويبر

$$ق_د = -ن \frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = -\frac{٥٠٠٠ \times -٠,٦}{٠,١}$$

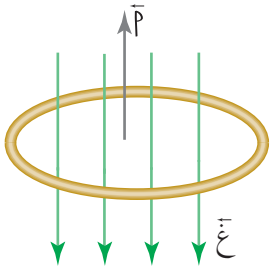
$$ق_د = ٣٠٠٠٠ \text{ فولت}$$

٣ $$\frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = -\frac{ق_د}{ن}$$

$$\frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = -\frac{-١٠٠٠}{٥٠٠٠} = ٠,٢ \text{ ويبر/ث}$$



(أ)



(ب)

الشكل (٦-٦): مثال (٦-٢).

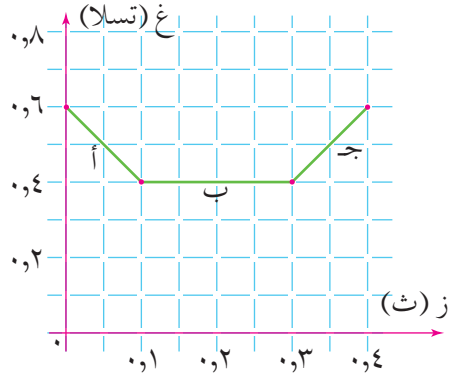
مثال (٦-٣)

عند تحريك مغناطيس داخل ملف، يتغير المجال المغناطيسي الذي يخترق الملف بالنسبة إلى الزمن وفق الرسم البياني في الشكل (٦-٧). إذا علمت أن عدد لفات الملف (٢٠٠٠) لفة، ومساحة مقطع اللفة الواحدة (٨٠) سم^{٢}، واتجاه المجال المغناطيسي يوازي متجه المساحة، فأجب عن الأسئلة الآتية:

١ احسب التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في الفترات الزمنية (أ، ب، جـ).

٢ احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف في الفترات الزمنية (أ، ب، جـ).

٣ مثل بيانيًّا العلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن في كل من الفترات الزمنية (أ، ب، جـ).



الشكل (٦-٧): مثال (٦-٣).

الحل:

١ نحسب التغير في التدفق المغناطيسي بمعرفة التغير في مقدار المجال المغناطيسي الذي يخترق الملف في كل فترة.

الفترة (أ)

$$\Delta\Phi = \Phi_{٢} - \Phi_{١}$$

$$= \text{ن} \times \text{م} \times \text{غ}_{٢} \times \text{جتا}\theta - \text{ن} \times \text{م} \times \text{غ}_{١} \times \text{جتا}\theta$$

$$= \text{ن} \times \text{م} \times (\text{غ}_{٢} - \text{غ}_{١}) \times \text{جتا صفر}$$

$$\Delta\Phi = (٠,٤ - ٠,٦) \times (٨٠ \times ١٠^{-٤}) \times ١ = -١,٦ \times ١٠^{-٣} \text{ ويبر}.$$

الفترة (ب)

لا يوجد تغير في المجال المغناطيسي في الفترة الزمنية (ب)؛ لذا فإن Δ غ = صفر.

ومنها $\Delta\Phi$ = صفر.

الفترة (جـ)

$$\Delta\Phi = \Phi_{٢} - \Phi_{١}$$

$$= \text{ن} \times \text{م} \times \text{غ}_{٢} \times \text{جتا}\theta - \text{ن} \times \text{م} \times \text{غ}_{١} \times \text{جتا}\theta$$

$$= \text{ن} \times \text{م} \times (\text{غ}_{٢} - \text{غ}_{١}) \times \text{جتا صفر}$$

$$\Delta\Phi = (٠,٦ - ٠,٤) \times (٨٠ \times ١٠^{-٤}) \times ١ = ١,٦ \times ١٠^{-٣} \text{ ويبر}.$$

٢ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية بتطبيق قانون فارادي:

الفترة (أ)

$$ق_د = -ن \frac{\Delta ﻫ}{\Delta ز} = -٢٠٠٠ \times \frac{-١٠ \times ١,٦^{-٣}}{٠,١}$$

$$ق_د = ٣٢ \text{ فولت}$$

الفترة (ب)

$$ق_د = -ن \frac{\Delta ﻫ}{\Delta ز} = -٢٠٠٠ \times \frac{\text{صفر}}{٠,٢}$$

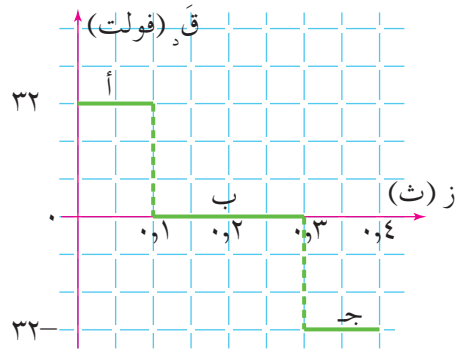
$$ق_د = \text{صفر}$$

الفترة (جـ)

$$ق_د = -ن \frac{\Delta ﻫ}{\Delta ز} = -٢٠٠٠ \times \frac{١٠ \times ١,٦^{-٣}}{٠,١}$$

$$ق_د = -٣٢ \text{ فولت}$$

٣ التمثيل البياني: يبين الشكل (٦-٨) التمثيل البياني للعلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن في كل من الفترات الزمنية (أ، ب، جـ).



الشكل (٦-٨): التمثيل البياني للعلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن.

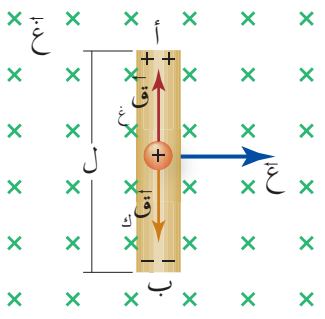
مراجعة (٦-٢)

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 (ﻫ) سم^{٢} مغمور في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (غ) تسلا موازٍ لمتجه المساحة. إذا زاد المجال المغناطيسي عبر الملف إلى ضعفي ما كان عليه في الفترة الزمنية (Δز) ثانية، فما متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف؟

في الدرس السابق تعلمت أنه يمكن توليد قوة دافعة كهربائية حثية عن طريق تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق ملفًا ما، إلا أنه يوجد طريقة أخرى تتولد فيها قوة دافعة كهربائية حثية، فعندما يغمر موصل مستقيم طوله (ل) في مجال مغناطيسي منتظم ($\overrightarrow{غ}$) اتجاهه نحو المحور الزيني السالب، ويسحب بسرعة ثابتة ($\overrightarrow{ع}$) باتجاه محور السينات الموجب كما في الشكل (٦–٩) بتأثير قوة خارجية، فإن الشحنات الموجبة (ـــ) الموجودة في الموصل ستتأثر بقوة مغناطيسية ($ق_{غ} = ـــ ع غ جا\theta$)، اتجاهها عمودي على اتجاه كل من (ع) و(غ)؛ ما يجعل هذه الشحنات تتحرك داخل الموصل من (ب) إلى (أ) وفقًا لقاعدة اليد اليمنى، فتتراكم الشحنات الموجبة عند الطرف(أ)، وعند الطرف (ب) للموصل تتراكم الشحنات السالبة، وتبعًا لذلك ينشأ مجالٌ كهربائي ($\overrightarrow{مـ}$) 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 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 (٦–٩).



الشكل (٦–٩): حركة موصل مستقيم بسرعة ثابتة في مجال مغناطيسي منتظم بتأثير قوة خارجية.

نتيجة لذلك يتولد فرق جهد كهربائي بين طرفي الموصل؛ ما يعني نشوء **قوة دافعة كهربائية حثية** (Induced electromotive force). عند انتقال الشحنة الكهربائية الموجبة من الطرف (ب) إلى الطرف (أ) للموصل فإن القوة المغناطيسية تبذل عليها شغلًا، وبما أن **الشغل = القوة.الإزاحة**، فإن الشغل الذي تبذله القوة المغناطيسية يعطى بالعلاقة الرياضية:

$ش = (ـــ ع غ) \times ل \times$ جتا صفر

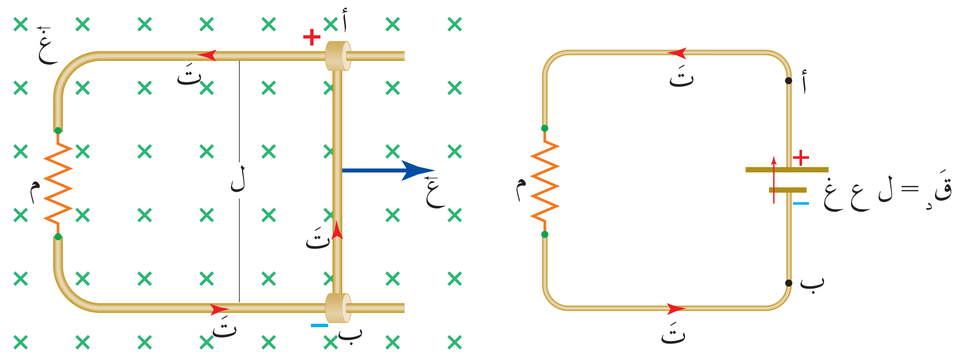
وبقسمة الطرفين على (ـــ) وبمعرفة أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة($ق_د$) $= \frac{ش}{ـــ}$، فإن:

$$ق_د = ل ع غ \quad \text{.....} (٦–٣)$$

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 (٦–١٠)، ويمكن حساب التيار الحثي من العلاقة الرياضية الآتية: $\text{تَ} = \frac{\text{قَ}_{\text{د}}}{\text{م}}$

$$\text{تَ} = \frac{\text{ل ع غ}}{\text{م}} \quad \text{(٦–٤)}$$

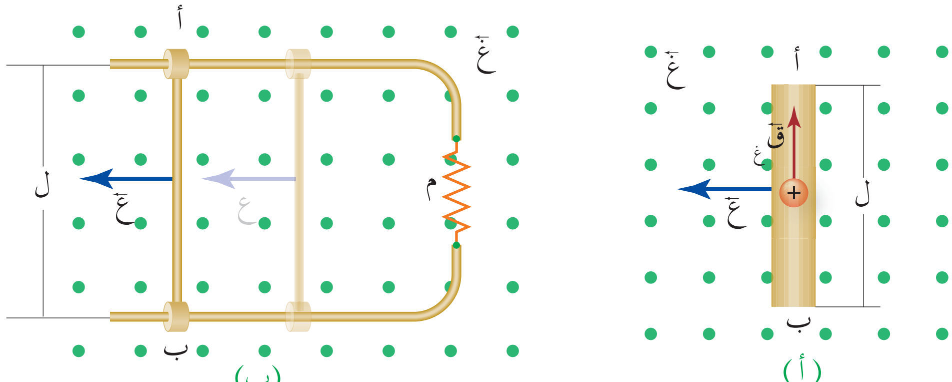
كيف نحدد اتجاه التيار الحثي في الدارة الكهربائية في الشكل (٦–١٠)؟ بما أن الطرف (أ) اكتسب شحنة موجبة، والطرف (ب) اكتسب شحنة سالبة، فإن اتجاه التيار عبر الدارة في المسار المغلق من الطرف الموجب إلى الطرف السالب؛ أي بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة.



الشكل (٦–١٠): القوة الدافعة الكهربائية الحثية واتجاه التيار الحثي.

مثال (٦–٤)

يوضح الشكل (٦–١١/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 (٦–١١): 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 (٦-١١/ب)، وحدد اتجاهه.

الحل:

١ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية في موصل مستقيم من العلاقة:

$$ق_د = ل \, ع \, غ$$

$$ق_د = ٠,٤ \times ٠,٨ \times ٢ = ٠,٦٤ \text{ فولت}$$

٢ $$ت = \frac{ق_د}{م}$$

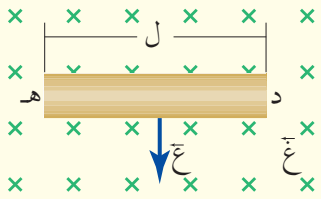
$$ت = \frac{٠,٦٤}{٠,٨} = ٠,٨ \text{ أمبير}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى نجد أن الطرف (أ) يكتسب شحنة موجبة والطرف (ب) يكتسب شحنة سالبة، فيكون اتجاه التيار الحثي عبر الدارة مع عقارب الساعة من الطرف (أ) إلى الطرف (ب).

مراجعة (٦-٣)

١ ما العوامل التي يعتمد عليها متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم، موضحًا العلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة وكل عامل من تلك العوامل.

٢ يتحرك موصل مستقيم في مجال مغناطيسي منتظم كما هو موضح في الشكل (٦-١٢)، إذا علمت أن قوة دافعة كهربائية حثية تولدت بين طرفي الموصل، فأجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٦-١٢): سؤال (٣).

أ حدد أي طرفي الموصل المتحرك (هـ) أم (د) يكون أعلى جهدًا.

ب حدد اتجاه المجال الكهربائي داخل الموصل.

٦–٤ قانون لنز
Lenz's Law

تعلمت أن تيارًا كهربائيًّا حثيًّا 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 هذا القانون وأهميته وكيفية استخدامه في تحديد اتجاه التيار الحثي الذي يتولد في ملف نفذ النشاط الآتي.

نشاط (٦ - ٢) قانون لنز

الهدف: التحقق عمليًّا من قانون لنز.

المواد والأدوات: ملف دائري أو لولبي، وغلفانوميتر، ومغناطيس مستقيم، وأسلاك توصيل، وإبرة مغناطيسية.

خطوات تنفيذ النشاط:

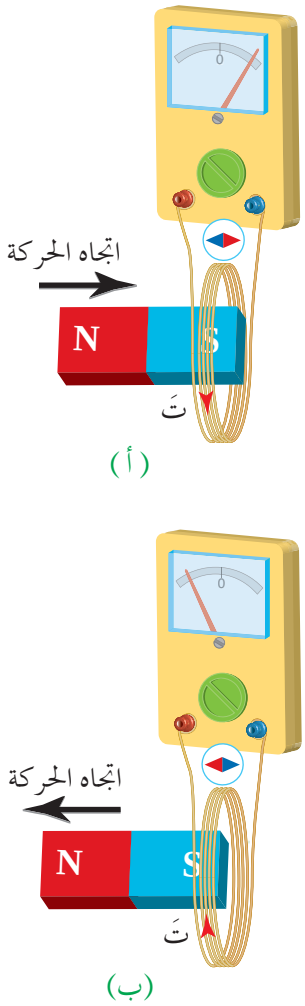
١ صل طرفي الملف بغلفانوميتر.

٢ قرب قطبًا مغناطيسيًّا وليكن جنوبيًّا من الملف كما في الشكل (٦–١٣/أ)، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر ولحركة المغناطيس في أثناء اقترابه من الملف.

٣ حدد القطب الشمالي للملف المستخدم لحظة انحراف مؤشر الغلفانوميتر مستخدمًا الإبرة المغناطيسية.

٤ أبعد القطب الجنوبي عن الملف كما في الشكل (٦–١٣/ب). ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر، ولحركة المغناطيس، في أثناء ابتعاده عن الملف.

٥ حدد القطب الشمالي للملف المستخدم لحظة انحراف مؤشر الغلفانوميتر مستخدمًا الإبرة المغناطيسية.



الشكل (٦–١٣): 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 تغير في أثناء اقتراب المغناطيس من الملف وفي أثناء ابتعاد المغناطيس عنه؟ ما تفسير ذلك؟

في أثناء اقتراب القطب الجنوبي للمغناطيس من الملف يزداد التدفق المغناطيسي الذي يخترقه، فتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية تولد تيارًا كهربائيًّا حثيًّا في الملف ينتج منه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه معاكس لاتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف؛ ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًّا جنوبيًّا وهو ما دلت عليه الإبرة المغناطيسية، 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 (القطب الشمالي)، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه التيار الحثي في لفات الملف، لاحظ الشكل(٦-١٣/أ).

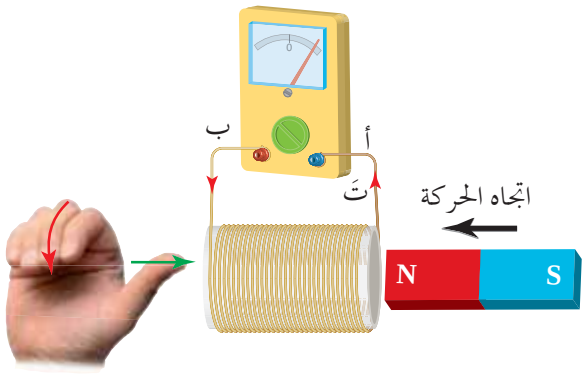
أما في أثناء ابتعاد القطب الجنوبي عن الملف فيقل التدفق المغناطيسي عبره، وتنشأ قوة دافعة كهربائيّة حثية تولد تيارًا كهربائيًّا حثيًّا في الملف ينتج منه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه مع اتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف؛ ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا وهو ما دلت عليه الإبرة المغناطيسية، فتتولد قوة تجاذب بينهما تقاوم ابتعاد المغناطيس عنه، فينعكس اتجاه التيار الحثي المتولد في الملف، لاحظ الشكل(٦-١٣/ب)، وهذا يفسر انحراف مؤشر الغلفانوميتر في الاتجاه المعاكس عند ابتعاد المغناطيس عن الملف.

يتبين مما سبق أن المجال المغناطيسي الحثي الناتج من تولد التيار الحثي في الملف يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له وهو ما يفسر الإشارة السالبة في قانون فارادي، ويمكن التعبير عن هذا الاستنتاج **بقانون لنز** (Lenz's Law) الذي ينص على أن:

"اتجاه التيار الحثي في ملف يكون؛ بحيث ينتج منه 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 (٦-١٤).



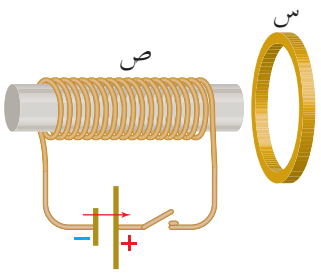
الشكل (٦-١٤): مثال (٦-٥).

الحل:

لاحظ حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف، فأثناء اقتراب القطب الشمالي للمغناطيس من الملف يزداد التدفق المغناطيسي عبره، وتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية في الملف تولد تيارًا حثيًّا ووفقًا لقانون لنز ينتج منه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه معاكس لاتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي يقاوم الزيادة فيه، ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الشمالي للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا. وباستخدام قاعدة اليد اليمنى، يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه التيار الحثي في لفات الملف على النحو المبين في الشكل (٦-١٤) أي من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) عبر الغلفانوميتر.

مثال (٦-٦)

حدد اتجاه التيار الحثي المتولد في لفات الملف الدائري (س) لحظة إغلاق المفتاح في دارة المغناطيس الكهربائي (ص) كما في الشكل (٦-١٥/أ).

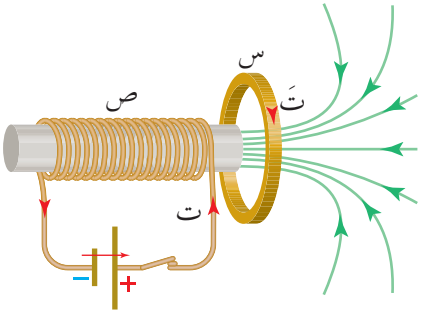


الشكل (٦-١٥/أ): مثال (٦-٦).

الحل:

لحظة إغلاق مفتاح دارة المغناطيس الكهربائي (ص) يتولد في لفاته تيار كهربائي في الاتجاه المبين، وينتج منه مجال مغناطيسي يخترق الملف (س)، فيزداد التدفق المغناطيسي داخل الملف (س)، وتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية في الملف (س) تولد تيارًا حثيًّا ووفق قانون لنز ينتج منه مجال مغناطيسي حثي يعاكس اتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي،

بحيث يقاوم الزيادة فيه ما يجعل طرف الملف (س) المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس الكهربائي قطبًا مغناطيسيًّا جنوبيًّا. وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى، يشير 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 (٦-١٥/ب).

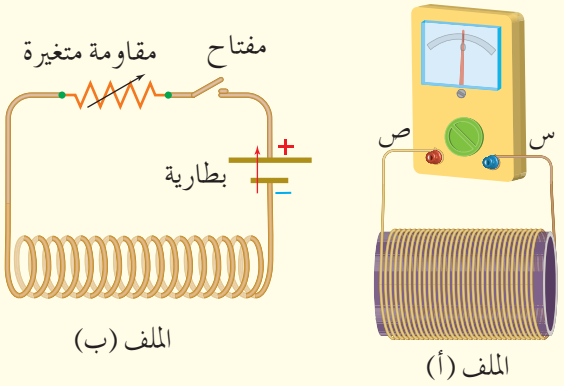


الشكل (٦-١٥/ب): مثال (٦-٦).

مراجعة (٦-٤)

١ اذكر نص قانون لنز، وبين أهميته؟

٢ حدد نوع كل من القطبين المتقابلين، واتجاه التيار الحثي في الملف (أ) في الشكل (٦-١٦) في الحالات الآتية:



الشكل (٦-١٦): سؤال (٢).

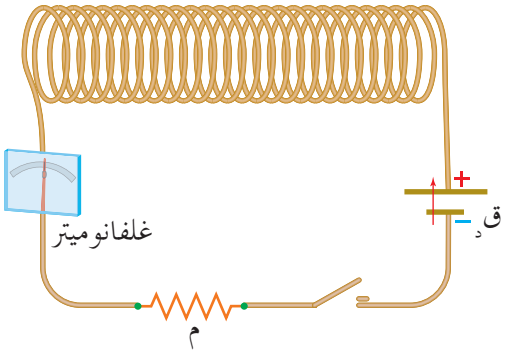
أ لحظة إغلاق دارة الملف (ب).

ب في أثناء زيادة المقاومة المتغيرة في دارة الملف (ب) والدارة مغلقة.

جـ في أثناء إدخال قلب حديد في الملف (ب) والدارة مغلقة.

٣ إذا حرّكت مغناطيس داخل ملف، فستشعر بمقاومة لهذه الحركة. لماذا تكون هذه المقاومة أكبر في ملف عدد لفاته أكبر؟

درست أن التغير في التدفق المغناطيسي عبر ملف ينتج من مسبب خارجي مثل تقريب مغناطيس من ملف أو إبعاده عنه. فهل يمكن توليد قوة دافعة كهربائية حثية في دارة ملف ذاتيًّا دون مسبب خارجي للتغير في التدفق المغناطيسي عبره؟



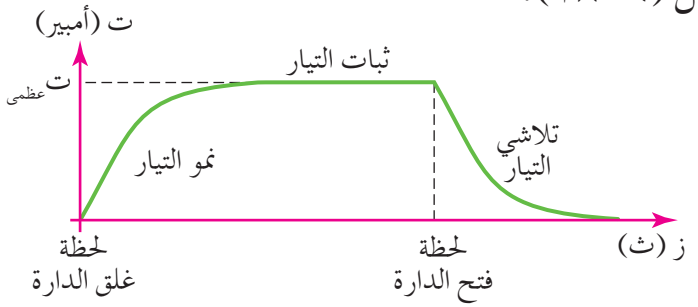
الشكل (٦–١٧): دارة تحتوي على ملف لولبي.

عند تركيب دارة كهربائية تحوي ملفًا لولبيًّا وتوصيلها مع غلفانوميتر كما في الشكل (٦–١٧)، فإنه لحظة إغلاق الدارة الكهربائية يلاحظ من حركة مؤشر الغلفانوميتر أن التيار الكهربائي لا يصل لحظيًّا من الصفر إلى قيمته العظمى. فلو تخيلت أن مصباحًا موصولًا في هذه الدارة وراقبته لرأيت أن شدة إضاءته تبدأ قليلة ثم تزداد ثم تثبت عندما يصل التيار إلى قيمته العظمى؛ ويعزى ذلك إلى **ظاهرة الحث الذاتي**؛ إذ إن المجال المغناطيسي الناتج من التيار الكهربائي الذي يمر في الملف اللولبي يزيد التدفق المغناطيسي عبر هذا الملف، فتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في الملف وفق قانون لنز تقاوم الزيادة في التيار، وتسمى **قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية عكسية**.

ويسمى الملف اللولبي في هذه الحالة **محثًّا**. وتعرف ظاهرة **الحث الذاتي** (Self-Inductance) بأنها **تولّد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في ملف بسبب تغير التدفق المغناطيسي من الملف ذاته**.

أما لحظة فتح الدارة الكهربائية فإن التيار في الدارة لا يصل لحظيًّا إلى الصفر. فلو راقبت مصباحًا مضيئًا في الدارة فإن شدة إضاءته تتناقص حتى تختفي بعد مدة زمنية بسبب تناقص المجال المغناطيسي الناتج من التيار تدريجيًّا في المحث، فيسبب تناقصًا في التدفق المغناطيسي عبره، وتنشأ فيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية وفق قانون لنز تقاوم النقصان في التيار تسمى **قوة دافعة**

كهربائية حثية ذاتية طردية. ويمكن تمثيل علاقة التيار الكهربائي المار في دارة تحوي محثًّا مع الزمن بيـانيًّا كما في الشكل (٦-١٨).



الشكل (٦-١٨): نمو التيار وتلاشيه في المحث.

وقد أثبتت التجارب أن التغير في التدفق المغناطيسي الناشئ في المحث (ΔØ)يتناسب طرديًّا مع التغير في التيار الكهربائي المسبب له (Δت) أي أن: $\Delta Ø \propto \Delta$ت

$$\Delta Ø = \text{ثابت} \times \Delta \text{ت}$$

ويسمى الثابت في الطرف الأيسر **محاثة المحث**، ويرمز له بالرمز(ح)، أي أن:

$$\Delta Ø = \text{ح} \times \Delta \text{ت}$$

وبقسمة الطرفين على الفترة الزمنية (Δز) التي حصل فيها التغير في التدفق نجد أن:

$$\frac{\Delta Ø}{\Delta \text{ز}} = \text{ح} \times \frac{\Delta \text{ت}}{\Delta \text{ز}}$$

ولعدد (ن) من لفات المحث:

$$\text{ن} \times \frac{\Delta Ø}{\Delta \text{ز}} = \text{ح} \times \frac{\Delta \text{ت}}{\Delta \text{ز}}$$

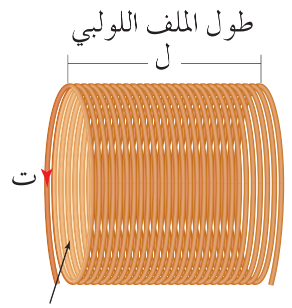
يمثل الطرف الأيمن سالب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية من قانون فارادي، وبما أنها متولدة في المحث فإنها تمثل متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية (قَ$_{د}$) الذي يمكن حسابه من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{قَ}_{د} = -\text{ح} \times \frac{\Delta \text{ت}}{\Delta \text{ز}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٦-٥)$$

حيث ($\frac{\Delta \text{ت}}{\Delta \text{ز}}$): المعدل الزمني للتغير في التيار الكهربائي المار في المحث.

وتشير الإشارة السالبة إلى أن متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له وفقًا لقانون لنز.

وتمثل **محاثة المحث** (ح) **نسبة متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة فيه إلى المعدل الزمني للتغير في التيار الكهربائي المار في المحث**، وتسمى المحاثة 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- ١٩): العوامل التي تعتمد عليها محاثة المحث.

وللتوصل إلى العوامل التي تعتمد عليها محاثة محث، انظر إلى الشكل (٦-١٩) الذي يبين محثًّا طوله (ل) ومساحة مقطعه (أ) وعدد لفاته (ن). عندما يتصل المحث في دارة كهربائية يتغير التيار الكهربائي المار فيه من (صفر) إلى (ت) فيتغير التدفق المغناطيسي الناتج منه من (صفر) إلى (Ø) في الفترة الزمنية ذاتها، أي أن: $ح \times \Delta ت = ن \times \Delta Ø$

ولأن ($ت_١ = ٠$، $Ø_١ = ٠$) فإن:

$$ح \times ت = ن \times Ø \Leftarrow ح = \frac{ن Ø}{ت}$$

ونعبر عن التدفق المغناطيسي عبر المحث بالعلاقة: $Ø = غ \times أ$.

وبتعويض قيمة المجال المغناطيسي داخل 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:

$$ح = أ \times \frac{ن^٢ \times \mu}{ل} \quad \text{.......................} \quad (٦-٦)$$

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 ($\mu_٠$)، وتعد المحاثة ثابتة للمحث الواحد.

مثال (٦ – ٧)

محث محاثته (٠,٤) هنري وعدد لفاته (٢٠٠) لفة، أغلقت دارته فاستغرق التيار زمنًا مقداره (٠,٠٤) ثانية للوصول إلى قيمته العظمى، وخلال هذه المدة الزمنية 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 $ق_{د\ عكسية} = -ح \frac{\Delta ت}{\Delta ز}$

$-٢ = -٠,٤ \times \frac{\Delta ت}{٠,٠٤}$

(لاحظ أن متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية العكسية تكون إشارتها سالبة)

$\Delta ت = \frac{٢}{١٠} = ٠,٢$ أمبير

$\Delta ت = ت_{٢} - ت_{١}$

$٠,٢ = ت_{عظمى} -$ صفر $\Leftarrow ت_{عظمى} = ٠,٢$ أمبير

٢ $ق_{د} = -ن \frac{\Delta Ø}{\Delta ز}$

$\frac{ق_{د}}{ن} - = \frac{\Delta Ø}{\Delta ز}$

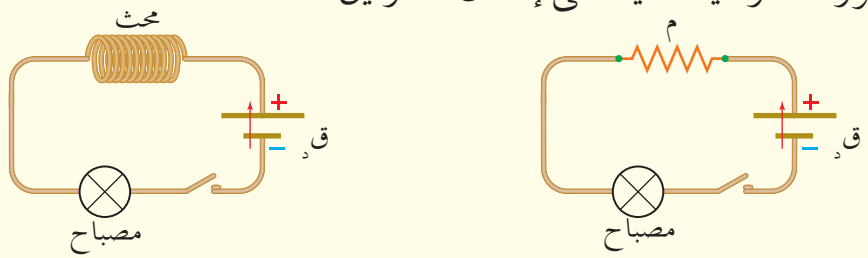
$\frac{-٢}{٢٠٠} - = \frac{\Delta Ø}{\Delta ز} = ٠,٠١$ ويبر/ث

١ ماذا نعني بقولنا إن محاثة محث تساوي (٢) هنري؟

٢ يبين الشكل (٦–٢٠) دارتين كهربائيتين، اعتمادًا على مكونات كل دارة، صف إضاءة المصباح في كل من الدارتين، مفسّرًا إجابتك، في الحالات الآتية:

أ لحظة إغلاق الدارتين.

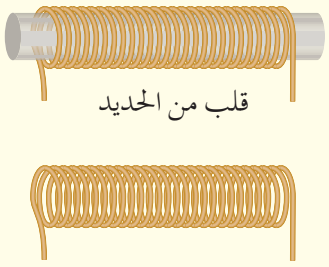
ب بعد مرور مدة زمنية كافية على إغلاق الدارتين.



الشكل (٦–٢٠): سؤال (٢).

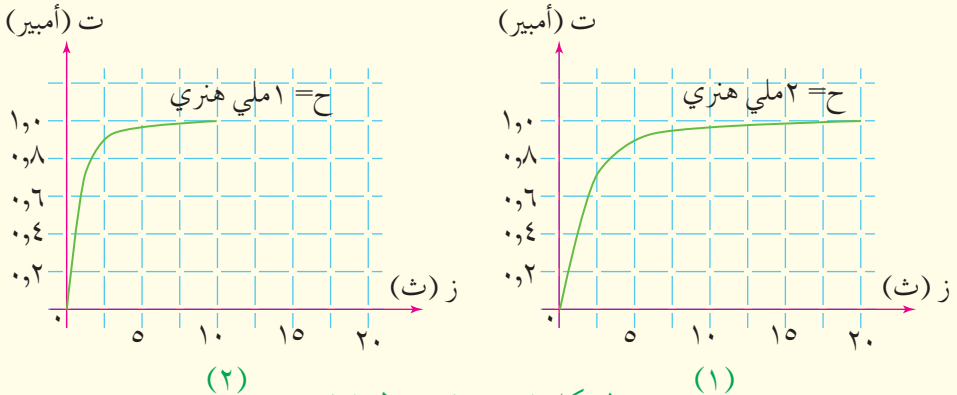
٣ فسر: عدم وصول التيار إلى قيمته العظمى فور إغلاق الدارة التي تحوي محثًّا، وعدم تلاشيه لحظيًّا فور فتحها.

٤ لديك ملفان لولبيان متماثلان، لفات أحدهما لفت حول قلب من الحديد، انظر الشكل (٦–٢١)، بين أثر نوع مادة القلب في مقدار محاثة المحث علمًا بأن ($\mu_{\text{الحديد}} = ٥٠٠٠\ \mu_{\text{ه}}$) تقريبًا.



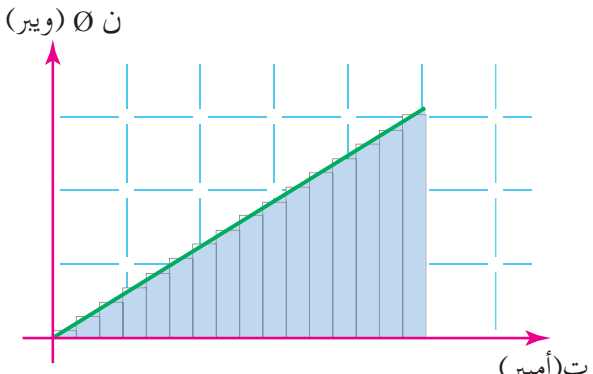
الشكل (٦–٢١): سؤال (٤).

٥ يبين الشكل (٦–٢٢) تمثيلًا بيانيًّا لتغير التيار الكهربائي بالنسبة إلى الزمن في دارتين تحوي كل منهما محثًّا، بين أثر محاثة المحث في المعدل الزمني لتغير التيار فيه.



الشكل (٦–٢٢): سؤال (٥).

تعرفت مما سبق أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في المحث تمانع نمو التيار المار فيه لحظة إغلاق الدارة، وعليه فإن البطارية مصدر القوة الدافعة الكهربائية في الدارة تتغلب على 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 الحثي للمحث لاحظ الشكل (٦-٢٣) 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 (٦-٢٣): منحنى (ت- ن Ø).

- ما نوع العلاقة البيانية في الشكل؟
- عبّر عن ميل منحنى العلاقة بدلالة الكميات الفيزيائية في الشكل.
- ما الكمية الفيزيائية التي يمثلها الميل؟
- أثبت أن الطاقة المغناطيسية تعطى بالعلاقة الرياضية:

$$(ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{١}{٢} ح\ ت^{٢}).$$

لا بد أنك لاحظت أن العلاقة البيانية في الشكل (٦-٢٣) خطية، ويمكن حساب ميل الخط المستقيم الذي يمثل محاثة المحث فيكون: $ح = \frac{Ø ن}{ت}$.

والمساحة تحت منحنى (ت - نØ) تمثل مساحة مثلث طول قاعدته (ت) وارتفاعه (نØ) أي أن:

$$\text{مساحة المثلث} = \frac{١}{٢} \times \text{القاعدة} \times \text{الارتفاع}$$

$$ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{١}{٢} ت \times Ø ن$$

ومن الميل نجد أن: $Ø = \frac{ح\ ت}{ن}$

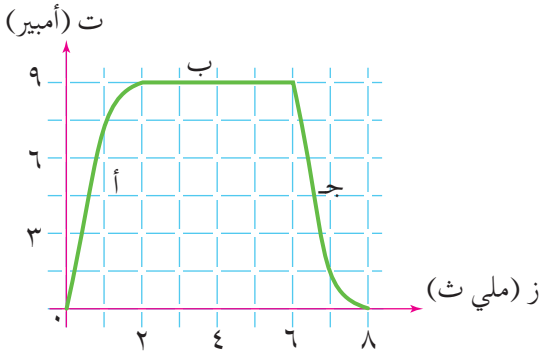
وعليه فإن الطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث يمكن حسابها من العلاقة الرياضية الآتية:

$$ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{١}{٢} ح ت^{٢} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٦-٧)$$

عمليًّا لحظة فتح الدارة نتيجة تولد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية طردية تتحول الطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث إلى طاقة كهربائية تظهر على شكل شرارة كهربائية.

مثال (٦-٨)

يتغير التيار الكهربائي في دارة محث محاثته (٠,٢) هنري من لحظة غلق دارته حتى تلاشي التيار فيها بعد فتح الدارة وفق المنحنى في الشكل (٦-٢٤). مستعينًا بالشكل أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٦-٢٤): مثال (٦-٨).

١ ماذا تمثل كل فترة من الفترات (أ، ب، جـ)؟

٢ احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في كل من الفترات (أ، ب، جـ).

٣ احسب الطاقة المغناطيسية العظمى المختزنة في 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، والفترة (ب) تمثل مرحلة ثبات التيار، بينما الفترة (جـ) تمثل مرحلة تلاشي التيار.

٢ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في المحث بتطبيق العلاقة:

$$ق_{د} = -ح \times \frac{\Delta ت}{\Delta ز}$$

الفترة (أ)

$$ق_{د} = -٠,٢ \times \frac{(٠ - ٩)}{(٠ - ٣^{-}١٠ \times ٢)}$$

$$ق_{د} = -٩٠٠ \text{ فولت}$$

الفترة (ب)

$$ق_د = -٠,٢ \times \frac{(٩ - ٩)}{(٣-١٠ \times ٢ - ٣-١٠ \times ٦)} = \text{صفر}$$

الفترة (جـ)

$$ق_د = -٠,٢ \times \frac{(٩ - ٠)}{(٣-١٠ \times ٦ - ٣-١٠ \times ٨)}$$

$$ق_د = ٩٠٠ \text{ فولت}$$

٣ تكون للطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث 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)

$$= \frac{١}{٢} \times ٠,٢ \times ٩^{٢}$$

$$= ٨,١ \text{ جول}$$

٤ $ت = \frac{١}{٣} ت_{\text{عظمى}}$

$ت = \frac{١}{٣} \times ٩ = ٣$ أمبير.

$$ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{١}{٢} ح\ ت^{٢}$$

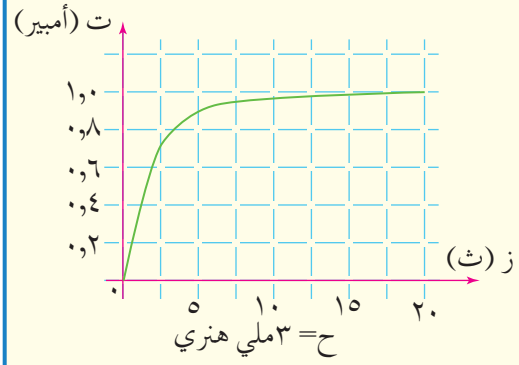
$$= \frac{١}{٢} \times ٠,٢ \times ٣^{٢}$$

$$= ٠,٩ \text{ جول}$$

مراجعة (٦-٦)

١ فسر: تظهر شرارة كهربائية لحظة فتح دارة تحوي محثًّا.

٢ مستعينًا بالتمثيل البياني في الشكل (٦-٢٥) الذي يبين تغير التيار بالنسبة إلى الزمن في دارة تحوي محثًّا، احسب الطاقة المغناطيسية العظمى المختزنة في المحث.



الشكل (٦-٢٥): سؤال (٢).

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 ويبر

٢ لحظة فتح دارة تحتوي على محثّ تنشأ قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في الملف تكون:

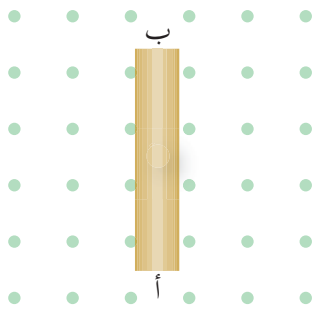
أ طردية، فينمو التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.

ب عكسية، فيتلاشى التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.

جـ طردية، فيتلاشى التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.

د عكسية، فينمو التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًّا.

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:



الشكل(٦-٢٦): سؤال (١) فقرة (٣).

أ (+س). ب (-س). جـ (+ص). د (-ص).

٤ في أثناء اقتراب قطب مغناطيسي جنوبي من طرف ملف لولبي في دارة مغلقة، يتولد في الملف تيار كهربائي حثي ينتج منه مجال مغناطيسي حثي 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 المحث تتناسب تناسبًا:

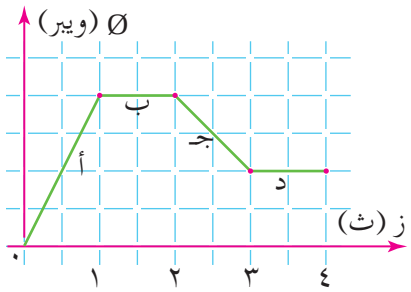
أ طرديًّا مع مربع التيار المار فيه. ب طرديًّا مع التيار المار فيه.

جـ عكسيًّا مع مربع التيار المار فيه. د عكسيًّا مع التيار المار فيه.

٦ مُثِّل التدفق المغناطيسي مع الزمن بيانيًّا كما في الشكل (٦–٢٧)، لحركة مغناطيس بالنسبة إلى ملف. نستنتج من التمثيل البياني أن قوة دافعة كهربائية حثية ستتولد في أثناء:

أ الفترتين (أ) و(ب). ب الفترتين (ب) و(د).

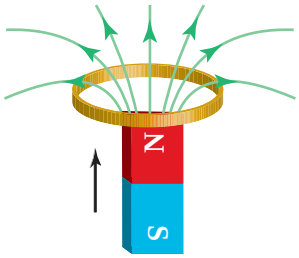
جـ الفترتين (أ) و(جـ). د الفترتين (جـ) و(د).



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 المحث في أثناء ذلك؟

٣ حدد اتجاه التيار الكهربائي الحثي المتولد في الحلقة المبينة في الشكل (٦–٢٨) في أثناء اقتراب المغناطيس منها. موضحًا ذلك.



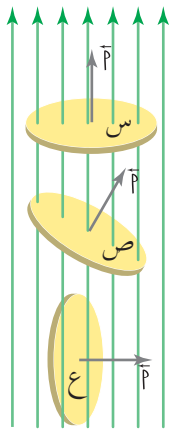
الشكل(٦–٢٨): سؤال (٣) .

٤ ثلاثة سطوح (س،ص،ع) متماثلة، مساحة كل منها (٠,٦)سم^{٢} مغمورة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٠,٨) تسلا، لاحظ الشكل (٦–٢٩)، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

أ أي السطوح الثلاثة يكون التدفق المغناطيسي عبره أكبر؟ فسر إجابتك.

ب أي السطوح الثلاثة يكون التدفق المغناطيسي عبره صفرًا؟ فسر إجابتك.

جـ احسب التدفق المغناطيسي الذي يخترق السطح (ص) إذا كانت الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي(٣٧°).



الشكل(٦–٢٩): سؤال (٤) .

٥ موصل مستقيم طوله (٠,٥) م، في وضع أفقيٍّ، يتحرك باتجاه المحور الصادي السالب بسرعة (٢٠) سم/ث في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٠,٨) تسلا باتجاه المحور الزيني الموجب. احسب:

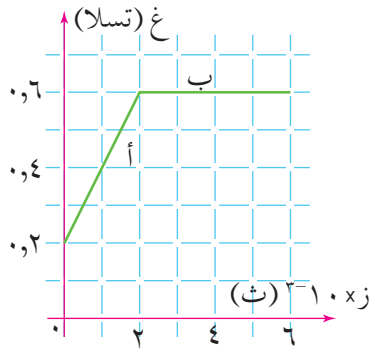
أ متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة فيه.

ب إذا كان الموصل جزءًا من دارة كهربائية مغلقة مقاومتها (٢) أوم. فاحسب التيار الحثي الذي يمر فيها.

٦ يمثل الشكل (٦–٣٠) الرسم البياني لتغير المجال المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن، فإذا كان هذا المجال يخترق ملفًا عدد لفاته (٢٠٠) لفة، ومساحة اللفة الواحدة(٤×١٠^{-٢}) م^{٢}، بحيث يكون متجه مساحة الملف موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي. فاحسب:

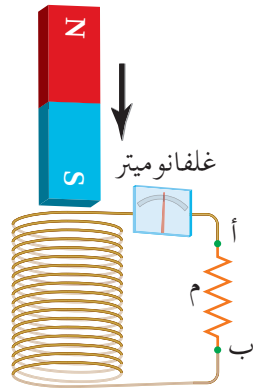
أ التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في كل من الفترتين (أ، ب).

ب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في كل من الفترتين (أ، ب).



الشكل(٦–٣٠): سؤال (٦) .

٧ أسقط طالب مغناطيسًا داخل ملف كما في الشكل (٦–٣١)، فتحرك المغناطيس بتسارع أقل من تسارع السقوط الحر، فافترض الطالب أنه توجد قوة معاكسة لقوة الجاذبية الأرضية تؤثر في حركة المغناطيس. أثبت صحة هذه الفرضية.



الشكل(٦–٣١): سؤال (٧) .

٨ تغير التيار المار في دارة محث من (٣) أمبير إلى (٧) أمبير خلال (٠,٠٢) ثانية. فإذا كانت محاثة المحث (٢٠) هنري، وعدد لفاته (١٠٠٠) لفة. فاحسب في أثناء المدة الزمنية التي تغير فيها التيار الكهربائي:

أ القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية العكسية المتولدة في المحث.

ب التغير في الطاقة المغناطيسية المختزنة في المحث.

جـ التغير في التدفق المغناطيسي عبر المحث.

٩ ملف عدد لفاته (٢٠٠) لفة، ومساحة مقطع كل لفة من لفاته (٠,٨) سم^{٢}، موضوع في مجال مغناطيسي مقداره (٢٠) تسلا، فإذا كان متجه مساحة الملف باتجاه المجال المغناطيسي فاحسب:

أ التدفق المغناطيسي عبره.

ب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية الطردية المتولدة فيه إذا تلاشى المجال المغناطيسي في مدة زمنية مقدارها (٠,٠٢) ثانية.

١ ملف لولبي يتكون من (٤٥٠) لفة، ومساحة مقطعه (١٥٠) سم^{٢}، وطوله (٢٠) سم، يمر فيه تيار كهربائي مقداره (٤٠) ملي أمبير.

أولًا: احسب:

أ مقدار المجال المغناطيسي الناشئ داخل الملف اللولبي.

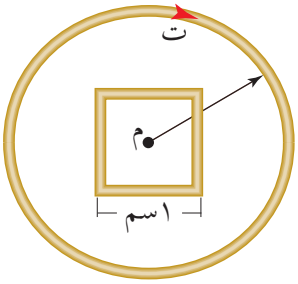
ب مقدار التدفق المغناطيسي عبر الملف.

جـ محاثة الملف اللولبي.

ثانيًا: أثبت أن الطاقة المختزنة في الملف اللولبي يمكن أن تعطى بالعلاقة الآتية:

$$ط = \frac{غ^{٢} \, ف^{٢} \, ل}{\mu \, ٢}$$

٢ يبين الشكل مقطعًا لملف لولبي مكون من (١٠٠) لفة، طوله (٢٠)سم، ومساحة مقطعه (٣٠) سم^{٢}، 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:



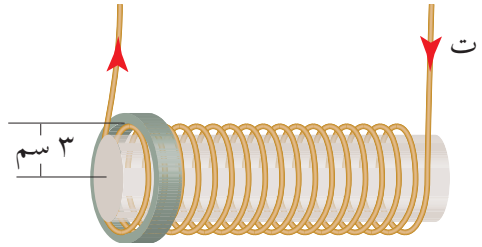
أ المجال المغناطيسي الناشئ داخل الملف اللولبي، مقدارًا واتجاهًا.

ب التدفق المغناطيسي عبر الملف المربع.

جـ متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف المربع، إذا تلاشى التيار الكهربائي في الملف اللولبي خلال (٣) ثوان.

د التيار الكهربائي الحثي المتولد في الملف المربع مقدارًا واتجاهًا، إذا كانت مقاومته (٠,٢)أوم.

٣ حلقة من الألمنيوم مساحتها ($٩ \pi \times ١٠^{-٤}$)م^{٢} ومقاومتها (٠,٣) ملي أوم، موضوعة حول أحد طرفي ملف لولبي يحتوي على (١٠٠٠) لفة/م كما في الشكل. يمر فيه تيار كهربائي فيتولد مجال مغناطيسي عند أحد طرفي الملف اللولبي مقداره نصف

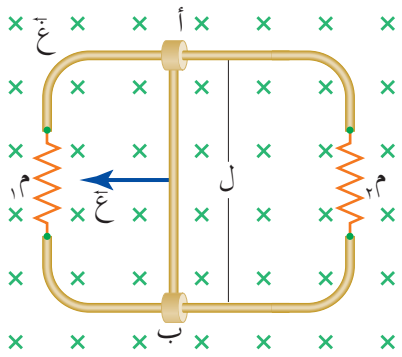


مقدار المجال المغناطيسي المتولد داخله، إذا كان المعدل الزمني لتغير التيار الكهربائي عبر الملف اللولبي (٢٧٠) أمبير/ث، فجد:

أ التيار الحثي المتولد في الحلقة مقدارًا واتجاهًا.

ب المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الحثي في مركز الحلقة مقدارًا واتجاهًا.

٤ في الشكل المجاور، موصل مستقيم (أ ب) طوله (٣٥) سم، قابل للانزلاق دون احتكاك على مجرى فلزي، مغمور داخل مجال مغناطيسي مقداره (٢,٥) تسلا باتجاه المحور الزيني السالب فإذا كان طرفا المجرى متصلين بمقاومتين ($م_١$ = ٢ ملي أوم، $م_٢$ = ٥ ملي أوم)، وسُحب الموصل باتجاه (–س) بسرعة ثابتة مقدارها (٨) مم/ث، فاحسب:

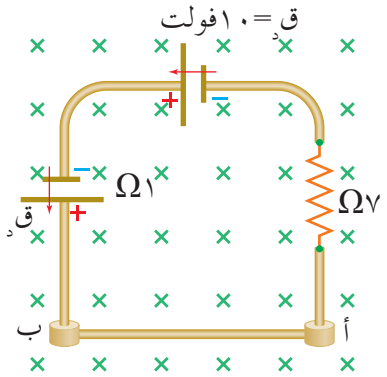


أ فرق الجهد الكهربائي بين طرفي الموصل(أ ب). ما علاقته بجهد كل من المقاومتين؟

ب التيار الحثي في كل من المقاومتين.

جـ 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 (أ ب) 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 (أ ب) ساكنًا.



الفصل السابع

مقدمة إلى فيزياء الكم

Introduction to Quantum Physics

قدّمت الفيزياء الكلاسيكية، ممثلة بالميكانيكا، والحرارة، والكهرمغناطيسية، التي طُورت على مدى ما يقرب قرنين من الزمن، العديد من القوانين والنظريات التي أسهمت إلى حدّ كبير في تفسير الظواهر الطبيعية المختلفة وفهمها، 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.

في هذا الفصل

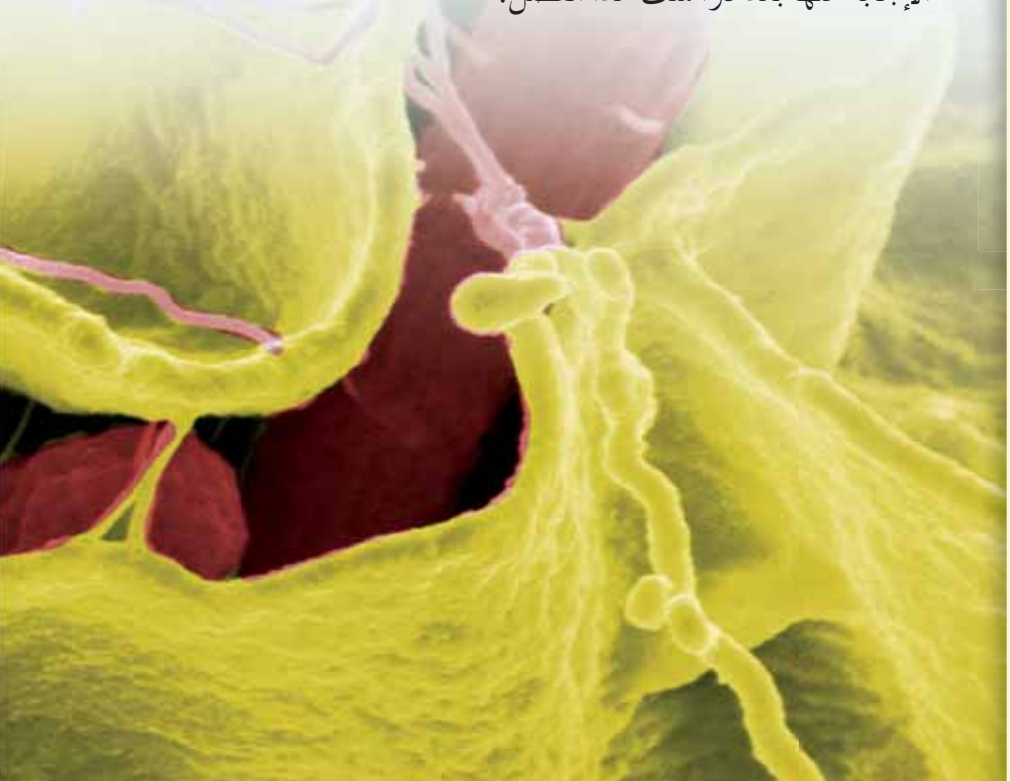
(٧-١)
تكمية الطاقة.

(٧-٢)
الظاهرة الكهرضوئية.

(٧-٣)
ظاهرة كومتون.

(٧-٤)
الأطياف الذرية للغازات

(٧-٥)
الطبيعة المزدوجة للإشعاع والمادة.



ينتج المجهر الإلكتروني الماسح صورًا ثلاثية الأبعاد، تبين الصورة من مجهر إلكتروني بكتيريا السالمونيلا المسببة للتسمم الغذائي.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- توضّح مبدأ تكمية الطاقة لبلانك، وتعبّر عنه رياضيًّا.
- تَتعرّف بعض 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.
- تطبق 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 مسائل حسابية.
- تُوضّح أن طول محيط مدار الإلكترون يساوي عددًا صحيحًا من طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون.

١-٧ تكمية الطاقة
Quantization of Energy

تصدر عن 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 يبعث مقدارًا غير محدد من الطاقة أو يمتصه، عندما يتغير اتساع اهتزازته. وتتناسب طاقة الإشعاع طرديًّا مع شدته، التي تتناسب مع اتساع اهتزازات الجسيمات المهتزة. هذه النظرة لطبيعة الإشعاع جعلت الفيزياء الكلاسيكية تواجه صعوبة في تفسير ظواهر فيزيائية كثيرة، مثل: الظاهرة الكهرضوئية، وظاهرة كومتون، وغيرهما من الظواهر.

في العام (١٩٠٠) قدّم العالم ماكس بلانك (Max Planck) تصوّرًا جديدًا للإشعاع؛ إذ افترض أن الإشعاع وحدات منفصلة ليست متصلة تسمى كمّات مفردها كمّة، لكل منها طاقة محددة مكمّاة تتناسب طرديًّا مع تردد الإشعاع؛ أي أن:

$$\text{ط} = \text{هـ ت}_{\text{د}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١-٧)$$

حيث (ط): طاقة الكمّة الواحدة، و(ت$_{\text{د}}$): تردد الإشعاع، و(هـ): ثابت بلانك، ويساوي تقريبًا ($٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}$ جول. ثانية).

وفرضية بلانك للإشعاع باتت تعرف بمبدأ **تكمية الطاقة** الذي ينص على أن **الطاقة الإشعاعية المنبعثة أو الممتصة تساوي عددًا صحيحًا من مضاعفات الكمية (هـ ت$_{\text{د}}$)**.

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:

$ط = هـ ت_د$

$= ٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ٤ \times ١٠^{١٤}$

$= ٢,٦٥ \times ١٠^{-١٩}$ جول

وهذا المقدار من الطاقة صغير جدًّا مقارنة بوحدة قياس الطاقة في النظام العالمي للوحدات (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 (٢-١):

$ط = ش_e جـ$

يمكن التوصل إلى أن (١) إلكترون فولت يساوي ($١,٦ \times ١٠^{-١٩}$)جول، وعليه فإن طاقة الكمة الواحدة للإشعاع الصادر عن الجسم:

$$ط = \frac{٢,٦٥ \times ١٠^{-١٩}}{١,٦ \times ١٠^{-١٩}}$$

$= ١,٦٦$ إلكترون فولت.

مراجعة (٧-١)

١ وضح المقصود بتكمية الطاقة، والإلكترون فولت.

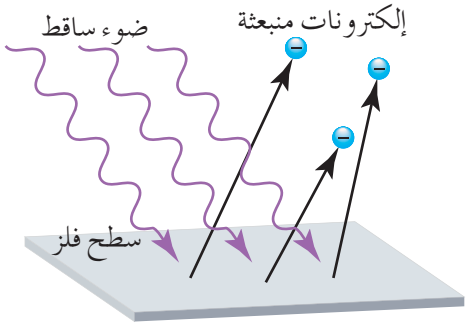
٢ ما الفرضية التي وضعها بلانك لتفسير الإشعاع الصادر عن الأجسام؟

٣ ما الفرق بين تفسير بلانك للإشعاع الصادر عن الأجسام، وتفسير الفيزياء الكلاسيكية؟

٧-٢ الظاهرة الكهرضوئية

Photoelectric Effect

دلت التجارب على 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.

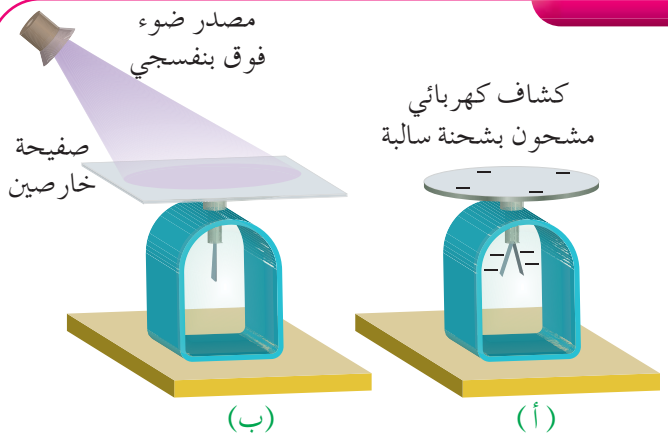


الشكل (٧-١): الظاهرة الكهرضوئية.

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): توضيح الظاهرة الكهرضوئية.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ اصقل صفيحة الخارصين حتى تصبح لامعة مستخدمًا ورق الزجاج.

٢ اشحن الكشاف الكهربائي بالحث بشحنة سالبة مستخدمًا قضيب الزجاج وقطعة الحرير، ولاحظ انفراج ورقتي الكشاف كما في الشكل (٧-٢/أ).

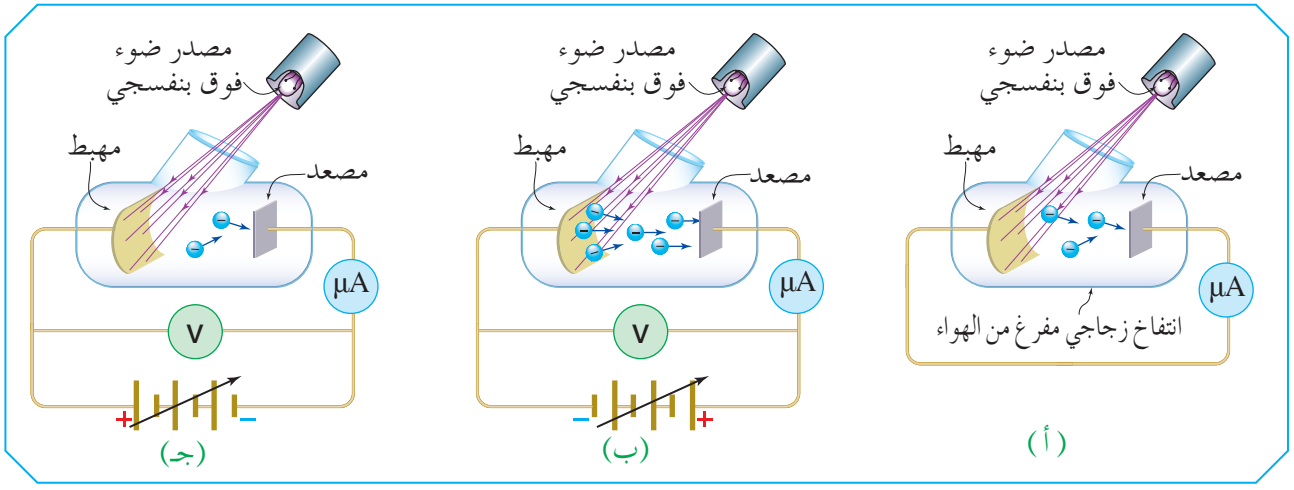
٣ صل صفيحة الخارصين بالكشاف الكهربائي، أو ضعها على قرص الكشاف.

٤ سلّط مصدر الضوء فوق البنفسجي على صفيحة الخارصين، كما في الشكل (٧-٢/ب). وراقب ما يحدث لورقتي الكشاف، ماذا تلاحظ؟

لا شكّ في أنك شاهدت انطباق ورقتي الكشاف عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على سطح الخارصين، فما تفسير ذلك؟ نستنتج أن الكشاف فقد شحنته بتأثير سقوط الأشعة فوق البنفسجية على الخارصين، ما يدل على فقدان هذا السطح للإلكترونات وتفريغ شحنة الكشاف.

(٧-٢-١) تجربة لينارد (Lenard Experiment)

يعد العالم لينارد (Lenard) أول من درس الظاهرة الكهرضوئية تجريبيًّا، مستخدمًا الدارة المبينة في الشكل (٧-٣)، التي تحتوي على خلية كهرضوئية تتكوّن من انتفاخ زجاجي مفرغ من الهواء؛ لكي 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): الدارة المستخدمة في تجربة لينارد.

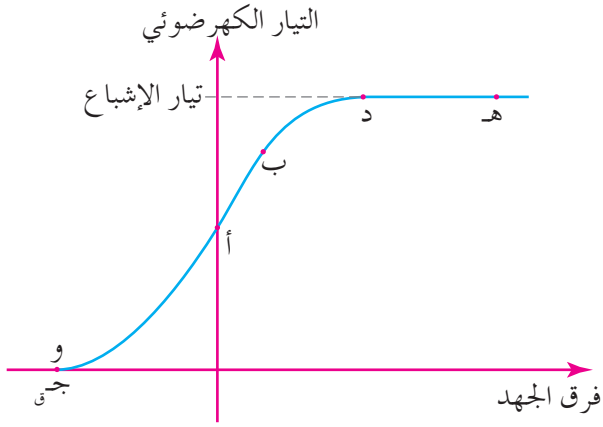
وصل لينارد الخلية الكهرضوئية مع ميكروأميتر بغياب مصدر فرق جهد كهربائي كما في الشكل (٧-٣/أ)، ثم أضاف مصدر فرق جهد كهربائي متغير، كما في الشكلين (٧-٣/ب، جـ)، ومثلت العلاقة بين فرق الجهد بين المصعد والمهبط والتيار الكهربائي المار في الخلية الكهرضوئية كما في الشكل (٧-٤).

لاحظ لينارد عند سقوط ضوء بتردد مناسب على مهبط الخلية الكهرضوئية أن الميكروأميتر يكشف عن مرور تيار كهربائي بغياب مصدر فرق الجهد، فاستنتج أن مصدر هذا التيار هو إلكترونات ضوئية تحررت من المهبط ووصلت إلى المصعد. لاحظ النقطة (أ) في الشكل (٧-٤)؛ ما يدل على أن هذه الإلكترونات تمتلك قدرًا كافيًا من الطاقة الحركية مكّنتها من الوصول إلى المصعد، ويسمى **التيار الناتج من حركة الإلكترونات المنبعثة من المهبط والمتجهة إلى المصعد تيّارًا كهرضوئيًّا**.

أضاف لينارد إلى الدارة مصدر فرق جهد كهربائي متغيّر؛ حيث كان جهد المصعد موجبًا والمهبط سالبًا، كما في الشكل (٧-٣/ب)، فلاحظ زيادة التيار الكهرضوئي، فاستنتج أن الفرق في الجهد بين

المصعد والمهبط يبذل شغلًا موجبًا على الإلكترونات ناقلًا إليها طاقة حركية، ويجذب المزيد منها نحو المصعد، 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). ولاحظ ثبات التيار الكهرضوئي بين النقطتين (د، هـ)، بالرغم من الاستمرار في زيادة فرق الجهد بين المصعد والمهبط؛ وهذا يعني أن الإلكترونات المتحرّرة من المهبط جميعها قد وصلت إلى المصعد، وتسمى القيمة العظمى للتيار الكهرضوئي **تيار الإشباع**، وهو **التيار الكهرضوئي الناتج من حركة الإلكترونات الضوئية جميعها المتحرّرة من المهبط والواصلة إلى المصعد.**



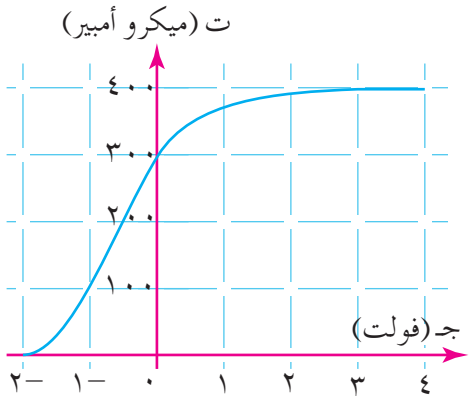
الشكل (٧–٤): العلاقة البيانيّة بين فرق الجهد بين المصعد والمهبط والتيار الكهرضوئي في الخلية الكهرضوئية .

أعاد لينارد وصل مهبط الخليّة الكهرضوئية بالقطب الموجب والمصعد بالقطب السالب، فأصبح فرق الجهد الكهربائي عكسيًّا، كما في الشكل (٧–٣/جـ)، وهذا الفرق في الجهد يبذل شغلًا سالبًا؛ أي يسحب طاقة حركية من الإلكترونات، ويعيق 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 الكهرضوئي يتناقص تدريجيًّا 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 الكهرضوئي عندما يكون فرق الجهد العكسي كافيًا لإيقاف الإلكترونات الضوئية التي تمتلك أكبر طاقة حركية ($ط_{ح\ عظمى}$)، ويسمى **فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لجعل التيار الكهرضوئي صفرًا**، (**أو فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لإيقاف أسرع الإلكترونات الضوئية**) **جهد القطع** (Cutoff Potential)، ويرمز له بالرمز ($جـ_{ق}$) وتمثله النقطة (و) في الشكل (٧–٤)، ويرتبط جهد القطع مع الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ط_{ح\ عظمى} = ـــ e\ جـ_{ق} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧–٢)$$

مثال (٧-٢)

يبين الشكل (٧-٥) تمثيلًا بيانيًا للعلاقة بين فرق الجهد (جـ) في خلية كهرضوئية والتيار الكهرضوئي (ت). مستعينًا بالبيانات المثبتة في 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 أفقيًّا، 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، ويمثل نقطة تقاطع المنحنى مع محور فرق الجهد (ت = صفر) ومن الرسم البياني جـ$_{ق}$ = -٢ فولت.

٤ $ط_{ح\ عظمى} = هـ\ جـ_{ق}$

$= -١,٦ \times ١٠^{-١٩} \times -٢ = ٣,٢ \times ١٠^{-١٩}$ جول

$= ٢$ إلكترون فولت.

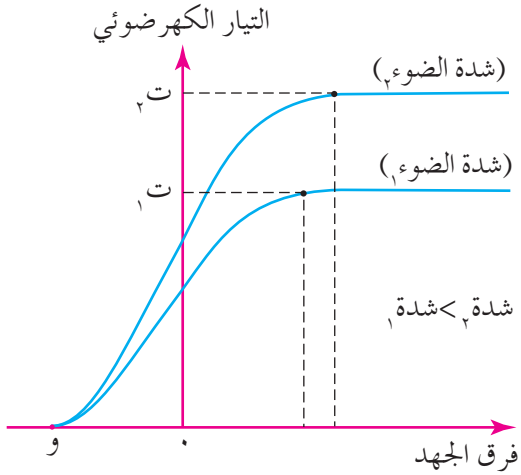
يُلاحظ أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بوحدة إلكترون فولت تساوي عدديًّا القيمة المطلقة لجهد القطع بوحدة فولت.

٥ $ط_{ح\ عظمى} = \frac{١}{٢} ك\ ع^{٢}_{عظمى}$

$٣,٢ \times ١٠^{-١٩} = \frac{١}{٢} \times ٩,١١ \times ١٠^{-٣١}\ ع^{٢}_{عظمى}$

$ع^{٢}_{عظمى} = ٠,٧ \times ١٠^{١٢} \Leftarrow ع_{عظمى} = ٨,٤ \times ١٠^{٥}$ م/ث.

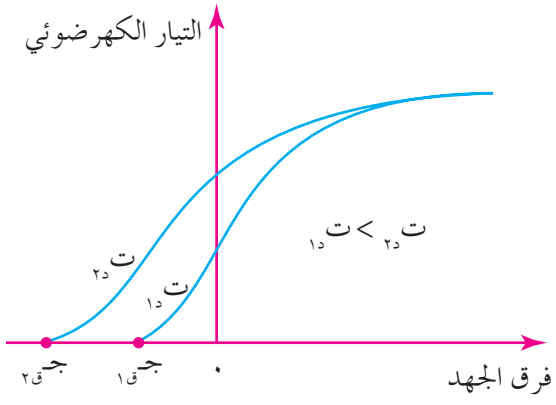
عند تكرار تجربة لينارد بعد زيادة شدة الضوء الساقط على المهبط عن طريق إضافة مصباح آخر (مع ثبات تردد الضوء الساقط)، وتمثيل العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهرضوئي بيانيًّا، تم الحصول على منحنى آخر كما في الشكل (٧–٦). بينت النتائج التجريبية أن جهد القطع الذي تمثله النقطة (و) في الشكل لم يتغير، وهذا يعني أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لم تتغير وفق 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 في الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.

ويُظهر 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 ثبات 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 ثبات فرق الجهد بين المهبط والمصعد.**

أمّا عند زيادة تردد الضوء الساقط مع ثبات شدّته في تجربة لينارد، وتمثيل العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهرضوئي بيانيًّا كما في الشكل (٧–٧)، بينت النتائج التجريبية أن جهد القطع تزداد قيمته المطلقة بزيادة تردد الضوء الساقط، وهذا يعني زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية وفق العلاقة (٧–٢)، 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 تردّد الضوء الساقط أقل من قيمة معينة مهما بلغت شدّته، **وأقل تردد للضوء يلزم لتحرير إلكترونات من سطح فلز** يسمى **تردّد العَتَبة** (Threshold Frequency)، ويرمز له بالرمز (**ت**$_{د_{\circ}}$)، ولكل فلز تردّد عتبة، 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 سطح الصوديوم.

(٧-٢-٢) تفسير الظاهرة الكهرضوئية

لفهم الظاهرة الكهرضوئية لجأ العلماء إلى تفسير النتائج التي رُصِدت من الظاهرة الكهرضوئية.

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 الذي كان سائدًا آنذاك 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.

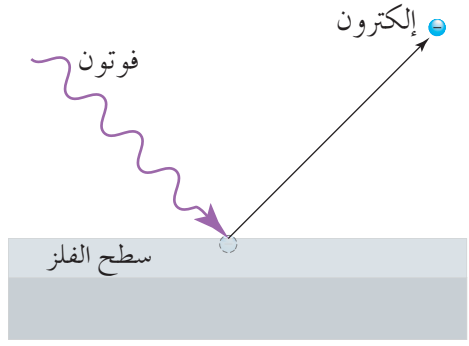
٣ وفقًا للفيزياء الكلاسيكية؛ فمن المتوقع عند سقوط ضوء ذي شدة عالية على فلز أن تتحرر منه إلكترونات، بغض النظر عن تردد الضوء الساقط عليه. وهذا لا يتفق مع التجربة؛ إذ تبين أنه لا تتحرر إلكترونات من الفلز إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من تردد العتبة لهذا الفلز مهما بلغت شدة الضوء.

وبذا نلاحظ أن النتائج التجريبية للظاهرة الكهرضوئية تتعارض مع تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية وفق النموذج الموجي للضوء، لذلك عجزت الفيزياء الكلاسيكية عن تفسير هذه النتائج.

ثانيًا: تفسير فيزياء الكم

في عام (١٩٠٥) م قدّم أينشتين (Einstein) تفسيرًا للظاهرة الكهرضوئية، مؤكدًا مفهوم تكمية الطاقة الذي افترضه بلانك؛ إذ وسّع هذا المفهوم ليشمل الموجات الكهرمغناطيسية جميعها.

فافترض أينشتين أن طاقة الضوء تتركز في حزم (bundles) منفصلة، أي كمّات، سميت في ما 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.

$$\text{هـ ت}_د = \Phi + \text{ط}_{\text{ح عظمى}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-٣)$$

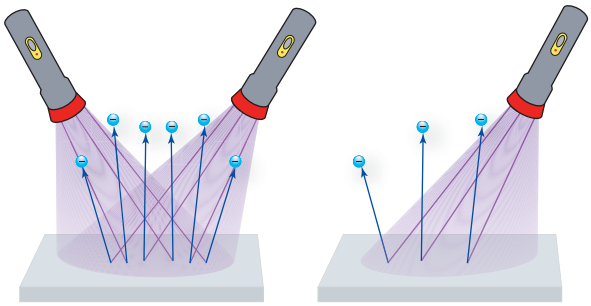
حيث (هـ ت$_د$): طاقة الفوتون الواحد، و(Φ): **أقل طاقة يمتلكها فوتون الضوء تلزم لتحرير إلكترون من سطح الفلز من غير إكسابه طاقة حركية**، ويطلق عليها اسم **اقتران الشغل** للفلز (Work Function). والفوتون الذي تكون طاقته مساوية اقتران الشغل للفلز يحرر إلكترونًا من السطح ولا يكسبه طاقة حركية، فيكون تردده مساويًا تردد العتبة، أي أن:

$$\Phi = \text{هـ ت}_{د_٥} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-٤)$$

وتسمى العلاقة (٧–٣) معادلة أينشتين الكهرضوئية، إذ عن طريقها فسر أينشتين النتائج التجريبية للظاهرة الكهرضوئية وفق الآتي:

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 واحدًا 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؛ ويدل على ذلك عدم تغير جهد القطع ($جـ_{ق}$) في العلاقة (٧–٢) بسبب ثبات تردد الضوء الساقط ($ت_{د}$).



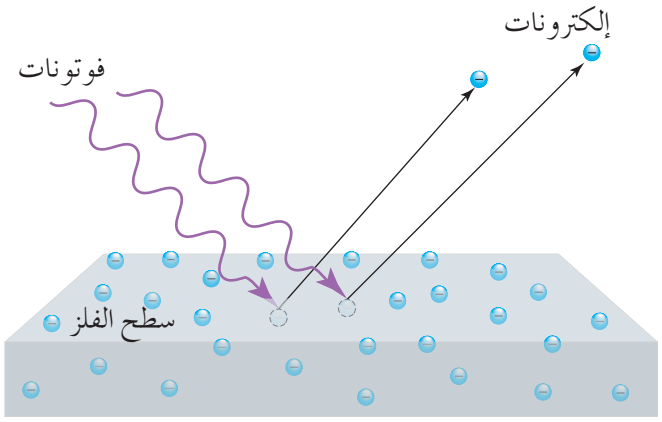
الشكل (٧–٩): علاقة عدد الإلكترونات الضوئية بشدة الضوء.

أما زيادة تردد الضوء الساقط على سطح الفلز مع بقاء شدته ثابتة فإنها تعني أن طاقة الفوتون الواحد تزداد ($ط_{فوتون} = هـ\ ت_{د}$)، أي أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية تزداد، فيزداد جهد القطع، إلا أن العدد الكلي للإلكترونات المتحررة لا يتغير؛ لأن عدد الفوتونات لم يتغير؛ فلا يتغير تيار الإشباع .

٢ فسر أينشتين الانبعاث الفوري للإلكترونات الضوئية بأنه إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من اقتران الشغل للفلز ($ط_{الفوتون} > \Phi$) فإن الإلكترون يتحرر وينبعث ممتلكًا طاقة حركية فور سقوط الفوتون.

٣ وفق معادلة أينشتين فإن أقل طاقة يمتلكها فوتون تلزم لتحرير إلكترون من سطح فلز، يجب أن تساوي اقتران الشغل للفلز؛ لذا وفقًا للعلاقة (٧–٤)، لن تتحرر 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 سطح الفلز ينتهي على عمق عدة مئات من الذرات، انظر الشكل (٧–١٠)، وعند سقوط الضوء على سطح الفلز فإن بعض الفوتونات يصطدم بذرات السطح الخارجية، وبعضها الآخر يصل إلى الذرات الأعمق داخل السطح، وعليه فإن الإلكترونات المتحررة من ذرات السطح الخارجية جميعها تتحرر ممتلكة الطاقة الحركية نفسها ($ط_{ح\ عظمى}$) وفق العلاقة (٧–٣)، أما الإلكترونات



الشكل (٧–١٠): اختلاف الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية تبعًا للعمق الذي تنبعث منه.

الأخرى التي تتحرر من داخل السطح فإنها تصطدم بالذرات التي تقع في طريق خروجها فاقدة جزءًا من طاقتها الحركية، لذا تتفاوت الإلكترونات الضوئية في سرعة انبعاثها من سطح الفلز، والسرعة التي تُحدَّد تجريبيًّا 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.

العنصر	Φ (إلكترون فولت)
صوديوم	٢,٢٨
ألمنيوم	٤,٢٨
نحاس	٤,٦٥
خارصين	٤,٣١
فضة	٤,٣
رصاص	٤,٢٥
حديد	٤,٥٠
كربون	٥,٠٠
كالسيوم	٢,٨٧

الحل:

بما أن اقتران الشغل للحديد يساوي (٤,٥) إلكترون فولت، يجب تحويل وحدة الإلكترون فولت إلى وحدة جول:

$$\Phi = ٤,٥ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩} = ٧,٢ \times ١٠^{-١٩} \text{ جول}$$

ومن العلاقة (٧-٤):

$$ت_{د_٥} = \frac{\Phi}{هـ}$$

$$= \frac{٧,٢ \times ١٠^{-١٩}}{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}} = ١,١ \times ١٠^{١٥} \text{ هيرتز}$$

ولحساب الطول الموجي (λ) لضوء تردده ($ت_د$) نطبق العلاقة: $ت_د = \frac{س}{\lambda}$

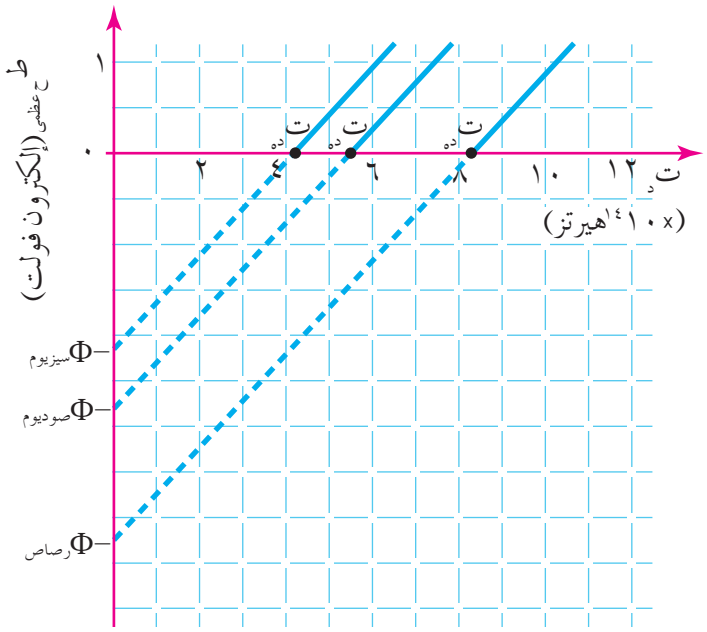
حيث (س): سرعة الضوء في الفراغ أو الهواء وتساوي ٣×١٠^{٨} م/ث.

وعليه فإن:

طول موجة العتبة (λ) $= \frac{س}{ت_{د_٥}}$.

$$\lambda = \frac{٣ \times ١٠^{٨}}{١,١ \times ١٠^{١٥}} = ٢٧٣ \times ١٠^{-٩} \text{ م} = ٢٧٣ \text{ نم}$$

لم يتوقف أينشتين عند تفسير العلاقة بين تردد الضوء الساقط 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 مختلفة، فحصل على المنحنيات الموضحة في الشكل (٧–١١)، وكان الفضل لميليكان في قياس ثابت بلانك تجريبيًّا.



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 ثابت بلانك (هـ)، ومن معادلة أينشتين يمكن التوصل إلى أن نقطة تقاطع أي من هذه الخطوط مع المحور السيني تمثل تردد العتبة للفلز(ت$_{د_{٥}}$)، وأن نقطة تقاطع الخط نفسه مع محور الصادات تمثل اقتران الشغل للفلز (Φ)، إذا كتبت على الصورة الآتية:

$$ط_{ح\ عظمى} = هـ\ ت_{د} - \Phi$$

وهي على صورة العلاقة الرياضية الخطية ص = أس + ب، حيث (أ): الميل، و(ب): المقطع الصادي.

مثال (٧–٤)

سقط ضوء فوق بنفسجي طول موجته (٢٤٠) نم على مهبط خلية كهرضوئية، فانطلقت منه إلكترونات باتجاه المصعد مكونة تيارًا كهرضوئيًّا عبر دارة مغلقة، وعندما أصبح فرق الجهد العكسي (١,٤) فولت انقطع التيار في الدارة. 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 $ط_{ح عظمى} = ش_e جـ_ق$

$= -١,٦ \times ١٠^{-١٩} \times -١,٤$

$= ٢,٢٤ \times ١٠^{-١٩}$ جول

٣ $\Phi = هـ ت_د - ط_{ح عظمى}$

$\Phi = ٨,٢٩ \times ١٠^{-١٩} - ٢,٢٤ \times ١٠^{-١٩} = ٦,٠٥ \times ١٠^{-١٩}$ جول

مثال (٧-٥)

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

$$ت_د = \frac{٤,٩٦ \times ١٠^{-١٩}}{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}$$

$$= ٧,٤٨ \times ١٠^{١٤} \text{ هيرتز}$$

٢ نحسب أوّلًا تردد العتبة للصوديوم، ونقارنه بتردد الضوء الساقط، كما يأتي:

$$ت_{د_٥} = \frac{\Phi}{هـ}$$

$$= \frac{٢,٢٨ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩}}{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}$$ (لاحظ أننا حولنا اقتران الشغل إلى وحدة الجول)

$$= ٥,٥ \times ١٠^{١٤} \text{ هيرتز}$$

أما تردد الضوء الساقط فهو:

$$ت_د = \frac{س}{\lambda} = \frac{٣ \times ١٠^{٨}}{٦٠٠ \times ١٠^{-٩}}$$

$$= ٥ \times ١٠^{١٤} \text{ هيرتز}$$

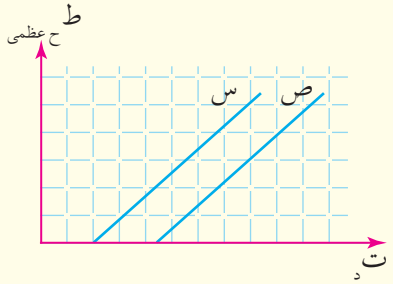
بما أن $ت_د < ت_{د_٥}$، فإنه في هذه الحالة لن تتحرر أي إلكترونات من سطح فلز الصوديوم.

مراجعة (٧-٢)

١ 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 العظمى للإلكترونات المنبعثة منهما متساوية، فأي الحزمتين ترددها أكبر؟ وضح إجابتك.

٢ سقط ضوء تردده ($١٠^{١٥}$) هيرتز على سطحين فلزيّين مختلفين (أ، ب)، فتحررت إلكترونات ضوئية من السطح (أ) من غير 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.

٣ يوضح الشكل (٧-١٢) العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط على فلزين مختلفين (س، ص) والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة. أجب عمّا يأتي:



الشكل (٧-١٢): سؤال (٣).

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.

٤ 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:

λ (نم)	٢٥٣,٦	٣١٣,٢	٣٦٥,٠	٤٠٤,٧
جـ$_{ق}$ (فولت)	١,٩٥	٠,٩٨	٠,٥٠	٠,١٤

معتمدًا على البيانات الواردة في الجدول أجب عما يأتي:

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 لفلز الكالسيوم من الجدول (٧-١).

٧-٣ ظاهرة كومتون
Compton Effect

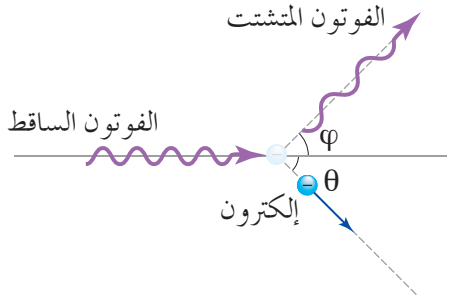
افترض أينشتين أن الضوء سيلٌ من **الجسيمات النقطية (الفوتونات)** وتأكيدًا لتصوّراته هذه؛ أدخل بعد عام من تفسيره للظاهرة الكهرضوئية مفهومًا على الفوتونات يرتبط بالأجسام المادية، وهو الزخم الخطي. إذ افترض أن الفوتون الواحد الذي طاقته (هـ ت) يحمل زخمًا خطيًّا (خ) باتجاه حركته يعطى مقداره بالعلاقة الآتية:

$$\text{خ} = \frac{\text{هـ}}{\lambda} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-٥)$$

وقد أثبتت التجارب التي أجراها كومتون (Compton) في ما 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 (١٩٢٣)م لاحظ كومتون أن سقوط أشعة سينية ذات تردد عالٍ على هدف من الغرافيت (الكربون) يؤدي إلى انطلاق إلكترونات تمتلك 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. وعندما يصطدم الفوتون بالإلكترون يحدث بينهما تصادم تام المرونة، كالذي يحدث بين الجسيمات، حيث يبقى مقدار طاقة النظام (فوتون– إلكترون) وزخمه محفوظين في هذا التصادم. وينتج من ذلك فوتون جديد يتشتت باتجاه يصنع زاوية (φ) مع اتجاه سير الفوتون الساقط، بينما ينطلق الإلكترون بزاوية (θ)، كما في الشكل (٧–١٣).



الشكل (٧–١٣): 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:

$$(\text{طـ}_{\text{ح}})_{\text{إلكترون}} = \text{هـ ت}_{\text{د}} - \text{هـ ت}_{\text{د}}' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-٦)$$

حيث (طـ$_{\text{ح}}$): الطاقة الحركية للإلكترون بعد التصادم، و(هـ ت$_{\text{د}}$): طاقة الفوتون الساقط، و(هـ تَ$_{\text{د}}$): 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 هذا التصادم؛ ما يؤكد فرض أينشتين بأن الفوتون يحمل زخمًا.

مثال (٧-٦)

في الشكل (٧-١٣)، وعلى فرض أن الإلكترون ساكن قبل التصادم، إذا كان طول موجة الفوتون الساقط (٠,٢٤) نم والطاقة الحركية للإلكترون 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 بتطبيق العلاقة (٧-٥):

$$\text{خ} = \frac{\text{هـ}}{\lambda}$$

$$= \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}{٠,٢٤ \times ١٠^{-٩}} \Leftarrow \text{خ} = ٢,٧٦ \times ١٠^{-٢٤} \text{ كغ.م/ث}.$$

٢ $ط_{\text{الفوتون الساقط}} = هـ ت_{د}$

$= \frac{هـ}{\lambda} س$

$= خ س$

$= ٢,٧٦ \times ١٠^{-٢٤} \times ٣ \times ١٠^{٨}$

$= ٨٢,٨٨ \times ١٠^{-١٧}$ جول $\Leftarrow ط_{\text{الفوتون الساقط}} = ٥١٨٠$ إلكترون فولت.

٣ نحسب أولًا طاقة الفوتون المتشتت:

$(ط_{ح})_{\text{إلكترون}} = ط_{\text{الفوتون الساقط}} - ط_{\text{الفوتون المتشتت}}$

$٢٦ = ٥١٨٠ - ط_{\text{الفوتون المتشتت}} \Leftarrow ط_{\text{الفوتون المتشتت}} = ٥١٥٤$ إلكترون فولت.

ومن العلاقة $(ط_{\text{فوتون}} = هـ ت_{د} = \frac{هـ س}{\lambda})$ نحسب طول موجة الفوتون المتشتت:

$ط_{\text{الفوتون المتشتت}} = \frac{هـ س}{\lambda}$

$\lambda = \frac{هـ س}{ط_{\text{الفوتون المتشتت}}}$

$\lambda = \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ٣ \times ١٠^{٨}}{١,٦ \times ٥١٥٤ \times ١٠^{-١٩}}$ (لاحظ أننا حولنا طاقة الفوتون المتشتت إلى وحدة الجول)

$\lambda = ٢٤١ \times ١٠^{-١٢}$ م $= ٠,٢٤١$ نم

مراجعة (٧-٣)

١ صف ظاهرة كومتون.

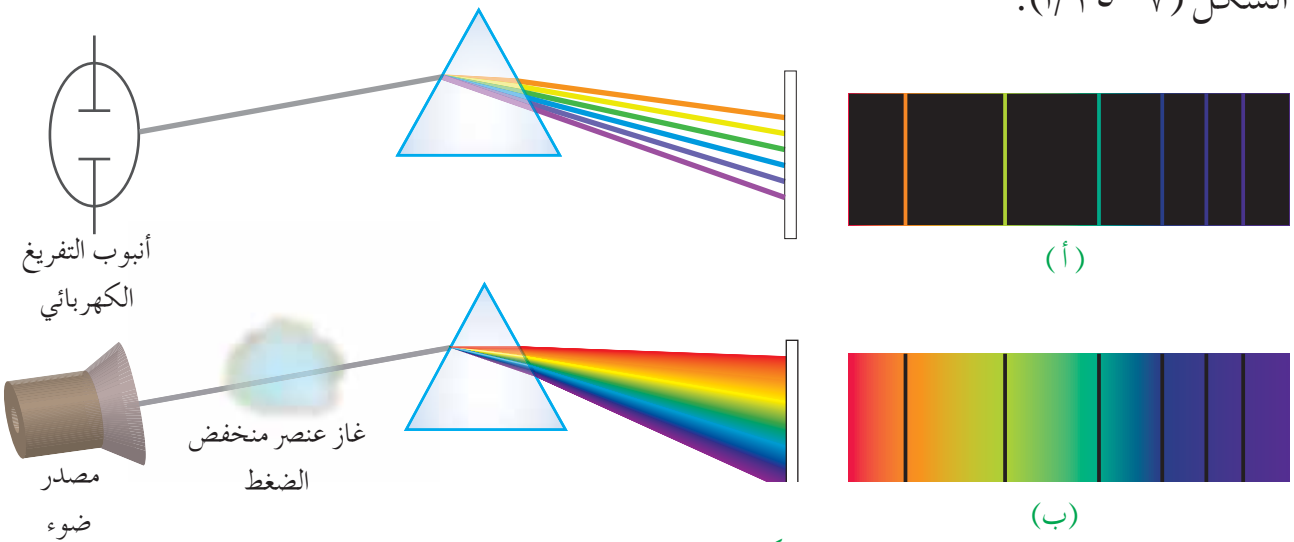
٢ كيف فسر كومتون ظهور الأشعة السينية المتشتتة عندما يحدث تصادم فوتون مع إلكترون حر ساكن؟

٣ قارن بين الفوتون الساقط والفوتون المتشتت في ظاهرة كومتون من حيث: الطاقة، الزخم الخطي، التردد، الطول الموجي، السرعة.

تبعث الأجسام الساخنة المتوهجة إشعاعًا حراريًّا مثل توهج فتيل مصباح التنغستن، فإذا حلّلنا هذا الإشعاع بوساطة منشور فإننا نحصل على طيف متصل (Continuous Spectrum) يضم الأطوال الموجية التي يقع بعضها في منطقة الطيف المرئي، انظر الشكل (٧-١٤)، ويقع بعضها الآخر خارج منطقة الطيف المرئي، وقد تعرفت سابقًا الطيف الكهرمغناطيسي كاملًا، المرئي وغير المرئي.

الشكل (٧-١٤): الطيف المتصل.

ويوجد نوع آخر من الإشعاع ينبعث من غاز عنصر منخفض الضغط في أنابيب التفريغ الكهربائي؛ فإذا حلّلنا هذا الإشعاع، فإننا نحصل على طيف يسمى طيف الانبعاث الخطي (Emission Line Spectrum) ، يظهر على هيئة خطوط ملونة منفصلة على خلفية سوداء، كما في الشكل (٧-١٥/أ).



الشكل (٧-١٥): الطيف الخطي.

ويمكن الحصول على طيف خطي بعد مرور إشعاع متصل مثل الإشعاع الصادر عن الشمس عبر غاز عنصر منخفض الضغط ثم تحليله، لنحصل على طيف يظهر على هيئة خطوط سوداء تتخلّل الطيف المتصل للضوء، في المناطق التي تقابل خطوط طيف الانبعاث للغاز نفسه، ويسمى هذا الطيف عندئذ طيف الامتصاص الخطي (Absorption Line Spectrum)، انظر الشكل (٧-١٥/ب). وهذا يعني أن الطيف الخطي (الانبعاث أو الامتصاص) يظهر عند أطوال موجية محددة تختلف باختلاف العنصر، إذ يعدّ الطيف الخطي صفة مميزة لغاز العنصر، فلا يوجد غازان لهما الطيف الخطي نفسه.

ولم يستطع العلماء باستخدام قوانين الفيزياء الكلاسيكية تفسير الأطياف الخطية للغازات، وفي العام (١٩١٣)م اقترح العالم الدنماركي بور (Bohr) نموذجًا للذرة عالج فيه الطيف الذري للهيدروجين، ولا بد لنا من تعرف طيف ذرة الهيدروجين، قبل دراستنا هذا النموذج.

(٧-٤-١) طيف ذرة الهيدروجين (Spectrum of Hydrogen Atom)

إن أبسط الأطياف الذرية دراسة وتحليلًا هو طيف ذرة الهيدروجين؛ ذلك أن ذرة الهيدروجين هي أبسط الذرات؛ لاحتوائها على بروتون واحد وإلكترون واحد، ويظهر طيف ذرة الهيدروجين على هيئة تجمعات عدة من الخطوط الطيفية التي يمكن حساب أطوالها الموجية باستخدام متسلسلات حسابية أشهرها خمس سميت بأسماء مكتشفيها، وهي:

- متسلسلة ليمان (Lyman)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الضوء فوق البنفسجي:

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left(\frac{١}{٢^{١}} - \frac{١}{\text{ن}^{٢}} \right)، \text{ن} = ٢، ٣، ٤، \ldots \quad (٧-٧)$$

- متسلسلة بالمر (Balmer)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الضوء المرئي:

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left(\frac{١}{٢^{٢}} - \frac{١}{\text{ن}^{٢}} \right)، \text{ن} = ٣، ٤، ٥، \ldots \quad (٧-٨)$$

- متسلسلة باشن (Paschen)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة تحت الحمراء:

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left(\frac{١}{٢^{٣}} - \frac{١}{\text{ن}^{٢}} \right)، \text{ن} = ٤، ٥، ٦، \ldots \quad (٧-٩)$$

- متسلسلة براكت (Brackett)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة تحت الحمراء:

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left(\frac{١}{٢^{٤}} - \frac{١}{\text{ن}^{٢}} \right)، \text{ن} = ٥، ٦، ٧، \ldots \quad (٧-١٠)$$

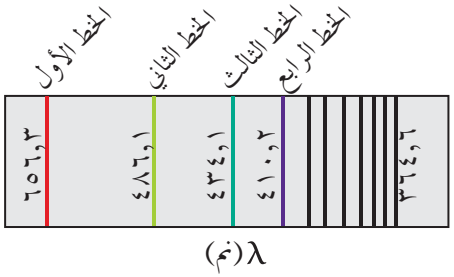
- متسلسلة فوند (Pfund)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة تحت الحمراء:

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left(\frac{١}{٢^{٥}} - \frac{١}{\text{ن}^{٢}} \right)، \text{ن} = ٦، ٧، ٨، \ldots \quad (٧-١١)$$

حيث (λ): طول موجة الخط الطيفي، و(R_H): ثابت فيزيائي يطلق عليه اسم ثابت ريدبيرغ، ويساوي ($١,٠٩٧ \times ١٠^{٧}$) م$^{-١}$، و(ن): عدد صحيح موجب.

يوضح الشكل (٧-١٦) مجموعة الخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين التي تقع أطوالها الموجية في منطقة الطيف المرئي، وكان أول من لاحظ النمطية في الأطوال الموجية لهذه الخطوط هو معلم

الرياضيات السويسري بالمر في عام (١٨٨٥)م. عند تعويض (ن = ٣) في متسلسلة بالمر نحصل على طول موجة الخط الأول فيها، وعند تعويض (ن = ٤) نحصل على طول موجة الخط الثاني، وهكذا، ويظهر في الشكل أن الأطوال الموجية لهذه الخطوط تقل بالانتقال من الخط الطيفي الأول إلى الثاني إلى الثالث،...، فأكبرها طولًا موجيًّا هو الخط الأول، وأقصرها الخط الأخير (ن = ∞).



الشكل (٧-١٦): متسلسلة بالمر لخطوط طيف ذرة الهيدروجين.

مثال (٧-٧)

احسب طول موجة الخط الطيفي الثالث في متسلسلة بالمر.

الحل:

نحصل على طول موجة الخط الطيفي الثالث بتعويض (ن = ٥) في العلاقة:

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left(\frac{١}{٢^{ن}} - \frac{١}{٢^{٢}}\right)$$

$$\frac{١}{\lambda} = ١,٠٩٧ \times ١٠^{٧} \times \left(\frac{١}{٢^{٢}} - \frac{١}{٢^{٥}}\right) = ٠,٢٣٠٣٧ \times ١٠^{٧}$$

$$\lambda = ٤,٣٤١ \times ١٠^{-٧} \text{ م} = ٤٣٤,١ \text{ نم}$$، وهو مطابق للرقم الموجود في الشكل (٧-١٦).

مثال (٧-٨)

احسب أقصر طول موجي في متسلسلة براكت.

الحل:

نحصل على أقصر طول موجي في أي من المتسلسلات عندما نعوض (ن= ∞) وباستخدام العلاقة:

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left(\frac{١}{٢^{ن}} - \frac{١}{٢^{٤}}\right)$$

$$= ١,٠٩٧ \times ١٠^{٧} \times \left(\frac{١}{٢^{٤}} - \frac{١}{٢^{\infty}}\right) = ٦,٨٦ \times ١٠^{٥}$$

$$\lambda = ١,٤٥٩ \times ١٠^{-٦} \text{م} = ١٤٥٩ \text{ نم}$$

(٧-٤-٢) نموذج بور لذرة الهيدروجين (Bohr's Model of the Hydrogen Atom)

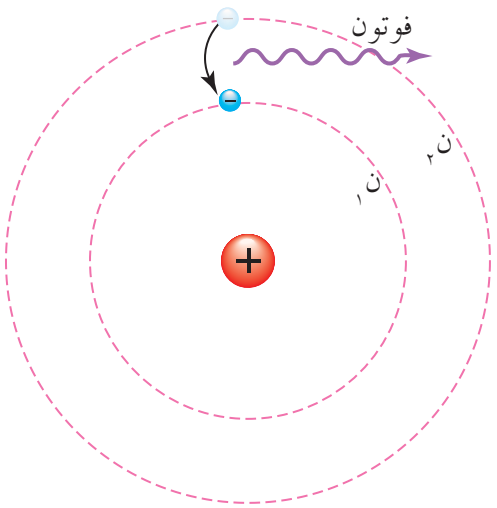
مهد بور الطريق لتفسير الأطياف الذرية، بوضعه نموذجًا لذرة الهيدروجين؛ لفهم طبيعة الذرة، وقد عدّ أينشتين هذا النموذج من أعظم الإنجازات العلمية في ذلك الوقت.

استفاد بور في بناء نموذجه لذرة الهيدروجين من نموذج رذرفورد الذري، واستفاد من مفهوم الزخم الزاوي، فمن المعروف أن للجسم المتحرك في خط مستقيم زخمًا خطيًّا، أما إذا تحرك الجسم حركة دائرية فيكون له زخم آخر يسمى زخمًا زاويًّا يعطى بالعلاقة ($خ_{زاوي} = ك\ ع\ نق$)، واستفاد بور من مفاهيم بلانك وأينشتين في تكمية الطاقة أيضًا؛ وبهذا ربط بور بين فيزياء الكم والفيزياء الكلاسيكية، ووضع نموذجًا لذرة الهيدروجين، يرتكز على أربعة فروض أساسية هي:

١ يتحرك الإلكترون حول النواة في مدار دائري بتأثير قوة التجاذب الكهربائية بين الإلكترون السالب، والنواة الموجبة.

٢ يوجد الإلكترون في مدارات محددة، كل مدار له مقدار محدد من الطاقة يختلف عن غيره من المدارات، وتسمى هذه المدارات "مستويات الطاقة"، ولا يمكن للذرة أن تشع أو تمتص طاقة طالما بقي الإلكترون في مستوى طاقة معين (في مدار محدد).

٣ ينبعث الإشعاع من الذرة عندما ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة عال إلى مستوى طاقة منخفض، وتكون الطاقة الإشعاعية المنبعثة مكمّاة على شكل فوتون طاقته تساوي فرق الطاقة بين المستويين اللذين انتقل بينهما، انظر الشكل (٧-١٧)، ولا ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة منخفض إلى مستوى طاقة عال إلا إذا امتصّ فوتونًا طاقته تساوي فرق الطاقة بين المستويين. ويمكن حساب طاقة الفوتون المنبعث أو الممتص من العلاقة الرياضية الآتية:



الشكل (٧-١٧): انبعاث فوتون من ذرة الهيدروجين نتيجة انتقال إلكترونها من مستوى طاقة عال إلى آخر منخفض.

$$ط_{\text{الفوتون}} = هـ ت_د = |ط - ط_ن| \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-١٢)$$

حيث (ط$_ن$): طاقة المستوى الابتدائي الموجود فيه الإلكترون، و(ط): طاقة المستوى النهائي الذي ينتقل إليه الإلكترون، و(هـ ت$_د$): طاقة الفوتون المنبعث أو الممتص.

٤ المدارات المسموح للإلكترون أن يوجد فيها هي التي يكون زخمه الزاوي فيها من مضاعفات المقدار ($\frac{هـ}{\pi ٢}$) أي أن:

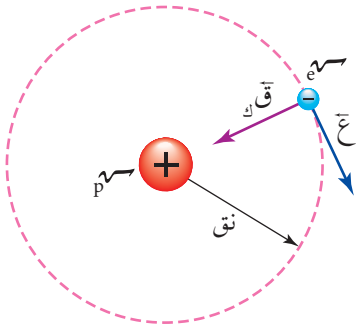
$$خ_{\text{زاوي}} = ن \frac{هـ}{\pi ٢}$$

$$ك ع نق = ن \frac{هـ}{\pi ٢} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-١٣)$$

حيث (ك): كتلة الإلكترون، و(ع): سرعة الإلكترون، و(نق): نصف قطر المدار الذي يوجد فيه الإلكترون، و(ن): رقم المدار (ن= ١، ٢، ٣، ...)، أي أن زخم الإلكترون الزاوي له كمات محددة. وبناءً على هذه الفروض تمكّن بور من تحديد أنصاف أقطار مدارات ذرة الهيدروجين وطاقتها.

أوّلًا: حساب أنصاف أقطار المدارات المسموح للإلكترون الوجود فيها

يشير الفرض الأول لبور إلى أن الإلكترون يدور حول النواة في مدار دائري، كما في الشكل (٧-١٨)، لذا فهو يخضع لقوة مركزية (ق$_م$) هي قوة التجاذب الكهربائية (ق$_ك$) المؤثرة في الإلكترون من النواة.



الشكل (٧-١٨): مدار الإلكترون حول نواة الهيدروجين وفقًا لنموذج بور.

وفق القانون الثاني لنيوتن فإن:

$$ق_م = \frac{ك ع^٢}{نق} = ق_ك$$

ووفق قانون كولوم فإن: $ق_ك = \frac{أ_p \, أ_e}{نق^٢}$

وبما أن شحنة البروتون تساوي شحنة الإلكترون فإن:

$$\frac{ك ع^٢}{نق} = \frac{أ_e^٢}{نق^٢} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-١٤)$$

ومن الفرض الرابع لبور نجد أن: $ع = \frac{ن\ هـ}{٢\pi\ ك\ نق}$

وبتعويض (ع) في العلاقة (٧–١٤) نتوصل إلى أن:

$$ك\left(\frac{ن^{٢}\ هـ^{٢}}{٤\ \pi^{٢}\ ك^{٢}\ نق^{٢}}\right) = \frac{أ\ شـ_{e}^{٢}}{نق}$$

وبإعادة ترتيب الكميات نتوصل إلى أن: $نق = \left(\frac{هـ^{٢}}{٤\ \pi^{٢}\ ك\ أ\ شـ_{e}^{٢}}\right) ن^{٢}$

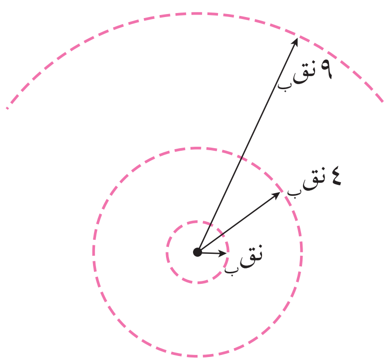
لاحظ أن الكميات بين القوسين جميعها مقادير ثابتة، وبتعويض قيمها تصبح العلاقة السابقة على الصورة: $نق = (٥{,}٢٩ \times ١٠^{-١١})\ ن^{٢}$

فيكون نصف قطر المدار الأول للإلكترون عندما (ن = ١): $نق_{١} = ٥{,}٢٩ \times ١٠^{-١١}$م.

ويسمى نصف قطر بور ($نق_{ب}$)، وعليه يمكن حساب نصف قطر المدار ذو الرقم (ن) وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$نق_{ن} = نق_{ب}\ ن^{٢} \quad \text{.......... (٧–١٥)}$$

ويوضح الشكل (٧–١٩) أنصاف أقطار المدارات الثلاثة الأولى لذرة الهيدروجين.



الشكل (٧–١٩): المدارات الثلاثة الأولى المسموح للإلكترون الوجود فيها.

مثال (٧–٩)

احسب نصف قطر المدار الثالث في ذرة الهيدروجين.

الحل:

للمدار الثالث (ن = ٣):

$نق_{ن} = نق_{ب}\ ن^{٢}$

$نق_{٣} = ٥{,}٢٩ \times ١٠^{-١١} \times ٣^{٢} = ٤{,}٧٦ \times ١٠^{-١٠}$ م

ثانيًا: حساب طاقة المستويات المسموح بها في ذرة الهيدروجين

يمتلك نظام (إلكترون – بروتون) في ذرة الهيدروجين طاقة وضع كهربائية، كما مر معك في فصل الجهد الكهربائي (راجع المثال (٢–٥))، تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\text{ط}_\text{و} = -\frac{\text{أ}\,\text{هـ}_e^{\,2}}{\text{نق}}$$

ويمتلك الإلكترون نتيجة دورانه حول النواة من الفرض الأول لبور طاقة حركية يحسب مقدارها من العلاقة:

$$\text{ط}_\text{ح} = \frac{1}{2}\,\text{ك}\,\text{ع}^2$$ ، لذا تصبح الطاقة الميكانيكية الكلية للنظام:

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

$$= \frac{1}{2}\,\text{ك}\,\text{ع}^2 - \frac{\text{أ}\,\text{هـ}_e^{\,2}}{\text{نق}}$$

وبالرجوع إلى العلاقة (٧–١٤) يمكن كتابة الطاقة الحركية على الصورة:

$$\text{ط}_\text{ح} = \frac{1}{2}\,\text{ك}\,\text{ع}^2 = \frac{1}{2}\,\frac{\text{أ}\,\text{هـ}_e^{\,2}}{\text{نق}}$$

وبتعويض هذه العلاقة في معادلة الطاقة الميكانيكية الكلية نجد أن:

$$\text{ط}_\text{م} = \frac{1}{2}\,\frac{\text{أ}\,\text{هـ}_e^{\,2}}{\text{نق}} - \frac{\text{أ}\,\text{هـ}_e^{\,2}}{\text{نق}}$$

$$= -\frac{1}{2}\,\frac{\text{أ}\,\text{هـ}_e^{\,2}}{\text{نق}}$$

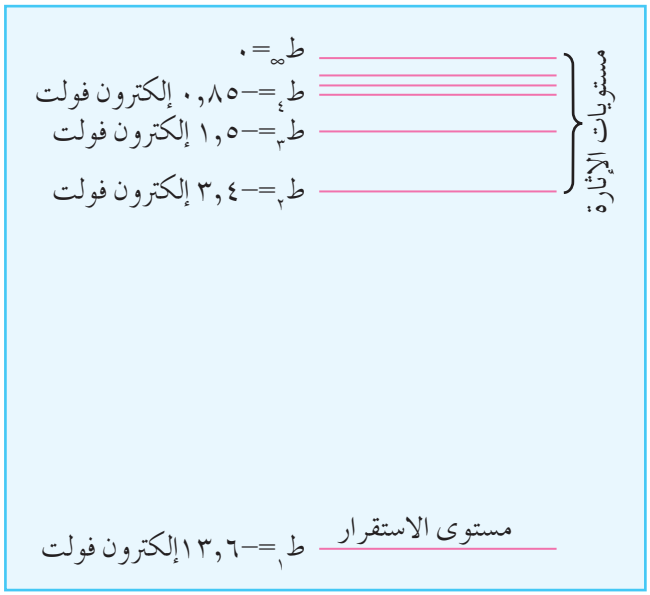
وبتعويض (نق) من العلاقة (٧–١٥) نجد أن:

$$\text{ط}_\text{م} = -\frac{\text{أ}\,\text{هـ}_e^{\,2}}{2\,\text{نق}_\text{ب}\,\text{ن}^2}$$

وبتعويض قيم الثوابت (أ، هـe، نقب) وقسمة الناتج على(١,٦ × ١٠$^{-١٩}$)، نحسب الطاقة الميكانيكية الكلية لأي مستوى في ذرة الهيدروجين بوحدة الإلكترون فولت، وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ط}_\text{ن} = \frac{-١٣,٦}{\text{ن}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧–١٦)$$

حيث (ن): رقم مستوى الطاقة (المدار) الذي يمكن أن يوجد فيه الإلكترون، والإشارة السالبة تعني أنه يجب تزويد الإلكترون بكمية من الطاقة تساوي طاقة المدار الذي يوجد فيه ليتحرر من الذرة من غير إكسابه طاقة حركية، وطاقة التحرر هذه تسمى **طاقة التأين**. فعندما (ن = ١) يكون الإلكترون في مستوى الطاقة الأول ($ط_{١} = -١٣,٦$) إلكترون فولت، وهو أدنى مستوى طاقة لذرة الهيدروجين، ويسمى **مستوى الاستقرار**. وتسمى مستويات الطاقة التي تعلو مستوى الاستقرار **مستويات الإثارة**، وهي المستويات التي ينتقل إليها الإلكترون إذا امتص مقدارًا محددًا من الطاقة. ويبين الشكل (٧-٢٠) رسمًا تخطيطيًّا لمستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين، وتكون الذرة غير مستقرة إذا كانت في حالة إثارة، ولكي تصل إلى حالة الاستقرار على الإلكترون أن يعود من مستوى الإثارة إلى مستوى الاستقرار. وقد تكون عودة الإلكترون مرة واحدة أو على مراحل، وفي كل مرة ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة أدنى منه يبعث فوتونًا طاقته تساوي فرق الطاقة بين هذين المستويين، وتظهر الفوتونات المنبعثة من الانتقالات المختلفة بعد تحليلها بالمطياف على هيئة خطوط تقع ضمن طيف الانبعاث الخطي لذرة الهيدروجين.



الشكل (٧-٢٠): رسم تخطيطي لمستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين.

مثال (٧-١٠)

مستعينًا بالشكل (٧-٢٠)، أجب عما يأتي:

١ ما أقل طاقة تلزم لتحرير إلكترون ذرة الهيدروجين عندما يكون في مستوى الاستقرار؟

٢ احسب طاقة الفوتون اللازمة لنقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الاستقرار إلى المستوى الرابع.

الحل:

١ بما أن الإلكترون يوجد في مستوى الطاقة الأول (مستوى الاستقرار)، فإنه يلزم تزويده

بكمية من الطاقة تساوي طاقة التأين ليتحرر من ذرة الهيدروجين، لذا يلزمه طاقة مقدارها ١٣,٦ إلكترون فولت ليتحرر من الذرة.

٢) $ن_{ا} = ١$ ، $ن = ٤$

يحسب فرق الطاقة بين مستويي الطاقة الأول والرابع من العلاقة:

$$ط_{الفوتون} = |ط - ط_{ا}|$$

ومن الشكل نجد أن:

$$ط_{الفوتون} = |-٠,٨٥ - (-١٣,٦)| = ١٢,٧٥ \text{ إلكترون فولت.}$$

مثال (٧-١١)

إلكترون ذرة هيدروجين في المستوى الأول، امتص فوتونًا فانتقل إلى مستوى الطاقة الثالث. مستعينًا بالشكل (٧-٢٠)، احسب ما يأتي:

١) طاقة الفوتون الممتص.

٢) إذا عاد الإلكترون إلى المستوى الأول، فاحسب قيم الطاقة للفوتونات التي يمكن أن تنبعث من الذرة.

الحل:

١) $ن_{ا} = ١$ ، $ن = ٣$

نحسب طاقة الفوتون الممتص من العلاقة:

$$ط_{الفوتون} = هـ ت_{د} = |ط_{٣} - ط_{١}|$$

$$= |-١,٥ - (-١٣,٦)| = ١٢,١ \text{ إلكترون فولت.}$$

٢) يمكن للإلكترون أن يعود من المستوى الثالث إلى المستوى الأول مباشرة باعثًا فوتونًا طاقته تساوي طاقة الفوتون الممتص، أي (١٢,١) إلكترون فولت، أو أن يعود على مرحلتين: من المستوى الثالث إلى المستوى الثاني باعثًا فوتونًا طاقته ($هـ ت_{د١}$)، ثم من المستوى الثاني إلى المستوى الأول باعثًا فوتونًا آخر طاقته ($هـ ت_{د٢}$)، حيث:

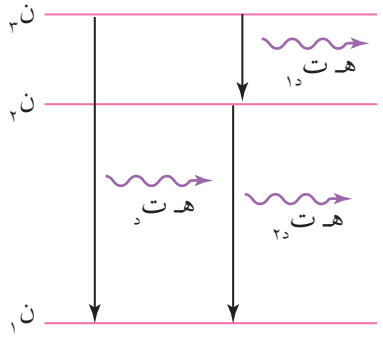
هـ ت$_{د_1}$ = | ط$_3$ − ط$_2$ |

= | −١,٥ − (−٣,٤) | = ١,٩ إلكترون فولت.

هـ ت$_{د_2}$ = | ط$_2$ − ط$_1$ |

= | −٣,٤ − (−١٣,٦) | = ١٠,٢ إلكترون فولت.

لاحظ أن مجموع طاقتي الفوتونين المنبعثين من عودة الإلكترون إلى المستوى الأول على مرحلتين يساوي طاقة الفوتون المنبعث من عودة الإلكترون مباشرة من المستوى الثالث إلى المستوى الأول. انظر الشكل (٧−٢١).



الشكل (٧−٢١): مثال (٧−١١).

ثالثًا: نموذج بور ومتسلسلات طيف ذرة الهيدروجين

تعلمت مما سبق أن تحدد أنصاف أقطار المدارات المسموح لإلكترون ذرة الهيدروجين الوجود فيها من العلاقة (٧−١٥)، وأن تحسب طاقة المدارات في ذرة الهيدروجين عند وجود الإلكترون في أي من تلك المدارات من العلاقة (٧−١٦)، وقد اشتُقَّت هاتان العلاقتان من قوانين الفيزياء الكلاسيكية بناء على الفروض النظرية لبور، لذا فالقيم التي نحصل عليها منهما هي قيم نظرية. وحتى يكون نموذج بور مقبولًا، يجب أن يتنبأ بالقيم التجريبية للأطوال الموجية للخطوط الطيفية في متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين الواردة سابقًا.

من الفرض الثالث لبور نجد أن طاقة الفوتون الممتص أو المنبعث تعطى بالعلاقة:

$$ط_{\text{فوتون}} = \text{هـ ت}_{د} = |ط - ط_{\circ}|$$

وبتعويض الطاقة من العلاقة (٧−١٦) بعد تحويلها إلى وحدة الجول، وتعويض ($\text{ت}_{د} = \frac{\text{س}}{\lambda}$)، نجد أن:

$$\frac{\text{س هـ}}{\lambda} = ١٣,٦ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩} \left| \frac{١}{\text{ن}_{\circ}^{٢}} - \frac{١}{\text{ن}^{٢}} \right|$$

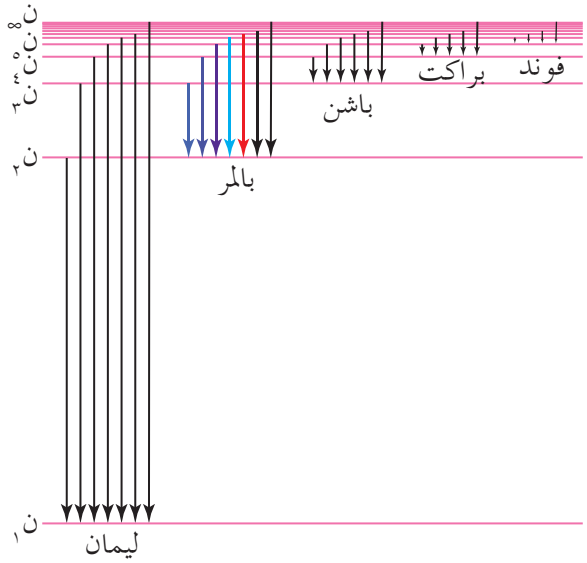
وبتعويض قيم (هـ، س) وقسمة الطرفين عليهما، نجد أن:

$$\frac{١}{\lambda} = ١,٠٩٧ \times ١٠^{٧} \left| \frac{١}{\text{ن}_{\circ}^{٢}} - \frac{١}{\text{ن}^{٢}} \right|$$

لاحظ أن (١,٠٩٧ × ١٠^{٧}) م$^{-١}$ يساوي ثابت ريدبيرغ (R_H)، وهي القيمة التجريبية التي تم التوصل إليها من متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين، لذا يمكن حساب الأطوال الموجية للخطوط الطيفية لطيف ذرة الهيدروجين من العلاقة الآتية :

$$\frac{١}{\lambda} = R_H \left| \frac{١}{ن_٢^٢} - \frac{١}{ن_٢^٢} \right| \quad \text{.....} \quad (٧-١٧)$$

وبتعويض ن= ١، ٢، ...، ∞ في العلاقة السابقة، نحصل على متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين، ابتداء من متسلسلة ليمان عندما (ن = ١) وانتهاء بمتسلسلة فوند عندما (ن = ∞)، والموضحة في الشكل (٧-٢٢). وهذا يعني أن الفروض النظرية لبور قد اتفقت مع النتائج التجريبية لطيف ذرة الهيدروجين، فالمتسلسلات جميعها التي رُصِدت لذرة الهيدروجين يمكن التوصل إليها من العلاقة (٧-١٧)، علاوة على التوصل إلى ثابت ريدبيرغ؛ ما أعطى نموذج بور قوة وقبولًا في الوسط العلمي.



الشكل (٧-٢٢): متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين.

مثال (٧-١٢)

انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الأول. احسب:

١ طاقة الفوتون المنبعث.

٢ تردد الفوتون المنبعث.

٣ طول موجة الفوتون المنبعث.

الحل:

ن$_{ه}$ = ٢ ، ن = ١

١ نحسب أوّلًا طاقة المستوى الأول وطاقة المستوى الثاني في ذرة الهيدروجين بتطبيق العلاقة:

$$ط_ن = \frac{-١٣,٦}{ن^٢}$$

$$ط_١ = \frac{-١٣,٦}{١^٢} = -١٣,٦ \text{ إلكترون فولت.}$$

$ط_{٢} = \frac{-١٣,٦}{٢^{٢}} = -٣,٤$ إلكترون فولت.

ولحساب طاقة الفوتون المنبعث نطبق العلاقة:

$ط_{\text{الفوتون}} = |ط_{١} - ط_{٢}|$

$= |-١٣,٦ - (-٣,٤)| = ١٠,٢$ إلكترون فولت.

٢ لحساب التردد نحتاج إلى طاقة الفوتون بوحدة الجول كما يأتي:

$ط_{\text{الفوتون}} = ١٠,٢ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩} = ١,٦٣ \times ١٠^{-١٨}$ جول.

$ط_{\text{الفوتون}} = هـ ت_{د}$

$١,٦٣ \times ١٠^{-١٨} = ٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ت_{د} \Leftarrow ت_{د} = ٢,٤٦ \times ١٠^{١٥}$ هيرتز.

٣ $\left|\frac{١}{ن_{٠}^{٢}} - \frac{١}{ن^{٢}}\right| R_H = \frac{١}{\lambda}$

$= ١,٠٩٧ \times ١٠^{٧} \left|\frac{١}{٢^{٢}} - \frac{١}{١^{٢}}\right| = ١,٠٩٧ \times ١٠^{٧} \times \frac{٣}{٤}$

$= ٨,٢٣ \times ١٠^{٦}$

$\lambda = ١,٢٢ \times ١٠^{-٧}$ م $= ١٢٢$ نم

أو $\lambda = \frac{س}{ت_{د}} = \frac{٣ \times ١٠^{٨}}{٢,٤٦ \times ١٠^{١٥}} \Leftarrow \lambda = ١,٢٢ \times ١٠^{-٧}$ م $= ١٢٢$ نم

مراجعة (٧-٤)

١ هل يمكن لذرة الهيدروجين أن تبعث فوتونًا طاقته (١٥) إلكترون فولت؟ فسر إجابتك.

٢ أي المدارات الممكنة لذرة الهيدروجين تكون فيه سرعة الإلكترون أكبر ما يمكن؟ وضح إجابتك.

٣ بماذا يتفق نموذج بور مع مبدأ بلانك في تكمية الطاقة؟

٤ إلى أي متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين ينتمي الخط الطيفي ذو الطول الموجي الأقصر؟

٥ ما الفرق بين طاقة التأين وطاقة الإثارة؟

٧–٥ الطبيعة المزدوجة للإشعاع والمادة

Duality Nature of Radiation and Matter

تبين من تفسير أينشتين للظاهرة الكهرضوئية أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات المادية (فوتونات)، وأثبت كومتون بالتجربة أن للفوتون زخمًا خطيًّا كما الجسيمات المادية. واستند بور في بناء نموذجه الذري، إلى أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات لتفسير الأطياف الذرية.

لكن في المقابل، توجد ظواهر لا يمكن معالجتها بافتراض الطبيعة الجسيمية للضوء؛ فظاهرتا التداخل والحيود مثلًا، تحدثان للموجات فقط، وهما من الخصائص المعروفة للضوء، والفوتون له خواصُّ موجية مثل التردد والطول الموجي، بالإضافة إلى خواصَّ جسيمية. هذا التباين في سلوك الضوء جعل العلماء يفترضون **أن للضوء طبيعة مزدوجة (موجية– جسيمية** (Wave–Particle Duality of Light)، وكلتاهما ملازمتان للضوء، إلا أن الضوء يسلك في حالات معينة سلوك الجسيمات، وفي حالات أخرى سلوك الموجات.

في عام (١٩٢٣)م قدم لويس دي بروي (Louis de Broglie) في أطروحته للدكتوراه فرضية نصها "**بما أن للفوتونات خواصَّ موجية وجسيمية، فمن المحتمل أن يكون لأشكال المادة جميعها خواص موجية كما لها خواص جسيمية**". وتشير هذه الفرضية إلى أن الأجسام جميعها يصاحبها موجات في أثناء حركتها، تسمى موجات المادة أو موجات دي بروي، وهي ليست موجات كهرمغناطيسية كموجات الضوء مثلًا، ولا موجات ميكانيكية كموجات الصوت، إنما لها خواص ترتبط بخواص الجسم الذي تلازمه في الحركة وهذا يعني وفق فرضية دي بروي **أن الأجسام المادية لها طبيعة مزدوجة (جسيمية– موجية)** (Particle–Wave Duality of Matter). ووفقًا للعلاقة التي حددها أينشتين للزخم الخطي للفوتون ($خ = \frac{هـ}{\lambda}$)، افترض دي بروي أن طول الموجة المصاحبة لحركة الجسم تتناسب عكسيًّا مع زخمه الخطي، أي أن: ($\lambda = \frac{هـ}{خ}$)، وبما أن زخم الجسم الخطي ($خ = ك\ ع$)، فإن:

$$\lambda = \frac{هـ}{ك\ ع} \quad \text{......} \quad (٧–١٨)$$

حيث (λ): طول الموجة المصاحبة لحركة الجسم (أو طول موجة دي بروي)، و(ك): كتلة الجسم، و(ع): سرعة الجسم.

مثال (٧-١٣)

احسب طول موجة دي بروي المصاحبة لكل مما يأتي:

١ رصاصة كتلتها (١٠) غ تتحرك بسرعة (٤٠٠) م/ث.

٢ إلكترون طاقته الحركية (٢) إلكترون فولت، علمًا بأن كتلته ($٩,١١ \times ١٠^{-٣١}$) كغ.

الحل:

١ نحسب طول موجة دي بروي من العلاقة:

$$\lambda = \frac{هـ}{ك\ ع}$$

$$= \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}{١٠ \times ١٠^{-٣} \times ٤٠٠} = ١,٦٦ \times ١٠^{-٣٤}\ م$$

٢ نحسب سرعة الإلكترون أوّلًا من العلاقة: $ط_ح = \frac{١}{٢}$ ك $ع^٢$

$$ع^٢ = \frac{٢ ط_ح}{ك}$$

$$ع^٢ = \frac{٢ \times ٢ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩}}{٩,١١ \times ١٠^{-٣١}} = ٧,٠٣ \times ١٠^{١١}$$

(لاحظ أننا حولنا الطاقة الحركية للإلكترون إلى وحدة الجول)

$$ع = ٨,٤ \times ١٠^{٥}\ م/ث$$

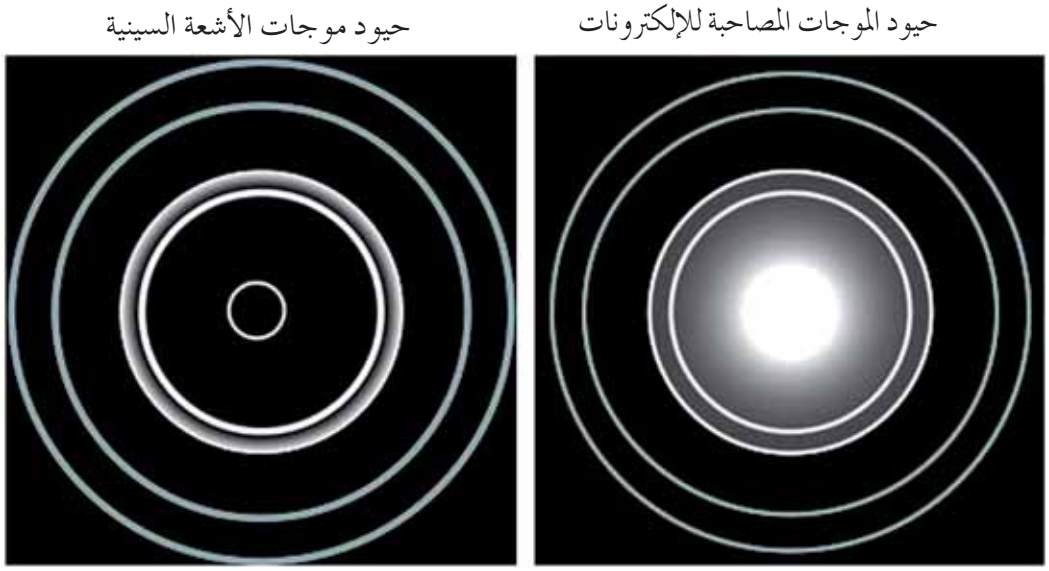
$$\lambda = \frac{هـ}{ك\ ع} = \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}{٩,١١ \times ١٠^{-٣١} \times ٨,٤ \times ١٠^{٥}}$$

$$= ٨,٧ \times ١٠^{-١٠}\ م = ٠,٨٧\ نم.$$

لاحظ أن الطول الموجي المصاحب للرصاصة صغير جدًّا وأصغر بكثير من أبعاد الرصاصة، لذا لا تظهر موجات المادة في حالة الأجسام الكبيرة (الجاهرية) (macroscopic)، و لم يتمكن العلماء من قياس الطول الموجي لها حتى الآن، في حين أن الطول الموجي المصاحب للإلكترون من رتبة الأطوال الموجية للموجات الكهرمغناطيسية، وأمكن قياسه عمليًّا. وتظهر هذه الموجات في حالة الدقائق الصغيرة (microscopic)، من إلكترونات، وبروتونات، ونيوترونات، ... وغيرها.

بعد ثلاث سنوات فقط من فرضية دي بروي أثبت دافسون (Davisson) وجيرمر (Germer)

بتجربتهما الشهيرة صحة فرضية دي بروي، حيث أثبتا أن للإلكترونات طبيعة موجية، وذلك عندما أسقطا حزمة من الإلكترونات على بلورة من النيكل، فلاحظا تشكل نمط من الحيود يشبه حيود الأشعة السينية. ويظهر الشكل (٧-٢٣) حيود كل من الموجات المصاحبة للإلكترونات وموجات الأشعة السينية ذات الطول الموجي نفسه عند سقوطها على رقيقة من الألمنيوم.



الشكل (٧-٢٣): حيود الموجات المصاحبة للإلكترونات مقارنة بحيود موجات الأشعة السينية.

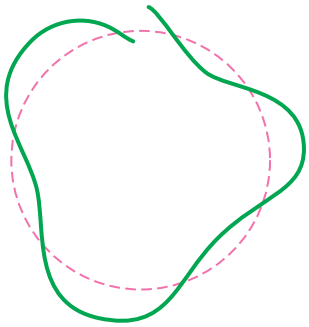
وعند حساب الطول الموجي للموجات المصاحبة للإلكترونات تجريبيًّا تبين أنه يتفق مع فرضية دي بروي العلاقة (٧-١٨)، ما يؤكد الطبيعة الموجية للأجسام المادية، ثم توالت التجارب التي أجريت في ما بعد بإسقاط حزم من جسيمات أخرى مثل: بروتونات، ونيوترونات، على بلورات من مواد مختلفة، فتم الحصول على أنماط للحيود، تؤكد الطبيعة الموجية للمادة.

اقترح دي بروي تطبيق فرضيته على ذرة الهيدروجين وقدم فكرة لتفسير وجود الإلكترون على أبعاد محددة من النواة، وذلك بأن الإلكترون في أثناء دورانه حول النواة في مدار ما يصاحبه موجات مادية، ويجب أن يكون طول محيط المدار (٢π نق) مساويًا أعدادًا صحيحة من الطول الموجي المصاحب له، أي أن: طول محيط المدار = ن λ

$$٢\pi نق_{ن} = ن \lambda \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٧-١٩)$$

وعلّل ذلك بأنه ضروري لحدوث تداخل بنّاء بين الموجات المصاحبة للإلكترون، وحيث إن

الطول الموجي المصاحب للإلكترون يتناسب عكسيًّا مع سرعته وفق العلاقة (٧–١٨) فإنه يجب أن تكون سرعة الإلكترون محددة، وإلا حدث تداخل هدام لهذه الموجات بحيث تلغي الموجات المصاحبة للإلكترون بعضها بعضًا، ويتلاشى المدار تبعًا لذلك، كما يظهر في الشكل (٧–٢٤).



الشكل (٧–٢٤): تداخل هدام.

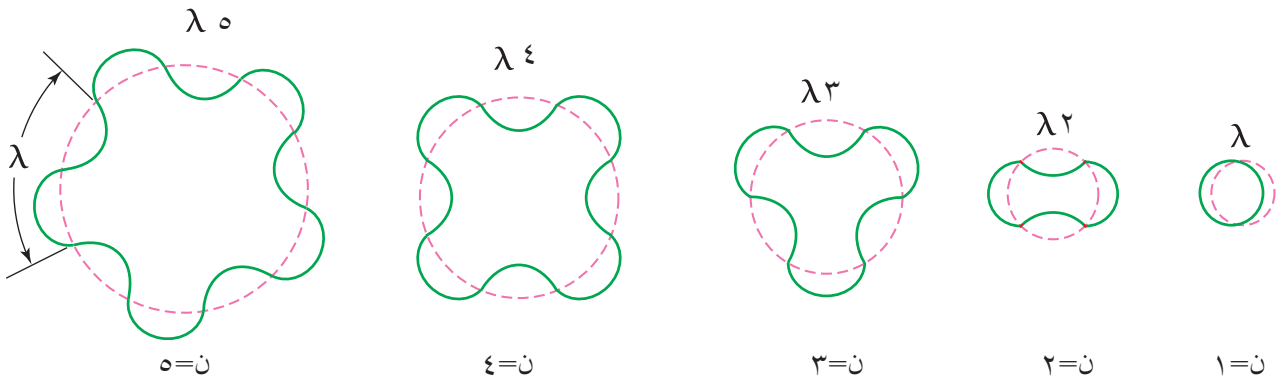
وبتعويض $\left(\lambda = \frac{هـ}{ك\ ع}\right)$ في العلاقة (٧–١٩)، نجد أن:

$$\pi ٢\ نق = \frac{ن\ هـ}{ك\ ع}$$

وبإعادة ترتيب الكميات نتوصل إلى أن:

$$ك\ ع\ نق = \frac{ن\ هـ}{\pi ٢}$$

وتمثل هذه العلاقة الفرض الرابع لبور الذي حدد فيه الزخم الزاوي للإلكترون، أي أنه يوجد توافق بين فرض بور وموجات الإلكترون لدي بروي، ويوضح الشكل (٧–٢٥) العلاقة بين عدد موجات الإلكترون لدي بروي والمدارات المسموح للإلكترون الوجود فيها في ذرة الهيدروجين.



الشكل (٧–٢٥): العلاقة بين عدد موجات دي بروي والمدارات المسموح للإلكترون الوجود فيها في ذرة الهيدروجين.

مثال (٧-١٤)

إلكترون في المدار الأول لذرة الهيدروجين، احسب:

١ طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون.

٢ سرعة الإلكترون في هذا المدار.

الحل:

١ ن = ١ ، نق$_{١}$ = نق$_{ب}$ = ٥,٢٩ × ١٠$^{-١١}$ م

يمكن حساب طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون من العلاقة:

$\pi ٢$ نق$_{ن}$ = ن λ

$\lambda = ٢ \times ٣,١٤ \times ٥,٢٩ \times ١٠^{-١١} = ٣٣,٢ \times ١٠^{-١١}$ م

٢ ولحساب سرعة الإلكترون نستخدم العلاقة:

$$\lambda = \frac{هـ}{ك\ ع}$$

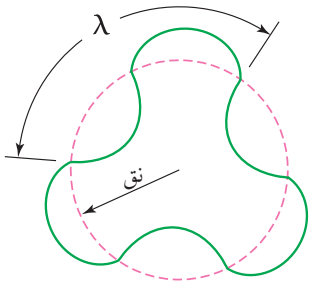
$$٣٣,٢ \times ١٠^{-١١} = \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}{٩,١١ \times ١٠^{-٣١} ع} \Leftarrow ع = ٢,٢ \times ١٠^{٦}\ م/ث.$$

مثال (٧-١٥)

يمثل الشكل (٧-٢٦) موجة مصاحبة لإلكترون ذرة الهيدروجين في أحد المدارات. فإذا كان طولها الموجي (٩,٩٧ × ١٠$^{-١٠}$) م، ومستعينًا بالشكل أجب عما يأتي:

١ ما رقم المدار الموجود فيه الإلكترون؟

٢ احسب نصف قطر هذا المدار.



الشكل (٧-٢٦): مثال (٧-١٥).

الحل:

١ يظهر من الشكل أن عدد الموجات المصاحبة للإلكترون ثلاث موجات، أي أن (ن = ٣).

٢ نجد نصف قطر المدار من العلاقة:

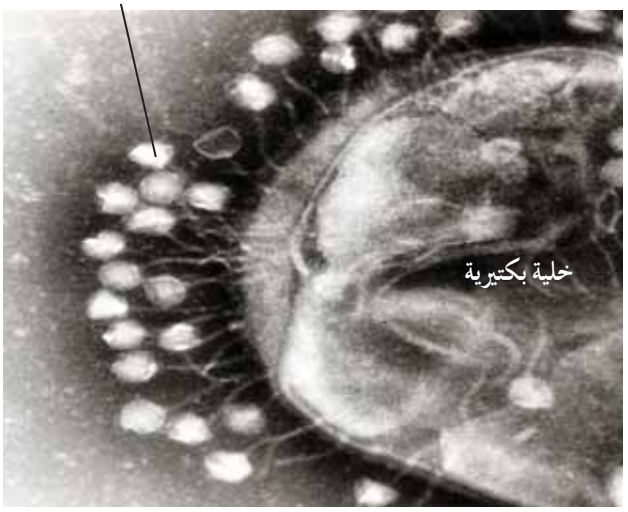
نق$_{ن}$ = نق$_{ب}$ ن^{٢}

نق$_{٣}$ = ٥,٢٩ × ١٠$^{-١١}$ × ٩

نق$_{٣}$ = ٤,٧٦ × ١٠$^{-١٠}$ م

يعد المجهر الإلكتروني (The Electron Microscope) أحد التطبيقات العملية على الطبيعة الموجية للمادة، حيث يقوم مبدأ عمله على الموجات المصاحبة لإلكترونات تُسرّع عبر فرق جهد كهربائي، وتُسلّط على العينة المراد رؤية تفاصيلها. وتزداد قدرة المجهر بوجه عام على تمييز تفاصيل جسم ما بنقصان الطول الموجي للموجات المصاحبة للإلكترونات المستخدمة في المجهر، إذ يمكن رؤية تفاصيل الجسم التي تزيد أبعادها على الطول الموجي المستخدم، وحيث إن الطول الموجي المصاحب للإلكترونات يتناسب عكسيًّا مع سرعتها ($\lambda = \frac{هـ}{ك ع}$)، فإنه يمكن زيادة سرعة الإلكترونات باستخدام مصدر فرق جهد كهربائي، ومن ثم الحصول على أطوال موجية قصيرة جدًّا تناسب تفاصيل الجسم.

ويصل تكبير المجهر الإلكتروني الذي يسرّع الإلكترونات عبر فرق جهد (١٠٠) كيلو فولت إلى أكثر من مليون مرة، بقدرة على تمييز التفاصيل التي تزيد أبعادها على (٠,٢) نم. ويظهر الشكل (٧-٢٧) صورة من المجهر الإلكتروني تظهر فيها خلية بكتيرية تهاجمها مجموعة فيروسات آكلة بكتيريا، والصورة مكبرة (٢٥٠٠٠٠) مرة.



الشكل (٧-٢٧): فيروسات آكلة البكتيريا تهاجم خلية بكتيرية كما تظهر من خلال مجهر إلكتروني مكبرة (٢٥٠٠٠٠) مرة.

مراجعة (٧-٥)

١ وضح المقصود بالطبيعة المزدوجة للضوء؟ ما الذي دعا العلماء إلى افتراض هذه الطبيعة؟

٢ لماذا لا تظهر الطبيعة الموجية للمادة في حالة الأجسام الكبيرة (الجاهرية)؟

٣ كيف فسر دي بروي وجود الإلكترونات على أبعاد محددة من نواة ذرة الهيدروجين؟

٤ ما مبدأ عمل المجهر الإلكتروني؟ وعلام تعتمد قدرته على التمييز؟

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

١ تزداد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعثة في الخلية الكهرضوئية بزيادة:

أ شدة الضوء الساقط
ب تردد الضوء الساقط
جـ اقتران الشغل للفلز
د تردد العتبة للفلز

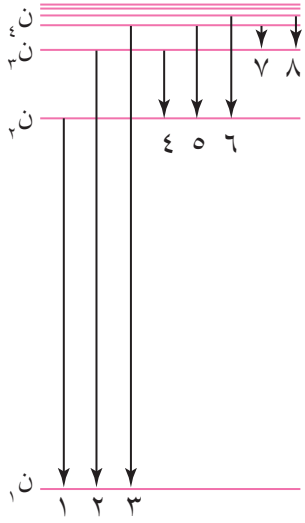
٢ عند اصطدام فوتون بإلكترون حر ساكن في ظاهرة كومتون، فإن الفوتون المتشتت يماثل الفوتون الساقط في مقدار:

أ سرعته
ب تردده
جـ زخمه الخطي
د طوله الموجي

٣ يعتمد مبدأ عمل المجهر الإلكتروني على:

أ التأثير الكهرضوئي
ب تأثير كومتون
جـ الطبيعة الموجية للمادة
د الطبيعة الجسيمية للإشعاع

يبين الشكل (٧-٢٨) بعضًا من خطوط طيف ذرة الهيدروجين. مستعينًا بالشكل أجب عن الفقرات (٤، ٥، ٦) الآتية.



الشكل (٧-٢٨): سؤال (١)، الفقرات (٤، ٥، ٦).

٤ إلى أي المتسلسلات الطيفية الآتية ينتمي الخطان الطيفيان (٧، ٨):

أ ليمان
ب باشن
جـ براكت
د فوند

٥ رقم الخط الطيفي ذي الطول الموجي الأقصر في متسلسلة بالمر هو:

أ ١
ب ٣
جـ ٤
د ٦

٦ رقم الخط الطيفي ذي التردد الأكبر في الخطوط جميعها هو:

أ ١
ب ٣
جـ ٧
د ٨

٢ إذا علمت أن طاقة المستويات في ذرة الهيدروجين تعطى بالعلاقة: $ط_{ن} = \frac{-١٣,٦}{ن^{٢}}$ إلكترون فولت. فأجب عما يأتي:

أ ما دلالة الإشارة السالبة في العلاقة؟

ب إلى ماذا يشير الرمز (ن) في العلاقة؟

جـ هل يمكن أن تكون طاقة أحد مستويات ذرة الهيدروجين مساوية (−١) إلكترون فولت؟ فسر إجابتك.

٣ سقط ضوء طول موجته (٤٢٠) نم على سطح من فلز الكالسيوم. إذا كان اقتران الشغل للكالسيوم يساوي (٢,٨٧) إلكترون فولت، فاحسب:

أ طاقة الفوتون الواحد للضوء الساقط بوحدة جول، ثم بوحدة إلكترون فولت.

ب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة من سطح الكالسيوم.

جـ جهد القطع.

د طول موجة العتبة للكالسيوم.

٤ عند سقوط ضوء طول موجته (٢٥٠) نم على مهبط خلية كهرضوئية، يمر تيار كهرضوئي فيها، إذا علمت أن هذا التيار انقطع عند فرق جهد عكسي مقداره (٢,٩٢) فولت. فجد ما يأتي:

أ الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بوحدة جول، ثم بوحدة إلكترون فولت.

ب اقتران الشغل للفلز الذي يتكون منه المهبط.

٥ إذا كان أقل طول موجي لفوتون في إحدى متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين يساوي $(\frac{٩}{R_H})$ م، حيث (R_H): ثابت ريدبيرغ، فأجب عما يأتي:

أ حدد المتسلسلة التي ينتمي إليها هذا الفوتون.

ب احسب طاقة الفوتون.

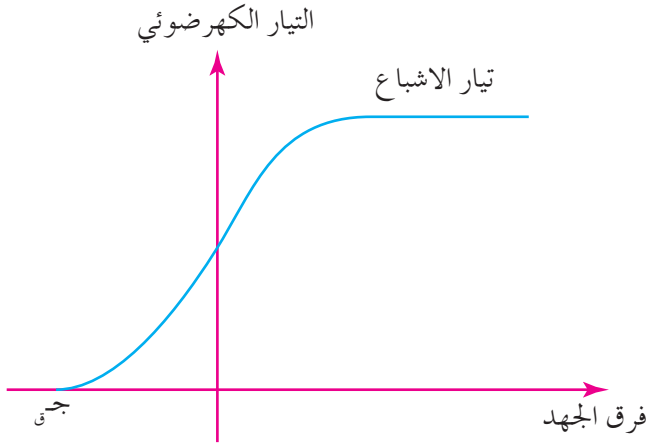
جـ احسب أكبر طول موجي لفوتون ينتمي إلى هذه المتسلسلة.

٦ يبين الشكل (٧–٢٩) التمثيل البياني لفرق الجهد بين المهبط والمصعد والتيار الكهرضوئي في خلية كهرضوئية. بيّن أثر ما يأتي على كلٍّ من تيار الإشباع وجهد القطع:

أ إذا زاد تردد الضوء الساقط.

ب إذا زادت شدة الضوء الساقط.

جـ إذا زاد الطول الموجي للضوء الساقط.



الشكل (٧–٢٩): سؤال (٦).

٧ احسب ما يأتي:

أ طول موجة الخط الطيفي الثاني في متسلسلة ليمان.

ب طول موجة الخط الطيفي الثالث في متسلسلة باشن.

جـ أقصر طول موجي في متسلسلة بالمر.

د أكبر طول موجي في متسلسلة فوند.

٨ إذا كان الزخم الزاوي لإلكترون ذرة الهيدروجين في أحد المدارات يساوي($٢,١١ \times ١٠^{-٣٤}$) كغ.م^{٢}/ث. فجد ما يأتي:

أ رقم المدار الموجود فيه الإلكترون.

ب نصف قطر المدار.

جـ طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون في هذا المدار.

د طاقة المستوى في ذرة الهيدروجين عندما يكون الإلكترون في هذا المدار.

٩ أجب عما يأتي:

أ بيّن لماذا نجحت النظرية الجسيمية في تفسير وجود تردد عتبة للفلزات في الظاهرة الكهرضوئية، في حين لم تنجح النظرية الموجية.

ب أعط مثالًا على السلوك الموجي للمادة، وآخر على السلوك الجسيمي لها.

جـ إذا كان اقتران الشغل لفلز يساوي Φ، هل يمكن لفوتونين طاقة كل منهما ($\frac{١}{٢}$ Φ) تحرير إلكترون واحد من سطح الفلز؟ وضح إجابتك.

١٠ انتقل إلكترون ذرة هيدروجين من المستوى الثالث إلى المستوى الثاني. احسب طاقة الفوتون المنبعث وتردده وطول موجته نتيجة هذا الانتقال.

١١ انبعث فوتون طوله الموجي (١٠٢٫٦) نم من ذرة هيدروجين، إذا كان هذا الفوتون يقع ضمن متسلسلة ليمان. فجد ما يأتي:

أ رقم المستوى الذي انتقل منه الإلكترون.

ب احسب طاقة الفوتون المنبعث وزخمه الخطي.

الفيزياء النووية

Nuclear Physics

الفصل الثامن

في هذا الفصل

(٨-١)
البنية النووية وبعض خصائص النواة.

(٨-٢)
استقرار النواة.

(٨-٣)
طاقة الربط النووية.

(٨-٤)
النشاط الإشعاعي.

(٨-٥)
الإشعاع النووي الطبيعي.

(٨-٦)
الإشعاع النووي الصناعي.

(٨-٧)
تطبيقات التفاعلات النووية.

تعد الشمس مصدر الطاقة على الكرة الأرضية، ويفسر العلماء مصدر الطاقة الشمسية بتفاعلات الاندماج النووي لنوى الهيدروجين.

تعود بدايات الفيزياء النووية إلى العام (١٨٩٦)م عندما اكتشف العالم الفرنسي هنري بيكرل النشاط الإشعاعي لبعض مركبات اليورانيوم، وتبع هذا الاكتشاف عدة دراسات لفهم طبيعة الإشعاعات المنبعثة من النوى المشعة، وكان من أبرزها اكتشاف رذرفورد الذي بيّن فيه أن الإشعاعات المنبعثة ثلاثة أنواع صنفت في ما بعد وفق خصائصها، وفي عام (١٩١١)م أجرى رذرفورد وبعض طلابه تجارب مهمة، أبرز نتائجها أن كتلة الذرة تتركز في نواتها، وأن معظم الذرة فراغ.

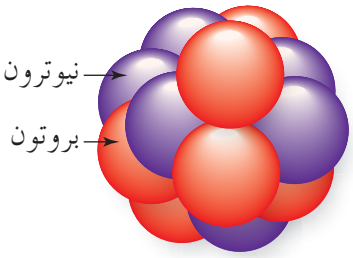
إلا أن البداية الحقيقية للفيزياء النووية كانت عندما اكتشف شادويك النيوترون عام (١٩٣٢)م، حيث أعاد تجارب معلمه رذرفورد جميعها باستخدام أجهزة أحدث، فلاحظ انبعاث جسيمات متعادلة كهربائيًّا أطلق عليها اسم نيوترونات، عندما قذف صفيحة من البيريليوم بجسيمات ألفا. وتشهد العديد من مجالات الحياة اليوم كالطب والصناعة والزراعة تطبيقات واسعة للفيزياء النووية. فمِمَّ تتكون النواة؟ ولماذا تنبعث الأشعة من بعض النوى؟ وكيف يتم الحصول على الطاقة النووية؟

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

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- تبين تركيب النواة، وتذكر مكوناتها.
- تتعرف القوة النووية، وتذكر خصائصها.
- تحلل منحنى الاستقرار لنوى العناصر.
- تقارن بين دقائق ألفا ودقائق بيتا وأشعة غاما من حيث (الكتلة والشحنة والطبيعة والنفاذية والقدرة على التأيين والسرعة).
- تصف ما يحدث للنواة عندما تبعث دقائق ألفا أو دقائق بيتا.
- توازن معادلات تتضمن انبعاث دقائق ألفا أو دقائق بيتا أو كليهما.
- تفسر انبعاث أشعة غاما، وأثر ذلك في النواة الباعثة.
- توضح المقصود بطاقة الربط النووية، وتفاعل الانشطار النووي والتفاعل المتسلسل.
- تحلل المنحنى البياني لطاقة الربط النووية لكل نيوكليون.
- تحسب طاقة الربط النووية لنوى بعض العناصر، وتحسب طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.
- تذكر مبادئ حفظ الكميات الفيزيائية في التفاعلات النووية.
- توضح المقصود بسلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي، وتحسب عدد دقائق ألفا وبيتا المنبعثة لكل سلسلة.
- تتعرف الإشعاعات النووية الصناعية واستخداماتها، والأخطار الناجمة عنها.
- تذكر شروط حدوث التفاعل النووي المتسلسل.
- توضح مبدأ عمل المفاعل النووي، وآلية التحكم في التفاعل المتسلسل فيه.
- تتعرف المفاعل النووي بوصفه مصدرًا للطاقة.
- توضح المقصود بتفاعل الاندماج، وتذكر أمثلة عليه.

(٨-١-١) البنية النووية (Nuclear Structure)



الشكل(٨-١): النيوكليونات.

تتألف نوى الذرات من بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة كهربائيًّا، باستثناء نواة الهيدروجين، حيث تحتوي على بروتون واحد فقط، وتسمى **البروتونات والنيوترونات معًا في النواة** **النيوكليونات** (Nucleons)، ويوضح الشكل (٨-١) هذه النيوكليونات.

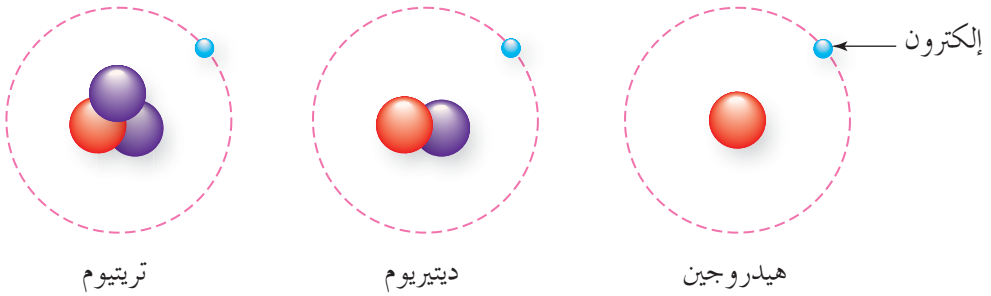
يمثل عدد البروتونات في نواة الذرة **العدد الذري**، ويرمز له بالرمز (Z)، ويساوي عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة، ويحدد العدد الذري نوع العنصر، فلكل عنصر عدد ذري خاص به. ويمثل **مجموع عدد البروتونات والنيوترونات معًا** **العدد الكتلي** لنواة الذرة، ويرمز له بالرمز(A)، ويمكن التعبير عن العدد الذري والعدد الكتلي لنواة ذرة العنصر بالرموز كما يأتي:

$$ {}^{A}_{Z}X $$

X: الرمز الكيميائي للعنصر

ويمكن حساب عدد النيوترونات (N) في النواة من العلاقة: $(A = N + Z)$؛ فمثلًا يرمز لعنصر الصوديوم (Na) الذي عدده الذري $(Z = ١١)$ وعدده الكتلي $(A = ٢٣)$ بالرمز ${}^{23}_{11}Na$ فيكون عدد النيوترونات في نواة ذرة الصوديوم $(N = A - Z = ١٢)$.

ويوجد في الطبيعة **ذرات للعنصر نفسه تتساوى أنويتها في العدد الذري، وتختلف في العدد الكتلي تسمى** **نظائر** (Isotopes)، مثل نظائر الهيدروجين لاحظ الشكل (٨-٢)، وهي الهيدروجين ${}^{1}_{1}H$، والهيدروجين ${}^{2}_{1}H$ يسمى الديتيريوم، والهيدروجين ${}^{3}_{1}H$ يسمى التريتيوم.



الشكل(٨-٢): نظائر الهيدروجين.

وتتفاوت النظائر في نسبة وجودها في الطبيعة، فقد وجد أن نظير الهيدروجين $^{1}_{1}H$ أكثر وجودًا في الطبيعة من نظيريه الآخرين، وأن نظير الكربون $^{12}_{6}C$ أكثر وجودًا في الطبيعة من نظائره الأخرى $^{11}_{6}C$، $^{13}_{6}C$، $^{14}_{6}C$. وقد استطاع العلماء إنتاج نظائر لبعض العناصر صناعيًّا.

ونظرًا لصغر كتل الجسيمات الذرية فإنها تقاس بوحدة تسمى وحدة الكتلة الذرية، ويرمز لها بالرمز (و.ك.ذ) وتكافىء ($\frac{1}{12}$) من كتلة ذرة نظير الكربون $^{12}_{6}C$ أي أن (١ و.ك.ذ= ١,٦٦ × ١٠$^{-٢٧}$ كغ) تقريبًا. ويبين الجدول (٨–١) كتل الجسيمات الذرية: البروتون والنيوترون والإلكترون بوحدة الكيلو غرام ووحدة الكتلة الذرية.

الجدول (٨–١): كتل الجسيمات الذرية.

الجسيم	الرمز	الكتلة (كغ)	الكتلة (و.ك.ذ)
البروتون	$ك_{ب}$	١,٦٧٢٦ × ١٠$^{-٢٧}$	١,٠٠٧٣
النيوترون	$ك_{ن}$	١,٦٧٤٩ × ١٠$^{-٢٧}$	١,٠٠٨٧
الإلكترون	$ك_{e}$	٩,١٠٩٤ × ١٠$^{-٣١}$	٥,٤٨٥٨ × ١٠$^{-٤}$

(٨–١–٢) بعض خصائص النواة (Some Properties of Nucleus)

درست سابقًا أن العالم رذرفورد عندما قذف صفائح فلزية مختلفة بجسيمات ألفا، افترض أن نوى ذرات الفلز كروية الشكل، وتوالت التجارب عقب رذرفورد التي أظهرت أن معظم نوى الذرات شكلها كروي، وأن نصف قطرها (نق) يمكن حسابه من العلاقة الرياضية الآتية:

$$نق = نق_{ْ} \sqrt[3]{A} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (٨–١)$$

حيث (A): العدد الكتلي للنواة، و(نق$_{ْ}$): ثابت يساوي ١,٢ × ١٠$^{-١٥}$م.

مثال (٨–١)

احسب نصف قطر نواة الليثيوم $^{8}_{3}Li$.

الحل:

بما أن العدد الكتلي لنواة الليثيوم(A = ٨) فإن:

$$نق = نق_{ْ} \sqrt[3]{A}$$

$$= ١,٢ \times ١٠^{-١٥} \times \sqrt[3]{٨}$$

$$= ٢,٤ \times ١٠^{-١٥} م$$

وبما أن النواة كروية الشكل، لذلك يمكن حساب حجمها من حجم الكرة: ح = $\frac{٤}{٣}$ π نق^{٣}

وبتعويض قيمة (نق) من العلاقة (٨–١)، فإن حجم النواة يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ح = \frac{٤}{٣}\pi (نق_{\circ} (A)^{\frac{١}{٣}})^{٣}$$

$$ح = \frac{٤}{٣}\pi\, نق_{\circ}^{٣}\, A$$

لاحظ أن حجم النواة يعتمد فقط على العدد الكتلي لها.

ومن الخصائص المهم دراستها للنواة كثافتها، إذ درست سابقًا أن كثافة أي مادة تحسب من العلاقة:

$$ث = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$$

بالرجوع إلى الجدول (٨–١)، نلاحظ أن كتلة البروتون تساوي كتلة النيوترون تقريبًا، لذا يمكن أن نحسب كتلة تقريبية للنواة، حيث (كتلة النواة التقريبية = $ك_{ب}$ × A).

ويمكن حساب الكثافة للنواة كما يأتي:

$$ث_{\text{نواة}} = \frac{ك_{ب} \times A}{\frac{٤}{٣}\pi\, نق_{\circ}^{٣}\, A}$$

أي أن: $ث_{\text{نواة}} = \frac{ك_{ب}}{\frac{٤}{٣}\pi\, نق_{\circ}^{٣}}$

لاحظ أن الكميات جميعها ثوابت، فماذا تستنتج؟

مثال (٨–٢)

احسب كثافة كل من نواتي الهيليوم $^{4}_{2}He$ ، والحديد $^{56}_{26}Fe$.

الحل:

يمكن حساب كثافة المادة النووية من العلاقة:

$$ث_{\text{نواة}} = \frac{ك_{ب}}{\frac{٤}{٣}\pi\, نق_{\circ}^{٣}}$$

وبتعويض قيم الكميات في هذه العلاقة نجد أن:

$$\text{ث}_{\text{نواة}} = \frac{١٠ \times ١,٦٧٢٦^{-٢٧}}{\frac{٤}{٣} \times ٣,١٤ \times (١,٢ \times ١٠^{-١٥})^{٣}}$$

$$\text{ث}_{\text{نواة}} = ٢,٣ \times ١٠^{١٧} \text{ كغ/م}^{٣}$$

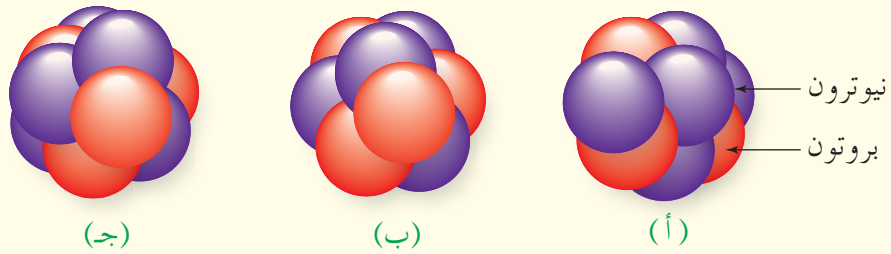
ما يعني أن كثافة نواة الهيليوم تساوي كثافة نواة الحديد، وبوجه عام فإن كثافة نوى العناصر جميعها ثابتة تقريبًا؛ لأن مكونات النواة هي نفسها للعناصر جميعها.

ولو تخيلنا أن حجم مادة نووية بحجم حبة حمص نصف قطرها ($\frac{١}{٢}$ سم) لكانت كتلتها تقريبًا (١٢٠ مليون طن).

مراجعة (٨-١)

١ ما عدد البروتونات في نواة عنصر البوتاسيوم $^{39}_{19}K$ ؟ وما عدد النيوترونات فيها؟

٢ يمثل الشكل(٨-٣) ثلاث نوى مختلفة ممثلة بالرموز(أ، ب، جـ). أي النوى تشكل نظائر للعنصر نفسه؟ فسر إجابتك.



الشكل(٨-٣): سؤال (٢).

٣ (س، ص) نواتان، إذا علمت أن العدد الكتلي للنواة (س) يساوي ثلاثة أمثال العدد الكتلي للنواة (ص). فجد نسبة :

أ كثافة النواة (س) إلى كثافة النواة (ص).

ب قطر النواة (س) إلى قطر النواة (ص).

جـ حجم النواة (س) إلى حجم النواة (ص).

٨-٢ استقرار النواة

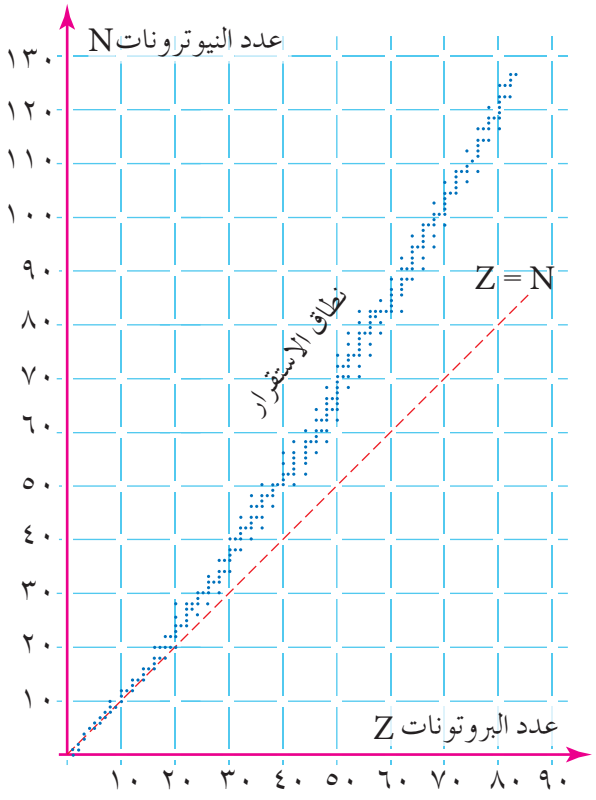
Stability of the Nucleus

تعد النواة تجمّعًا من نيوترونات متعادلة كهربائيًّا وبروتونات موجبة الشحنة في حيز صغير جدًّا، وكما تعلم فإن الشحنات المتشابهة تتنافر كهربائيًّا، فكيف تحافظ النواة على تماسكها بالرغم من وجود قوة تنافر كهربائية بين بروتوناتها؟

إن سبب ذلك وجود نوع آخر من القوى تربط مكونات النواة معًا تسمى **القوة النووية** (Nuclear Force) وهي **قوة تجاذب ذات مدى قصير جدًّا تربط النيوكليونات المتجاورة في النواة**. فكل نيوكليونين متجاورين يتجاذبان بغض النظر عن شحنة أي منهما سواء أكانا بروتونين أم نيوترونين أم بروتونًا ونيوترونًا؛ وهذا يعني أن البروتونات والنيوترونات تتجاذب بفعل القوة النووية بالإضافة إلى تنافر البروتونات بفعل القوة الكهربائية.

وتمتاز القوة النووية بكبر مقدارها وقصر مداها في حال كان النيوكليونان متجاورين، وتكون أكبر ما يمكن بين نيوكليونين متلاصقين عندما يكون البعد بينهما ($١,٤ \times ١٠^{-١٥}$م) تقريبًا، وتصبح قوة التنافر الكهربائية بين بروتونين في نواة أكبر من القوة النووية إذا زاد البعد بينهما إلى أربعة أضعاف هذا المقدار.

ويشكل عدد النيوترونات في النواة عاملًا مهمًّا في استقرارها؛ وذلك لأن النيوترونات متعادلة كهربائيًّا فتتأثر بالقوة النووية فقط. وعند تصنيف النوى تجريبيًّا إلى مستقرة وغير مستقرة، وتمثيل العلاقة بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات بيانيًّا للنوى التي يقل عددها الذري عن(٨٣)، نحصل على الشكل (٨-٤)؛ إذ تشير النقاط الزرقاء في الشكل إلى النوى المستقرة، وتظهر في نطاق ضيق يسمى **نطاق الاستقرار**.



الشكل(٨-٤): منحنى الاستقرار.

إذا تأملت المنحنى تجد أن **النوى المستقرة** ($Z \geq ٢٠$) إما أن يكون عدد النيوترونات فيها مساويًا عدد بروتوناتها مثل نواة النتروجين $^{14}_{7}N$، فتقع على الخط (Z=N)، أو يزيد عدد النيوترونات على عدد البروتونات ($Z < N$) مثل نواة الصوديوم $^{23}_{11}Na$.

أما النوى المستقرة التي يقع عددها الذري ضمن المدى ($٢٠ < Z < ٨٣$) فنلاحظ أن أنويتها تقع ضمن نطاق الاستقرار فوق الخط (Z=N). فوجود عدد كبير من البروتونات فيها، يزيد من قوى التنافر الكهربائية بين بروتوناتها بشكل كبير، إلا أن عدد النيوترونات في هذه النوى يفوق دائمًا عدد البروتونات، لذلك تبقى قوى التجاذب النووية سائدة على قوى التنافر الكهربائية. فمثلًا تعد نواة الزركونيوم $^{90}_{40}Zr$ من النوى المستقرة؛ إذ تحتوي على (٤٠) بروتونًا و(٥٠) نيوترونًا، وتحتوي نواة الذهب $^{197}_{79}Au$ على (٧٩) بروتونًا و (١١٨) نيوترونًا، وهي من النوى المستقرة أيضًا.

أما النوى التي **عددها الذري يساوي ٨٣ أو يزيد عليه** ($Z \geq ٨٣$) فإنها غير مستقرة؛ نظرًا لكبر حجم النواة، وتباعد النيوكليونات بعضها عن بعض؛ فتتعاظم قوى التنافر الكهربائية بين بروتونات النواة، عندئذ لا تستطيع القوى النووية أن تتغلب على قوى التنافر الكهربائية أو تجاريها مهما بلغ عدد النيوترونات في النواة.

مراجعة (٨-٢)

١ تمتاز القوة النووية بجملة من الخصائص، اذكرها.

٢ فسر ما يأتي:

أ تعد نواة الثوريوم $^{234}_{90}Th$ من النوى غير المستقرة.

ب نلاحظ انحراف نطاق الاستقرار نحو الأعلى مع زيادة العدد الذري في منحنى الاستقرار.

٨–٣ طاقة الربط النووية

Nuclear Binding Energy

بيَّن العالم أينشتين في نظريّة النسبية الخاصة تكافؤ الكتلة مع الطاقة، فالكتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة، والطاقة يمكن أن تتحول إلى كتلة، ويمكن أيضًا حساب الطاقة المكافئة لمقدار من الكتلة (Δك) وفقًا للعلاقة الرياضية الآتية:

$$ط = Δك \times س^{٢} \quad .... \quad (٨–٢)$$

حيث (ط): الطاقة بوحدة الجول، و(Δك): الكتلة بوحدة الكيلوغرام، و(س): سرعة الضوء في الفراغ، وتساوي (٣×١٠^{٨}) م/ث.

وتسمى العلاقة الرياضية (٨–٢) معادلة أينشتين في تكافؤ (الطاقة – الكتلة)، وتبين هذه العلاقة أنه يمكن الحصول على طاقة هائلة من مقدار صغير جدًّا من الكتلة؛ فالطاقة المكافئة لكتلة (١ و.ك.ذ) تساوي (٩٣١,٥) مليون إلكترون فولت، وعليه يمكن حساب **الطاقة بوحدة المليون إلكترون فولت المكافئة لكتلة (Δك) مقيسة بوحدة الكتلة الذرية (و.ك.ذ)**، وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$ط = Δك \times ٩٣١,٥ \quad .... \quad (٨–٣)$$

مثال (٨–٣)

احسب الطاقة المكافئة لكتلة البروتون بوحدة المليون إلكترون فولت.

الحل:

من الجدول (٨–١) نجد أن كتلة البروتون (١,٠٠٧٣) و.ك.ذ، نحسب الطاقة المكافئة لكتلة البروتون من العلاقة الآتية:

ط = Δك × ٩٣١,٥

= ١,٠٠٧٣ × ٩٣١,٥

= ٩٣٨,٣ مليون إلكترون فولت.

تمكن العلماء من تعيين كتل النوى وكتل مكوناتها بدقة كبيرة بعد اختراع جهاز مطياف الكتلة، ووُجد فرق بين كتلة النواة ومجموع كتل مكوناتها. وفي ما يأتي توضيح لكيفية حساب الفرق في الكتلة بين نواة منفردة ومكوناتها.

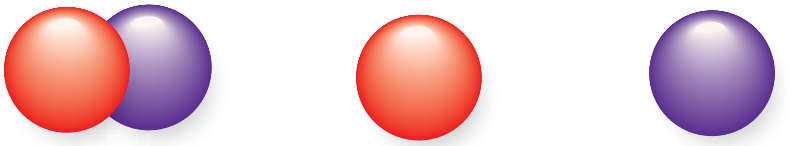
افترض أن لدينا بروتونًا واحدًا ونيوترونًا واحدًا، وأردنا تكوين نواة ديتيريوم $_1^2H$ منهما، فإن كتلة مكونات نواة الديتيريوم تحسب من العلاقة الآتية:

$$ك_{المكونات} = Z \times ك_ب + N \times ك_ن$$

$$= ١ \times ١,٠٠٧٣ + ١ \times ١,٠٠٨٧$$

$$= ٢,٠١٦ \text{ و.ك.ذ}$$

وتبين من الأبحاث العلمية أن كتلة نواة الديتيريوم ($ك_{نواة}$) = ٢,٠١٣٦ و.ك.ذ، لاحظ الشكل (٨–٥).



الشكل (٨–٥): كتلة نواة الديتيريوم ومكوناتها.

والفرق في الكتلة بين نواة الديتيريوم منفردة ومكوناتها يمكن حسابه كالآتي:

$$\Delta ك = ك_{المكونات} - ك_{النواة}$$

$$= ٢,٠١٦ - ٢,٠١٣٦$$

$$= ٠,٠٠٢٤ \text{ و.ك.ذ}$$

فما تفسير هذا الفرق في الكتلة؟ لقد دلت الدراسات على أن **كتلة النواة تكون دائمًا أقل من مجموع كتل مكوناتها**، وهذا الفرق في الكتلة ($\Delta ك$) يتحول إلى طاقة وفقًا لمعادلة أينشتين في تكافؤ (الطاقة – الكتلة)، وهذا المقدار من الطاقة يمثل **مقدار الطاقة الخارجية التي يجب أن تزود بها النواة لفصل مكوناتها عن بعضها نهائيًّا** وتسمى **طاقة الربط النووية** ($ط_ر$). ويمكن حسابها من العلاقة الرياضية الآتية:

$$ط_ر = \Delta ك \times ٩٣١,٥$$

$$ط_ر = (ك_{المكونات} - ك_{النواة}) \times ٩٣١,٥$$

$$ط_ر = \{(Z \times ك_ب + N \times ك_ن) - ك_{النواة}\} \times ٩٣١,٥ \quad \text{..... (٨–٤)}$$

ويمكن حساب طاقة الربط النووية للنيوكليون الواحد من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{طاقة الربط النووية لكل نيوكليون} = \frac{\text{طاقة الربط النووية}}{\text{العدد الكتلي}} \quad \text{..... (٨–٥)}$$

مثال (٨-٤)

احسب لنواتي البوتاسيوم $^{39}_{19}K$ واليورانيوم $^{235}_{92}U$ ما يأتي:

أ طاقة الربط النووية علمًا بأن كتلة نواة البوتاسيوم (٣٨,٩٦٣٧) و.ك.ذ، وكتلة نواة اليورانيوم (٢٣٥,٠٤٣٩) و.ك.ذ.

ب طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

الحل:

أ طاقة الربط النووية:

■ لنواة البوتاسيوم: Z = ١٩، N = ٣٩ − ١٩ = ٢٠

$$\Delta ك = ك_{المكونات} - ك_{النواة}$$

$$= (Z \times ك_{ب} + N \times ك_{ن}) - ك_{النواة}$$

$$= (١٩ \times ١,٠٠٧٣ + ٢٠ \times ١,٠٠٨٧) - ٣٨,٩٦٣٧$$

$$= ٣٩,٣١٢٧ - ٣٨,٩٦٣٧$$

$$\Delta ك = ٠,٣٤٩ \text{ و.ك.ذ}$$

$$ط_{ر} = \Delta ك \times ٩٣١,٥$$

$$= ٠,٣٤٩ \times ٩٣١,٥ = ٣٢٥,٠٩ \text{ مليون إلكترون فولت.}$$

■ لنواة اليورانيوم: Z = ٩٢، N = ٢٣٥ − ٩٢ = ١٤٣

$$\Delta ك = ك_{المكونات} - ك_{النواة}$$

$$= (Z \times ك_{ب} + N \times ك_{ن}) - ك_{النواة}$$

$$= (٩٢ \times ١,٠٠٧٣ + ١٤٣ \times ١,٠٠٨٧) - ٢٣٥,٠٤٣٩$$

$$= ٢٣٥,٠٤٣٩ - ٢٣٦,٩١٥٧$$

$$\Delta ك = ١,٨٧١٨ \text{ و.ك.ذ}$$

$$ط_{ر} = \Delta ك \times ٩٣١,٥$$

$$= ١,٨٧١٨ \times ٩٣١,٥ = ١٧٤٣,٥٨ \text{ مليون إلكترون فولت.}$$

إن طاقة الربط النووية لنواة اليورانيوم أكبر منها لنواة البوتاسيوم، فهل تتوقع أن تكون نواة اليورانيوم أكثر استقرارًا من نواة البوتاسيوم؟

ب طاقة الربط النووية لكل نيوكليون:

- لنواة البوتاسيوم:

$$\text{طاقة الربط النووية لكل نيوكليون} = \frac{\text{طاقة الربط النووية}}{\text{العدد الكتلي}}$$

$$= \frac{٣٢٥,٠٩}{٣٩}$$

$$= ٨,٣٤ \text{ مليون إلكترون فولت/نيوكليون.}$$

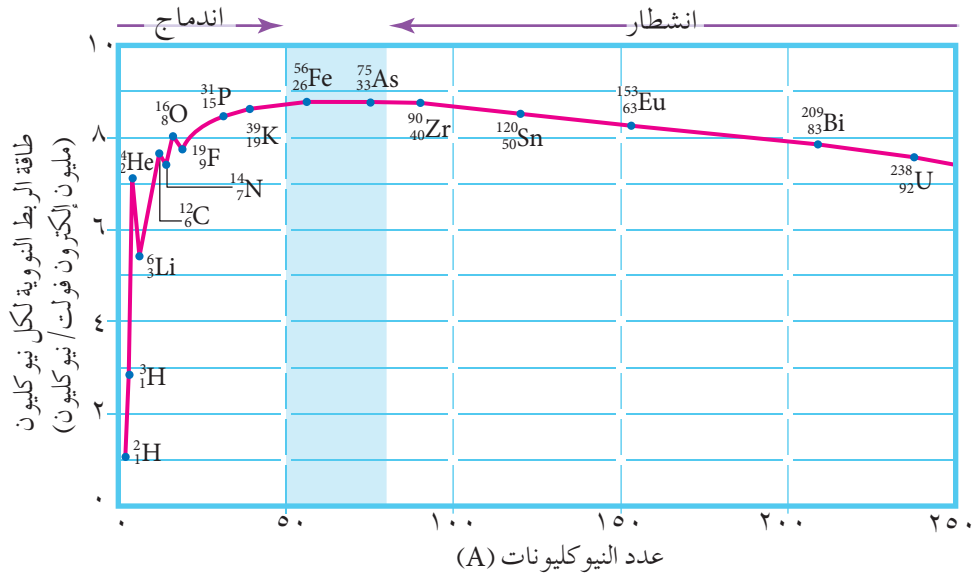
- لنواة اليورانيوم:

$$\text{طاقة الربط النووية لكل نيوكليون} = \frac{\text{طاقة الربط النووية}}{\text{العدد الكتلي}}$$

$$= \frac{١٧٤٣,٥٨}{٢٣٥}$$

$$= ٧,٤٢ \text{ مليون إلكترون فولت/نيوكليون.}$$

نلاحظ من المثال السابق أن الطاقة اللازمة لفصل أحد نيوكليونات نواة البوتاسيوم أكبر من تلك اللازمة لفصل أحد نيوكليونات نواة اليورانيوم؛ وهذا يعني أن نواة البوتاسيوم أكثر استقرارًا من نواة اليورانيوم، وبوجه عام فإنه كلما كانت طاقة الربط النووية لكل نيوكليون أكبر كانت النواة أكثر استقرارًا، ويوضح الشكل(٨–٦) علاقة طاقة الربط النووية لكل نيوكليون مع العدد الكتلي للنوى المختلفة.



الشكل(٨–٦): منحنى طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

نلاحظ من المنحنى أن النوى المتوسطة (٥٠ ≤ A ≤ ٨٠) لها أعلى طاقة ربط نووية لكل نيوكليون؛ ما يجعلها أكثر استقرارًا من غيرها؛ إذ يظهر من المنحنى أن القيمة العظمى لطاقة الربط النووية لكل نيوكليون (٨,٨) مليون إلكترون فولت/نيوكليون تكون لنواة الحديد $^{56}_{26}Fe$ إحدى النوى المتوسطة.

أما النوى الخفيفة (A < ٥٠) فإن طاقة الربط النووية لكل نيوكليون فيها تكون أقل بالنسبة إلى النوى المتوسطة، لذلك يمكن دمجها في حال توافرت ظروف مناسبة لتكوين نوى كتلها أقرب إلى كتلة نواة الحديد لتصبح أكثر استقرارًا، ويصاحب ذلك تحرر قدر من الطاقة.

وكذلك النوى الثقيلة (A > ٨٠) فإن طاقة الربط النووية لكل نيوكليون فيها تكون أقل بالنسبة إلى النوى المتوسطة؛ لذلك يمكن شطرها في حال توافرت ظروف مناسبة لتكوين نواتين أكثر استقرارًا، كتلة كل منهما أقرب إلى كتلة نواة الحديد، مع تحرر قدر من الطاقة.

مراجعة (٨-٣)

١ احسب الطاقة الناتجة من تحويل (١×١٠^{-٣}) كغ من المادة إلى طاقة بوحدة الجول، ثم المليون إلكترون فولت.

٢ رتب تصاعديًّا نوى العناصر الآتية: $^{56}_{26}Fe$ ، $^{208}_{82}Pb$ ، $^{238}_{92}U$ ، وفق طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

٣ فسر: "تكون كتلة النواة دائمًا أقل من مجموع كتل مكوناتها".

٤ (س، ص) نواتان ثقيلتان لهما العدد الكتلي نفسه، إذا علمت أن النواة (س) تمتلك طاقة ربط نووية أكبر من النواة (ص) فأي النواتين أكثر استقرارًا؟ فسر إجابتك.

توجد في الطبيعة نوى مستقرة وأخرى غير مستقرة، وتعد العناصر جميعها التي يزيد عددها الذري على (٨٣) غير مستقرة (Unstable)، وللوصول إلى حالة الاستقرار تتحول النواة غير المستقرة في الطبيعة إلى نواة أخرى عن طريق التخلص من جزء من طاقتها على شكل انبعاث إشعاعات أو جسيمات، فتتغير مكونات النواة؛ لذا توصف النوى غير المستقرة بأنها مشعة، وفي هذه الحالة نقول أن النواة اضمحلت وتسمى **عملية الانبعاث التلقائي للإشعاع من النوى غير المستقرة** **النشاط الإشعاعي** (Radioactivity).

وفي أي اضمحلال أو تفاعل نووي يجب أن تتحقق أربعة مبادئ لحفظ الكميات الفيزيائية، وهي مبدأ حفظ العدد الذري، ومبدأ حفظ العدد الكتلي، ومبدأ حفظ الزخم الخطي، ومبدأ حفظ (الطاقة–الكتلة).

ويتألف الإشعاع المنبعث من نوى العناصر المشعة من ثلاثة أنواع هي أشعة ألفا(α)، وأشعة بيتا(β)، وأشعة غاما (γ)، وفي ما يأتي خصائص هذه الإشعاعات وانبعاثها.

(٨-٤-١) اضمحلال ألفا (Alpha Decay)

يصدر عن بعض النوى المشعة أشعة تسمى أشعة ألفا (α – ray)، وهي دقائق (جسيمات) موجبة الشحنة، يتكون الجسيم الواحد منها من بروتونين ونيوترونين، لذا فهي نوى ذرات هيليوم $^{4}_{2}He$، وتمتاز دقائق ألفا بقدرتها العالية على تأيين ذرات المادة التي تصطدم بها؛ وذلك بسبب كبر كتلتها وكبر شحنتها؛ ما يجعل احتمال تصادمها مع ذرات المادة كبيرًا عند مرورها في المادة، وعليه تفقد دقائق ألفا معظم طاقتها في التأيين، فتكون قدرتها على النفاذ ضعيفة؛ إذ لا تكاد تخترق صفحة من الورق.

تطرأ تغيرات على النوى عندما تبعث دقائق ألفا، فإذا أطلقت نواة مشعة دقيقة ألفا فإنها تفقد بروتونين ونيوترونين؛ أي يقل عددها الذري بمقدار (٢)، ويقل عددها الكتلي بمقدار (٤)، وتنتج نواة جديدة أكثر استقرارًا، يعرف هذا التحول **باضمحلال ألفا (Alpha Decay)**، ويعبر عنه بالمعادلة النووية الآتية:

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He$$

حيث (X): النواة الأم (المشعة)، و(Y): النواة الناتجة، ويصاحب هذا الانبعاث فرق في الكتلة يظهر على شكل طاقة حركية للنواتج.

وتوضح المعادلة النووية السابقة أن مجموع الأعداد الكتلية للنواتج يساوي العدد الكتلي للنواة الأم، وهو ما يعرف **بمبدأ حفظ العدد الكتلي**، ويكون مجموع الأعداد الذرية للنواتج مساويًا العدد الذري للنواة الأم وهو ما يعرف **بمبدأ حفظ العدد الذري** الذي يعد صورة من صور قانون حفظ الشحنة، ويتضح ذلك من اضمحلال ألفا في المعادلة النووية الآتية:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

ويجب أن يكون مجموع الطاقة والكتلة للنوى والجسيمات المتفاعلة أو المضمحلة مساويًا مجموع الطاقة والكتلة للنوى والجسيمات الناتجة من التفاعل أو الاضمحلال، وهذا ما يعرف **بمبدأ حفظ (الطاقة–الكتلة)**، بالإضافة إلى تحقق **مبدأ حفظ الزخم الخطي** الذي ينص على أن الزخم الخطي للنوى والجسيمات المتفاعلة أو المضمحلة يساوي الزخم الخطي للنوى والجسيمات الناتجة من التفاعل أو الاضمحلال.

(٨–٤–٢) اضمحلال بيتا (Beta Decay)

يصدر عن بعض النوى المشعة أشعة تسمى أشعة بيتا(β–ray)، وهي إلكترونات سالبة الشحنة يعبر عنها بالرمز($_{-1}^{0}e$) وتسمى بيتا السالبة (β–)، وتنتقل بسرعة عالية جدًّا، ولصغر شحنتها، فإن قدرتها على التأيين قليلة في الأوساط التي تعبرها؛ ولصغر كتلتها يكون مدى نفاذيتها كبيرًا.

عندما نقول إن نواة مشعة بعثت دقيقة بيتا، فهذا يعني أن النواة بعثت إلكترونًا، فإذا كانت النواة تتكون من بروتونات ونيوترونات فقط؛ فمن أين جاء هذا الإلكترون؟

عندما يتحلل أحد نيوترونات النواة ينتج بروتون وإلكترون، وبسبب صغر كتلة الإلكترون، ووفق فرضية دي بروي يكون الطول الموجي المصاحب للإلكترون كبيرًا مقارنة بأبعاد النواة، فتبعثه النواة خارجها، بينما يبقى البروتون ذو الكتلة الكبيرة داخلها.

وقد وجد تجريبيًّا أن بعض النوى المشعة تبعث دقائق لها خصائص الإلكترونات نفسها إلا أنها تحمل شحنة موجبة أطلق عليها اسم بوزيترونات، ويعبر عنها بالرمز ($_{+1}^{0}e$) وتسمى بيتا الموجبة (β+). فعندما يتحلل أحد بروتونات النواة ينتج نيوترون وبوزيترون، فالبوزيترون تبعثه النواة خارجها، للسبب ذاته الذي انبعث به الإلكترون، ويبقى النيوترون داخل النواة.

ويتحقق مبدأ حفظ العدد الكتلي ومبدأ حفظ العدد الذري في أي نشاط إشعاعي يبعث

أشعة بيتا. وليتحقق مبدأ حفظ الزخم الخطي ومبدأ حفظ (الطاقة–الكتلة) افترض العالم باولي انبعاث **جسيم صغير مهمل الكتلة وغير مشحون** يسمى **النيوترينو** يعبر عنه بالرمز (ν) يصاحب دائمًا انبعاث البوزيترون، ويمكن التعبير عن **تحلل البروتون** بالمعادلة الآتية:

$$ {}^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu $$

أما انبعاث الإلكترون فيصاحبه انبعاث جسيم صغير آخر مهمل الكتلة وغير مشحون، يسمى **ضديد النيوترينو** ويعبر عنه بالرمز $\bar{\nu}$ ، وعليه يمكن التعبير عن **تحلل النيوترون** بالمعادلة الآتية:

$$ {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} $$

ماذا عن النواة التي تبعث دقيقة بيتا؟ ما التغيرات التي تطرأ عليها؟ عندما تطلق نواة مشعة **دقيقة بيتا السالبة (الإلكترون)**، فإن عدد نيوتروناتها يقل بمقدار (١)، نتيجة تحلله، ويزداد تبعًا لذلك عدد بروتوناتها بمقدار (١)؛ أي يزداد العدد الذري بمقدار (١) بينما يبقى العدد الكتلي ثابتًا، وتنتج نواة جديدة أكثر استقرارًا، ويعبر عن هذا التحول، الذي يعرف **باضمحلال بيتا السالبة**، بالمعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} $$

ومن الأمثلة على هذا الاضمحلال اضمحلال نواة نظير الكربون إلى نواة النتروجين، وفق المعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} $$

أما إذا أطلقت نواة مشعة **دقيقة بيتا الموجبة (البوزيترون)** فإن عدد بروتوناتها يقل بمقدار (١)، نتيجة تحلله، ويزداد تبعًا لذلك عدد نيوتروناتها بمقدار (١)؛ أي يقل العدد الذري بمقدار (١) بينما يبقى العدد الكتلي ثابتًا، وتنتج نواة جديدة أكثر استقرارًا، ويعبر عن هذا التحول، الذي يعرف **باضمحلال بيتا الموجبة**، بالمعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + \nu $$

ومن الأمثلة على هذا الاضمحلال اضمحلال نواة نظير النحاس إلى نواة النيكل، وفق المعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{64}_{29}Cu \longrightarrow {}^{64}_{28}Ni + {}^{0}_{+1}e + \nu $$

(٨-٤-٣) اضمحلال غاما (Gamma Decay)

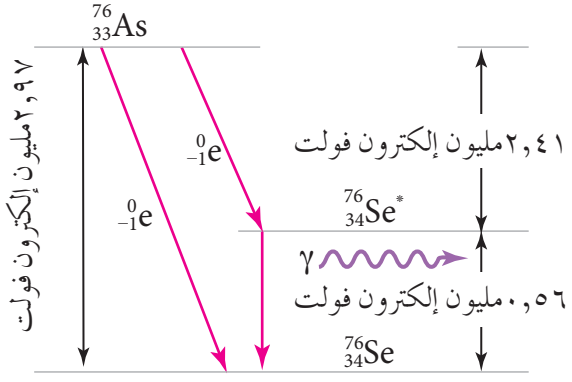
يصدر عن بعض النوى المشعة غير المستقرة أشعة تسمى أشعة غاما ($\gamma - ray$)، وهي أشعة كهرمغناطيسية (فوتونات)، ليس لها كتلة، وذات طاقة عالية جدًّا، فتكون قدرتها على النفاذ هائلة، أما قدرتها على التأيين فتكون منخفضة؛ لأنه لا شحنة لها.

عندما تبعث نواة ما دقائق ألفا أو بيتا فإن النواة الناتجة ـ غالبًا ـ تبقى مثارة؛ لامتلاكها طاقة زائدة عن الوضع الطبيعي لها، ولكي تستقر النواة تتخلص من هذه الطاقة باعثة أشعة غاما، ولا يحدث عندئذ أي تغيير في العددين الكتلي والذري للنواة الباعثة، ويمكن التعبير عن اضمحلال غاما (Gamma Decay) بالمعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma $$

حيث ($X^{\times}$): النواة المثارة.

ويبين الشكل (٨-٧)، اضمحلال نواة الزرنيخ ${}^{76}_{33}As$ المشعة، حيث يمكن أن تصل إلى حالة الاستقرار بإنتاج نواة جديدة **بإحدى طريقتين:**



الشكل(٨-٧): اضمحلال نواة الزرنيخ.

الطريقة الأولى: وتتم في مرحلة واحدة حيث تبعث نواة الزرنيخ ${}^{76}_{33}As$ دقيقة بيتا سالبة طاقتها (٢,٩٧) مليون إلكترون فولت، وتنتج نواة السيلينيوم ${}^{76}_{34}Se$ في حالة الاستقرار وفق المعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{76}_{33}As \longrightarrow {}^{76}_{34}Se + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} $$

الطريقة الثانية: وتتم في مرحلتين حيث تبعث نواة الزرنيخ ${}^{76}_{33}As$ دقيقة بيتا سالبة طاقتها (٢,٤١) مليون إلكترون فولت، فتنتج نواة السيلينيوم ${}^{76}_{34}Se^{*}$ المثارة، ولكي تصل الأخيرة إلى حالة الاستقرار تبعث أشعة غاما(γ) على هيئة فوتون طاقته (٠,٥٦) مليون إلكترون فولت، والمعادلتان النوويتان الآتيتان توضحان ذلك:

$$ {}^{76}_{33}As \longrightarrow {}^{76}_{34}Se^{*} + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu} $$

$$ {}^{76}_{34}Se^{*} \longrightarrow {}^{76}_{34}Se + \gamma $$

١ أي النوى الآتية تنتج عندما تضمحل نواة البولونيوم $^{210}_{84}Po$ باعثة دقيقة ألفا:

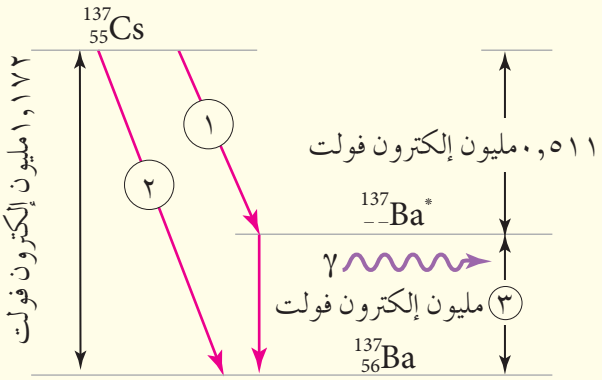
($^{206}_{82}Pb$ ، $^{208}_{82}Pb$ ، $^{210}_{82}Pb$)؟

٢ يمثل الشكل (٨–٨) اضمحلال نواة السيزيوم، تأمل الشكل وأجب عن الأسئلة الآتية:

أ ما نوع الإشعاعات المنبعثة والمشار إليها بالرقم (١) والرقم (٢)؟

ب احسب طاقة الفوتون المنبعث المشار إليها بالرقم (٣).

جـ اكتب معادلة نووية موزونة تمثل اضمحلال نواة Cs إلى نواة Ba^*



الشكل (٨–٨): سؤال (٢).

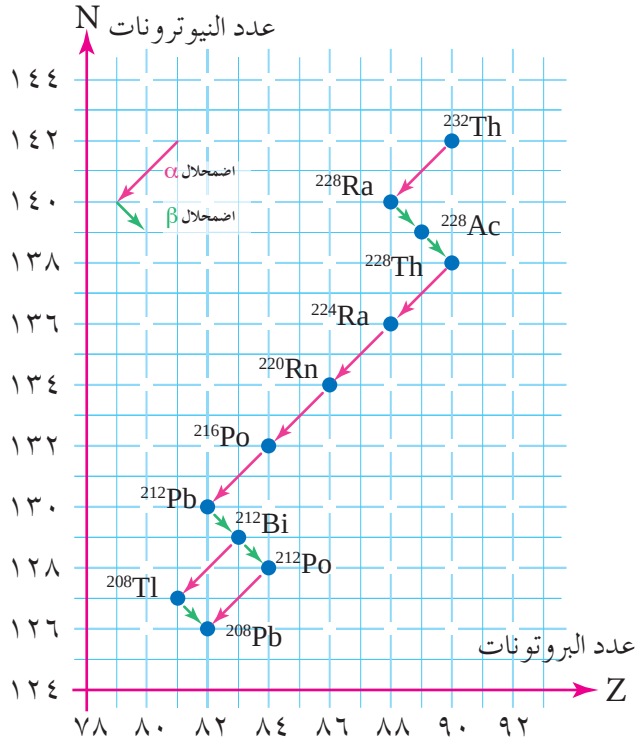
٣ فسر العبارة الآتية:

" تنبعث دقائق بيتا السالبة أو الموجبة من النواة بالرغم من أنها ليست من مكونات النواة".

تضمحل النوى غير المستقرة تلقائيًا في الطبيعة وتبعث إشعاعًا يسمى إشعاعًا نوويًا طبيعيًا، ومن أبرز مصادر هذا الإشعاع **سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي** (Natural Radioactive Decay Series) **وهي مجموعة التحولات المتتالية التلقائية التي تبدأ بنواة نظير مشع لعنصر ثقيل، وتنتهي بنواة نظير مستقر لعنصر آخر**، ويصاحب كل تحول انبعاث دقائق ألفا أو دقائق بيتا.

ومن أشهر سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي ثلاث سلاسل هي: سلسلة اليورانيوم تبدأ بنظير اليورانيوم $^{238}_{92}U$، وسلسلة الأكتينيوم تبدأ بنظير اليورانيوم $^{235}_{92}U$، وسلسلة الثوريوم تبدأ بنظير الثوريوم $^{232}_{90}Th$، إذ تسمى السلسلة باسم العنصر الأطول عمرًا فيها، وتبدأ هذه السلاسل بنواة نظير مشع، وتنتهي جميعها بنواة أحد نظائر الرصاص المستقر.

يبين الشكل (٨–٩) سلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي لنواة الثوريوم $^{232}_{90}Th$. لاحظ أن نواة النظير $^{232}_{90}Th$ تبدأ بإشعاع دقيقة ألفا لتنتج نواة الراديوم $^{228}_{88}Ra$ والتي بدورها تضمحل إلى نواة أكتينيوم $^{228}_{89}Ac$ باعثة دقيقة بيتا السالبة، ويستمر الاضمحلال المتتابع للنوى حتى يصل إلى نواة البزموث $^{212}_{83}Bi$، حيث تواجه النواة أكثر من اضمحلال محتمل لها، وتنتهي هذه السلسلة بنواة نظير الرصاص المستقر $^{208}_{82}Pb$.



الشكل(٨–٩): سلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي لنواة الثوريوم ٢٣٢.

وبتأمل كامل اضمحلالات سلسلة الثوريوم نلاحظ أنه ينبعث (٦) دقائق ألفا و(٤) دقائق بيتا السالبة عبر أي مسار اضمحلال محتمل يتم اختياره، لذا يمكن التعبير عن اضمحلالات هذه السلسلة جميعها بالمعادلة النووية الآتية:

$$^{232}_{90}Th \longrightarrow {}^{208}_{82}Pb + 6\,{}^{4}_{2}He + 4\,{}^{0}_{-1}e + 4\,\bar{\nu}$$

لاحظ أن مبدأ حفظ العدد الكتلي ومبدأ حفظ العدد الذري يتحققان في هذه المعادلة وفي المعادلات النووية السابقة جميعها، وكذلك يتحقق مبدأ حفظ (الطاقة – الكتلة) ومبدأ حفظ الزخم الخطي.

مثال (٨–٥)

تضمحل نواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ وفق المعادلة النووية الآتية:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + 6\,{}^{4}_{2}He + 3\,{}^{0}_{-1}e + 3\,\bar{\nu}$$

أ ما العدد الكتلي (A) للنواة الناتجة (X)؟

ب ما العدد الذري (Z) للنواة الناتجة (X)؟

الحل:

أ وفق مبدأ حفظ العدد الكتلي:

$A_{\text{اليورانيوم}} = A_X + 6\,A_{\text{ألفا}} + 3\,A_{\text{بيتا السالبة}}$ (لاحظ أن ضديد النيوترينو لا كتلة له)

$٢٣٨ = A_X + (٦ \times ٤) + (٣ \times ٠)$

$A_X = ٢١٤$

ب وفق مبدأ حفظ العدد الذري:

$Z_{\text{اليورانيوم}} = Z_X + 6\,Z_{\text{ألفا}} + 3\,Z_{\text{بيتا السالبة}}$ (لاحظ أن ضديد النيوترينو لا شحنة له)

$٩٢ = Z_X + (٦ \times ٢) + (٣ \times (-١))$

$٩٢ = Z_X + ١٢ - ٣$

$Z_X = ٨٣$

وعليه تكون النواة الناتجة هي: $^{214}_{83}X$.

مثال (٨-٦)

تمر نواة البروتكتينيوم $^{234}_{91}Pa$ في إحدى سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي بسلسلة اضمحلالات إشعاعية لتنتج نواة الرصاص $^{210}_{82}Pb$ كما في المعادلة النووية الآتية:

$$^{234}_{91}Pa \longrightarrow {}^{210}_{82}Pb + س\,{}^{4}_{2}He + ص\,{}^{0}_{-1}e + ص\,\overline{\nu}$$

حيث (س): عدد دقائق ألفا المنبعثة، (ص): عدد دقائق بيتا السالبة المنبعثة أو عدد جسيمات ضديد النيوترينو. احسب قيمة (س)، و(ص) في السلسلة السابقة.

الحل:

نبدأ بإيجاد عدد دقائق ألفا المنبعثة، وذلك بتطبيق مبدأ حفظ العدد الكتلي على معادلة الاضمحلال على النحو الآتي:

$$A_{\text{البروتكتينيوم}} = A_{\text{الرصاص}} + س\,A_{\text{ألفا}} + ص\,A_{\text{بيتا السالبة}}$$

$$٢٣٤ = ٢١٠ + (س \times ٤) + (ص \times ٠)$$

$$س = ٦ \text{ دقائق ألفا.}$$

ولإيجاد عدد دقائق بيتا السالبة نطبق مبدأ حفظ العدد الذري على معادلة الاضمحلال على النحو الآتي:

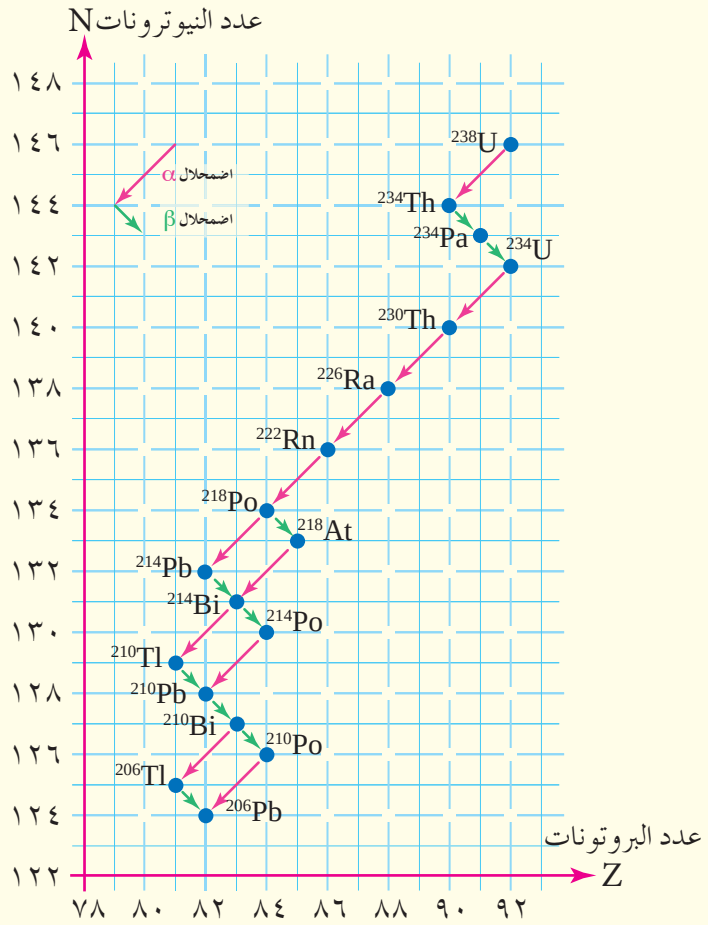
$$Z_{\text{البروتكتينيوم}} = Z_{\text{الرصاص}} + ٦\,Z_{\text{ألفا}} + ص\,Z_{\text{بيتا السالبة}}$$

$$٩١ = ٨٢ + (٦ \times ٢) + (ص \times (-١))$$

$$ص = ٣ \text{ دقائق بيتا السالبة.}$$

١ وضح المقصود بسلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي.

٢ يوضح الشكل(٨–١٠) إحدى سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي، مستعينًا بالشكل أجب عما يأتي:



الشكل(٨–١٠): سؤال (٢).

أ ما اسم هذه السلسلة؟

ب أي نظائر الرصاص الناتجة الآتية مستقر($^{214}_{82}Pb$ ، $^{210}_{82}Pb$ ، $^{206}_{82}Pb$)؟ ولماذا؟

جـ كم عدد كل من دقائق ألفا ودقائق بيتا السالبة المنبعثة نتيجة اضمحلال نواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ إلى نواة بولونيوم $^{218}_{84}Po$ ؟

د اكتب معادلة نووية موزونة تعبر عن الاضمحلالات المذكورة في الفرع السابق.

هـ ما العدد الكتلي والعدد الذري للنواة الناتجة من سلسلة تحولات تبدأ بنواة الراديوم $^{226}_{88}Ra$ تنبعث فيها (٥) دقائق ألفا و (٣) دقائق بيتا السالبة؟

تتحول النواة المستقرة غالبًا إلى نواة مشعة عند إحداث أي تغيير في مكوناتها، وتسمى **العملية التي يتم فيها إحداث تغيير في مكونات نواة ما** **التفاعل النووي الصناعي**، ولإحداث تفاعل نووي بين نواة وجسيم يتم تسريع الجسيم (القذيفة) باستخدام أجهزة خاصة يطلق عليها اسم المسارعات النووية، تكسب القذيفة طاقة حركية كافية تمكنها من اختراق النواة، وإحداث التحولات النووية، ويمكن التعبير عن التفاعل النووي بالمعادلة النووية الآتية:

$$a + X \longrightarrow (C.N)^{*} \longrightarrow Y + b$$

حيث (a): الجسيم القذيفة، و(X): النواة الهدف، و $(C.N)^{*}$: النواة المركبة (Compound Nucleus)، و(Y): النواة الناتجة، و(b): الجسيم الناتج.

تمتص النواة الهدف القذيفة فتتشكّل نواة مركبة تكون في حالة إثارة وعدم استقرار، ثم ما تلبث النواة المركبة أن تضمحل في مدة زمنية قصيرة جدًّا؛ لذلك تعد النواة المركبة حالة انتقالية مؤقتة تتحلل سريعًا في التفاعل النووي، ويسمى الإشعاع الصادر عنها في هذه الحالة إشعاعًا نوويًّا صناعيًّا، ومن الأمثلة على القذائف في التفاعلات النووية: البروتون ($_{1}^{1}H$)، دقائق ألفا ($_{2}^{4}He$)، نواة الديتيريوم ($_{1}^{2}H$). ومن أفضل القذائف النووية المستخدمة في إنتاج النظائر المشعة النيوترون ($_{0}^{1}n$)؛ لأنه متعادل كهربائيًّا، فلا يتفاعل مع النواة تجاذبًا أو تنافرًا. وتوضح المعادلات النووية الآتية بعض الأمثلة على التفاعلات النووية التي تنتج إشعاعات نووية صناعية:

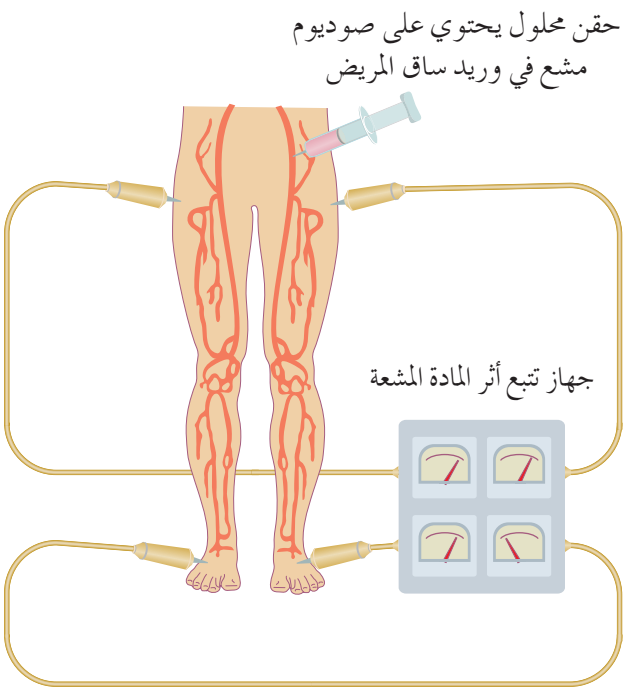
$$_{1}^{1}H + {}_{3}^{7}Li \longrightarrow {}_{4}^{8}Be^{*} \longrightarrow {}_{4}^{7}Be + {}_{0}^{1}n$$

$$_{0}^{1}n + {}_{7}^{14}N \longrightarrow {}_{7}^{15}N^{*} \longrightarrow {}_{6}^{14}C + {}_{1}^{1}H$$

وتكمن أهمية التفاعلات النووية الصناعية في إمكانية تحويل عنصر معين إلى عنصر آخر، وإنتاج النظائر المشعّة، وكذلك الحصول على جسيمات أو أشعة ذات طاقة عالية. ولقد اتسع نطاق استخدام الأشعة النووية الصناعية والنظائر المشعة في الكثير من مجالات الحياة المختلفة ومنها المجال الطبي ومن الأمثلة على ذلك:

(٨-٦-١) التعقب (Tracing)

يتم الكشف عن وجود الانسدادات في الأوعية الدموية أو غيابها عن طريق تعقب الإشعاع في جسم المريض؛ إذ يحقن محلول يحتوي على صوديوم مشع في وريد ساق المريض، لمعرفة مدى نشاط الدورة الدموية لديه، لاحظ الشكل (٨-١١)، ويستطيع الطبيب باستخدام أجهزة خاصة أن يقتفي أثر المادة المشعة ويعرف ما إذا كان دم المريض ينساب بشكل طبيعي في الأوعية الدموية أم لا، ليتم تحديد موقع الانسداد بدقة ووصف العلاج اللازم.



الشكل(٨-١١): أحد استخدامات تعقب الإشعاع في الطب.

(٨-٦-٢) العلاج بالإشعاع (RadioTherapy)

يمكن أن يكون الإشعاع النووي مفيدًا في الدرجة الأولى في قتل الخلايا السرطانية ذات الانقسامات السريعة، فعندما يتركز الورم في منطقة محددة من الجسم يتم القضاء عليه بتوجيه حزمة ضيقة عالية التركيز من أشعة غاما نحو النسيج السرطاني، وتستخدم أشعة غاما المنبعثة من أحد النظائر المشعة، مثل الكوبالت $^{60}_{27}Co$، ويمكن استخدام الأشعة السينية أو البروتونات أو النيوترونات لهذا الأمر، وذلك باستخدام أجهزة خاصة كما في الشكل(٨-١٢).

الشكل(٨-١٢): جهاز علاج السرطان بالإشعاع.

وبالرغم من المنافع الكثيرة التي نجنيها من الأشعة النووية عند العلاج بها؛ إلا أن لها أضرارًا وأخطارًا يصعب تجاهلها؛ لذلك عند العلاج بالإشعاع لا بدّ أولًا من تحديد نوع الإشعاع وطاقته والعضو المعرَّض له (الجلد، العظام، الكبد،...) بالإضافة إلى زمن التعرض للإشعاع ومدى قرب الجسم من مصدر الإشعاع لكي يكون الضرر أقل ما يمكن. ويعد الإشعاع مصدر خطر حقيقي على صحة الإنسان تبعًا لقدرة الإشعاع على التأيين؛ فإذا كان مصدر الإشعاع داخل الجسم كأن يتناول الشخص طعامًا ملوّثًا بالإشعاع، تكون دقائق ألفا في هذه الحالة أكثر خطورة من غيرها؛ إذ ينتج من عملية التأيين التي تحدثها دقائق ألفا (α) تفاعلات كيميائية تؤدي إلى إتلاف خلايا الجسم وأنسجته وتحويل الخلايا السليمة التي تعرضت لها إلى خلايا سرطانية، وحدوث طفرات وتغيرات في المادة الوراثية قد تؤدي إلى ولادة أطفال مشوهين، أما إذا كان مصدر الإشعاع خارج الجسم فإن أشعة غاما تعد الأخطر لقدرتها العالية على النفاذ.

مراجعة (٨-٦)

١ وضح المقصود بالتفاعل النووي الصناعي.

٢ ما التغيرات التي تطرأ على النواة الهدف عند التحامها بقذيفة في أي تفاعل نووي؟

٣ حدد مع بيان السبب الأشعة النووية الأكثر خطورة على الإنسان عند التعرض لها:

أ من مصدر خارج جسم الإنسان.

ب من مصدر داخل جسم الإنسان.

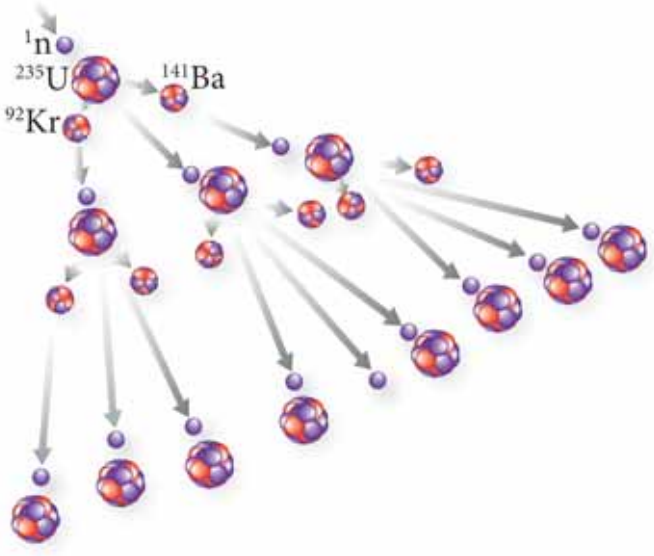
(٨-٧-١) الانشطار النووي (Nuclear Fission)

يعد الانشطار النووي أهم التفاعلات النووية الصناعية، ويعرف **الانشطار النووي** **بأنه تفاعل نووي يحدث فيه انقسام نواة ثقيلة، عند قذفها بنيوترون، إلى نواتين متوسطتي الكتلة، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة يتحول إلى طاقة** وفقًا لمعادلة أينشتين في تكافؤ الطاقة والكتلة. ويبدأ الانشطار النووي عندما تُقذف نواة ثقيلة كاليورانيوم $^{235}_{92}U$ بنيوترون بطيء فتصبح في حالة إثارة لزمن قصير جدًّا؛ ما يجعلها نشطة إشعاعيًّا، فتنشطر إلى نواتين مختلفتين منتجة نيوترونين أو ثلاثة نيوترونات سريعة مع كمية هائلة من الطاقة، كما في أحد الاحتمالات الآتية لتفاعل الانشطار:

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{236}_{92}U^{*} \longrightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

وتكمن أهمية هذا التفاعل في كمية الطاقة الكبيرة المتحررة منه؛ إذ إن انشطار (١) كغ من اليورانيوم $^{235}_{92}U$ ينتج منه طاقة تبلغ (٥,٣٢ × ١٠^{٢٦}) مليون إلكترون فولت، وهذه الطاقة تكفي لتشغيل مصباح قدرته (١٠٠) واط لمدة (٣٠٠٠٠) سنة تقريبًا؛ وهذا ما حدا بالعلماء للاستفادة من هذه الطاقة في النواحي المختلفة في الحياة.

تتمكن النيوترونات الناتجة من انشطار نواة اليورانيوم $^{235}_{92}U$ من شطر نوًى أخرى من اليورانيوم $^{235}_{92}U$ في كتلة من اليورانيوم، وبذا يقود كل تفاعل انشطار نووي إلى انشطارات نووية أخرى ويسمى **تتابع انشطار النوى الثقيلة مثل اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) نتيجة قذفها بنيوترونات تنبعث من نوى يورانيوم انشطرت سابقًا** **التفاعل النووي المتسلسل** (Nuclear Chain Reaction). ويوضح الشكل (٨-١٣) التفاعل المتسلسل الذي يحدث عند قذف كتلة من اليورانيوم $^{235}_{92}U$ بنيوترون بطيء.

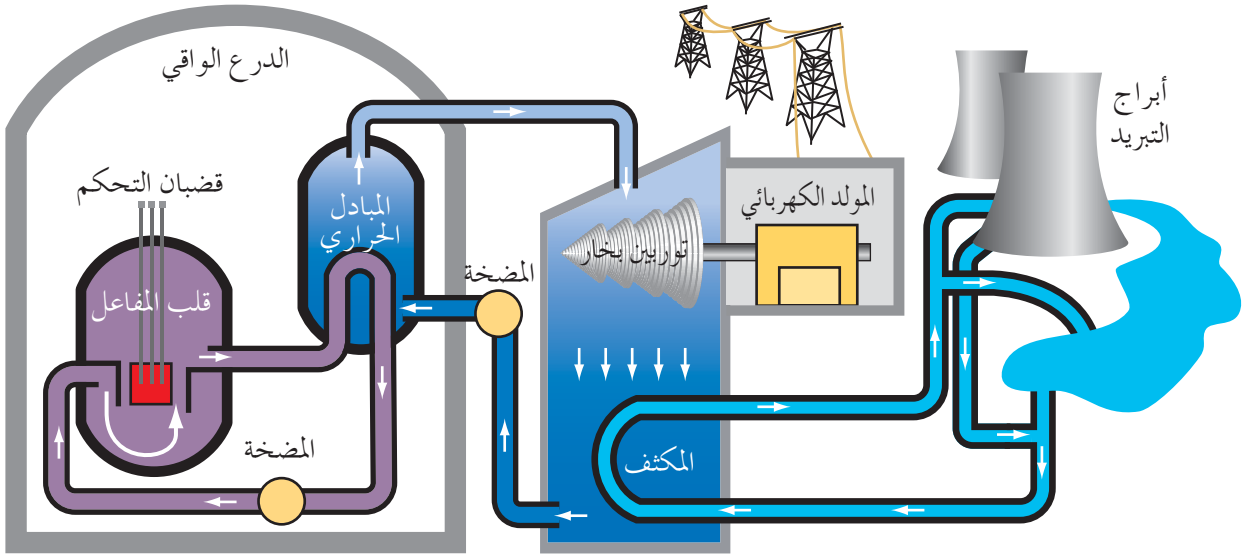


الشكل(٨-١٣): التفاعل المتسلسل.

ويجب إبطاء سرعة النيوترونات الناتجة من كل انشطار حتى تتمكن من شطر نوى اليورانيوم الأخرى، ولضمان استمرار التفاعل المتسلسل يجب منع تسرب النيوترونات الناتجة من الانشطار خارج كتلة اليورانيوم، ويسمى **الحد الأدنى من كتلة اليورانيوم اللازم لمنع تسرب النيوترونات وإدامة حدوث التفاعل المتسلسل** **الكتلة الحرجة** (Critical Mass).

(٨-٧-٢) المفاعل النووي (Nuclear Reactor)

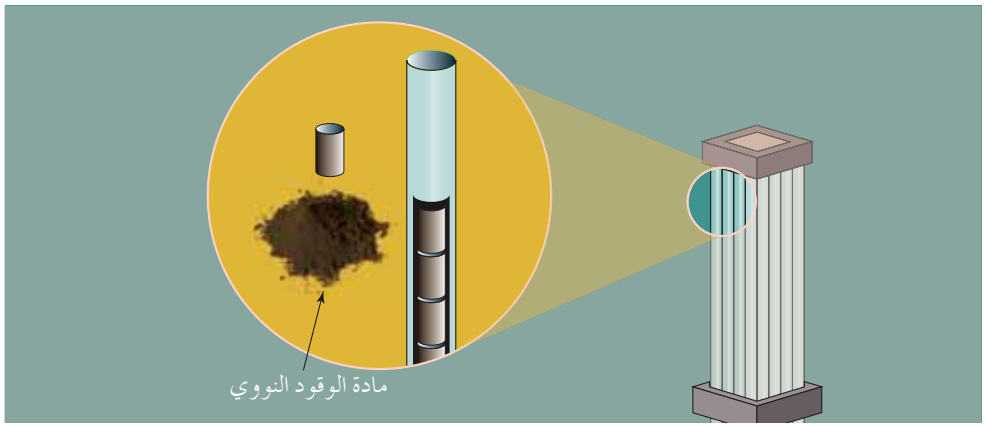
يسمى النظام الذي يعمل على توفير الظروف المناسبة لاستمرار تفاعل الانشطار النووي والسيطرة عليه **المفاعل النووي**، ويوجد عدة أنواع من المفاعلات تبعًا لطريقة التبريد المستخدمة فيها، ويبين الشكل(٨-١٤) أجزاء مفاعل الماء المضغوط.



الشكل(٨-١٤): أجزاء مفاعل الماء المضغوط.

١ **قلب المفاعل، ويتكون من:**

أ **مادة الوقود النووي** (يورانيوم $^{235}_{92}U$ أو بلوتونيوم $^{239}_{94}Pu$): تُحضَّر في صورة أقراص توضع فوق بعضها داخل أنابيب طويلة مشكلة ما يعرف بحزم الوقود النووي التي تظهر في الشكل (٨-١٥).



الشكل(٨–١٥): أقراص وحزم الوقود النووي.

ب **قضبان التحكم**: قضبان من الكادميوم تتحكم في سرعة التفاعل المتسلسل وتعمل آليًّا، ذات كفاءة عالية في امتصاص النيوترونات، حيث تفصل بين أنابيب حزم الوقود النووي فتحات مخصصة لإدخال عدد مناسب من قضبان التحكم لكي تمتص بعض النيوترونات عند الحاجة إلى إبطاء عملية الانشطار وإبقائها ضمن المعدل المطلوب، وتسمى هذه العملية **التحكم**.

جـ **المواد المهدئة للنيوترونات**: مواد ذات أعداد كتلية صغيرة كالماء العادي H_2O توضع في طريق النيوترونات السريعة الناتجة من تفاعلات الانشطار لتصطدم بها النيوترونات وتقل سرعتها، فتصبح قادرة على إحداث تفاعل انشطار جديد، وتعرف هذه العملية **بالتهدئة**، وفي أنواع أخرى من المفاعلات تستخدم مواد مهدئة مختلفة كالغرافيت والماء الثقيل D_2O.

٢ **المبادل الحراري**: يستخدم الماء الساخن جدًّا والمضغوط القادم من قلب المفاعل، في تسخين الماء الموجود في المبادل الحراري لإنتاج البخار اللازم الذي يذهب لإدارة العنفات (التوربينات) المتصلة بمولدات الطاقة الكهربائية.

٣ **الدرع الواقي**: يحيط بقلب المفاعل وبالمبادل الحراري للوقاية من التسرب الإشعاعي.

٤ **المولدات الكهربائية**: تحول الطاقة الحرارية والحركية لبخار الماء إلى طاقة كهربائية.

٥ **المكثف**: يعمل على تحويل بخار الماء الفائض إلى ماء.

٦ **أبراج التبريد**: تعمل على تزويد المكثف والمبادل الحراري بالماء اللازم.

يبدأ تشغيل المفاعل برفع قضبان التحكم ببطء من قلب المفاعل، وعندئذ يبدأ التفاعل المتسلسل، وتظهر الطاقة المتحررة من تفاعلات الانشطار على شكل طاقة حرارية تعمل على تسخين الماء، وإنتاج البخار اللازم لإدارة العنفات (التوربينات) المتصلة بمولدات الطاقة الكهربائية.

وتكمن خطورة التعامل مع المفاعل النووي بفقدان السيطرة عليه أو انفجاره، لذا يجب مراعاة أمور قبل إنشاء المفاعل النووي منها: اختيار أماكن نائية بعيدة عن التجمعات السكنية، وفي الوقت ذاته قريبة من مصادر وافرة للمياه، وضرورة وجود هيئات دولية تضبط بناء المفاعلات وتشغيلها، وتعنى برقابة سلامة تصريف نفايات المواد المشعة عند استبدال وقود المفاعل، وتعنى أيضًا بفحص الحاويات المستخدمة في نقل الوقود النووي باستمرار.

(٨-٧-٣) الاندماج النووي (Nuclear Fusion)

درست في منحنى(طاقة الربط النووية لكل نيوكليون– العدد الكتلي) أن طاقة الربط النووية لكل نيوكليون للنوى الخفيفة تكون أقل منها للنوى المتوسطة المستقرة؛ وتحت ظروف معينة يمكن أن تندمج بعض النوى الخفيفة معًا مثل الهيدروجين لإنتاج نوى أثقل، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة، ويظهر على شكل طاقة عالية جدًّا، وتعرف **عملية اتحاد نواتين خفيفتين لتكوين نواة جديدة كتلتها أقل من مجموع كتلتيهما بالاندماج النووي**.

ويشكل الهيدروجين معظم كتلة النجوم؛ لذا تستمد بعض النجوم ومنها الشمس طاقتها من سلسلة تفاعلات اندماج رئيسة تعرف بدورة بروتون – بروتون يكون ناتجها النهائي تجمع أربعة بروتونات لتشكيل نواة هيليوم ${}^{4}_{2}He$ كما في التفاعل الآتي:

$$4\,{}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2\,{}^{0}_{+1}e + 2\,\nu$$

وبما أن النوى الداخلة في تفاعل الاندماج جميعها موجبة الشحنة وصغيرة الحجم فإن رفع درجة حرارتها إلى ما يقارب ($١٠^{٧}$) كلفن تحت ضغط هائل شرط أساسي لاندماجها؛ حيث تزيد درجة الحرارة من سرعة النوى؛ فتزداد طاقتها الحركية، وتمكنها من الاقتراب كثيرًا من بعضها والتغلب على قوة التنافر الكهربائية، فيتم الاندماج النووي؛ لذلك يسمى هذا التفاعل **التفاعل النووي الحراري**.

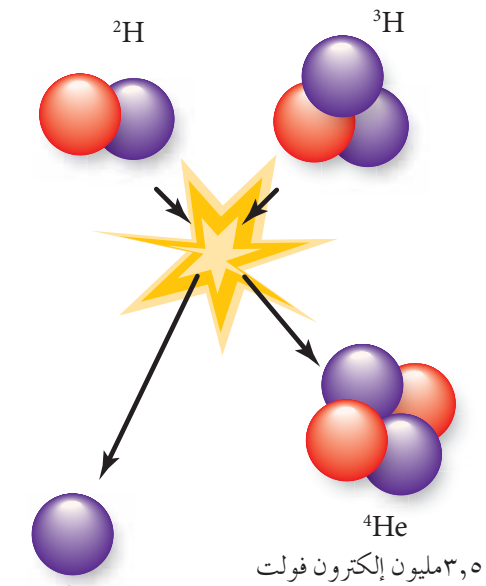
ويصعب حاليًّا إجراء تفاعلات الاندماج النووي في المختبرات العلمية، إلا أن خير مثال على حدوثها، التفاعلات الحاصلة في باطن الشمس والنجوم؛ حيث تتوافر درجات الحرارة العالية والضغط الهائل اللازمان لحدوث تفاعل الاندماج النووي.

وتفوق الطاقة لكل نيوكليون الناتجة من تفاعلات الاندماج أضعاف مضاعفة الطاقة لكل نيوكليون الناتجة من تفاعلات الانشطار؛ لذا يسعى العلماء لإنتاج الطاقة على سطح الأرض من دمج نظيري

الهيدروجين: الديتيريوم $^{2}_{1}H$ والتريتيوم $^{3}_{1}H$ كما في الشكل(٨-١٦)، حيث يكون مجموع كتل النوى الداخلة في التفاعل أكبر من مجموع كتل النوى والجسيمات الخارجة من التفاعل، وتوضح المعادلة النووية الآتية هذا التفاعل:

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

وللاستفادة من هذا التفاعل يتعين توفير مفاعل نووي حراري لم يخرج بعد عن حيز التجريب، إذ لا تزال أمامه الكثير من العقبات بالرغم من تغلب العلماء على بعض منها، ونأمل أن تكون أنت مستقبلًا أحد من يتغلب على ما تبقى منها.



الشكل(٨-١٦): تفاعل اندماج التريتيوم والديتيريوم.

مراجعة (٨-٧)

١ وضح المقصود بكل من: الانشطار النووي، والتفاعل المتسلسل، والمفاعل النووي، والاندماج النووي.

٢ اذكر:

أ شرطي حدوث التفاعل المتسلسل.

ب أجزاء مفاعل الماء المضغوط.

٣ فسر العبارات الآتية:

أ تصنع قضبان التحكم المستخدمة في المفاعل النووي من الكادميوم.

ب من الأمور الواجب مراعاتها قبل إنشاء المفاعل النووي ضرورة إشراف هيئات دولية.

٤ كيف تضبط كل من الأمور الآتية في المفاعل النووي:

أ منع تسرب النيوترونات؟

ب التحكم في سرعة التفاعل المتسلسل؟

جـ إبطاء سرعة النيوترونات الناتجة من تفاعلات الانشطار؟

٥ قارن بين تفاعلي الانشطار والاندماج النوويين من حيث الوقود المستخدم، والطاقة الناتجة، وشروط حدوث كل تفاعل.

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

١ أي العبارات الآتية تصف الذرتين ($^{63}_{29}X$)، ($^{67}_{33}Y$) وصفًا صحيحًا؟

أ $N_y < N_x$.
ب $N_y > N_x$.
جـ $N_y = N_x$.
د $Z_y = Z_x$.

٢ وظيفة الغرافيت في المفاعل النووي هي:

أ امتصاص بعض النيوترونات.
ب إيقاف النيوترونات.
جـ زيادة سرعة النيوترونات.
د إبطاء سرعة النيوترونات.

٣ أكمل المعادلة النووية الآتية ($^{76}_{33}As \longrightarrow {}^{76}_{34}Se + {}^{0}_{-1}e + ...$) بملء الفراغ بأحد الإشعاعات الآتية:

أ نيوترينو.
ب ضديد النيوترينو.
جـ غاما.
د ألفا.

٤ لكي يتحول العنصر $^{A}_{Z}X$ إلى العنصر $^{A}_{Z+1}Y$ تلقائيًا لا بد للعنصر X من أن:

أ يكتسب نيوترونًا.
ب يبعث دقيقة ألفا.
جـ يبعث أشعة غاما.
د يبعث دقيقة بيتا السالب وضديد النيوترينو.

٥ القوى التي تنشأ بين بروتون وبروتون داخل النواة هي:

أ جذب نووي فقط.
ب تنافر كهربائي فقط.
جـ جذب نووي وتنافر كهربائي.
د تنافر نووي وجذب كهربائي.

٦ في المعادلة الآتية ($^{208}_{84}Po \longrightarrow {}^{204}_{82}Pb + {}^{A}_{Z}X$)، القيم الصحيحة لكل من(A، Z) على الترتيب:

أ (٤،٢)
ب (٢،٤)
جـ (٤،٤)
د (٢،٢)

٧ يعد البوزيترون المنبعث في المعادلة النووية الآتية ($^{64}_{29}Cu \longrightarrow {}^{64}_{28}Ni + {}^{0}_{+1}e + \nu$) ناتج تحلل:

أ نيوترون من نواة النيكل ($^{64}_{28}Ni$)
ب بروتون من نواة النيكل ($^{64}_{28}Ni$)
جـ نيوترون من نواة النحاس ($^{64}_{29}Cu$)
د بروتون من نواة النحاس ($^{64}_{29}Cu$)

٢ أكمل المعادلات النووية الآتية بكتابة الرموز والأرقام المناسبة في كل فراغ:

$$^{27}_{13}Al^{*} \longrightarrow {}^{27}_{13}Al + \cdots$$

$$^{230}_{90}Th \longrightarrow {}^{226}_{88}Ra + \cdots$$

$$^{27}_{13}Al + {}^{1}_{0}n \longrightarrow \cdots \longrightarrow {}^{28}_{13}Al + \gamma$$

$$^{76}_{33}As \longrightarrow {}^{76}_{34}Se + \cdots + \cdots$$

$$^{26}_{13}Al \longrightarrow {}^{26}_{12}Mg + \cdots + \cdots$$

٣ اذكر أهمية واحدة لكل من:

أ مقدار طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

ب قضبان التحكم في المفاعل النووي.

جـ الكتلة الحرجة.

د المسارعات النووية.

هـ نظير الكوبالت المشع $^{60}_{27}Co$.

و عملية التعقب في الأوعية الدموية في المجال الطبي.

٤ يمكن للنواة ($^{A}_{Z}X$) أن تضمحل باعثة دقيقة ألفا أو دقيقة بيتا، وضح بالمعادلات النووية المناسبة التغيرات التي تطرأ على هذه النواة، وذلك عندما تبعث:

أ دقيقة ألفا فقط.

ب دقيقة بيتا السالبة فقط.

٥ في التفاعل النووي الآتي: $^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \longrightarrow {}^{18}_{9}F^{*} \longrightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$

أ ما القذيفة المستخدمة؟

ب حدد النواة المركبة في التفاعل.

جـ أي النواتج يمتلك أكبر طاقة حركية؟

د ما مبادئ حفظ الكميات الفيزيائية التي يجب أن تتحقق في هذا التفاعل؟

٦ احسب:

أ الطاقة اللازمة لفصل نواة النيكل $^{60}_{28}Ni$ إلى مكوناتها، علمًا بأن كتلة نواة النيكل تساوي (٥٩,٩٣٠٨) و.ك.ذ

ب طاقة الربط النووية لكل نيوكليون في نواة الليثيوم $^{8}_{3}Li$. إذا علمت أن فرق الكتلة بين كتلة نواة الليثيوم ومجموع كتل مكوناتها يساوي (Δك= ٠,٠٦٢٨) و.ك.ذ.

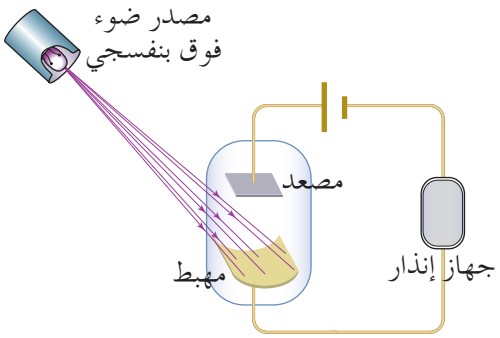
٧ قارن بين دقائق ألفا ودقائق بيتا وأشعة غاما بملء الجدول الآتي:

نوع الإشعاع / أوجه المقارنة	دقائق ألفا	دقائق بيتا	أشعة غاما
الطبيعة	جسيمات		
الشحنة		إما سالبة (الإلكترون) أوموجبة (البوزيترون)	
الكتلة		تساوي كتلة الإلكترون وأقل من كتلة ألفا	
القدرة على النفاذ		كبيرة	
السرعة			تساوي سرعة الضوء
القدرة على التأين	كبيرة نسبيًّا		

٨ إذا علمت أن كتلة نواة الأكسجين $^{16}_{8}O$ تساوي (١٥,٩٩٤٩) و.ك.ذ، وكتلة نواة الفضة $^{107}_{47}Ag$ تساوي (١٠٦,٩٠٥١) و.ك.ذ. بيّن أي النواتين أكثر استقرارًا، مدعمًا إجابتك رياضيًّا.

٩ تمر نواة اليورانيوم $^{235}_{92}U$ في الطبيعة بسلسلة اضمحلالات، فإذا كانت أول خمسة اضمحلالات على الترتيب لها: (α ، β^- ، α ، β^- ، α)، جد العدد الذري والعدد الكتلي للنواة الناتجة في نهاية هذه الاضمحلالات.

١ يوضح الشكل رسمًا تخطيطيًّا لأحد أجهزة الإنذار ضد السرقة، الذي يعد أحد التطبيقات العملية على الظاهرة الكهرضوئية. يصدر عن الجهاز صوت تحذيري إذا حدث قطع في مسار الأشعة فوق البنفسجية، ادرس الشكل، وأجب عن الأسئلة الآتية:



أ ما وظيفة كل من المهبط والمصعد في الخلية الكهرضوئية؟

ب صف ما يحدث في الخلية الكهرضوئية عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على المهبط، وعند حدوث قطع في مسار الأشعة.

جـ هل يتأثر عمل الجهاز إذا زاد تردد الأشعة الساقطة على المهبط أو زادت شدتها؟ وضح إجابتك.

د إذا كان اقتران الشغل لفلز المهبط (٢) إلكترون فولت، فأجب عما يأتي:

- ما المقصود باقتران الشغل للفلز؟
- إذا كانت الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعثة تساوي ٣ إلكترون فولت، فاحسب تردد الأشعة فوق البنفسجية.

٢ يشير بور في أحد فروضه المتعلقة بذرة الهيدروجين إلى أن الإلكترون يشع طاقة أو يمتصها إذا انتقل من مستوى طاقة (مدار) إلى مستوى طاقة آخر فقط، فإذا كان الإلكترون موجود في المدار الثالث (ن = ٣) عند لحظة معينة فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ يمتص إلكترون ذرة الهيدروجين أو يشع مقادير محددة من الطاقة. فسر ذلك.

ب ما أقل طاقة وما أكبر طاقة يمكن أن يشعها الإلكترون؟

جـ جد نصف قطر المدار الثالث.

د احسب للإلكترون في المدار الثالث كل من:

- الزخم الزاوي
- الزخم الخطي
- السرعة
- طول موجة دي بروي المصاحبة له

٣ إحدى الفرضيات المهمة في فيزياء الكم "الطبيعة المزدوجة لكل من الإشعاع والمادة":

أ بين ما تعنيه هذه العبارة.

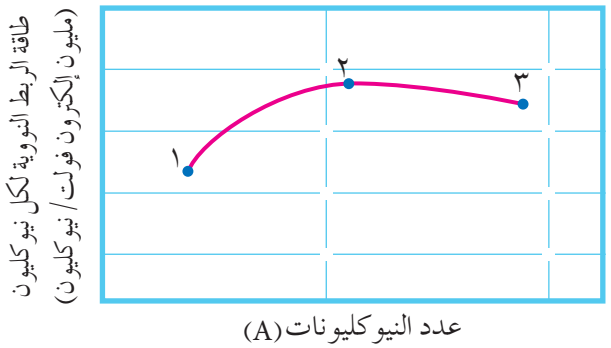
ب اذكر دليلًا عمليًّا يدعم سلوك الإشعاع بوصفه جسيمًا، وآخر يدعم سلوك المادة بوصفها موجة.

٤ إذا علمت أن طاقة الربط النووية لنواة النتروجين $^{14}_{7}N$ تساوي (١٠٨) مليون إلكترون فولت:

أ وضح المقصود بطاقة الربط النووية.

ب احسب كتلة نواة النتروجين.

٥ يوضح الشكل المجاور التمثيل البياني للعلاقة بين عدد النيوكليونات، وطاقة الربط النووي لكل نيوكليون، وتشير الأرقام (١، ٢، ٣) على المنحنى في الشكل إلى ثلاثة نظائر:

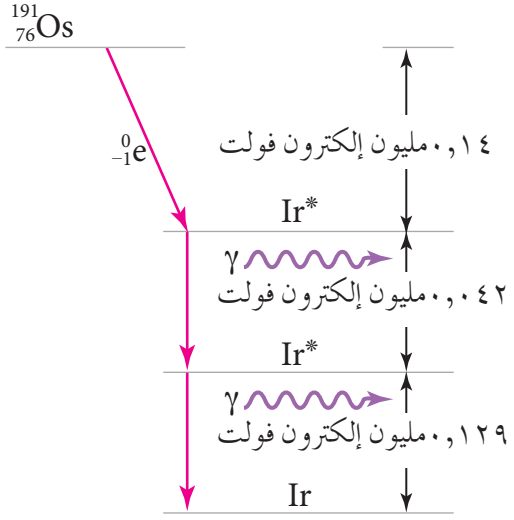


أ وضح المقصود بالنظائر.

ب رتب تنازليًّا هذه النظائر وفق الطاقة اللازمة لفصل نيوكليون واحد من نواة كل منها.

٦ تضمحل نواة أوزميوم $^{191}_{76}Os$ باعثة دقيقة بيتا سالبة طاقتها (٠,١٤) مليون إلكترون فولت في المرحلة الأولى لاحظ الشكل، ثم أشعة غاما طاقتها ٠,٠٤٢ مليون إلكترون فولت في المرحلة الثانية، ثم أشعة غاما طاقتها (٠,١٢٩) مليون إلكترون فولت في المرحلة الثالثة لكي تصل إلى حالة الاستقرار.

تأمل الشكل ثم أجب عما يأتي:



أ جد العدد الذري والعدد الكتلي للنواة الناتجة المستقرة وفق المعادلة الآتية.

$$^{191}_{76}Os \longrightarrow {}^{\cdots\cdots}_{\cdots\cdots}Ir + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

ب ما الطاقة التي يجب أن تبعثها نواة Os في مرحلة واحدة حتى تستقر؟

المفاهيم والمصطلحات

المصطلح	باللغة الإنجليزية
اقتران الشغل	**(Work Function)**
أقل طاقة يمتلكها فوتون الضوء تلزم لتحرير إلكترون من سطح الفلز من غير إكسابه طاقة حركية.	
الاندماج النووي	**(Nuclear Fusion)**
تفاعل نووي تتحد فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة جديدة كتلتها أقل من مجموع كتلتيهما.	
الانشطار النووي	**(Nuclear Fission)**
تفاعل نووي يحدث فيه انقسام نواة ثقيلة عند قذفها بنيوترون إلى نواتين متوسطتي الكتلة، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة يتحول إلى طاقة.	
التدفق المغناطيسي	**(Magnetic flux)**
عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق سطحًا ما عموديًّا عليه.	
تردد العتبة	**(Threshold Frequency)**
أقل تردد للضوء يلزم لتحرير إلكترونات من سطح فلز.	
التفاعل النووي المتسلسل	**(Nuclear Chain Reaction)**
تتابع انشطار النوى الثقيلة مثل اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) نتيجة قذفها بنيوترونات تنبعث من نوى يورانيوم انشطرت سابقًا.	
تيار الإشباع	**(maximum current)**
التيار الكهرضوئي الناتج من حركة الإلكترونات الضوئية جميعها المتحرّرة من المهبط والواصلة إلى المصعد.	
التيار الكهربائي	**(Electric Current)**
كمية الشحنة التي تعبر مقطع موصل في وحدة الزمن.	
جهد القطع	**(Cutoff Potential)**
فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لجعل التيار الكهرضوئي صفرًا، أو فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لإيقاف أسرع الإلكترونات الضوئية.	
الجهد الكهربائي عند نقطة	**(Electric Potential)**
طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة موضوعة عند تلك النقطة في مجال كهربائي.	
الحث الذاتي	**(Self-Inductance)**
تولّد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في ملف بسبب تغير التدفق المغناطيسي من الملف ذاته.	
السرعة الانسياقية	**(Drift Velocity)**
متوسط سرعة الإلكترونات الحرة داخل الموصل عندما تنساق بعكس اتجاه المجال الكهربائي المؤثر فيها.	
سطح تساوي الجهد	**(Equipotential Surface)**
السطح الذي يكون الجهد عند نقاطه جميعها متساويًا ويساوي قيمة ثابتة.	

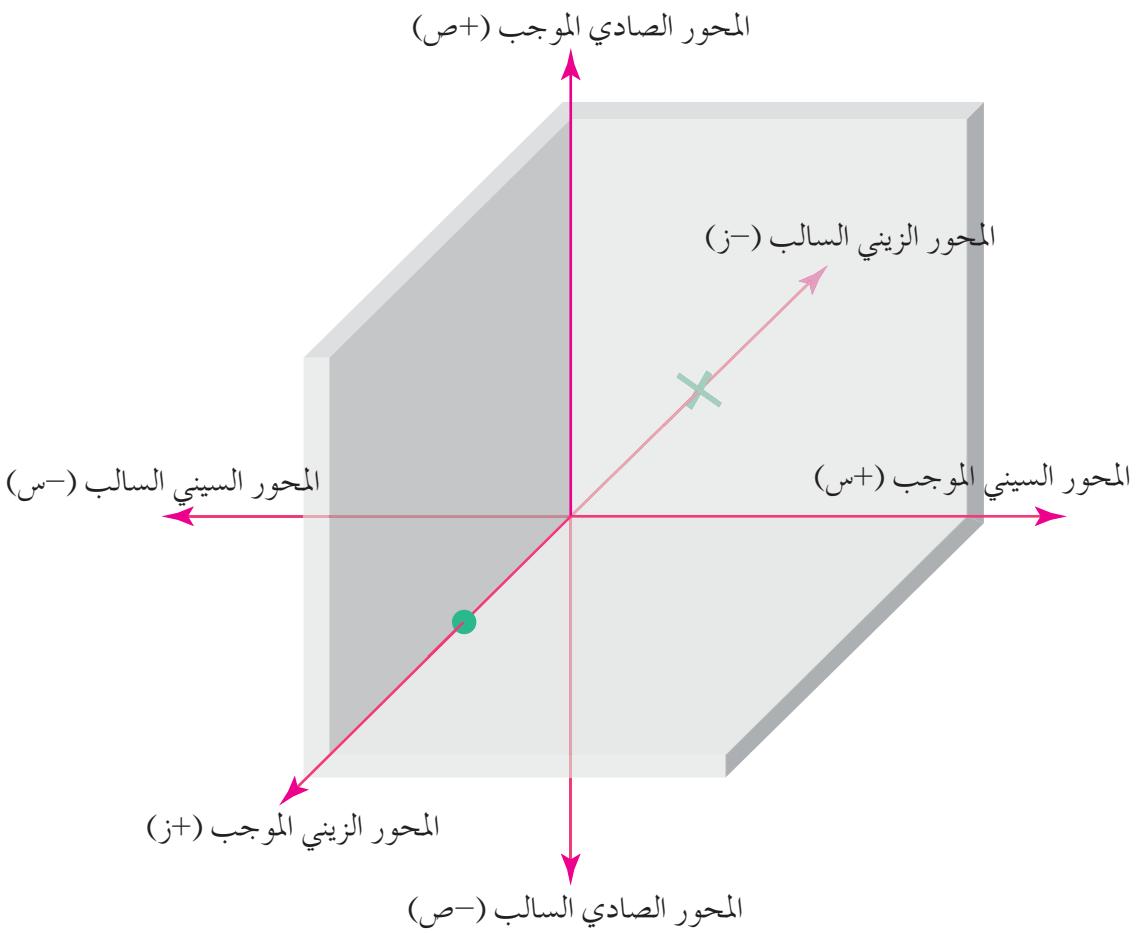
طاقة الربط النووية	(Nuclear Binding Energy)
مقدار الطاقة الخارجية التي يجب أن تزود بها النواة لفصل مكوناتها عن بعضها نهائيًا.	
ظاهرة الحث الكهرمغناطيسي	(Electromagnetic induction)
ظاهرة توليد التيار الحثي بسبب تغير التدفق المغناطيسي عبر ملف.	
الظاهرة الكهرضوئية	(Photoelectric Effect)
ظاهرة انبعاث إلكترونات من سطح فلز يتعرض لإشعاع كهرمغناطيسي عندما يكون تردد الإشعاع أكبر أو يساوي تردد العتبة للفلز.	
القدرة الكهربائية	(Electric Power)
الشغل المبذول (ش) لنقل شحنة بين نقطتين بينهما فرق في الجهد في وحدة الزمن (ز).	
القوة الدافعة الكهربائية	(Electromotive Force)
الشغل الذي تبذله البطارية لدفع وحدة الشحنات الموجبة من القطب السالب إلى القطب الموجب داخلها.	
القوة النووية	(Nuclear Force)
قوة تجاذب ذات مدى قصير جدًّا تربط النيوكليونات المتجاورة في النواة.	
المجال الكهربائي عند نقطة	(Electric field)
القوة الكهربائية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة الموضوعة عند تلك النقطة.	
المجال المغناطيسي المنتظم	Uniform Magnetic Field
المجال المغناطيسي الثابت مقدارًا واتجاهًا عند نقاطه جميعها.	
المجال المغناطيسي عند نقطة	(The Magnetic Field)
القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة لحظة مرورها بسرعة (١) م/ث عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي عند تلك النقطة.	
المقاومة الكهربائية	(Electric Resistance)
إعاقة حركة الإلكترونات الحرة في الموصل عند مرور تيار كهربائي فيه.	
المقاومية	(Resistivity)
تساوي عدديًّا مقاومة جزء من المادة طوله (١) م ومساحة مقطعه (١) م^{٢} عند درجة حرارة محددة.	
المواسعة الكهربائية	(Capacitance)
النسبة بين كمية الشحنة المختزنة في المواسع وفرق الجهد بين طرفيه (صفيحتيه).	
الهنري	(Henry)
محاثة محث تتولد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية مقدارها (١) فولت عندما يكون المعدل الزمني لتغيّر التيار المار فيه (١) أمبير/ث.	

جدول الاقترانات المثلثية

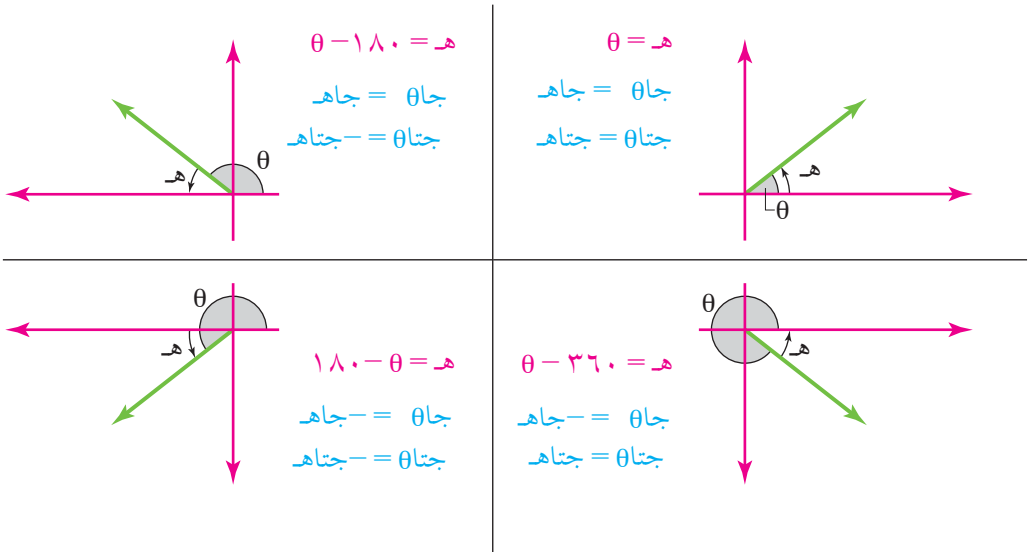
الزاوية	الجيب	جيب التمام	الظل
صفر	٠,٠٠٠٠	١,٠٠٠	٠,٠٠٠
١	٠,٠١٨	١,٠٠٠	٠,٠١٨
٢	٠,٠٣٥	٠,٩٩٩	٠,٠٣٥
٣	٠,٠٥٢	٠,٩٩٩	٠,٠٥٢
٤	٠,٠٧٠	٠,٩٩٨	٠,٠٧٠
٥	٠,٠٨٧	٠,٩٩٦	٠,٠٨٨
٦	٠,١٠٥	٠,٩٩٥	٠,١٠٥
٧	٠,١٢٢	٠,٩٩٣	٠,١٢٣
٨	٠,١٣٩	٠,٩٩٠	٠,١٤١
٩	٠,١٥٦	٠,٩٨٩	٠,١٥٨
١٠	٠,١٧٤	٠,٩٨٥	٠,١٧٦
١١	٠,١٩١	٠,٩٨٢	٠,١٩٤
١٢	٠,٢٠٨	٠,٩٧٨	٠,٢١٣
١٣	٠,٢٢٥	٠,٩٧٤	٠,٢٣١
١٤	٠,٢٤٢	٠,٩٧٠	٠,٢٤٩
١٥	٠,٢٥٩	٠,٩٦٦	٠,٢٦٨
١٦	٠,٢٧٦	٠,٩٦١	٠,٢٨٧
١٧	٠,٢٩٢	٠,٩٥٦	٠,٣٠٦
١٨	٠,٣٠٩	٠,٩٥١	٠,٣٢٥
١٩	٠,٣٢٦	٠,٩٤٦	٠,٣٤٤
٢٠	٠,٣٤٢	٠,٩٤٠	٠,٣٦٤
٢١	٠,٣٥٨	٠,٩٣٤	٠,٣٨٤
٢٢	٠,٣٧٥	٠,٩٢٧	٠,٤٠٤
٢٣	٠,٣٩١	٠,٩٢١	٠,٤٢٥
٢٤	٠,٤٠٧	٠,٩١٤	٠,٤٤٥
٢٥	٠,٤٢٣	٠,٩٠٦	٠,٤٦٦
٢٦	٠,٤٣٨	٠,٨٩٩	٠,٤٨٨
٢٧	٠,٤٥٤	٠,٨٩١	٠,٥١٠
٢٨	٠,٤٧٠	٠,٨٨٣	٠,٥٣١
٢٩	٠,٤٨٥	٠,٨٧٥	٠,٥٥٤
٣٠	٠,٥٠٠	٠,٨٦٦	٠,٥٧٧
٣١	٠,٥١٥	٠,٨٥٧	٠,٦٠٤
٣٢	٠,٥٣٠	٠,٨٤٨	٠,٦٢٥
٣٣	٠,٥٤٥	٠,٨٣٩	٠,٦٥٠
٣٤	٠,٥٥٩	٠,٨٢٩	٠,٦٧٥
٣٥	٠,٥٧٤	٠,٨١٩	٠,٧٠٠
٣٦	٠,٥٨٨	٠,٨٠٩	٠,٧٢٧
٣٧	٠,٦٠٢	٠,٧٩٩	٠,٧٥٤
٣٨	٠,٦١٦	٠,٧٨٨	٠,٧٨١
٣٩	٠,٦٢٩	٠,٧٧٧	٠,٨١٠
٤٠	٠,٦٤٣	٠,٧٦٦	٠,٨٣٩
٤١	٠,٦٥٦	٠,٧٥٥	٠,٨٦٩
٤٢	٠,٦٦٩	٠,٧٣٤	٠,٩٠٠
٤٣	٠,٦٨٢	٠,٧٣١	٠,٩٣٢
٤٤	٠,٦٩٥	٠,٧١٩	٠,٩٦٦
٤٥	٠,٧٠٧	٠,٧٠٧	١,٠٠٠

الزاوية	الجيب	جيب التمام	الظل
٤٦	٠,٧١٩	٠,٦٩٥	١,٠٣٦
٤٧	٠,٧٣١	٠,٦٨٢	١,٠٧٢
٤٨	٠,٧٤٣	٠,٦٦٩	١,١١٠
٤٩	٠,٧٥٦	٠,٦٥٦	١,١٥٠
٥٠	٠,٧٦٦	٠,٦٤٣	١,١٩٢
٥١	٠,٧٧٧	٠,٦٢٩	١,٢٣٥
٥٢	٠,٧٨٨	٠,٦١٦	١,٢٨٠
٥٣	٠,٧٩٩	٠,٦٠٢	١,٣٢٧
٥٤	٠,٨٠٩	٠,٥٨٨	١,٣٧٦
٥٥	٠,٨١٩	٠,٥٧٤	١,٤٢٨
٥٦	٠,٨٢٩	٠,٥٥٩	١,٤٨٣
٥٧	٠,٨٣٩	٠,٥٤٥	١,٥٤٠
٥٨	٠,٨٤٨	٠,٥٣٠	١,٦٠٠
٥٩	٠,٨٥٧	٠,٥١٥	١,٦٦٤
٦٠	٠,٨٦٦	٠,٥٠٠	١,٧٣٢
٦١	٠,٨٧٥	٠,٤٨٥	١,٨٠٤
٦٢	٠,٨٨٣	٠,٤٧٠	١,٨٨٠
٦٣	٠,٨٩١	٠,٤٥٤	١,٩٦٣
٦٤	٠,٨٩٩	٠,٤٣٨	٢,٠٥٠
٦٥	٠,٩٠٦	٠,٤٢٣	٢,١٤٥
٦٦	٠,٩١٤	٠,٤٠٧	٢,٢٤٦
٦٧	٠,٩٢١	٠,٣٩١	٢,٣٥٦
٦٨	٠,٩٢٧	٠,٣٧٥	٢,٤٧٥
٦٩	٠,٩٣٥	٠,٣٨٤	٢,٦٠٥
٧٠	٠,٩٤٠	٠,٣٤٢	٢,٧٤٨
٧١	٠,٩٤٦	٠,٣٢٦	٢,٩٠٤
٧٢	٠,٩٥١	٠,٣٠٩	٣,٠٧٨
٧٣	٠,٩٥٦	٠,٢٩٢	٣,٢٧١
٧٤	٠,٩٦١	٠,٢٧٦	٣,٤٨٧
٧٥	٠,٩٦٦	٠,٢٥٩	٣,٧٣٢
٧٦	٠,٩٧٠	٠,٢٤٢	٤,٠١١
٧٧	٠,٩٧٤	٠,٢٢٥	٤,٣٣١
٧٨	٠,٩٧٨	٠,٢٠٨	٤,٧٠٥
٧٩	٠,٩٨٢	٠,١٩١	٥,١٤٥
٨٠	٠,٩٨٥	٠,١٧٤	٥,٦٧١
٨١	٠,٩٨٨	٠,١٥٦	٦,٣١٤
٨٢	٠,٩٩٠	٠,١٣٩	٧,١١٥
٨٣	٠,٩٩٣	٠,١٢٢	٨,١٤٤
٨٤	٠,٩٩٥	٠,١٠٥	٩,٥١٤
٨٥	٠,٩٩٦	٠,٠٨٧	١١,٤٣
٨٦	٠,٩٩٨	٠,٠٧٠	١٤,٣٠
٨٧	٠,٩٩٨	٠,٠٥٢	١٩,٠٨
٨٨	٠,٩٩٩	٠,٠٣٥	٢٨,٦٤
٨٩	١,٠٠٠	٠,٠١٨	٥٧,٢٩
٩٠	١,٠٠٠	٠,٠٠٠	∞

التعبير عن الاتجاهات بدلالة المحاور



علاقات مثلثية بدلالة الزاوية المرجعية (هـ)



الثوابت الفيزيائية

- شحنة الإلكترون (سهـ) = $١,٦ \times ١٠^{-١٩}$ كولوم
- النفاذية المغناطيسية للهواء أو الفراغ ($\mu_{\circ}$) = $٤\pi \times ١٠^{-٧}$ تسلا.م/أمبير
- تسارع الجاذبية الأرضية (جـ) ≈ ١٠ م/ث^{٢}
- السماحية الكهربائية للهواء أو الفراغ ($\varepsilon_{\circ}$)≈ $٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢}$ كولوم^{٢} / نيوتن.م^{٢}
- ثابت كولوم (أ) = $\left(\frac{١}{\varepsilon_{\circ} ٤\pi}\right) \approx ٩ \times ١٠^{٩}$ نيوتن.م^{٢}/ كولوم^{٢}
- ١ و.ك.ذ = $١,٦٦ \times ١٠^{-٢٧}$ كغ
- نق$_{\circ}$ = $١,٢ \times ١٠^{-١٥}$ م (الثابت في قانون نصف قطر النواة)
- $\pi = ٣,١٤ = \frac{٢٢}{٧}$
- سرعة الضوء في الفراغ (س) = ٣×١٠^{٨}م/ث
- الإلكترون فولت = $١,٦ \times ١٠^{-١٩}$ جول
- الطاقة المكافئة لوحدة الكتلة الذرية تساوي ٩٣١,٥ مليون إلكترون فولت.
- ثابت بلانك (هـ) = $٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}$ جول.ثانية
- ثابت ريدبيرغ (R_H) = $١,٠٩٧ \times ١٠^{٧}$ م$^{-١}$
- نصف قطر بور (نق$_{ب}$) = $٥,٢٩ \times ١٠^{-١١}$م
- جدول يوضح كتل الجسيمات الذرية

الجسيم	الكتلة (كغ)	الكتلة (و.ك.ذ)	الكتلة (مليون إلكترون فولت)
البروتون	$١٠\times١,٦٧٢٦^{-٢٧}$	١,٠٠٧٣	٩٣٨,٣
النيوترون	$١٠\times١,٦٧٤٩^{-٢٧}$	١,٠٠٨٧	٩٣٩,٥٨
الإلكترون	$١٠\times٩,١٠٩٤^{-٣١}$	$١٠\times٥,٤٨٥٨^{-٤}$	٠,٥١١

قائمة المراجع

أولًا: المراجع العربية

١ – بول ج . هويت وزملاؤه، **مفاهيم العلوم الفيزيائية**، ترجمة وزارة التعليم العالي، الرياض، ٢٠١٤م.

٢ – بي. تي. ماثيوز، **مقدمة في ميكانيكا الكم**، ترجمة: أسامة زيد إبراهيم ناجي، الدار الدولية للنشر والتوزيع، القاهرة.

٣ – سام تريمان، **من الذرة إلى الكوارك**، ترجمة: أحمد فؤاد باشا، عالم المعرفة، الكويت، ٢٠٠٦.

٤ – غازي القيسي، **أساسيات الفيزياء الحديثة** (الطبعة الثانية)، دار المسيرة، عمان، ٢٠٠٩.

٥ – غازي القيسي، **الكهرباء والمغناطيسية**، دار المسيرة، عمان، ٢٠٠٤م.

٦ – ف. بوش، **أساسيات الفيزياء** (الطبعة الثامنة)، ترجمة: سعيد الجزيري ومحمد أمين سليمان، الدار الدولية للاستثمارات الثقافية، القاهرة، ٢٠٠٠.

٧ – مناف عبد حسن، **الفيزياء النووية**، دار صفاء، عمان، ٢٠٠٤ .

٨ – وليد القادري، **موسوعة الفيزياء "الميكانيك والكهرباء"** دار أسامة للنشر، عمان، ٢٠٠٤م.

ثانيًا: المراجع الأجنبية

1. Beiser, A., **Concepts of Modern Physics**, 6th ed., McGraw-Hill, 2003.
2. D. Giancoli, **Physics-Principles with Applications**, 6th ed., Prentice Hall, 2014.
3. D. Giancoli, **Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics**, 4th ed., Addison-Wesley, 2008.
4. Duncan, & Kennett, **Physics**, 3rd ed., Hodder Education, 2014.
5. Fishbane, Gaziorowicz, & others, **Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics**, 3rd ed., Pearson, 2005.
6. H. Young, & R. Freedman, & others, Sears and Zemansky's University **Physics with Modern Physics,** 13th ed., Addison-Wesley, 2011.
7. Halliday, & Resnick, **Fundamentals of Physics Extended**, 8th ed., John Wiley & Sons, 2007.
8. Krane, Kenneth S., **Modern Physics**, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc, 2012.
9. **Physics Course Book** M part 1, SABIS Educational Services 2008
10. S. Woolley, **Edexcel IGCSE physics**. Revision guide, 1st ed., Pearson Education, 2011.
11. Serway & Faughn, **Physics**, Holt, Rinehart and Winston, 2006
12. Serway, & Jewett, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, 9th ed., Cengage Learning, 2013.
13. Serway, & Peichner, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**,7th ed, Soounders College Publishing , 2008
14. Serway, & Vuille, **College Physics**, 10th ed., Cengage Learning, 2014.
15. Serway, R. & others, **Modern Physics**, 3rd ed., Thomson Learning, Inc, 2005.

تَمَّ بِحَمْدِ اللّٰہ تَعالٰی