محاضرات مادة الفيزياء /2/

لطلاب السنة الأولى

(ميكاترونيكس)

الأستاذ الدكتور جبُّور نوفل جبُّور

2024 - 2025

الفصل الأول

المغناطيسية

The Magnetism

1) مقدمة،
2) المغانط،
3) الحقل المغناطيسي الأرضي،
4) الحقول المغناطيسية،
5) القوة المغناطيسية على ناقل يمر به تيار،
6) عزم الدوران لتيار حلقي والمحركات الكهربائية،
7) حركة جسيم مشحون في حقل مغناطيسي،
8) الحقل المغناطيسي على طول سلك مستقيم وقانون آمبير،
9) القوة المغناطيسية بين ناقلين متوازيين،
10) الحقول المغناطيسي الناتجة عن تيار حلقي (حلقة) والملفات اللولبية،
11) المجالات المغناطيسية.
12) تصنيف المواد المغناطيسية.

المغناطيسية

1- مقدمة:

تُعتبر التطبيقات المغناطيسية واحدة من أهم التطبيقات في الفيزياء. والمغانط الكهربائية تُستخدم على نطاق واسع للأحمال الثقيلة. تُستخدم المغانط كأجهزة أو كأدوات في أجهزة القياس، المحركات، ومكبرات الصوت. الأشرطة والأسطوانات المغناطيسية تُستخدم بشكل روتيني في الصوت وأشرطة التسجيل، ولتخزين المعلومات في الحواسيب. إن الحقول المغناطيسية القوية (الشديدة) تُستخدم في تصوير الرنين المغناطيسي (Magnetic Resonance Imaging-MRI) لاستكشاف الجسم البشري بدقة وأمان أكبر مما هو عليه في حالة أشعة إكس (X-Rays). وهناك المغانط ما فوق الناقلية الضخمة التي تُستخدم في مسرعات الجسيمات أو السيكلوترونات (Cyclotrons) التي تسمح بتوجيه الجسيمات على أهداف بسرعة قريبة من سرعة الضوء.

وعادة نربط بشكل قوي المغناطيسية والكهرباء. إن الحقول المغناطيسية تؤثر على الشحنات المتحركة، والشحنات المتحركة تولد بدورها حقول مغناطيسية. وتغيير الحقول المغناطيسية يمكنها حتى توليد حقول كهربائية. وهذه الظواهر تعني وتتضمن وحدة الكهرباء والمغناطيسية، حيث أن العالم الفيزيائي **"جيمس كليرك ماكسويل – James Clerk Maxwell"** هو أول من وصف ذلك في القرن التاسع عشر. **ونشير هنا إلى أن المنبع الرئيسي والجوهري لأي حقل مغناطيسي هو التيار الكهربائي.**

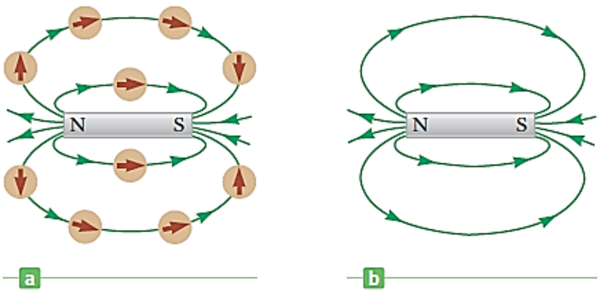
2- المغانط (المغناط):

معظم الناس لديهم تجربة بشكل من الأشكال مع المغنطيس. معظمنا رأينا المغناطيس على شكل حدوة الفرس الذي نلتقط به الدبابيس ومشابك الورق. الأشياء أو الأجسام الحديدة تنجذب بقوة لأحد طرفي المغناطيس، الذي يُطلق عليها اسم "الأقطاب – The Poles". نهاية يُطلق عليها اسم "القطب الشمالي – North Pole"، والأخرى "القطب الشمالي – South Pole". وهذه الأسماء تأتي من ميزات المغناطيس المتشكل من الحقل المغناطيسي الأرضي. إذا علقنا مغناطيس من منتصفه بحبل بحيث يتحرك بشكل حر في المستوي الأفقي، نلاحظ أنه يدور بحيث أن قطبه الشمالي يتجه نحو الشمال وقطبه الجنوبي نحو الجنوب. إن هذه الفكرة استخدمت لصناعة بوصلة بسيطة. ونشير إلى أن **الأقطاب من نوع واحد تتنافر ومن نوعين مختلفين تتجاذب**، وهذا كما هو الحال بالنسبة للقوى الكهربائية بين الأجسام المشحونة.

إن القوى بين الأقطاب المغناطيسية المتعاكسة مشابهة للقوى بين الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة، ولكن يوجد اختلاف هام وهو: **الشحنات الموجبة والسالبة يمكن أن تتواجد بشكل معزول (منفرد)، بالمقابل هذا غير صحيح بالنسبة للأقطاب المغناطيسية. أي لا يمكن فصل الأقطاب عن بعضها البعض، أي مهما كانت القطعة المغناطيسية صغيرة فهي تتضمن القطبين معاً.** ولكن هناك

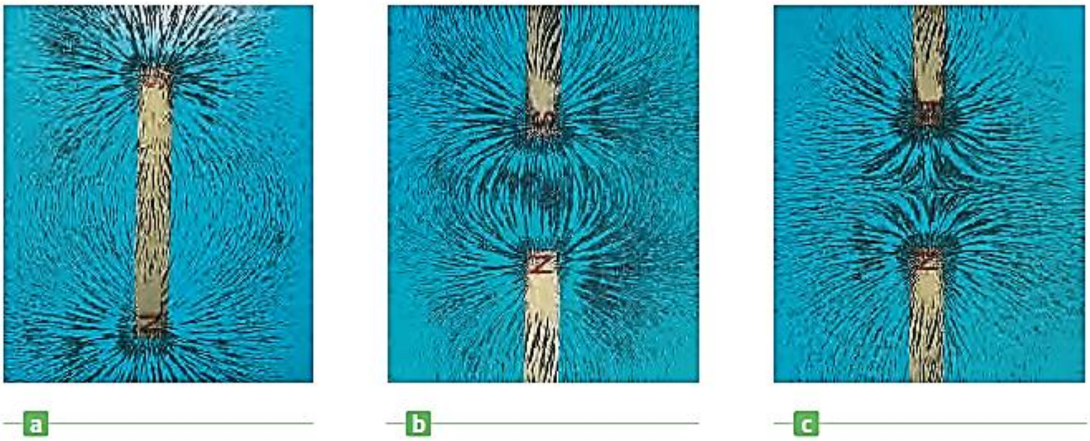
بعض القواعد والأســس النظرية، مع ذلك، تقود للتفكير أن الأقطاب المغناطيســية (المعزولة) توجد في الطبيعة، وهناك محاولات تجريبية في هذا المجال لكشفها.

لوصــف أي نوع من حقل شــعاعي يجب أن نعرف قيمته العددية، أو شــدته، ومن ثم اتجاهه. إن اتجاه الحقل المغناطيسـي $\vec{B}$ في أي موضـع هو الاتجاه حيث أن القطب الشـمالي لإبرة بوصـلة يتجه في تلك الموضـع. يوضح الشـكل المرفق كيف يمكن رسـم وتعريف خطوط الحقل المغناطيسـي لمغناطيس بمساعدة بوصلة.



(a) رسم خطوط الحقل المغناطيسي لقضيب مغناطيس بواسطة بوصلة. (b) عدة خطوط لحقل مغناطيسي لقضيب مغناطيسي.

إن سـلوك الحقل المتولد عن مغناطيس موضـح بتغطيته (أو لفه) بكمية صـغيرة من برادة الحديد على صـحيفة من الورق، انظر الشـكل المرفق. ويمكن الإشـارة هنا إلى أنه في المجال القضـائي تُسـتخدم هذه التقنية أو هذا المبدأ لإيجاد بصمات الأصابع في مسرح الجريمة.



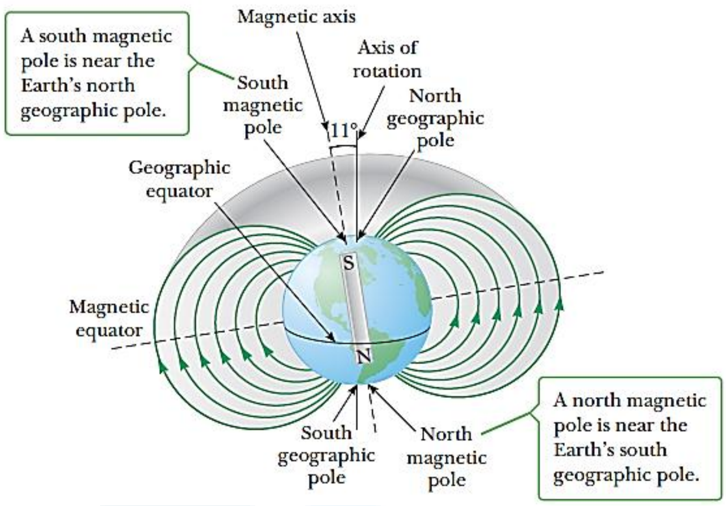
(a) نموذج لحقل مغناطيسي ناتج عن قضيب مغناطيسي مغطى بكمية صغيرة من برادة الحديد على صحيفة من الورق، (b) نموذج لحقل مغناطيسي بين قطبين مختلفين لقضيبين مغناطيسيين، (c) نموذج لحقل مغناطيسي بين قطبين متماثلين.

3- الحقل المغناطيسي الأرضي:

إن التجربة تشير إلى أن القطب الشمالي لإبرة البوصلة يتجه باتجاه الشمال الجغرافي للأرض. يُفسر ذلك بأن القطب الشــمالي للبوصــلة ينجذب باتجاه القطب الجنوبي للأرض، المتوضــع بالقرب من القطب الشمالي الجغرافي. بتعبير آخر **فإن القطب الشمالي الجغرافي هو القطب الجنوبي المغناطيسي**.

باختصار، فإن القطب الشمالي الجغرافي للأرض يوافق القطب الجنوبي المغناطيسي، والقطب الجنوبي الجغرافي للأرض يوافق القطب الشمالي المغناطيسي.

إن الشكل المرفق يبين تشكيل الحقل المغناطيسي للأرض، وهذا يشابه بشكل كبير لما نلاحظه إذا دفنا قضيب مغناطيسي ضخم جداً داخل الأرض.



خطوط الحقل المغناطيسي الأرضي. خطوط الحقل تبتعد عن الجوار المباشر للقطب الشمالي المغناطيسي وتدخل بالقرب من القطب المغناطيسي الجنوبي.

4- الحقول المغناطيسية:

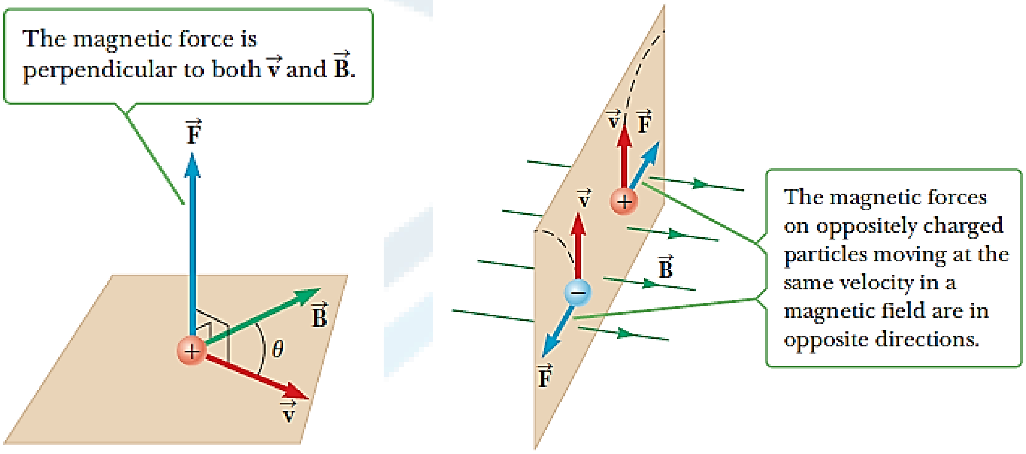
تشير التجارب أن الجسيم المشحون الساكن لا يتأثر بالحقل المغناطيسي الساكن. عندما يتحرك جسيم في حقل مغناطيسي، فإن هناك قوة مغناطيسية تؤثر عليه. هذه القوة تكون عظمى عندما تتحرك الشحنة باتجاه عمودي على خطوط الحقل المغناطيسي، وتتناقص من أجل زوايا أخرى، وتصبح معدومة عندما يتحرك الجسيم على طول خطوط الحقل. وهذا مختلف تماماً عن القوة الكهربائية التي تؤثر على الجسيم المشحون إذا كان يتحرك أو إذا كان في حالة السكون. إضافة لذلك، فإن اتجاه القوة الكهربائية يكون موازياً لاتجاه الحقل الكهربائي، بينما القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنة تكون عمودية على الحقل المغناطيسي.

عندما تكلمنا عن الكهرباء، رأينا أن الحقل الكهربائي في نقطة ما في الفضاء يُعرف بأنه القوة الكهربائية بوحدة الشحنة المؤثرة على شحنة اختبارية موضوعة في تلك النقطة. بطريقة مماثلة، نستطيع أن نصف خصائص الحقل المغناطيسي $\vec{B}$ في نقطة بأنه القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة اختبارية في تلك النقطة. نفرض أن شحنتنا الاختبارية q تتحرك بسرعة $\vec{v}$. وجد تجريبياً أن شدة القوة المغناطيسية المؤثرة على جسيم تتناسب مع قيمة الشحنة q، مع قيمة السرعة $\vec{v}$، مع شدة الحقل المغناطيسي الخارجي، ومع جيب الزاوية θ بين اتجاه السرعة $\vec{v}$ واتجاه الحقل $\vec{B}$. إن هذه الملاحظات (المراقبات) يمكن تلخيصها بكتابة أن شدة القوة المغناطيسية التي تؤثر على شحنة q المتحركة بسرعة $\vec{v}$ في حقل مغناطيسي $\vec{B}$ تُعطى بالعلاقة الآتية، انظر الشكل التالي:

$$F = qvB\ sin\theta \qquad (1)$$

حيث الزاوية θ بين الشــعاعين $\vec{v}$ و $\vec{B}$. وهذه العلاقة تُســتخدم لتعريف شــدة الحقل المغناطيســي وفق العلاقة:

$$B = \frac{F}{qv\ sin\theta} \qquad (2)$$



(a) **(b)**

(a) اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على جسيم مشحون بشحنة q يتحرك بسرعة $\vec{v}$ في حقل مغناطيسي $\vec{B}$. القوة المغناطيسية عمودية على السرعة $\vec{v}$ والحقل $\vec{B}$. (b) قوى مغناطيسية مؤثرة على شحنة موجبة وشحنة سالبة. الخطوط المتقطعة تشير لمسار الجسيمات. إن اتجاه القوى المغناطيسية المؤثرة على جسيمات متحركة مشحونة بشحنات موجبة وسالبة (متعاكسة) بنفس السرعة في الحقل المغناطيسي تكون متعاكسة.

إذا قُدرت القوة F بالنيوتن، الشحنة q بالكولون، والسـرعة v بالمتر على الثانية، فواحدة الحقل المغناطيسي في الجملة الدولية $(System\ International - SI)$ هي التيسلا $(Tesla - T)$، الـذي يُســمى أيضــاً الويبر Wb بـالمتر المربع $\left(Weber/Squar\ meter - \frac{Wb}{m^2}\right)$، حيـث أن $\left(1\ T = \frac{Wb}{m^2}\right)$. إذا كان لـدينا شــحنة قيمتها كولون واحد $(1\ C)$ تتحرك بـاتجاه عمودي على حقل مغناطيسي قيمته $(1\ T)$، بسرعة تساوي $(1\ m/s)$، فالقوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنة تساوي واحد نيوتن $(1\ N)$. نستطيع أن نعبر عن واحدات الحقل $\vec{B}$ كما يلي:

$$[B] = T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{N}{C.m/s} = \frac{N}{A.m} \qquad (3)$$

إضافة لذلك، من الناحية العملية، في جملة الواحدات السغثية $(cetimeter\ gram\ second -$ $cgs)$ هناك واحدة تُستخدم للحقل المغناطيسي هي الغوص $(Gauss - G)$ وغالباً هي المستخدمة، حيث أن العلاقة بين الغوص والتيسلا هي $(1\ T = 10^4\ G)$.

نشير هنا إلى أن المغناط المخبرية يمكنها توليد حقول مغناطيسية إلى حد ما كبيرة، حتى أن قيمتها تصل إلى $(25000\ G)$، أو $(2{,}5\ T)$. إن المغانط ذات الناقلية الفائقة يمكنها أن تولد حقول مغناطيسية قيمتها تصل إلى $(3 \times 10^5\ G)$، أو $(30\ T)$، وقد تم تصنيع مثل تلك المغانط. يمكن مقارنة هذه القيم مع القيمة الصغيرة للحقل المغناطيسي الأرضي بجوار سطح الأرض، والتي تساوي تقريباً $(0{,}5\ G)$، أو $(0{,}5 \times 10^{-4}\ T)$.

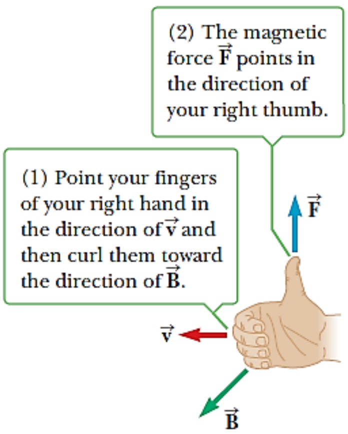
من المعادلة رقم (1) يمكننا أن نرى أن القوة المؤثرة على جسيم مشحون يتحرك في حقل مغناطيسي تأخذ قيمتها العظمى عندما تكون حركة الجسيم (أي سرعته) عمودية على الحقل المغناطيسي، وهذا يوافق للقيمة $\theta = 90^o$، أي أن $\sin\theta = 1$. وعندها القيمة العظمى للقوة تساوي:

$$F_{max} = qvB \qquad (4)$$

أيضاً، من المعادلة (1)، القوة تساوي الصفر عندما تكون السرعة $\vec{v}$ موازية للحقل $\vec{B}$. (وهذا يتوافق مع $\theta = 0^o$ أو $\theta = 180^o$)، وهكذا ليس هناك من قوة مغناطيسية تؤثر على الجسيم المشحون عندما يتحرك باتجاه الحقل المغناطيسي أو معاكساً له.

تشير التجارب أن اتجاه القوة المغناطيسية هو عمودي دوماً على كل من السرعة $\vec{v}$ والحقل $\vec{B}$، كما هو موضح في الشكل السابق من أجل جسيم مشحون بشحنة موجبة. ولتحديد اتجاه القوة، نستخدم القاعدة الأولى لليد اليمنى والتي تقول:

1) نوجه أصابع اليد اليمنى باتجاه السرعة $\vec{v}$.
2) ندور الأصابع باتجاه الحقل المغناطيسي $\vec{B}$، الذي يتحرك نحو الزوايا الصغيرة كما هو موضح في الشكل التالي.
3) في هذه الحالة الإبهام يُعطي اتجاه القوة المغناطيسية $\vec{F}$ المؤثرة على شحنة موجبة.



القاعدة الأولى لليد اليمنى تحدد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة موجبة تتحرك بسرعة $\vec{v}$ في حقل مغناطيسي $\vec{B}$.

أسئلة سريعة:

(1) جسيم مشحون يتحرك وفق خط مستقيم في منطقة من الفضاء. بفرض كل الحقول الأخرى مهملة، ما هو الجواب الصحيح من الأجوبة الآتية؟ الحقل المغناطيسي: (أ) قيمته معدومة، (ب) مركبته العمودية على سرعة الجسيم معدومة، (ج) مركبته الموازية لسرعة الجسيم في تلك المنطقة معدومة.

الجواب: الخيار هو **(ب)**. إن القوة التي يؤثر بها الحقل المغناطيسي على جسيم مشحون يتحرك تساوي $F = qvB\,sin\theta = qvB_{\perp}$، حيث $B_{\perp}$ مركبة الحقل العمودية على سرعة الجسم. بما أن الجسيم يتحرك وفق خط مستقيم، فقيمة القوة يجب أن تساوي الصفر لأن $B_{\perp} = 0$، و $qv \neq 0$.

(2) القطب الشمالي لنهاية (لطرف) قضيب مغناطيسي موضوعة بالقرب من قطعة من البلاستيك مشحون بشحنة موجبة وساكنة. هل القطعة البلاستيكية: (أ) تُجذب، (ب) تُدفع، أو (ج) لا تتأثر بالمغناطيسي؟

الجواب: الخيار هو (ج). إن القوة المغناطيسية الخارجية المؤثرة على الشحنة الناتجة عن الحقل المغناطيسي تتناسب مع سرعة الشحنة بالنسبة للحقل. إذا كانت الشحنة ساكنة لا تتحرك، ففي هذا الوضع، لا يوجد قوة مغناطيسية.

مثال (1): (حركة بروتون في الحقل المغناطيسي الأرضي – حساب قيمة واتجاه القوة المغناطيسية)

بروتون يتحرك بسرعة تساوي $(1,00 \times 10^5\ m/s)$ في الحقل المغناطيسي الأرضي، الذي قيمته تساوي $(55,0\ \mu T)$ في تلك المنطقة الخاصة. عندما يتحرك البروتون باتجاه الشرق، القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون تتجه بشكل مستقيم نحو الأعلى، وعندما يتحرك الجسيم نحو الشمال، ليس هناك من قوة تؤثر عليه. (أ) ما هو اتجاه الحقل المغناطيسي، و (ب) ما هي قيمة أو شدة الحقل المغناطيسي عندما يتحرك البروتون باتجاه الشرق؟ (ج) احسب القوة الثقالية (Gravitational Force) المؤثرة على البروتون وقارنها بالقوة المغناطيسية. قارن أيضاً هذه القوة بالقوة الكهربائية بفرض أن قيمة الحقل الكهربائي تساوي $(E = 1,50 \times 10^2\ N/C)$ في تلك الموضع، المشترك من سطح الأرض. إن كتلة البروتون تساوي $(1,67 \times 10^{-27}\ kg)$ وشحنته تساوي $(1,60 \times 10^{-19}\ C)$، وتسارع الجاذبية الأرضية يساوي $\left(9,80\ \frac{m}{s^2}\right)$.

الحل:

يمكن إيجاد اتجاه الحقل المغناطيسي بتطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى، علماً أنه لا يوجد قوة تؤثر على البروتون عندما يتحرك نحو الشمال. باستبدال ذلك في العلاقة (1) نجد شدة الحقل المغناطيسي.

(أ) إيجاد اتجاه الحقل المغناطيسي:

ليس هناك من قوة مغناطيسية تؤثر على البروتون عندما يتحرك نحو الشمال، إذاً الزاوية التي يصنعها البروتون مع اتجاه الحقل المغناطيسي يجب أن تكون إما 0^o أو 180^o. إذاً، الحقل المغناطيسي $\vec{B}$ يجب أن يتجه إما باتجاه الشمال أو باتجاه الجنوب. نطبق الآن القاعدة الأولى لليد اليمنى. عندما يتحرك الجسيم نحو الشرق، القوة المغناطيسية ستتجه نحو الأعلى. بتوجيه الإبهام باتجاه القوة والأصابع باتجاه

السرعة نحو الشرق. وعندما ندور الأصابع، فهم يتجهوا نحو الشمال، فهذا الاتجاه هو يجب أن يكون اتجاه الحقل المغناطيسي.

(ب) إيجاد قيمة القوة المغناطيسية:

لنعوض القيم المعطاة وشحنة البروتون في المعادة (1). من الطلب (أ)، الزاوية بين سرعة البروتون $\vec{v}$ والحقل المغناطيسي $\vec{B}$ تساوي 90^o. أي أن:

$$F = qvB\, sin\theta$$
$$= (1{,}60 \times 10^{-19}\ C) \times (1{,}00 \times 10^5\ m/s)$$
$$\times (55{,}0 \times 10^{-6}\ T) \times \sin 90^o = 8{,}80 \times 10^{-19}\ N$$

(ج) حساب قوة الثقالة F_{grav} المؤثرة على البروتون:

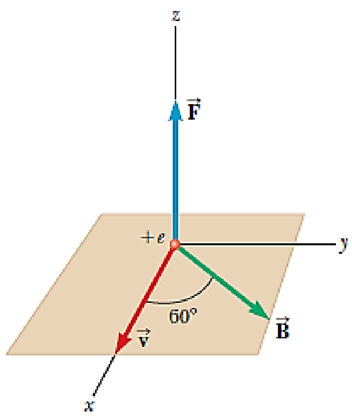
بحساب قوة الثقالة المؤثرة على البروتون ومقارنتها بالقوة المغناطيسية والقوة الكهربائية من أجل حقل كهربائي $(E = 1{,}50 \times 10^2\ N/C)$ نجد أن:

$$F_{grav} = mg = (1{,}67 \times 10^{-27}\ kg) \times \left(9{,}80 \frac{m}{s^2}\right) = 1{,}64 \times 10^{-26}\ N$$
$$F_{elec} = qE = (1{,}60 \times 10^{-19}\ C) \times (1{,}50 \times 10^2\ N/C) = 2{,}40 \times 10^{-17}\ N$$

مما سبق نستنتج أن القوة الكهربائية أكبر من القوتين المغناطيسية والثقالية.

<u>مثال (2): (حركة بروتون في حقل مغناطيسي – حساب قيمة القوة المغناطيسية والتسارع لبروتون يتحرك بزاوية تختلف عن الزاوية 90^o بالنسبة للحقل)</u>

بروتون يتحرك بسرعة تساوي $(8{,}00 \times 10^6\ m/s)$ على طول المحور x. يدخل في منطقة حيث يوجد حقل مغناطيسي قيمته $(2{,}50\ T)$، موجه بزاوية قدرها 60^o مع المحور x، المرتبط في المستوي xy وفق الشكل المرفق. المطلوب: (1) إيجاد القيمة البدائية واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون. (2) احسب التسارع البدائي للبروتون. إن كتلة البروتون تساوي $(1{,}67 \times 10^{-27}\ kg)$.



القوة المغناطيسية $\vec{F}$ المؤثرة على بروتون تتجه بالاتجاه الموجب للمحور z عندما يكون كل من السرعة $\vec{v}$ والحقل $\vec{B}$ واقعان في المستوي xy.

<u>الحل:</u>

لإيجاد قيمة واتجاه القوة المغناطيسية نعوض المعطيات العددية بالمعادلة (1)، ونستخدم القاعدة الأولى لليد اليمنى. ومن أجل الطلب الثاني نستخدم قانون نيوتن الثاني.

(1) إيجاد قيمة واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون:

بالتعويض نجد أن:

$$F = qvB\, sin\theta$$
$$= (1{,}60 \times 10^{-19}\, C) \times (8{,}00 \times 10^{6}\, m/s) \times (2{,}50\, T) \times \sin 60^{o} = 2{,}77 \times 10^{-12}\, N$$

وبتطبيق القاعد الأولى لليد اليمنى نجد الاتجاه البدائي للقوة المغناطيسية: نوجه أصابع اليد اليمنى باتجاه المحور x (أي باتجاه السرعة $\vec{v}$) ومن ثم ندورهم باتجاه الحقل $\vec{B}$. عند ذلك فالإبهام سيتوجه باتجاه المحور z.

(2) حساب التسارع البدائي للبروتون:

نبدل القوة وكتلة البروتون بقيمهما في القانون الثاني لنيوتن نجد:

$$F = ma \rightarrow a = \frac{2{,}77 \times 10^{-12}\, N}{(1{,}67 \times 10^{-27}\, kg)} = 1{,}66 \times 10^{15}\, m/s^{2}$$

5- القوة المغناطيسية على ناقل يمر به تيار:

إذا كان الحقل المغناطيسي يؤثر بقوة على جسيم وحيد مشحون عندما يتحرك في هذا الحقل، فليس من المفاجئ أن القوى المغناطيسية تؤثر على ناقل يمر به تيار. بسبب أن التيار هو مجموعة من الجسيمات المشحونة المتعددة المتحركة، والقوة المحصلة القوى المؤثرة على السلك هي عبارة عن المجموع الفردي للقوى المؤثرة على الجسيمات.

لتعيين اتجاه الحقل $\vec{B}$، نستخدم الاصطلاحات الآتية: إذا كان الحقل $\vec{B}$ يخرج من الصفحة، نستخدم إشارة الصليب أو الضرب، وذلك من أجل تمثيل نهاية أو ذيل الشعاع أو السهم. وإذا كان الحقل $\vec{B}$ يدخل إلى الصفحة، نستخدم إشارة نقطة، وذلك من أجل تمثيل رأس أو بداية الشعاع أو السهم.

لنفرض أنه لدينا سلك طوله ℓ ومقطعه A يمر به تيار I موضوع داخل حقل مغناطيسي خارجي $\vec{B}$، كما هو موضح بالشكل المرفق. نفرض أن الحقل $\vec{B}$ عمودي على السلك، أي أن الزاوية بينهما تساوي 90^{o} ويتجه نحو داخل الصفحة. هناك قوة مغناطيسية قيمتها العظمى تساوي:

$$F_{max} = q(\vec{v}_d \Lambda \vec{B}) = q|v_d||B|\, sin\theta = q|v_d||B| \sin 90^{o} = qv_dB$$

تؤثر على كل شحنة في السلك، و v_d السرعة الجرية للشحنة. ولإيجاد القوة الكلية المؤثرة على السلك، نضرب القوة المؤثرة على شحنة واحدة بعدد الشحنات الموجودة في السلك. بما أن حجم السلك أو قطعة السلك (عبارة عن أسطوانة) يساوي $A\ell$، فعدد الشحنات يساوي $nA\ell$، حيث n عدد الشحنات (أو

حاملات الشـحنة) بواحدة الحجم. ومنه، فإن القيمة الكلية للقوة المغناطيسـية المؤثرة على السـلك الذي طوله ℓ يساوي:

القوة الكلية = القوة المؤثرة على شحنة واحدة (أو حامل الشحنة) × العدد الكلي للشحنات

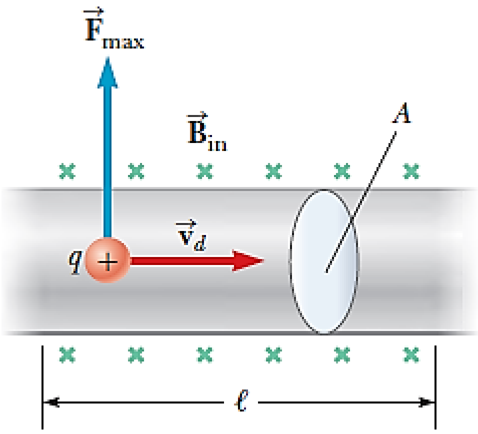
$$F_{max} = (qv_dB)(nA\ell)$$

ونعلم أن التيار المار بالسلك يُعطى بالعلاقة: $I = nqv_dA$، حيث:

$$I = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = (nqv_dA)$$

فيكون لدينا:

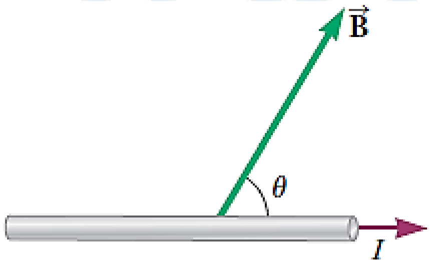
$$F_{max} = BI\ell \qquad (5)$$



مقطع من سلك تتحرك فيه شحنات خاضع لحقل مغناطيسي خارجي $\vec{B}$ يتجه نحو داخل الصفحة (من الأمام نحو الخلف) الممثل بإشارة ضرب.

وهذه العلاقة تُسـتخدم فقط عندما تكون الزاوية بين التيار والحقل زاوية قائمة. وإذا كانت الزاوية بينهما ليسـت قائمة، لا على التعيين، كما هو موضح في الشـكل المرفق، فإن القوة المغناطيسـية المؤثرة على السـلك تساوي:

$$F = BI\ell \sin\theta \qquad (6)$$



سلك (ناقل) يمر به تيار I بوجود حقل مغناطيسي خارجي منتظم $\vec{B}$ يصنع زاوية θ مع السلك. إن شعاع القوة المغناطيسية هو خارج الصفحة.

حيث الزاوية θ بين الحقل $\vec{B}$ واتجاه التيار. يمكن تحديد اتجاه القوة باسـتخدام القاعدة الأولى لليد اليمنى. في هذه الحالة، مع ذلك، يجب توجيه الأصابع بالاتجاه الموجب للتيار I، بدلاً من اتجاه السـرعة $\vec{v}$، قبل تدويرها في اتجاه $\vec{B}$. الإبهام إذاً سـيتوجه باتجاه القوة، كما هو سـابقاً. بشـكل طبيعي، التيار يجب أن يكون مولداً بشـحنات تتحرك بنفس السـرعة، وهكذا واقع لن يكون مفصـول عن القاعدة. وفي الشـكل

السابق، اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على السلك تخرج خارج من الصفحة. وأخيراً، عندما يكون اتجاه التيار ليس له اتجاه الحقل أو معاكساً له، فالقوة المغناطيسية على السلك تكون مساوية للصفر.

مثال: (سلك يمر به تيار موضوع في حقل مغناطيسي أرضي)

سلك يمر به تيار شدته $22{,}0\ A$ من الغرب إلى الشرق. نفرض أن الحقل المغناطيسي في تلك الموقع أفقي ويتجه من الجنوب إلى الشمال وشدته تساوي $0{,}500\times10^{-4}T$. المطلوب: (1) إيجاد قيم واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك طوله $36{,}0\ \mathrm{m}$. (2) احسب قوة الثقالة المؤثرة على نفس السلك إذا كان مصنوع من النحاس وسطح مقطعه يساوي $2{,}50\times10^{-6}\ m^2$. (3) المقارنة بين القوتين. ماذا تستنتج؟ تسارع الجاذبية الأرضية يساوي $\left(9{,}80\,\frac{m}{s^2}\right)$، والكثافة الحجمية للنحاس $(8{,}92\times10^3\ kg/m^3)$.

الحل:

(1) حساب قيمة القوة المغناطيسية المؤثرة على السلك:

بالتبديل في المعادلة (6)، وباعتبار أن الحقل المغناطيسي والتيار متعامدان نجد أن:

$$F = BI\ell\ sin\theta$$
$$= (0{,}500\times10^{-4}T)(22{,}0\ A)(36{,}0\ \mathrm{m})\sin 90^o$$
$$= 3{,}96\times10^{-2}\ N$$

وبتطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى نجد اتجاه القوة المغناطيسية: بتوجيه أصابع اليد اليمنى من الغرب نحو الشرق باتجاه التيار، تدويرهم نحو الشمال يُعطي اتجاه الحقل المغناطيسي. الإبهام سيتوجه نحو الأمام.

(2) حساب قوة الثقالة المؤثرة على السلك:

من أجل ذلك، يجب أولاً حساب كتلة السلك من العلاقة التي تسمح بحساب الكثافة الحجمية للنحاس، الطول، وسطح مقطع السلك:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V = \rho(A\ell)$$
$$= (8{,}92\times10^3\ kg/m^3)(2{,}50\times10^{-6}\ m^2)(36{,}0\ m)$$
$$= 0{,}803\ kg$$

وللحصول على قوة الثقالة، نضرب الكتلة بتسارع الجاذبية الأرضية:

$$F_{grav} = mg = (0{,}803\ kg)(9{,}80\ m/s^2) = 7{,}87\ N$$

بمقارنة القوتين:

$$\frac{F_{grav}}{F} = \frac{7{,}87\ N}{3{,}96\times10^{-2}\ N} \cong 200$$

نجد أن قوة الثقالة أكبر بكثير من القوة المغناطيسية، تقريباً بـ 200 مرة.

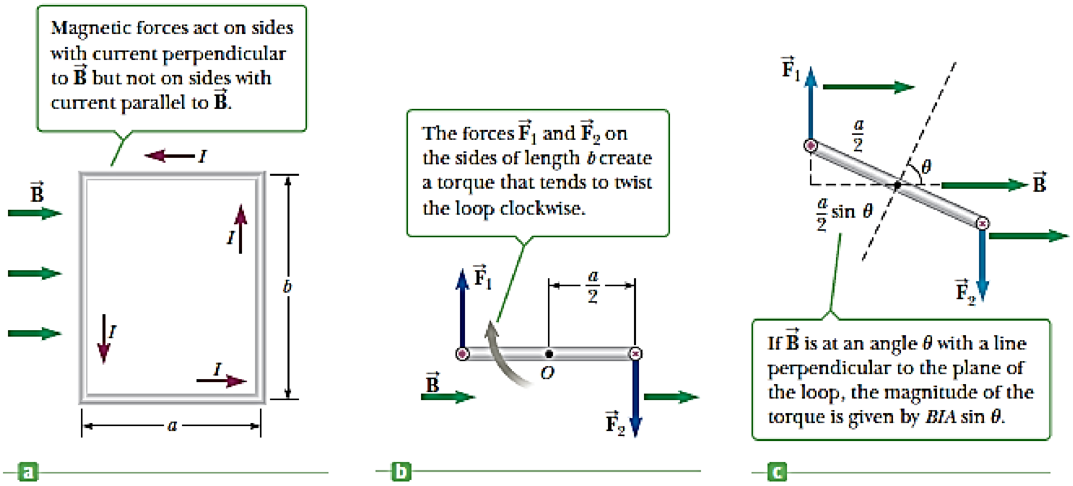
6- عزم الدوران لتيار حلقي والمحركات الكهربائية:

رأينا في المقطع السـابق أن القوة المغناطيسـية تؤثر على ناقل يمر به تيار إذا وضـع هذا الناقل في حقل مغناطيسـي خارجي. انطلاقاً من تلك النقطة، سـنرى أن هناك عزم يؤثر على تيار حلقي (حلقة يمر بها تيار) إذا كان موضوع في حقل مغناطيسي. ونتيجة هذا التحليل سيكون له قيمة عملية كبيرة عندما نتحدث عن المولدات والمحركات.

لنعتبر حلقة مسـتطيلة الشـكل يمر بها تيار I بوجود حقل مغناطيسـي خارجي منتظم في مسـتوي الحلقة، كما هو مبين في الشـكل المرفق. إن القوى على الطولين a معدوم يسـاوي الصـفر لأنهما موازين للحقل. إن قيمة القوى المغناطيسية المؤثرة على الطولين b تساوي:

$$F_1 = F_2 = BIb$$

إن اتجـاه القوة $\vec{F}_1$، القوة المؤثرة على الطرف الأيسـر للحلقـة، خـارج الصـفحـة (يخرج من الصفحة)، والقوة $\vec{F}_2$، القوة المؤثرة على الطرف الأيمن للحلقة، داخل الصفحة (يدخل إلى الصفحة). وإذا نظرنا للحلقة من الأعلى، كما هو مبين في الشكل السابق الحالة (b)، فالقوة تكون موجهة كما هو مبين في الشكل.



(a) منظر علوي للحلقة المستطيلة الشكل في حقل مغناطيسي منتظم. (b) منظر جانبي للحلقة المستطيلة في الحالة (a). (c) منظر جانبي للحلقة في الحالة (a) مع الناظم على الحلقة من أجل زاوية قدرها θ مع الحقل المغناطيسي.

إذا فرضـنا أن الحلقة موضـوعة على محور بحيث يمكنها الدوران حول النقطة O، نرى أن هاتين القوتين تشـكلان مزدوجة حول النقطة O حيث تدور الحلقة مع حركة عقارب السـاعة. إن قيمة هذه المزدوجة، τ_{max}، تساوي:

$$\tau_{max} = F_1 \frac{a}{2} + F_2 \frac{a}{2} = (BIb)\frac{a}{2} + (BIb)\frac{a}{2} = BIab$$

حيث عزم الذراع حول O يساوي $(a/2)$ من أجل القوتين. وبما أن سطح الحلقة يساوي $A = ab$، فالقيمة العظمى للعزم يمكن أن نعبر عنها بالعلاقة:

$$\tau_{max} = BIA \qquad (7)$$

وهذه النتيجة تكون صالحة فقط عندما يكون الحقل المغناطيسي موازياً لمستوي الحلقة، كما هو مبين في الحالة (b) من الشكل السابق. إذا كان الحقل يصنع زاوية θ مع العمود على مستوي الحلقة، كما هو مبين في الحالة (c) من الشكل السابق، فعزم الذراع لكل قوة يُعطى $(a/2)\, sin\, \theta$. تحليل مشابه للسابق يعطي قيمة للعزم تساوي:

$$\tau = BIA \sin \theta \qquad (8)$$

هذه النتيجة تشير إلى أن العزم يأخذ قيمة عظمى تساوي BIA وذلك عندما يكون الحقل موازياً لمستوي الحلقة $(\theta = 90^o)$، ويساوي الصفر عندما يكون عمودياً على مستوي الحلقة $(\theta = 0^o)$. كما نرى في الحالة (c) من الشكل السابق، للحلقة اتجاه للدوران بزاوية θ صغيرة (وهكذا فإن الناظن على مستوي الحلقة يدور متجهاً باتجاه الحقل المغناطيسي).

وبشكل عام، مهما كان شكل الحلقة، فإنه يمكننا تطبيق العلاقة (8). ومن أجل عزم ملف مكون من لفة N يمكن أن نكتب:

$$\tau = BIAN \sin \theta \qquad (9a)$$

إن الكمية $\mu = IAN$ تعرف بأنها قيمة الشعاع $\vec{\mu}$ الذي يُطلق عليه اسم "**العزم المغناطيسي – Magnetic Moment**" للملف. إن هذا الشعاع $\vec{\mu}$ يكون عمودياً على مستوي الحلقة (أو الحلقات)، وإن إبهام اليد اليمنى يكون موجه باتجاهه $\vec{\mu}$، أصابع اليد اليمنى تتجه باتجاه التيار. إن الزاوية θ في المعادلتين (8) و (9) ترتبطان باتجاه العزم المغناطيسي $\vec{\mu}$ والحقل المغناطيسي $\vec{B}$. يمكن كتابة العزم المغناطيسي على النحو الآتي:

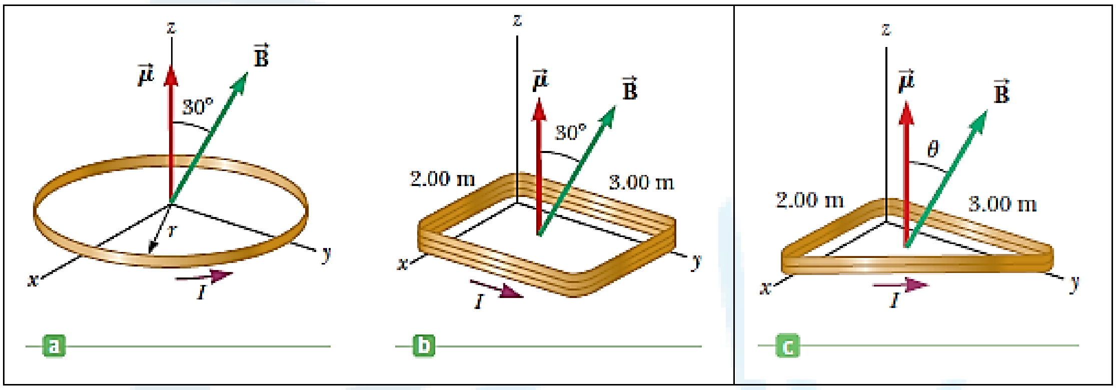
$$\tau = \mu B \sin \theta \qquad (9b)$$

ونشير هنا إلى أن العزم $\vec{\tau}$ هو أيضاً عمودي على كل من العزم المغناطيسي $\vec{\mu}$ والحقل المغناطيسي $\vec{B}$.

<u>مثال: (حساب العزم المغناطيسي لحلقة دائرية يمر بها تيار)</u>

نفرض أنه لدينا حلقة دائرية (سلك دائري) نصف قطرها $(1\ m)$ يمر بها تيار I موضوعة في حقل مغناطيسي قيمته $(0{,}500\ T)$. الناظم على مستوي الحلقة يصنع زاوية تساوي $(\theta = 30^o)$ مع الحقل المغناطيسي كما هو مبين في الشكل المرفق. إن قيمة التيار المار في الحلقة الدائرية يساوي $2{,}00\ A$

واتجاهه موضح في الشكل المرفق. (a) المطلوب إيجاد العزم المغناطيسي للحلقة في تلك اللحظة. (b) إذا كان نفس التيار يمر في ملف مستطيل الشكل الذي أبعاده $2,00\ m$ و $3,00\ m$ ومؤلف من لفات كما هو مبين في الحالة (b) من الشكل المرفق. المطلوب إيجاد العزم المغناطيسي للملف وقيمة العزم المؤثر على الملف في تلك اللحظة.



(a) حلقة دائرية يمر بها تيار موجودة في المستوي xy حيث يوجد حقل مغناطيسي خارجي $\vec{B}$.

(b) لفة مستطيلة الشكل موجودة في المستوي xy حيث يوجد نفس الحقل المغناطيسي.

الحل:

من أجل كل جزء أو طلب، يجب حساب السطح (المساحة)، لحساب العزم المغناطيسي، ومن ثم ضربه بـ $B\ sin\theta$. وكل هذه الآلية تقود إلى استبدال القيم بالعلاقة (9b).

(a) إيجاد العزم المغناطيسي لحلقة دائرية وعزم المزدوجة المؤثر عليها:

ولهذه الغاية، لنحسب أولاً سطح الحلقة الدائرية:

$$A = \pi r^2 = \pi(1,00\ m)^2 = 3,14\ m^2$$

ولنحسب العزم المغناطيسي للحلقة:

$$\mu = IAN = (2,00\ A)(3,14\ m^2)(1) = 6,28\ A.m^2$$

والآن نبدل قيم كل من العزم المغناطيسي، الحقل المغناطيسي، والزاوية θ في العلاقة (9b):

$$\tau = \mu B\ sin\ \theta = (6,28\ A.m^2)(0,500\ T)(\sin 30,0^o) = 1,57\ N.m$$

(a) إيجاد العزم المغناطيسي لملف مستطيل الشكل وعزم المزدوجة المؤثر عليه:

لنحسب سطح الحلقة المستطيلة:

$$A = L \times H = (2,00\ m)(3,00\ m) = 6,00\ m^2$$

ولنحسب العزم المغناطيسي للحلقة:

$$\mu = IAN = (2,00\ A)(6,00\ m^2)(3) = 36,0\ A.m^2$$

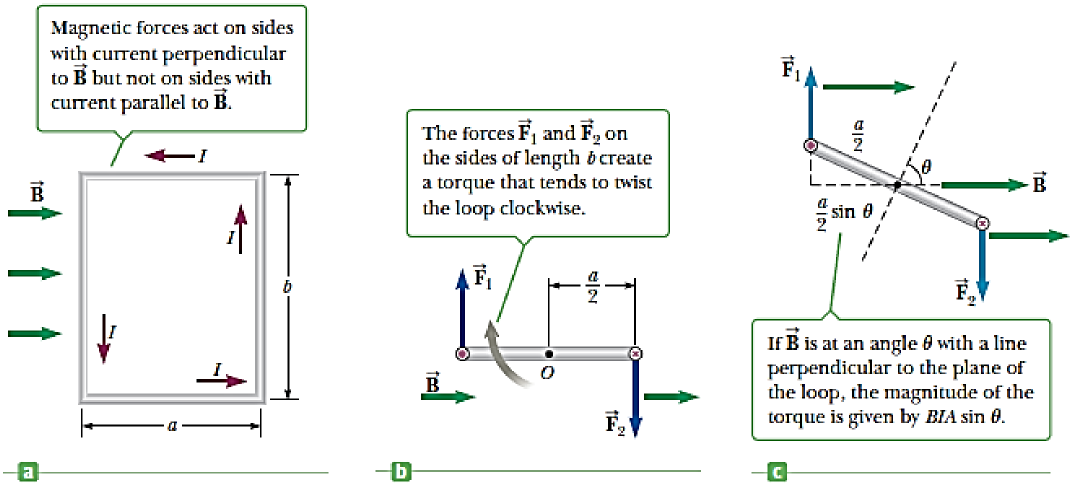
والآن نبدل قيم كل من العزم المغناطيسي، الحقل المغناطيسي، والزاوية θ في العلاقة (9b):

$$\tau = \mu B\ sin\ \theta = (36,0\ A.m^2)(0,500\ T)(\sin 30,0^o) = 9,00\ N.m$$

تطبيق: المحرك الكهربائي:

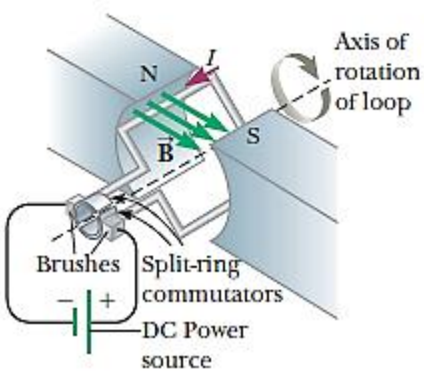
من الصعب، تخيل ونحن في القرن 21، أن نعيش دون المحركات الكهربائية. بعض التطبيقات التي تحتوي محركات نذكر على سبيل المثال: سواقات أقراص الحاسوب، الألعاب التي تعتمد على "الأقراص المدمجة – Disk Compacts" الـ CD، وأقراص الفيديوهات - DVD، نظام إقلاع السيارات، والمكيفات... إلخ.
إن المحركات تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية لطاقة حركية دورانية، وتتكون من حلقة صلبة يمر بها تيار وتدور عند وضعها في حقل مغناطيسي.

كما رأينا سابقاً، فعزم الدوران الناتج عن دوران حلقة من أجل القيم الصغيرة للزاوية θ فالعزم يصبح مساوياً الصفر، عندما يكون الحقل المغناطيسي عمودي على مستوى الحلقة و $\theta = 0^o$. إذا كانت الحلقة تدور مسبقاً فهذه الزاوية والتيار يبقيان في الاتجاه الموضح على الشكل المرفق. إن العزم يعكس الاتجاه وتدور الحلقة في الاتجاه المعاكس، أي بالاتجاه المعاكس لدوران عقارب الساعة.



(a) منظر علوي للحلقة المستطيلة الشكل في حقل مغناطيسي منتظم. (b) منظر جانبي للحلقة المستطيلة في الحالة (a). (c) منظر جانبي للحلقة في الحالة (a) مع الناظم على الحلقة من أجل زاوية قدرها θ مع الحقل المغناطيسي.

إن التغلب على هذه الصعوبة وأخذ الاحتياطات للدوران المستمر في اتجاه واحد، فإن التيار المار في الحلقة يجب أن يعكس الاتجاه بشكل دوري. إن المحركات التي تعمل على "التيار المتناوب – Alternating-Current (AC)" تقوم بالتغلب على تلك الصعوبة حيث تقوم بالعكس 120 مرة في الثانية الواحدة. في حالة المحركات التي تعمل على التيار المستمر (DC)، إن العمل يتم ميكانيكياً بواسطة التماسات لحلقة فصل (Split-Ring) أي (عاكس للتيار - Commutators) وفراشي، كما هو مبين في الشكل التالي.



مخطط مبسط لمحرك كهربائي يعمل على التيار المستمر DC.

7- حركة جسيم مشحون في حقل مغناطيسي:

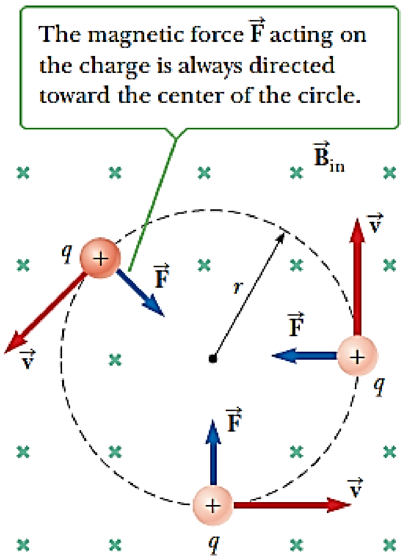
إذا كان لدينا جسيم مشحون يتحرك في حقل مغناطيسي منتظم وكانت سرعته البدائية عمودية على الحقل، فسيتحرك على طريق دائري (دائرة) في مستوي عمودي على الحقل المغناطيسي. إن نصف قطر الطريق الدائري r يمكن أن يُحسب انطلاقاً من القانون الثاني لنيوتن والتسارع المركزي الذي يساوي (v^2/r)، ويُعطى بالعلاقة، انظر الشكل المرافق:

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

ومنه نجد أن:

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (10)$$

حيث m كتلة الجسيم و q شحنته.

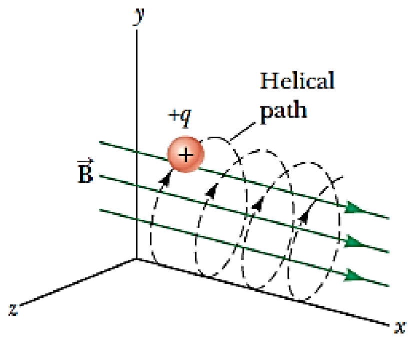


سرعة الجسيم $\vec{v}$ عمودية على حقل مغناطيسي منتظم. يتحرك الجسيم على دائرة في المستوي العمودي على الحقل $\vec{B}$، وموجه نحو داخل الصفحة. (إشارات الضرب أو الصلبان تمثل ذيل أو نهاية أشعة الحقل المغناطيسي).

إن شعاع القوة المغناطيسية $\vec{F}$ المؤثرة على الشحنة يتجه نحو مركز الدائرة.

والعلاقة الســابقة رقم (10) تعني أن نصــف قطر المســار يتناســب طرداً مع كمية حركة mv الجسيم وعكساً مع الشحنة والحقل المغناطيسي. يُطلق غالباً على المعادلة (10) اسم "**معادلة السيكلوترون – Cyclotron Equation**" وذلك لأنها تُســتخدم في تصــميم تلك الأجهزة التي بدورها تُســتخدم في فيزياء الجسيمات (لتسريع الجسيمات).

إذا لم يكن اتجاه شعاع السرعة البدائية للجسيم المشحون عمودي على الحقل المغناطيسي، كما هو مبين في الشكل المرفق، فإن الجسيم يتبع مسار حلزوني أو لولبي يُسمى بالـ **(هيليكس - Helix)** على طول خطوط الحقل المغناطيسي.



جسيم مشحون بشحنة موجبة شعاع سرعته موجه بحيث يصنع زاوية ما مع حقل مغناطيسي منتظم. إن مسار هذا الجسيم هو عبارة عن شكل حلزوني.

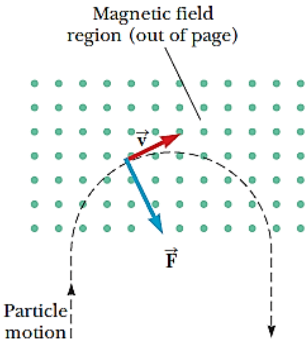
تطبيق فيزيائي: (اصطياد شحنات أو جسيمات مشحونة – Trapping Charges)

إن تخزين الجســيمات المشــحونة مهم من أجل العديد من التطبيقات. ولنفرض أنه لدينا حقل مغناطيســي خارجي في منطقة محدودة أو منتهية من الفضــاء. **الســؤال المطروح هو الآتي: هل يمكن قذف جسيم مشحون من خارج تلك المنطقة إلى داخلها وإبقائه داخلها بواسطة قوة مغناطيسية؟ الجواب هو نعم. ولكن كيف؟**

الشرح:

من الأفضل أن نعتبر بشكل منفصل مركبتي السرعة للجسم الزاوية والعمودية على خطوط الحقل المغناطيســي في تلك المنطقة. لا يوجد قوة مغناطيســية مرافقة لمركبة الســرعة الموازية لخطوط الحقل المغناطيسي، وهكذا فمركبة السرعة تبقى نفسها لا تتغير.

لنعتبر الآن مركبة السـرعة العمودية على خطوط الحقل. هذه المركبة سـتؤدي إلى قوة مغناطيسـية عمودية على كل من خطوط الحقل ومركبة السـرعة نفسـها. إن مسـار الجسـيم من تلك القوة يكون أيضـاً عمودي على السرعة التي هي عبارة عن سرعة دائرية. في هذا الوضع الجسيم يتبع مسار قوس دائري ويخرج الحقل من الجهة الأخرى للدائرة، كما هو مبين في الشــكل المرفق، وذلك من أجل جســيم طاقته الحركية ثابتة. من ناحية أخرى، يمكن اصـطياد الجسـيم (حصـره) إذا خسـر جزء من طاقته الحركية بالتصـادم بعد دخوله منطقة الحقل، وهكذا يدور الجسيم على دائرة أصغر ويبقى داخل الحقل، أو داخل منطقة الحقل.



تطبيق فيزيائي لاصطياد جسيم وحصره في منطقة حيث يوجد حقل مغناطيسي.

يمكن قذف الجسيمات واصطيادها إذا، إضافة للحقل المغناطيسي، هناك حقول كهربائية ساكنة (Electrostatic). تستخدم تلك الحقول في مكان احتجاز الجسيمات أو اصطيادها (**Penning Trap**). بواسطة هذه الأجهزة، من الممكن تخزين جسيمات مشحونة لفترات طويلة. مثل هذه المصايد مفيدة، على سبيل المثال، من تخزين مضاد المادة (**Anti-Matter**)، التي تتفكك بشكل كامل عند ملامستها للمادة العادية (**Ordinary Matter**).

سؤال سريع:

جسيم مشحون يتحرك بشكل حر على مسار دائري بوجود حقل مغناطيسي ثابت ومطبق بشكل عمودي على سرعة الجسيم، إن الطاقة الحركية للجسيم: (1) تبقى ثابتة، (2) تتزايد، أو (3) تتناقص.

الجواب هو الخيار رقم (1). إن القوة المغناطيسية التي تؤثر على الجسيم هي دوماً عمودية على سرعة الجسيم وبالتالي لا يخضع الجسيم لانتقال. تحت هذه الشروط، لا تقوم القوة بعمل على الجسيم، وبالتالي الطاقة الحركية للجسم تبقى ثابتة.

مثال (1): محلل الطيف الكتلي أو مقياس الكتلة أو مطياف الكتلة: التعرف وتحديد الجسيمات)

إن الهدف من هذا المثال هو استخدام معادلة السيكلوترون للتعرف على جسيم.

لنفرض جسيم مشحون يدخل مجال حقل مغناطيسي لمحلل الطيف الكتلي بسرعة قدرها $1{,}79 \times 10^6 m/s$. وفيما بعد يتحرك على مسار دائري نصف قطره يساوي $16{,}0\ cm$ في حقل مغناطيسي منتظم قيمته $0{,}350\ T$ عمودي على سرعة الجسيم. المطلوب إيجاد النسبة بين كتلة وشحنة الجسيم ومن ثم معرفة تلك الجسيم استناداً إلى الجدول المعطى:

النواة $Nucleus$	الكتلة $m\ (kg)$	الشحنة $q\ (C)$	النسبة $m/q\ (kg/C)$
Hydrogen - هيدروجين	$1,67 \times 10^{-27}$	$1,60 \times 10^{-19}$	$1,04 \times 10^{-8}$
Deuterium – ديتيريوم	$3,35 \times 10^{-27}$	$1,60 \times 10^{-19}$	$2,09 \times 10^{-8}$
Tritium – تريثيوم	$5,01 \times 10^{-27}$	$1,60 \times 10^{-19}$	$3,13 \times 10^{-8}$
Helium 3 – هيليوم 3	$5,01 \times 10^{-27}$	$3,20 \times 10^{-19}$	$1,57 \times 10^{-8}$

الحل:

لإيجاد النسبة بين الكتلة والشحنة نستخدم معادلة السيكلوترون، المعادلة (10)، فنكتب:

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

وبحل تلك المعادلة من أجل النسبة: الكتلة على الشحنة m/q، وبالتبديل بالقيم المعطاة نجد:

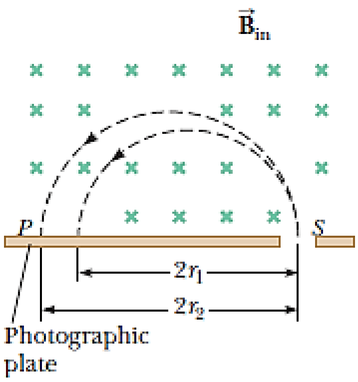
$$\frac{m}{q} = \frac{rB}{v} = \frac{(0{,}160\ m)(0{,}350\ T)}{1{,}79 \times 10^{6} m/s} = 3{,}13 \times 10^{-8} \frac{kg}{C}$$

وبمقارنة تلك مع القيم المعطاة في الجدول نتعرف على الجسيم وهو "نواة الترثيوم. ونشير هنا إلى أن كل الجسيمات المعطاة في الجدول هي جسيمات مؤينة بشكل كامل، أي أنه تم نزع جميع إلكتروناتها، أي هي عبارة عن نوى عارية، أي ليس هناك من إلكترونات تدور حول تلك النوى.

مثال (2): محلل الطيف الكتلي أو مقياس الكتلة: فصل النظائر عن بعضها)

إن الهدف من هذا المثال هو تطبيق معادلة السيكلوترون لفصل النظائر (النظائر هي نوى لها نفس عدد البروتونات لكن تختلف بعدد النترونات) عن بعضها (**Separating Isotopes**).

ذرتان مفردتان مؤيتان تخرجان من الفتحة S عن النقطة كما هو مبين في الشكل المرفق، وتدخلان في منطقة حيث يوجد حقل مغناطيسي قيمته $0{,}100\ T$ موجه خارج الصفحة. الذرتان لهما نفس السرعة وتساوي $1{,}00 \times 10^{6}\ m/s$. إن نواة الذرة الأولى تحتوي بروتون واحد حيث كتلته تساوي $1{,}67 \times 10^{-27}\ kg$، بينما نواة الذرة الثانية تحتوي بروتون ونترون وكتلتها تساوي $3{,}34 \times 10^{-27}\ kg$. إن الذرات التي لها نفس العدد من البروتونات في النواة لكن كتلها تختلف نُطلق عليها اسم "نظائر – **Isotopes**". إن النظيرين هما الهيدروجين والديتيريوم. المطلوب إيجاد المسافة الفاصلة بينهما عندما تصطدمان في لوح التصوير في النقطة P.



مقياس الكتلة أو مطياف الكتلة.
نظيران يخرجان من الشق عند النقطة S ويسلكان مساران دائريان مختلفان قبل الاصطدام بلوح التصوير في النقطة P.

الحل:

نطبق معادلة السيكلوترون على كل ذرة، ومن ثم نجد نصف قطر مسار كل منهما. إن ضعف نصف القطر يُمثل قطر المسار، وثم نجد الفرق بينهما.

نستخدم المعادلة (10) لإيجاد نصف قطر مسار كل من نظيري الهيدروجين والديتيريوم:

$$r_1(Hydrogen) = \frac{m_1 v}{qB} = \frac{(1{,}67 \times 10^{-27}\ kg)(1{,}00 \times 10^{6} m/s)}{(1{,}60 \times 10^{-19} C)(0{,}100\ T)}$$
$$= 0{,}104\ m$$

$$r_2(Deuterium) = \frac{m_2 v}{qB} = \frac{(3{,}34 \times 10^{-27}\ kg)(1{,}00 \times 10^{6} m/s)}{(1{,}60 \times 10^{-19} C)(0{,}100\ T)}$$
$$= 0{,}209\ m$$

وبضرب نصف القطر بـ 2 وطرحهما من بعضهما نجد المسافة الفاصلة بين النظيرين:

$$x = 2r_2 - 2r_1 = 0{,}210\ m$$

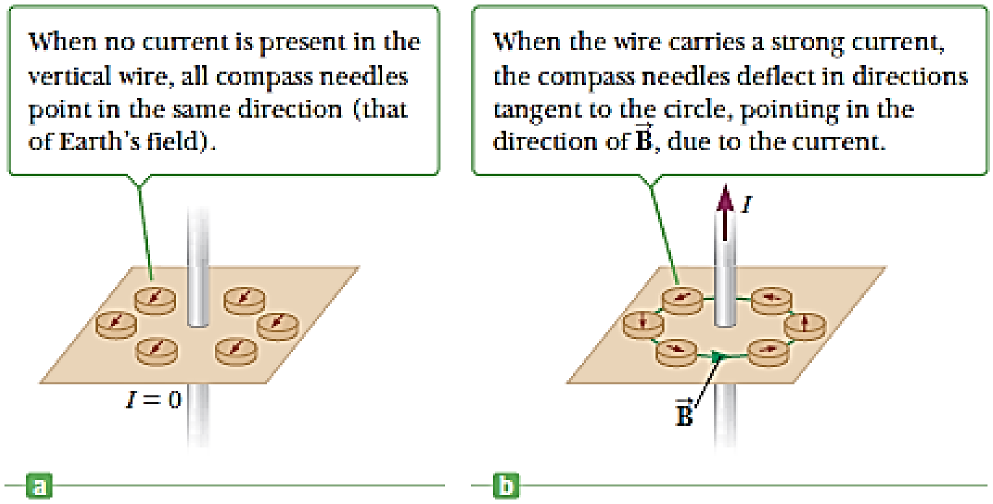
8- الحقل المغناطيسي على طول سلك مستقيم وقانون أمبير:

خلال البرهان الذي قام به الفيزيائي الدانماركي "**هانس أورستيد – Hans Oersted**" في عام 1819 الذي بين فيه أن التيار الكهربائي المار بسلك يؤدي إلى تحريك إبرة بوصلة موضوعة بالقرب منه. هذا الاكتشاف، وربط الحقل المغناطيسي بالتيار الكهربائي لأول مرة، كان بمثابة البداية لفهمنا لأصل المغناطيسية.

التجربة الأولى البسيطة التي قام بها أورستيد كانت في عام 1920 حيث برهن بشكل واضح وجلي أن الناقل الذي يمر به تيار يولد حقل مغناطيسي. في تلك التجربة قام بوضع عدة بواصل حيث إبرها موضوعة بشكل أفقي بالقرب من سلك عمودي، كما هو مبين في الشكل المرفق. يوضح الشكل ان تأثير تيار كهربائي في سلك على مجموعة من البوصلات. عندما يكون التيار معدوم في السلك فإن إبر البوصلات تأخذ جميعها نفس الاتجاه، وهو اتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي. بينما عند مرور التيار في السلك فإبر البوصلات تتأثر وتأخذ اتجاه المماس على الدائرة حول السلك، وهذا سببه التيار المار في السلك. إن هذه الملاحظات أو المراقبات تبين اتجاه الحقل المغناطيسي التي تشكل "**القاعدة الثانية لليد اليمنى**". وبهذا الشكل تم إدخال قاعدتان لليد اليمنى. ويجب أن نشير إلى أنه يجب على الشخص أن يستخدم فقط يده اليمنى عند تطبيق القاعدتين.

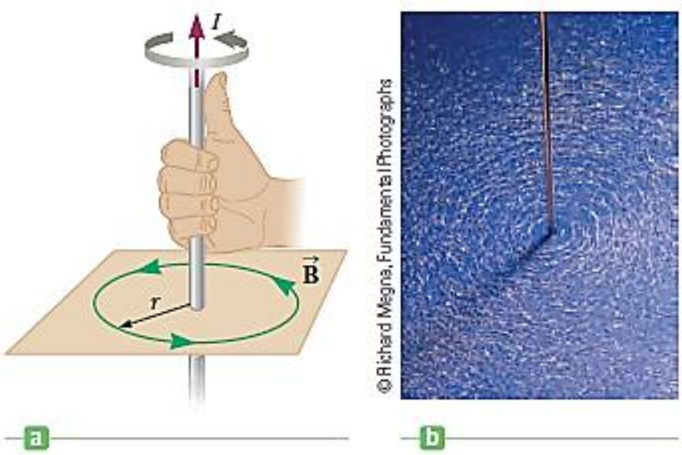
إذاً، يجب توجيه إبهام اليد اليمنى على طول السلك في الاتجاه الموجب للتيار، كما هو مبين في الشكل المرفق. فعند تدوير بقية الأصابع، فبشكل طبيعي ستدور باتجاه الحقل المغناطيسي $\vec{B}$.

وعندما نغير اتجاه التيار فإن اتجاه برادة الحديد يتغير أيضاً في الشكل المرفق.



الوضعان (a) و (b) من الشكل يوضحان تأثير تيار كهربائي في سلك على مجموعة من البوصلات. حيث في الحالة (a) عندما يكون التيار معدوم في السلك فإن إبر البوصلات تأخذ جميعها نفس الاتجاه، وهو اتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي. بينما في الحالة (b) حيث يمر تيار في السلك فإبر البوصلات تأخذ اتجاه المماس على الدائرة حول السلك، وهذا سببه التيار المار في السلك.

(a) في هذه الحالة نبين كيفية تطبيق قاعدة اليد اليمنى الثانية لتحديد اتجاه الحقل المغناطيسي المتولد عن سلك يمر به تيار. نشير إلى أن خطوط الحقل المغناطيسي تشكل دوائر حول السلك. (b) يبين الخطوط الدائرية للحقل المغناطيسي الناتج عن سلك يمر به تيار، بواسطة برادة من الحديد.



وبسبب أن برادة الحديد تتوجه وفق اتجاه الحقل $\vec{B}$، نستنتج أن خطوط الحقل $\vec{B}$ تشكل دوائر حول السلك. باختصار، فإن قيمة الحقل المغناطيسي $\vec{B}$ تأخذ نفس القيمة في أي نقطة من نقاط هذا المسار الدائري الذي مركزه السلك وهو يقع في مستوي عمودي على السلك. بتغيير التيار والمسافة أو البعد عن السلك، يمكننا تجريبياً تحديد الحقل $\vec{B}$ ونجد أنه يتناسب طرداً مع التيار وعكساً مع البعد عن السلك. هذه المراقبات تقود إلى العبارة أو العلاقة الرياضية التي تسمح بحساب **قيمة أو شدة الحقل المغناطيسي المتولد عن التيار المار على طول السلك المستقيم** وهي:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad (11)$$

أي إن الحقل المغناطيسي على بعد قدره r من السلك المستقيم يمر به تيار I يُعطى بالعلاقة السابقة: حيث أن ثابت التناسب:

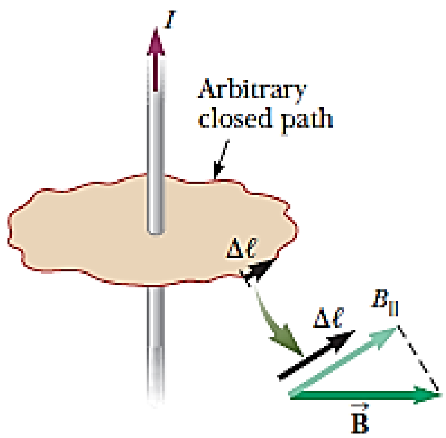
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m/A \qquad (12)$$

يُسمى بنفوذية الخلاء. إن خطوط الحقل المغناطيسي حول السلك المستقيم هي عبارة عن دوائر مركزها السلك (متحدة المركز أي لها مركز واحد).

يمكن استخدام **قانون أمبير** (Ampere's Law) لإيجاد الحقل المغناطيسي حول نواقل بسيطة يمر بها تيار. ويمكن أن يُكتب على النحو الآتي:

$$\sum B_{||}\, \Delta\ell = \mu_0 I \qquad (13)$$

حيث $B_{||}$ مركبة الحقل المماسية لعنصر صغير من التيار المار بطول $\Delta\ell$ و $\sum B_{||}\, \Delta\ell$ يعني أننا أخذنا المجموع على الجداء $B_{||}\Delta\ell$ حول المسار المغلق. وقانون أمبير هو قانون أساسي لوصف كيف أن التيارات الكهربائية تولد حقول مغناطيسية في محيط فضاء فارغ.



طريق أو مسار مغلق عشوائي حول تيار يمر بسلك مستقيم مُستخدم لحساب الحقل المغناطيسي لتيار بواسطة قانون أمبير.

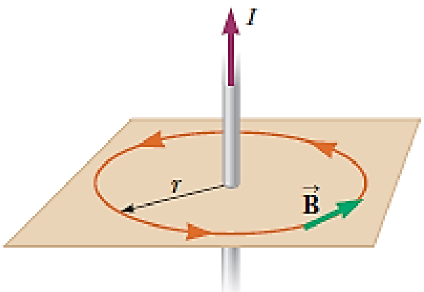
يمكننا استخدام قانون أمبير لاستنتاج الحقل المغناطيسي المتولد عن سلك مستقيم يمر به تيار I.

كما رأينا سابقاً، كل تشكيل لخطوط الحقل المغناطيسي يُشكل دائرة (دوائر) حيث يكون السلك مركزها (مراكزها). إن الحقل المغناطيسي يكون مماساً لتلك الدائرة في كل نقطة، وشدته أو قيمته لها نفس القيمة B على كامل محيط الدائرة التي نصف قطرها r، وهكذا يكون $B_{||} = B$، كما هو مبين في الشكل المرفق. بحساب المجموع $\sum B_{||}\,\Delta\ell$ على المسار الدائري، مع الإشارة إلى أن $B_{||}$ يمكن إخراجه خارج المجموع لأن له نفس القيمة B على كل عنصر من عناصر الدائرة، فالمعادة (13) تعطي:

$$\sum B_{||}\,\Delta\ell = B_{||}\sum \Delta\ell = B(2\pi r) = \mu_0 I$$

وبقسمة الطرفين على محيط الدائرة $2\pi r$، نحصل على:

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



مسار دائري مغلق نصف قطره حول سلك مستقيم يمر به تيار أُستخدم لحساب الحقل المغناطيسي المتولد عن السلك

والنتيجة السابقة مشابهة للعلاقة (11) حيث الحقل المغناطيسي متولد عن تيار يمر على طول سلك مستقيم.

إن قانون أمبير يسمح بطريقة أنيقة وبسيطة حساب الحقول المغناطيسية حيث هناك تشكيلات متناظرة للتيار، لكن لا يمكن استخدامه بسهولة لحساب الحقول المغناطيسية ذات التشكيلات المعقدة للتيار التي لا تملك تناظر. إضافة لذلك، فإن قانون أمبير الدائري هو قانون قابل للتطبيق فقط عندما تكون التيارات والحقول ثابتة لا تتغير مع الزمن.

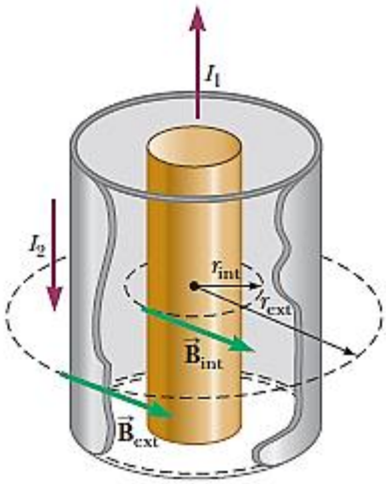
<u>**مثال: حساب الحقل المغناطيسي المتولد في كابل محوري:**</u>

إن الهدف من هذا المثال هو استخدام قانون أمبير لحساب الحقل المغناطيسي لتيار أسطواني متناظر.

نفرض أنه لدينا كابل محوري يتكون من سلك معزول يمر به تيار $I_1 = 3{,}00\ A$ مُحاط بناقل أسطواني الشكل يمر به تيار $I_2 = 1{,}00\ A$ بالاتجاه المعاكس، كما هو مبين في الشكل المرفق. المطلوب:

(a) حساب الحقل المغناطيسي داخل الناقل الأسطواني الذي نصف قطره الداخلي $r_{int} = 0{,}500\ cm$.

(b) حساب الحقل المغناطيسي خارج الناقل الأسطواني الذي نصف قطره الخارجي $r_{ext} = 1{,}50\ cm$.



حساب الحقل المغناطيسي المتولد في كابل محوري

الحل:

لنشكل مسار دائري حول السلك الداخلي، كما هو مبين في الشكل السابق. فقط التيار الداخلي الذي يمر عبر تلك الدائرة هو الذي يساهم في الحقل المغناطيسي B_{int} في النقطة على الدائرة. لحساب الحقل المغناطيسي الخارجي (خارج الأسطوانة) B_{ext}، لنشكل مسار دائري خارج الأسطوانة. الآن، كلا التياران يجب أن يؤخذان بالحسبان، لكن التيار الخارج من الصفحة يجب أن يُطرح من التيار المار في السلك.

(a) حساب الحقل B_{int} داخل الناقل الأسطواني عند $r_{int} = 0,500\ cm$:

نكتب قانون أمبير:

$$\sum B_{||}\,\Delta\ell = \mu_0 I$$

الحقل المغناطيسي ثابت على المسار الدائري وطول المسار يساوي $2\pi r_{int}$:

$$B_{int}(2\pi r_{int}) = \mu_0 I_1$$

بحل المعادلة واستبدال القيم نجد:

$$B_{int} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_{int}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ T.m/A)(3,00\ A)}{2\pi(0,005\ m)} = 1,20 \times 10^{-4}\ T$$

(b) حساب الحقل B_{ext} خارج الناقل الأسطواني عند $r_{ext} = 1,50\ cm$:

نكتب قانون أمبير:

$$\sum B_{||}\,\Delta\ell = \mu_0 I$$

الحقل المغناطيسي ثابت أيضاً على المسار الدائري، والحقل الكلي على طول المسار يساوي $2\pi r_{ext}$:

$$B_{ext}(2\pi r_{ext}) = \mu_0(I_1 - I_2)$$

بحل المعادلة واستبدال القيم نجد:

$$B_{ext} = \frac{\mu_0(I_1 - I_2)}{2\pi r_{ext}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\, T.m/A)(3{,}00\, A - 1{,}00\, A)}{2\pi(0{,}015\, m)}$$
$$= 2{,}67 \times 10^{-5}\, T$$

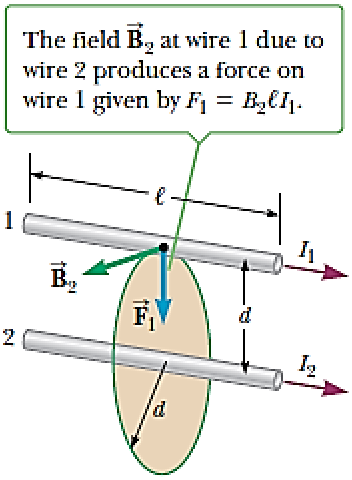
ملاحظة:

إن اتجاه كلا الحقلين داخل وخارج الأسطوانة يُعطى أو يُحدد بقاعدة اليد اليمنى، أو عكس عقارب الساعة كما هو مبين في الشكل السابق. يمكن أن تُستخدم الأكبال المحورية لتقليل آثار الحقل المغناطيسي الناتج عن التيار، بحيث أن التيارات داخل السلك والأسطوانة تكون متساوية في القيمة ومتعاكسة في الاتجاه.

9- القوة المغناطيسية بين ناقلين متوازيين:

كما رأينا سابقاً فالقوة المغناطيسية تؤثر على ناقل يمر به تيار عندما يكون هذا الناقل موضوع في حقل مغناطيسي خارجي. بسبب التيار المار بالناقل يتولد حقل مغناطيسي حول نفسه، فمن السهل فهم أن التيارين المارين في السلكين موضوعين بالقرب من بعضهما يؤثران على بعضهما بقوى مغناطيسية.

لنعتبر الآن سلكان مستقيمان طويلان ومتوازيان المسافة بينهما d، ويمر بهما تيارين I_1 و I_2 في نفس الاتجاه، كما هو مبين في الشكل المرفق. إن السلك الأول فوق السلك الثاني. ما هي القوة المغناطيسية على أحد السلكين التي سببها الحقل المغناطيسي المتولد عن السلك الآخر؟



سلكان متوازيان موجهان بشكل عمودي على المسافة الفاصلة بينهما. يمر بهما تيار ثابت ويؤثران بقوى خارجية على بعضهما البعض. القوة تجاذبية إذا كان التياران لهما نفس الاتجاه، كما هو مبين في الشكل المرفق، وتدافعية إذا كان التياران باتجاهين مختلفين.

في الحساب يجب إيجاد القوة المؤثرة على السلك رقم 1 والتي سببها الحقل المغناطيس الناتج أو المتولد عن السلك الثاني. إن التيار I_2 يولد حقل مغناطيسي $\vec{B}_2$ يؤثر على السلك رقم 1. إن اتجاه الحقل $\vec{B}_2$ هو عمودي على السلك، كما موضح في الشكل. باستخدام العلاقة (11) نجد قيمة الحقل المغناطيسي الذي يساوي:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

وبحسب العلاقة (5)، فقيمة القوة المغناطيسية المؤثرة على السلك رقم 1 بوجود الحقل $\vec{B}_2$ والذي سببه التيار I_2 تساوي:

$$F_1 = B_2 I_1 \ell = \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}\right) I_1 \ell = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi d}$$

ويمكن كتابة العلاقة السابقة بشكل القوة في واحدة الطول:

$$\boldsymbol{\frac{F_1}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}} \qquad \textbf{(14)}$$

إن اتجاه القوة $\vec{F}_1$ هو نحو الأسفل باتجاه السلك الثاني، وكما تشير إليه القاعدة الأولى لليد اليمنى. إن هذه الحسابات متناظرة، هذا يعني أن القوة $\vec{F}_2$ المؤثرة على السلك الثاني تساوي للقوة المعاكسة $\vec{F}_1$، كما هو متوقع من **قانون نيوتن الثالث "مبدأ الفعل ورد الفعل – Action-Reaction"**.

إذاً تم البرهان على أن ناقلين متوازيين يمر بهما تيارين لهما نفس الاتجاه يتجاذبان. وفي حالة أن التيارين لهما اتجاهين متعاكسين فإن السلكان سيتدافعان (يتنافران).

سؤال سريع (1):

إذا أردنا مضاعفة قيمة القوة المغناطيسية بواحدة الطول بين السلكين السابقين المتوازيين واللذين يمر بهما تيارين، فماذا يجب أن نعمل؟ هل: (1) نضاعف أحد التيارين؟ (2) نضاعف المسافة بينهما؟ (3) ننقص المسافة بينهما إلى النصف؟ (4) نضاعف التيارين؟

الشرح:

الخيار ان (1) و (3). إن قيمة القوة بواحدة الطول بين السلكين المار بهما تيارين تساوي $F/\ell = (\mu_0 I_1 I_2)/(2\pi d)$. يمكن مضاعفة تلك القوة بمضاعفة التيار في إحدى السلكين. ويمكن أيضاً مضاعفتها بإنقاص المسافة d بينهما إلى النصف. إذاً الخياران (1) و (2) صحيحان.

سؤال سريع (2):

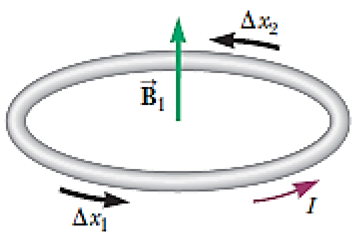
بحسب الشكل السابق، إذا كان $I_1 = 2\ A$، و $I_2 = 6\ A$ ، ما هو الجواب الصحيح؟ (1) $F_1 = 3\ F_2$ ، (2) $F_1 = F_2$، (3) $F_1 = F_2/3$.

الشرح:

الخيار (2). القوتان يمثلان زوج من القوى: الفعل ورد الفعل. إذاً يؤثران على السلكين المختلفين وهما قوتان متساويتان ولكن مختلفتان بالاتجاه.

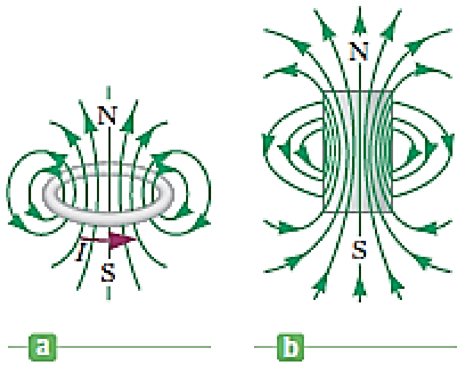
10- الحقول المغناطيسي الناتجة عن تيار حلقي (حلقة) والملفات اللولبية:

إن شدة الحقل المغناطيسي المتولد بواسطة قطعة من أسفل السلك يمر بها تيار يمكن أن تزداد بحسب الموضع الدقيق إذا كان السلك على شكل حلقة. يمكن فهم هذا إذا أخذنا بالحسبان تأثير القطع المتعددة الصغيرة للتيار الحلقي، كما مبين في الشكل المرفق. إن القطعة الصغيرة من الحلقة، التي نرمز لها بـ Δx_1، تولد حقل مغناطيسي شدته أو قيمته B_1 في مركز الحلقة، ويتجه نحو الأعلى. يمكن التحقق من اتجاه شعاع الحقل $\vec{B}$ باستخدام أو بتطبيق القاعدة الثانية لليد اليمنى على طول سلك مستقيم. لنتخيل أننا نمسك السلك باليد اليمنى، ونوجه الإبهام باتجاه التيار، فتدوير الأصابع يكون باتجاه الحقل $\vec{B}$.



كل القطع من الحلقة المار بها تيار تولد حقل مغناطيسي في مركز الحلقة، وموجه نحو الأعلى.

قطعة أخرى Δx_2 في أعلى الحلقة تساهم أيضاً في توليد الحقل في المركز، تزيد من شدته. الحقل المتولد في مركز الحلقة بالقطعة Δx_2 لها نفس قيمة الـ B_1، واتجاهه نحو الأعلى. بشكل مشابه، كل القطع الأخرى لقطع الحلقة التي يمر بها التيار تساهم في الحقل. إن التأثير الصافي هو الحقل المغناطيسي لتيار الحلقة المبين في الشكل المرفق الحالة (a).



(a) خطوط الحقل المغناطيسي لتيار حلقي (تيار يمر في حلقة). يجب أن نلاحظ أن خطوط الحقل تشبه تلك الناتجة عن مغناطيس. (b) خطوط الحقل المغناطيسي الناتجة عن مغناطيس مشابهة للخطوط الناتجة عن تيار حلقي.

نشير هنا إلى أنه في الحالة (a) من الشكل السابق خطوط الحقل المغناطيسي تدخل من أسفل الحلقة وتخرج من الأعلى. بمقارنة تلك الحالة (a) مع الحالة (b) في نفس الشكل حيث يبين الحقل المتولد عن قضيب مغناطيسي، نلاحظ أن الحقلين متشابهين. جهة من الحلقة تؤثر كما لو كانت تمثل القطب الشمالي لمغناطيس، والجهة الأخرى كما لو كانت تمثل القطب الجنوبي. إن التشابه لهذين الحقلين يُستخدم لشرح وتفسير المغناطيسية في المادة.

إن قيمة الحقل المغناطيسي في مركز حلقة دائرية يمر بها تيار I تُعطى بالعلاقة:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

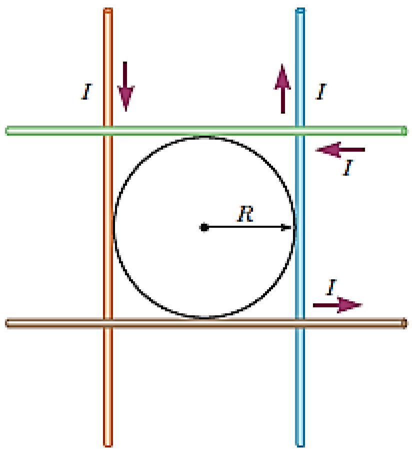
هذه المعادلة يمكن اشتقاقها أو استنتاجها بحسابات تفاضلية وتكاملية. ويمكن أن نبين، مع ذلك، بحساب منطقي للحقل في مركز الأسلاك الأربعة، حيث كل منهم يمر به تيار I ويشكلان مربع، كما هو مبين في الشكل المرفق، باعتبارهم دائرة نصف قطرها R. بشكل حدسي، فإن هذا الترتيب سيعطي الحقل في المركز والذي يشبه قيمة الحقل المتولد عن حلقة دائرية. إن التيار في السلك الدائري أقرب إلى المركز، وهكذا فسيكون للسلك حقل مغناطيسي إلى حد ما أكبر أو أكثر شدة من الحقل المتولد عن الأسلاك الأربعة التي تشك مربع أو مستطيل، ولكن أطوال الأسلاك الأربعة التي تشكل المربع أو المستطيل تعوض ذلك. إذاً، كل سلك يساهم بنفس الحقل المغناطيسي في المركز تماماً، وهكذا فالحقل الكلي يُعطى بالعلاقة:

$$B = 4 \times \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{\mu_0 I}{2R}\right) = 1{,}27\left(\frac{\mu_0 I}{2R}\right)$$

وهذه النتيجة التقريبية هي نفس الحقل المتولد عن حلقة دائرية يمر بها تيار والذي يساوي $B = \mu_0 I/2R$.

وعندما يكون لدينا ملف يحتوي N حلقة، وكل حلقة يمر بها تيار I ، فإن الحقل مغناطيسي المتولد في المركز يُعطى بالعلاقة:

$$\boldsymbol{B = N\frac{\mu_0 I}{2R}} \qquad (15)$$



الحقل المتولد عن حلقة دائرية يمر بها تيار (تيار حلقي) I يمكن تقريبه لحقل ناتج عن أربعة أسلاك مستقيمة، كل منها يمر بها تيار I.

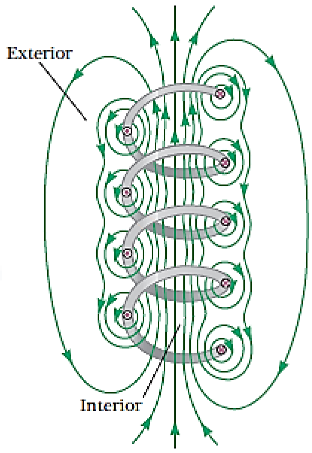
إن الحقل المغناطيسي في مركز ملف مؤلف من حلقة دائرية نصف قطرها ، كل حلقة يمر بها تيار يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\boldsymbol{B = N\frac{\mu_0 I}{2R}} \qquad (15)$$

الحقل المغناطيسي الناتج عن ملف لولبي:

إذا كان لدينا سلك مستقيم ملفوف داخل ملف أو وشيعة على شكل عدة حلقات قريبة من بعضها البعض، إن الأداة أو الجهاز الناتجة يُطلق عليها اسم **"ملف لولبي – Solenoid"**، وغالباً ما يُدعى بالمغناطيسي الكهربائي. هذه الأدارة مهمة في العديد من التطبيقات لأنها تعمل عمل مغناطيسي أو تؤثر كمغناطيسي فقط عندما يمر بها تيار. إن الحقل المغناطيسي داخل الملف اللولبي يزداد مع التيار ويتناسب مع عدد اللفات في واحدة الطول.

إن الشكل المرفق يبين خطوط الحقل المغناطيسي لملف (غير مضغوط) طوله ℓ وعدد لفاته N. نشير إلى أن خطوط الحقل داخل الملف هي تقريباً متوازية، متباعدة بشكل منتظم، وقريبة من بعضها. وكنتيجة لذلك، فالحقل داخل الملف يكون قوي وتقريباً منتظم. الحقل خارج الملف غير منتظم، وأضعف بكثير من الحقل داخله، وهو **معاكس بالاتجاه** للحقل في داخل الملف.

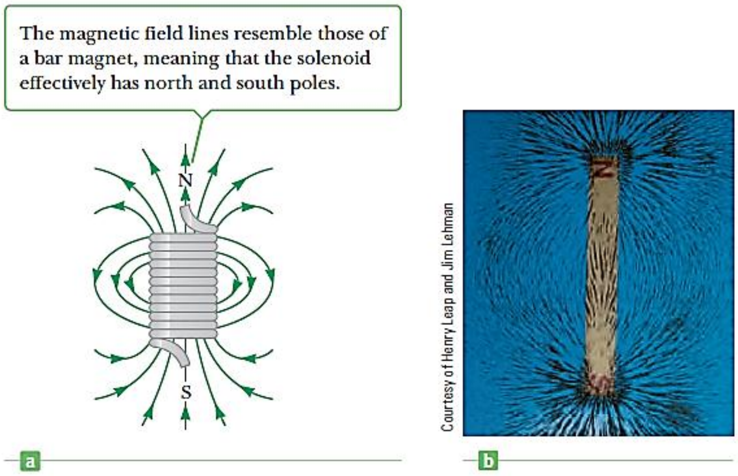


خطوط الحقل لملف غير مضغوط.

إذا كانت مسافات التباعد بين اللفات صغيرة ومنتظمة (قريبة من بعضها البعض)، فخطوط الحقل موضحة في الشكل المرفق، حيث تدخل من نهاية الملف وتخرج من النهاية الأخرى. نهاية الملف تعمل عمل قطب شمالي والنهاية الأخرى كقطب جنوبي. إذا كان طول الملف أكبر بكثير من نصف قطره، فإن خطوط الحقل التي تترك النهاية الشمالية للملف الذي يمتد خارج المنطقة العريضة قبل العودة ثانية ليدخل في النهاية الجنوبية. إن التباعد العريض أو العريض لخطوط الحقل يُعطي حقل ضعيف. وهذا ما يلاحظ أن الحقل داخل الملف أكبر بكثير من الحقل خارجه، حيث الخطوط تكون قريبة من بعضها بعضاً. أيضاً إن الحقل داخل الملف له قيمة ثابتة في كل النقاط البعيدة عن نهايته. إن كل هذه الاعتبارات تسمح بتطبيق نظرية أو قانون أمبير على الملف ويتم الحصول على العلاقة:

$$\boldsymbol{B = \mu_0 n I} \qquad \textbf{(16)}$$

وذلك من أجل حقل داخل الملف، حيث $n = N/\ell$ عدد اللفات بواحدة الطول للملف.



(a) خطوط الحقل المغناطيسي من أجل ملف حلزوني مغلق وطوله محدود. الحقل داخل الملف تقريباً منتظم وقوي. (b) إن سلوك الحقل المتولد عن مغناطيس موضح عن طريق استخدام برادة من الحديد موضوعة على ورقة.

مثال: (حساب الحقل المغناطيسي داخل ملف):

بفرض أنه لدينا ملف مؤلف من 100 لفة (100 turns) من سلك طوله (10,0 cm). المطلوب: (1) إيجاد قيمة الحقل المغناطيسي داخل الملف عندما يمر به تيار (0,500 A). (2) ما هو عزم بروتون يدور داخل الملف على دائرة نصف قطرها (0,020 m)؟ (3) بشكل تقريبي ما هو طول السلك الذي نحتاج له لتشكيل الملف بفرض أن نصف قطر الملف يساوي (5,00 cm)؟

الحل:

في الجزء الأول لحساب عدد اللفات بمتر واحد ومن ثم نستبدل تلك القيمة والمعطيات في المعادلة (16)، وهكذا نحصل على قيمة الحقل المغناطيسي. ومن أجل الجزء (2) نطبق قانون نيوتن الثاني.

(1) حساب قيمة الحقل المغناطيسي داخل الملف:

نحسب عدد اللفات بواحدة الطول من العلاقة:

$$n = \frac{N}{\ell} = \frac{100\ turns}{0,100\ m} = 1,00 \times 10^3\ \frac{turns}{m}$$

بتبديل قيمة n و I في المعادلة (16) نجد قيمة الحقل المغناطيسي:

$$B = \mu_0 n I = (4\pi \times 10^{-7}\ T)(1,00 \times 10^3\ turns/m)(0,500\ A)$$
$$= 6,28 \times 10^{-4}\ T$$

(2) حساب كمية حركة البروتون يدور حول دائرة نصف قطرها (0,020 m) بالقرب من مركز الملف:

نكتب قانون الثاني لنيوتن من أجل بروتون على النحو الآتي:

$$F = ma = qvB$$

وبالتبديل بالعلاقة التي تعطي تسارع الطرد المركزي $a = v^2/r$ نجد أن:

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

وبالتبسيط نجد كمية الحركة للبروتون:

$$mv = rqB = (0,20\ m)(1,6 \times 10^{-19} C)(6,28 \times 10^{-4} T)$$

أي أن:

$$p = mv = 2,01 \times 10^{-24}\ kg.m/s$$

(3) الحساب التقريبي لطول السلك – Length of wire:

بضرب عدد اللفات بمحيط لفة واحدة نجد:

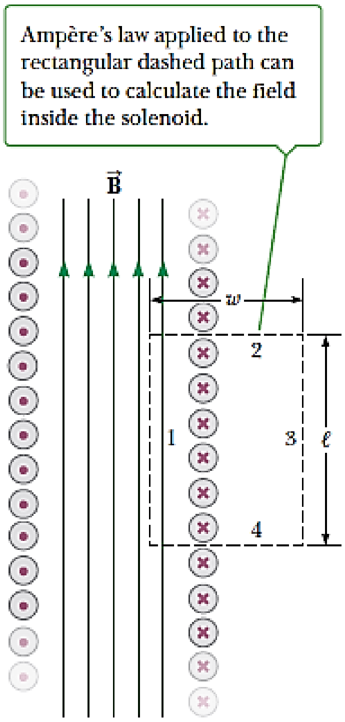
$$Length\ wire = (number\ of\ turns)(2\pi r)$$
$$= (1,00 \times 10^2 turns)(2\pi \times 0,0500\ m) = 31,4\ m$$

تطبيق قانون أمبير على ملف:

يمكن استخدام قانون أمبير للحصول على العلاقة التي تسمح بحساب الحقل المغناطيسي داخل الملف الذي يمر به تيار I. نأخذ مقطع عرضي على طول الملف كما هو مبين الشكل المرفق. إن الحقل $\vec{B}$ داخل الملف هو منتظم ومازي للمحور، والحقل $\vec{B}$ خارج الملف تقريباً يساوي الصفر. لنعتبر ماسر على شكل مستطيل طوله L وعرضه ω، كما موضح في الشكل. يمكن تطبيق قانون أمبير على هذا المسار وذلك بتقدير المجموع $B_{||}\Delta\ell$ على كل جهة (ضلع) من جهات (أضلاع) المستطيل. إن مساهمة الطول رقم 3 في الحقل هو صفر بسبب أن $\vec{B} = 0$ في هذه المنطقة. إن مساهمة كل من الطولين 2 و4 كلاهما يساوي الصفر بسبب أن الحقل $\vec{B}$ عمودي على $\Delta\ell$ على طول هذه المسارات. الطرف أو الجنب رقم 1 الذي طوله L يعطي أو يساهم بالمقدار BL في المجموع بسبب أن الحقل $\vec{B}$ منتظم على طول هذا المسار وموازي لـ $\Delta\ell$.

ومنه، فإن المجموع على المسار المستطيل الشكل والمغلق يساوي:

$$\sum B_{||}\Delta\ell = BL$$



منظر لمقطع عرضي لملف محكم التصنيع. إذا كان طول الملف أكبر بالنسبة لنصف قطره، نعتبر أن الحقل المغناطيسي داخل الملف منتظم وخارجه يساوي الصفر، أي معدوم.

إن الطرف الأيمن من قانون أمبير يقتضي أن التيار الكلي الذي يمر عبر السطح مقيد أو مرتبط بالطريق المختار. في هذه الحالة، التيار الكلي عبر المستطيل يساوي التيار عبر كل لفة من الملف، مضروباً بعدد اللفات. إذا كان N عدد اللفات في الطول L، فالتيار الكلي عبر المستطيل يساوي NI. إن تطبيق قانون أمبير على هذا الطريق يُعطي:

$$\sum B_{||}\Delta\ell = BL = \mu_0 NI$$

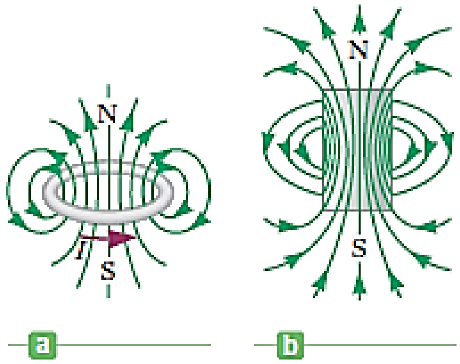
أو:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 nI$$

حيث $n = N/L$ عدد اللفات في واحدة الطول.

11- المجالات المغناطيسية:

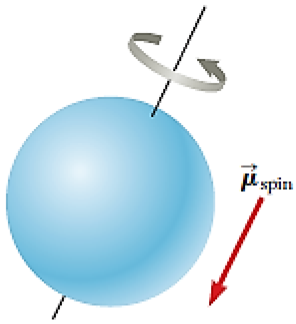
إن الحقل المغناطيسي المتولد أو الناتج عن ملف سلكي يمر به تيار يعطينا أو يشير لنا إلى أنه يجب أن يكون هناك بعض المواد تُظهر خواص مغناطيسية قوية. حلقة وحيدة كما هو مبين في الشكل المرفق لها قطب شمالي وقطب جنوبي، لكن هذا صحيح من أجل لفة مصنوعة من سلك، وهذا يجب أن يكون صحيحاً أيضاً من أجل أي تيار محصور في طريق أو مسلك دائري.



(a) خطوط الحقل المغناطيسي لتيار حلقي (تيار يمر في حلقة). يجب أن نلاحظ أن خطوط الحقل تشبه تلك الناتجة عن مغناطيس. (b) خطوط الحقل المغناطيسي الناتجة عن مغناطيس مشابهة للخطوط الناتجة عن تيار حلقي.

بشكل خاص، ذرة وحيدة يجب أن تعمل كعمل مغناطيس بسبب حركة الإلكترونات حول النواة. كل إلكترون، يحمل شحنة قدرها $1{,}6 \times 10^{-19}\ C$، يدور حول النواة في الذرة بزمن يُقدر بـ $10^{-16} s$. إذا قسمنا الشحنة الكهربائية على زمن الدوران، نلاحظ أن دوران الإلكترون حول النواة يكافئ تيار قدره $1{,}6 \times 10^{-3} A$. تيار مثل هذا التيار يولد حقل مغناطيسي من مرتبة الـ $20\ T$ في المسار الدائري. من هذا نرى أن يجب أن يكون هناك حقل مغناطيسي قوي جداً ينتج إذا كان هناك عدة من هذه المغانط الذرية يمكن أن تصطف، أي يكون لها نفس الاتجاه داخل المادة. وهذا لا يحدث، مع ذلك، بسبب أن النموذج الذي نقوم بوصفه غير كامل. ومن خلال التحليل للتركيب الذري يتبين أن الحقل المغناطيسي المتولد بإلكترون واحد في الذرة يعاكسه في أغلب الأحيان حقل آخر متولد عن إلكترون في نفس الذرة. **والنتيجة النهائية تكون أن الحقل المغناطيسي المتولد عن الإلكترونات التي تدور حول النواة يكون مع ذلك معدم أو صغير جداً من أجل معظم المواد.**

إن معظم الخواص المغناطيسية للعديد من المواد يمكن أن تُشرح ليس فقط بدوران الإلكترون حول النواة، لكن أيضاً بحركة الإلكترون حول نفسه كالدوامة، والذي نُطلق عليه اسم **"اللف الذاتي أو السبين – Spin"**، كما مبين في الشكل المرفق.

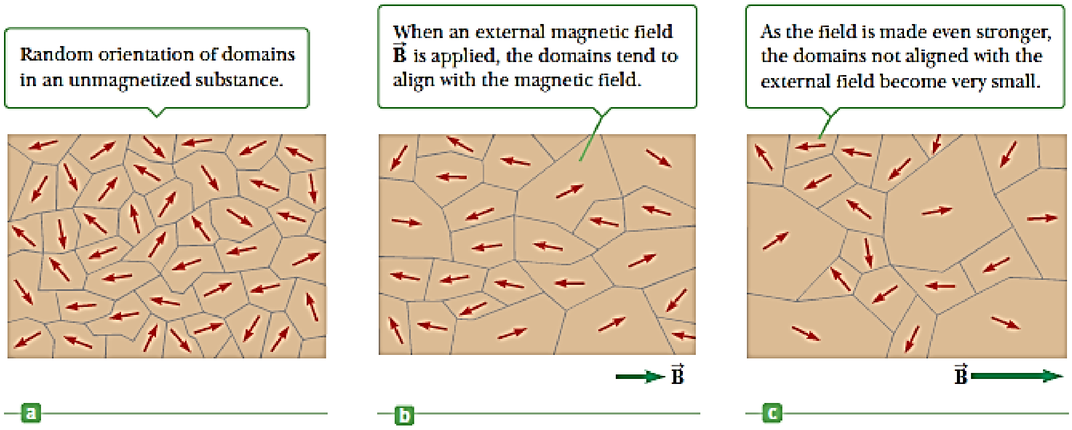


نموذج كلاسيكي لدوران الإلكترون حول نفسه أو ذاته – أي مفهوم السبين.

إن مفهوم السبين أو خاصية السبين التي يتمتع بها الإلكترون لا يمكن أن تُفهم ضمن نطاق الميكانيك الكلاسيكي، وإنما ضمن نطاق **"الميكانيك الكوانتي أو الفيزياء الكوانتية"**، والتي لم نتحدث عنها هنا. الحركة السبينية للإلكترون تُمثل بشحنة تتحرك وتولد حقل مغناطيسي. إن الحقل المغناطيسي الناتج

عن الحركة السبينية (حركة الإلكترون حول نفسه) بشكل عام أكبر بكثير من الحقل المغناطيسي الناتج عن حركة الإلكترون المدارية (حركة الإلكترون حول مداره، أي حول النواة).

وكما نعلم فالذرات تحتوي العديد من الإلكترونات، وعادة الإلكترونات تتجمع بشكل ثنائي (مثنى مثنى) بحيث أن سبيناتها متعاكسة، بحيث أن الحقول المغناطيسية المتولدة تفني بضعها بعضاً. ولهذا السبب فإن معظم المواد لا تشكل مغناط. في بعض المواد ذات المغناطيسية القوية، مثل الحديد، الكوبالت، والنيكل، مع ذلك، الحقول المغناطيسية المتولدة عن الحركة السبينية للإلكترونات لم تنعدم بشكل كامل. مثل تلك المواد تُدعى بالمواد **"الفيرومغناطيسية – Ferromagnetic"**. في تلك المواد الفيرومغناطيسية فالذرات ترتبط ببعضها ارتباطاً قوياً بحيث تشكل مجموعات كبيرة من الذرات سبيناتها تصطف باتجاه واحد. يُطلق عليها **"مجالات – Domains"**، ومقادير أو مقاييس هذه المجموعات بشكل نموذجي هي من مرتبة الـ $10^{-4} cm$ إلى $0,1\ cm$. في المواد اللامغناطيسية المجالات تكون موجه بشكل عشوائي، كما موضح في الشكل المرفق.



توجيه ثنائيات الأقطاب المغناطيسية قبل وبعد تطبيق حقل مغناطيسي على المادة الفيرومغناطيسية.

عندما يكون الحقل المغناطيسي الخارجي المطبق، الحالة (b) والحالة (c)، من الشكل السابق، فإن الحقل المغناطيسي المتولد لكل مجال يتجه ليصبح قريبا من الاصطفاف مع الحقل الخارجي (أي تقريباً لها نفس الاتجاه)، وهذا ناتج عن التمغنط.

في المواد التي يُطلق عليها اسم المواد المغناطيسية الثقيلة، المجالات تبقى مصطفة حتى ولو بعد إبعاد الحقل؛ وهذه النتيجة هي ما نُطلق عليها اسم **"المغناطيس المستمر – Permanent magnet"**، أو المغناطيسية المستمرة. في المواد المغناطيسية اللينة (الطرية)، مثل الحديد، عند إبعاد الحقل المغناطيسي الخارجي، فإن الحركة الحرارية تولد حركة للمجالات والمادة تعود بسرعة لحالة عدم التمغنط.

إن اصطفاف المجالات يشرح لماذا شدة المغناطيسي الكهربائية تزداد بشكل كبير بإدخال قلب حديدي (من الحديد) في مركز المغناطيس.

إن الحقل المغناطيسي المتولد عن تيار حلقات يؤدي إلى اصطفاف المجالات (السبينات)، وهذا يولد حقل خارجي كبير بشكل واضح. إن استخدام الحديد كقلب (كنواة) هو ميزة لأن هذا عبارة عن مادة مغناطيسية لينية التي تفقد مغناطيسيتها تقريباً بشكل لحظي بعد انقطاع التيار في الملفات.

إن تشكيل المجالات في المواد الفيرومغناطيسية (الحديدية) تشرح أيضاً لماذا مثل تلك المواد تجذب المغانط المستمرة أو الدائمة. الحقل المغناطيسي لمغناطيسي مستمر (دائم) يحقق المجالات في الأجسام الفيرومغناطيسية، وهكذا الجسم يصبح ممغنط بشكل مؤقت. إن الأجسام التي لها أقطاب فهي تجذب الأقطاب المعاكسة للمغناطيسي الدائم. الجسم يمكنه جذب أجسام فيرومغناطيسية أخرى، كما هو موضح في الشكل المرفق.

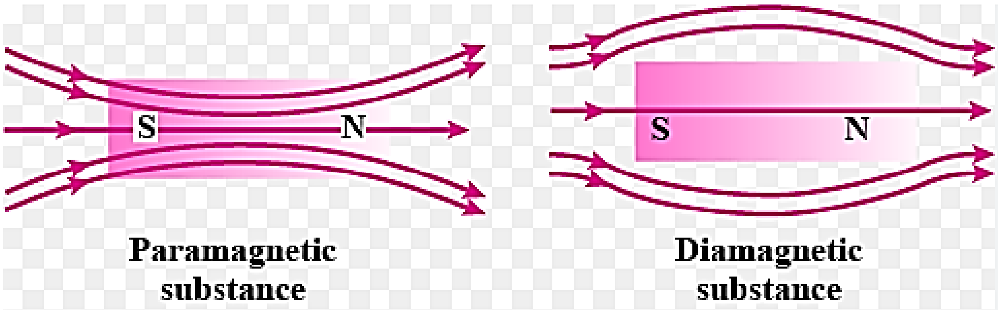
مغناطيس دائم (باللون الأحمر) يُمغنط بشكل مؤقت بعض مشابك الأوراق، والتي بعد أن تتماسك كل مشبك يؤثر على الآخر بقوى مغناطيسية.

12- تصنيف المواد المغناطيسية:

يُمكن أن تصنف "**المواد المغناطيسية – Magnetic materials**" بحسب ردة فعلها للحقل المغناطيسي الخارجي، أو مدى تأثير الحقل المغناطيسي الخارجي عليها. في "المواد **الحديدية** أو **الفيرومغناطيسية – Ferromagnetic materials**" الذرات تمتلك عزوم مغناطيسية دائمة (مستمرة) وتصطف بسهولة مع الحقل المغناطيسي الخارجي المطبق. من الأمثلة على المواد **الفيرومغناطيسية** الحديد، الكوبالت، والنيكل. مثل تلك المواد يمكن أن تحتفظ ببعض مغناطيسيتها حتى بعد إبعاد الحقل المغناطيسي المطبق.

بتعبير آخر، المواد التي تتمغنط بفعل حقل مغناطيسي تسمى "**المواد المغناطيسية – Magnetic materials**". وإن بعض المواد تقوي الحقل المغناطيسي الخارجي التي تتمغنط به وبعضها تضعفه. ولندرس أولاً المواد التي تملك جزيئاتها أو ذراتها حقلاً مغناطيسياً ذاتياً تحدثه الحركة المدارية (الفلكية) للإلكترونات حول النوى، وهذا الحقل المغناطيسي مشابه لحقل التيار الدائري (حقل ناتج عن حلقة يمر بها تيار. لذا يمكن تصور مثل هذه الجزيئات (الذرات) في صورة مواد مغناطيسية صغيرة جداً بقطبين شمالي وجنوبي.

إذا وقعت مثل هذه المادة في حقل مغناطيسي خارجي، تؤثر عندئذ على جزيئاتها (ذراتها) عزوم دورانية تحدث ترتيباً منتظماً للجزيئات على طول خطوط الحقل المغناطيسي. علماً بأن خطوط الحقل تدخل الجزيء من جهة القطب الجنوبي وتخرج منه من جهة القطب الشمالي. وبالتالي تحدث تقوية الحقل المغناطيسي داخل المادة. وتتمغنط الأجسام المصنوعة من مثل هذه المواد بالحقل المغناطيسي كما هو مبين في الشكل المرفق. وعند تركيب الحقل الذي تحدثه المادة على الحقل الخارجي تنتج محصلة الحقل الخارجي المبين في الشكل، حيث تشاهد خطوط الحقل كما لو كانت مسحوبة إلى داخل الجسم. ويستقر القضيب المصنوع من مثل هذه المادة في الحقل الخارجي بموازاة خطوط الحقل.



(a) (b)

شكل يوضح الفرق بين المواد البارامغناطيسية (Paramagnetic) والديامغناطيسية (Diamagnetic).

يتضح من الشكل السابق أنه يجب أن ينسحب القضيب إلى داخل الحقل المغناطيسي الخارجي وذلك لأن الأقطاب المغناطيسية المختلفة (من نوعين مختلفين) تتجاذب.

وبما أن الحركة الحرارية لجزيئات مادة الجسم تخل بترتيبها المنتظم، لذا تضعف المغنطة عند ارتفاع درجة الحرارة. فإذا أبعد هذا الجسم عن الحقل الخارجي، تؤدي عندئذ الحركة العشوائية للجزيئات إلى إزالة مغناطيسيته إزالة تامة.

"المواد ذات المغناطيسية المسايرة أو البارامغناطيسية – **Paramagnetic materials**" هي أيضاً لها عزوم مغناطيسية تصطف مع الحقل المغناطيسي الخارجي، لكن استجابتها ضعيفة جداً مقارنة بالمواد الحديدية. أمثل على تلك المواد الألمنيوم، الكالسيوم، والبلاتينيوم. إن المواد الحديدة يمكن أن تصبح مواد بارامغناطيسية عندما تسخن، وتصل درجة حرارتها إلى درجة حرجة، حيث تُدعى تلك الدرجة بـــــ **"درجة حرارة كوري – Curie temperature"**، والتي تتعلق بالمادة.

وهكذا فإنه يمكن تفسير الخواص البارامغناطيسية للمواد بالحركة المدارية (الفلكية) للإلكترونات حول نوى الذرات التي تكون حقلاً مغناطيسياً ذاتياً للجزيئات. ونلاحظ أن المواد البارامغناطيسية تتمغنط تمغنطاً ضعيفاً جداً.

تسلك المواد التي تملك جزيئاتها حقلاً مغناطيسياً ذاتياً سلوكاً مختلفاً في الحقل المغناطيسي الخارجي. فيتمغنط الجسم المصنوع من مثل هذه المادة بحيث يكون الحقل المغناطيسي الذاتي داخل

الجسم في اتجاه معاكس لاتجاه الحقل المغناطيسي الخارجي، وبالتالي يكون الحقل داخل المادة أضعف من خارجها بدرجة ما: تكون خطوط الحقل كما لو أنها أبعدت خارج الجسم، كما هو موضح في الشكل السابق.

في المواد ذات المغناطيسية **المعاكسة** أو **الديامغناطيسية – Diamagnetic materials**"، الحقل المغناطيسي الخارجي المطبق يؤدي إلى تمغنط ضعيف معاكس للحقل المطبق. عادة المغناطيسية المعاكسة أو الديامغناطيسية لا تصادف أو لا تلاحظ بسبب أن تأثيرات المغناطيسية الحديدة والبارامغناطيسية تكون أكبر.

📖 📖 📖
📖 📖
📖