

الباب الثاني

المجال المغناطيسي

شدة المجال المغناطيسي *Magnetic Field Intensity*:

تعرف المنطقة المحيطة بمغناطيس دائم أو موصل يمر به تيار بمنطقة مجال مغناطيسي Magnetic field والمقصود بكلمة مجال field هو تأثير فيزيائي يأخذ قيم مختلفة في الفراغ. وتاريخياً هناك خلط بين كميتين فيزيائيتين هما B ، H فالبعض يعتبر أن المتجه الأساسي في التأثيرات المغناطيسية هو متجه الحث المغناطيسي Magnetic induction vector ويرمز له بالرمز B والبعض الآخر يعتبر المتجه الأساسي هو متجه شدة المجال المغناطيسي H . والفرق بينهما أن H تمثل شدة المجال المغناطيسي في الفراغ، أما B فتمثل شدة المجال المغناطيسي داخل مادة معامل النفاذية المغناطيسية لها μ . والعلاقة بين H ، B هي:

$$B = \mu H$$

وتكون شدة المجال المغناطيسي H مساوية للحث المغناطيسي B في حالة الفراغ أو الهواء.

يمكن تمثيل المجال المغناطيسي بخطوط القوى المغناطيسية بحيث يكون كثافة الخطوط لكل وحدة مساحات من عنصر مساحة عمودي على اتجاه خطوط القوى هو مقدار المجال المغناطيسي. ويكون اتجاه المماس لخط القوى عند أي نقطة عليه يعطي اتجاه المجال المغناطيسي B أو H عند تلك النقطة.

شدة المجال المغناطيسي تساوي عددياً القوة المؤثرة على وحدة الأقطاب الشمالية الموجودة عند تلك النقطة. كما يمكن تعريفها بأنها عدد خطوط التأثير المغناطيسي العمودية على وحدة المساحات.

ويسمى العدد الكلي لخطوط التأثير المغناطيسي التي تخترق عمودياً سطحاً ما S بالفيض المغناطيسي ϕ .

$$\phi = B \cdot S$$

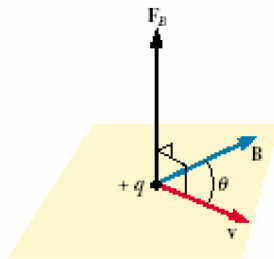
والجدول التالي يوضح العلاقة بين الوحدات المستخدمة لقياس ϕ ، H ، B .

الكمية	الوحدات العملية M.K.S	الوحدات العلمية c.g.s
الحث المغناطيسي B	1 وبر/متر ² (تسلا)	10^4 جاوس
شدة المجال المغناطيسي H	1 أمبير/متر	$4\pi \times 10^{-3}$ أورستيد
الفيض المغناطيسي ϕ	1 وبر	10^8 ماكسويل
معامل النفاذية المغناطيسية للفراغ μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ تسلا.متر/أمبير (وبر/أمبير.متر) (نيوتن/أمبير ²)	1 جاوس/أورستيد

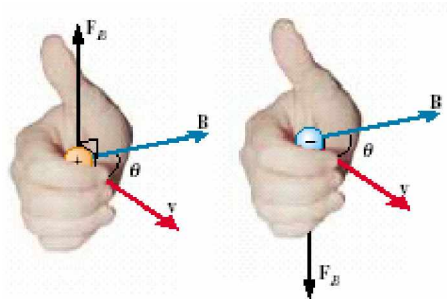
تأثير المجال المغناطيسي على الشحنات الكهربائية

: Magnetic Force on an Electric Charge

إذا كانت الشحنة الكهربائية ساكنة أو متحركة في اتجاه أو عكس اتجاه المجال المغناطيسي فإنها لن تتأثر بالمجال المغناطيسي. أما إذا كانت الشحنة متحركة بحيث يصنع اتجاه حركتها زاوية $0 < \theta < 180^\circ$ مع اتجاه المجال المغناطيسي فإن المجال يؤثر عليها بقوة F يكون اتجاهها عموديا على كل من المجال المغناطيسي واتجاه حركة الشحنة كما بالشكل (1-2)، أما مقدار القوة فهو يتناسب طرديا مع مقدار الشحنة q وسرعتها v وشدة المجال المغناطيسي B وجيب الزاوية θ أي أن:



شكل (1-2)

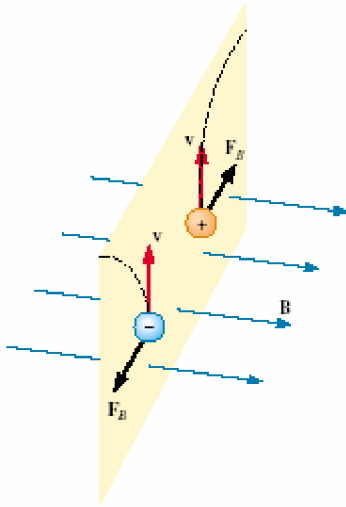


شكل (2-2)

$$F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = q v B \sin \theta$$

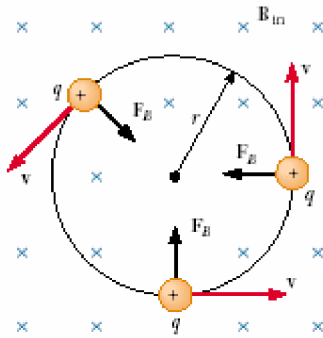
حيث \times علامة الضرب الاتجاهي ويتم تحديد اتجاه القوة طبقاً لقاعدة بريمة اليد اليمنى كما بالشكل (2-2).

وتكون القوة أكبر ما يمكن عندما تكون $\theta = 90^\circ$ أي عندما يكون المجال عموديا علي اتجاه السرعة كما بالشكل (2-3).



شكل (2-3)

والقوة المغناطيسية موجهة وليست معجلة، لأن القوة المغناطيسية دائما عموديه علي اتجاه الحركة فإنها غير قادرة علي بذل شغل - (يعرف الشغل بأنه حاصل ضرب مركبة القوة في اتجاه الإزاحة مضروباً في الإزاحة نفسها) - ولا تستطيع إكسابها أي قدر من الطاقة، ولكن القوة المغناطيسية تستطيع تغيير اتجاه الشحنة المتحركة وتوجيهها. أي أن المجال المغناطيسي B يؤثر علي الشحنة q المتحركة بسرعة v بقوة F تغير اتجاه v ولكن لا تغير مقدارها. إذا كان اتجاه الحركة عموديا علي المجال يكون مسار الشحنة مساراً دائرياً بسرعة ثابتة حيث تكون القوة المغناطيسية التي تتجه نحو مركز المدار تساوي قوة الطرد المركزي للخارج، حيث:



شكل (2-4)

$$q v B = \frac{m v^2}{r}$$

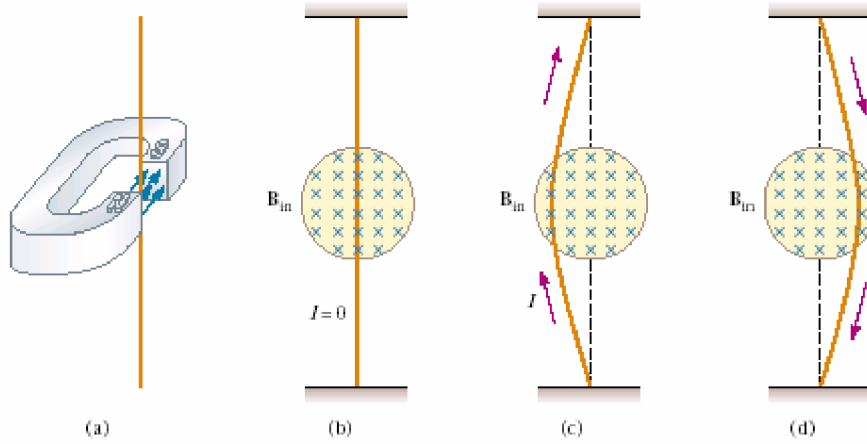
حيث m كتلة الشحنة المتحركة، r نصف قطر المسار الدائري.

تأثير المجال المغناطيسي علي سلك يحمل تياراً

:Magnetic Field Effect on a Current-Carrying Conductor

عند وضع سلك يمر به تيار كهربائي I في مجال مغناطيسي B يلاحظ أن السلك يتحرك تحت تأثير المجال. ومن المؤكد أن هذه الحركة هي نتيجة للقوة المغناطيسية المؤثرة علي الشحنات المتحركة في السلك بدليل عدم تأثر السلك بالمجال المغناطيسي عند انقطاع التيار كما بالشكل (2-5).

فإذا كان طول السلك l ومساحة مقطعه S وكثافة الشحنة به n فإن عدد الشحنات المتحركة بالسلك يساوي $l S n$ وتكون القوة التي يؤثر بها المجال علي السلك:



شكل (5-2)

$$F = l S n q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = l \mathbf{I} \times \mathbf{B} = l I B \sin \theta$$



شكل (6-2)

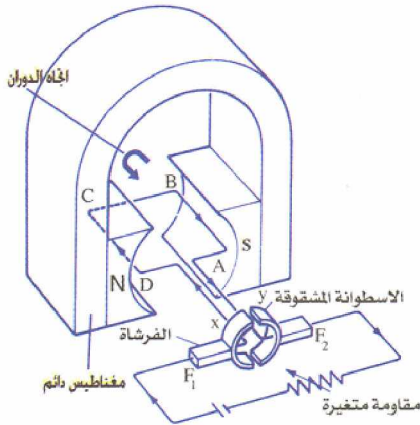
وتسمى هذه القوة بقوة لورنتز، ويتحدد اتجاهها باستعمال قاعدة اليد اليسرى حيث نجعل الإبهام والسبابة والوسطى متعامدة مع بعضها البعض، ويشير الوسطى إلي اتجاه التيار والسبابة إلي اتجاه المجال المغناطيسي أما الإبهام فيشير إلي اتجاه القوة كما بالشكل (6-2).

يعتبر كل من المحرك الكهربائي والجلفانومتر ذو الملف المتحرك تطبيقاً علي قوة لورنتز أي تطبيقاً علي تأثير المجال المغناطيسي علي سلك يحمل تياراً كهربياً.

المحرك الكهربائي $D C Motor$:

محرك التيار الكهربائي المستمر $D C Motor$ جهاز يستخدم لتحويل الطاقة الكهربائية إلي طاقة ميكانيكية ويعمل بمصدر كهربائي مستمر. ويتركب في أبسط صورته كما بالشكل (7-2) من 0 ملف مستطيل ($ABCD$) يتكون من عدد كبير من لفات سلك نحاسي رفيع معزول ملفوفة

حول قلب من الحديد المطاوع مكون من أقراص رقيقة معزولة عن بعضها للحد من التيارات الدوامية.

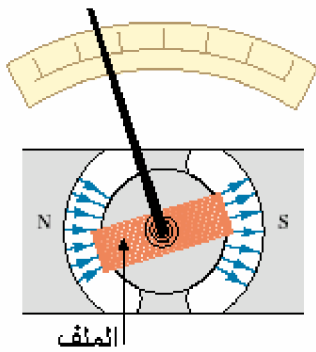


شكل (7-2)

والملف ومعه القلب الحديدي قابلان للدوران بين قطبي مغناطيس قوي علي شكل حذاء الفرس. ويتصل طرفا الملف بنصفي أسطوانة معدنية مشقوقة بالطول وهما النصفان x, y وهما معزولان عن بعضهما، وقابلان للدوران حول نفس محور دوران الملف. يكون المستوي الفاصل بين نصفي الاسطوانة متعامدا مع مستوي الملف والخط الواصل بين الفرشتين F_1, F_2 موازيا لخطوط المجال المغناطيسي وعند تشغيل المحرك الكهربائي توصل

الفرشتان بقطبي بطارية. وعند مرور تيار كهربائي I في الملف فإنه يخضع لازدواج يعمل علي دورانه. ونلاحظ أن نصف الاسطوانة x, y تغيرا موضعيهما بالنسبة للفرشتين F_1, F_2 كل نصف دورة ويترتب علي ذلك أن التيار الكهربائي المار في ملف المحرك الكهربائي يعكس اتجاهه في الملف كل نصف دورة مما يؤدي إلي دوران ملف المحرك باستمرار في نفس الاتجاه.

الجلفانومتر ذو الملف المتحرك *Moving Coil Galvanometer*:



شكل (8-2)

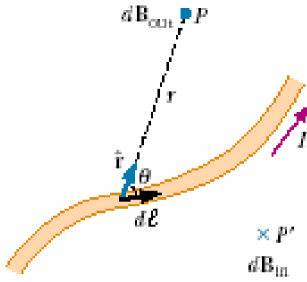
الجلفانومتر ذو الملف المتحرك جهاز يستخدم للاستدلال علي وجود التيار الكهربائي في دائرة ما، وقياس شدتها، وتحديد اتجاهها. ويتركب من ملف من سلك نحاسي رفيع معزول، معلق بين قطبي مغناطيس قوي بواسطة سلك زنبركي مرن كما بالشكل (8-2). وتبني فكرة عمل الجلفانومتر علي أنه إذا مر تيار كهربائي I في ملف موجود في مجال مغناطيسي فإن الملف يخضع لازدواج يعمل علي دورانه حول محوره ويتزن عزم هذا

الازدواج مع عزم الازدواج الناشئ في السلك الزنبركي المرن بعد دوران الملف بزاوية تتناسب مع شدة التيار. وتدل قراءة المؤشر علي قيمة شدة التيار.

المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي (قانون بايو وسافار):

كان يعتقد أن الظواهر المغناطيسية لا علاقة لها بالظواهر الكهربائية حتى لاحظ العالم أورستيد عام 1819 انحراف إبرة مغناطيسية نتيجة لمرور تيار كهربائي في سلك قريب منها. وفي العام التالي 1820 تمكن العالمان الفرنسيان بايو وسافار من استنتاج علاقة رياضية يمكن بواسطتها حساب المجال المغناطيسي لأي دائرة كهربائية.

فقد درس بايو وسافار المجال المغناطيسي dB الناشئ عن جزء من السلك طوله dl ويمر فيه تيار شدته I عند نقطة p تبعد عن السلك مسافة r وتصنع زاوية θ مع اتجاه التيار كما بالشكل (9-2). وجدا أن شدة المجال dB تتناسب طردياً مع شدة التيار I وطول السلك dl وجيب الزاوية $\sin\theta$ كما تتناسب عكسياً مع مربع البعد عن السلك r كما وجدا أن ثابت التناسب K' يتوقف على الوحدات المستخدمة وعلي نوع الوسط الموجود فيه السلك، أي أن:



شكل (9-2)

$$dB = K' I dl \sin\theta \frac{1}{r^2}$$

والثابت K' يساوي 10^{-7} وبر/أمبيرمتر بالوحدات الدولية في الفراغ. والعلاقة بين الثابت المغناطيسي K' والثابت الكهربائي K الذي ظهر في قانون كولوم هي:

$$K' = \frac{K}{c^2} = \frac{9 \times 10^9}{(3 \times 10^8)^2} \frac{N \cdot m^2 \cdot \text{sec}^2}{\text{coul}^2 \cdot m^2} = 10^{-7} \frac{N}{\text{Amp}^2} = 10^{-7} \frac{\text{Weber}}{\text{Amp} \cdot m}$$

والعلاقة بين الثابت K' ومعامل النفاذية المغناطيسية للوسط الموجود به السلك μ هي:

$$K' = \frac{\mu}{4\pi}$$

وبذلك يمكن كتابة قانون بايو وسافار علي الصورة:

$$dB = \frac{\mu}{4\pi} I dl \sin\theta \frac{1}{r^2} = \frac{\mu}{4\pi} I \frac{dl \times \vec{r}}{r^2}$$

حيث: \times علامة الضرب الاتجاهي، \vec{r} متجهه الوحدة في اتجاه r .

تطبيقات علي قانون بايو سافار:

أولاً: المجال المغناطيسي لسلك مستقيم لانهائي الطول يمر به تيار I :

لحساب المجال المغناطيسي B الناشئ عن مرور تيار شدته I في سلك طويل لانهائي عند نقطة p تبعد عن عنصر السلك dl مسافة r ، وتصنع زاوية θ مع اتجاه التيار كما بالشكل

(10-2)، نطبق علاقة بايو سافار:

$$dB = \frac{\mu}{4\pi} I dl \sin\theta \frac{1}{r^2}$$

ولكن من هندسة الشكل (10-2) نجد أن:

$$r = \frac{R}{\sin\theta} = R \csc\theta$$

$$l = -\frac{R}{\tan\theta} = -R \cot\theta$$

$$\therefore dl = R \csc^2\theta d\theta$$

بالتعويض عن r ، dl في علاقة بايو سافار نحصل علي:

شكل (10-2)

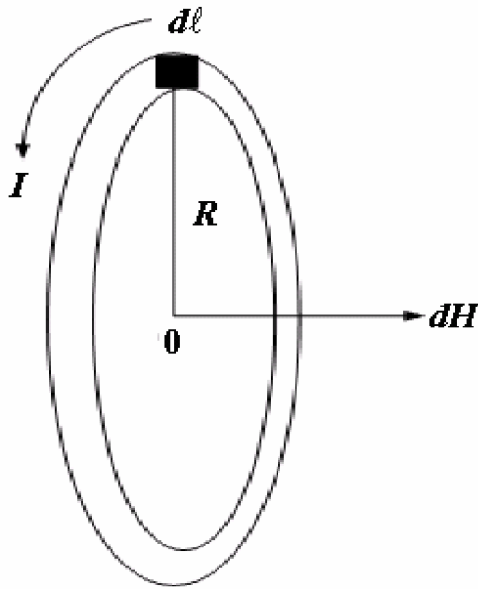
$$dB = \frac{\mu}{4\pi} I \frac{R \csc^2\theta \sin\theta d\theta}{R^2 \csc^2\theta} = \frac{\mu I}{4\pi R} \sin\theta d\theta$$

وبالتكامل:

$$B = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu I}{4\pi R} \sin\theta d\theta = \frac{\mu I}{4\pi R} \int_0^\pi \sin\theta d\theta$$

$$= \frac{\mu I}{4\pi R} [\cos 0 - \cos \pi] = \frac{\mu I}{2\pi R}$$

ثانياً: المجال المغناطيسي عند مركز ملف دائري يمر به تيار شدته I :



شكل (11-2)

تصور ملف دائري نصف قطره R في مستوى عمودي على مستوى الصفحة ويمر به تيار شدته I عكس عقارب الساعة كما في الشكل (11-2). بأخذ عنصر طوله dl من الملف وبتطبيق قانون بايو-سافار فإن شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن هذا العنصر عند مركز الملف تعطى بالعلاقة:

$$dB = \frac{\mu I dl}{4\pi R^2}$$

وتكون شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن لفة واحدة:

$$B = \frac{\mu I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi} dl = \frac{\mu I}{2R}$$

ويكون المجال المغناطيسي الناشئ عن عدد n من اللفات هو:

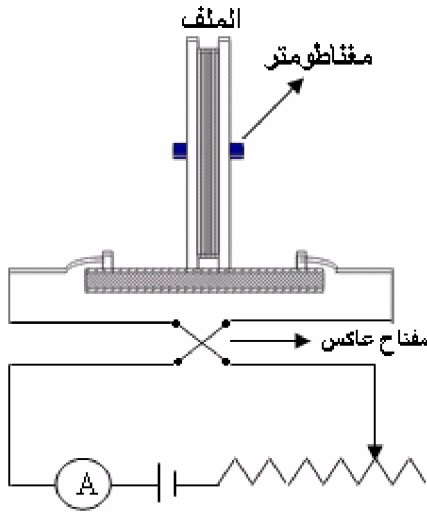
$$B = \frac{\mu I n}{2R}$$

حيث: B بالأورستيد، I بالأمبير، R بالمتر، μ معامل النفاذية المغناطيسية للوسط بالتسلا.متر/أمبير. ويكون المجال المغناطيسي B في اتجاه عمودي على مستوى الملف ومواز لمحوره. ولحساب شدة المجال المغناطيسي في الفراغ H فإن:

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

حيث H بالأمبير/متر.

جلفانومتر الظل:



شكل (12-2)

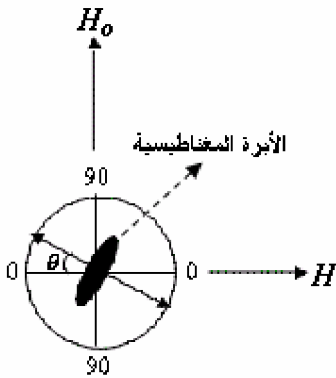
جلفانومتر الظل عبارة عن جهاز يستخدم لقياس شدة التيار الكهربائي، عن طريق إمرار هذا التيار في ملف دائري (رأسي ومكون من n لفة) وقياس تأثير المجال المغناطيسي الناشئ عن هذا التيار على إبرة مغناطيسية موجودة في مركز الملف وتحرك بحرية في مستوى أفقي كما بالشكل (12-2).

فإذا وضعت إبرة مغناطيسية حرة الحركة في مركز الملف قبل مرور التيار فيه فإن الإبرة تأخذ اتجاه

الشمال والجنوب المغناطيسي وبتعديل وضع الملف بحيث ينطبق مستواه مع اتجاه الإبرة يكون اتجاه الملف في اتجاه الزوال المغناطيسي وعندها يكون طرفا الإبرة في الاتجاه (90° ، 90°) وطرفا المؤشر على صفري التدرج. وعند إمرار التيار الكهربائي في الملف فإن الإبرة تكون في وضع جاوس الأول (يكون فيه المجال H عموديا على المجال H_0) وتتحرف بزاوية θ كما بالشكل (13-2) نتيجة لوجود مجالين مغناطيسيين متعامدين هما المركبة الأفقية للمجال الأرضي H_0 والآخر المجال H الناشئ عن مرور تيار كهربائي I في الملف وعندئذ يكون:

$$H = H_0 \tan \theta$$

وبالتعويض عن قيمة H نحصل على:



شكل (13-2)

$$\frac{I n}{2R} = H_0 \tan \theta$$

$$\therefore I = \frac{2R H_0}{n} \tan \theta = C \tan \theta$$

حيث C مقدار ثابت يسمى معامل اختزال جلفانومتر الظل وهو يعتمد على مواصفات الجلفانومتر وعلي خط العرض للمكان الذي نقيس عنده. ومعامل اختزال جلفانومتر الظل

يساوي عدديا التيار الكهربى بالأمبير الذى يعطى انحرافا قدره 45° فى الجلفانومتر ويعطى من العلاقة:

$$C = \frac{2 R H_o}{n}$$

قانون أمبير *Ampere's Law*:

يلاحظ أن حساب شدة المجال المغناطيسى بقانون بايو سافار يشبه حساب شدة المجال الكهربى بقانون كولوم، حيث تعتمد كل من الطريقتين على التكامل المباشر. وكما أدت صعوبة التكامل فى الكهربية إلى ظهور قانون جاوس كبديل لقانون كولوم فى حساب شدة المجال الكهربى، كذلك فى المغناطيسية يستخدم قانون أمبير كبديل سهل لقانون بايو سافار. وينص قانون أمبير على أن التكامل الخطى للمجال المغناطيسى حول أى مسار مغلق يتناسب مع المجموع الجبرى للتيارات الكهربية التى تخترق المساحة المحدودة بالمسار المغلق. أى أن:

$$\oint B \cdot dl = \mu I$$

فإذا أحسنا اختيار المسار المغلق بحيث يكون المجال المغناطيسى فى اتجاه المسار منتظم تصبح تلك العلاقة على الصورة:

$$LB_L = \mu \sum I$$

حيث: L طول المسار المغلق، B_L مركبة المجال المغناطيسى فى اتجاه المسار.

تطبيق على قانون أمبير:

المجال المغناطيسى لسلك مستقيم لانهاىي الطول يمر به تيار I :

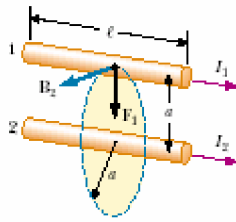
يبين شكل (2-10) سلكاً مستقيماً يحمل تياراً I يتجه إلى أعلى. والمطلوب إيجاد شدة المجال المغناطيسى B عند نقطة p تبعد عن السلك مسافة R . نظراً لأن المجال المغناطيسى يكون على هيئة دوائر مركزها السلك، فإن أبسط وأنسب مسار مغلق لتطبيق قانون أمبير هو

دائرة حول السلك تمر بالنقطة p ، ولأن المجال B يكون منتظماً علي طول محيط الدائرة وموازيًا للمحيط يكون قانون أمبير علي الصورة:

$$LB_L = 2\pi R B = \mu I$$

$$\therefore B = \frac{\mu I}{2\pi R}$$

القوة المؤثرة بين سلكين متوازيين يمر فيهما تيار كهربائي:



شكل (14-2)

يبين الشكل (14-2) جزءاً من سلكين 1، 2 طويلين مستقيمين ومتوازيين ويفصل بينهما وسط معامل النفاذية المغناطيسية له μ والمسافة بينهما a ويمر بهما تياران كهربيان I_1 ، I_2 في الاتجاه نفسه. ومن الواضح أن السلكين يتجاذبان حيث أن كل من الموصلين يقع في المجال المغناطيسي للموصل الآخر، أي أن التيار الكهربائي المار بأحد السلكين يحدث مجالاً مغناطيسياً يؤثر بقوة جذب علي السلك الآخر.

المجال المغناطيسي B عند السلك 2 والناشئ عن مرور التيار الكهربائي I_1 في السلك 1

يساوي:

$$B = \frac{\mu I_1}{2\pi a}$$

وبالتالي تكون القوة F المؤثرة علي السلك 2 الذي طوله l ويمر به تيار كهربائي شدته I_2 نتيجة لوجوده في المجال المغناطيسي B هي:

$$F = I_2 B l = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi a} l$$

وبالتالي تكون القوة المؤثرة علي وحدة الأطوال من السلك هي:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi a}$$