ينتج المغناطيس مجالًا مغناطيسيًّا وكذلك يفعل التيار الكهربائيّ، فعند مرور تيار كهربائي في سلك مستقيم، فإنّه ينتج مجالا مغناطيسيّا حوله، وبسبب ترتيب برادة الحديد باتجاه المجال. وتكون خطوط هذا المجال حول السلك على شكل دوائر.

سنرى في هذا الفصل كيفية تعريف المجال المغناطيسيّ، وكيفية تحديد اتجاهه، كما سنناقش أيضًا كيفية تأثير المجال الكهربائيّ بقوة في الشحنات المتحركة، وفي الأسلاك التي تحمل تيارًا كهربائيًّا، كتطبيق مفيد على تفاعل المجال المغناطيسيّ مع التيار الكهربائيّ والشحنات الكهربائيّة المتحركة.

الفصل 20

المغناطيسيّة

الشّكل 20 – 1 مغناطيس على شكل حذوة الفرس يجذب مجموعة دبابيس.

أقطاب المغناطيس

يعود تاريخ المغناطيسيّة إلى آلاف السنوات، في منطقة من مناطق آسيا تدعى ماغنيسيا وجدت فيها صخور يتجاذب بعضها مع بعض، وسميت هذه الصّخور بعد اكتشافها بالمغناطيس.

لم تُكتشف العلاقة بين المغناطيسيّة والكهرباء قبل بداية القرن التاسع عشر. إنّ الاكتشاف الحاسم بأنّ التيار الكهربائيّ يُولّد مجالًا مغناطيسيًّا كالمغناطيس فتح المجال أمام الكثير من الأجهزة العملية التي تعتمد على المغناطيسيّة ابتداءً من البوصلة وانتهاءً بالمحركات الكهربائيّة، والسّماعات، وذاكرة الحاسوب، والمولّدات الكهربائيّة.

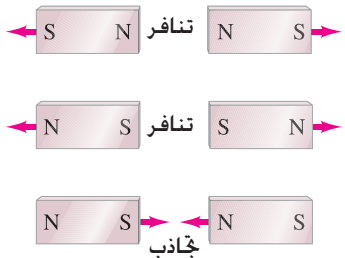
1-20 المغناطيس والمجال المغناطيسيّ

نلاحظ جميعًا أنّ المغناطيس يجذب مشابك الورق، والمسامير، والأجسام الأخرى المصنوعة من الحديد، (الشّكل 20 – 1). أي مغناطيس، سواءً كان على شكل قضيب أو على شكل حذوة فرس له طرفان يُسَمّى كلٌّ منهما **قطبًا**. وعند هذه الأقطاب، يكون تأثير المغناطيس أكبر ما يمكن، إذا عُلّق قضيبٌ مغناطيسيٌّ من منتصفه، فإنّنا نجد أحد الأقطاب يشير دائمًا باتجاه الشّمال. لم يعرف تمامًا متى اكتشفت هذه الظاهرة، ولكن الصينيين استخدموها في الملاحة في القرن الحادي عشر، وربّما قبل ذلك، وهذا هو مبدأ عمل البوصلة. فالبوصلة قضيبٌ مغناطيسيٌّ يُثَبَّت من مركز جاذبيته بحيث يستطيع الدوران بحرية.

يُسَمّى القطبُ الذي يشير باتجاه الشّمال الجغرافيّ **القطبَ الشّماليّ** للمغناطيس، أمّا القطب الآخر الذي يشير باتجاه الجنوب الجغرافيّ فَيُسَمّى **القطب الجنوبيّ**. ومن المشاهدات المألوفة أنّه عند تقريب مغناطيسين من بعضهما؛ فإنّ كلًّا منهما يؤثر بقوة في الآخر، وقد تكون هذه القوّةُ قوةَ تنافر أو قوةَ تجاذب. وعند تقريب القطب الشّماليّ من قضيب مغناطيسيّ من القطب الشّماليّ لآخر، فإنّ القوّة بينهما تكون قوة تنافر. وبالمثل، عند تقريب قطبين جنوبيين من بعضهما. ولكن عند تقريب قطب شماليّ من آخر جنوبيّ، فإنّ القوّة بينهما تكون قوة تجاذب. هذه النتائج موضحة في (الشّكل 20 – 2). وهذا يذكّرنا بالقوى بين الشحنات الكهربائيّة، الأقطاب المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب، ولكن لا تخلط بين أقطاب المغناطيس والشحنات الكهربائيّة، فهما مختلفان تمامًا. ومن أهمّ هذه الاختلافات أنّنا نستطيع الحصول على كلٍّ من الشحنتين الموجبة والسالبة بشكلٍ منفرد، في حين لا نستطيع أبدًا الحصول على قطبٍ شماليٍّ منفردٍ أو قطبٍ جنوبيٍّ منفرد؛ فعند شطر قضيب مغناطيسيّ إلى قسمين، فإنّنا لا نحصل على قطبٍ شماليٍّ وآخر جنوبيٍّ منفردين، ولكنّنا نحصل على قضيبين مغناطيسيّين لكلٍّ منهما قطبٌ شماليٌّ وقطبٌ جنوبيٌّ، (الشّكل 20 – 3). ولو تكرّرت عمليّة الشّطر هذه، فسنحصل على قضبانٍ مغناطيسيّةٍ أخرى. يبحث الفيزيائيون في إيجاد مغناطيس وحيد القطب ولكن هذا البحث لم يسفر عن أيّ نتيجة حتى الآن.

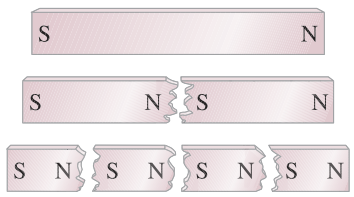
من المعلوم أنّ الحديد فقط مع بعض المواد الأخرى مثل الكوبالت، والنيكل، والجادولينيوم، وبعض أكاسيدها وخلائطها يرينا تأثيرات مغناطيسيّة قوية، وتُسَمّى هذه المواد المواد **الفرّومغناطيسيّة** (من الكلمة اللاتينية *ferrum*؛ وتعني حديد). وهناك مواد أخرى تظهر تأثيرات مغناطيسيّة طفيفة وضعيفة نستطيع قياسها بأجهزة أكثر تعقيدًا. وسنقدم تفاصيل أكثر عن المواد الفرّومغناطيسيّة في (البند 20 – 12).

لقد استخدمنا في (الفصل 16) مصطلح المجال الكهربائيّ الذي يحيط بالشحنة الكهربائيّة، وبالطريقة نفسها نستطيع تخيّل **مجال مغناطيسيّ** يحيط بالمغناطيس، أي أنَّ القوّة التي يؤثر بها مغناطيس في آخر يمكن وصفها بأنّها تنتج من التفاعل بين مغناطيس والمجال المغناطيسيّ لمغناطيس آخر، وكما رسمنا **خطوط المجال الكهربائيّ**، فإنّنا نستطيع أيضًا رسم خطوط المجال المغناطيسيّ.
ونستطيع رسمها كما هو الحال في المجال الكهربائيّ بحيث يكون: 1- اتجاه المجال المغناطيسيّ عند نقطة هو المماس على خط المجال عند تلك النقطة. 2- عدد خطوط المجال في وحدة المساحة يتناسب مع شدة المجال المغناطيسيّ.
ونستطيع تحديد اتجاه المجال المغناطيسيّ عند نقطة معيّنة من اتجاه القطب الشّماليّ لإبرة بوصلة موضوعة عند تلك النقطة تعريف أكثر دقة سيقدم في (البند 20 – 3). ويرينا (الشّكل 20 – 4أ) تخطيطًا للمجال المغناطيسيّ باستخدام برادة الحديد (التي تعمل كمغانط دقيقة) والاتجاه يحدد من البوصلات الصغيرة. والمجال المغناطيسيّ المحدد بهذه الطريقة موضح في (الشّكل 20 – 54) (ب). لاحظنا (اصطلاحًا) أنَّ خطوط المجال المغناطيسيّ تخرج من القطب الشّماليّ باتجاه القطب الجنوبيّ (يتجاذب القطبُ الشّماليّ للبوصلة المغناطيسيّة مع القطبِ الجنوبيّ للمغناطيس).
تستمرّ خطوط المجال المغناطيسيّ داخل المغناطيس كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 4 ب). في الواقع، ونظرًا لعدم وجود قطب منفرد، فإنّ خطوط المجال المغناطيسيّ دائمًا تشكّل حلقة مغلقة بعكس خطوط المجال الكهربائيّ التي تبدأ من الشحنة الموجبة وتنتهي بالشحنة السالبة.



الشّكل 20 – 2 الأقطاب المتشابهة للمغناطيس تتنافر والمختلفة تتجاذب.

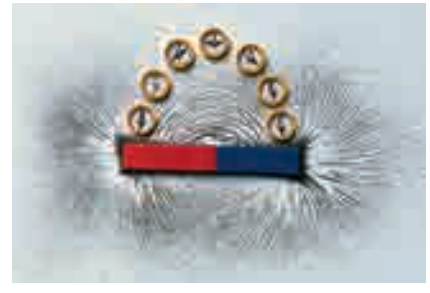
الشّكل 20 – 3 إذا شطرت مغناطيسًا فلن تحصل على قطب منفرد ولكنك ستحصل على مغناطيسين لكلّ منهما قطب شماليّ وآخر جنوبيّ.



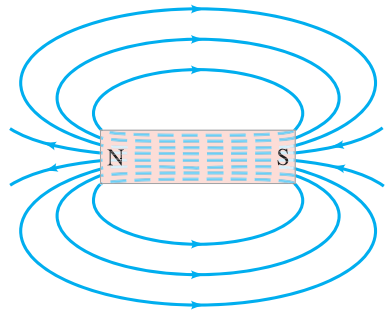
تنويه:
المغناطيس لا يجذب كل الفلزات.

خطوط المجال المغناطيسيّ

تنويه:
تشكل خطوط المجال المغناطيسيّ حلقة مغلقة على خلاف خطوط المجال الكهربائيّ.



(أ)



(ب)

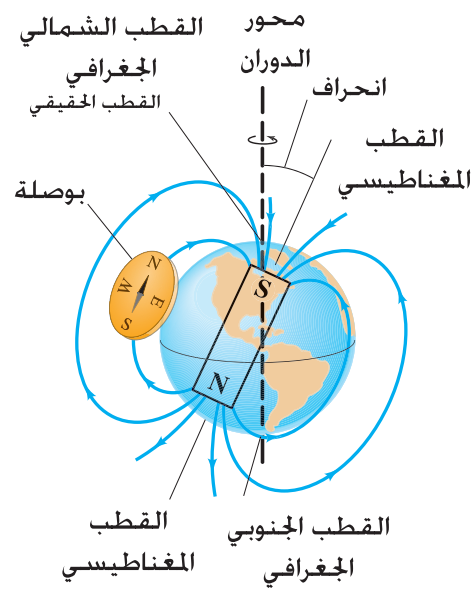
الشّكل 20 – 4 (أ) تخطيط المجال المغناطيسيّ يكون باستخدام برادة الحديد، وباستخدام مجموعة بوصلات. النهاية الحمراء للقضيب المغناطيسيّ تمثل القطب الشّماليّ. القطب الشّماليّ للإبر المغناطيسيّة يُشير بعيدًا عن القطب الشّماليّ للمغناطيس. (ب) خطوط المجال المغناطيسيّ لقضيب مغناطيسيّ.

المجال المغناطيسيّ للأرض

المجال المغناطيسيّ للأرض موضّح في (الشّكل 20 – 5)، حيث يكون نمط خطوط المجال كما لو كان هنالك قضيبٌ مغناطيسيّ تخيليّ داخل الأرض. ولأنّ القطب الشّماليّ (CN) لإبرة البوصلة يشير إلى الشّمال، فإنّ القطب المغناطيسيّ الأرضيّ الذي يكون باتجاه الشّمال الجغرافيّ هو القطب الجنوبيّ (S)، كما يُستنتج من (الشّكل 20 – 5). تذكر أنّ القطب الشّماليّ لمغناطيس يتجاذب مع القطب الجنوبيّ لمغناطيس آخر. القطب الأرضي الموجود في الشّمال ما زال يسمى القطبَ الشّماليّ المغناطيسيّ أو القطبَ الشّماليّ الجيومغناطيسيّ، ببساطة، لأنّه يقع في الشّمال. ويندرج هذا الكلام على القطب الجنوبيّ المغناطيسيّ الذي يكون بالقرب من القطب الجنوبيّ الجغرافيّ مع أنه في الواقع من الناحية المغناطيسيّة قطب شماليّ (N). إنّ الأقطاب المغناطيسيّة الأرضية لا تتطابق مع الأقطاب الجغرافيّة التي تقع على محور دوران الأرض: فالقطب الشّماليّ المغناطيسيّ مثلاً يقع في منطقة كنديّة،[1] ويبعد 900 Km عن القطب الشّماليّ الجغرافيّ (أو القطب الحقيقيّ). وهذا الفرق يجب أن يؤخذ بالحسبان عند استخدام البوصلة. (الشّكل 20 – 6). ويُسَمّى الفرقُ الزّاويُّ بين القطب المغناطيسيّ الشّماليّ والقطب الشّماليّ الحقيقيّ (الجغرافيّ) الميلَ المغناطيسيَّ **magnet-ic declination**. وفي الولايات المتحدة، يتغير هذا الميل من $0°$ إلى نحو $20°$ اعتمادًا على الموقع.

لاحظ في (الشّكل 20 – 5) أنّ المجال المغناطيسيّ الأرضيّ في معظم المواقع ليس ماسًا على سطح الأرض. تُعرف الزاوية التي يصنعها المجال المغناطيسيّ مع الاتجاه الأفقي عند أيّ نقطة بزاوية الانحدار **angle of dip**.

تمرين أ: أين يمتلك المجال المغناطيسيّ الأرضيّ قيمة أكبر: عند الأقطاب أم عند خطّ الاستواء. مفتاح الحلّ: لاحظ خطوط المجال في (الشّكل 20- 5).



الشّكل 20 – 5 تبدو الأرض وكأنها مغناطيس ضخم، ولكن أقطابها المغناطيسيّة ليست باتجاه الأقطاب المغناطيسيّة الجغرافيّة التي تقع على محور دوران الأرض

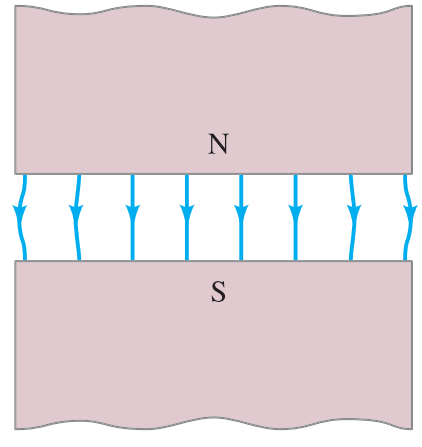
تطبيق الفيزياء

استخدام البوصلة.

الشّكل 20 – 6 استخدام بوصلة وخريطة في البراري. أولا، تشير إبرة وجه البوصلة بعيدًا عن اتجاه الشّمال بزاوية تساوي تمامًا زاوية الميل الموضحة في الخريطة ($15°$). بعد ذلك، وجِّه الخريطة باتجاه الشّمال الصحيح دون النظر إلى إبرة البوصلة.

المجال المغناطيسيّ المنتظم

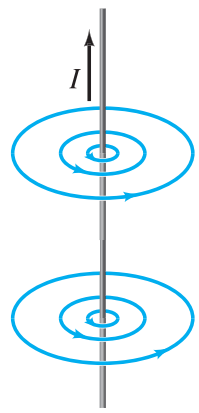
إنّ أبسط مجالٍ مغناطيسيٍّ هو المجال المنتظم، وهو المجال الذي لا تتغير قيمته واتجاهه من نقطة إلى أخرى. ويصعب إيجاد المجال المنتظم تمامًا في مساحة واسعة. ولكن المجال الموجود بين قطبين مسطحين عريضين ومتوازين يعدّ منتظمًا على نحو تقريبيّ إذا كانت مساحة كلّ وجه من هذين القطبين كبيرة مقارنة بالمسافة بينهما، (الشّكل 20 – 7). وعلى الأطراف، يميل المجال إلى الخارج قليلا. ولهذا، لا تكون خطوط المجال متوازية، ولا يكون المجال منتظمًا. أمّا في المنطقة المركزية، فتكون خطوط المجال متوازية. وعليه، يكون المجال منتظمًا. وهذا يشبه المجال الكهربائيّ بين سطحين متوازيين. (الشّكل 17 -1)



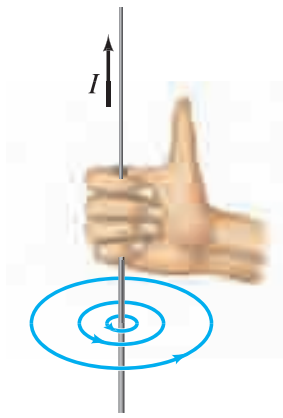
الشّكل 20 – 7 المجال المغناطيسيّ بين قطبين عريضين عبارة عن مجال منتظم تقريبًا باستثناء الأطراف.

(1) يتغير مكان القطب الشمالي المغناطيس عدّة كيلومترات في العام في الوقت الحاضر. وتظهر مغناطيسية الصخور أن اقطاب الأرض لم يتغير مكانها فقط خلال العصور الجيولوجية وإنما قد تغير اتجاها 400 خلال الـ 330 مليون سنة الأخيرة.

(أ)



(ب)



(ج)

الشّكل 20 - 8 (أ) انحراف إبرة البوصلة بالقرب من سلك يحمل تيارًا كهربائيًا يرينا وجود مجال مغناطيسيّ ويبيّن اتجاهه. (ب) خطوط المجال المغناطيسيّ حول سلك مستقيم يمرّ فيه تيّار كهربائيّ. (ج) قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسيّ: إذا أشار الإبهام إلى اتجاه التيار الكهربائيّ، فإنّ الأصابع الأخرى تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ.

2-20 التّيّارات الكهربائيّة تنتج مجالات مغناطيسيّة

تولد التيارات الكهربائية مجالات مغناطيسية

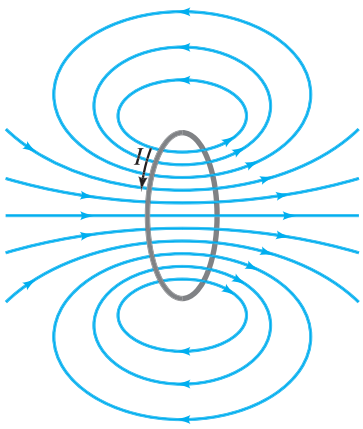
حاول عدة باحثين إيجاد العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسيّة في القرن الثامن عشر. فقد بدت الشحنات الكهربائيّة المتحركة والمغناطيس وكأنها لا تؤثر في بعضها. ولكن في عام 1820م، وجد هانز أورستد (1777 – 1851) أنّه عند وضع بوصلة بالقرب من سلك يمرّ فيه تيار كهربائيّ، فإنّ إبرة البوصلة تنحرف باتجاه ما. وبما أنّ إبرة البوصلة تنحرف بسبب المجالات المغناطيسيّة، فإنّ تجربة أورستد بيّنت أنّ التّيّار الكهربائيّ يُنتج مجالًا مغناطيسيًّا، أي أنّه أوجد نقطة الوصل بين الكهرباء والمغناطيسيّة.

إنّ إبرة البوصلة الموضوعة بالقرب من سلك مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًّا تتأثر بقوة تؤدي إلى انحرافها باتجاه المماس على دائرة حول السّلك، (الشّكل 20 – 8 أ). لذا، يكون المجال المغناطيسي المتولد حول سلك مستقيم يحمل تيارًا كهربائيًّا على شكل دوائر يكون السّلك في مركزها، (الشّكل 20 – 8 ب). وهنالك طريقة بسيطة لتذكّر اتجاه المجال المغناطيسيّ هي قاعدة اليد اليمنى: إذا أمسكنا السّلك باليد اليمنى بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار الكهربائيّ (الموجب)، فإنّ الأصابع الأخرى تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ، (الشّكل 20 – 8 ج).

قاعدة اليد اليمنى 1: اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربائي.

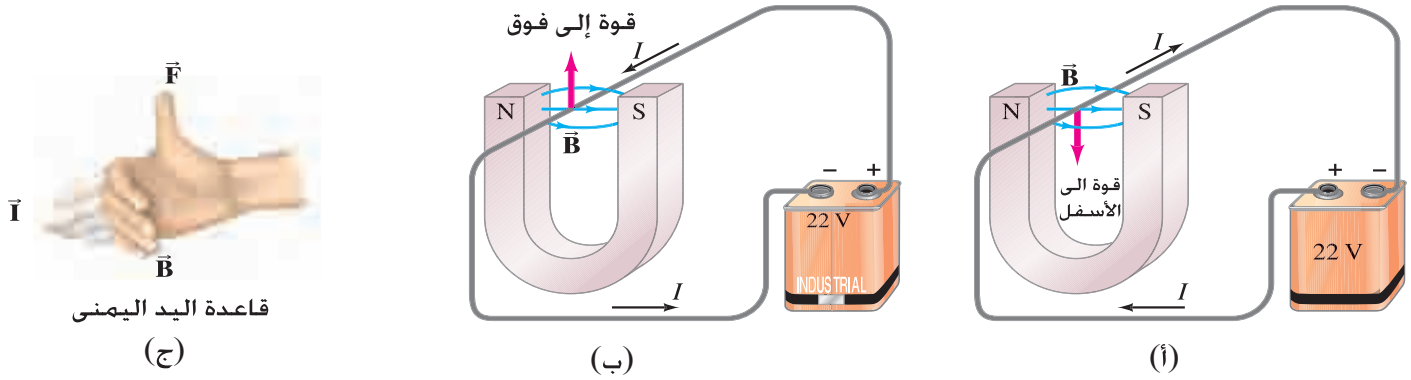
ونستطيع تحديد خطوط المجال المغناطيسيّ الناتج من حلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا بالطريقة نفسها وباستخدام البوصلة كما هو واضح في (الشّكل 20 – 9). مرة أخرى، نستطيع استخدام قاعدة اليد اليمنى كما يوضّحها (الشّكل 20 – 10)، والمجال الناتج هنا هو مجال غير منتظم، ولا يشبه المجال المنتظم المبيّن في (الشّكلين 20 – 8، و 20 – 9)، فهو مجال يختلف في المقدار والاتجاه من نقطة إلى أخرى.

الشّكل 20 - 9 خطوط المجال المغناطيسيّ الناتج من حلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا.



تمرين ب: سلك مستقيم يحمل تيارًا باتجاهك مباشرة، ما اتجاه المجال المغناطيسيّ حول السّلك؟

الشّكل 20 – 10 قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسيّ بالنسبة لحلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا.



الشّكل 20 – 11 (أ) القوّة المؤثّرة في سلك يحمل تيارًا كهربائيًّا في مجال مغناطيسيّ $\vec{B}$. (ب) الشيء نفسه، ولكن التيار الكهربائيّ بالاتجاه المعاكس. (ج) قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوّة في (ب).

3-20 القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيّارًا في مجال مغناطيسيّ، تعريف $\vec{B}$

رأينا في (الجزء 20 – 2) أنّ التّيّار الكهربائيّ يؤثر بقوة معينة في المغناطيس كإبرة البوصلة. ومن قانون نيوتن الثالث، يمكن توقّع أنّ العكس سيكون صحيحًا، أي أنّنا نتوقع أنّ المغناطيس يؤثر بقوة في السلك الذي يحمل تيارًا كهربائيًّا. وهناك تجارب عدّة أكدت هذا التأثير، كان أولها التجربة التي أجراها أورستد.

افرض أنّ لدينا سلكًا مستقيمًا موضوعًا في مجال مغناطيسيّ بين قطبي مغناطيس على شكل حذاء الفرس كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 11). عندما يمرّ تيار كهربائيّ في السّلك، فإنّ التجربة تبيّن أنّ هذا السّلك يتأثر بقوة معينة، ولكن هذه القوّة ليست باتجاه أحد قطبي المغناطيس، ولكنها تكون عموديّة على اتجاه المجال المغناطيسيّ، إلى الأسفل كما في (الشّكل 20 – 11 أ)، أو إلى الأعلى كما في (الشّكل 20 – 11 ب) اعتمادًا على اتجاه التّيّار. لقد بينت التجارب أنّ اتجاه القوّة المغناطيسيّة يكون دائمًا عموديًّا على كلّ من اتجاهي التّيّار والمجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.

ويُحدَّد اتجاه القوّة بصورة أخرى من صور قاعدة اليد اليمنى كما هو موضح في (الشّكل 20 – 11 ج)؛ وجِّه يدك اليمنى المفتوحة بحيث تشير أصابع اليد باتجاه التّيّار I، وعند ثني الأصابع فإنّها تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$، وهنا يشير الإبهام إلى اتجاه القوّة $\vec{F}$ المؤثّرة في السّلك.

المغناطيس يؤثر بقوة في موصل يحمل تيارًا كهربائيًا.

قاعدة اليد اليمنى 2- لتحديد اتجاه القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ.

تصف قاعدة اليد اليمنى اتجاه القوّة. ولكن ماذا عن مقدار هذه القوّة؟ لقد وُجد تجريبيًّا أنّ مقدار القوّة يتناسب طرديًّا مع مقدار التّيّار I، وطول السّلك L، ومقدار المجال المغناطيسيّ B، حيث تزداد القوّة كلما زاد المجال المغناطيسيّ. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ القوّة تعتمد على الزاوية θ بين اتجاهي التّيّار والمجال المغناطيسيّ (الشّكل 20- 12) وتتناسب مع $\sin\theta$ (جيب الزاوية):

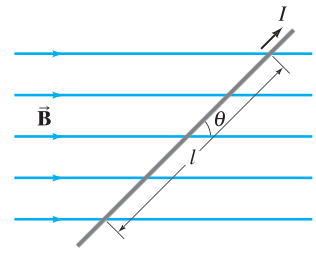
$$F \propto IlB \sin\theta.$$

وإذا كان ثابت التناسب يساوي 1 (وعلى اعتبار أنّ المجال المغناطيسيّ منتظم)، فإنّ القوّة تعطى بالعلاقة التالية: (20 – 1)

$$F = IlB \sin\theta.$$

وتكون هذه القوّة مساوية للصفر عندما $(\theta = 0°)$، أي عندما يكون اتجاه التّيّار موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسيّ، وتكون F قيمة قصوى عندما تكون $(\theta = 90°)$، أي عندما يكون اتجاه التّيّار عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسيّ وهنا تكون (20 – 2)

$$F_{max} = IlB \qquad \text{[التيار عمودي على } \vec{B}\text{]}$$



الشّكل 20 – 12 موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ اتجاه القوّة عموديّ على الورقة إلى الداخل.

القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ منتظم.

تعريف المجال المغناطيسيّ

(1) في مناقشتنا، افترضنا أن المجال المغناطيسي منتظم، حيث B في المعادلتين (20 -1) و(20 - 2) هو المجال المتوسط على الطول l للسلك.

نستطيع تحديد مقدار المجال المغناطيسيّ B من (المعادلة 20 – 2) كما يلي: $B = F_{max}/Il$ حيث F_{max} مقدار القوّة على السلك الذي طوله l، ويحمل تيارًا مقداره I عموديًّا على المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.†

وحدات المجال المغناطيسيّ: التسلا (T) والجاوس (G)

إنّ وحدة المجال المغناطيسيّ في النظام الدوليّ للوحدات (SI) هي التسلا T(tesla). ويتضح من المعادلة 20 – 1 أو 20 – 2. أنّ $1\ T = 1N/A \cdot m$. والاسم القديم للتسلا هو الويبر/ متر مربّع (*weber per meter*^{2}) ($1Wb/m^2 = 1\ T$). وهناك وحدةٌ أخرى تُستخدم في تحديد المجال المغناطيسيّ في نظام cgs هي الجاوس **gauss** (G): $1G = 10^{-4}\ T$. ويجب تحويل المجال المعطى بوحدة الجاوس إلى تسلا ليتناسب مع وحدات النظام الدوليّ (SI). ولإعطائك شعورًا بهذه الوحدات: نلاحظ أنّ المجال المغناطيسيّ للأرض عند سطحها يساوي $0.5 \times 10^{-4}\ T$. ومن جهة أخرى، تستطيع المغانط القوية نتاج مجال مغناطيسيّ تصل شدته إلى 2 T كما تستطيع المغانط ذات الموصلية الفائقة (*supercon-ducting magnet*) إنتاج مجالات مغناطيسيّة تزيد شدتها على 10T.

المثال 20-1 القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا

سلك طوله $l = 12\ cm$ ويحمل تيارًا مقداره 30-A، موضوع بين قطبي مغناطيس، وعلى زاوية $60°$ مع اتجاه المجال المغناطيسيّ الذي يساوي 0.90 T تقريبًا. ما مقدار القوّة المؤثّرة في السّلك على اعتبار أنّ المجال منتظم؟

النّهج: نستخدم العلاقة 20 – 1 لإيجاد القوّة المؤثّرة في السلك الموضوع في مجال مغناطيسيّ.

الحلّ: بتعويض $B = 0.90\ T$، $I = 30\ A$، $l = 12\ cm$، و $\theta = 60°$ في العلاقة 20 – 1 نحصل على

$$F = IlB \sin\theta$$
$$= (30\ A)(0.12\ m)(0.90\ T)(0.866) = 2.8\ N$$

تمرين ج: السلك الذي يحمل التّيار الكهربائيّ من محطة التوليد إلى المدن، يحمل تيّارًا كهربائيًّا مقداره 30 A عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسيّ الأرضيّ الذي مقداره $0.50 \times 10^{-4}\ T$. ما القوّة المؤثّرة في 100 m من هذا السلك؟

عندما نمثل اتجاه التّيار أو المجال المغناطيسيّ بحيث يكون عموديًّا على الورقة باتجاه القارئ (إلى الخارج)، فإنّنا نستخدم الرمز ⊙ أو ×، وعندما يكون الاتجاه عموديًّا على الورقة بعيدًا عن القارئ (إلى الداخل)، فإنّنا نستخدم الرمز × أو ⊗. (انظر الشّكل 20 – 13).

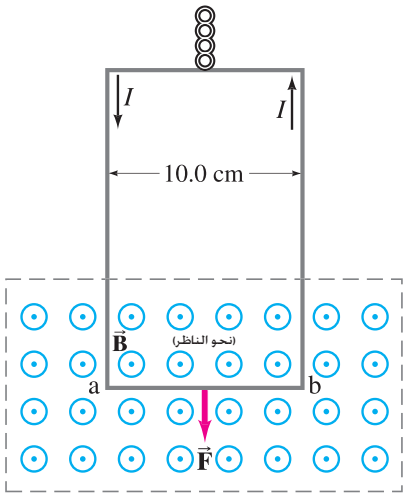
المثال 20-2 قياس المجال المغناطيسيّ

عروةٌ مستطيلة الشّكل معلّقة عموديًّا في ميزان زنبركيّ كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 13). إذا أثر مجال مغناطيسيّ أفقي بحيث يكون عموديًّا على الحلقة (عموديّ إلى الخارج ⊙)، وإذا كان المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ منتظمًا تقريبًا، وكان طول الجزء الأفقي من الحلقة $a\ b$ يساوي $l = 10.0\ cm$، ويقع تقريبًا في مركز مغناطيس كبير ينتج المجال. الجزء العلوي للحلقة يقع بعيدًا عن المجال المغناطيسيّ. إذا كانت قراءة الميزان الزّنبركيّ $F = 3.48 \times 10^{-2}\ N$ عندما لا يمر تيار في الحلقة، وصفرًا عندما يمرّ تيار مقداره $I = 0.245\ A$ (هنا تكون الحلقة متزنة). احسب مقدار المجال المغناطيسيّ B.

النّهج: هنالك ثلاثة أجزاء من الحلقة تقع في المجال المغناطيسيّ: اثنان عموديّان وواحد أفقيّ. نطبّق (المعادلة 20 – 1) ونستخدم قاعدة اليد اليمنى لإيجاد مقدار القوّة المؤثّرة في كلّ جزء واتجاهها.

الحلّ: القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الجزء العمودي الأيمن تكون باتجاه اليسار، أمّا في الجزء العمودي الأيسر فتكون باتجاه اليمين، وهاتان القوتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتجاهًا، وبالتالي تكون محصلتاهما صفرًا. لذا، تبقى القوّة المؤثّرة في الجزء الأفقي وهي تساوي قوة الجاذبيّة عند الاتزان، وهنا تكون $\theta = 90°$، و $\sin\theta = 1$. وعليه، يكون

$$B = \frac{F}{Il} = \frac{3.48 \times 10^{-2}\ N}{(0.245\ A)(0.100\ m)} = 1.42\ T$$



الشّكل 20 – 13 قياس المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$. المثال 20 - 2.

ملحوظة: يمكن استخدام هذه الطريقة في حساب شدة المجال المغناطيسيّ.

4-20 القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ

ناقشنا سابقًا أنّ السّلك الذي يحمل تيّارًا كهربائيًّا يتأثر بقوة عند وضعه في مجال مغناطيسيّ، وحيث إنّ التيار الكهربائيّ في السّلك يتكون من شحنات متحركة، فمن المتوقع أنّ الشحنات التي تتحرك بحرية (خارج السلك) ستتأثر أيضًا بقوة عند مرورها في مجال مغناطيسيّ. وعليه، نستنتج أنّ القوّة المؤثّرة في شحنة منفردة تتحرك في مجال مغناطيسيّ. لو كان لدينا N من الجسيمات المشحونة بشحنة مقدارها q تمر في نقطة معينة في زمن t فإنّها تكوّن تيارًا مقداره $I = Nq/t$. إذا كان t هو الزمن اللازم للشحنة q حتى تتحرك مسافة L في المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$، فيكون $l = vt$ حيث v مقدار سرعة الجسيم $\vec{\mathbf{v}}$. وهنا، تعطى القوّة المؤثّرة في N من الجسيمات من خلال المعادلة 20 – 1 كما يلي:

$$F = IlB\sin\theta = (Nq/t)(vt)B\sin\theta = NqvB\sin\theta.$$

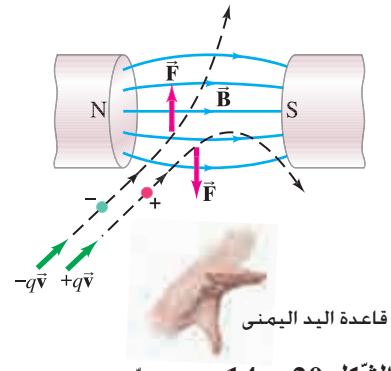
وبالتالي، فإنّ القوّة المؤثّرة على جسيم واحد تساوي

$$F = qvB\sin\theta. \qquad \textbf{(3 – 20)}$$

وهذه المعادلة تعطي مقدار القوّة التي يؤثر بها المجال المغناطيسيّ في الجسم المشحون بشحنة q، ويتحرك بسرعة v داخل المجال الذي قيمته B. الزاوية بين $\vec{\mathbf{v}}$، و $\vec{\mathbf{B}}$ هي θ، وتكون القوّة أكبر ما يمكن عندما يتحرك الجسيم عموديًّا على اتجاه $\vec{\mathbf{B}}$ $(\theta = 90^\circ)$.

$$F_{\max} = qvB \qquad [\vec{\mathbf{v}} \perp \vec{\mathbf{B}}] \qquad \textbf{(4 – 20)}$$

في حين تساوي القوّة صفرًا عندما يتحرك الجسم باتجاه موازٍ لاتجاه المجال المغناطيسيّ $(\theta = 0^\circ)$. يكون اتجاه القوّة عموديًّا على كلّ من المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ والسرعة $\vec{\mathbf{v}}$، ويحدد باستخدام **قاعدة اليد اليمنى** أيضًا. وجِّه يدك اليمنى المفتوحة بحيث تشير أصابع اليد (عدا الإبهام) إلى اتجاه السرعة، وعند ثنيها إلى اتجاه المجال، فإنّ الإبهام يشير إلى اتجاه القوّة. وهذا ينطبق على الشحنات الموجبة. وبالتالي، تكون القوّة للوضع المبيّن في (الشّكل 20 – 14) إلى الأسفل. أمّا بالنسبة إلى الشحنات السالبة، فتكون القوّة بالاتجاه المعاكس تمامًا، إلى الأعلى في (الشّكل 20 – 14).



الشّكل 20 – 14 القوّة المؤثّرة في جسيمات مشحونة متحركة في مجال مغناطيسيّ عموديًّا عليه.

القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ.

قاعدة اليد اليمنى (3) القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$.

المثال المفاهيمي 20 - 3 الاستراتيجية الخطأ

وُضِعَتْ شحنةٌ سالبة $-Q$ ساكنة بالقرب من مغناطيس. هل ستبدأ هذه الشحنة بالحركة؟ وهل ستتأثر بقوة؟ ما هو الوضع إذا كانت الشحنة موجبة $+Q$؟

الحلّ: الجواب لا في الحالات كلها؛ لأنّ المجال يؤثر بقوة في الأجسام المتحركة فقط (المعادلة 20-3).

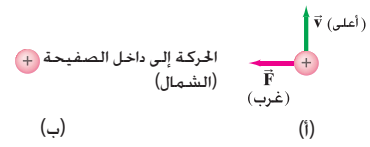
المثال 20-4 القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في البروتون

يتحرك بروتون بسرعة مقدارها $5.0 \times 10^6\ \text{m/s}$ في مجال مغناطيسيّ، فيتأثر بقوة مقدارها $8.0 \times 10^{-14}\ \text{N}$ باتجاه الغرب عندما يتحرك عموديًّا للأعلى (الشّكل 20 – 15 أ). إذا تحرك أفقيًّا باتجاه الشّمال، فإنّه لا يعاني من أيّ قوة (الشّكل 20 – 15 ب). أوجد مقدار المجال المغناطيسيّ واتجاهه في هذا المكان (شحنة البروتون هي $q = +e = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$).

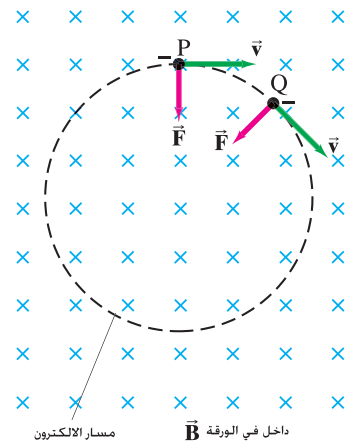
النّهج: لأنّ البروتون لا يعاني من أيّ قوة عندما يتحرك شمالاً ، فيجب أن يكون المجال المغناطيسيّ باتجاه الشّمال أو الجنوب. وحتى تكون القوّة المؤثّرة إلى الغرب عندما يتحرك البروتون إلى الأعلى، فإنّ قاعدة اليد اليمنى تعطينا أنّ المجال المغناطيسيّ يجب أن يشير إلى الشّمال. (يشير الإبهام إلى الغرب، في حين تشير الأصابع الأخرى إلى أعلى، أمّا عند ثنيها فتشير إلى الشّمال). ويمكن إيجاد مقدار المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ باستخدام (المعادلة 20 – 3). وبوضع $\theta = 90^\circ$ نحصل على

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{8.0 \times 10^{-14}\ \text{N}}{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(5.0 \times 10^6\ \text{m/s})} = 0.10\ \text{T}.$$

الشّكل 20 – 15 المثال 20 - 4



تمرين د: (D) في المثال 20 – 4، أوجد القوّة المؤثر في البروتون إذا تحرك أفقيًّا إلى الجنوب.



الشّكل 20 - 16 القوّة التي يؤثر بها مجال مغناطيسيّ منتظم في جسيم متحرك مشحون (في هذه الحالة يتحرك إلكترون في مسار دائريّ).

مسار الجسيم المشحون الذي يتحرك في مستوى عموديّ على مجال مغناطيسيّ منتظم هو دائرة كما سنبيّن الآن. في (الشّكل 20 – 16)، يشير المجال المغناطيسيّ بشكل عموديّ إلى داخل الورقة، ويُمثّل بالرمز (×). إذا بدأ إلكترون عند النقطة P بالحركة إلى اليمين، فإنّ القوّة المؤثّرة فيه عند هذه النقطة ستكون للأسفل (باستخدام قاعدة اليد اليمنى مع عكس الاتجاه بالنسبة للشحنات السالبة). لذا، سينحرف الإلكترون باتجاه الأسفل، وبعد لحظة عندما يصل الإلكترون النقطة Q، فإنّ القوّة تبقى عموديّة على اتجاه السرعة بالاتجاه الموضح في الشّكل. ولأنّ القوّة تبقى عموديّة على السرعة، فإنّ مقدار السرعة $\vec{v}$ لا يتغير. ولقد رأينا في الفصل الخامس أنه إذا كانت القوّة المؤثّرة في جسيم عموديّة دائمًا على اتجاه سرعته $\vec{v}$، فإنّ الجسيم في مسار دائري وبتسارع مركزي $a = v^2/r$ (المعادلة 5 – 1). لذلك، يتحرك الجسيم المشحون في مسار دائري بتسارع مركزي ثابت (انظر المثال 20-5) في مجال مغناطيسيّ منتظم. يتحرك الإلكترون مع اتجاه عقارب الساعة في (الشّكل 20 – 16). وسيتأثر الجسيم الموجب بقوة بالاتجاه المعاكس. لذا، سيتحرك بعكس اتجاه عقارب الساعة.

المثال 20-5 مسار الإلكترون في مجال مغناطيسيّ منتظم

يتحرك إلكترون بسرعة $2.0 \times 10^7\ \text{m/s}$ في مستوى عموديّ على مجال مغناطيسيّ منتظم شدته 0.010-T. صف مسار الإلكترون بشكل كمّيّ.

النّهج: يتحرك الإلكترون بسرعة v في مسار منحن. لذلك، فإنّه يمتلك تسارعًا مركزيًّا $a = v^2/r$ (معادلة 5 – 1). ونستطيع إيجاد نصف قطر المسار باستخدام قانون نيوتن الثاني. (المعادلة 20 – 3).

$$F = qvB \quad \text{بوضع} \quad \sin\theta = 1$$

الحلّ: من قانون نيوتن الثاني كما يلي:

$$\Sigma F = ma$$

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

وبحلّ هذه المعادلة نجد أنّ

$$r = \frac{mv}{qB}$$

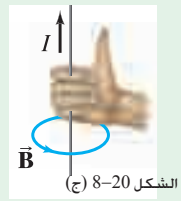
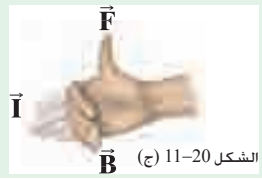
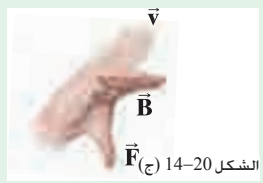
وحيث إنّ $\vec{F}$ عموديّة على $\vec{v}$ ، فإنّ مقدار $\vec{v}$ لا يتغير. ومن هذه المعادلة، نجد أنه إذا كان مقدار المجال المغناطيسيّ ثابتًا، فإنّ مقدار نصف القطر يبقى ثابتًا أيضًا. وعليه، فإنّ المنحنى يصبح دائرة كما استنتجنا سابقًا. ولإيجاد r: نعوض بالقيم المعطاة، فنحصل على

$$r = \frac{(9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})(2.0 \times 10^7\ \text{m/s})}{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(0.010\ \text{T})} = 1.1 \times 10^{-2}\ \text{m} = 1.1\ \text{cm}$$

يشبه المجالُ المغناطيسيُّ المجالَ الكهربائيَّ في وجه ما. ولكن هنالك عدة فروقات منها:

1. تكون القوّةُ المؤثّرةُ في جسيم مشحون يتحرك في المجال المغناطيسيّ عموديّةً على اتجاه المجال المغناطيسيّ (وليس باتجاه سرعة الجسم)، أمّا القوّة المؤثّرة في حالة المجال الكهربائيّ فتكون موازية لاتجاه المجال (ولا تتأثر بسرعة الجسيم).
2. تستخدم قاعدة اليد اليمنى بصيغها المختلفة لإيجاد اتجاه المجال المغناطيسيّ، والقوّة التي يؤثر بها في سلك يحمل تيارًا، أو في شحنات متحركة. صمّمت قاعدة اليد اليمنى (الجدول 20 – 1) لتتفاعل مع الطبيعة المتعامدة لهذه الكميات.
3. تستخدم المعادلات في هذا الفصل بشكل عام لتعطي المقادير فقط، وليست معادلات متجهة. وتستخدم قاعدة اليد اليمنى لإيجاد اتجاهات الكميات المتجهة.

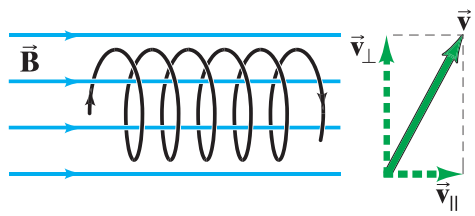
الجدول 20 – 1 ملخص لقواعد اليد اليمنى (RHR)

الوضع الفيزيائيّ	مثال	كيف نوجّه اليد اليمنى	النتيجة
1. المجال المغناطيسيّ الناتج من سلك يحمل تيارًا (RHR-1). قاعدة اليد اليمنى - 1	 الشكل 20–8 (ج)	لفّ أصابعك حول السلك بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التّيّار.	تشير الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$ حول السلك.
2. القوّة المؤثّرة من مجال مغناطيسيّ في سلك يحمل تيارًا . قاعدة اليد اليمنى- 2	 الشكل 20–11 (ج)	تشير أصابع اليد المفتوحة إلى اتجاه التّيّار I، وعند ثنيها تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.	يشير الإبهام إلى اتجاه القوّة.
3. القوّة المؤثّرة في شحنة q + متحركة في مجال مغناطيسيّ قاعدة اليد اليمنى- 3	 الشكل 20–14 (ج)	تشير أصابع اليد المفتوحة إلى اتجاه السرعة $\vec{v}$، وعند ثنيها تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{B}$.	يشير الإبهام إلى اتجاه القوّة.

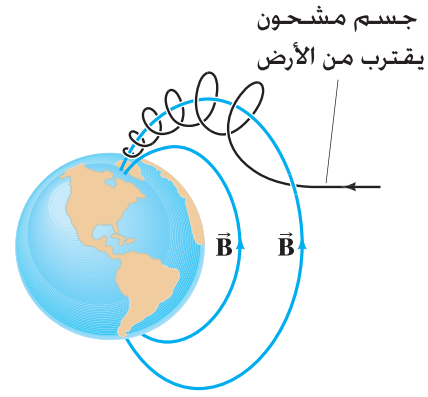
المثال المفاهيمي 20-6 المسار الحلزونيّ

ما مسار الجسيم المشحون المتحرك في مجال مغناطيسيّ إذا كانت السرعة غير متعامدة مع المجال المغناطيسيّ؟

الجواب: يمكن تحليل متجه السرعة إلى مركبتين: إحداهما موازية للمجال المغناطيسيّ، والأخرى متعامدة معه. المركبة الموازية للمجال لا تتأثر بقوة. لذا، تبقى ثابتة، وتؤدي إلى حركة الجسم باتجاه المجال. أمّا المركبة العموديّة للسرعة فتؤدي إلى حركة الجسيم بمسار دائري. وبوضع هاتين الحركتين مع بعضهما، فإنّ الجسيم يتحرك في مسار حلزونيّ حول المجال المغناطيسيّ كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 17).



الشّكل 20 – 17 مثال 20-6



(أ)

(ب)

الشّكل 20 – 18 (أ) مخطط يرينا الجسيمات المشحونة التي تقترب من الأرض، والتي يتم أسرُها بواسطة مجال الجاذبيّة الأرضية. مثل هذه الجسيمات تتبع خطوط المجال باتجاه القطب كما هو موضح في الشّكل. (ب) صورة للشفق القطبيّ.

* الشّفق القطبيّ

تجتاز الأيونات المشحونة الأرض قادمةً من الشّمس (العواصف الشّمسيّة)، ثم تخترق الغلاف الجويّ بالقرب من الأقطاب مشكّلة أحيانًا ظاهرة تسمّى الشّفقَ القطبيَّ (**aurora borealis**) أو (الضَّوء الشّماليّ) في النطاق الشّماليّ للكرة الأرضية. ولمعرفة سبب هذه الظاهرة: ارجع إلى المثال 20 – 6 (والشّكل 20 – 17). في (الشّكل 20 – 18)، تخيلنا عاصفة من الجسيمات المشحونة التي تجتاز الأرض. مركبة السرعة العموديّة على المجال لكلّ جُسيم تجعله يتحرك بمسارات دائرية حول خطوط المجال، في حين تدفع مركبة السرعة الموازية للمجال الجسيم باتجاه الأقطاب. وكلّما اقترب الجُسَيْمُ من القطب، يصبح المجال المغناطيسيّ أقوى، ويقلّ نصف قطر المسار الحلزونيّ.

إنّ التركيز الكبير للجسيمات المشحونة يؤدي إلى تأيّن الهواء، مما يؤدي إلى انطلاق ضوء يسمّى الشّفقَ القطبيَّ، وهي ظاهرة ترافق زيادة إطلاق العواصف الشّمسيّة للجسيمات المشحونة باتجاه الأرض

تطبيق الفيزياء
الشفق القطبيّ

* الضّرب الاتّجاهيّ

نستطيع كتابة (المعادلة 20 – 3) بصورة متجهة بدمجها مع قاعدة اليد اليمنى كما يلي:

$$\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} \qquad \textbf{(5 – 20)}$$

إنّ إشارة الضرب المتجه ($\times$) تعطي قاعدة اليد اليمنى: بحيث نشير أولا بأصابع اليد المفتوحة باتجاه السرعة $\vec{\mathbf{v}}$، وعند ثنيها باتجاه المجال $\vec{\mathbf{B}}$، فإنّ الإبهام يشير إلى اتجاه القوّة $\vec{\mathbf{F}}$. ويتضمن الضرب المتجه ($\times$) استخدام جيب الزاوية ($\sin\theta$) لتحديد مقدار القوّة F. (المعادلة 20 – 5) هي معادلة متجه، وتدعى عملية الضّرب المتجه.

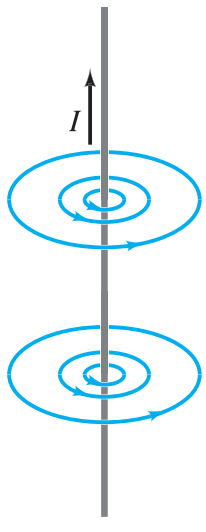
5-20 المجال المغناطيسيّ الناتج من سلك مستقيم طويل

رأينا في (البند 20 – 2 والشّكل 20 – 8) أنّ المجال المغناطيسيّ المحيط بسلك مستقيم طويل يحمل تيارًا I عبارة عن دوائر يكون السّلك في مركزها. وتستطيع التّوقّع بأنّ المجال عند نقطة معينة يكون أكبر كلّما كان التّيّار أكبر، وأنّ المجال يكون أقلّ كلّما ابتعدنا عن السلك. وهناك الكثير من التجارب التي أثبتت أنّ المجال الناتج من التّيّار في سلك طويل مستقيم يتناسب طرديًّا مع التّيّار، وعكسيًّا مع المسافة r عن السلك

$$B \propto \frac{I}{r}$$

وتنطبق هذه العلاقة عندما يكون السلك طويلا مقارنة بالمسافة r.

الشّكل 20 – 19: كما ورد في الشّكل (20-8 ب). خطوط المجال المغناطيسيّ حول سلك مستقيم يحمل تيارًا (I).



ثابت التناسب يساوي* $\mu_0/2\pi$. وبالتالي، يكون (المجال المغناطيسيّ لسلك مستقيم طويل

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r} \qquad \textbf{(6 - 20)}$$

ومقدار الثابت μ_0 الذي يسمى **السّماحية المغناطيسيّة للفراغ** هو: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$

لمجال المغناطيسيّ الناتج من تيار في سلك مستقيم طويل.

المثال 20-7 حساب $\vec{B}$ بالقرب من سلك

سلك كهربائيّ في جدار عمارة يحمل تيارًا مستمرًّا مقداره 25 A عموديًّا للأعلى. ما المجال المغناطيسيالناتج من هذا السلك عند نقطة P تقع على مسافة 10 cm شمال السلك (الشكل 20 - 20)؟

النهج: نفترض أنّ طول السلك أكبر بكثير من مسافة 10 cm التي تقع عندها النقطة P. وعليه، نستطيع تطبيق المعادلة 20 - 6.

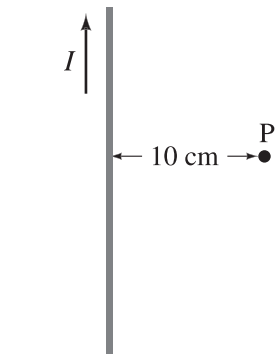
الحل: بالرجوع إلى المعادلة 20 - 6 يكون

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(25\,\mathrm{A})}{(2\pi)(0.10\,\mathrm{m})} = 5.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}$$

أو 0.050 G ومن قاعدة اليد اليمنى (الشكل 20 - 8 ج). فإنّ المجال عند هذه النقطة يكون باتجاه الغرب (داخل إلى الورقة في الشّكل 20 - 20).

ملحوظة: مجال السّلك يساوي مجال الجاذبيّة الأرضية تقريبًا. لذا، فإنّ البوصلة عند هذه النقطة لا تشير إلى الشّمال، بل إلى الشّمال الشّرقيّ.

ملحوظة: تتكون معظم أسلاك التوصيل في المباني من كيبلات تحتوي على سلكين يحملان تيارين باتجاهين متعاكسين. ولهذا، فإنّ المجال المغناطيسيّ الناتج منهما يلغي بعضه بعضًا.



الشّكل 20 - 20 المثال 20 - 7

تنويه:

البوصلة بالقرب من تيار كهربائيّ لا تشير إلى اتجاه الشّمال.

المثال 20-8 المجال المغناطيسيّ عند منتصف المسافة بين سلكين حاملين تيارًا

سلكان مستقيمان متوازيان، المسافة بينهما 10.0 cm، يحملان تيارين باتجاهين متعاكسين. التّيّار $I_1 = 5.0$ A خارج من الورقة. والتّيّار $I_2 = 7.0$ A داخل إليها (الشكل 20 - 21). احسب المجال المغناطيسيّ بالمقدار والاتجاه عند نقطة تقع في منتصف المسافة بينهما.

النّهج: المجال الناتج من كلا السّلكين يحسب من العلاقة 20 - 6. ويحدّد الاتجاه من قاعدة اليد اليمنى. المجال الكليّ هو حاصل جمع المجالين.

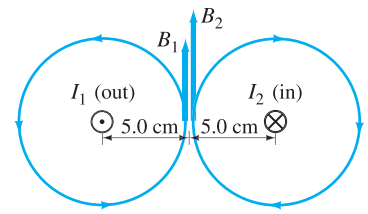
الحل: تقع نقطة المنتصف على مسافة 0.050 m عن كلا السّلكين. ومن (المعادلة 20 - 6) نحصل علي

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(5.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.050\,\mathrm{m})} = 2.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T} \quad \text{(إلى الأعلى)}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(7.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.050\,\mathrm{m})} = 2.8 \times 10^{-5}\,\mathrm{T} \quad \text{(إلى الأعلى)}$$

إذن، يكون المجال الكلي إلى الأعلى، ويساوي

$$B = B_1 + B_2 = 4.8 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}.$$



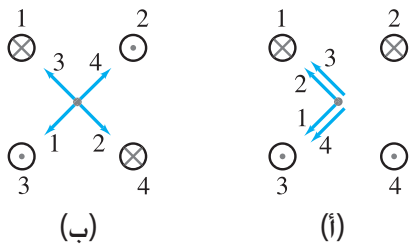
الشّكل 20 – 21 المثال 20 - 8
يحمل السلكُ 1 تيار I1 خارج من الورقة، والسلك 2 يحمل تيار I_2 داخل إليها، فينتج مجالان يكون شكل خطوطهما دوائر حول كلا السّلكين.

* تم اختيار الثابت بهذه الصورة المعقدة بحيث يكون لقانون أمبير (البند 20 - 8) شكل بسيط وجميل.

المثال المفاهيمي 20-9 **المجال المغناطيسيّ الناتج من أربعة أسلاك**

يرينا (الشكل 20 – 22) أربعةَ أسلاك طويلةً متوازيةً، تحمل تيارات متساوية باتجاه داخل الورقة أو خارجة منها. في أيّ الوضعين يكون المجال المغناطيسيّ في مركز المربع أكبر: (أ) أم (ب)؟

الجواب: يكون المجال المغناطيسيّ أكبر في (أ). تشير الأسهم إلى اتجاهات المجالات الناتجة من كلّ سلك. وتستطيع التّأكّد من هذه الاتجاهات باستخدام قاعدة اليد اليمنى. يكون المجال المغناطيسيّ الكلّيّ إلى اليسار في الوضع (أ)، ويساوي صفرًا في الوضع (ب).



الشّكل 20 – 22 المثال 20 - 9

6-20 القوّة بين سلكين متوازيين حاملين للتيار

لقد رأينا أنّ السلك الذي يحمل تيارًا ينتج مجالا مغناطيسيّا (مقداره يعطى بالعلاقة 20 – 6 لسلك مستقيم طويل). بالإضافة إلى ذلك، وجدنا أنّ الموصل الذي يحمل تيارًا يتأثر بقوة عند وضعه في مجال مغناطيسيّ (البند 20 – 3، العلاقة 20 – 1). ولذلك، فإنّنا نتوقع أنّ السلكين المتوازيين اللذين يحملان تيارين يؤثران بقوة في بعضهما.

إذا كان لدينا سلكان طويلان متوازيان بينهما مسافة d كما في (الشّكل 20 – 23 أ) يحملان تيارين: I_1 و I_2، على الترتيب، فإنّ كلّ تيار يُنتج مجالًا مغناطيسيًّا يؤثر في السّلك الآخر. على سبيل المثال، المجال المغناطيسيّ B_1 الناتج من التّيّار I_1 في (الشّكل 20 – 23) يعطى بالعلاقة 20 – 6 عند موقع السلك الثاني كما يلي:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1}{d}$$

انظر إلى (الشّكل 20 – 23 ب) حيث إنّ المجال الناتج من التّيّار I_1 فقط موضح فيه . واستنادًا إلى العلاقة 20 – 2، فإنّ القوّةَ F_2 المؤثّرة من المجال B_1 على قطعة طولها L_2 من السلك الثاني الذي يحمل تيارًا مقداره I_2 هي

$$F_2 = I_2 B_1 l_2$$

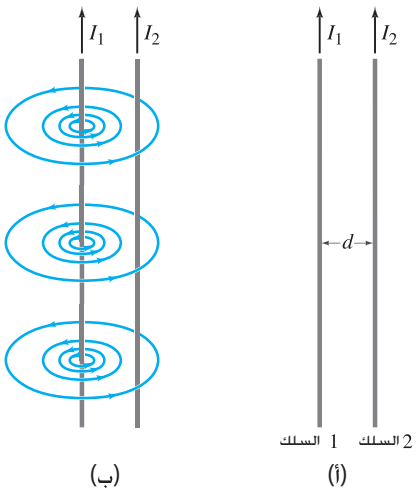
لاحظ أنّ القوّة على I_2 هي من المجال الناتج من I_1 فقط. وبالطبع، فإنّ I_2 يُنتج مجالا، ولكنّه لا يؤثر في نفسه. وبتعويض قيمة B_2 في المعادلة السابقة، نجد أنّ القوّة F_2 المؤثّرة في L_2 من السلك الثاني هي

$$F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} l_2 \qquad \textbf{(7 – 20)}$$

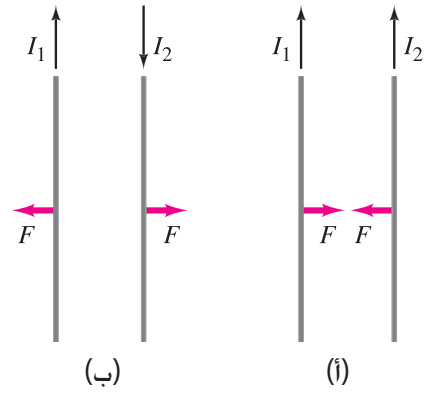
إذا استخدمنا قاعدة اليد اليمنى -1. (الشكل 20 - 8 ج). نرى أنَّ خطوط المجال تكون كما في (الشكل 20 - 23 ب).

وإذا طبّقنا قاعدة اليد اليمنى الموضّحة في (الشّكل 20 – 11 ج)، فإنّ القوّة المؤثّرة في I_2 ستكون إلى اليسار في (الشّكل 20 – 23 ب). أي أنّ I_1 يؤثر بقوة جاذب في I_2 (الشّكل 20 – 24 أ) . وهذا صحيح إذا كان التّيّاران بالاتجاه نفسه، أما إذا كانا في اتجاهين متعاكسين، فتكون القوّة بينهما قوة تنافر (الشكل 20 – 24 ب). وبالطريقة ذاتها نستطيع توضيح أنّ المجال المغناطيسيّ الناتج من I_2 يؤثر بقوة مساوية ومعاكسة بالاتجاه في I_1. ونستطيع أن نتوقع هذا أيضًا من قانون نيوتن الثالث. ولهذا، فإنّ السلكين المتوازيين اللذين يحملان تيارين يجذبان بعضهما إذا كانا بالاتجاه نفسه، ولكنّهما يتنافران إذا كانا باتجاهين متعاكسين.

الشّكل 20 – 23
(أ) سلكان متوازيان يحملان تيارين؛ I_1 و I_2.
(ب) المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}_1$ الناتج من I_1 (المجال الناتج من I_2 غير موضح بالصورة). اتجاه $\vec{\mathbf{B}}_1$ داخل للورقة عند موقع التّيّار 2I.



الشّكل 20 - 24
(أ) التّيّاران المتوازيان يؤثّران في بعضهما بقوة تجاذب إذا كانا بالاتجاه نفسه.
(ب) التّيّاران المتوازيان يؤثّران في بعضهما بقوة تنافر إذا كانا باتجاهين متعاكسين.



المثال 20-10 القوّة بين سلكين حاملين للتيار

سلكان في كابل واحد، طول كلٍّ منهما 2.0-m، والمسافة بينهما 3.0 mm، يحملان تيارًا ثابتًا مقداره 8.0 A باتجاهين متعاكسين. احسب القوّة المتبادلة بينهما.

النّهج: يقع كلّ تيار في المجال المغناطيسيّ للآخر. وبتطبيق المعادلة 20 – 7. نستطيع معرفة المطلوب $\mu_0/2\pi = 2.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$.

الحلّ: باستخدام المعادلة 20 – 7 نحصل على

$$F = \frac{(2.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(8.0\,\mathrm{A})^2(2.0\,\mathrm{m})}{(3.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m})} = 8.5 \times 10^{-3}\,\mathrm{N}$$

التّيّاران باتجاهين متعاكسين. لذا، فإنّ القوّة بينهما قوة تنافر.

المثال 20-11 تعليق سلك يحمل تيارًا باستخدام سلك آخر يحمل تيارًا.

يحمل سلك أفقيّ تيارًا $I_1 = 80\ \mathrm{A}$. إذا كان هنالك سلكٌ آخر موازٍ لهذا السّلك، ويقع تحته مباشرة على مسافة 20 cm (الشّكل 20 – 25). وإذا كانت كتلة السّلك السّفليّ 0.12 g للمتر الواحد، فما مقدار التّيّار الذي يجب أن يمرّ فيه حتى لا يسقط بتأثير الجاذبيّة الأرضية؟

النّهج: حتى لا يسقط السّلك السّفليّ تحت تأثير الجاذبيّة الأرضية، فيجب أن تؤثّر فيه قوة أفقية للأعلى تساوي قوة الجاذبيّة الأرضية (وزن السلك)، وهنا يجب أن يكون التّيّاران في السلكين بالاتجاه نفسه.

الحلّ: تؤثّر قوّةُ الجاذبيّة الأرضية على السلك الثاني للأسفل. وهنا، فإنّ قوّة الجاذبيّة لمترٍ واحدٍ من السلك تساوي

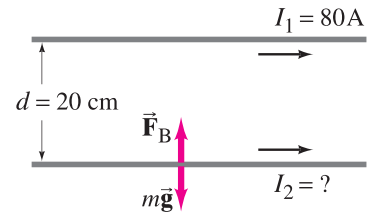
$$F = mg = (0.12 \times 10^{-3}\,\mathrm{kg/m})(1.0\,\mathrm{m})(9.8\,\mathrm{m/s^2}) = 1.18 \times 10^{-3}\,\mathrm{N}$$

القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في السلك الثاني تعطى من العلاقة 20 – 7 كما يلي:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d}l$$

حيث $d = 0.20\ \mathrm{m}$، و $I_1 = 80\ \mathrm{A}$، و $l = 1.0\ \mathrm{m}$. وبمساواة هاتين القوتين نحصل على

$$I_2 = \frac{2\pi d}{\mu_0 I_1}\left(\frac{F}{l}\right) = \frac{2\pi(0.20\,\mathrm{m})}{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})(80\,\mathrm{A})}(1.18 \times 10^{-3}\,\mathrm{N/m}) = 15\,\mathrm{A}$$



الشّكل 20 – 25 المثال 20 - 11

* تعريف الأمبير والكولوم

قد تتسائل كيف يمكن أن يكون الثابت μ_0 في المعادلة (20 - 6) مساويًا تمامًا للقيمة $4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$. إليك الإجابة عن ذلك، حسب التعريف القديم، فقد قيست قيمة μ_0 مخبريًّا عن طريق التجربة وقد كانت قريبة جدًّا من هذه القيمة. أمّا الآن، فتعرف μ_0 على أنّها مساويةٌ تمامًا للقيمة $4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$. وهذا لا يمكن حدوثه لو تم تعريف الأمبير بصورة مستقلة. فالأمبير وحدة التيار الكهربائي، يُعرّف بالاعتماد على المجال المغناطيسي B الذي ينتجه مستخدمين تعريف القيمة μ_0.

وبشكل جزئيّ، نستخدم القوّة بين سلكين متوازيين يحملان تيارين (المعادلة 20 - 7) لتعريف الأمبير بصورة دقيقة. فإذا كانت $I_1 = I_2 = 1\ \mathrm{A}$ تمامًا، وكانت المسافة بين السلكين تمامًا، فإنّ

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A})}{(2\pi)}\frac{(1\,\mathrm{A})(1\,\mathrm{A})}{(1\,\mathrm{m})} = 2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N/m}$$

تعريف الأمبير والكولوم

وعليه، يُعرّف الأمبير على أنّه التّيّار الذي يمر في سلكين طويلين متوازيين، والمسافة بينهما $1\,m$ بحيث تنتج قوة مقدارها $2 \times 10^{-7}\,N/m$ لوحدة الأطوال لكلا السلكين.

وهذا تعريف دقيق للأمبير (ampere). وعليه يعرف الكولوم (coulomb) بأنّه أمبير. ثانية: $1\ \mathrm{C} = 1\ \mathrm{A\cdot s}$

7-20 الملفّ الحلزونيّ والكهرومغناطيسيّة

يتكوّن الملفّ الحلزونيّ من سلك ملفوف عدة لفات بشكل أسطوانيّ. المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ كبير نسبيًّا؛ لأنّه ينتج من الكهربائيّ المار في كلّ حلقة. إنّ الملفّ الحلزونيّ يؤثّر كالمغناطيس تمامًا وتكون إحدى نهايتيه قطبًا شماليًّا، في حين تكون النهاية الثانية قطبًا جنوبيًّا، وذلك استنادًا إلى اتجاه التّيار في الملف (باستخدام قاعدة اليد اليمنى). في (الشّكل 20 – 26)، يكون القطب الشّماليّ إلى اليمين. وكما سنرى في البند اللاحق، فإنّ المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ الذي يتكون من N لفة، وطوله L، ويحمل تيارًا مقداره I، يعطى كما يلي:

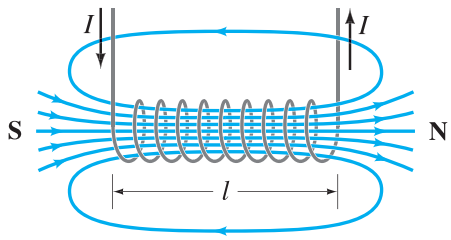
$$B = \mu_0 IN/l \qquad \textbf{(8 – 20)}$$

إذا وضعنا قطعة من الحديد داخل الملفّ الحلزونيّ، فسيزداد مجاله المغناطيسيّ؛ لأنّ الحديد يصبح مغناطيسًا. المجال المغناطيسيّ الكليّ هو مجموع المجالين المغناطيسيّين الناتجين من التّيار والحديد، ويمكن أن يكون مئة أو ألف ضعف من المجال الناتج من التّيار فقط (انظر البند 20 – 12). مثل هذا المغناطيس الناتج من ملف حلزونيّ يحوي قلبًا من الحديد يُسَمّى **مغناطيسًا كهربائيًّا**.

إنّ المغانط الكهربائيّة لها عدّة تطبيقات عملية؛ تبدأ من استخدامها في المحركات والمولّدات إلى إنتاج مجالات مغناطيسيّة كبيرة تُستخدم في الأبحاث. وفي بعض الأحيان، نستخدم مغانط دون قلب حديديّ، والمجال المغناطيسيّ هنا ينتج من التّيار في أسلاك الملفّ فقط. وفي بعض التطبيقات، تُصنعُ الأسلاك من مادة ذات موصلية فائقة تحفظ تحت درجة التحوّل (البند 18 – 9)، وتنتج المجالات المغناطيسيّة العالية جدًّا من هذه المواد دون استخدام قلب حديديّ. لا نحتاج إلى قدرة كهربائية للاحتفاظ بالتّيارات العالية في الملفات فائقة الموصلية، ممّا يعني توفير الطاقة وتقليل الحرارة المستنفذة.

وهناك أداةٌ أخرى مفيدة تتكوّن من ملفّ حلزونيّ يوضع جزئيًّا داخله قضيبٌ من الحديد. أحد أبسط الاستخدامات لهذا التركيب هو جرس الباب (الشّكل 20-27). عندما تغلق الدائرة بالضغط على المفتاح الخارجي، فإنّ الملفّ يصبح مغناطيسًا، وعندئذٍ يؤثر بقوة في قضيب الحديد، فيجذبه نحو الجرس. كما أنّ هناك ملفا حلزونيّا كبيرا يستخدم في باديء حركة السيارة: فعند تشغيلها، يمر التّيار في محرك الباديء، فينشط الملفّ الحلزونيّ، ممّا يجعله يتحرّك ليصبح على اتصالٍ مباشرٍ مع مبدّل السرعة المثبت على محرك العجلات. يستخدم الملفّ الحلزونيّ كمفتاح في كثيرٍ من الأجهزة، وله ميزة التحريك الميكانيكيّ لبعض الأجزاء بسرعة ودقة.

إنّ دوائر الحماية الحديثة جميعها التي تستخدم لحماية المنازل والمباني من الحمل الزائد أو الحرائق تحتوي على حساس مغناطيسيّ، وليس فقط على أجزاء حرارية ازدواج معدني حراري كما هو موضّح في (البند 18 – 6، الشّكل 18 – 19). إذا أصبح التّيار الكهربائيّ فوق مستوى معين، فإنّ المجال المغناطيسيّ الناجم عنه يسحب صفيحة حديدية تؤدي إلى كسر نقطة التوصيل كما في (الشّكل 18 – 19 ب) و ج. وتحتوي دوائر الحماية الأكثر تعقيدًا على قواطع تيار أرضية مشروحة في (البند 21-8) يستخدم فيها الملف الحلزونيّ. القضيب الحديدي في (الشّكل 20 – 27) بدلا من قرعه الجرس، فإنّه يضرب جهة واحدة من زوج من النقاط فيفتحها، مما يؤدي إلى فتح الدارة الكهربائيّة. وتتفاعل قواطع الدارات المغناطيسية بسرعة (<10 msec) وفي المباني تصمم للتفاعل مع التيارات العالية للقواطع.

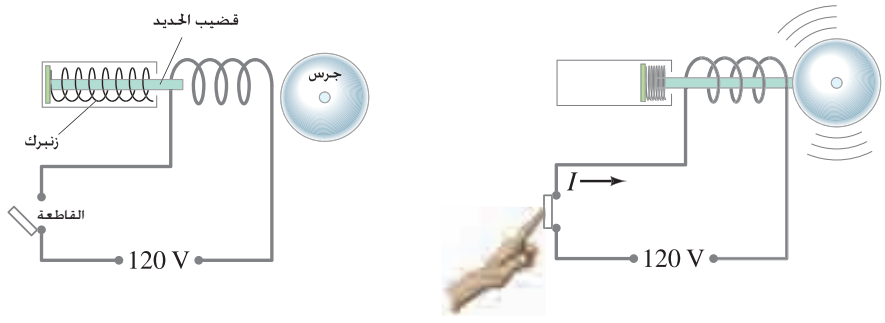


الشّكل 20 – 26 المجال المغناطيسيّ للملفّ الحلزونيّ. القطب الشّماليّ لهذا الملفّ الذي يعدّ كمغناطيس إلى اليمين والقطب الجنوبيّ إلى اليسار.

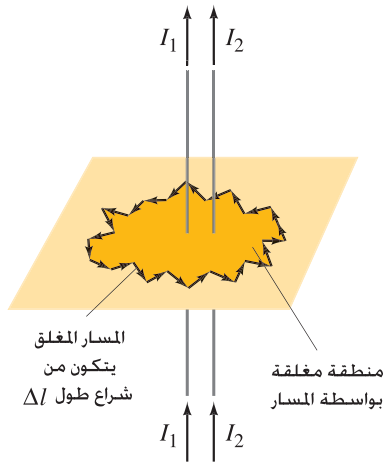
تطبيق الفيزياء
المغناطيس الكهربائيّ. والملف الحلزوني

تطبيق الفيزياء
جرس الباب، باديء حركة السيارة.

تطبيق الفيزياء
قواطع الدارات المغناطيسية.



الشّكل 20 – 27 الملفّ الحلزونيّ المستخدم في جرس الباب.



الشّكل 20 – 28 مسار اختياري يحوي تيارين كهربائيين للتعامل مع قانون أمبير. قسّم المسار إلى قطع طول كلّ منها Δl . التّيّار الكليّ الذي يحويه المسار المغلق الموضح في الشّكل هو $I_{\text{encl}} = I_1 + I_2$.

8-20 قانون أمبير *

رأينا في (البند 20 – 5) أنّ (المعادلة 20 – 6) تعطينا العلاقة بين التّيّار المار في سلك مستقيم طويل والمجال المغناطيسيّ الناتج منه. إنّ هذه المعادلة صالحة فقط في حالة وجود سلك مستقيم طويل. هل هنالك علاقة عامة بين التّيّارِ في سلك مهما كان شكله والمجالِ المغناطيسيّ حوله؟ نعم: فالعالِم الفرنسي أندريه أمبير (1775 – 1836) اقترح مثل هذه العلاقة بعد وقت قصير من اكتشاف أورستد. اختر أيّ مسار مغلق حول التّيّار، كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 28)، وتخيّل أنّه يتكوّن من قطع صغيرة، طول كلّ منها Δl. نأخذ حاصل ضرب طول كلّ قطعة في مركبة المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ الموازية لتلك القطعة. إذا جمعنا هذه الحدود، فإنّ الناتج (كما قال أمبير) يساوي μ_0 مضروبًا في التّيّار I_{encl} الذي يمرّ بالسطح الذي يحويه المسار. وهذا هو قانون أمبير، ويمكن كتابته كما يلي:

قانون أمبير

$$\Sigma B_{\parallel}\,\Delta l = \mu_0 I_{\text{encl}} \qquad \textbf{(20 – 9)}$$

يعني الرمز Σ المجموع، أمّا $B_{\parallel}$ فتعني مركبة $\vec{\mathbf{B}}$ الموازية لـ Δl. تمّ اختيار الطول Δl صغيرًا بما يكفي لجعل $B_{\parallel}$ ثابتة لكلّ طول. ويجب أن يُعمل المجموع على مسار مغلق، و I_{encl} هو التّيّار الكليّ المحصور بهذا المسار المغلق.

* المجال الناتج من سلك مستقيم

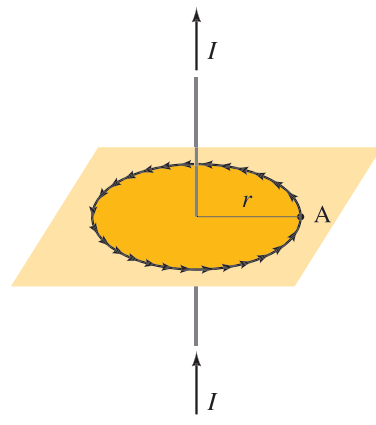
نستطيع اختبار قانون أمبير بتطبيقه على سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا I. لِنجدَ الآن مقدار المجال B عند النقطة A التي تبعد مسافة r عن السلك في (الشّكل 20 – 29). وكالمسار المستخدم في (المعادلة 20 – 9)، نختار مسارًا ملائمًا على شكل دائرة نصف قطرها r، لأنّه عند أيّ نقطة على هذا المسار يكون باتجاه المماس على هذه الدائرة. ولأيّ قطعة قصيرة من الدائرة (الشّكل 20 – 29) سيكون $\vec{\mathbf{B}}$ موازيًا لهذه القطعة. وعليه، $B_{\parallel} = B$. ولو فرضنا أننا قطّعنا المسار الدائريّ إلى 100 قطعة*، فإنّ قانون أمبير يعطي كما يلي:

$$(B\,\Delta l)_1 + (B\,\Delta l)_2 + (B\,\Delta l)_3 + \cdots + (B\,\Delta l)_{100} = \mu_0 I$$

تمثّل النقاطُ الحدودَ غير المكتوبة كلَّها. وتبعد القطع كلّها المسافة نفسها عن السلك. وبسبب التماثل، فإنّ B متساوي عند القطع كلّها. لذا، يخرج B خارج المجموع، فنحصل على

$$B(\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \cdots + \Delta l_{100}) = \mu_0 I$$

مجموع طول القطع Δl مجتمعةً هو محيط الدائرة، $2\pi r$، ويكون لدينا



الشّكل 20 – 29 مسار دائري نصف قطره r

* في الواقع يكون قانون أمبير دقيقًا عندما يكون هناك عددٌ كبيرٌ من قطعٍ صغيرة. لكن ذلك يقود إلى التكامل.

$$B(2\pi r) = \mu_0 I$$

أو:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

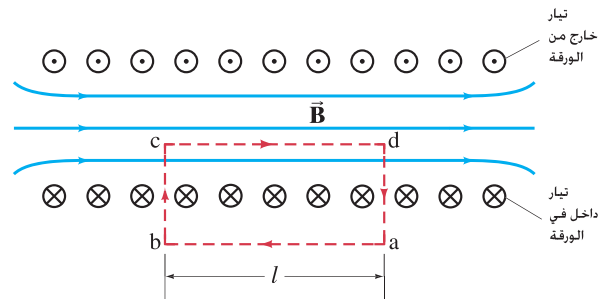
وهذه هي (المعادلة 20 – 6) نفسها للمجال المغناطيسيّ بالقرب من سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا؛ أي أنَّ قانون أمبير يتوافق مع التجارب في هذه الحالة. وهناك عدد كبير من التجارب التي أكّدت أنّ قانون أمبير يمكن تطبيقه بشكل عام، حيث يمكن تطبيقه لحساب المجال المغناطيسيّ لأوضاع بسيطة ومتماثلة. إنّ أهمية قانون أمبير تكمن في أنّه يربط المجالين المغناطيسيّ والكهربائيّ بطريقةٍ مباشرةٍ وشائقة رياضيًّا. يُعدّ قانون أمبير واحدًا من القوانين الأساسيّة في الكهرباء والمغناطيسيّة، ويطبق على الأوضاع جميعها التي لا تتغير فيها التّيّارات والمجالات مع الزمن.

* المجال داخل الملفّ الحلزونيّ (اللولبيّ)

سنستخدم الآن قانون أمبير لحساب المجال المغناطيسيّ داخل ملف حلزونيّ يتكون من سلك ملفوف عدة لفات، (الشّكل 20 – 3). كلّ لفة تنتج مجالا كما هو مبيّن في (الشّكل 20 – 9). والمجال الكليّ داخل الملف الحلزونيّ هو مجموع المجالات الناتجة من كلّ حلقة كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 3 أ) لعدد من اللفات. إذا زاد عدد اللفات، وأصبحت متراصّة بشكل أكبر يصبح المجال في الداخل موازيًا لمحور الملف باستثناء الأطراف كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 3 ب). وخارج الملف، تنتشر خطوط المجال إلى الخارج في الفضاء، ويكون المجال خارج الملف أضعف منه في الداخل. ولتطبيق قانون أمبير؛ نختار المسار *abcd* الموضح في (الشّكل 20 – 31) بعيدًا عن أطراف الملف. نفترض أنّ هذا المسار مكوّن من أربع قطع مستقيمة تشكل أضلاع مستطيل هي: *ab, bc, cd, da*. وباستعمال قانون أمبير، (المعادلة 20 – 9)، نحصل على

$$(B_{\parallel}\,\Delta l)_{ab} + (B_{\parallel}\,\Delta l)_{bc} + (B_{\parallel}\,\Delta l)_{cd} + (B_{\parallel}\,\Delta l)_{da} = \mu_0 I_{encl}$$

أول حدّ في المجموع إلى أقصى اليسار يساوي صفرًا تقريبًا؛ لأنّ المجال يكون مهملًا خارج الملفّ الحلزونيّ. إلى جانب أنّ $\vec{\mathbf{B}}$ يكون عموديًّا على القطعتين *bc*، و *cd*، وتكون هذه الحدود مساوية للصفر، ويبقى الحدّ $(B_{\parallel}\,\Delta l)_{cd}$ فقط إلى اليسار. لذا، يكون $(B_{\parallel}\,\Delta l)_{cd} = Bl$، حيث B هو المجال داخل الملفّ الحلزونيّ، و l طول *cd*. ويصبح $B\,l$ مساويًا لِـ μ_0 مضروبًا في التّيّار المحصور بالمستطيل الذي اخترناه.



الشّكل 20 – 31 مقطع عرضي للملفّ الحلزونيّ. المجال المغناطيسيّ داخله مستقيم باستثناء الأطراف. تمثل الخطوطُ الحمراء المقطّعة المسارَ الذي اخترناه لتطبيق قانون أمبير. ⊙ و ⊗ يمثلان اتجاه التّيّار في الحلقات خارج الصفحة وداخلها.

إذا كان التّيّار الذي يمر في سلك الملفّ الحلزونيّ هو I، فالتّيّار الكليّ المحصور في المسار *abcd* هو NI، حيث N عدد اللفات داخل هذا المسار خمس لفات في (الشّكل 20 – 31). ونحصل من قانون أمبير على

$$Bl = \mu_0 NI$$

و

$$B = \frac{\mu_0 IN}{l}$$

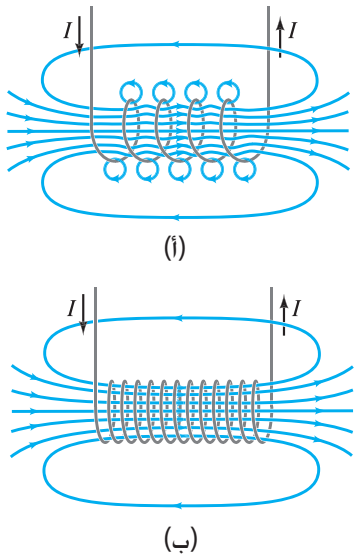
(الملفّ الحلزونيّ) **(20 – 8 إعادة)**

المجال المغناطيسيّ داخل الملف الحلزونيّ.

وهذا ما استنتجناه في البند السابق، وهذا هو المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ. يعتمد B فقط على عدد اللفات لوحدة الطول N/l ومقدار التّيّار I، ولا يعتمد على الموقع داخل الملفّ الحلزونيّ، ويكون B منتظمًا داخل الملفّ الحلزونيّ، إذا كان الملفّ الحلزونيّ متناهي الطول، ولكنه يعطينا تقريبًا جيدًا للمجال المغناطيسيّ داخل الملفّ الحلزونيّ وبعيدًا عن الأطراف.

إنّ اتجاه المجال المغناطيسيّ تحدده قاعدة اليد اليمنى الأولى (الشّكل 20 – 8 ج) كما هو موضح في (الشّكل 20 – 31).

المجال المغناطيسيّ الناتج من سلك مستقيم باستخدام قانون أمبير.



الشّكل 20 – 3 (أ) المجال المغناطيسيّ الناجم عن عدة حلقات من الملفّ الحلزونيّ. (ب) لحلقات متراصّة، فإنّ المجال الناتج يكون مُنتظما تقريبًا.

9-20 عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا والثناقطبي المغناطيسيّ

عندما يمرّ تيار كهربائيّ في حلقة مغلقة من سلك موضوعة في مجال مغناطيسيّ خارجيّ كما هو مبين في (الشّكل 20 –32)، فإنّ القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الحلقة تسبب عزم ازدواج، وهذا هو مبدأ عمل الكثير من الأجهزة العملية بما فيها الفولتميترات، والأميترات والمحركات الكهربائيّة (سنناقش هذه التطبيقات في البند القادم). ومن الجدير بالذكر أنّ التفاعل بين التّيّار والمجال المغناطيسيّ مهم في مجالات أخرى كالفيزياء الذرية.

عندما يمرّ تيار خلال الحلقة الموضحة في (الشّكل 20 – 32) أ بحيث يكون سطحها موازيًا للمجال المغناطيسيّ B، وإذا افترضنا أنّ الحلقة مستطيلة، فإنّ $\vec{\mathbf{B}}$ لا يؤثر بقوة ولا بعزم دورانيّ في الأضلاع الموازية له؛ لأنّ $\sin\theta = 0$ في المعادلة 20 – 1، ولكن المجال المغناطيسيّ يؤثر بقوة في كلّ من الضلعين المتعامدين مع المجال بقوتين هما: $\vec{\mathbf{F}}_1$ ، و $\vec{\mathbf{F}}_2$ (انظر الشّكل 20 – 32 ب). ومن قاعدة اليد اليمنى الثانية (الشّكل 20 – 11 ج)، فإنّ اتجاه القوّة على الضلع الذي يسري فيه التّيّار للأعلى (إلى اليسار) يكون معاكسًا لاتجاه القوّة على الضلع الذي يسري فيه التّيّار للأسفل (إلى اليمين)، ويكون مقدار القوتين متساويًا. هاتان القوتان تسببان عزم ازدواج يؤدي إلى دوران الملف حول محور دورانه. لنحسب الآن مقدار العزم الدورانيّ. من المعادلة 20 – 2 (I ⊥ B)، تكون القوّة $F = IaB$، حيث a طول الضلع العمودي للملف. طول ذراع القوّة لكلتا القوتين هو $b/2$، حيث b عرض الملفّ. وهنا، يكون محور الدوران في المنتصف. العزم الناتج من كلتا القوتين $\vec{\mathbf{F}}_1$ ، و $\vec{\mathbf{F}}_2$ يؤثر بالاتجاه نفسه، ويكون العزم الكليّ هو المجموع الآتي:

$$\tau = IaB\frac{b}{2} + IaB\frac{b}{2} = IabB = IAB$$

حيث $A = ab$ هي مساحة حلقة الملف. وإذا كان عدد اللفات N يكون التّيّار NI. ويصبح العزم

$$\tau = NIAB$$

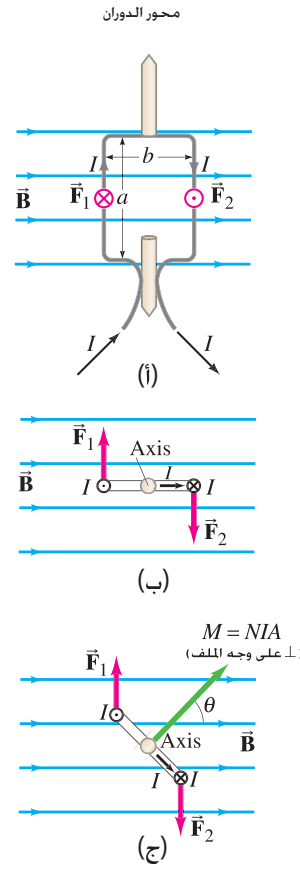
وإذا عمل الملف زاوية θ مع المجال المغناطيسيّ كما هو موضح في (الشّكل 20 – 32 ج) فإنّ القوّة لا تتغير، ولكن كلّ ضلع يتغير من $\frac{1}{2}b$ إلى $\frac{1}{2}b\sin\theta$. لاحظ أنّ الزاوية θ تؤثر بين اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ والعمودي على سطح الملف (الشّكل 20 – 32 ج)، وبالتالي يكون عزم الازدواج

$$\tau = NIAB\sin\theta \qquad \textbf{(10 – 20)}$$

وتصلح الصيغة المشتقة للملف المستطيل هنا لأيّ شكل مسطح من الملفات. وتُسَمّى الكمية NIA الثناقطبي المغناطيسيّ للملف حيث

$$M = NIA \qquad \textbf{(11 – 20)}$$

وتمثل بمتجه عموديّ على سطح الملف.



الشّكل 20 – 32 حساب عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ. (أ) وجه الحلقة موازٍ للمجال B. (ب) مشهد علويّ. (ج) تصنع الحلقة زاوية θ مع المجال مما يؤدي إلى تقليل العزم الدورانيّ لأنّ ذراع القوّة يقل.

عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا.

الثناقطبي المغناطيسيّ

المثال 12-20 عزم الازدواج على ملفّ

ملفٌ دائري قطره 20.0 cm، ويحتوي على 10 لفات. التّيّار المار في كلّ لفّة هو 3.00A. إذا وضع هذا الملفّ في مجال مغناطيسيّ خارجي $B = 2.00\text{-T}$، فاحسب أقصى وأدنى عزم ازدواج يتأثر به الملفّ من المجال.

النّهج: تصلح المعادلة 20 – 10 لأيّ شكل مسطح من الملفّات بما فيها الملفات الدّائريّة. أقصى وأقلّ عزم ازدواج يحدد من الزاوية θ التي يصنعها الملفّ (العمودي على الملف) مع المجال المغناطيسيّ.

الحلّ: مساحة لفة واحدة من الملف هي

$$A = \pi r^2 = \pi(0.100\,\text{m})^2 = 3.14\times10^{-2}\,\text{m}^2$$

يظهر أقصى عزم ازدواج عندما يكون سطح الملف موازيًا للمجال، وتكون $\theta = 90^\circ$ (الشّكل 20 – 32 ج)، و $\sin\theta = 1$. وبالتعويض في المعادلة 20 – 10 نحصل على

$$\tau = NIAB\sin\theta = (10)(3.00\,\text{A})(3.14\times10^{-2}\,\text{m}^2)(2.00\,\text{T})(1) = 1.88\,\text{N}\cdot\text{m}$$

ويظهر أقلّ عزم ازدواج عندما يكون $\sin\theta = 0$، وعندها تكون $\theta = 0^\circ$. وعليه، $\tau = 0$ من (المعادلة 20 – 10).

ملحوظة: إذا كان الملفّ حرّ الدوران، فإنّه سيدور باتجاه الوضع الذي تكون فيه $\theta = 0^\circ$.

10-20 تطبيقات: الجلفانوميترات، والمحركات، ومكبرات الصوت.

* الجلفانوميترات

إنّ المكون الأساسي لأجهزة القياس الكهربائيّ (التي تحتوي على مؤشر وتدريج) كالأميترات، والفولتميترات، والأوميترات هو الجلفانوميتر. رأينا سابقًا (البند 19 – 8) كيفية تصميم هذه الأجهزة، وسنختبر الآن كيفية عمل الجلفانوميترات. كما هو واضح في (الشّكل 20 – 23)، فإنّ الجلفانوميتر يتكوّن من ملفّ من السلك، مع مؤشّر مرتبط به معلّق في مجالٍ مغناطيسيّ لمغناطيس دائم. عندما يمر تيار في الملفّ، فإنّه يتأثر بعزم ازدواج يساوي

$$\tau = NIAB \sin\theta$$

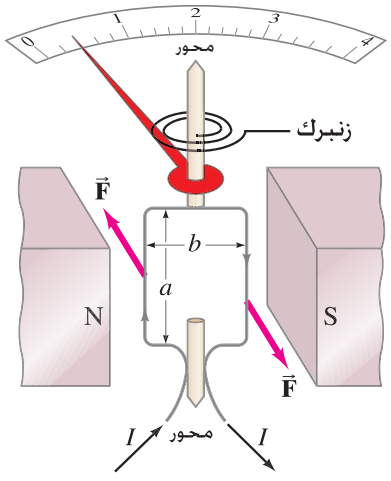
هذا العزم يعاكس بعزم مرونيّ لزنبرك مقداره τ_s، ويتناسب مع الزاوية ϕ التي يدور بها الزّنبرك (قانون هوك) ويكون

$$\tau_s = k\phi$$

حيث k معامل المرونة للزنبرك. الملف والمؤشر المرتبط به يدوران حتى يتعادل العزمان. عندما يصبح المؤشر ساكنًا في حالة اتزان، يكون العزمان متساويين: $k\phi = NIAB \sin\theta$، أو

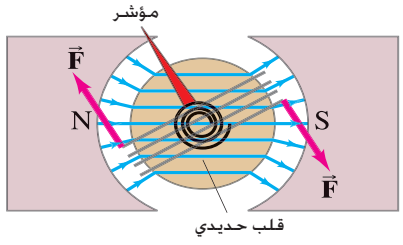
$$\phi = \frac{NIAB \sin\theta}{k}$$

يتناسب مقدار الزاوية ϕ (مقدار انحراف المؤشر) طرديًّا مع التّيّار I الذي يمرّ في الملفّ، ولكنه يعتمد أيضًا على الزاوية θ بين الملف والمجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$. وحتى يكون الجلفانوميتر أكثر فائدة؛ يجب أن تعتمد ϕ على التّيّار I فقط، وليس على الزاوية θ. ولحلّ هذه المشكلة؛ علينا استخدام مغانط ذات أقطاب منحنية حول ملفّ يحيط بقلب حديديّ أسطوانيّ كما هو موضّح في (الشّكل 20 – 34). يؤدّي الحديد إلى تكثيف خطوط المجال المغناطيسيّ، ويكون $\vec{\mathbf{B}}$ دائمًا موازيًا لوجه الملفّ. وتكون القوّة عموديّة على وجه الملف دائمًا، كما أنّ العزم لا يتغيّر مع الزاوية. وهنا، تعتمد ϕ على التّيّار فقط كما هو مطلوب.



الشّكل 20 – 33 جلفانوميتر

الشّكل 20 – 34 ملف جلفانوميتر ملفوف على قلب حديدي.



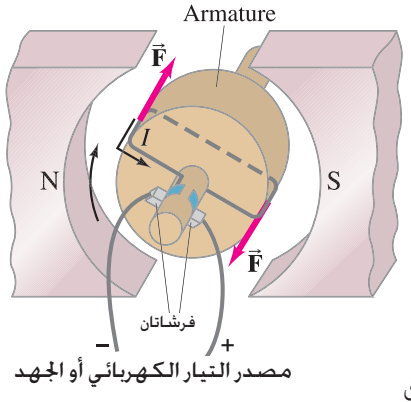
* المحرّكات الكهربائيّة

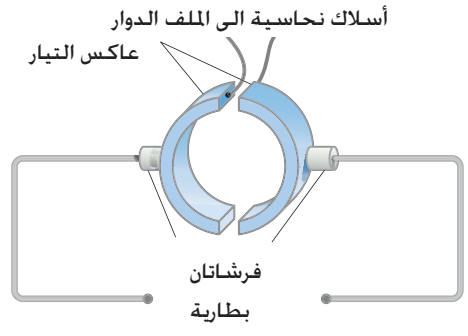
يحوّل المحركُ الكهربائيّ الطاقةَ الكهربائيّة إلى طاقةٍ ميكانيكية (دورانية). والمبدأ الذي يستند إليه في عمله هو المبدأ نفسه الذي يعمل به الجلفانوميتر باستثناء عدم وجود زنبرك. وعليه، يستطيع الملفّ الدوران المستمر باتجاه واحد. ويكون الملفّ هنا أكبر، ويكون كذلك ملفوفا على أسطوانة أكبر تُسَمّى الدوار ($r^{\circ}t^{\circ}r$)، (الشّكل 20 – 35). في الوقع، هنالك عدة أنواع من المحركات؛ أحدها موضح في هذا الشّكل، حيث الدوار مثبت على عمود دوران. عندما يكون الدوار في الموقع الموضح في (الشّكل 20 – 35)، فإنّ المجال المغناطيسيّ يؤثر بقوى في الملفّ الذي يحمل التّيّار كما يوضحه الشّكل. ومن جهة أخرى، عندما يمرّ الملفّ الذي يدور مع اتجاه عقارب الساعة- (الشّكل 20 – 35) في الموقع الرأسيّ، فإنّ القوى تؤثر بحيث تعيد الملفّ بالاتجاه المعاكس إذا بقي التّيّار كما هو. ولكن إذا استطعنا عكس اتجاه التّيّار عند تلك اللحظة الحرجة بطريقة ما، فإنّ القوى تعكس اتجاهها، ويستمر الملف بالدوران بالاتجاه نفسه. لذا، فإنّ عكس اتجاه التّيّار بشكل دوري ضروريّ كي يستمر بالسريان باتجاه واحد. ويمكن تحقيق هذا في المحركات ذات التّيّار المستمر باستخدام ما يُسَمّى بعاكس التّيّار مع فرشاتين كما هو موضح في (الشّكل 20 – 36). الفرشاتان تكونان ثابتتين باستمرار، وتحتكان مع عاكس التّيّار المثبت على عمود الدوران. عند كلّ نصف دورة، يغير كلّ نصف من العاكس اتصاله مع الشفرة الأخرى. وأخيرا، فإنّ التّيّار في الملفّ يعكس اتجاهه كلّ نصف دورة ممّا يؤدي إلى استمرار الدوران.

تطبيق الفيزياء

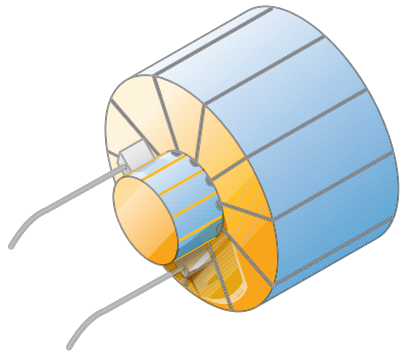
المحركات الكهربائيّة ذات التّيّار المستمر

الشّكل 20 – 35 مخطط لمحرك dc بسيط





الشّكل 20 – 36 نظام العاكس والفرشاتان في المحرك ذي التّيّار المستمر الذي يعمل على تغيير اتجاه التّيّار في الدوار لجعله يدور بشكل مستمر. يتصل العاكس مع محور دوران المحرك، ويدور معه، في حين تظلّ الفرشاتان ثابتتين.



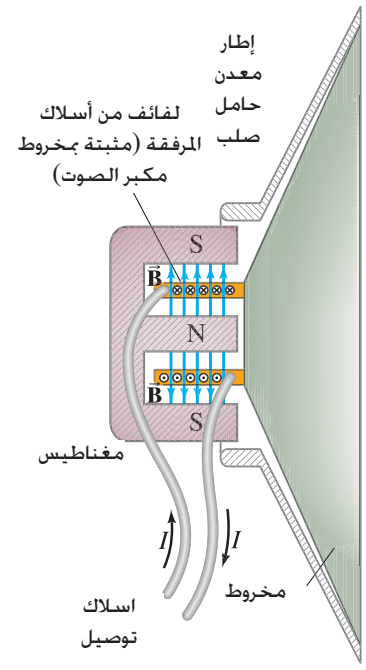
الشّكل 20 – 37 محرك كهربائيّ بعدة لفات

يحتوي كثيرٌ من المحرّكات على عدّة لفّات تُسمّى لفائف (*windings*) تثبت في أماكن مختلفة على الدوّار، (الشّكل 20 – 37). يمرّ التّيّار خلال كلّ ملفّ فقط في جزءٍ معيّن من الدورة، في الوقت الذي يعطي ترتيبه أقصى عزم دورانيّ. وبهذه الطريقة، ينتج المحرك عزمًا دورانيًّا أكثر ثباتًا من العزم الناتج من الملف المنفرد.

يستطيع محرك التّيّار المتناوب (*ac*) أن يعمل دون عاكس للتيار، حيث يعكس التّيّار نفسه اتجاهه دوريًّا. وهناك الكثير من المحركات التي تستخدم اللفائف السلكية لإنتاج المجال المغناطيسيّ (المغانط الكهربائيّة). وفي الواقع، وإضافة إلى المغانط الدائمة، نجد أنّ تصميم معظم المحركات أكثر تعقيدًا ممّا شرحناه سابقًا، ولكن المبدأ العام لها يبقى متشابهًا.

تطبيق الفيزياء

المحركات الكهربائيّة ذات التّيّار المتناوب



الشّكل 20 – 38 مكبر الصّوت

* مكبرات الصّوت

يعمل مكبّر الصّوت أيضًا على مبدأ أنّ المغناطيس يؤثر بقوة في السلك الذي يحمل تيارًا. يوصل المخرج الكهربائيّ الستيريو أو التلفاز بسلك مع السماعة (*speaker*). ومصدر الصوت يوصل بملف سلكي يرتبط بمخروط السماعة، (الشّكل 20 – 38)، يصنع مخروط السماعة عادة من ورق مقوّى قاسٍ، ويوضع بحيث يتمكن من الحركة إلى الخلف وإلى الأمام بحريّة. ويوضع مغناطيس ثابت مباشرة على الخط مع الملفّ السّلكيّ. عندما يمرّ تيار متردد لإشارة صوتية خلال سلك الملف الذي يكون حرّ الحركة خلال المغناطيس، فإنّ الملف يتأثر بقوة تنتج من المجال المغناطيسيّ للمغناطيس. وعندما يتردد التّيّار بتردد مساوٍ لتردد الإشارة الصوتية، فإنّ الملف ومخروط السماعة المرتبط به يتحرك نحو الأمام والخلف بالتردد نفسه مسببًا انضغاطات وتخلخلات مترددة للهواء، مما ينتج موجات صوتية. وتعمل السماعة على تحويل الطاقة الكهربائيّة إلى طاقة صوتية، وتعتمد ترددات الأمواج الصوتية الناتجة وكثافاتها بدقة على الإشارة الكهربائيّة المدخلة.

11-20 مطياف الكتلة

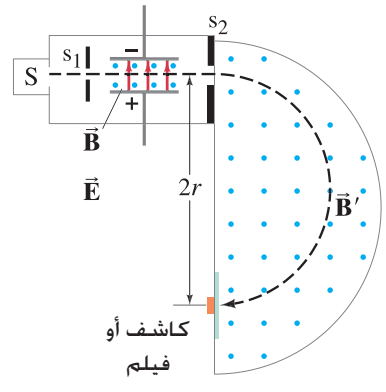
مطياف الكتلة هو أداة تستخدم لقياس كتل الذرات، ويستخدم اليوم في الكيمياء، والجيولوجيا، والأدوية لتحديد الذرات ونسبها في عينة معينة، إضافة إلى استخدامه في الفيزياء. كما هو واضح في (الشّكل 20 – 39)، فإنّ الأيونات تنتج بالتسخين أو بواسطة تيار كهربائيّ في المصدر أو العينة S، ثم تمر خلال شق S_1، ثم تدخل حيّزًا يحتوي مجالين متقاطعين: كهربائيّ ومغناطيسيّ. تتبع الأيونات مسارًا مستقيمًا في هذا الحيز إذا كانت القوّة الكهربائيّة qE (للأعلى على الأيونات الموجبة) تعادل القوّة المغناطيسيّة qvB (للأسفل على الأيونات الموجبة) وهنا يكون $qE = qvB$، أو

$$v = \frac{E}{B}$$

تطبيق الفيزياء

مطياف الكتلة

الشّكل 20 – 39 مطياف الكتلة المجالان المغناطيسيّان B و'B يشيران إلى خارج الورقة (يمثّلان بنقاط).



أمّا الأيونات التي تكون سرعتها $v = E/B$ فستمر دون انحراف خلال الشّقّ S_2 (يُسَمّى هذا الترتيب "منتقي السرعة"). في حيّزِ أنصاف الدوائر بعد S_2 يكون لدينا مجال مغناطيسيّ فقط (B')، وتتحرك الأيونات في مسار دائريّ. ويظهر نصف قطر المسار الدائريّ من العلامة التي تتركها الأيونات عند اصطدامها بالغشاء (أو الكاشف) عندما يكون المجال B' ثابتًا. وعند تثبيت r بتثبيت الموقع على الكاشف، فإنّ B' يمكن تغييره إلى أن يظهر الكاشف. يطبق قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$ على الأيون الذي يتحرك بمسار دائريّ تحت تأثير المجال المغناطيسيّ B'. مما يعطينا $qvB' = mv^2/r$ أي:

$$m = \frac{qB'r}{v} = \frac{qBB'r}{E}$$

إنّ الكميّات الموجودة على يمين المعادلة كلّها معروفة، أو نستطيع قياسها. لذا، نستطيع إيجاد قيمة m .

تاريخيًّا، قيست كتلُ كثيرٍ من الذرات باستخدام هذه الطريقة. وعند استخدام عينة نقية، فإنّنا نجد أحيانًا علامات متقاربة على الغشاء. على سبيل المثال، ينتج النيون علامتين تعودان للذرات التي كتلها 20 و 22 وحدة كتل ذرية (u)، وبما أنّ الشوائب غير موجودة، فإنّنا نستنتج وجود نوعين من عنصر النيون بكتلتين مختلفتين. تُسَمّى هذه الأشكالُ المختلفة للعنصر النظائرَ (isotopes). وقد وُجد أنّ معظمَ العناصر خليطٌ من عدة نظائر، وأنّ الاختلاف في كتل هذه النظائر يعود إلى اختلاف عدد النيوترونات فيها (سيناقش هذا الموضوع في الفصل 30).

النظائر

المثال 20-13 **مطياف الكتلة**

وُجدتْ ذرات من الكربون ذي الوزن الذري 12.0 u مختلطة مع ذرات عنصر آخر غير معلوم. في مطياف كتلة ذي مجال مغناطيسيّ B' ثابت، كان نصف قطر مسار الكربون 22.4 cm، ونصف قطر مسار العنصر غير المعروف 26.2-cm. ما هو العنصر المجهول؟ افرض أنّ العنصرين لهما الشحنة نفسها.

النّهج: تمر ذرات كلّ من الكربون والعنصر المجهول خلال المجالين الكهربائيّ والمغناطيسيّ نفسيهما. لذا، فإنّ كتلها تتناسب مع أنصاف أقطار المسارات التي تتبعها (انظر المعادلة السابقة).

الحلّ: تكتب النسبة بين الكتل من المعادلة السابقة كما يلي:

$$\frac{m_x}{m_C} = \frac{qBB'r_x/E}{qBB'r_C/E} = \frac{26.2\text{ cm}}{22.4\text{ cm}} = 1.17$$

أي أنَّ، $m_x = 1.17 \times 12.0\text{ u} = 14.0\text{ u}$. وقد يكون العنصر المجهول هو النيتروجين (انظر الجدول الدوري على ظهر الغلاف الخلفي للكتاب).

ملحوظة: قد يكون العنصر المجهول أيضًا أحد النظائر، مثل نظير الكربون 14 ($^{14}_{6}C$). انظر الملحق B. وهنا نحتاج إلى مزيد من التحاليل الفيزيائية والكيميائية.

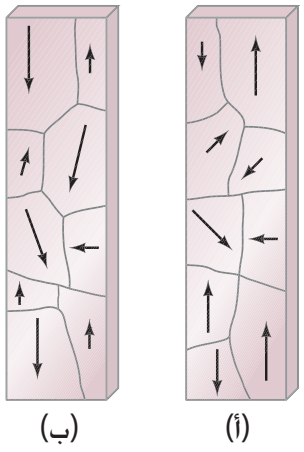
12-20 الفرّومغناطيسيّة: الحقول والتخلّف المغناطيسيّ

رأينا في (البند 20 - 1) أنّ الحديد وبعض المواد الأخرى يمكن تحويلها إلى مغانط قوية، حيث تُسَمّى هذه المواد فرّومغناطيسيّة.

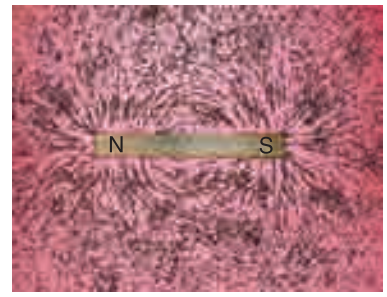
مصادر الفرّومغناطيسيّة

أظهرت الفحوصات المجهرية أنّ المغناطيس يتكون من أجزاء دقيقة تُسَمّى حقولا، تصل إلى نحو 1 mm في الطول والسمك على الأكثر. يتصرف كلّ حقل وكأنه مغناطيس دقيق ذو قطبين: شماليّ وجنوبيّ. في قطعة الحديد غير الممغنطة تكون الحقول موزعة بصورة عشوائية، (الشّكل 20 - 40أ). إنّ التأثيرات المغناطيسيّة لهذه الحقول تلغي بعضها بعضا، وبالتالي لا تشكل قطعة الحديد مغناطيسًا. وفي المغناطيس، تترتب الحقول باتجاه واحد كما هو واضح في (الشّكل 20 - 40ب) (إلى الأسفل في هذه الحالة). ويمكن صناعة المغناطيس من قطعة حديد غير ممغنطة بوضعها في مجال مغناطيسيّ قويّ (نستطيع أن نصنع مسمارًا مغناطيسيّا بدلكه برفق مع أحد أقطاب مغناطيس قويّ). وقد يدور اتجاه الممغنطة للحقول حتى يصبح موازيا للمجال المغناطيسيّ الخارجي تقريبًا (قارن الشّكلين 20 - 40أ و ب)، وهذا يفسّر سبب جذب المغناطيس لقطع من الحديد كالمسامير ومشابك الورق. ويسبب المجال المغناطيسيّ ترتيبا خفيفا للحقول المغناطيسيّة في قطع الحديد بحيث تصبح مغناطيسًا، يكون قطبه الشّماليّ مواجهًا للقطب الجنوبيّ للمغناطيس الدائم وبالعكس مما يؤدي إلى التجاذب.

حقول



الشّكل 20 – 40 (أ) تتكوّن قطعة الحديد غير الممغنطة من حقول موزعة عشوائيًا. كلّ حقل يشبه مغناطيسًا دقيقًا، والسهم يشير إلى اتجاه المغناطيسيّة، ويكون رأس السهم باتجاه القطب الشّماليّ. (ب) تترتب الحقول في المغناطيس باتجاه واحد (إلى الأسفل في هذه الحالة)، وقد تكون متغيرة في الحجم بسبب عملية المغنطة.



الشّكل 20-41 خطوط المجال المغناطيسيّ لقطعة معدنية في مجال مغناطيسيّ دائم.

تنويه:
تشكل خطوط المجال المغناطيسيّ حلقة مغلقة. تبدأ خطوط المجال الكهربائيّ من الشحنات الموجبة وتنتهي بالسالبة.

وبشكّل مشابه، إذا وقعت قطعة حديد مستطيلة في مجال مغناطيسيّ، فإنّها تكتسب ترتيبًا للحقول داخلها بحيث تعكس شكل المجال المغناطيسيّ (الشّكل 20 – 41). انظر أيضًا إلى صورة مقدمة هذا الفصل ص 554.

تستمرّ المغنطة في المغناطيس الحديدي لفترة زمنية طويلة، ويمكن اعتبار المغناطيس هنا وكأنّه مغناطيس دائم. ولكن إذا سقط المغناطيس على الأرض، أو ضُرب بمطرقة، فإنّ الحقول المغناطيسيّة تعود للترتيب العشوائيّ، وقد يفقد المغناطيس بعض مغناطيسيّته أو كلّها. إنّ زيادة درجة الحرارة يزيد من الحركة العشوائية للذرات مما يؤدي إلى زيادة عشوائية الحقول. ولكن لا يمكن صناعة مغناطيس فوق درجة حرارة معينة، تُسَمّى درجة كوري، (1043 K للحديد) أبدا؛ لأنّ المادة تفقد خصائصها المغناطيسيّة.

إنّ التشابه الفريد بين المجالات الناتجة من القضيب المغناطيسيّ والحلقة التي تحمل تيارًا والملف الحلزونيّ (الأشكال 20 – 4 ب، 20 – 9 و 20 – 3) يبين أنّ المجال المغناطيسيّ الناتج من التّيّار يمكن أن يعمل شيئًا ما مع الفرّومغناطيسيّة. ووفقا للنظرية الذرية الحديثة، فإنّ الذرات التي تشكّل أيّ مادة يمكن تخيلها على أنها إلكترونات تدور حول نواة مركزية. الإلكترونات مشحونة، وتنشئ تيارًا كهربائيًّا يؤدي بالتالي إلى إنتاج مجال مغناطيسيّ. وتنتج الإلكترونات نفسها مجالا مغناطيسيّا إضافيًا لأنّها تبرُم (تغزل) حول محورها. إنّ المجال المغناطيسيّ الناتج من بَرْم الإلكترون* حول نفسه هو المسؤول عن إنتاج الخصائص الفرّومغناطيسيّة في معظم المواد الفرّومغناطيسيّة.

ومن المسلّمات حاليّا أنّ المجالات المغناطيسيّة كلّها تنتج من التّيّار الكهربائيّ، وهذا يعني أنّ خطوط المجال المغناطيسيّ تشكّل دائمًا حلقة مغلقة بعكس خطوط المجال الكهربائيّ التي تنطلق من الشحنات الموجبة وتنتهي بالشحنات السالبة.

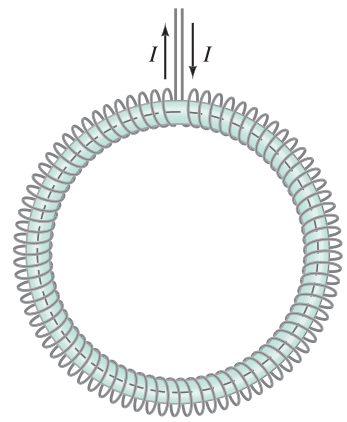
* النّفاذيّة المغناطيسيّة

إذا وضعت قطعة حديد داخل ملفّ حلزونيّ لعمل مغناطيس، فإنّ المجال المغناطيسيّ يزداد بشدة مقارنة بالمجال الناتج من الملفّ وحده. إنّ المجال المغناطيسيّ الكلّيّ هو مجموع الحدّين $\vec{\mathbf{B}} = \vec{\mathbf{B}}_0 + \vec{\mathbf{B}}_M$ ، حيث $\vec{\mathbf{B}}_0$ هو المجال النّاتج من التّيّار المار في الملفّ، و $\vec{\mathbf{B}}_M$ هو المجال الإضافيّ النّاتج من الحديد (أو أيّ مواد مغناطيسيّة موضوعة في قلب الملفّ). غالبًا $B_M \gg B_0$. إنّ المجال الكلي الناتج يمكن كتابته بتبديل الثابت μ_0 في المعادلة 20 – 8 ($B = \mu_0 NI/l$) للملف الحلزونيّ) بالنّفاذيّة المغناطيسيّة μ، وهي من خصائص المادة المغناطيسيّة داخل الملف، ويكون ($B = \mu NI/l$). وللمواد الفرّومغناطيسيّة، تكون قيمة μ_0 أكبر بكثير من قيمة μ_0. أمّا لبقية المواد، فتكون قريبة من قيمة μ_0.** إنّ قيمة μ ليست ثابتة للمواد الفرّومغناطيسيّة، ولكنها تعتمد على شدّة المجال الخارجي B_0 كما ستوضح لنا التجارب اللاحقة.

* التخلف المغناطيسي

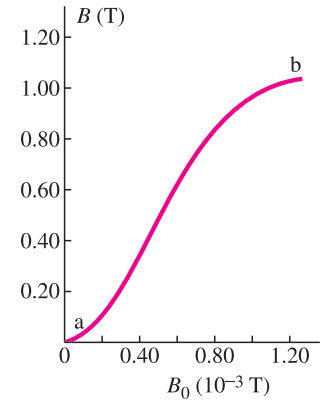
إذا أردنا إجراء تجارب على مواد مغناطيسيّة، فإنّنا نستخدم الملف الإطاريّ (toroid)، وهو ملفّ حلزونيّ طويل يُطوى على شكل إطار (الشّكل 20 - 42)، وتبقى خطوط المجال $\vec{\mathbf{B}}$ جميعها خلال الملفّ الإطاريّ. افرض أنّ لدينا ملفًّا إطاريًّا بقلب حديديّ، غير ممغنط مبدئيًّا، وليس هنالك تيار في الملفّ. إذا بدأنا بزيادة التّيّار تدريجيًّا، فإنّ المجال المغناطيسيّ الكلي B، والذي هو مجموع المجال الناتج من التيار الكهربائيّ فقط (B_0) والمجال الناتج من القلب الحديدي، يزداد أيضًا ولكنّه يتبع خطًّا منحنيًا موضحًا في (الشّكل 20 - 43). (لاحظ التدريجات المختلفة: $B \gg B_0$).

الشّكل 20 - 42 ملف إطاريّ ذو قلب حديديّ.

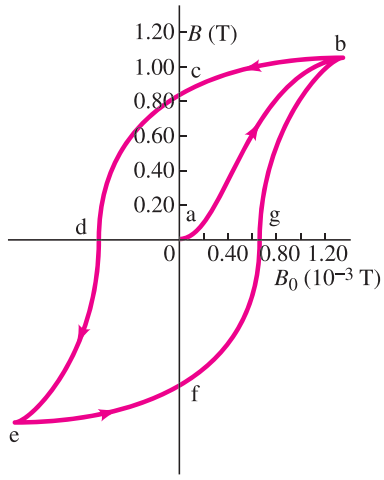


* الاسم بَرّم (sin) يأتي من الاقتراح القديم ان المجال المغناطيسي الإضافي يأتي من برم الإلكترون حول محوره (بالاضافة للدوران حول النواة) لينتج المجال الزائد. وعلى اي حال، فإن هذا الالكترون البارم هو نموذج مبسط جدًا ولا ينطبق (انظر الفصل 28).

** كل المواد هي **مواد مغناطيسية** قليلا. المواد غير المغناطيسية تقع ضمن صنفين أساسيين: (1) البارامغناطيسية وتتكون من ذرات لها عزم ثنا قطبي مغناطيسي محصل يصطف قليلًا تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي، كما في ملف الجلفانوميتر في (الشكل 20-33) والذي يتأثر بعزم يديره؛ (2) **مواد ديامغناطيسية** فيها ذرات لا تملك عزم ثنا قطبي محصل، لكن بوجود مجال مؤثر خارجي، فالإلكترونات التي تدور باتجاه معين تزداد سرعتها قليلًا، بينما الالكترونات التي تدور بالاتجاه المعاكس تقل سرعتها؛ والنتيجة هي اثر مغناطيسي قليل يعاكس المجال الخارجي.



الشّكل20 - 43 المجال المغناطيسيّ الكلي B في ملف إطاري بقلب حديدي كدالة مع المجال الخارجي B_0 (B_0 ينتج من التيار الكهربائيّ I الناتج في الملف).



الشّكل 20 - 44 منحنى التخلف المغناطيسي

عند نقطة البداية، تكون الحقول موزعة عشوائيًّا داخل القلب الحديدي. وبزيادة قيمة B_0، تبدأ الحقول بالترتيب حتى تصبح كلّها مرتّبةً تقريبًا، وعند النقطة b، يكون الفلّز هنا قد وصل إلى ما يُسمّى الإشباعَ. بعد ذلك، لو افترضنا أنّ التّيّار في الملفّ بدأ بالتناقص، فإنّ B_0 سيبدأ بالتناقص أيضًا. وإذا تناقص التّيّار (وكذلك B_0) إلى الصفر، النقطة c في (الشّكل 20 - 44)، فإنّ الحقول لا تصبح عشوائيّةً تمامًا، وتبقى بعض المغناطيسيّة الدائمة في القلب الحديديّ. وإذا زاد التّيّار بالاتجاه المعاكس، فستتكوّن حقول كافية بحيث يساوي المجال الكلّيّ B صفرًا عند النقطة d. أمّا إذا استمر التّيّار بالزيادة بالاتجاه المعاكس، فإنّ الحديد يصل إلى الإشباع في الاتجاه المعاكس عند النقطة e. وأخيرًا، إذا نقص التّيّار مرّةً أخرى إلى الصفر، ثم بدأ بالزيادة باتجاهه الأصلي، فإنّ المجال يتبع المسار $efgb$، وسيصل إلى نقطة الإشباع b مرة أخرى.

لاحظ أنّ المجال لا يمرّ بنقطة الأصل (النقطة a) في هذه الدورة، وهذه الحقيقة (عدم ججوع المنحنى من حيث بدأ بالمسار ذاته) تُسَمّى **التّخلّف المغناطيسيّ**. ويدعى المنحنى $bcde$-fgb **حلقةَ التّخلّفِ المغناطيسيّ**. في هذه الحلقة، يتحول جزء من الطاقة إلى طاقة حرارية (احتكاك) بسبب إعادة ترتيب الحقول. لاحظ أنّ القلب الحديديّ يتمغنط عند النقطتين c، و f حتى دون وجود تيّار في الملفات: هذه النقاط تعود لوجود مغناطيسيّة دائمة.

ملخص

للمغناطيس قطبان: شماليّ وجنوبيّ. القطب الشّماليّ هو الطرف الذي يشير إلى الشّمال الجغرافيّ عند تعليق المغناطيس تعليقًا حرًّا. الأقطاب المتشابهة للمغانط تتنافر، أمّا الأقطاب المختلفة فتتجاذب.

نستطيع تخيّل أنّ المجال المغناطيسيّ يحيط بأيّ مغناطيس. وحدة قياس المجال المغناطيسيّ هي التسلا ($tesla \equiv \mathrm{T}$).

تُنتج التّيّارات الكهربائيّة مجالات مغناطيسيّة. على سبيل المثال، تشكّل خطوطُ المجال المغناطيسيّ الناتجة من مرور تيار كهربائيّ في سلك مستقيم دوائرَ حول السلك، كما أنّ المجال يؤثّر بقوّةٍ في مغانط (أو تيارات) بالقرب منه. يؤثّر المجال المغناطيسيّ بقوّةٍ في التّيّار الكهربائيّ لسلكٍ مستقيمٍ طوله L ويحمل تيار I، والقوّة لها المقدار التالي (المعادلة 20– 1):

$$F = qvB \sin\theta$$

حيث θ هي الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ واتجاه التّيّار. يكون اتجاه القوّة عموديًّا على كلّ من السلك الذي يحمل التّيّار والمجال المغناطيسيّ، ويُحدّد من قاعدة اليد اليمنى. وتساعدنا المعادلة (20 – 1) في تعريف المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$.

وبشكلٍ مشابه، يؤثّر المجال المغناطيسيّ B بقوّة في شحنة q تتحرك بسرعة v . ومقدار هذه القوّة هو

$$F = IlB \sin\theta \qquad \textbf{(3-20)}$$

حيث θ هي الزاوية بين $\vec{\mathbf{v}}$، و $\vec{\mathbf{B}}$. اتجاه $\vec{\mathbf{F}}$ عموديٌّ على كلّ من $\vec{\mathbf{v}}$، و $\vec{\mathbf{B}}$ (ويُحدّد أيضًا من قاعدة اليد اليمنى).

مسار الجسيمات المشحونة التي تتحرك عموديًّا على مجال مغناطيسيّ عبارة عن دائرة. مقدار المجال المغناطيسيّ الناتج من مرور تيار I في سلكٍ مستقيمٍ طويل وعلى مسافة r من السلك هو

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r} \qquad \textbf{(6 – 20)}$$

التّيّاران الماران في سلكين طويلين مستقيمين يؤثران بقوة في بعضهما من خلال المجال المغناطيسيّ الناتج من كليهما. التّيّاران المتوازيان بالاتجاه نفسه يجذبان بعضهما، ولكنّهما يتنافران إذا كانا باتجاهين متعاكسين . المجال المغناطيسيّ داخل ملفّ حلزونيّ هو

$$B = \mu_0 NI/l \qquad \textbf{(8-20)}$$

حيث N عدد اللفّات في الطول L من الملفّ و I هو التّيّار المار في كلّ حلقة.

* [ينصّ قانون أمبير على أنّه لأيّ مسار اختياري مغلق فإنّ مجموع حاصل ضرب كلّ قطعة من المسار في مركبة المجال $\vec{\mathbf{B}}$الموازية لتلك القطعة يساوي μ_0 مضروبًا في التّيار I المحصور بهذا المسار المغلق.

$$\Sigma B_{\parallel}\,\Delta l = \mu_0 I_{\text{encl}} \qquad \textbf{(9-20)}$$

[* العزم الدوراني τ على N من الحلقات التي يحمل كلّ منها تيارًا I، في مجال مغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ هو

$$\tau = NIAB\sin\theta \qquad \textbf{(11-20)}$$

القوّة أوالعزم الدورانيّ المؤثر في موصل يحمل تيارًا من المجال المغناطيسيّ يشكل مبدأ عمل الكثير من الأجهزة مثل الفولتميترات، والأميترات، والمحرّكات، ومكبّرات الصوت.]

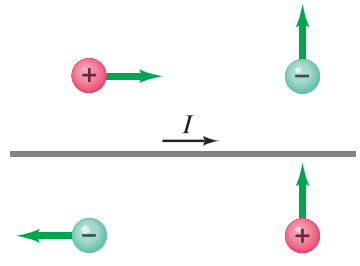
[* يستخدم مطياف الكتلة المجالين الكهربائيّ والمغناطيسيّ لتحديد كتل الذرات.]

إنّ الحديد وبعض المواد الأخرى التي تُسَمّى فرّومغناطيسيّة يمكن تحويلها إلى مغانط دائمةٍ قويّة. ويتكون هذا النوع من المواد من حقول يُعدّ كلٌّ منها مغناطيسًا دقيقًا، وتترتب هذه الحقول بحيث تصبح مغانط دائمة.

[* عندما يوضع الحديد أو أيّ مادة فرّومغناطيسيّة في مجال مغناطيسيّ B ناتج من تيار، فإنّ الحديد يتمغنط، وإذا زاد التّيار بالاتجاه المعاكس، فإنّنا نحصل على منحنى للمجال الكلّيّ كدالة مع المجال B_0 يُسَمّى حلقة التخلّف المغناطيسيّ. وحقيقة أنّ المنحنى لا يرجع من حيث بدأ بالمسار نفسه تُسَمّى التخلّف المغناطيسيّ.]

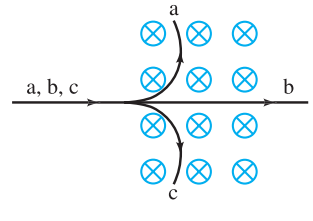
أسئلـــة

1. لا تكون إبرة البوصلة متزنة دائمًا بشكل موازٍ لسطح الأرض، ولكن إحدى نهايتيها قد تنحني للأسفل. فسّر ذلك.
2. ارسم خطوط المجال المغناطيسيّ المحيطة بسلكٍ أفقيٍّ مستقيمٍ يحمل تيارًا إلى اليسار.
3. بأيّ اتجاه تكون خطوط المجال المغناطيسيّ لسلك مستقيم إذا حمل تيارًا يتجه بعيدًا عنك؟
4. مغناطيس على شكل حذاء الفرس مثبت رأسيًّا بحيث يكون قطبه الشّماليّ إلى اليسار، وقطبه الجنوبيّ إلى اليمين. إذا مرّ سلك في منتصف المسافة بين القطبيّن بحيث يحمل تيّارًا يتجه مباشرةً بعيدًا عنك، فبأيّ اتجاه تكون القوّة المؤثّرة في السلك.
5. هل يجذب المغناطيس أيّ جسم فلزي، أم أنّه يجذب المواد المصنوعة من الحديد فقط ؟ (جرّب وسترى). ما سبب ذلك؟
6. قضيبان مغناطيسيّان يجذبان بعضهما إذا كانا على مسافةٍ قريبةٍ من بعضهما. هل يُعدّ كلٌّ منهما مغناطيسًا؟ فسّر ذلك.
7. يستطيع المجال المغناطيسيّ الناتج من التّيار في الأسلاك الموجودة في منزلك التأثير في البوصلة. ناقش ذلك بدلالة التّيار من حيث كونه تيارًا مستمرًّا أو متناوبًا.
8. إذا دخلت شحنة سالبة منطقة مجال مغناطيسيّ متعامدٍ مع سرعتها. فهل تزداد الطاقة الحركية، أم تقلّ، أم تبقى ثابتة؟ فسّر إجابتك (أهمل الجاذبيّة، وافترض عدم وجود تيار كهربائيّ
9. في الشّكل 20 - 45، تتحرك عدة جُسيمات مشحونة بالقرب من سلك يحمل تيارًا. تمثل الأسهم اتجاه حركة كلّ جسيم، الإشارة + أو - تشير إلى إشارة الشحنة لكلّ جسيم. حدّد اتجاه القوّة المؤثّرة في كلّ جسيم من المجال المغناطيسيّ الناتج من السلك.



الشّكل 20 – 45
السّؤال 9

10. ثلاثة جُسميات؛ a، و b، و c تدخل مجالًا مغناطيسيًّا كما يوضحه الشّكل 20 - 46. ما شحنة كلّ من هذه الجسيمات؟



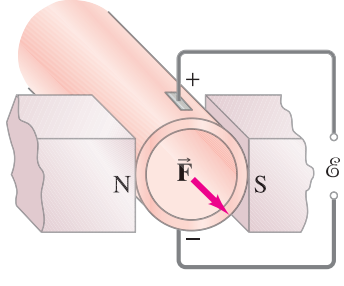
الشّكل 20 – 46.
السّؤال 10

11. يتحرّك جسمٌ مشحونٌ بشحنةٍ موجبةٍ في مجال مغناطيسيّ غير منتظم حسب المسار الموضّح في الشّكل 20 - 47. حدّد اتجاه المجال المغناطيسيّ في كلّ مكان من الفضاء مفترضا أنّ مسار الجسيم في مستوى الورقة دائمًا. وحدّد أيضا المقدار النسبي للمجال في كلّ جزء من الحركة.

الشكل 20 - 47
السؤال 11

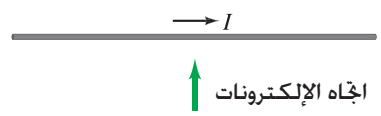
12. هل يمكن لقضيب حديد أن يجذب مغناطيسًا؟ هل يمكن لمغناطيس أن يجذب قضيبًا حديديًّا. إلامَ تستند في إجابتك ؟
13. بيّن سبب التّشويش على الصورة عند وضع مغناطيس قوي بالقرب من شاشة التلفاز؟ وبيّن أيضًا تحوّل الصورة إلى سوداء تمامًا عند وضع مغناطيس أكثر قوة؟ (لا تحاول عمل ذلك حتى لا تتلف تلفازك).
14. لو افترضنا أنّ لديك ثلاثة قضبان حديدية: اثنان مغنطان، والثالث غير مغنط. كيف تستطيع تحديد المغنطين دون استخدام أيّ أجسامٍ أخرى؟
15. هل تستطيع جعل إلكترون ساكن يتحرك باستخدام مجال مغناطيسيّ؟ وباستخدام مجال كهربائي؟ وضّح إجابتك

16. يتحرّك جُسيمٌ مشحونٌ حركةً دائريّةً تحت تأثير مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم. إذا أثّر مجال كهربائيّ باتجاه المجال المغناطيسيّ نفسه، فصِفِ المسار الذي سيتبعه هذا الجُسيم.
17. القوّة المؤثّرة في جسيم موضوع في مجال مغناطيسيّ هي فكرة ما يسمى بالمضخة الكهرومغناطيسيّة. تستخدم هذه المضخة في سحب سوائل تحتوي على فلزات (مثل الصوديوم) وضخّها في الدم في جهاز القلب الصناعي، المبدأ موضح في الشّكل 20 – 48. إذا أثّر مجال كهربائيّ عموديًّا في كلّ من الوعاء الدمويّ والمجال المغناطيسيّ، فوضّح كيف تدفع الأيونات للحركة. هل تعاني الأيونات الموجبة والسالبة من قوة بالاتجاه نفسه؟



الشّكل 20 – 48
المضخة الكهرومغناطيسيّة للضخ في الوعاء الدموي، السؤال 17.

18. أُطلقت حزمة من الإلكترونات باتجاه سلكٍ أفقيٍّ يحمل تيارًا من اليسار لليمين (الشكل 20 - 49). بأيّ اتجاهٍ سوف تنحرف الحزمة؟



الشكل 20 – 49 السؤال 18

19. صفِ المجال الكهربائيّ و/ أو المغناطيسيَّ الذي يحيط بشحنةٍ كهربائيّةٍ متحرّكة.

20. يتحرّك جُسيم مشحونٌ بخطٍّ مستقيمٍ في حيّزٍ معيّنٍ في الفضاء. فهل من الممكن أن يكون هنالك مجالٌ مغناطيسيٌّ في هذا الحيّز؟ إذا كان كذلك، فأعط وضعين ممكنين.

21. إذا انحرف جُسيمٌ مشحونٌ باتجاهٍ ما في حيّزٍ من الفضاء، فهل نستطيع الاستنتاج أنّ $\vec{\mathbf{B}} \neq 0$ في هذا الحيّز، وضّح إجابتك؟

22. إذا كان لدينا مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظم $\vec{\mathbf{B}}$ في حيّزٍ معيَّنٍ من الفضاء. خارج هذا الحيز $B = 0$. هل تستطيع أن تطلق إلكترونًا من الخارج باتجاهٍ عموديٍّ على المجال بحيث يتحرك في مسارٍ دائريٍّ مغلقٍ في منطقة المجال؟ ماذا لو قذف الإلكترون بالقرب من المركز؟

23. كيف تستطيع تحديد أنّ الإلكترونات المتحركة في حيّزٍ معيّنٍ في الفضاء تنحرف بواسطة مجالٍ كهربائيٍّ، أو مجالٍ مغناطيسيٍّ، أو كليهما؟

24. كيف تستطيع صناعة بوصلة دون استخدام الحديد أو أيّ مادّةٍ فرّومغناطيسيّة؟

25. سلكان طويلان يحملان تيارين متساويين، I، بزاويةٍ قائمةٍ مع بعضهما، ولكنّهما لا يتلامسان. صفِ القوّة التي يؤثّر بها كلٌّ منهما في الآخر.

26. يحمل سلكٌ أفقيٌّ تيارًا حرَّ الحركة في مجال الجاذبيّة الأرضيّة. عُلّق مباشرةً وبشكلٍ موازٍ فوق سلك آخر يحمل تيارًا. (أ) بأيّ اتجاهٍ يمرّ التّيّار في السلك السفليّ؟ (ب) هل يمكن للسلك العلويّ أن يكون متزنًا بتأثير القوّة المغناطيسيّة للسلك السفلي؟ وضّح ذلك. **27.** لماذا يجذب كلٌّ من قطبي المغناطيس قطعةً غير ممغنطةٍ من الحديد؟

28. المسمار غير الممغنط لا يجذب مشابك الورق غير الممغنطة. ومن جهةٍ أخرى، إذا اتصل أحد أطراف المسمار بمغناطيس، فإنّ الطرف الآخر سوف يجذب المشابك الورقية، فسّر ذلك.

29. أيونان لهما الكتلة نفسها، لكن أحدهما مؤيّن بضعف الشحنة للآخر. كيف سيختلف موقعهما على الغشاء في مطياف الكتلة؟

30. كيف سيتأثر المجال المغناطيسيّ داخل ملفٍّ حلزونيٍّ إذا ضاعفنا: (أ) قطر اللفات؟ (ب) المسافة بين اللفات؟ (ج) طول الملف مع مضاعفة عدد اللفات؟

31. هناك نوعٌ من المفاتيح المغناطيسيّة يشبه الملفَّ الحلزونيّ، ويُسمّى المفتاح التحكّمي (الشّكل 20 - 50) وهو مغناطيسٌ كهربائيٌّ ملفوفٌ على قضيبٍ حديديٍّ ثابت. وعندما ينشط هذا المغناطيس، فإنّه يجذب قطعة فلزية على محور ارتكاز. صُمّمَ مفتاحَ تحكّم لفتح دائرة كهربائية وإغلاقها. يستخدم مفتاح التحكم عندما نحتاج إلى فتح دائرة ذات تيار كبير، ولكنّنا لا نريد لهذا التّيّار أن يمرّ بالمفتاح الرئيس مثل مفتاح التشغيل في السيارة الذي يكون موصولا بمفتاح التحكّم. وبالتالي، فإنّ التّيّار العالي اللازم للتشغيل لا يمرّ بالمفتاح الرئيس (الموجود على اللوحة أمام السائق).

الشكل 20 - 50 السؤال 31

مسائـل

20 – 3 القوّة المؤثّرة في موصل يحمل تيارًا في مجال مغناطيسيّ

1. (I) (أ) ما مقدار القوّة المؤثّرة لكلّ متر في سلك مستقيم يحمل تيارًا مقداره 8.40-A عند وضعه عموديًّا على مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره 0.90-T؟ (ب) ما مقدار القوّة لكلّ متر، إذا كانت الزاوية بين السلك والمجال $45.0°$؟

2. (I) ما مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في 160-m من سلك مستقيم موصول بين برجين، ويحمل تيارًا مقداره 150-A. مقدار المجال المغناطيسيّ الأرضي 5.0×10^{-5} T ويصنع زاوية $65°$ مع السلك.

3. (I) ما مقدار التّيّار الذي يمرّ في سلك طوله 4.80 m إذا كانت أقصى قوة تؤثر فيه 0.750 N عند وضعه في مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره 0.0800-T؟

4. (II) سلك أفقي طوله 1.5-m يحمل تيارًا مقداره 4.5 A. عند تلك النقطة من سطح الأرض، يصنع المجالُ المغناطيسيّ الأرضي زاويةً مقدارها $38°$ مع السلك. احسب مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في السلك من المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي قيمته 5.5×10^{-5} T عند تلك النقطة.

5. (II) أقصى قوة تؤثر في سلك يحمل تيارًا مقداره 8.75 A عند وضعه بين قطبين قطر كلّ منهما 55.5 cm هي 1.28 N. ما شدة المجال المغناطيسيّ بين القطبيّن تقريبًا ؟

6. (II) قِيس مقدار القوّة المغناطيسيّة لكلّ متر على سلك فكان 35% من قيمته القصوى الممكنة. ارسم العلاقة بين السلك والمجال عندما تكون القوّة أقصى ما يمكن، وارسم العلاقة عندما تكون القوّة المغناطيسيّة 35% من قيمتها القصوى بحساب الزاوية بين السلك والمجال المغناطيسيّ.

7. (II) أقصى قوة تؤثر في سلك عند وضعه بين قطبي مغناطيس هي 6.50×10^{-2} N. يمرّ التّيّار بشكل أفقي إلى اليمين والمجال المغناطيسيّ رأسيّ للأعلى. إذا لوحظ أنّ السلك يتحرك باتجاه المشاهد عند مرور التّيّار فيه. (أ) ما نوع القطب المغناطيسيّ العلوي؟ (ب) إذا كان قطر وجه كلّ قطب 10.0 cm، فاحسب التّيّار المار في السلك إذا كان المجال 0.16 T. (ج) إذا مال السلك بحيث صنع زاوية $10.0°$ مع الأفقي، فما القوّة المؤثّرة فيه هنا؟

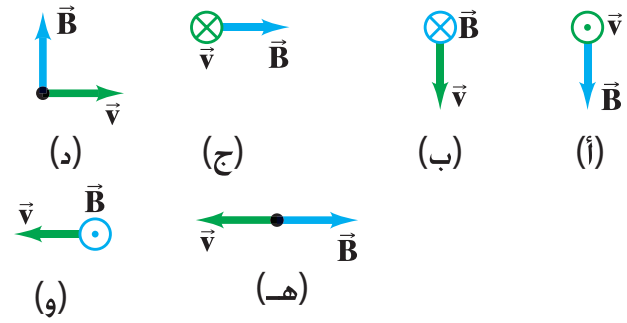
8. (II) افرض أنّ لديك سلكًا مستقيمًا من النحاس قطره 1.00 mm. يطفو أفقيًّا في الهواء بسبب القوّة المؤثّرة من المجال المغناطيسيّ الأرضي $\vec{\mathbf{B}}$ الذي يكون عموديًّا على السلك ومقداره 5.0×10^{-5} T. ما مقدار التّيّار الذي يجب أن يحمله السلك؟ هل تبدو الإجابة مقبولة عمليًّا؟ وضّح باختصار.

4-20 القوّة المؤثّرة في شحنة متحركة في مجال مغناطيسيّ.

9. (I) جُسيمات ألفا لها شحنة $q = +2e$، وكتلة $6.6 \times 10^{-27}\,\text{kg}$ انطلقت من مصدرٍ مشعٍّ بسرعةٍ مقدارها $1.6 \times 10^{7}\,\text{m/s}$. ما مقدار شدة المجال المغناطيسيّ اللازم لجعلها تتحرك في مسارٍ دائريٍّ نصف قطره $r = 0.25\,\text{m}$؟

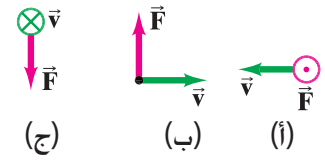
10. (I) حدّد مقدار القوّة المؤثّرة واتجاهها في إلكترون يتحرك أفقيًّا إلى الشّرق بسرعة $8.75 \times 10^{5}\,\text{m/s}$ عموديًّا على مجال مغناطيسيّ شدته $0.75\,\text{T}$ يؤثر للأعلى.

11. (I) أوجد اتجاه القوّة المؤثّرة في شحنةٍ سالبةٍ لكلّ حالة من الحالات الموضحة في الشّكل 20-51، حيث $\vec{\mathbf{v}}$ (بالأخضر) هي سرعة الشحنة، و $\vec{\mathbf{B}}$ (بالأزرق) هو اتجاه المجال المغناطيسيّ. (الإشارة ⊗ تعني أنّ المتجه عموديّ إلى الداخل، و ⊙ عموديّ للخارج باتجاهك.



الشكل 20 – 51 مسألة 11

12. (I) حدّد اتجاه $\vec{\mathbf{B}}$ لكلّ حالة من الحالات الموضحة في الشّكل 20-52 حيث تمثل $\vec{\mathbf{F}}$ أقصى قوة مؤثرة في الشحنة الموجبة التي تتحرك بسرعة $\vec{\mathbf{v}}$.



الشكل 20 - 52 مسألة 12

13. (I) انطلق إلكترون عموديًّا نحو الأعلى بسرعة $1.70 \times 10^{6}\,\text{m/s}$ باتجاه مجال مغناطيسيٍّ منتظم شدّته 0.20-T باتجاهٍ أفقيٍّ بعيدًا عن المشاهد. صف مسار الإلكترون في هذا المجال.

14. (I) يدخل بروتون طاقته الحركية 5.0-MeV عموديًّا إلى منطقة مجال مغناطيسيّ شدته 0.20-T. ما نصف قطر مسار البروتون؟

15. كانت أقصى قوّة يتعرض لها هي $1.70 \times 10^{6}\,\text{m/s}$ للأعلى نتيجة دخول منطقة مجال مغناطيسيّ. فما مقدار المجال المغناطيسيّ واتجاهه ؟

16. (II) كم سرعة حزمة من الإلكترونات تمرُّ دون انحرافٍ في منطقة مجالين كهربائيٍّ ومغناطيسيٍّ مقدارهما $8.8 \times 10^{3}\,\text{V/m}$ و $3.5 \times 10^{-3}\,\text{T}$، على الترتيب؟ ما نصف قطر مسار الإلكترون إذا أبعدنا المجال الكهربائيّ؟

17. (II) أيون الهيليوم He^{+2} كتلته $6.6 \times 10^{-27}\,\text{kg}$، يتسارع بواسطة فرق جهد مقداره 2100 V. (أ) ما نصف قطرٍ مساره إذا حُرّك في مستوىً عموديٍّ على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدّته 0.340-T؟ (ب) ما الزمن الدوري لحركته؟

18. (II) بروتون (كتلته m_p) وديوترون $(m = 2m_p,\ Q = e)$ وجُسيم ألفا $(m = 4m_p,\ Q = 2e)$ تتسارع بفرق الجهد V نفسه، ثم تدخل مجالا مغناطيسيّا $\vec{\mathbf{B}}$ حيث تتحرّك بمساراتٍ دائريّةٍ عموديّةٍ على $\vec{\mathbf{B}}$. حدّد نصف قطر مساري الديوترون وجُسيم ألفا بدلالة نصف قطر مسار البروتون.

19. (II) اثبت أنّ الزمن الدوري (T) للحركة الدائرية لجُسيم يتحرّك بسرعةٍ ثابتةٍ v عموديًّا على مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم $\vec{\mathbf{B}}$ هو

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

[مساعدة: انظر المثال 20 – 5 والفصل الخامس]

20. (II) يتحرك جُسيم شحنتُه q في مسار دائري نصف قطره r في مجال مغناطيسيّ منتظم B. أثبت أنّ كمية تحرك الجسيم هي $p = qBr$.

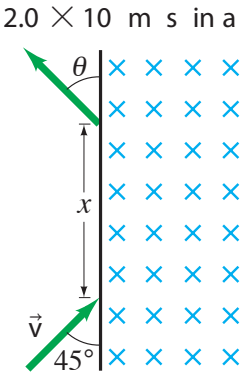
21. (II) يتحرك جُسيم كتلتُه m، وشحنته q في مسار دائري في مجال مغناطيسيّ B. أثبت أنّ طاقته الحركية تتناسب مع r^2 (مربع نصف قطر مسار الجُسيم).

22. (II) اثبت أنّ كمية التحرك الزاوية للجسيم في التمرين 21 هي $L = q\,Br^2$ حول مركز الدائرة.

23. (III) تتحرّك رصاصةٌ كتلتها 3.40-g بسرعة مقدارها 160 m/s عموديًّا على المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي شدته $5.00 \times 10^{-5}\,\text{T}$. إذا حملت الرصاصة شحنة مقدارها $13.5 \times 10^{-9}\,\text{C}$، فكم المسافة التي ستنحرفها عن مسارها بسبب المجال المغناطيسيّ الأرضي بعد أن تتحرك مسافة 1.00 km؟

24. (III) افرض أنّ المجال المغناطيسيّ الأرضيّ عند خط الاستواء يساوي $0.40 \times 10^{-4}\,\text{T}$ باتجاه الشّمال عند كلّ النقاط. احسب سرعة أيون اليورانيوم $(m = 238\,\text{u},\ q = e)$ ليدور حول الأرض على ارتفاع 5.0km عن خطّ الاستواء. هل تستطيع إهمال الجاذبيّة الأرضية؟

25. (III) يتحرك بروتون بسرعة $v = 2.0 \times 10^{5}\,\text{m/s}$ في منطقة خالية من المجالات إلى أن يدخل مجالا مغناطيسيّا منتظما شدته $B = 0.850\,\text{T}$ $(\vec{\mathbf{B}} \perp \vec{\mathbf{v}})$. إذا دخل البروتون منطقة المجال بزاوية 45° كما هو موضح في الشّكل 20 – 53 (أ) بأيّ زاوية سيغادر المجال؟ (ب) على أيّ مسافة x سيخرج من المجال؟



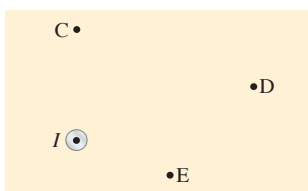
الشكل 20 - 53 مسألة 25

20 – 5، و 20 – 6 المجالُ المغناطيسيّ الناتج من سلك مستقيم يحمل تيّارًا. القوّة بين سلكين

26. (II) يحمل كيبل تيّارًا مقداره 65-A، ما مقدار المجال المغناطيسيّ على مسافة 6.0 m عنه؟ قارن النتيجة مع مقدار المجال المغناطيسيّ الأرضيّ.

27. (I) إذا أردنا استخدام سلك كهربائيّ لإنتاج مجال مغناطيسيّ لا يزيد على المجال المغناطيسيّ الأرضي $(0.55 \times 10^{-4}\,\text{T})$ على مسافة 25 cm، فما أقصى تيار يمكن أن يحمله السلك؟

28. (I) في الشّكل 20 - 24، سلك طويل يحمل تيارًا I خارج من الصفحة باتجاهك. حدد بسهم مناسب اتجاه المجال المغناطيسيّ $\vec{\mathbf{B}}$ عند كل نقطة من النقاط C، و D، و E في مستوى الورقة.



الشكل 20 – 54 مسألة 28

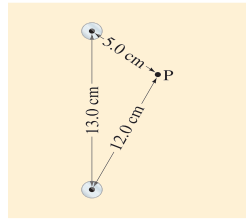
29. (I) يحمل سلكٌ مستقيمٌ عموديٌّ تيّارًا للأعلى مقداره 24-A، ويؤثر بقوة لوحدة الأطوال مقدارها $8.8 \times 10^{-4}\,\text{N/m}$ في سلك آخر موازٍ له ويقع على مسافة 7.0 cm بعيدًا عنه. ما التّيار (بالمقدار والاتجاه) الذي يمرّ في السلك الثاني؟

30. (I) احسب مقدار القوّة المتبادلة واتجاهها بين سلكين طول كلّ منهما 35 m، ويقعان على مسافة 6.0 cm عن بعضهما، ويحمل كلٌّ منهما تيّارًا مقداره 25A بالاتجاه نفسه.

31. (II) أجريت تجربة على المجال المغناطيسيّ الأرضي على بعد 1.00 m من كيبل كهربائيّ. ما أقصى تيار مسموح يمكن أن يمرّ في الكيبل حتى تكون دقة التجربة $\pm 1.0\%$؟

32. (II) سلك قدرة يحمل تيارًا مقداره 95A على قمة أعمدة ارتفاعها 8.5-m. ما مقدار المجال المغناطيسيّ على سطح الأرض؟ كيف تقارن هذه النتيجة بالمجال المغناطيسيّ الأرضيّ الذي يساوي $\frac{1}{2}$ G تقريبًا؟

33. (II) سلكان طويلان متوازيان يبعدان 13.0 cm عن بعضهما ، ويحمل كلّ منهما تيارًا مقداره 25-A بالاتجاه نفسه. احسب المجال المغناطيسيّ عند النقطة p التي تبعد 12 cm عن الأول و 5 cm عن الثاني (الشّكل 20 – 55).



الشكل 20 – 55
مسألة 33

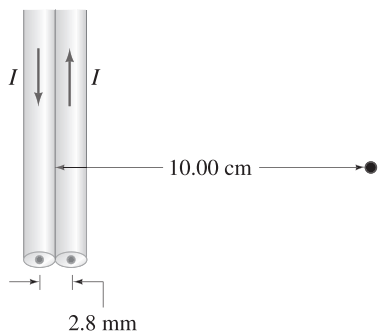
34. (II) بوصلة أفقية تقع على مسافة 18 cm جنوب سلك مستقيم عموديّ يحمل تيارًا مقداره 35-A للأسفل. بأيّ اتجاه ستشير إبرة البوصلة عند هذا الموقع؟ افرض أنّ المركبة الأفقية للمجال المغناطيسيّ الأرضيّ عند هذا النقطة تساوي 0.45×10^{-4} T والميل المغناطيسيّ يساوي 0°.

35. (II) سلك أفقيّ طويل يحمل تيارًا مقداره 22.0 A باتجاه الشّمال. ما المجال المغناطيسيّ الكليّ عند نقطة تقع على مسافة 20.0 cm غرب السلك إذا كان المجال المغناطيسيّ الأرضيّ يشير إلى الشّمال وبزاوية 37° للأسفل، ومقداره يساوي 5.0×10^{-5} T؟

36. (II) سيل من البروتونات يجتاز نقطة معينة في الفضاء بمعدل 1.5×10^{9} بروتون/ ثانية. ما المجال المغناطيسيّ الناتج على مسافة 2.0 m منها؟

37. (II) احسب المجال المغناطيسيّ عند منتصف المسافة بين سلكين مستقيمين طويلين المسافة بينهما 2.0 cm بدلالة التّيار I الذي يمرّ في أحد السّلكين، أما التّيار في السلك الثاني 15A. افرض أنّ التّيارين: (أ) بالاتجاه نفسه. (ب) باتجاهين متعاكسين

38. (II) زوج من الأسلاك في كيبل يحملان تيارًا مستمرًا مقداره 25.0 A من جهاز معيّن وإليه. إذا كان السّلكان معزولين، وقطراهما مهملين، ويبعدان 2.8 mm عن بعضهما، فما المجال المغناطيسيّ على مسافة تبعد 10.00 cm. عن منتصف المسافة بينهما (الشّكل 20 – 56)؟ قارن النتيجة بالمجال المغناطيسيّ الأرضيّ.

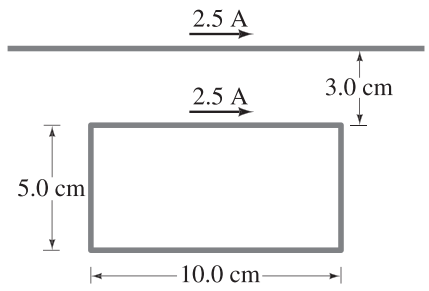


الشكل 20 – 56
مسألتان 38، و 39

39. (II) يقع سلك ثالث في مستوى السلكين المبينين في (الشّكل 20 – 56) على مسافة 2.8 mm من السلك الأيمن وموازيًا لكليهما. ما القوّة لوحدة الأطوال التي يؤثر بها هذا السلك في كلا السلكين؟

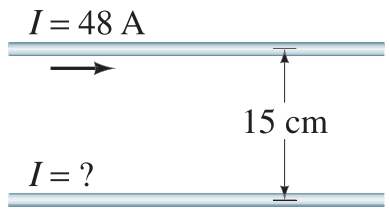
40. (II) تشير إبرة بوصلة بزاوية 23° باتجاه الشّمال الشرقي خارج العمران. وعند وضعها على مسافة 12.0 cm شرق سلك عمودي داخل عمارة، فإنّها تشير بزاوية 55° باتجاه الشّمال الشرقي. ما مقدار التّيّار المار في السلك واتجاهه ؟ المجال المغناطيسيّ في ذلك المكان أفقيّ ومقداره 0.50×10^{-4} T.

41. (II) تقع حلقة مستطيلة من سلك في المستوى نفسه لسلك مستقيم كما هو واضح في (الشّكل 20 – 57). إذا مرّ تيار مقداره 2.5A في كليهما، فاحسب مقدار القوّة المؤثّرة في الحلقة واتجاهها.



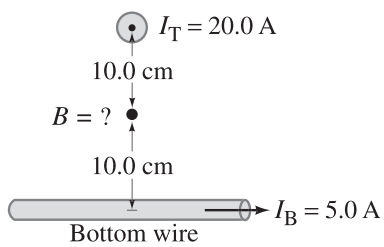
الشكل 20 – 57 مسألة 41

42. (II) يحمل سلك أفقيّ طويل تيارًا مقداره 48 A. وهناك سلك ثانٍ قطره 2.5-mm مصنوع من النحاس متزن على مسافة 15 cm تحت السلك الأول (الشكل 20 – 58) (أ) أوجد مقدار التّيّار المار في السّلك السفليّ واتجاهه. (ب) أعد حلّ الفرع أ إذا كان السّلك الثاني متزنًا على مسافة 15 cm فوق السّلك الأول.



الشكل 20 – 58 مسألة 42

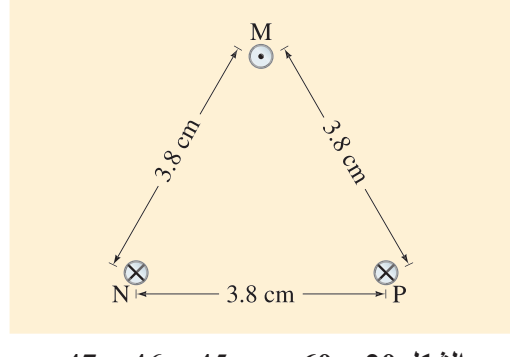
43. (II) سلكان مستقيمان طويلان متعامدان على بعضهما، والمسافة العموديّة بينهما عند أقرب نقطة. 20.0 cm (شكل 20 – 59)، ما مقدار المجال المغناطيسيّ عند نقطة تقع في منتصف المسافة العموديّة بينهما، إذا كان السّلك العلويّ يحمل تيارًا مقداره 20.0 A، في حين يحمل السّلك السفليّ تيارًا مقداره 5.0 A.



الشكل 20 – 59 مسألة 43

44. (II) سلكان طويلان متوازيان، المسافة بينهما 15 cm، السلك A يحمل تيّارًا مقداره 2.0 A، أمّا السلك B فيحمل تيّارًا مقداره 4.0 A بالاتجاه نفسه. (أ) احسب المجال المغناطيسيّ الناتج من السلك A في موقع السلك B. (ب) احسب المجالَ المغناطيسيَّ الناتجَ من السلك B في موقع السلك A. (ج) هل هذان المجالان متساويان ومتعاكسان في الاتجاه؟ لماذا؟ (د) احسب القوّة المؤثّرة في السلك A من السلك B، وكذلك القوّة المؤثّرة في السلك B من السلك A. هل هاتان القوتان متساويتان ومتعاكستان في الاتجاه؟ لماذا؟

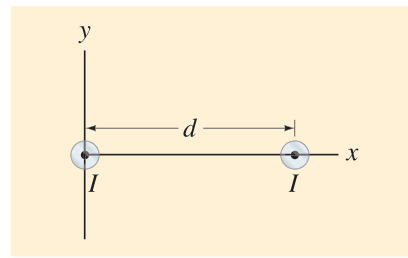
45. (II) ثلاثةُ أسلاكٍ طويلةٍ متوازيةٍ يبعد كلٌّ منها عن الآخر مسافة 3.8 cm (تبدو وكأنّها على رؤوس مثلثٍ متساوي الأضلاع) التّيّار المارّ في كلّ منها يساوي 8.00 A، ولكن اتجاهه في السلك M معاكس لكلا السلكين N، و P. احسب القوّة المغناطيسيّة لوحدة الأطوال المؤثّرة في كلّ سلك من السلكين الآخرين.



الشكل 20 – 60 مسائل 45، و 46، و 47

46. (II) في (الشّكل 20 – 60)، احسب مقدار المجال المغناطيسيّ واتجاهه عند النقطة التي تقع في منتصف المسافة بين السلكين N، و M.

47. (II) سلكان طويلان متوازيان، المسافة بينهما d، يحملان التّيّار I نفسه وبالاتجاه ذاته. إذا كان أحد السلكين عند $x = 0$، والثاني عند $x = d$ (الشّكل 20 – 61)، فاحسب $\vec{\mathbf{B}}$ على محور السّينات بين السّلكين كدالة في x.



الشكل 20 – 61 مسألة 47

20 – 7 الملفّ الحلزونيّ والمغانط الكهربائيّة

48. (I) ملفٌّ حلزونيٌّ طوله 12-cm، وعدد لفاته 420 لفةً، يحمل تيّارًا مقداره 2.0 A. احسب المجال المغناطيسيّ داخل الملف بالقرب من مركزه.

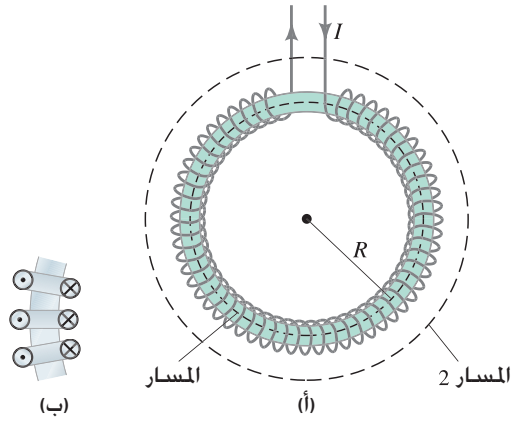
49. (I) ملفٌّ حلزونيٌّ طوله 30.0 cm، وقطره 1.25 cm، ينتج مجالا مغناطيسيّا في مركزه مقداره 0.385 T. ما مقدار التّيّار اللازم مروره في الملفّ إذا كان عدد لفاته 975 لفة من السلك؟

50. (II) ملفٌّ حلزونيٌّ عدد لفاته 550 لفة، وطوله 15 cm، يمرّ به تيّارٌ مقداره 33A. وضع سلك مستقيم طوله 3.0 cm، ويحمل تيّارًا مقداره 22A للأسفل في مركز الملفّ الحلزونيّ. ما القوّة المؤثّرة في هذا السلك على أنّ مجال الملفّ الحلزونيّ باتجاه الشرق؟

51. (II) إذا كان لديك 1.0 kg من النحاس، وتريد أن تصنع ملفًّا حلزونيًّا بحيث يعطي أقصى مجالٍ مغناطيسيٍّ ممكن عند فرق جهد معين، فهل ستصنع الأسلاك بحيث تكون سميكة قصيرة، أم رفيعة طويلة، أم أيّ شكل آخر؟ خذ بالحسبان المتغيّرات الأخرى، كقطر الملفّ الحلزونيّ وطوله، وأيّ أمور أخرى.

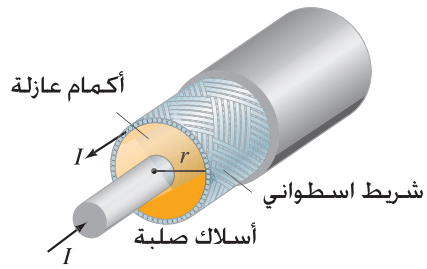
* 20 – 8 قانون أمبير

*** 52.** (II) الملفُّ الإطاريُّ هو ملفٌّ حلزونيٌّ دائريّ الشّكل (الشّكل 20 – 62). استخدم قانون أمبير والمسار الدائريّ الموضّح بالخطوط المتقطعة في (الشّكل 20 – 62)أ لإثبات أنّ المجال المغناطيسيّ: (أ) داخل الملفّ الإطاريّ هو $B = \mu_0 NI/2\pi r$، حيث N العدد الكلّيّ للفّات. (ب) خارج الملفّ الإطاريّ $B = 0$. (ج) هل المجال داخل الملف الإطاريّ منتظم كما في الملفّ الحلزونيّ؟ إنْ لم يكن كذلك، فكيف يتغيّر؟



الشكل 20 – 62 مسألة 52 (أ) ملف إطاري (ب) مقطع من الملفّ الإطاريّ يرينا اتجاه التّيّار في ثلاث حلقات: ⊙ تعني أنّ التّيّار باتجاهك، و ⊗ تعني أنّ التّيّار بعيدًا عنك.

*** 53.** (III) (أ) استخدم قانون أمبير لإثبات أنّ المجال المغناطيسيّ لكبل ذي موصلين متّحدي المحور (*c°axial cable*). كما في (الشّكل 20 – 36) يساوي $B = \mu_0 I/2\pi r$ إذا كان r أكبر من نصف قطر السلك الداخلي، وأقلّ من نصف قطر بديلة السلك الأسطوانية الخارجية. (ب) أثبت أنّ $B = 0$ خارج هذا الكيبل.



الشكل 20 – 63 الكيبل ذو الموصلين متحدي المحور (c°axial cable)

* 20 – 9، و 20 – 10 عزم الازدواج على حلقة تحمل تيارًا والتطبيقات

*** 54.** حلقةٌ سلكيّةٌ مربّعةٌ، طول ضلعها 54، وحلقةٌ سلكيّةٌ مربّعةٌ أخرى، طول ضلعها 22.0 cm تقع بحيث يكون وجهها موازيًا لمجالٍ مغناطيسيٍّ بين قطبي مغناطيسٍ كبير الحجم. إذا مرّ تيّارٌ مقداره 6.30 A خلال الحلقة، فإنّ عزم الازدواج عليها يساوي 0.325 m·N، فما شدة المجال المغناطيسيّ؟

* **55.** (I) إبرة جلفانوميتر تنحرف لأقصى تدريج عند تيّارٍ مقداره 53.0-μA. ما مقدار التّيار الذي سيمرّ بها حتى تنحرف لأقصى تدريج إذا ضوعف المجال المغناطيسيّ ليصبح 0.860 من قيمته الأصلية؟

* **56.** (I) إذا كان زنبرك الإرجاع يضعف بنسبة 25% مع السنوات. ما التّيار الذي سيعطي أقصى انحراف للتدريج إذا كانت القيمة الأصلية اللازمة له 36 μA؟

* **57.** (I) إذا قلّ التّيار في محرك كهربائيّ بنسبة 12%، فما المعامل الذي سيتناقص به عزم الازدواج؟

* **58.** (II) اثبت أنّ الثنائقطبيّ المغناطيسيّ M لإلكترون يدور حول النواة التي تحتوي على بروتون فقط في ذرة الهيدروجين يرتبط بكمية التحرك الزاوية L للإلكترون حسب العلاقة

$$M = \frac{e}{2m}L$$

* **59.** (II) ملفٌّ دائريٌّ قطره 16.0 cm، ويحتوي على تسع لفّات، يقع في مستوى سطح الأرض. إذا كان المجال المغناطيسيّ الأرضي في هذا الموقع 5.50×10^{-5} T باتجاه الأرض وبزاوية 56.0° تحت الخط الذي يشير إلى اتجاه الشّمال إذا مرّ تيار قيمته 7.20-A مع اتجاه عقارب الساعة خلال الملف: (أ) احسب عزم الازدواج على الملف. (ب) أيّ حافة من حواف الملف سترتفع للأعلى: الشّماليّة، أم الشرقية، أم الجنوبيّة، أم الغربية؟

20 – 11 مطياف الكتلة

* **60.** (I) تتحرك بروتونات بدائرة نصف قطرها 5.10 cm في مجال مغناطيسيّ شدته 0.566-T. ما قيمة المجال الكهربائيّ اللازم لجعل مساره مستقيمًا؟ وبأيّ اتجاه يجب أن يكون؟

* **61.** (I) يكون لذرات الجرمانيوم في مطياف الكتلة أنصاف أقطار مساوية لـ 21.0، و21.6، و21.9، و22.2، و 22.8 cm . إذا كان أقصى نصف قطر يعود للكتلة الذرية $76u$. ما الكتل الذرية للنظائر الأخرى؟

* **62.** (II) لو فرضنا أنّ المجال الكهربائيّ بين اللوحين في مطياف الكتلة الموضح في (الشّكل 20 - 39) هو 2.48×10^4 V/m. والمجالان المغناطيسيّان $B = B' = 0.68$ T. إذا كان المصدر يحتوي على نظائر الكربون ذات العدد الكتلي 12، و13، و14 من قطعةٍ قديمةٍ من الشجر. (لحساب الكتلة الذرية، اضرب في 1.67×10^{-27} kg. كم ستبعد الإشارات التي تتكون على الغشاء في مطياف الكتلة بعضها عن بعض؟ وماذا ستكون هذه المسافة إذا كانت الأيونات ثنائية الشحنة؟

* **63.** (II) يُستخدم مطيافُ الكتلة لقياس تلوّث الهواء. من الصعب فصل الجزيئات التي لها كتلٌ متساويةٌ تقريبًا مثل CO (28.0106 u)، و N_2 (28.0134 u). كم يجب أن يكون نصف قطر تقعر المطياف إذا أردنا أن نفصل هذين الجزأين على الغشاء بمسافة 0.50 mm؟

* **64.** (II) أحد أشكال مطياف الكتلة يعمل على مسارعة الأيونات بفرق جهد V قبل دخولها منطقة المجال المغناطيسيّ B حيث تبدأ الأيونات الحركة من السكون. أثبت أنّ كتلة الأيون هي $m = qB^2R^2/2V$، حيث R هي نصف قطر مسار الأيون في المجال المغناطيسيّ وq هي شحنته.

20 – 12 الفرّومغناطيسيّة والتخلّف المغناطيسيّ

* **65.** (I) ملفٌّ حلزونيٌّ رفيعٌ، يحتوي 430 لفةً في المتر الواحد، ويمرّ به تيارٌ مقداره 25-A. إذا كانت النّفاذيّة المغناطيسيّة للحديد $3000\mu_0$، فاحسب المجالَ المغناطيسيّ الكلّيَّ داخلَ الملفّ الحلزونيّ؟

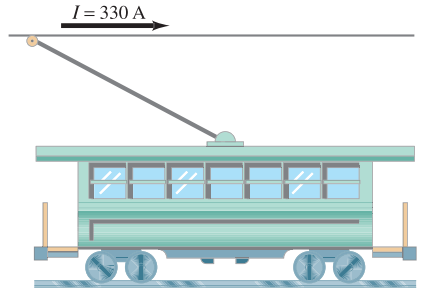
* **66.** (II) ملفٌّ حلزونيٌّ بقلبٍ حديديٍّ، طوله 38 cm، وقطره 1.8 cm، وعدد لفّاته 640 لفةً. إذا كان المجال المغناطيسيّ داخله 2.2 T عندما يمرّ به تيار مقداره 48 A. فاحسب النّفاذيّة المغناطيسيّة عند هذا المجال ذي الشدة العالية.

مسائـل عامة

* **67.** تنحرف حزمةٌ من البروتونات، كميّةُ تحرّكها 4.8×10^{-16} kg·m/s مع اتجاه عقارب الساعة في مسار دائريّ قطره 2.0km في المختبرات التابعة لمسارع فيرمي العالمي في إلينوي في الولايات المتحدة الأمريكية. حدّد مقدار المجال المغناطيسيّ الذي يحيط بالأنبوب الذي يحتوي الحزمة واتجاهه.

* **68.** بروتون وإلكترون لهما الطاقة الحركية نفسها يدخلان منطقة مجال مغناطيسيّ منتظم. ما النسبة بين نصفي أقطار مساريهما الدائريين؟

* **69.** كبل القدرة لعربة كهربائية (الشّكل 20 – 64) يحمل تيارًا أفقيًّا مقداره 330 A باتجاه الشرق. شدة المجال المغناطيسيّ عند هذا الموقع 5.0×10^{-5} T، ويصنع زاوية انحراف مقدارها 22°. احسب مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في 15-m من هذا الكيبل واتجاهها.



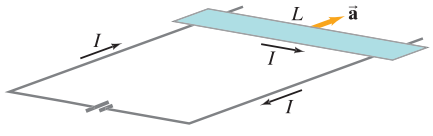
الشكل 20 - 64
مسألة 69

* **70.** احسب القوّة المؤثّرة في طائرة تكتسب شحنة كلية مقدارها 1550 μC، وتتحرك بسرعة 120 m/s عموديًّا على المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي قيمته 5.0×10^{-5} T.

* **71.** يشير المجالُ المغناطيسيُّ الأرضيُّ بالقرب من خطّ الاستواء بشكلٍ أفقيٍّ نحو الشّمال تقريبًا، وقيمته $B = 0.50 \times 10^{-4}$ T. ماذا سيكون مقدار سرعة إلكترون واتجاهه حتى تتوازن القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة فيه مع وزنه

* **72.** ذرة هيليوم لها شحنة ثنائية (He^{+2})، وكتلتها 6.6×10^{-27} kg. تتسارع بواسطة فرق جهد مقداره 2400 V. (أ) ماذا سيكون نصف قطر مسارها في مجال مغناطيسيّ منتظم شدته 0.240-T؟ (ب) ما الزمن الدوري لحركتها؟

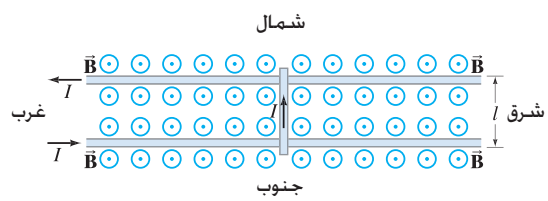
* **73.** مبدأ عمل جهاز إطلاق المقذوفات موضح في الشّكل 20- 65. يمر تيار عالٍ في حلقة تتكون من سكتين، وبطارية، وقضيب خفيف عديم الاحتكاك يلمس كلتا السكتين. المجال المغناطيسيّ عمودي على مستوى الحلقة. إذا كان طول القضيب $L = 22$ cm، وكتلته 1.5g ويستقر في مجال مغناطيسيّ شدته 1.7 T، فما التّيار الذي يجب مروره حتى يتسارع القضيب من السكون لسرعة 28 m/s في مسافة مقدارها 1 m؟ بأيّ اتجاه يجب أن يكون المجال المغناطيسيّ؟



الشكل 20–65
مسألة 73

* **74.** في الشّكل 20 - 60، إذا كان السلكُ العلويُّ مصنوعًا من النحاس وقطره 1.00-mm ومعلّقًا في الهواء بسبب القوّتين المغناطيسيّتين من السلكين السفليين، إذا مرّ تيّارٌ مقداره 95 A في كلا السلكين السفليين، فاحسب التّيار اللازم مروره في السلك العلويّ المعلّق؟

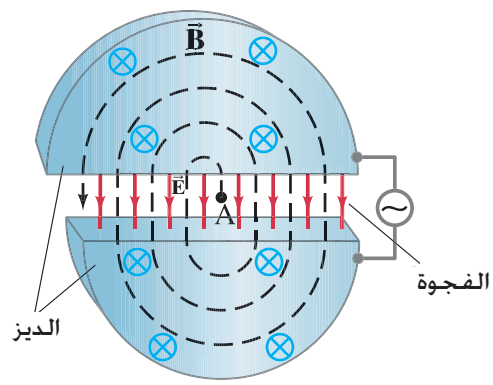
75. سلكان قويّان متوازيان، المسافة بينهما l في مستوًى أفقيٍّ يعملان كسكّةٍ لقضيبٍ فلزّيّ خفيف كتلته m عموديّ على كلّ منهما (الشّكل 20 - 66). إذا أثّر مجال مغناطيسيّ عموديًّا للخارج. وعند $t = 0$، وصل السلكان بمصدر كهربائيّ بحيث يمرّ تيار مقداره I في المجموعة، فاحسب سرعة القضيب الذي يبدأ الحركة من السكون كدالة في الزمن: (أ) على فرض عدم وجود احتكاك بين القضيب والسلكين. (ب) إذا كان معامل الاحتكاك الحركي بينهما μ_k. (ج) إذا كان التّيّار المار فيه باتجاه الشّمال، فهل يتحرّك القضيب نحو الشرق أم نحو الغرب ؟



الشكل 20 – 66 قضيب ينزلق على سكتين، مسألة 75.

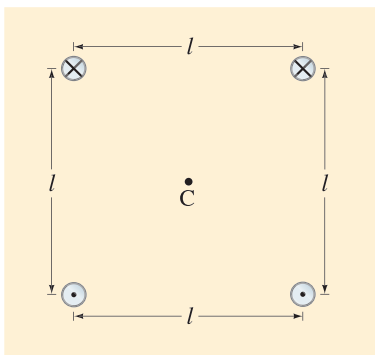
76. احسب أقصى انحراف لحزمة الإلكترونات بالقرب من مركز شاشة التلفاز نتيجة المجال المغناطيسيّ الأرضي الذي قيمته $5.0 \times 10^{-5}\,\text{T}$. افرض أنّ شاشة CRT (البند 17 – 10) تبعد 22 cm عن مصدر الإلكترونات بحيث تتسارع هذه الإلكترونات بفرق جهد مقداره (أ) 2.0 kV. (ب) 30 kV.

77. السيكلوترون (الشّكل 20 – 67) جهازٌ يُستخدم لمُسارعة الجُسيمات المشحونة مثل البروتونات. تبدأ الجُسيمات عند النقطة A بسرعة ابتدائية، ثمّ تتحرّك بمساراتٍ دائريّةٍ في المجال المغناطيسيّ B. وكلّما عبرت الجُسيمات الفجوة بين "الديز" تتعرّض لمجالٍ كهربائيٍّ يعمل على تسريعها وزيادة طاقتها الحركية (لا يوجد مجال كهربائي في فجوات "الديز"). المجال الكهربائيّ يغيّر اتجاهه كلّ نصف دورة بسبب فرق الجهد المتغيّر $V = V_0 \sin 2\pi ft$ وبالتالي تزداد سرعة الجسيمات عند كلّ مرور خلال الفجوة. (أ) اثبت أنّ تردّد الفولتيّة f يجب أن يكون $f = Bq/2\pi m$؛ حيث q هي شحنةُ الجُسيمات، وm كتلتها. (ب) اثبت أنّ الطاقة الحركية للجسيمات تزداد بمعدل $2qV_0$ خلال كلّ دورة على اعتبار أنّ الفجوة صغيرة جدًّا. (ج) إذا كان نصف قطر السيكلوترون 2.0 m وشدة المجال المغناطيسيّ 0.50 T، فماذا ستكون أقصى طاقةٍ حركيّةٍ للبروتونات المتسارعة بوحدة MeV؟



الشكل 20 – 67 السيكلوترون مسألة 77

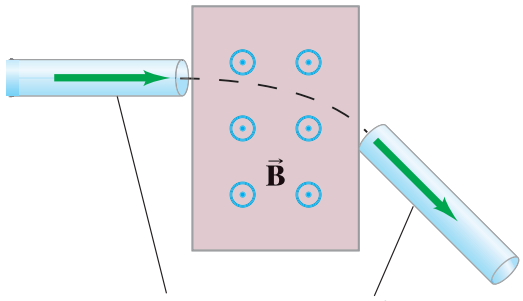
78. أربعةُ أسلاكٍ طويلةٍ مستقيمةٍ ومتوازيةٍ، موضوعةً عند رؤوس مربّعٍ طول ضلعه l، تحمل تيارات متساوية I_0، عموديّة على الورقة كما هو موضح في (الشّكل 20 - 68). احسب مقدار المجال المغناطيسيّ واتجاهه عند مركز المربع (c).



الشكل 20 – 68 مسألة 78

79. المجال المغناطيسيّ مفيدٌ جدًّا في مُسارعات الجُسيمات لتوجيه حزمة الجُسيمات، أي تغيير اتجاهها دون تغيير سرعتها (الشّكل 20 – 69). بيّن كيف يحدث ذلك لحزمة من البروتونات. ماذا يحدث للبروتونات التي لا تتحرك بالسرعة التي صمّم المجال المغناطيسيّ لأجلها؟ إذا كان المجال المغناطيسيّ يؤثر في منطقة عمقها 5.0 cm وقيمته 0.33 T، فما الزاوية التي ستنحرفها حزمة من البروتونات تتحرك بسرعة $1.0 \times 10^7\,\text{m/s}$.

مغناطيس



الشكل 20 – 69 مسألة 79

80. المجالُ المغناطيسيُّ في مركز ملفٍّ دائريٍّ، يحمل تيّارًا مقداره I (كما في الشّكل 20 – 9) هو

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2r}$$

حيث N عدد اللفّات، و r نصف قطره. افرض أنّ المغناطيس الكهربائيّ يستخدم ملفًا قطره 1.2 m ومصنوع من سلك نحاسيّ مربع طول ضلعه 1.6 mm. إذا كانت البطارية تعطي 120 V وأقصى قدرة تساوي 4.0 kW: (أ) كم عدد اللفات التي نحتاج إليها لتشغيل البطارية بالقدرة القصوى؟ (ب) ما شدة المجال المغناطيسيّ في مركز الملفّ؟ (ج) إذا استخدمت أكبر عدد من اللفّات والبطاريّة نفسها (بحيث يبقى جهدها 120 V)، فهل تحصل على مجال مغناطيسيّ أكبر؟ وضّح إجابتك.

81. قيمةُ المجال المغناطيسيّ بالقرب من قطبيّ الأرض هي $1\ \text{G}\ (1 \times 10^{-4}\ \text{T})$ تقريبًا. تخيّلْ نموذجًا بسيطًا يكون فيه المجال الأرضي ناجمًا من حلقة تحمل تيارًا حول خطّ الاستواء. احسب التّيّار الذي يمرّ في هذه الحلقة.

[مفتاح الحلّ: استخدم العلاقة المعطاة في التمرين 80]

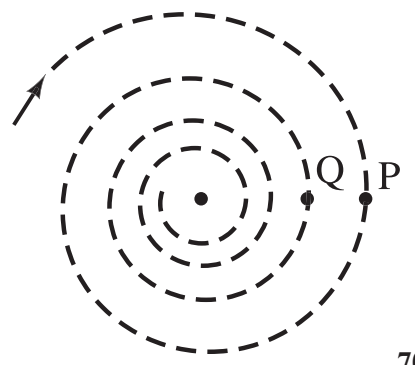
82. إذا أردت أن تأخذ فكرة عن المجال المغناطيسيّ الذي يتولّد من خطّين من خطوط الضغط العالي. وإذا قدّرت أنّ ارتفاع كلٍّ منهما نحو 30 m عن سطح الأرض ويبعدان مسافة 3 m عن بعضهما. وإذا أخبرك مسؤول في شركة الكهرباء أنّ هذه الخطوط تعمل على 10 kV، وبقدرة قصوى مقدارها 40 MW للمنطقة المحلّية، فاحسب أقصى مجال مغناطيسيّ يؤثّر فيك عندما تسير تحت هذه الخطوط، وقارنه بالمجال المغناطيسيّ الأرضي.

83. (أ) ما قيمة المجال المغناطيسيّ اللازم لجعل حزمة من الإلكترونات تتحرك إلى اليمين بسرعة $4.8 \times 10^6\ \text{m/s}$، وتسير دون انحراف في حيّز يحوي مجالا كهربائيًّا مقداره $10{,}000\ \text{V/m}$ باتجاه عمودي للأعلى؟

(ب) ما اتجاه المجال المغناطيسيّ إذا كان عموديًّا على المجال الكهربائيّ؟

(ج) ما تردد المسار الدائريّ للإلكترونات إذا أقفل المجال الكهربائيّ؟

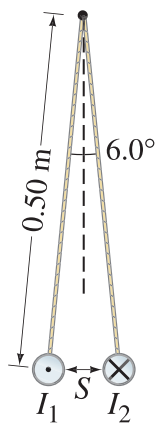
84. يتحرك بروتون في مسار لولبي في غاز تحت تأثير مجال مغناطيسيّ شدته $0.010\ \text{T}$ عموديًّا على المسار الحلزونيّ كما في (الشّكل 20 – 70). في دورتين متتاليتين يكون نصف القطر عند النقطتين P و Q. نصف القطرين هما 10.0 mm، و8.5 mm على الترتيب. احسب التغير في الطاقة الحركية للبروتون عندما ينتقل من النقطة P إلى النقطة Q.



الشكل 20 - 70
مسألة 84

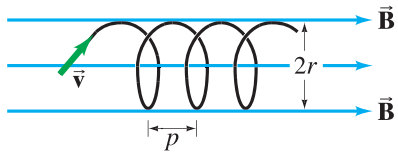
85. ملفٌّ حلزونيٌّ طولُهُ 32-cm، وقطره 1.8 cm ينتج مجالًا مغناطيسيًّا مقداره 0.30-T في مركزه. إذا كان أقصى تيّارٍ يساوي 5.7 A، فكم عدد اللفات التي يجب أن يحتويها الملف؟

86. سلكان طويلان من الألمنيوم، قطر كلّ منهما 0.50 mm، ويحملان التّيّار نفسه ولكن باتجاهين متعاكسين، عُلّقا بخيطين طول كلّ منهما 0.50 m كما في الشّكل 20 – 71. إذا صنع خيطا التعليق زاوية 3.0° مع العمودي، فما هو التّيّار المار في السلكين.



الشكل 20 – 71 مسألة 86

87. يدخل إلكترون مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا شدته $B = 0.23\ \text{T}$ بزاوية 45° مع $\vec{\mathbf{B}}$. احسب نصف القطر r والمسافة p بين الحلقات للمسار الحلزونيّ للإلكترون على افتراض أنّ سرعته تساوي $3.0 \times 10^6\ \text{m/s}$ (انظر الشّكل 20 – 72)



الشكل 20 – 72 مسألة 87

إجابات التمارين

أ: بالقرب من الأقطاب حيث تكون خطوط المجال قريبة من بعضها.
ب: عكس اتجاه عقارب الساعة.
جـ: 0.15N
د: صفر
هـ: سالب، اتجاه المسار الحلزونيّ سينعكس
و: 2.0 cm