الكهربائية والمغناطيسية

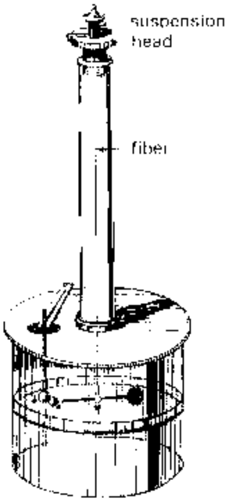
د. محمود السمان

الفرق الأولى/الرياضيات العامة والطبيعة والكيمياء

القوى الكهربية وقانون كولوم

قانون كولوم Coulomb's Law

عام 1784 عبر العالم كولوم عن القانون الاساسى للقوة الكهربية الناشئة بين جسمين مشحونين، ولقد اثبتت التجارب العملية ان القوة الكهربية تتميز بالاتى:



1- ان القوة تناسب عكسيا مع مربع المسافة بين الحسمين المشحونين

$$F \propto \frac{1}{r^2} \qquad 2.1$$

2- ان القوة تناسب طرديا مع حاصل ضرب كتلتى الجسمين المشحونين

$$F \propto q_1 q_2 \qquad 2.2$$

3- ان القـوة الكهربيـة تكـون تجاذبيـة اذا كانـت الجسـيمين مشـحونين بشحنة مختلفة وتنافرية اذا كانت الشحنة متشابه.

وبذلك يمكن ان نستنتج أن

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\therefore F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad 2.3$$

حيث ان k هو ثابت كولوم وهو يساوى 9×10^9 N.m^2/C^2

وتسمى المعادلة الاخيرة بقانون كولوم ، وتستخدم فى حساب القوة الكهربية الناشئة بين جسمين مشحونين. وفى هذه المعادلة تقاس القوة الكهربية F بالنيوتن N عندما تقاس الشحنة q بالكولوم c والمسافة r بالمتر. ويمكن كتابة الثابت k كالتالى:

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}$$

حبث ان ε_o يسمى *Permittivity constant of free space* وهو يساوى $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$

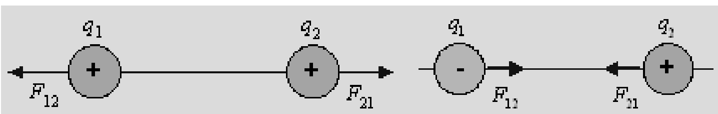
$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} = \frac{1}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12}} = 9 \times 10^9 N.m^2 / C^2$$

2- حساب القوة الكهربية

القوى الكهربية تكون ناتجة من تأثير شحنة على شحنة أخرى أو من تأثير توزيع معين لعدة شحنات على شحنة معينة q_1 على سبيل المثال، ولحساب القوة الكهربية المؤثرة على تلك الشحنة نتبع الخطوات التالية:-

أ- حساب القوة الكهربية بين جسمين مشحونين

في حالة وجود شحنتين فقط والمراد هو حساب تأثير القوى الكهربية لشحنة على الأخرى. الحالة في الشكل الشكل (2-2)(a) تمثل شحنات متشابهة إما موجبة أو سالبة حيث القوة المتبادلة هي قوة تنافر *Repulsive force*.



الشكل (2-2) **(a)**

الشكل (2-2)**(b)**

لحساب مقدار القوة المتبادلة نسمى الشحنة الأولى q_1 والثانية q_2. فإن القوة المؤثرة على الشحنة q_1 نتيجة الشحنة q_2 تكتب F_{12} وتكون في اتجاه التنافر عن q_2. وتحسب مقدار القوة من قانون كولوم كالتالي:

$$F_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} = F_{21}$$ **مقداراً**

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$ **واتجاها**

أي أن القوتين متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه.

كذلك الحال في الشكل (b)(2-2) والذي يمثل شحنتين مختلفتين، حيث القوة المتبادلة قوة تجاذب *Attractive force*. وهنا أيضا نتبع نفس الخطوات السابقة وتكون القوتان متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه أيضاً.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

لاحظ اتجاه أسهم القوة على الرسم.

مثال (1) احسب قيمة الشحنتين المتساويتين أذا تنافرتا بقوة تساوى 0.1 N وكانت المسافة بينهما هى 50 سم .

الحـــــل: حيث ان

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

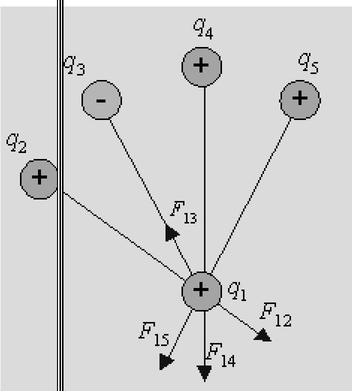
وحيث ان $\mathbf{q_1=q_2}$ فأن

$$0.1 = \frac{9 \times 10^9 \times q^2}{(0.5)^2}$$

$$\boldsymbol{q = 1.7 \times 10^{-6} C = 1.7 \mu C}$$

وهذه هي قيمة الشحنة التي تجعل القوة المتبادلة تساوي 0.1N.

ب- حساب القوة الناشئة بين أكثر من شحنة



شكل (3-2)

في حالة التعامل مع أكثر من شحنتين والمراد حساب القوى الكهربية الكلية The resultant electric forces المؤثرة على شحنة q_1 كما في الشكل (2.3) فإن هذه القوة هي F_1 وهى الجمع الاتجاهي لجميع القوى المتبادلة مع الشحنة q_1 أي أن

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15} \qquad \mathbf{2.4}$$

ولحساب قيمة واتجاه F_1 نتبع الخطوات التالية:-

1) حدد متجهات القوة المتبادلة مع الشحنة q_1 على الشكل وذلك حسب إشارة الشحنات وللسهولة نعتبر أن الشحنة q_1 قابلة للحركة وباقي الشحنات ثابتة.

2) نأخذ الشحنتين q_1&q_2 أولا حيث أن الشحنتين موجبتان. إذاً q_1 تتحرك بعيدا عن الشحنة q_2 وعلى امتداد الخط الواصل بينهما ويكون المتجه F_{12} هو اتجاه القوة المؤثرة على الشحنة q_1 نتيجة الشحنة q_2 وطول المتجه يتناسب مع مقدار القوة. وبالمثل نأخذ الشحنتين q_1&q_3 ونحدد اتجاه القوة F_{13} ثم نحدد F_{14} وهكذا.

3) هنا نهمل القوى الكهربية المتبادلة بين الشحنات q_2 & q_3 & q_4 لأننا نحسب القوى المؤثرة على q_1.

4) لحساب مقدار متجهات القوة كل على حده نعوض في قانون كولوم كالتالي:-

$$F_{12} = K\,\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{13} = K\,\frac{q_1 q_3}{r^2}$$

$$F_{14} = K\,\frac{q_1 q_4}{r^2}$$

5) تكون محصلة هذه القوى هي F_1 ولكن كما هو واضح على الشكل فإن خط عمل القوى مختلف ولذلك نستخدم طريقة تحليل المتجهات إلى مركبتين كما يلي

$$\boldsymbol{F}_{1x} = \boldsymbol{F}_{12x} + \boldsymbol{F}_{13x} + \boldsymbol{F}_{14x}$$

$$\boldsymbol{F}_{1y} = \boldsymbol{F}_{12y} + \boldsymbol{F}_{13y} + \boldsymbol{F}_{14y}$$

- مقدار محصلة القوى

$$F_1 = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2} \qquad (2.5)$$

- واتجاهها

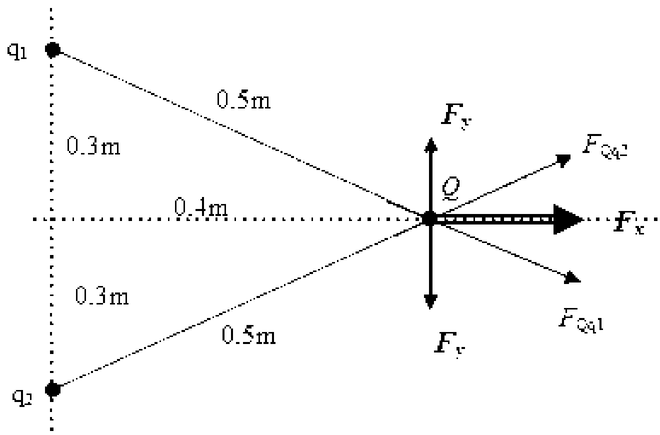
$$\theta = \tan^{-1}\frac{F_y}{F_x} \qquad (2.6)$$

نتبع هذه الخطوات لأن القوة الكهربية كمية متجهة، والأمثلة توضح تطبيقاً على ما سبق ذكره.

امثلة على قانون كولوم

مثال 1-2

فى الشكل 1-4 ، شحنتان متساويتا فى المقدار q=2x10^{-6}C تفاعلتا مع شحنة ثالثة Q=4x10^{-6}C ، أوجد شدة وأتجاه القوة الناتجة على الشحنة Q .



شكل رقم 1-4

الحـــل

لإيجاد محصلة القوى الكهربية المؤثرة على الشحنة Q نطبق قانون كولوم لحساب مقدار القوة التي تؤثر بها كل شحنة على الشحنة Q. وبما أن الشحنتين q1&q2 متساويتان وتبعدان نفس المسافة عن الشحنة Q فإن القوتين متساويتان في مقدار وقيمة القوة

$$F_{Qq1} = K\frac{qQ}{r^2} = 9\times10^9\,\frac{(4\times10^{-6})(2\times10^{-6})}{(0.5)^2} = 0.29\,N = F_{Qq2}$$

بتحليل متجه القوة إلى مركبتير

$$F_x = F\cos\theta = 0.29\left(\frac{0.4}{0.5}\right) = 0.23\,N$$

$$F_y = -F\sin\theta = -0.29\left(\frac{0.3}{0.5}\right) = -0.17\,N$$

وبالمثل يمكن إيجاد القوة المتبادلة بين الشحنتين $q2$ و Q وهي F_{Qq2} وبالتحليل الاتجاهي نلاحظ أن مركبتي y متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه.

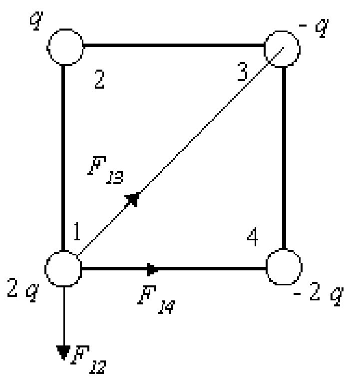
$$\sum F_x = 2\times 0.23 = 0.46\,N$$

$$\sum F_y = 0$$

وبهذا فإن مقدار القوة المحصلة هي N0.46 واتجاهها في اتجاه محور x الموجب.

مثال 1-3

فى الشكل 1-5 ما هى القوة المؤثرة على الشحنة الموجودة فى الركن الاسفل من الناحية اليسرى للمربع؟ بأفتراض ان $q=1\times10^{-7}$ C وان a = 5cm



شكل رقم 1-5

الحـــل

للتبسيط نرقم الشحنات كما هو مبين بالشكل 1-5 ثم نحدد اتجاهات القوى الكهربية على الشحنة المطلوبة

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14}$$

$$F_{12} = K\frac{2qq}{a^2}$$

$$F_{13} = K\frac{2qq}{2a^2}$$

$$F_{14} = K\frac{2q2q}{a^2}$$

لاحظ هنا أننا أهملنا التعويض عن إشارة الشحنات عند حساب مقدار القوى. وبالتعويض في المعادلات ينتج أن:

$F_{12} = 0.072$ N,

$F_{13} = 0.036$ N,

$F_{14} = 0.144$ N

لاحظ هنا أننا لا نستطيع جمع القوى الثلاث مباشرة لأن خط عمل القوى مختلف، ولذلك لحساب المحصلة نفرض محورين متعامدين x,y ونحلل القوى التي لا تقع على هذين المحورين أي متجه القوة $F13$ ليصبح

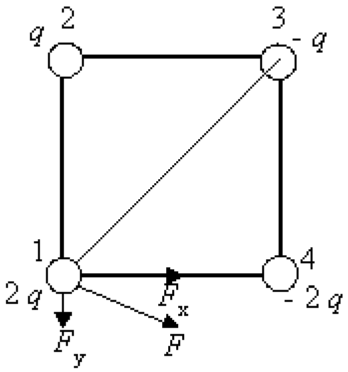
$F_{13x} = F_{13} \sin 45 = 0.025$ N &

$F_{13y} = F_{13} \cos 45 = 0.025$ N

$F_x = F_{13x} + F_{14} = 0.025 + 0.144 = 0.169$ N

$F_y = F_{13y} - F_{12} = 0.025 - 0.072 = -0.047$ N

الإشارة السالبة تدل على أن اتجاه مركبة القوة في اتجاه محور y السالب.



القوة الكهربية الناتجة تساوى

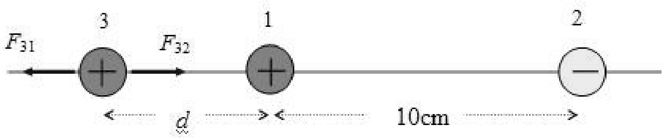
$$F_1 = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2} = 0.175 \text{ N}$$

واتجاهها على المحور السيني هو

$$\theta = \tan^{-1}\frac{F_y}{F_x} = \mathbf{-15.5°}$$

مثال 1-4

تم شحنتين مقدارهما $-3\mu C$ & $1\mu C$ تفصلهما مسافة 10سم كما هو موضح بالشكل 1-6 ، أين يمكن وضع شحنة ثالثة بحيث يكون القوى المؤثرة عليها مساوية الصفر



شكل 1-6

الحــل

المطلوب من السؤال هو أين يمكن وضع شحنة ثالثة بحيث تكون محصلة القوى الكهربية المؤثرة عليها تساوى صفراً، أي أن تكون في وضع اتزان equilibrium. (لاحظ أن نوع الشحنة ومقدارها لا يؤثر في تعيين نقطة الاتزان). حتى يتحقق هذا فإنه يجب أن تكون القوى المؤثرة متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه. وحتى يتحقق هذا الشرط فإن الشحنة الثالثة يجب أن توضع خارج الشحنتين وبالقرب من الشحنة الأصغر. لذلك نفرض شحنة موجبة $q3$ كما في الرسم ونحدد اتجاه القوى المؤثرة عليها.

$$\boldsymbol{F_{31} = F_{32}}$$

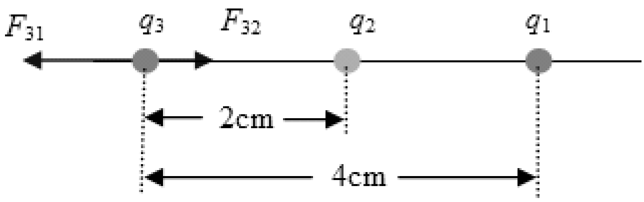
$$k\frac{q_3 q_1}{r_{31}^2} = k\frac{q_3 q_2}{r_{32}^2}$$

$$\frac{1\times10^{-6}}{d^2} = \frac{3\times10^{-6}}{(d+10)^2}$$

نحل هذه المعادلة ونوجد قيمة d

مثال 1-5

وجدت شحنتين على المحور السيني لنظام الإحداثيات كما في الشكل 1-7 الشحنة الاولى q_1=2n على بعد 2سم من نقطة الأصل والشحنة q_2=-3nC على بعد 4سم من نقطة الأصل ، ما هي القوى المبذولة من الشحنتين على شحنة ثالثة q_3=5nC تقع على نقطة الأصل.



الحــــل

القوى المؤثرة على الشحنة الثالثة هى المحموع الاتجاهى للقوى الناتجة من q_1 & q_2

$$F_{31} = \frac{(9\times10^{9})(2\times10^{-9})(5\times10^{-9})}{(0.02)^{2}} = 2.25\times10^{-4}\,N$$

$$F_{32} = \frac{(9\times10^{9})(3\times10^{-9})(5\times10^{-9})}{(0.04)^{2}} = 0.84\times10^{-4}\,N$$

حيث أن الشحنة $q1$ موجبة فإنها تؤثر على الشحنة $q3$ بقوة تنافر مقدارها $F31$ واتجاهها كما هو موضح في الشكل، أما الشحنة $q2$ سالبة فإنها تؤثر على الشحنة $q3$ بقوة تجاذب مقدارها $F32$. وبالتالي فإن القوة المحصلة $F3$ يمكن حسابها بالجمع الاتجاهي كالتالي:

$$F_3 = F_{31} + F_{32}$$
$$\therefore F_3 = 0.84\times10^{-4} - 2.25\times10^{-4} = -1.41\times10^{-4}\,N$$

2- المجال الكهربي Electric field

المجـال الكهربـي هـو الحيـز المحـيط بالشـحنة الكهربيـة والـذي تظهـر فيـه تـأثير القـوى الكهربية. كذلك سندرس تأثير المجال الكهربي على شحنة في حالـة أن كـون السـرعة الابتدائية تساوي صفراً وكذلك في حالة شحنة متحركة.

1-2 المجال الكهربى

شدة المجال الكهربى عند نفطة يعرف بالقوة الكهربية المؤثرة على وحدة شحنة موجبـة q موضوعة عند هذه النقطة وفى نفس أتجاه القوة

$$\mathbf{E = F/q}$$

$$= N/C$$

$$= NC^{-1}$$

أى ان شدة المجال الكهربى (E) هى كمية متجهه لها مقدار وأتجاه.

ولكن ماذا يحدث لو أثرت هذه الشحنة على الجسم المراد إيجاد شدة مجاله ، فى هذه الحاله فإننا نفترض ان شحنة الاختبار صغيرة ولا تؤثر على الجسم

لاحظ هنا أن المجال الكهربي E هو مجال خارجي وليس المجال الناشئ من الشحنة q_o كما هو موضح في الشكل 3.1، وقد يكون هناك مجال كهربي عند أية نقطة في الفراغ بوجود أو عدم وجود الشحنة q_o ولكن وضع الشحنة q_o عند أية نقطة في الفراغ هو وسيلة لحساب المجال الكهربي من خلال القوى الكهربية المؤثرة عليها.

شكل 2-1

<u>أيجاد أتجاه المجال الكهربى</u>

1- اذا كانت الشحنة الكهربية q موجبة عند النقطة p يكون سهم اتجاه المجال خارجا من الشحنة كما فى الشكل 2-2 a

2- اذا كانت الشحنة الكهربية q سالبة عند النقطة p يكون سهم اتجاه المجال عكس الحالة السابقة كما فى الشكل 2-2 b

a

شكل رقم 2-2 b

الشكل 2-2

يكون اتجاه المجال عند نقطة ما لشحنة موجبة في اتجاه الخروج من النقطة كما في الشكل 2-2(a)، ويكون اتجاه المجال عند نقطة ما لشحنة سالبة في اتجاه الدخول من النقطة إلى الشحنة كما في الشكل 2-2 (b).

<u>حساب المجال الكهربى نتيجة جسيم مشحون</u>

بالاخذ فى الاعتبار الشكل 2-2 a ، فأن القوة المؤثرة على q_o تعطى من قانون كولوم كالتالى:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Qq_o}{r^2}$$

$$E = \frac{F}{q_o}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{r^2} \qquad \textbf{(2.3)}$$

لأيجاد المجال الكهربى E لمجموعة نقاط مشحونة:

نفترض الشكل التالى :

(1) نرقم الشحنات المراد إيجاد المجال الكهربي لها.

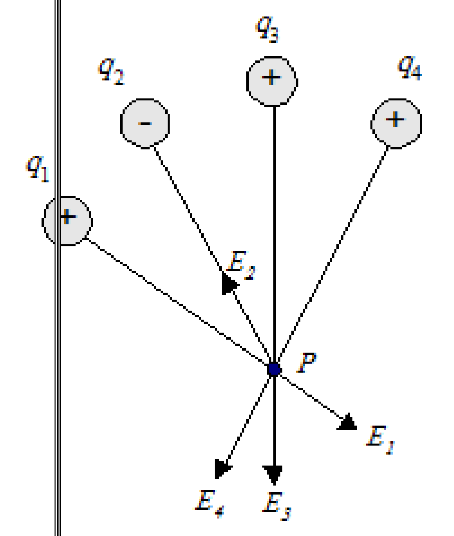


Figure 3.3

(2) نحدد اتجاه المجال الكهربي لكل شحنة على حده عند النقطة المراد إيجاد محصلة المجال عندها ولتكن النقطة p، يكون اتجاه المجال خارجاً من النقطة p إذا كانت الشحنة موجبة ويكون اتجاه المجال داخلاً إلى النقطة إذا كانت الشحنة سالبة كما هو الحال في الشحنة رقم (2).

(3) يكون المجال الكهربي الكلي هو الجمع الاتجاهي لمتجهات المجال

$$E_p = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2.4)$$

(4) إذا كان لا يجمع متجهات المجال خط عمل واحد نحلل كل متجه إلى مركبتين في اتجاه محوري x و y

(5) نجمع مركبات المحور x على حده ومركبات المحور y.

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} + E_{3x} + E_{4x}$$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} + E_{3y} + E_{4y}$$

(6) تكون قيمة المجال الكهربي عند النقطة الفراغ هي $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$

(7) يكون اتجاه المجال هو $\theta = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x}$

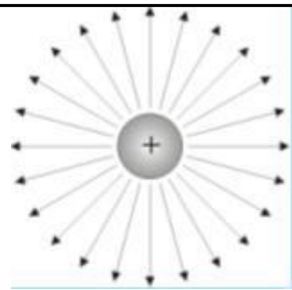
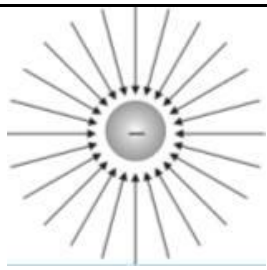
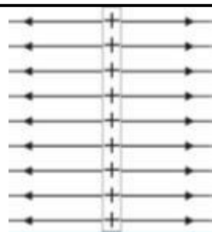
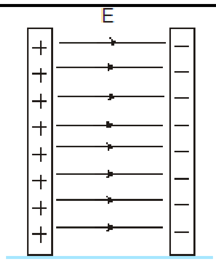
<u>خطوط المجال الكهربى</u>

هى خطوط وهمية تساعد على تصور المجال ويكون الخط بحيث يكون المماس له عند اى نقطة له نفس اتجاه المجال عند هذه النقطةوتتميز خطوط المجال الكهربى :

1- خطوط القوى لا يمكن ان تتقاطع

2- تتقارب خطوط القوى فى مناطق التى تشتد فيها قيمة المجال وتتباعد عندما تقل شدة المجال

بعض أمثلة خطوط القوى للمجال الكهربى

	
خطوط المجال الكهربى نتيجة شحنة موجبة	***خطوط المجال الكهربى نتيجة شحنةسالبة***
	
خطوط المجال الكهربى نتيجةخط	***خطوط المجال الكهربى***

مشحون بشحنة موجبة	***نتيجةسطحين مشحونين بشحنات مختلفة***

شكل 2-7 يوضح بعض أمثلة لخطوط قوى المجال الكهربى

ومن الرسم لاحظ الاتى:

1- ان الخطوط لا بد وان تبدأ من الشحنات الموجبة وتنتهى للشحنات السالبة.

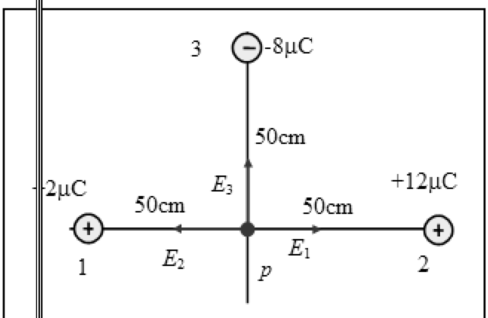
2- ان عدد خطوط القوى يتناسب مع شدة المجال.

3- انه لا يتقاطع خطوط مجالين كهربيين.

أمثلة على المجال الكهربى

مثال 2-1

أوجد المجال الكهربي عند النقطة P في الشكل التالي نتيجة للشحنات الموضحة بالشكل



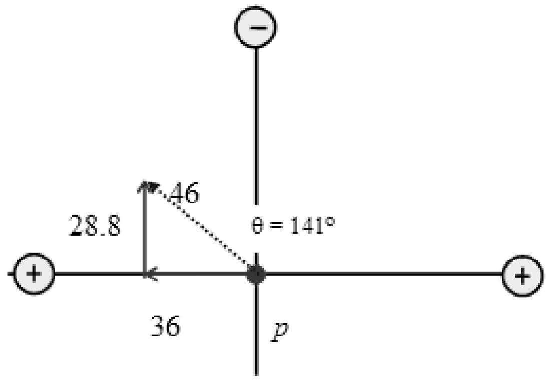
$$\vec{E}_p = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

$$\boldsymbol{E_x = E_1 - E_2 = -36\times10^4 N/C}$$

$$\boldsymbol{E_y = E_3 = 28.8\times10^4 N/C}$$

$$\boldsymbol{E_p = \sqrt{(36\times10^4)^2+(28.8\times10^4)^2} = 46.1 N/C}$$

$$\boldsymbol{\theta = 141^o}$$

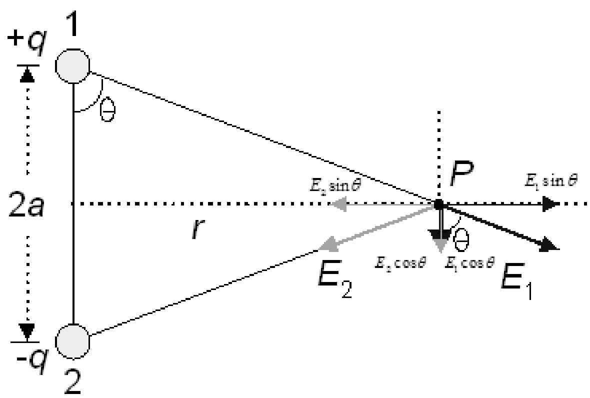


المجال الكهربى المؤثر على النقطة P

مثال 2-2

أوجد المجال الكهربى الناتج من جزىء ثنائى الاستقطاب على المحور السينى على النقطة p تفصل بينهما مسافة r من نقطة الاصل ثم أفترض ان $\boldsymbol{r}>>\boldsymbol{a}$

(جزىء ثنائى الاستقطاب) هو شحنة موجبة وشحنة موجبة متساويتا القوى تقع بينهما مسافة قدرها $\boldsymbol{2a}$ كما هو متضح بالشكل التالى



الحـــل

الناتج E_2 والمجال q_1 الناتج عن الشحنة E_1 هو محصلة المجالين pالمجال الكلي عند النقطة عن الشحنة q_2أي أن

$$\vec{E}_p = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

وحيث أن النقطة p تبعد عن الشحنتين بنفس المقدار، والشحنتان متساويتان إذاً المجالان متساويان وقيمة المجال تعطى بالعلاقة

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q_1}{a^2 + r^2} = E_2$$

لاحظ هنا أن المسافة الفاصلة هي ما بين الشحنة والنقطة المراد إيجاد المجال عندها.

نحلل متجه المجال إلى مركبتين كما في الشكل أعلاه

$$\boldsymbol{E_x = E_1 \sin\theta - E_2 \sin\theta}$$

$$\boldsymbol{E_y = E_1 \cos\theta + E_2 \cos\theta = 2E_1 \cos\theta}$$

$$\boldsymbol{E_p = 2E_1 \cos\theta}$$

$$E_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q}{a^2 + r^2} \cos\theta$$

ومن الشكل

$$\cos\theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}}$$

$$E_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{q}{a^2 + r^2} \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}}$$

$$E_p = \frac{2aq}{4\pi\varepsilon_o (r^2 + a^2)^{3/2}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

ان أتجاه المجال الكهربى فى أتجاه المحور السالب السينى

تسمى الكمية $2aq$ القوة الدافعة للجزىء الثنائى الاستقطاب p ولها اتجاه من الشحنة السالبة الى الشحنة الموجبة

عندما تكون $r>>a$

$$\therefore E = \frac{2aq}{4\pi\varepsilon_o r^3} \qquad \textbf{(3.6)}$$

يتضح مما سبق أن المجال الكهربي الناشئ عن electric dipole عند نقطة واقعة على العمود المنصف بين الشحنتين يكون اتجاهه في عكس اتجاه electric dipole momentum وبالنسبة للنقطة البعيدة عن electric dipole فإن المجال يتناسب عكسيا مع مكعب المسافة، وهذا يعنى أن تناقص المجال مع المسافة يكون أكبر منه في حالة شحنة واحدة فقط.

الجهد الكهربي Potential Electric

تعلمنا فيما سبق كيف يمكن التعبير عن القوى الكهربية أو التأثير الكهربي في الفراغ المحيط بشحنة أو أكثر باستخدام مفهوم المجال الكهربي. وكما نعلم أن المجال الكهربي هو كمية متجهة وقد استخدمنا لحسابه كلا من قانون كولوم وقانون جاوس. وقد سهل علينا قانون جاوس الكثير من التعقيدات الرياضية التي واجهتنا أثناء إيجاد المجال الكهربي لتوزيع متصل من الشحنة باستخدام قانون كولوم.

في هذه الفصل سوف نتعلم كيف يمكننا التعبير عن التأثير الكهربي في الفراغ المحيط بشحنة أو أكثر بواسطة كمية قياسية تسمى الجهد الكهربي The electric potential. وحيث أن الجهد الكهربي كمية قياسية وبالتالي فسيكون التعامل معه أسهل في التعبير عن التأثير الكهربي من المجال الكهربي.

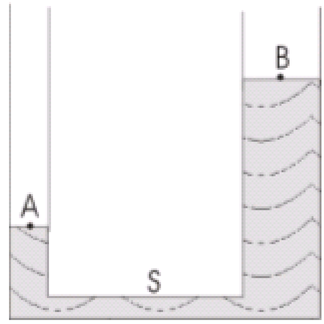
قبل أن نبدأ بتعريف الجهد الكهربي أو بمعنى أصح فرق الجهد الكهربي بين نقطتين في مجال شحنة في الفراغ سوف نضرب بعض الأمثلة التوضيحية.

مثال (1)

عند رفع جسم كتلته m إلى ارتفاع h فوق سطح الأرض فإننا نقول أن شغلا خارجيا (موجبا) تم بذله لتحريك الجسم ضد عجلة الجاذبية الأرضية، وهذا الشغل سوف يتحول إلى طاقة وضع مختزنة في المجموعة المكونة من الجسم m والأرض. وطاقة الوضع هذه تزداد بازدياد المسافة h لأنه بالطبع سيزداد الشغل المبذول. إذا زال تأثير الشغل المبذول على الجسم m فإنه سيتحرك من المناطق ذات طاقة الوضع المرتفعة إلى المناطق ذات طاقة الوضع المنخفضة حتى يصبح فرق طاقة الوضع مساوياً للصفر.

مثال (2)

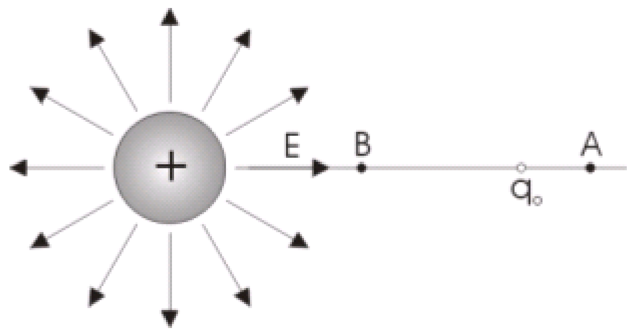
نفرض إناء على شكل حرف U به ماء كما في شكل التالى. تكون طاقة الوضع لجزئ الماء عند النقطة B أكبر من طاقة الوضع عند النقطة A ولذلك إذا فتح الصنبور S فإن الماء سوف يتدفق في اتجاه النقطة A إلى أن يصبح الفرق في طاقتي الوضع بين النقطتين A&B مساويا للصفر.



مثال (3)

هناك حالة مشابهة تماما للحالتين السابقتين في الكهربية، حيث نفترض أن النقطتين A&B موجودتان في مجال كهربي ناتج من شحنة موجبة Q على سبيل المثال كما في شكل 3-1 . إذا كانت هناك شحنة اختبار q_0 (مناظرة للجسم m في مجال عجلة الجاذبية الأرضية وكذلك لجزئ الماء عند النقطة B في المثال السابق) موجودة بالقرب من الشحنة Q فإن الشحنة q_0 سوف تتحرك من نقطة قريبة من الشحنة إلى نقطة أكثر بعداً أي من B إلى A وفيزيائيا نقول أن الشحنة q_0 تحركت من مناطق ذات جهد كهربي مرتفع إلى مناطق ذات جهد كهربي منخفض. ولذلك يكون تعريف فرق الجهد الكهربي بين نقطتين A&B واقعتين في مجال كهربي شدته E بحساب الشغل المبذول بواسطة قوة خارجية (F_{ex}) ضد القوى الكهربية (qE) لتحريك شحنة اختبار q_0 من A إلى B بحيث تكون دائما في حالة اتزان (أي التحريك بدون عجلة).

إذا كانت هنالك بطارية فرق الجهد بين قطبيها 1.5volt فهذا يعنى إنها إذا ما وصلت في دائرة كهربية، فإن الشحنات الموجبة ستتحرك من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض. كما حدث في حالة فتح الصنبور في الأنبوبة U وستستمر حركة الشحنات حتى يصبح فرق الجهد بين قطبي البطارية مساوياً للصفر.



شكل 3-1

3-1 تعريف فرق الجهد

فرق الجهد بين نقطتين B & A هو الشغل المبذول بواسطة قوة خارجية لتحريك شحنة أختبار q_0 من النقطة A الى النقطة B بحيث:

$$V_B - V_A = W_{AB} / q_o \qquad (5.1)$$

ووحدة فرق الجهد هى (*Joule/Coulomb*) وتعرف بـ *Volt (V)*

لأحظ أن اذا كان الشغل

1- موجبا فأن $V_B > V_A$

2- سالبا فأن $V_B < V_A$

3- صفرا فأن $V_B = V_A$

ويجب ان تتذكر ان هذا الشغل يكون بالمعادلة الاتية:

$$W = \vec{F}_{ex}\,\vec{l} = F_{ex}\cos\theta\, l$$

- اذا $\cos\theta \Rightarrow 0 < \theta < 90$ تكون موجبة وتكون W موجبة
- اذا $\cos\theta \Rightarrow 90 < \theta < 180$ تكون سالبة وتكون W سالبة
- اذا $\theta = 90$ بين F_{ex} & l فأن w تساوى الصفر

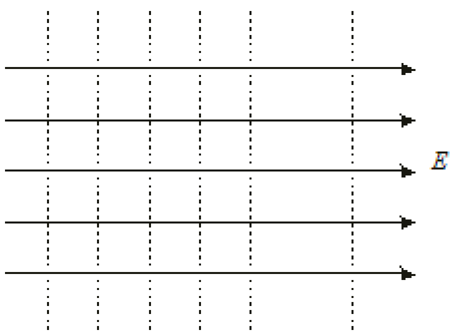
وفرق لبجهد لا يعتمد على المسار بين A & B حيث ان الشغل (W_{AB}) يعمل على تحريك شحنة الاختبار q_0 من A الى B لا يعتمد على هذه المسافة.

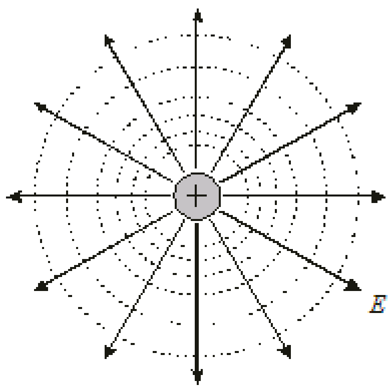
2-3 الاسطح المتكافئة الجهد (**The Equipotent surfaces**)

كما ان المجال الكهربى يرسم بخطوط القوى ، فأن فرق الجهد يمكن رسمه كأسطح متكافئة التأثير

الاسطح المتكافئة الجهد (**The Equipotent surfaces**) هو ذلك السطح الذى يتساوى فيه الجهد عند كل نقطة اى ان $V_B - V_A = \text{zero}$ بين اى نقطتين على السطح.

فى كل الحالات فأن الاسطح المتكافئة الجهد تعمل زاوية قائمة مع خطوط القوى E .





شكل 1-3(a)   شكل 1-3(**b**)

يوضح الشكل 3-1 شكل الاسطح المتكافئة التأثير (الخطوط المنقطة) وخطوط القوى الكهربية (الخطوط الغير منقطة) ويمثل الشكل a لمجال كهربى متماثل بينما الشكل الاخر يمثل المجال الكهربى الناشىء من شحنة موجبة.

الدوائر الكهربائية

عناصر الدائرة الكهربائية:

تتكون الدائرة الكهربائية من العناصر التالية.

1- العناصر النشطة:

العناصر النشطة هي عناصر الدائرة التي تمتلك طاقة خاصة بها ويمكن نقلها إلى عنصر آخر في الدائرة.

العناصر النشطة من نوعين

أ) مصدر الجهد ب) مصدر التيار

مصدر الجهد : له جهد محدد عبر أطرافه ، بغض النظر عن التيار المتدفق من خلاله.

مصدر التيار: له تيار محدد من خلاله مستقل عن الجهد الذي يظهر عبره

2- العناصر السلبية:

لا تمتلك العناصر السلبية للدائرة الكهربائية طاقة خاصة بها. يتلقون الطاقة من المصادر. العناصر السلبية هي المقاومة والحث والسعة. عندما يتم توفير الطاقة الكهربائية لعنصر الدائرة ، فإنه سوف يستجيب بواحدة وأكثر من الطرق التالية

إذا تم استهلاك الطاقة ، فإن عنصر الدائرة هو مقاوم نقي.

إذا تم تخزين الطاقة فى مجال مغناطيسى ، فإن العنصر هو محث نقى.

وإذا تم تخزين الطاقة فى مجال كهربائى ، فإن العنصر هو مكثف نقى.

العناصر الخطية وغير الخطية.

تظهر العناصر الخطية الخصائص الخطية للجهد والتيار. هذه هي خصائص تيار الجهد هي في جميع الأوقات خط مستقيم عبر الأصل.

على سبيل المثال ، يتناسب التيار الذي يمر عبر المقاوم مع الجهد المطبق من خلاله ويتم التعبير عن العلاقة ك V I أو V = IR. العنصر الخطي أو الشبكة هي التي تلبي مبدأ التراكب ، أي مبدأ التجانس والإضافة.

المقاومات والمحاثات والمكثفات هي أمثلة على العناصر الخطية ولا تتغير خصائصها مع تغير الجهد المطبق وتيار الدائرة.

لا تتبع خصائص V-I للعنصر غير الخطي النمط الخطي ، أي أن التيار الذي يمر عبره لا يتغير خطيا مع التغير الخطي في الجهد عبره. **ومن الأمثلة على ذلك أجهزة أشباه الموصلات مثل الصمام الثنائي والترانزستور.**

العناصر الثنائية والأحادية

يقال إن العنصر ثنائي ، عندما توجد نفس العلاقة بين الجهد والتيار للتيار المتدفق في كلا الاتجاهين.

على سبيل المثال: مصدر الجهد ، مصدر التيار ، المقاومة ، الحث والسعة.

تسمى الدوائر التي تحتوي عليها الدوائر الثنائية.

يقال إن العنصر أحادي الجانب ، عندما لا توجد نفس العلاقة بين الجهد والتيار عندما يتدفق التيار في كلا الاتجاهين. تسمى الدوائر التي تحتوي عليها دوائر أحادية الجانب.

على سبيل المثال: الثنائيات فراغ ، الثنائيات السيليكون ، مقومات السيلينيوم الخ

عناصر الدائرة الكهربية

العناصر الاساسية فى الدوائر الكهربية هى

1- المقاومات

2- المكثفات

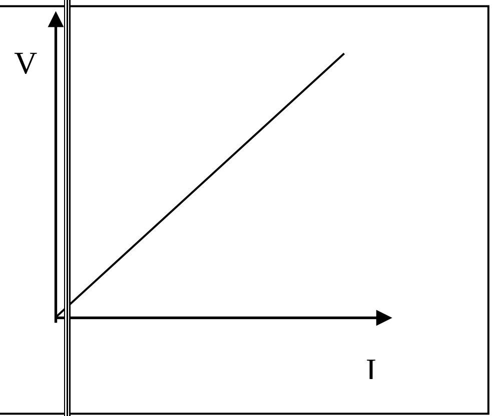
3- الملفات

ويتوقف سلوك كل عنصر من هذه العناصر على طريقة توصيله مع باقى عناصر الدائرة ونوعية مصادر التيار فى الدائرة

أولا : المقاومات

قانون أوم

"ان شدة التيار المار فى موصل تتناسب طرديا مع فرق الجهد بين طرفى موصل" أى ان



$$V \,\alpha\, I$$

$$V = \text{constant} \,.\, I$$

يقاس التيار فى الدائرة بواسطة أميتر موصل على التوالى ، كما يقاس فرق الجهد عبر اى مقاومة فى الدائرة بواسطة فولتميتر يوصل على التوازى مع المقاومة. ويجب ان تكون أجهزة القياس هذه بحيث لا تتغير قيمة التيار أو فرق الجهد المقاسين.

ويتضح من المعادلة ان $V = R \,.\, I$

حيث R مقدار ثابت تتوقف قيمتة على مادة التوصيل وأبعاده ويسمى هذا الثابت بمقاومة الموصل. وتتوقف وحدة المقاومة على الوجدات المقاس بها التيار وفرق الجهد فالوحدة العملية للتيار هى الامبير والوحدة العملية للجهد هى الفولت وللمقاومة هى الاوم. وبذلك يمكن تعريف المقاومة " هى **مقاومة موصل الذى يمر فيه تيار شدته 1 امبير وفرق الجهد بين طرفيه هو 1 فولت** " أى ان المقاومة

$\mathbf{R \,\alpha\, L}$ **(علاقة طردية)**

$\mathbf{R \,\alpha\, \frac{1}{A}}$ **(علاقة عكسية)**

$$\mathbf{R = \rho \frac{L}{A}}$$

حيث ان (ρ) هى المقاومة النوعية وهى مقاومة موصل (مقاسة بالاوم) من هذه المادة . تعتمد مقاومة الموصل R على نوع مادته (ρ) ، باختلاف نوع المادة(ρ) تختلف المقاومة النوعية ، كما انه بتغير درجة الحرارة (ρ) تتغير قيمة المقاومة النوعية ولقد وجد بالتجربة ان .

$$\rho_t = \rho_0 (1+ \alpha t)$$

حيث ان α مقدار ثابت يسمى معامل ازدياد المقاومة مع درجة الحرارة ويسمى مقلوب المقاومة النوعية بالتوصيل النوعى ومعامل التوصيل النوعى أى أن.

$\sigma = \frac{1}{\rho}$ = (التوصيل النوعى)

$$R = \rho \frac{L}{A} \Longrightarrow R = \frac{L}{A\sigma}$$

$$V = R . I$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{A\sigma V}{L}$$

توصيل المقاومـــات

يمكن توصيل المقاومات للحصول على مقاومة كبيرة أو صغيرة للحصول عـلـى تيار مناسب في الدائرة

أولا : التوصيل على التوالى

الغرض منه:

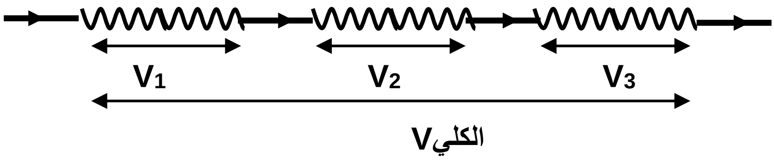
1- الحصول عـلى مقاومة كبيرة من عـدة مقاومات صـغـيرة وبالتالي تزيد المقاومة

2- الحصول عـلى مقاومة أكبر من أكبر مقاومة بالدائرة $R < R_{eq}$

3- إنقـاص شـدة التيــار الكهربــي المــارة بالـدائرة وتكـون قيمــة شـدة التيــار متســاوية بالمقاومات

4- تقليل القدرة المسحوبة بالدائرة وفرق الجهد الكلي يساوي الجمع الجـبري لفروق الجهد لتلك المقاومات (الجمع الإتجاهي لفروق الجهد بالملفات والمكثفات في دوائر التيار المتردد)

I R_1 R_2 R_3 I



* شدة التيار(I) واحـدة في كل المقاومات

* يتجزأ فـرق الجهد بين المقاومات

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots\ldots.$$

$$IR_{TotaL} = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \ldots\ldots$$

$$IR = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

$$R_{eq} = (R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots)$$

مجموع قيم المقاومات = المقاومة المكافئة

** لوكانت المقاومات متساوية وعـددهـا (N) وقيمة كل منـها (r) فإن :

$$\boxed{R = N\,r}$$

أولا : التوصيل على التوازى

الغرض منه:

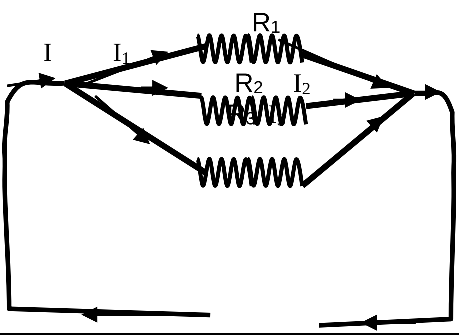
1- الحصول على مقاومة صغيرة من عدة مقاومات كبيرة وبالتالي تنقص المقاومة

2- الحصول على مقاومة أصغـر من أصغـر مقاومة بالدائرة $R > R_{eq}$

3- زيادة شدة التيار الكهربي المارة بالدائرة وتكون قيمة فرق الجهد متساوية لكل المقاومات

4- زيادة القدرة المسحوبة بالدائرة وفرق الجهد الكلي يساوي فرق الجهد لكل فرع من المقاومات

لوكانت المقاومات متساوية القيمة وقيمة كل منها (r) وعـددها (N) فإن:



***فرق الجهد واحد بين طرفي المقاومات**

*** تتجزأ شدة التيار في المقاومات**

التيار الكلي $I = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots.$

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} + \ldots\ldots$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

•

•

•

•

• المقاومة المكافئة لمقاومتين متصلتين علـى التوازي

$$\boxed{R_{eq} = \frac{r}{N}}$$

$$\boxed{R_{eq} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}}$$

*

حاصل ضربهما علـى مجموعهما

<u>قـانون أوم لدائرة مـغـلقة:</u>

لولدينا عمــود كهربي قوته الدافعة الكهربية (E) ومقاومتـه الداخليـة(r) ويتصل بمقاومـة خـارجية (R) في دائرة شدة تيارها (I) فإن:-

E=V+Ir

وبالتـالي

E=IR+Ir

E=I(R+r)

$$\boxed{\therefore I = \frac{E}{R+r}}$$

• **<u>العـلاقة بين القوة الدافعة الكهربية لعمود وفرق الجهد بين قطبيه</u>**

- من قــانون أوم لدائرة كهربية مغلقة وبفرض(V_R) فرق الجهد بين طرفي المقاومة الداخلية يكون: $E=V_R +V_r$
- ولكن فرق الجهد بين قطبـي مصـدر كهربـي $V_R=V$ فرق الجهد بين طرفـي (R) وكذلك فرق الجهد بين طرفي دائرة العمود الداخلية (المصدر)$I_r =V_r$
- أي فرق الجهد بين قطبي العمود $E > V$ بمقدارIr

$$\boxed{E = V + Ir}$$

- **<u>ونستنتـج أن:</u>**

1- في حالة عـدم مرور تيـار كهربـي للعمـود(وذلك بفتح الدائرة Zer0 $I=0$أو $R=\infty$)

فرق الجهد بين قطبيـه $\boxed{E=V}$ ال ق.د.ك

2- في حالة تفريغ شحنة ومرور تيار كهربي

$$\boxed{V = E - Ir}$$

في حالة غـلق الدائرة ومرور تيار كهربي وكانت البطارية أو العمود يُشحــن بالكهربـاء (عكس التفريغ)

$$\boxed{V = E + Ir}$$

تمارين

1- تصل الكهرباء الى أحدى القرى عن طريق سلك من النحاس المعزول نصف قطره 1.5مم وطوله 3كم محمـول علـى ستة ابـراج عاليـة ، فـأذا كانـت المقاومـة النوعيـة للنحـاس هى 1.65×10^{-6} أوم.سم وكـان معامل ازديـاد المقاومـة للنحـاس بأرتفـاع درجة الحرارة يساوى 0.0042 فأحسب

أ- المقاومة الكلية للسلك

ب- التغير فى مقومة السلك المحمول بين برجين متتالين بأرتفاع درجـة الحـرارة مـن الصفر الى 25 ^{O}م

الحـــل

العلاقة بين مقاومة السلك ومقاومته النوعية ومساحة من مقطعه تأتى من المعادلة الاتية:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$R = 1.65 \times 10^{-6} \frac{300000}{\Pi r^2} \qquad A = \Pi r^2$$

$$R = \frac{1.65 \times 10^{-6} \times 300000 \times 7}{22 \times 0.15 \times 0.15} = 7$$ أوم

ب-المسافة بين البرجين المتتاليين هى

$$\frac{3 \times 1000 \times 100}{5} = 60000$$

ومن العلاقة :

$$R_{25} = R_0 (1+ 0.0042 X 25)$$

$Ro = 7/5 = 1.4$ اوم

$R_{25} = 1.4 (1+ 0.0042 X 25) = 1.547$ أوم

مثال

سلك مقاومته فى درجة 25 ^{o}م هى 8.1 أوم ومقاومتة فى درجة 100 ^{o}م هى 10.8 أوم أستنتج مقاومة السلك فى درجة 150 ^{o}م وكذلك معامل أزدياد مقاومة السلك بتغير درجة الحرارة

الحــــــل

$$R_{25} = R_0 (1+\alpha (25-0)$$

$$R_{100}= R_0 (1+ \alpha(100-0)$$

حبث ان α هى معامل أزدياد المقاومة بأرتفاع درجة الحرارة ، وبقسم المعادلتين

$$\frac{R_{100}}{R_{25}} = \frac{1+100 \alpha}{1+25 \alpha}$$

$$10.8 = \underline{1+100 \alpha}$$

$8.1 \qquad 1+25\ \alpha$

$\alpha = 0.005$ أوم/درجة

نفترض ان مقاومة السلك فى درجة 150 هى R_{150}

$$\frac{R_{150}}{R_{100}} = \frac{1+150\ \alpha}{1+100\ \alpha}$$

$$\frac{R_{150}}{10.8} = \frac{1+150 \times 0.005}{1+100 \times 0.005}$$

$$\frac{R_{150}}{10.8} = \frac{1+0.75}{1+0.5}$$

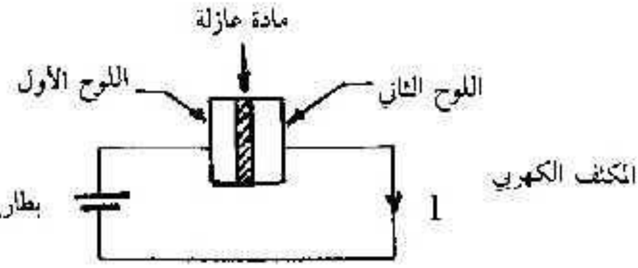
$$R_{150} = \frac{10.8 \times 1.75}{1.5}$$

$R_{150} = 12.6$ أوم

المكثفات (Capacitors)

يتكون المكثف الكهربي من لوحين من مادة موصلة بينهما مادة عازلة كما هو مبين في الشكل التالي، ويتحدد نوع المكثف على حسب المادة العازلة المستخدمة في صناعته، فإذا كانت المادة العازلة الموجودة بين لوحي المكثف هي الهواء فيطلق على المكثف في هذه الحالة اسم المكثف الهوائي، وإذا كانت مصنوعة من مادة البلاستيك سمي مكثف بلاستيك، وإذا كانت المادة العازلة من الميكا أطلق على المكثف اسم مكثف ميكا وإذا كانت المادة العازلة من السيراميك أطلق على المكثف اسم المكثف السيراميك، أما إذا استخدم محلول كيماوي كمادة عازلة بين لوحي المكثف أطلق على المكثف اسم المكثف الكيماوي أو الالكترولتي. وعادة ما يشحن بشحنتين متساويتين فى المقدار ومختلفتين فى الاشارة يستقر احداها على لوح والاخرى على اللوح المقابل وبالتالى فان الشحنة الكلية على المكثف تساوى صفرا . يتناسب كل منها مع المجال

الكهربى فى المنطقة بين اللوحين وفرق الجهد بين اللوحين V_{ab} مع القيمة العددية لاحدى الشحنتين Q



السعة:

تعرف قدرة المكثف على تخزين الشحنة الكهربية بالسعة الكهربية أو السعة ووحدة قياسها الفاراد، وتحسب قيمة سعة المكثف كالآتي:

$$\text{سعة المكثف (C) بالفاراد} = \frac{\text{الشحنة المخزونة في المكثف Q بالكولوم}}{\text{فرق الجهد بين اللوحين للمكثف V بالفولت}}$$

نستنتج من هذا القانون أن اختيار قيمة المكثف في الدائرة الإلكترونية تتحدد بعاملين أساسيين هما سعة المكثف، وقيمة فرق الجهد المطبق على طرفيه، ووحدة قياس سعة الفاراد يمكن تقسيمها إلى وحدات أصغر هي:

$$\text{الميكروفاراد} (\mu F) = \frac{١}{\text{مليون}} \text{ فاراد } (F)$$

$$\text{البيكوفاراد} (pF) = \frac{١}{\text{مليون}} \text{ ميكروفاراد } (\mu F)$$

العوامل المؤثرة على سعة المكثف:

يوجد ثلاثة عوامل أساسية تؤثر على سعة المكثف بصورة مباشرة وهذه العوامل هي:

أ- المساحة السطحية لألواح المكثف (a):

إن سعة المكثف تتناسب طرديا مع المساحة السطحية للألواح، فإذا زادت مساحة سطح اللوح زادت سعة المكثف وذلك لزيادة استيعابه للشحنات الكهربائية، وبالعكس تقل سعة المكثف كلما قلت هذه المساحة.

ب- المسافة بين الألواح (d):

تقل السعة عندما تزداد المسافة بين الألواح وتزداد كلما قلت تلك المسافة أي أنه يوجد تناسب عكسي بين سعة المكثف والمساحة بين ألواحه.

ج- الوسط العازل (المادة العازلة) ε:

تغير سعة المكثف بتغير المادة العازلة بين الألواح ويعتبر الهواء الوحدة الأساسية لمقارنة قابلية عزل المواد الأخرى المستعملة في صناعة المكثفات. يوجد لكل مادة ثابت عزل يطلق عليه ابسلون ε

مما سبق نجد أن سعة المكثف بدلالة المساحة السطحية للألواح (a) والمسافة بين الألواح d وثابت العزل للمادة العازلة **ε** يكون:

$$C = \epsilon \frac{a}{d}$$

وثابت العزلε في المعادلة يساوي حاصل ضرب ثابت العزل للهواءε_0 مضروب في ثابت العزل النسبي للمواد العازلة، بالتالي تكون

$$\epsilon = \epsilon_O \cdot \epsilon_r$$

وتكون ϵ_o تساوى $\epsilon_o = 8{\cdot}85 \times 10^{12}$ F/m

المفاعلة (مقاومة المكثف الأومية):

المكثف الكهربي له مقاومة أومية Xc (لأنها تقاس بوحدة الأوم) تتغير مع التردد(F) وتتناسب عكسيا مع كل من السعة C والتردد F ، ويمكن حسابها من القانون التالي:

من القانون
$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fc} = \frac{1}{(2x3{\cdot}14\ fc)}$$

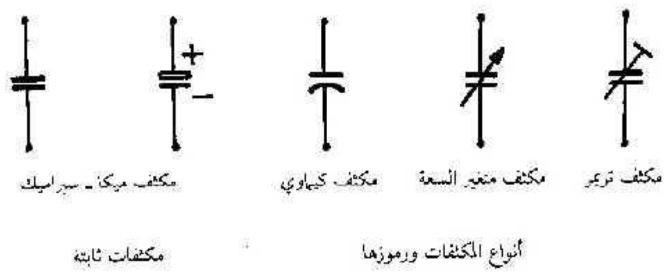
في حالة التيار المستمر تكون قيمة الترددF تساوي (صفر)، وتكون بالتالي قيمة مقاومة المكثف الأوميةXc كبيرة جدا (ما لا نهاية) وبذلك فإن المكثف يمنع مرور التيار المستمر في الدائرة، بينما يمرر التيار المتغير وهذه الخاصية تعد أهم وظائف استعمالات المكثف في الدائرة الإلكترونية.

أنواع وأشكال المكثفات:

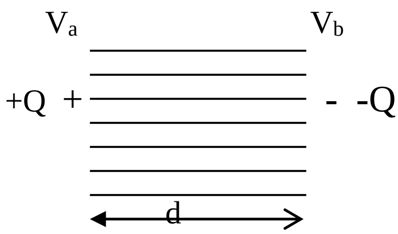
يطلق على المكثف ذي السعة الثابتة (المكثف الثابت)، أما المكثف الذي يمكن تغيير سعته (وذلك بتغيير المساحة المحصورة بين الألواح) فيطلق عليه اسم المكثف المتغير. يوجد أيضا نوع ثالث من المكثفات يمكن أن نتحكم في تغيير سعته، أو يترك دون تعديل

لفترات زمنية طويلة ويطلق عليه اسم (مكثف تريمر) الذي قد نلجأ لضبط قيمته عند إجراء أعمال الصيانة والإصلاح في الدائرة الإلكترونية.

والشكل التالي يبين الرموز الاصطلاحية لهذه الأنواع من المكثفات.



<u>المكثف ذو اللوحين المتوازيين</u>



يتكون من لوحين معدنين متوازيين بينهما مسافة صغيرة بالنسبة لابعادهما والمجال الكهربى لمثل هذه المكثفات منتظم ويتركز فى المنطقة بين اللوحين كما ان توزيع الشحنة على ألواح المكثف يكون منتظما.

<u>المكثفات الكريه :</u> يتكون المكثف الكروي من كرتين متحدى المركز حسب الشكل التالي ، فأذا فرضنا ان نصف قطر الدائرة الداخلية r_1 ونصف قطر الكرة الخارجية هو r_2 . فأذا شحنت الكرة الداخلية بشحنة مقدارها ($-Q$) فأن شحنة مقدارها ($+Q$) ننكون على سطح الكرة الخارجية المتصلة بالأرض اى إن جهدها يساوى الصفر حيث ان سعة المكثف

$$C = \frac{Q}{V}$$

ولكن جهد الكرة الداخلية المعزولة يتكون من

أ- جهد V_1 ناتج عن شحنة الكرة الداخلية $+Q$ ويساوى

$$V_1 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_1}$$

ب- جهد V_2 ناتج عن الشحنة التأثيرية $-Q$ الموجودة على الخارجية وهو ثابت على جميع نقط السطح الداخلى لهذه الكرة ويساوى جهدها عند السطح اى ان

$$V_2 = \frac{-Q}{4\pi\varepsilon_0 r_2}$$

أى ان الجهد الكلى (V) يساوى

$$V = V1 + V2$$

$$= \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_1} + \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_2} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q\, 4\pi\varepsilon_0\, (r_1 r_2)}{Q\, (r_2 - r_1)}$$

$$\mathbf{C = \frac{4\pi\varepsilon_0\,(r_1 r_2)}{(r_2 - r_1)}} \qquad *$$

ومن هذه المعادلة نرى ان سعة المكثف الكروى تزداد كلما نقصت المسافة بين الموصلين نتيجة لنقص الجهد نتيجة لاقتراب الشحنة السالبة على الكرة الخارجية من الشحنة الموجبة على الكرة الداخلية . كما ان السعة تقل كلما ازدادت المسافة بين الكرتين حتى تصبح اقل ما يمكن عندما تصبح الكرة الخارجية لا نهائية فى الكبر وهذه الحالة تمثل حالة الموصل الكرى المعزول الذى يتكون من موصل كروى معزول من

اى موصل اخر وهذا يصبح مثل المكثف الكروى حيث تكون السعة لا نهائية فى هذه الحالة تساوى

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q/4\pi\varepsilon_0 r}$$

ويمكن الوصول الى نفس النتيجة بالتعويض فى المعادلة * حيث يهمل قيمة r_1 بالنسبة الى قيمة r_2 التى تساوى فى هذه الحالة لا نهاية وفى هذه الحالة نحصل على

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0 r_1 r_2}{r_2} = 4\pi\varepsilon_0 r_1 \qquad \#$$

من المقارنة بين المعادلة * والمعادلة # نلاحظ ان سعة الموصل الكروى تزداد زيادة كبيرة جدا اذا أحيط بموصل اخر متصل بالارض

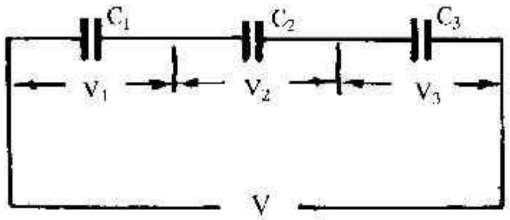
المكثفات متغيرات السعة

يتكون من مجموعتين من الالواح المعدنية المتوازية كل مجموعة متصلة كهربيا ببعضها وتكون معا احد لوحى المكثف. أحد المجموعتين ثابت والاخرى مركبة على محور متحرك وبدورانه يمكن للمجموعه الثانية ان تتحرك الواحها من خلال ألواح المجموعة الثابتة لتقليل ازدياد المساحة (A) ويرمز للمكثفات المتغيرة السعه بالرمز И

.

توصيل المكثفات على التوالى:

توصل المكثفات على التوالي للحصول على سعة كلية صغيرة أقل من أصغر سعة مكثف موجودة في الدائرة.



توصيل المكثفات على التوالي

$$\because \quad V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$\therefore \quad \frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$$

$$\therefore \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

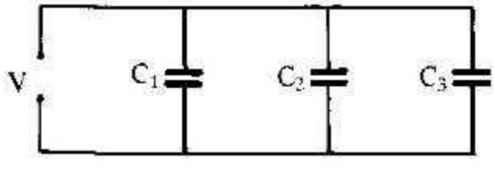
في حالة مكثفين على التوالي فإن السعة الكليةC تساوي

$$C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

نستنتج مما سبق أنه عند حساب القيمة الكلية لسعة مكثفات موصلة على التوالي يكون طريقة الحساب على عكس المتبع في المقاومات.

توصيل المكثفات على التوازي:

توصل المكثفات على التوازي للحصول على سعة كلية كبيرة تساوي مجموع سعة المكثفات المتصلة على التوازي في الدائرة.



توصيل المكثفات على التوازي

$$\because \text{الشحنة الكلية} \quad Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$\therefore \quad V \times C = V \times C1 + V \times C_2 + V \times C3$$

$$\therefore \quad C = C1 + C2 + C3$$

استعمالات المكثف فى الدائرة إلكترونية:

1- يستعمل المكثف لإمرار التيار المتغير ومنع مرور التيار المستمر في الدائرة الإلكترونية، حيث يعمل (كمكثف ربط) Coupling أو (مكثف تسريب) Bypass.

2- يستعمل المكثف الكيماوي للشحن والتفريغ في دوائر التنعيم التي تحول التيار المتغير إلى تيار مستمر.

3- يستعمل المكثف الكيماوي كبير السعة في دوائر فلاش كاميرا التصوير حيث يخزن شحنات كهربية عالية، وعندما يفرغ فجأة يعطي الضوء الأبيض الباهر اللازم لعملية التصوير.

4- يستعمل المكثف المتغير على التوازي مع ملف لاختيار المحطات (الترددات) في جهاز الراديو أو جهاز التلفزيون.

5- يوصل المكثف مع المقاومة في الدائرة الإلكترونية للحصول على أشكال موجات متنوعة ويطلق على الدائرة في هذه الحالة دائرة تفاضل أو دائرة تكامل.

أحسب مساحة اللوح (A) لمكثف سعته (C=1f) والمسافة بينهما هى 10^{-3} m

الحــل

$$\mathbf{C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}}$$

$$\mathbf{A = \frac{Cd}{\varepsilon_0}}$$

$$= \mathbf{\frac{1 \times 10^{-3}}{8.85 \times 10^{-12}} = 1.13 \times 10^{8}\ m^{2}}$$

وهذه مساحة كبيرة تزيد عن ($100\ km^2$) ويتضح من هذا المثال مدى ضخامة وحدة الفاراد .

مثال

يبعد لوحى مكثف ذو اللوحين المتوازيين (5×10^{-3}) عن بعضهما البعض ومساحة اللوح $2m^2$ وفرق الجهد 10^7 V أحسب

أ- سعة المكثف ب- الشحنة على كل لوح

ج- شدة المجال الكهربى بينم اللوحين

الحل

$$أ - C = \varepsilon o \frac{A}{D} = \frac{8.85 \times 10\text{-}12 \times 2}{5 \times 10\text{-}3}$$

$C = 3.54 \times 10\text{-}9 \; c^2 N^{-1} m^{-1}$

$1 c^2 N^{-1} m^{-1} = 1 c^2 j^{-1} = 1 c (J/c)^{-1} = 1 cv^{-1} = 1 F$

$C = 3.34 \times 10\text{-}9 \qquad F = 3.5 \times 10^{-3} \mu F$

ب $- Q = CV_{ab} = (3.54 \times 10^{-9}) (10^4) = 3.5 \times 10^{-5} C$

ولذلك فأن اللوح ذى الجهد الاعلى عليه شحنة مقدارها ($+ 3.54 \times 10^{-5}$) والاخر عليه شحنة مقدارها (-3.54×10^{-5}).

$$ج- E = \frac{Q}{\varepsilon_o A} = \frac{3.54 \times 10^{-5}}{(8.85 \times 10^{-12})^2} = 20 \times 10^5 NC^{-1}$$

أذن شدة المجال = انحدار الجهد

$$E = \frac{V_{ab}}{d} = \frac{10^4}{5 \times 10^3} = 20 \times 10^5 Vm^{-1}$$

مثال

مكثف مكون من لوحين كل منهما مساحته $7.6cm^2$ تفصل بينهما مسافة 1.8mm ، فأذا كان فرق الجهد بينهما هو 20V فأحسب

أ- المجال الكهربى بينهما

ب- كثافة الشحنة المتكونة على سطح اللوح

ت- السعة

ث- الشحنة على كل منهما .

الحل

$$\textbf{(a)}\ E=\frac{V}{d}=\frac{20}{1.8\times10^{-3}}=1.11\times10^{4}\ V/m$$

$$\textbf{(b)}\ \sigma=\varepsilon_o E=(8.85\times10^{-12})(1.11\times10^{4})=9.83\times10^{-8}\ C/m^2$$

$$\textbf{(c)}\ C=\frac{\varepsilon_o A}{d}=\frac{(8.85\times10^{-12})(7.6\times10^{-4})}{1.8\times10^{-3}}=3.74\times10^{-12}\ F$$

$$\textbf{(d)}\ q=CV=(3.74\times10^{-12})(20)=7.48\times10^{-11}C$$

مثال

مكثفان سعتهما (2 & 8) ميكروفاراد وصلا على التوالى . فاذا كان فرق الجهد على المجموعة هو 300 v

- أحسب الشحنة وفرق الجهد على كل مكثف
- أذا وصلا المكثفان على التوازى فاحسب الشحنة وفرق الجهد على كل مكثف

الحل

$$C=\frac{C_1 C_2}{C_1+C_2}=\frac{2\ X\ 8}{2+8}=1.6\ \mu F$$

$$Q=CV=1.6\times10^{-6}\times300=4.8\ 10^{-4}\ C$$

المكثفان على التوالى فتكون الشحنة متساوية ولكن فرق الجهد يختلف

$$Q1=Q2=Q=4.8\times10^{-4}\ C$$

$$V_1=\frac{Q}{C_1}=\frac{4.8\times10^{-4}}{2\times10^{-6}}=240\ v$$

$$V_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{4.8 \times 10^{-4}}{8 \times 10^{-6}} = 60 \text{ v}$$

عند توصيلهما على التوازى فأن

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 8 = 10\ \mu F$$

$$V_1 = V_2 = V = 300 \text{ volt}$$

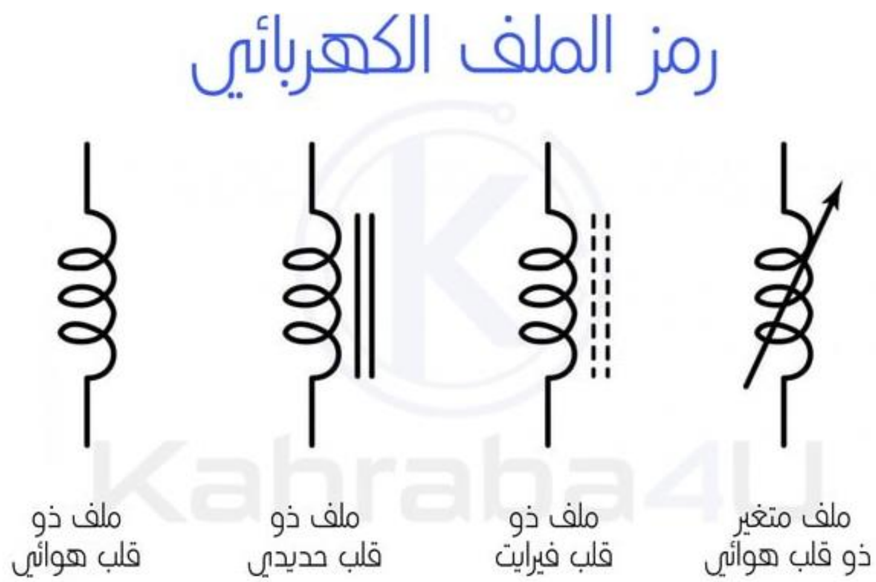
$$Q_1 = C_1 V = 2 \times 10^{-6} \times 300 = 6 \times 10^{-4} \text{ C}$$

$$Q_2 = C_2 V = 8 \times 10^{-6} \times 300 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ C}$$

الملفات

ما هو الملف الكهربائي؟

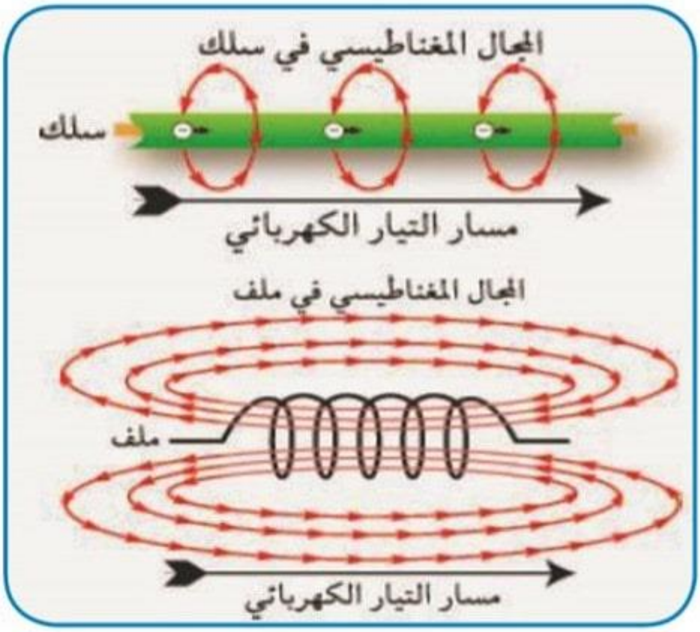
الملف الكهربائي (Inductor) هو سلك مصنوع من مادة موصلة مثل النحاس معزول وملفوف على حول قلب حديدي أو هوائي، وعند مرور تيار كهربائي في الملف يتولد مجال مغناطيسي حوله. وتختلف الملفات بعضها عن بعض من حيث عدد الملفات، ومساحة مقطع السلك الملفوف، وابعاد قلب الملف، ونوع مادة الإطار التي يُلف حولها السلك



يشير خط أو خطان متوازيان بجانب الملف إلى أنه ملفوف حول قلب صلب من مادة يمكن مغنطتها، بينما يشير خط أو خطان منقطان إلى أنه ملفوف حول قلب يحتوي على جزيئات معدنية، مثل برادة الحديد. أما في حالة عدم وجود أي خط أو نقاط فهذا يشير إلى أنه ملفوف حول قلب هوائي.

كيف يعمل الملف الكهربائي

عند توصيل الملف بمصدر تيار كهربائي يمكن للكهرباء التي تمر عبر سلك توليد مجال مغناطيسي حول السلك، وعلى العكس من ذلك يمكن للمغناطيس المتحرك بالقرب من السلك أن يحفز تيارًا كهربائيًا في السلك وفقًا لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي.



يستخدم هذا المبدأ في المولد الكهربائي ، وأيضًا في المحولات حيث يولد التيار المتردد في الملف الأولي مجال مغناطيسي متغير في القلب، ويتحول الفيض المغناطيسي الموجود في القلب إلى تيار متردد في الملف الثانوي.

المحاثه Inductance

المحاثة (Inductance) تعرف بأنها إعاقة الملف لمرور التيار الكهربائي به نتيجة لتولد للملف خاصية تسمى قوة دافعة كهربائية (emf) بين طرفي الملف، ناتجة عن تكون مجال مغناطيسي حوله عند مرور التيار الكهربائي به، ولأن قطبية هذه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة تكون معاكسة لقطبية القوة الدافعة الكهربائية للمصدر، فإنها ستدفع تيارًا معاكسًا للتيار الأصلي المار في الدارة؛ ما يعيق مروره.

يقوم الملف بتخزين الطاقة الكهربائية على شكل مجال مغناطيسي حول الملف، وهذه الطاقة يتم تفريغها في الملف عند ضعف التيار المار في الدارة الكهربائية، أو انقطاعه.

مقدار الطاقة المخزونة في الملف يمكن إيجادها من العلاقة التالية

$$W = 0.5 \times L \times I2$$

حيث أن (W) هي الشغل وتقاس بالجول، (L) المحاثة وتقاس بالهنري، (I)التيار ويقاس بالأمبير.

يرمز لمحاثة الملف بالحرف(L) ، وتقاس بوحدة تسمى هنري(H) ، وهى وحدة كبيرة تستخدم عوضًا عنها أجزاؤها الصغرى، مثل: ميللي هنري mH ومايكرو هنري μH.

ميللي هنريmH	10^{-3}هنريH
مايكرو هنريμH	10^{-6}هنريH
نانو هنريnH	10^{-9}هنريH

العوامل المؤثرة في قيمة المحاثة

1- **عدد لفات الملف:** بازدياد عدد لفات الملف تزداد شدة المجال المغناطيسي حول الملف وتزداد محاثته.(L)
2- **مساحة مقطع الملف:** كلما زادت مساحة مقطع الملف زادت محاثته(L)
3- **طول الملف:** كلما زاد طول الملف انخفض مقدار الحث الذات.D
4- **نوع مادة القلب المغناطيسي:** كلما كانت نفاذية مادة القلب الملفوف عليها الملف أكبر، كانت المحاثة (L) أكبر

.

أنواع الملفات الكهربائية

يمكن تصنيف الملفات الكهربائية من حيث نوع القلب، أو ثبات قيمتها، أو الترددات التي تعمل عليها إلى ما يأتي:

أنواع الملفات الكهربائية وفق نوع القلب:

ملف ذو قلب الهوائي

ملف ذو قلب الحديدي

ملف ذو قلب فرايت

أنواع الملفات وفق ثبات قيمتها:

ملفات ثابتة القيمة

ملفات متغيرة القيمة

أنواع الملفات من حيث الترددات التي تعمل عليها:

ملفات التردد المنخفض

ملفات التردد المتوسط

ملفات التردد العالي

الحث الذاتي :

اذا كانت قيمة التيار المار في الملف تتغير زيادة ونقصا كما هو الحال مع التيار المتردد ، فان قيمة المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار تتغير ايضا زيادة ونقصا وفي هذه الحالة يتولد على طرفي الملف جهد يعارض الزيادة والنقص في التيار المار في الملف وكلما زاد معدل تغير التيار كلما زادت قيمة هذا الجهد المعارض لحدوث التغيير وخاصية المعارضة هذه تسمى " الحث الذاتى " .

ويسمى الجهد العارض لحدوث التغير : جهد مستحث أو جهد مستنتج أو جهد مولد بالحث الذاتى . يقاس الحث الذاتى لملف بوحدة (الهنري) أو (المللى هنري) .

والمللى هنرى يساوى 10^{-3} هنري.

ممانعة الملفات :

ممانعة الملف = 2× ط × التردد × حث الملف . ط= 3.14

يزيد الحث الذاتى لملف اذا :

1- زادت مساحة مقطعة وقل طوله .

2- زاد عدد لفاته .

3- كان للملف قلب من مادة مغناطيسية كالحديد أو مسحوق الحديد أو من مادة الفيريت .

والعكس صحيح .

تزيد ممانعة الملف :

1- بزيادة تردد الاشارة المارة بالملف .

2- بزيادة حث الملف .

3- بكليهما .

معامل الارتباط الكهرومغناطيسى بين الملفات

يعرف معامل الارتباط المغناطيسي بين ملفين بأنه النسبة بين القيمة الفعلية للحث المتبادل بين الملفين إلى القيمة العظمى الممكنة لهذا الحث ، والقيمة العظمى للحث المتبادل نحصل عليها في حالة الملفات المثالية عندما لا يحدث اى فقد للفيض المغناطيسي الناتج عن كل منهما بمعنى عندما يرتبط كل الفيض المغناطيسي الناتج من احد الملفين بالملف الأخر دون فقد . فإذا فرضنا ملفين ولهما معاملات الحث الذاتي L_1 & L_2 ومن الناحية العملية فان الفيض المغناطيسي الناتج فى الملف الأول لا يرتبط كلية بالملف الثاني نتيجة للفقد المغناطيسي . فإذا فرضنا ان جزء من الفيض المغناطيسي فى الملف الاول وقدره K_1 سيرتبط او يؤثر فى الملف الثاني وبالمثل K_2 هى جزء الفيض المغناطيسي الذى يؤثر فى الملف الثاني وعلى ذلك فأن

$$M^2 = K_1 K_2 L_1 L_2$$

واذا فرضنا ان

$$K = K_1 = K_2$$

$K^2 = K_1 K_2$

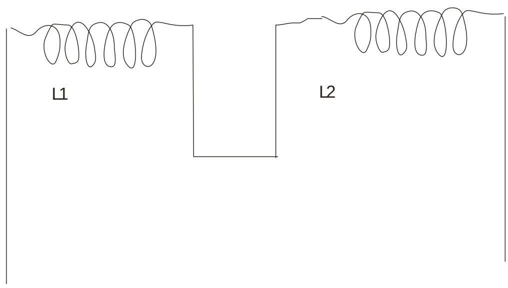
$M^2 = K^2 L_1 L_2$

$K = M /(L_1L_2)^{-1/2} = \frac{M}{M_{max}}$

حيث ان K هو معامل الارتباط الكهرومغناطيسبين الملفين وعندما تكون K = الوحدة يقال ان الملفين مرتبطان مغناطيسيا تاما وعندما تكون K = الصفر يقال ان الملفين معزولين مغناطيسيا.

حساب معامل الحث المكافىء لمجموعة ملفات

التوصيل على التوالى



فى هذه الحالة سوف ندرس طريقتين للتوصيل

1- عندما تتصل الملفات مع بعضها على التوالى بحيث تكون القوة الدافعة الكهرومغناطيسية الناتجة عنهما لها نفس الاتجاة

فأذا فرضنا ان معامل الحث المتبادل بين الملفين M ، L1 هو معامل الحث الذاتى للملف الاول ، L2 هو معامل الحث الذاتى للملف الثانى.

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير الذاتى فى الملف الاول هى

$E_1 = -L_1 \frac{di}{dt}$ volt

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير المتبادل فى الملف الاول هى

$$E_1 = -M \frac{di}{dt} \quad volt$$

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير الذاتى فى الملف الثانى هى

$$E_2 = -L_2 \frac{di}{dt} \quad volt$$

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير المتبادل فى الملف الثانى هى

$$E_2 = -M \frac{di}{dt} \quad volt$$

وتكون محصلة القوة الدافعة المؤثرة هى

$$E = -\frac{di}{dt} (L_1 + L_2 + 2M)$$

وتكون محصلة الحث المكافىء للمجموعة هى

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$

ب- عندما تتصل الملفات مع بعضها على التوالى بحيث تكون القوة الدافعة الكهرومغناطيسية الناتجة فى أتجاهين متعاكسين

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير الذاتى فى الملف الاول هى

$$E_1 = -L_1 \frac{di}{dt} \quad volt$$

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير المتبادل فى الملف الاول هى

$$E_1 = M \frac{di}{dt} \quad volt$$

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير الذاتى فى الملف الثانى هى

$$E_2 = -L_2 \frac{di}{dt} \quad volt$$

القوة الدافعة الكهربية الناتجة بالتأثير المتبادل فى الملف الثانى هى

$$E_2 = M \frac{di}{dt} \quad \text{volt}$$

وتكون محصلة القوة الدافعة المؤثرة هى

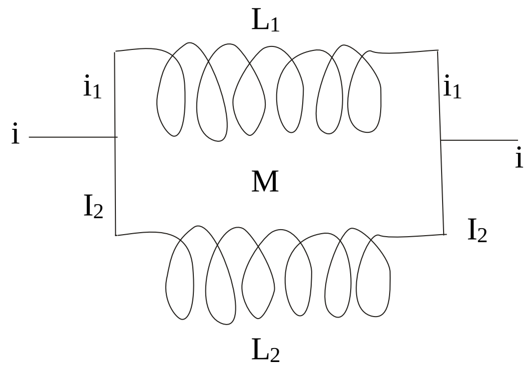
$$E = -\frac{di}{dt}\,(L_1 + L_2 - 2M) \quad \text{volt}$$

وتكون محصلة الحث المكافىء للمجموعة هى

$$L = L_1 + L_2 - 2M \quad \text{hennery}$$

2- <u>التوصيل على التوازى</u>

يوضح الشكل التالى ملفين متصلين على التوازى ومعامل الحث الذاتى لهما هو L1 ، L2 ومعامل الحث المتبادل بينهما M . فأذا كان التيار الكلى المار فى المجموعة من المصدر هو (i) والتيار المارفى كلا الملفين هو i_1 ، i_2



فأن

$$I = I_1 + I_2$$

والمعدل الزمنى لتغير التيار هو

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt}$$

ونتيجة لتغير التبار فى الدائرة تنتج فى كل ملف قوة دافعة كهربية تأثيرية نتيجة الحث الذاتى المتبادل وحيث ان الملفين متصلين على التوازى فان القوة الدافعة الكهربية بين

طرفى الملفين تكون متساوية وتكون هذه القوة لكلا الملفين لها نفس الاتجاة وتكون محصلة القوى الدافعة التأثيرية هى :

$$E = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt}$$

$$= L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt}$$

$$\frac{dI_1}{dt} (L_1 - M) = \frac{dI_2}{dt} (L_2 - M)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{(L_2 - M)}{(L_1 - M)} \frac{dI_2}{dt}$$

وبالتعويض فى المعادلة التى تمثل المعدل الزمنى لتغير التيار فأن

$$\frac{dI}{dt} = \left(\frac{L_2 - M}{L_1 - M} + 1 \right) \frac{dI_2}{dt}$$

ومن المعادلتين الاخيرتين نحصل على

$$-L \frac{dI}{dt} = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt}$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \left(L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} \right)$$

وبالتعويض عن قيمة $\frac{dI}{dt}$ نحصل على

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \left[L_1 \left(\frac{L_2 - M}{L_1 - M} \right) + M \right] \frac{dI_2}{dt}$$

$$\frac{1}{L} \left[L_1 \left(\frac{L_2 - M}{L_1 - M} \right) + M \right] \frac{dI_2}{dt} = \frac{dI_2}{dt} \left[\frac{L_2 - M}{L_1 - M} + 1 \right]$$

$$\left[\frac{L_2 - M}{L_1 - M} + 1 \right] = \frac{1}{L} \left(L_1 \frac{L_2 - M}{L_1 - M} + M \right)$$

$$\frac{L_1 + L_2 - 2M}{L_1 - M} = \frac{1}{L} \left(\frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 - M} \right)$$

وعلى ذلك عندما يكون الفيض نتيجة الحث المتبادل فى نفس اتجاة الفيض الناتج عن الحث الذاتى

$$L = \left(\frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \right)$$

وعندما يكون الفيض نتيجة الحث المتبادل فى عكس أتجاة الفيض نتيجة للحث الذاتى

$$L = \left(\frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \right)$$

تأثيرات التيار الكهربى

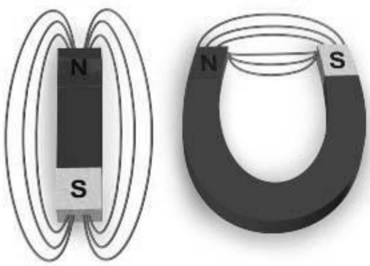
التأثير المغناطيسي للتيار الكهربي

في عام 1820 لاحظ العالم اورستد Orested أنه إذا مر تيار في سلك فإنه ينشأ تأثير مغناطيسي متمثلاً في انحراف ابرة مغناطيسية موضوعة بجوار السلك، وكما سندرس لاحقاً أن المجال المغناطيسي ينشأ عن الشحنات في حالة حركة (تيار كهربي) وقد ربط اكشاف اورستد علاقة بين علم الكهربية وعلم المغناطيسية .

تعرف المنطقة المحيطة بمغناطيس دائم أو موصل يمر به تيار بمنطقة مجال مغناطيسي Magnetic field والمقصود بكلمة مجال field هو تأثير فيزيائي يأخذ قيم

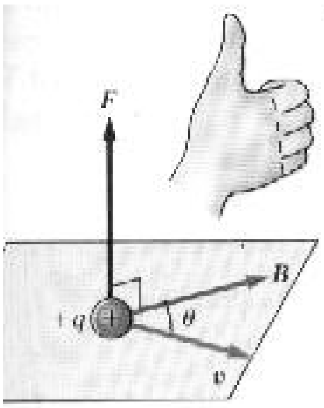
مختلفة في الفراغ. والمتجه الأساسي في التأثيرات المغناطيسية يسمى متجه الحث المغناطيسي Magnetic induction vector ويرمز له بالرمز.B

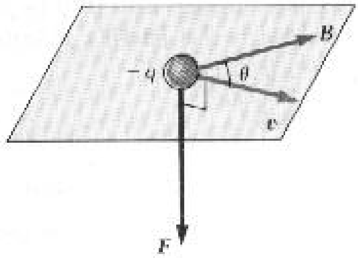
يمكن تمثل المجال المغناطيسي بخطوط القوى المغناطيسية بحيث يكون كثافة الخطوط لكل وحدة مساحات من عنصر مساحة عمودي على اتجاه خطوط القوى هو مقدار المجال المغناطيسي. ويكون اتجاه المماس لخط القوى عند أي نقطة عليه يعطي اتجاه المجال المغناطيسي B عند تلك النقطة.



لتعريف المجال المغناطيسي سوف نستخدم التعريف الاجرائي Operational Definition والتي تعتمد على الطريقة العملية لقياس المجال المغناطيسي.

ويكون اتجاه المجال المغناطيسي في اتجاه دوران بريمة تدور من v إلى B كما في الشكل التالي:وتتحدد اتجاه المجال المغناطيسى بالنسبة لاتجاة التيار المار فى سلك بواسطة قاعدة اليد اليمنى التى تنص اذا امسك السلك باليد اليمنى بحيث يشير الابهام الى اتجاة التيار كان اتجاة الاصابع الاخرى حول السلك هو اتجاة المجال كما أن القوة المغناطيسية على الشحنة السالبة يكون في عكس القوة المغناطيسية على الشحنة السالبة.





وحدة المجال المغناطيسي B هي Tesla ويرمز لها بالرمز T

ووحدة Tesla هي وحدة كبيرة ويمكن استخدام وحدة الجاوس في نظام جاوس للوحدات حيث أن

Tesla = 10^4 Gauss

المجال المغناطيسي

Magnetic Fields

الكثير من المؤرخين يعتقدون ان البوصلة التي تستخدم الإبرة المغناطيسية قد استخدمتفي الصين في مطلق القرن الثالث عشر قبل الميلاد، ويعتقد انها في الأصل من اختراعالعرب او الهنود. تعرف اليونانيون على المغناطيسية في مطلق العام 800 قبل الميلاد .لقد اكتشفوا ان حجر الماجنتيت او أكسيد الحديد الأسود) ^{4Fe3O}(يجذب قطع من الحديد .وتقول الاساطير القديمة ان اسم مغناطيس يعود إلى راعي اغنام يدعى ماغنس شعر بانجذاب المسامير في حذائه بحجارة الماجنتيت على انه اول من اكتشف المغناطيسية تجوله في الأراضي لرعاية الاغنام.

في العام 1269 وجد بير دي ماريكورت Pierre de Maricourt الفرنسي ان اتجاهات ابرة بالقرب من مغناطيس طبيعي كروي الشكل تشكل خطوط تحيط بالكرة وتمر خلال نقطتين متعاكستين لبعضهما البعض، والتي عرفتا بالاسم قطبي المغناطيس. التجارب التي أجريت بعد ذلك اثبتت ان كل مغناطيس مهما كان شكله يمتلك قطبين احدهما يعرف بالقطب الشمالي والأخر بالقطب الجنوبي، ويبذل كل قطب قوى مغناطيسية على القطب الاخر. بحيث ان الأقطاب المتشابهة تتنافر والاقطاب المتعاكسة تتجاذب مع بعضها البعض.

التسمية التي اطلقت على كل قطب جاءت من طريقة تصرف المغناطيس في وجود المجال المغناطيسي للأرض. اذا قمنا بتعليق مغناطيس من نقطة في وسطه وسمح له بالدوران بحرية في الاتجاه الافقي، فانه سوف يستمر في الدوران حتى يتجه قطبه الشمالي إلى الاتجاه الشمال الجغرافي للأرض ويتجه قطبه الجنوبي إلى اتجاه الجنوب الجغرافي للأرض.

في العام 1600 اجرى العالم وليام جيلبيرت William Gilbert (1540 – 1603) المزيد من التجارب على العديد من المواد. لقد عرف ان إبرة البوصلة تتخذ اتجاهات مفضلة، لذلك فقد اقترح ان الأرض نفسها عبارة عن مغناطيس دائم كبير. في العام 1750 أجريت العديد من التجارب باستخدام ميزان اللي لاثبات ان الأقطاب المغناطيسية تبذل قوة تجاذبية او تنافرية على بعضها البعض وان هذه القوى تتغير عكسيا مع مربع المسافة بين الأقطاب المتقابلة. بالرغم من ان القوى بين الأقطاب المغناطيسية تشبه القوى بين شحنيتن كهربيتين، الا ان الشحنات الكهربية يمكن فصلها عن بعضها البعض (كما في الالكترون والبروتون) في حين انه لا يمكن فصل قطب مغناطيسي عن القطب الاخر .

لذلك فاننا نجد ان الأقطاب المغناطيسية تتواجد في شكل ازواج، ومهما قمنا بتقسيم المغناطيس إلى قطع صغيرة يكون دائما لدينا قطبين مغناطيسيين قطب شمالي وقطب جنوبي.

هانز كريستيان اورستيد. Hans Christian Oersted فيزيائي وكيميائي دينماركي (1777 - 1851)

سلك يمر فيه تيار كهربي. هذا الاكتشاف الهام كان هو الاثبات الاولي للعلاقة بين الكهربية والمغناطيسية. كما ان العالم اورستيد هو اول من حضر الألومنيوم النقي.

اكتشفت العلاقة بين المغناطيسية والكهربية في العام 1819 اثناء قيام العالم هانز كريستيان اورستيد Hans Christian Oersted بعرض تجربة في محاضرة له حيث واجد ان التيار الكهربي في السلك يتسبب في انحراف ابرة مغناطيسية موجودة بالقرب من سلك يمر به التيار الكهربي. في العام 1820 اكتشف بشكل مستقل كلا من العالم فارادي Faraday والعالم جوزيف هنري Joseph Henry (1797 - 1878) نفس العلاقة بين الكهربية والمغناطيسية. لقد اثبتا ان التيار الكهربي يمكن ان ينتج في الدائرة اما بواسطة تحريك مغناطيس بالقرب من دائرة كهربية او بتغير التيار الكهربي بالقرب من دائرة. تظهر هذه الملاحظات ان المجال المغناطيسي المتغير ينتج مجالا كهربيا. بعد مرور عدة أعوام اثبت العالم ماكسويل Maxwell بالاشتقاق النظري ان العكس ممكن أيضا، أي تغير المجال الكهربي ينتج مجالا مغناطيسيا.

في هذا الفصل سوف نقوم بدراسة القوى التي تؤثر على شحنة متحركة وكذلك التيتؤثر على سلك يمر فيه تيار كهربي في وجود مجال مغناطيسي. سوف ندرس مصدر المجالالمغناطيسي في الفصل الثاني من هذا الكتاب.

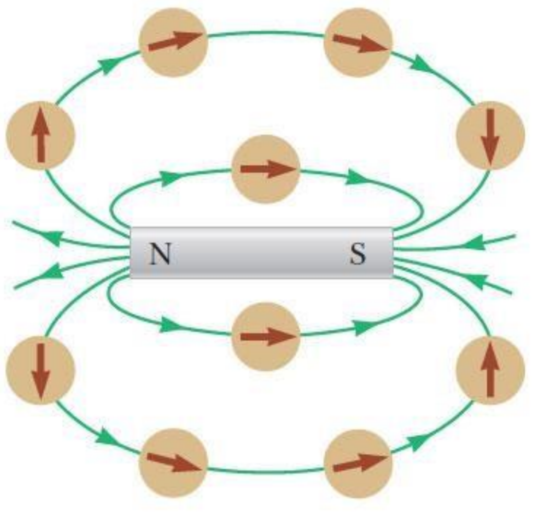
Magnetic Fields and Forces

1.1المجالات والقوى المغناطيسية

من دراستنا للكهربية قمنا بوصف التفاعلات بين الاجسام المشحونة بدلالة المجال الكهربي. تذكر المجال الكهربي المحيط باي شحنة كهربية. بالإضافة إلى الشحنات الكهربية الساكنة تمتلك مجالا كهربيا، فان المنطقة المحيطة بشحنة متحركة تمتلك أيضا مجالا مغناطيسيا. كذلك فان المجال المغناطيسي يحيط بالمغناطيس.

استخدم الرمز $\vec{B}$ لتمثيل المجال المغناطيسية وسوف نستخدمه أيضا في هذا الكتاب. اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عند أي موضع يكون في اتجاه إبرة بوصلة مغناطيسية عند ذلك الموضع. على نحو مشابع للمجال الكهربي يمكننا ان نمثل المجال المغناطيسي بخطوط تعرف باسم خطوك المجال المغناطيسي.

يوضح الشكل 1.1 خطوط المجال المغناطيسي لساق مغناطيسية يمكن أيضا تتبع هذه الخطوط بواسطة إبرة بوصلة مغناطيسية. لاحظ ان خطوط المجال المغناطيسي خارج المغناطيس تتجه من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي .كما يمكن توضيح خطوط المجال المغناطيسي لساق مغناطيسية باستخدام برادة حديد كما هو موضح في الشكل 1.2.

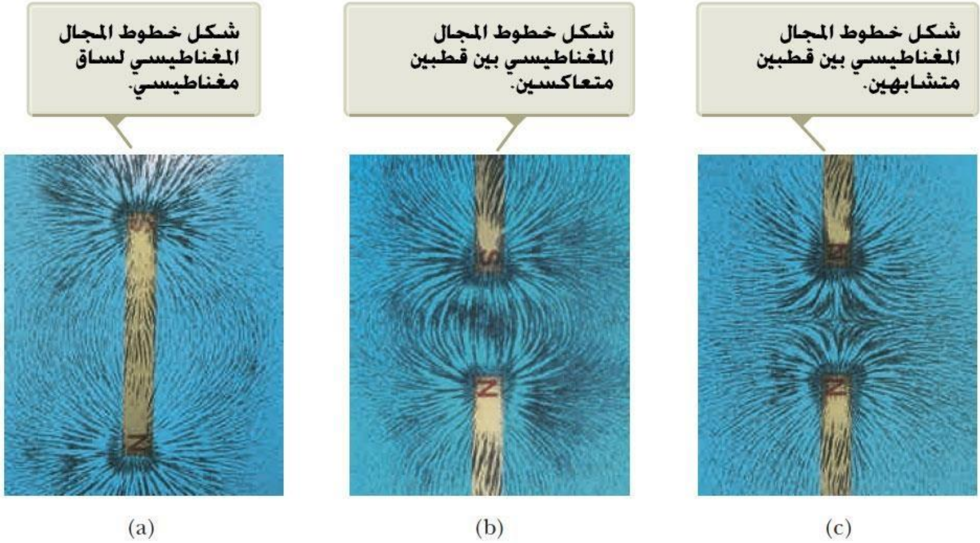


الشكل 1.1 يمكن استخدام إبرة بوصلة لتتبع خطوط المجال المغناطيسي في منطقة خارج ساق مغناطيسية.

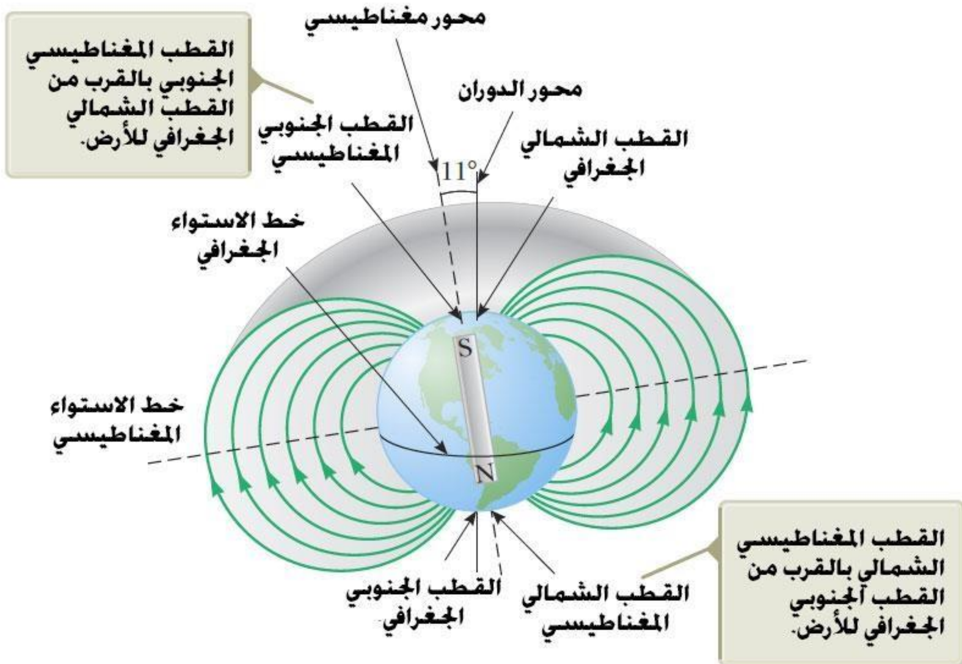
عند الحديث عن قطبي مغناطيس البوصلة وهما القطب الشمالي والقطب الجنوبي فانه من الأنسب ان نقول القطب الباحث عن الشمال والقطب الباحث عن الجنوب. هذا

يعنيان القطب الباحث عن الشمال يشير دائما إلى القطب الشمالي الجغرافي، بينما القطب الباحث عن الجنوب يشير دائما إلى القطب الجنوبي الجغرافي .حيث ان القطب الشمالي للمغناطيس ينجذب نحو القطب الشمالي الجغرافي، فإن موضع القطب المغناطيسي الجنوبي يقع بالقرب من القطب الشمالي الجغرافي والقطب المغناطيسي الشمالي يقع بالقرب من القطب الجنوبي الجغرافي. يوضح الشكل 1.3 صورة لمجال المغناطيسية الأرضية والذي يشبه تماما المجال المغناطيسي الناتج عن ساق مغناطيسي افتراضي مدفون في داخل الكرة الأرضية. اذا كانت الإبرة المغناطيسية مثبتة بشكل يسمح لها الدوران بحرية في المستوى الرأسي وكذلك في المستوى الأفقي، فان الإبرة تكون افقية بالنسبة لسطح الأرض فقط عندما تكون بالقرب من خط الاستواء. مع حركة البوصلة نحو الشمال فان الإبرة المغناطيسية للبوصلة سوف تدور بحيث تشير اكثر واكثر نحو سطح الأرض .
أخيرا عند نقطة بالقرب من بحيرة هدسون في كندا فان القطب الشمالي للابرة المغناطيسية سوف يشير مباشرة إلى الأسفل .اكتشف هذا الموقع في العام 1832 وقد اعتبر على انه موضع القطب المغناطيسي الجنوبي للأرض. ويبعد حوالي 1300 ميل تقريبا عن القطب الشمالي الجغرافي للأرض، والموضع الدقيق يتغير ببطء شديد مع الزمن. بالمثل فان القطب المغناطيسي الشمالي للارضي يبعد حوالي 1200 ميل عن القطب الجنوبي الجغرافي للأرض.

بالرغم من ان شكل المجال المغناطيسي للأرض يشبه تماما للمجال المغناطيسي لساق كبيرة داخل باطن الأرض، فانه من السهل فهم لماذا لا يكون مصدر هذا المجال المغناطيسي كتلة كبيرة من المواد الدائمة المغناطيسية. يوجد الكثير من الحديد الخام في باطن الأرض الا ان درجة الحرارة العالية في باطن الأرض تمنع الحديد من الاحتفاظ باي مغناطيسية دائمة. اعتبر العلماء ان مصدر المجال المغناطيسي للأرض هو تيارات الحمل convection currents في باطن الأرض. الايونات المشحونة او الالكترونات التي تدور في الوسط السائل في باطن الأرض قد ينتج مجالا مغناطيسيا تماما مثلما تفعل حلقة تيار كهربي كما سوف نوضحه في الفصل الثاني من هذا الكتاب.



الشكل 1.2 اشكال المجال المغناطيسي المختلفة تظهر بنشر برادة الحديد على ورقة فوق مغناطيس



الشكل 1.3 خطوط المجال المغناطيسي للكرة الأرضية

كما يوجد أيضا دليل قوي على ان مقدار المجال المغناطيسي لكوكب يرتبط مع معدلدوران الكوكب حول نفسه. على سبيل المثال يدور كوكب المشتري بسرعة اكبر منالأرض وقد أفادت المجسات الفضائية ان المجال المغناطيسي لكوكب المشتري اقوى من المجال المغناطيسي للأرض. أما كوكب الزهرة يدرو بسرعة اقل من كوكب الأرض وقد وجد ان مجاله المغناطيسي اضعف من المجال المغناطيسي للأرض. لازالت البحوث والدراسات تجرى على منشأ المغناطيسية الأرضية .

اتجاه المجال المغناطيسي الأرضي قد انعكس عدة مرات خلال الملايين من السنوات السابقة. تتشكل صخور البازلت في أعماق المحيطات تحت تأثير النشاط البركاني.مع انخفاض درجة حرارة الحمم البركانية فانها تتصلب وتحافظ على صورة اتجاه المجال المغناطيسي للأرض. أجريت دراسات لتقدير اعمار هذه الصخور للحصول على معلومات حول الخط الزمني للانعكاسات التي حدثت في المجال المغناطيسي للأرض.

يمكننا ان نعرف المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عند نقطة محددة في الفراغ بدلالة القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$ التي يبذلها المجال على جسيم مشحون يتحرك بسرعة $\vec{v}$، والتي نطلق عليه باسم جسم الاختبار .في الوقت الراهن دعنا نفترض عدم وجود مجال كهربي او مجال الجاذبية عند موضع جسم الاختبار. التجارب العديدة التي أجريت على اجسام مشحونة ومتحركة في مجال مغناطيسي أعطت النتائج المتنوعة التالية:

خواص القوة المغناطيسية على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي

- مقدار القوة المغناطيسية FB المبذولة على جسيم تتناسب طرديا مع الشحنة q وسرعة الجسيم v.
- عندما يتحرك الجسيم المشحون بشكل موازيا مع متجه المجال المغناطيسي فان القوة المغناطيسية المؤثرة على الجسيم تساوي صفر.
- عندما يصنع متجه سرعة الجسيم أي زاوية $\Theta \neq 0$ مع المجال المغناطيسي، فان القوة المغناطيسية تؤثر في اتجاه عمودي على كلا من $\vec{v}$ و$\vec{B}$ كما هو موضح في الشكل 1.4 a.
-
-

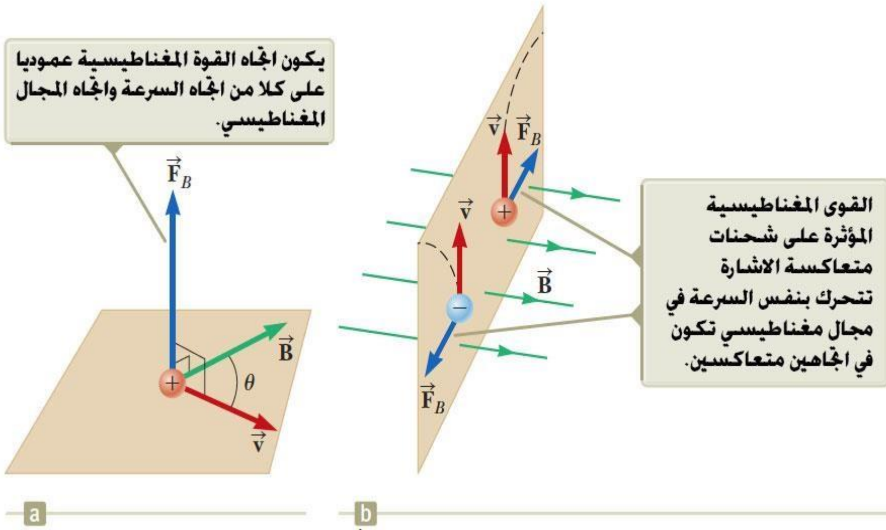
- القوة المغناطيسية المبذولة على الشحنة الموجبة تكون في اتجاه معاكس لاتجاه القوةالمغناطيسية المبذولة على شحنة سالبة تتحرك في نفس الاتجاه كما هو موضح فيالشكل 1.4 b.
- مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على جسيم متحرك يتناسب طرديا مع $\sin \Theta$ حيث ان Θ هي الزاوية التي يصنعها متجه سرعة الجسيم مع الاتجاه $\vec{B}$.

يمكننا ان نلخص هذه الملاحظات بكتابة القوة المغناطيسية في صورة

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \qquad (1.1)$$

هذه هي الصورة الاتجاهية للقوة المغناطيسية المؤثرة على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي.

واتجاه القوة المغناطيسية نحصل عليه من خلال خصائص الضرب الاتجاهي ويكون عموديا على كلا من $\vec{v}$ و $\vec{B}$. يمكن اعتبار هذه المعادلة على انها تعريف اجرائي)أي تم الحصول عليه بواسطة التجارب(للمجال المغناطيسي عند نقطة محددة في الفراغ. هذا يعني ان المجال المغناطيسي يعرف بدلالة القوة المؤثرة على جسيم مشحون متحرك.



الشكل 1.4)a(اتجاه القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$ المؤثرة على جسيم مشحون متحرك بسرعة $\vec{v}$ في وجود مجال مغناطيسي $\vec{B}$.)b(القوى المغناطيسية على شحنة موجبة وشحنة سالبة. الخطوط المتقطعة تبين مسار الجسيمات تحت الدراسة والتي سوف نوضحها في الفصل القادم 1.2.

الشكل 1.5 يوضح قواعد اليد اليمنى المستخدمة لتحديد اتجاه الضرب $\vec{B}$

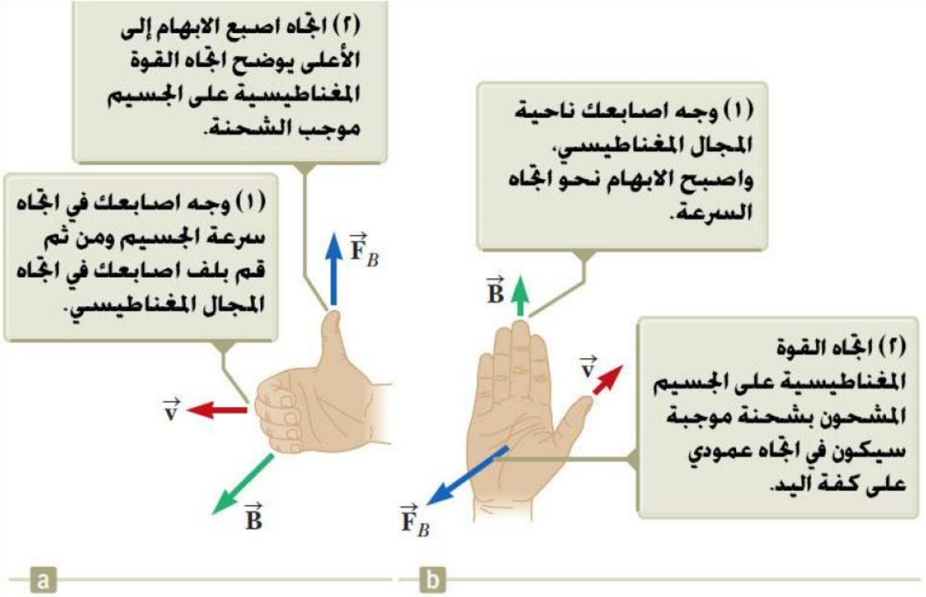
الاتجاهي وتحديد اتجاه القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$. القاعدة في الشكل $\vec{v} \times \vec{B}$ تعتمد على اليد اليمنى للضرب الاتجاهي حيث تشير الأربعة أصابع لليد اليمنى إلى اتجاه المجال المغناطيسي ، اما اصبع الابهام الممدود الذي يكون عموديا على باقي الأصابع يشير اتجاه $\vec{v} \times \bar{B}$. حيث ان ، و $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ $\vec{F}_B$ تكون في اتجاه اصبع الابهام اذا كانت الشحنة q موجبة وتكون في عكس اتجاه اصبع الابهام اذا كانت الشحنة q سالبة.

القاعدة البديلة موضحة في الشكل 1.5 b. هنا يشير اصبع الابهام إلى اتجاه السرعة $\vec{v}$ وتشير الأصابع الممدودة إلى اتجاه المجال $\vec{B}$. الان متجه القوة $\vec{F}_B$ على الشحنة الموجبة يكون متجها إلى الخارج من الكف. الميزة لهذه القاعدة هي ان القوة المؤثرة على الشحنة في اتجاه دفع شيء ما بيدك إلى الخارج من كفك. القوة المؤثرة على الشحنة السالبة تكون في عكس الاتجاه. يمكنك ان تستخدم أي من هاتين القاعدتين.

مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة على الجسيم المشحون هي

$$F_B = |q|vB\sin\theta \qquad (1.2)$$

حيث ان الزاوية Θ هي اصغر زاوية بين $\vec{v}$ و $\vec{B}$. من هذه المعادلة نرى ان القوة F_B تكون مساوية للصفر عندما $\vec{v}$ تكون موازية أو في عكس اتجاه $\vec{v}$)عندما تكون θ تساوي صفر او 180^o(واقصى قيمة لها عندما تكون $\vec{v}$ عمودية على $\vec{B}$)عندما تكون $\Theta = 90^o$).



الشكل 1.5 قاعدتين لليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ المؤثرة على جسيم يحمل شحنة q ويتحرك بسرعة $\vec{v}$ في مجال مغناطيسي $\vec{B}$. (a) في هذه القاعدة يكون اتجاه القوة المغناطيسية في اتجاه اصبع الابهام. (b) في هذه القاعدة يكون اتجاه القوة المغناطيسية في تجاه الكف كما لو كنت تدفع جسيم بيدك.

الجدول 1.1 بعد قيم المجال المغناطيسي

مصدر المجال المغناطيسي	مقدار المجال (T)
مختبر به مغناطيس قوي من الموصلات الفائقة	30
مختبر به مغناطيس قوي من مواد عادية	2
وحدة طبية للتصوير بالرنين المغناطيسي	1.5
ساق مغناطيسية	10-2
سطح الشمس	10-2
سطح الأرض	0.5×10^{-4}
داخل دماغ الانسان (نتيجة للنبضات العصبية)	10-13

الفروقات الأساسية بين القوة الكهربية والمغناطيسية

- متجه القوة الكهربية يكون في اتجاه خطوط المجال الكهربي، بينما متجه القوة المغناطيسية يكون عموديا على المجال المغناطيسي.
- تؤثر القوة الكهربية على الجسيم المشحون بغض النظر اذا كان الجسيم ساكنا او متحركا، بينما القوة المغناطيسية تؤثر على الجسيم المشحون فقط عندما يكون متحركا.
- تبذل القوة الكهربية شغلا في إزاحة الجسيم المشحون، بينما القوة المغناطيسية المرتبطة مع مجال مغناطيسي مستقر لا تبذل شغلا عندما يتحرك الجسيم لان القوة المغناطيسية عمودية على اتجاه الازاحة.

من الجملة الأخيرة ومن نظرية الطاقة الحركية والشغل، نستنتج ان الطاقة الحركية للجسيم المشحون المتحرك خلال مجالا مغناطيسيا لا يمكن ان يتغير بواسطة المجال المغناطيسي فقط. يغير المجال اتجاه متجه السرعة ولكن لا يغير سرعة او طاقة حركة الجسيم.

من المعادلة 1.2 نستنتج ان وحدة المجال المغناطيسي هي نيوتن لكل كولوم في متر لكل ثانية وتعرف هذه الوحدة بالتسلا tesla ويرمز لها بالرمز T:

$$1\ \mathrm{T} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C.\,m/s}}$$

حيث ان الكولوم لكل ثانية هي الامبير فان

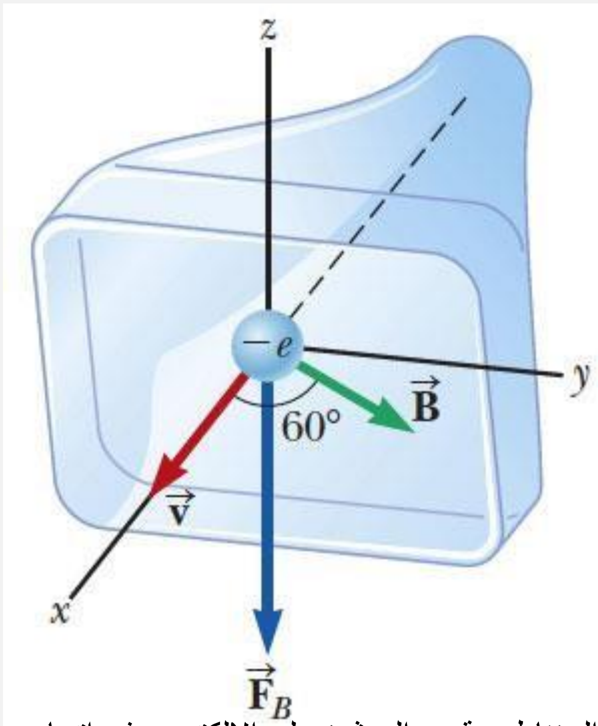
$$1\ \mathrm{T} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A.\,m}}$$

كما يوجد وحدة أخرى للمجال المغناطيسي هي وحدة الجاوس *gauss* ويرمز لها بالرمز G وهي ترتبط بوحدة التسلا من خلال العلاقة 1 T = 104 G. في الجدول 1.1 بعض قيم المجال المغناطيسي لمصادر مختلفة.

مثال 1.1 **الكترون يتحرك في مجال مغناطيسي**

An Electron Moving in a Magnetic Field

الكترون في تلفزيون اشعة المهبط يتحرك في اتجاه الشاشة الامامية بسرعة مقدارها 0.8×106 m/s على امتداد المحور x كما هو موضح في الشكل 1.6. يحيط بمؤخرة انبوبة المهبط ملفات تنتج مجال مغناطيسي مقداره 0.025 T، في اتجاه يصنع زاوية مقدارها 60o بالنسبة لمحور x ويقع في المستوى xy. احسب القوة المغناطيسية المؤثرة على الالكترون.



الشكل 1.6 القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$ المؤثرة على الالكترون في اتجاه محور z السالب عندما يقع كلا من متجه السرعة $\vec{v}$ ومتجه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ في المستوى xy.

الحل

تصور المسألة: تذكر ان القوة المغناطيسية المؤثرة على جسيم مشحون تكون عمودية على المستوى الذي يحتوي على كلا من متجه السرعة ومتجه المجال المغناطيسي. استخدم أي

من قواعد اليد اليمنى في الشكل [1.5] لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على الالكترون وستجد انها تتجه نحو الأسفل كما هو موضح في الشكل [1.6].

تصنيف المسألة: نحسب القوة المغناطيسية باستخدام المعادلة [1.2] ولهذا نعتبر ان هذا المثال هو مسألة تعويض مباشر.

باستخدام المعادلة [1.2] لايجاد مقدار القوة الغناطيسية:

$$F_B = |q|vB\sin\theta$$

$$FB = (1.6\times10^{-19}C)(8.0\times10^{6}m/s)(0.025T)(\sin 60^{o})$$

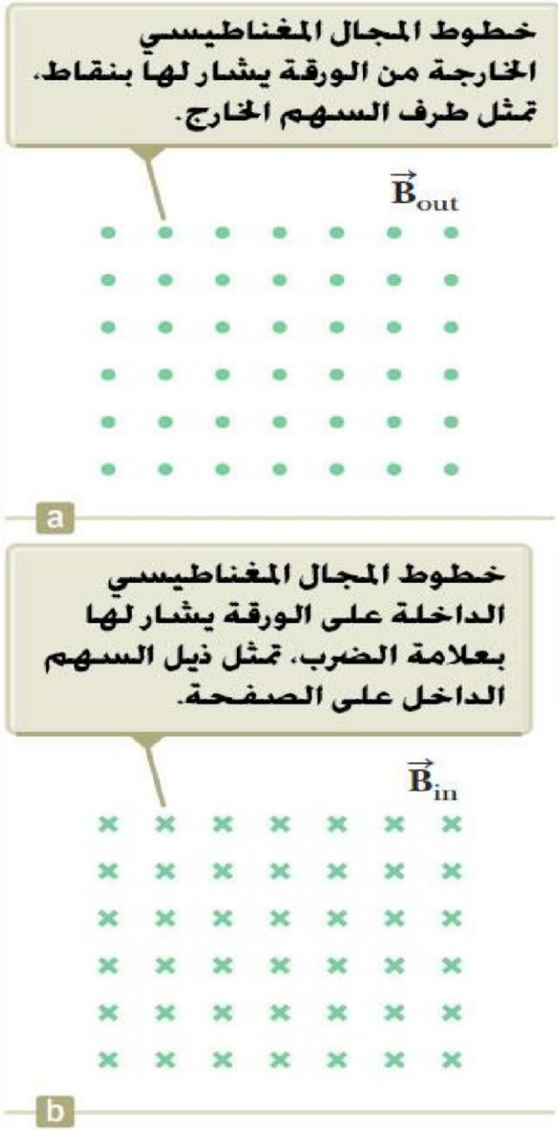
$$= 2.8\times10^{-14}\ N$$

1- حركة جسيم مشحون في مجال كهربي منتظم

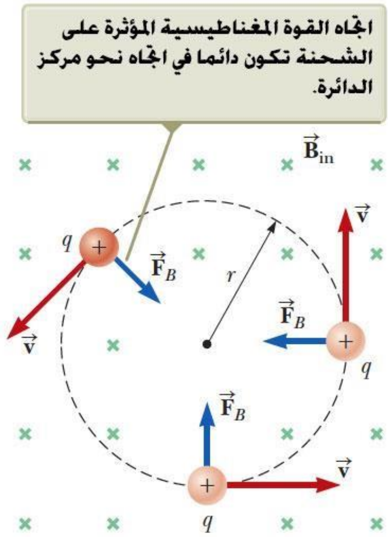
Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field

قبل ان نستمر في مناقشتنا سوف نقدم تفسيرا للرموز المستخدمة في هذا الكتاب. سوف نستخدم في بعض الأحيان الابعاد لاشارة إلى اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ الثلاثية كما هو موضح في الشكل [1.6]. اذا كان المجال المغناطيسي $\vec{B}$ يقع في مستوى الصفحة او عموديا على مستوى الصفحة، سوف نستخدم متجهات باللون الأخضر او الخطوط مجال خضراء موضح عليها اتجاه المجال برؤوس اسهم. اما اذا كان الرسم التوضيحي يستخدم بعدين فقط فاننا نقوم برسم المجال المغناطيسي العمودي الخارج من الصفحة في صورة نقاط خضراء، وهذه تمثل رؤوس الأسهم الخارجة من الصفحة في اتجاه نظرك كما هو موضح في الشكل [1.7] [a]. في هذه الحالة نشير إلى المجال المغناطيسي بـ $\vec{B}\ out$. اذا كان المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عموديا على الصفحة وفي اتجاه الدخول عليها فاننا نستخدم إشارات ضرب × خضراء اللون

والتي تمثل ذيل الأسهم المبتعدة عنك كما هو موضح في الشكل 1.7 b في هذه الحالة يشار إلى المجال المغناطيسي بـ $\vec{B}_{in}$. يستخدم نفس هذا الترميز لاي كمية فيزيائية أخرى قد تكون عمودية على الصفحة مثل اتجاه القوة او اتجاه التيار.



الشكل 1.7 تمثيل خطوط المجال المغناطيسي العمودية على الصفحة.



الشكل 1.8 عندما تكون سرعة جسيم مشحون عمودية على جمال مغناطيسي منتظم، فان اجلسيم يتحرك يف مسار دائري يف مستوى عمودي على اجملال املغناطيسي $\vec{B}$

وجدنا فى الفصل 1.1 ان الشغل المبذول بواسطة قوة مغناطيسية على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي عمودي على سرعة الجسيم يساوي صفرا. الان افترض حالة خاصة لجسيم مشحون بشحنة موجبة يتحرك في مجال مغناطيسي بسرعة ابتدائية لها اتجاه عمودية على المجال المغناطيسي. افترض ان اتجاه المجال المغناطيسي عموديا على الصفحة وفى اتجاه الدخول عليها كما هو موضح فى الشكل 1.8 .مع قيام الجسيم بتغيير اتجاه سرعته كاستجابة للقوة المغناطيسية، تبقى القوة المغناطيسية عمودية غلى السرعه كما يوضح الشكل [1]. جسيم يتحرك في مسار دائري في مستوى عمودي على المجال المغناطيسي. بالرغم من ان المغناطيسية والقوى المغناطيسية قد تكون جديدة

عليك وغير مؤلوفة لك حتى الان سوف نرى ان التأثير المغناطيسي الناتج في شيء مألوف لنا: حركة جسيم في مسار دائري منتظم!

يتحرك الجسيم في مسار دائري لان القوة المغناطيسية $\vec{\boldsymbol{F}}_B$ تكون عمودية على كلا من $\vec{v}$ و $\vec{B}$ ولها قيمة ثابتة وتساوي qvB. كما هو موضح في الشكل 1.8 يكون الدوران في عكس عقارب الساعة للشحنة الموجبة في مجال مغناطيسي متجها نحو الصفحة. اما اذا كانت الشحنة q سالبة فان اتجاه الدروان يكون مع عقارب الساعة. سوف نستخدم نموذج جسيم يتحرك تحت تأثير قوة ثابتة لكتابة قانون نيوتن الثاني للجسيم على النحو التالي:

$$\sum F = F_B = ma$$

حيث ان الجسيم يتحرك في مسار دائري فاننا يمكننا ان نستخدم نموذج جسيم يتحرك في مسار دائري ونستبدل التسارع بالتسارع المركزي على النحو التالي:

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

من هذه المعادلة نستنتج معادلة نصف قطر المسار الدائري على النحو التالي:

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (1.3)$$

هذا يعنى ان نصف قطر المسار يتناسب طرديا مع كمية الحركة الخطية mv للجسيم ويتناسب عكسيا مع مقدار الشحنة على الجسيم وكذلك يتنسب عكسيا مع مقدار

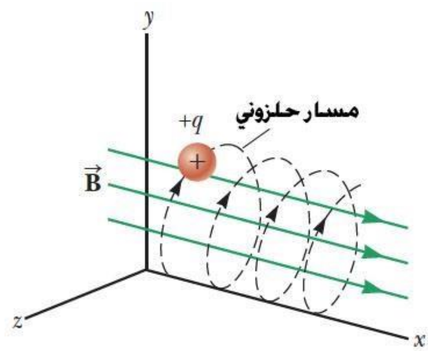
المجال المغناطيسي. السرعة الزاوية للجسيم هي السرعة على نصف القطر وتعطى على النحو التالي:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \qquad (1.4)$$

الزمن الدوري للحركة) أي الفترة الزمنية اللازمة للجسيم لاكمال دورة واحدة(تساوي محيط الدائرة مقسوما على سرعة الجسيم.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \qquad (1.5)$$

تبين هذه النتيجة ان السرعة الزاوية للجسيم والزمن الدوري للحركة الدائرية لا تعتمد على سرعة الجسيم او نصف قطر المدار. السرعة الزاوية في الاغلب تعرف باسم تردد المعجل الدرواين او تردد السيكلوترون *cyclotron ferquency* لان الجسيم المشحون يدور عند هذا التردد الزاوي بنفس طريقة نوع من المعجلات يعرف باسم السيكلوترون والذي سوف نتحدث عنه في الفصل 1.3.



اذا تحرك الجسيم المشحون في مجال مغناطيسي منتظم بسرعة عند زاوية ما بالنسبة للمجال المغناطيسي $\vec{B}$، فان مساره سيكون حلزوني. على سبيل المثال اذا كان اتجاه المجال في اتجاه محور x كما هو موضح في الشكل 1.9، فانه لا يكون هناك مركبة للقوة في اتجاه x. نتيجة لذلك فان $a_x = 0$ والمركبة x للسرعة تبقى ثابتة.يتسبب مقدار القوة المغناطيسية $q\vec{v} \times \vec{B}$ في تغير مركبات الشكل 1.9 جسيم مشحون يمتلك السرعة v_y وv_z مع الزمن، ولكن محصلة متجه المغناطيس يسرعة

له المنتظم مركبة يتحرك توازي في المجال مسار الحركة في النهاية تكون حلزونية محورها حلزوني. يوازي المجال المغناطيسي. مسقط المسار على المستوى yz

)عند النظر له على امتداد المحور x(يكون دائريا. يمكن استخدام المعادلات 1.3 حتى 5.3 مع استبدال v بـ $v_{\perp} = \sqrt{{v_y}^2 + {v_z}^2}$.

سؤال للتفكير 1.2

جسيم مشحون يتحرك عموديا على مجال مغناطيسي في مسار دائري نصف قطره r.)i(يدخل جسيم مماثل المجال بسرعة $\vec{v}$ عموديا على $\vec{B}$ ولكن بسرعة اعلى من سرعة الجسيمالأول. بالمقارنة مع نصف قطر المسار الدائري للجسيم الأول، هل نصف قطر المسارالدائري للجسيم الثاني) a(اصغر ،)b(اكبر) c(يساوي نصف قطر المسار الأول؟) ii(مقدار المجال المغناطيسي يزداد. من نفس الخيارات قارن نصف قطر المسار الدائريالجديد للجسيم الأول مع نصف قطر مساره الابتدائي.

مثال 1.2 **بروتون يتحرك عموديا على مجال مغناطيسي منتظم**

A Proton Moving Perpendicular to a Uniform Magnetic Field

يتحرك بروتون في مسار دائري نصف قطرها 14 cm في مجال مغناطيسي منتظم 0.35 T عموديا على سرعة البروتون. اوجد سرعة البروتون.

الحل

تصور المسألة: من مناقشتنا في هذا الفصل نعلم ان البروتون يتبع مسار دائري عندما يتحرك عموديا على مجال مغناطيسي منتظم.

تصنيف المسألة: نحسب سرعة البروتون باستخدام المعادلة التي قمنا باشتقاقها في هذا الفصل، لذا فاننا نصنف هذا المثال على انه مسألة تعويض مباشر.

بحل المعادلة 1.3 بالنسبة لسرعة الجسيم:

$$v = \frac{qBr}{m_p}$$

بالتعويض عن بالقيم المعطاة في المثال نحصل على ما يلي:

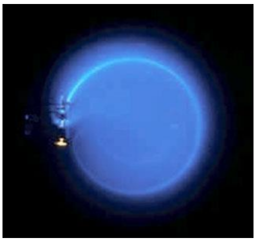
$$v = \frac{(1.60 \times 10^{-19}C)(0.35T)(0.14m)}{1.67 \times 10^{-27}kg}$$
$$= 4.7 \times 10^{6} m/s$$

ماذا لو؟ ماذا لو كان الكترون بدلا من بروتون هو الذي يتحرك في اتجاه عمودي على نفس المجال المغناطيسي بنفس السرعة؟ هل سوف يكون نصف قطر المسار الدائري مختلفا؟

الإجابة: يمتلك الالكترون كتلة اصغر بكثير من كتلة البروتون لذا فان المجال المغناطيسي سوف يكون قادرا على تغير سرعته بشكل اكبر من البروتون. لهذا فاننا نتوقع ان يكون نصف القطر اصغر. توضح المعادلة 1.3 ان نصف القطر r يتناسب طرديا مع m عندما تكون كلا من q وB وv للالكترون لها نفس القيم للبروتون. وعليه نستنتج ان نصف القطر سيكون اصغر بمعدل يتناسب مع نسبة الكتل me/mP.

مثال 1.3 انحراف شعاع الكتروني

في التجربة التي صممت لقياس مقدار المجال المغناطيسي المنتظم، تم تعجيل الكترونات من السكون من خلال فرق جهد مقداره 350 V ومن ثم تدخل المجال المغناطيسي الذي يكون عموديا على متجه سرعة الالكترونات. تنتقل الالكترونات على امتداد مسار منحني لان المجال المغناطيسي يبذل قوة عليها كما هو موضح في الشكل 1.10، ونصف قطر المسار يساوي (5.7 cm). ما مقدار المجال لمغناطيسي؟



الشكل 1.10 انحراف شعاع الكتروني في مجال مغناطيسي

الحل

تصور المسألة: يتضمن هذا المثال الكترونات تتسارع من السكون بسبب القوة الكهربي ومن ثم تتحرك في مسار دائري بسبب القوة المغناطيسية. بمساعدة الشكل 1.8 والشكل 1.10 يمكن تصور الحركة الدائرية للالكترونات.

تصنيف المسألة: المعادلة 1.3 تبين اننا نحتاج إلى استخدام سرعة الالكترونات v لايجاد مقدر المجال المغناطيسي .وعليه يجب ان نحسب سرعة الالكترونات بالاعتماد على فرق جهد التعجيل . للقيام بذلك نصنف الجزء الأول من المسألة على انها نظام الكترون ومجال كهربي معزول. بمجرد ان يدخل الالكترون المجال المغناطيسي فاننا نصنف الجزء الثاني من المسألة على انها مسألة تعويض مباشر.

تحليل المسألة: بكتابة معادلة الحفاظ على الطاقة لنظام الالكترون والمجال الكهربي

$$\Delta K + \Delta U = 0$$

بالتعويض عن القيم الابتدائية والنهائية للطاقات نحصل على

$$(1/2\, m_e v^2 - 0) + (q\Delta V) = 0$$

بالحل بالنسبة لسرعة الالكترون نحصل على

$$v = \sqrt{\frac{-2q\Delta V}{m_e}}$$

بالتعويض بالقيم العددية نحصل على

$$v = \sqrt{\frac{-2(-1.60 \times 10^{-19}\mathrm{C})(350\mathrm{V})}{9.11 \times 10^{-31}\mathrm{kg}}} = 1.11 \times 10^{7}\mathrm{m/s}$$

الان تخيل ان الالكترون يدخل المجال المغناطيسي بهذه السرعة. بحل المعادلة 1.3 لايجاد مقدار المجال المغناطيسي

$$B = \frac{m_e v}{er}$$

بالتعويض عن القيم العددية

$$B = \frac{(9.11 \times 10^{-31}\mathrm{kg})(1.11 \times 10^{7}\mathrm{m/s})}{(1.60 \times 10^{-19}\mathrm{C})(0.075\mathrm{m})} = 8.4 \times 10^{-4}\mathrm{T}$$

(B) ما مقدار السرعة الزاوية للالكترون؟

الحل

باستخدام معادلة السرعة الزاوية

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{1.11 \times 10^{7}\mathrm{m/s}}{0.075\mathrm{m}} = 1.5 \times 10^{8}\mathrm{rad/s}$$

الخلاصة: تمثل السرعة الزاوية عدد من الدورات في الثانية يساوي

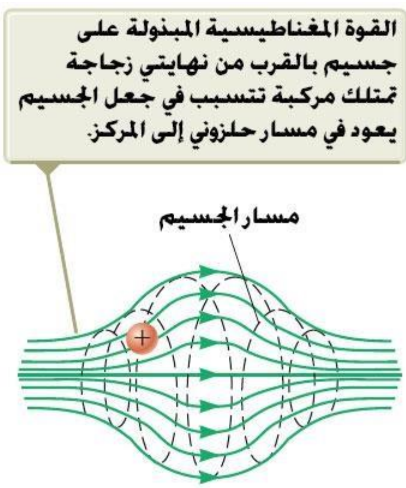
$\square=(1.5\times10^{8}$ rad/s)(1 rev/2$\square$ rad) $= 2.4\times10^{7}$ rev/s

أي ان الالكترون يقوم بـ 24 مليون دورة في الثانية!. هذه النتيجة تتفق تماما مع النتيجة التي حصلنا عليها من الجزء (A).

ماذا لو؟ اذا ازداد فرق جهد التعجيل إلى $400\ V$؟ كيف سوف يؤثر هذا على السرعة الزاوية للالكترونات، افترض ان المجال المغناطيسي يبقى ثابتا؟

الإجابة: الزيادة في فرق جهد التعجيل تتسبب في دخول الالكترونات المجال المغناطيسي بسرعة اعلى. هذه السرعة الأعلى تتسبب في انها تتحرك في مسار دائري بنصف قطر اعلى .السرعة الزاوية هي النسبة بين السرعة ونصف القطر، وحيث ان كلا من السرعة ونصف القطر يزدادان فان النسبة تبقى ثابتة وعليه فان السرعة الزاوية تبقى نفسها بدون تغير.

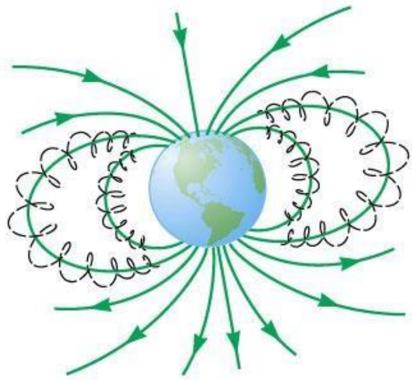
عندما تتحرك جسيمات مشحونة في مجال مغناطيسي غير منتظم، فان الحركة تكون معقدة. على سبيل المثال في مجال مغناطيسي يكون قويا عند طرفيه وضعيفا في الوسط كما هو موضح في الشكل 1.11، فان الجسيمات يمكن ان تتذبذب بين موضعين. يبدأ الجسيم المشحون عند احد الطرفين ويتحرك في حركة حلزونية عيل



امتداد خطوط المجال حتى يصل إلى الطرف الثاني، بينما يعكس مساره ويعود إلى

الطرف الأول بحركة حلزونية. هذا الشكل يعرف باسم الزجاجة المغناطيسية *magnetic bottle* لحصر البلازما وتقييدها، والبلازما هي غاز مكون من الشكل 1.11 جسيم مشحون ايونات والكترونات. مخطط حصر البلازما هذا يحقق قاعدة هامة في تجارب التحكم في الاندماج النووي، العلمية التي يأمل العلماء ان توفر لنا طاقة غير منتهية في المستقبل .

لسوء الحظ فان الزجاجة المغناطيسية لها بعض المشاكل. اذا كان هناك عدد كبير من الجسيمات محصورا، فان التصادمات بينهم سوف تتسبب في تسرب هذه الجسيمات خارج النظام.



الشكل 1.12 احزمة فان الين Allen Van مصنوعة من جسيمات مشحونة محصورة في مجال الأرض الأخضر ومسارات الجسيمات موضحة بالخطوط السوداء المنقطة

تتكون احزمة فان ألن Van Allen الاشعاعية من جسيمات مشحونة (في الاغلب من الالكترونات والبروتونات) تحيط بالكرة الأرضية في صورة شكل الكعكة كما هو موضح في الشكل 1.12.

الجسيمات المحصورة في المجال المغناطيسي الغير منتظم للأرض تدور في شكل حلزوني حول خطوط المجال من قطب إلى القطب الاخر، وتغطي المسافة في ثواني معدودة .

تنشأ هذه الجسيمات بالأساس من الشمس ولكن بعضها يأتي من النجوم او الاجسام الثقيلة الأخرى. لهذا السبب فان الجسيمات تعرف باسم الأشعة الكونية *cosmic rays*.

معظم الأشعة الكونية تنحرف بواسطة المجال المغناطيسي الأرضي ولا يمكن ان تصل إلى الغلاف الجوي. بعض الجسيمات تصبح محصورة ولكن هذه الجسيمات تصنع احزمة فان الن Van Allen الاشعاعية .عندما تصبح الجسيمات فوق احد القطبين فانها في بعض الأحيان تتصادم مع ذرات الغلاف الجوي وتسبب في ابنعاث ضوء مرئي. مثل هذه التصادمات تنتج الشفق القطبي *aurora borealis* الجميل المنظر، او الأضواء الشمالية في نصف الكرة الشمالي والشفق القطبي في نصف الكرة الجنوبي. يكون الشفق القطبي في العادة محصورة في المناطق القطبية بسبب ان احزمة فان ألن الاشعاعية تكون قريبة من سطح الأرض في تلك النقاط. في بعض الأحيان يتسبب النشاط الشمسي في دخول اعداد كبيرة من الجسيمات المشحونة إلى الاحزمة الاشعاعية وهذا يؤدي إلى تشويش خطوط المجال المغناطيسي الطبيعية المرتبطة بالكرة الأرضية. في هذه الحالات فان الشفق القطبي يمكن ان يشاهد عند ارتفاعات منخفضة.

1.3 **تطبيقات متعلقة في جسيمات مشحونة تتحرك في مجال مغناطيسي**

Applications Involving charged Particles Moving in a Magnetic Field

$\vec{E}$

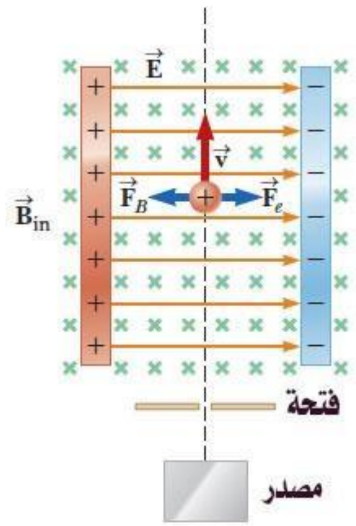
شحنة تتحرك بسرعة v في وجود كلا من مجال كهربي $\vec{E}$ ومجال مغناطيسي $\vec{B}$

تتعرض لقوة كهربية $q\vec{E}$ وقوة مغناطيسية $q\vec{v} \times \vec{B}$. القوة

الكلية)تعرف باسم قوة لورنتز Lorentz force(

المؤثرة على الشحنة هي

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \qquad (1.6)$$



الشكل 1.13 مرشح السرعة . يتحرك جسيم موجب الشحنة بسرعة $\vec{v}$ في وجود مجال مغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة ومجال كهربي متجها إلى اليمين، فانه يتعرض إلى قوة كهربية $q\vec{E}$ إلى اليمين

Velocity Selector **مرشح السرعة**

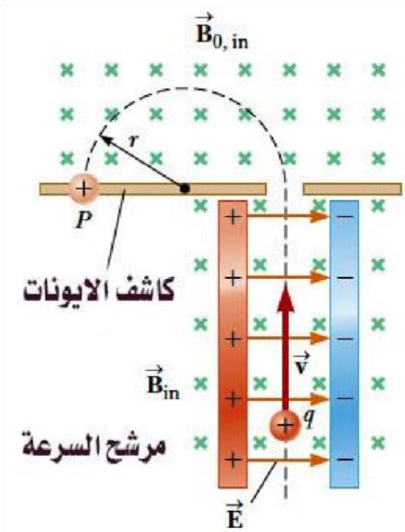
في العديد من التجارب التي تشتمل على حركة جسيمات مشحونة، فانه من المهم ان تكون هذه الجسيمات لها نفس السرعة، هذا يمكن ان يتحقق بتطبيق مجال كهربي ومجال مغناطيسي في الاتجاهات الموضحة في الشكل 1.13. يوجه مجال كهربي منتظم إلى اليمين كما هو موضح في الشكل 1.13 (، وبتطبيق مجال مغناطيسي منتظم في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي)داخل على الصفحة في الشكل 1.13(. اذا كانت q موجبة والسرعة v إلى الأعلى، فان اتجاه القوة المغناطيسية $q\vec{v}\times\vec{B}$ سوف يكون إلى اليسار واتجاه القوة الكهربية $q\vec{E}$ سيكون إلى اليمين. عندما يتم اختيار كلا من مقدار المجال الكهربي ومقدار المجال المغناطيسي بحيث يجعل كلا من القوة الكهربية مساوية للقوة المغناطيسية أي ان $qE = qvB$، فانه يمكن اعتبار ان الجسيم المشحون كجسيم في حالة اتزان ويتحرك في خط رأسي مستقيم خلال منطقة المجالين. من الصيغة $qE = qvB$، ومنها نحصل على

$$v = \frac{E}{B} \qquad (1.7)$$

نلاحظ هنا ان الجسيمات التي تمتلك هذه السرعة فقط هي التي تمر بدون انحراف من خلال المجالين المتعامدين الكهربي والمغناطيسي. القوة المغناطيسية المبذولة على جسيمات متحركة بسرعات اعلى من ذلك تكون اعلى من القوة الكهربية، والجسيمات في هذه الحالة تنحرف إلى اليسار. اما الجسيمات المتحركة بسرعة اقل من تلك السرعة تنحرف إلى اليمين. وبهذه

الطريقة نحصل على شعاع من الجسيمات التي تتحرك بسرعة واحدة هي v ويمكن تغير قيمة هذه السرعة بالتحكم في شدة المجال الكهربي والمجال المغناطيسي.

مطياف الكتلة The Mass Spectrometer



يعمل مطياف الكتلة على فصل الايونات حسب نسبة كتلتها إلى شحنتها. في جهاز مطياف الكتلة يمر شعاع من الايونات من مرشح السرعة أولا لنحصل على جسيمات لها نفس السرعة v ومن ثم تدخل هذه الجسيمات في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}_0$ له نفس اتجاه المجال المغناطيسي في مرشح السرعة كما هو موضح فى الشكل 14.1 مع دخول المجال المغناطيسي الثانى ، تتحرك الايونات فى نصف دائرة نصف قطرها r قبل ان تصل الى كاشف عند p ، اذا كانت الايونات موجبة الشحنة فان الشعاع ينحرف الى اليسار كما هو موضح بالشكل 14.1. اذا كانت الايوناتسالبة الشحنة فان الشعاع ينحرف الى اليمين.
من المعادلة 3.1 يمكن ان نعبر عن النسبة m/q على النحو التالى

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

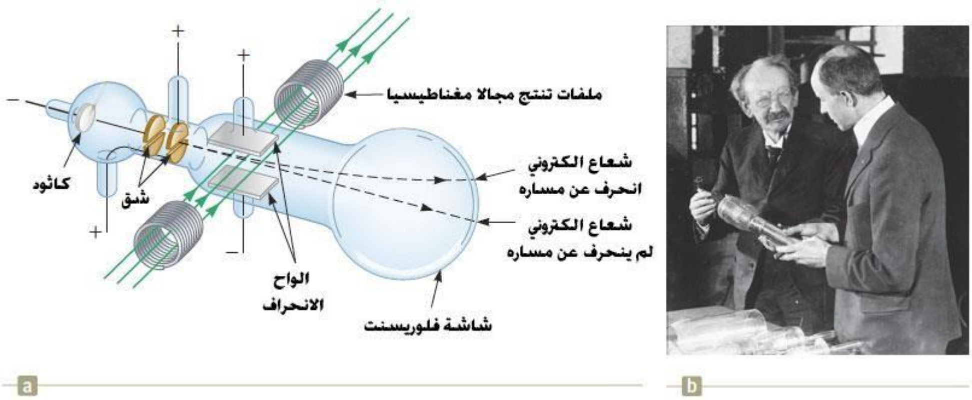
باستخدام المعادلة 1.7 نحصل على

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E}$$

لهذا، يمكن حساب النسبة m/q بقياس نصف قطر التحدب وبمعرفة كلا من B وB_0 وE.

عمليا يتم قياس الكتل للعديد من نظائر الايونات، بايونات تحمل نفس الشحنة q. بهذه الطريقة يمكن تحديد نسب الكتل حتى لو كانت q مجهولة.

قام العالم طومسون Thomson (1856 – 1940) في العام 1897 لقياس نسبة e/m_e للالكترونات. يوضح الشكل 1.15 a الأدوات التي استخدمها طومسون. تعجل الالكترونات من الكاثود وتمر خلال شقين. تنجرف الالكترونات في منطقة يكون فيها المجال الكهربي والمجال المغناطيسي متعامدين. يتم في البداية ضبط مقدار المجالين للحصول على شعاع غير منحرف يسجل على شاشة فلوريسنت. من حجم الانحراف والقيم المقاسة E وB، يمكن تحديد نسبة الشحنة إلى الكتلة.النتائج التي تم الحصول عليها من هذه التجربة تمثل اكتشاف الالكترون كجسيم أولي.



الشكل 1.15 (a) أدوات طومسون لقياس النسبة e/m_e.(b) العالم طومسون إلى اليسار في مختبر كافيندش بجامعة كامبردج. وعلى اليمين العالم فرانك بالدوين جيوت

المعجل الدوراني السيكلترون The Cyclotron

المعجل الدوراني او السيكلترون هو عبارة عن جهاز يعمل على تعجيل الجسيمات المشحونة إلى سرعات عالية جدا. تستخدم الجسيمات المعجلة الناتجة في التصادم مع انوية الذرات لاحداث تفاعلات نووية هامة للمجال البحثي. كما تستخدم العديد من المستشفيات أجهزة السيكلترون في انتاج مواد مشعة للتشخيص والعلاج.

يقوم المجال الكهربي والمجال المغناطيسي بدور هام في فكرة عمل السيكلترون. يوضح الشكل 1.16 a مخطط يشرح فكرة عمل السيكلترون. تتحرك الشحنات في داخل حاويتين نصف دائريتين لها شكل حرف D ولهذا يطلق عليها اسم D_1 لنصف الدائرة الأولى واسم D_2 لنصف الدائرة الثانية. يطبق فرق جهد ذو تردد عالي على نصفي الدائرتين D_1 وD_2 في وجود مجال مغناطيسي منتظم عمودي عليهما. عند وجود ايون عند النقطة P بالقرب من مركز المغناطيس في احد نصفي الدائرتين وليكن عند D_1 فان الايون يتحرك في مسار نصف دائري والموضح بالخط الأسود المنقط في الشكل 1.16 a، وعندما يصل الايون إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين يكون قد استغرق فترة زمنية مقدارها $T/2$ حيث ان T هو

الفترة الزمنية اللازمة لعمل دورة كاملة حول نصفي الدائرتين والتي تعطى بالمعادلة 1.5 . يتم ضبط تردد فرق الجهد بحيث ان قطبية نصفي الدائرتين تكون معكوسة في خلال الفترة الزمنية التي ينتقل فيها الايون من احد نصفي الدائرتين إلى الأخرى. اذا تم ضبط تردد فرق الجهد بحيث يكون D_1 عند جهد كهربي اقل من D_2 بمقدار ΔV، فان الايون يتسارع عبر الفراغ إلى D_1 وتزداد طاقة حركته بمقدار $q\Delta V$. بعد ذلك يتحرك الايون حول D_1 في مسار نصف دائري نصف قطره اكبر لان سرعة الايون قد ازدادت. بعد مرور فترة زمنية قدرها $T/2$ فان الايون يصل مرة أخرى إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين. لحظة انقضاء هذه الفترة الزمنية تعكس القطبية على نصفي الدائرتين مرة أخرى ويتلقى الايون تعجيل اخر خلال الفراغ بينهما. تستمر الحركة بحيث انه في كل نصف دائرة يكتسب الايون طاقة حركية إضافية تساوي $q\Delta V$. عندما يصبح نصف قطر المسار مساويا تقريبا لنصف قطر الوعاء نصف الدائري فان الايونات المعجلة تترك النظام وتخرج من خلال فتحة الخروج .

الشكل 1.16)a(يحتوي السيكلترون على مصدر ايوني عند النقطة P، وقطعتين على شكل حرف D هما D_1 وD_2 مطبق عليهما فرق جهد متناوب ،ومجال مغناطيسي منتظم(b) اول سيكلترون تم اختراعه بواسطة كلا من 1934. في العام M.S. Livingston وليفينغستون E. O. Lawrenceلورنس

تعتمد فكرة عمل السيكلترون على الفترة الزمنية T المستقلة عن سرعة الايون ونصف قطر المسار الدائري (انظر المعادلة 1.5 .)
يمكننا الحصول على صيغة رياضية لطاقة الحركة التي يكتسبها الايون عندما يخرج من السيكلترون بدلالة نصف قطر الوعاء نصف دائري R.
من المعادلة 1.3 نعلم ان $v = qBR/m$ وعليه فان طاقة الحركة تكون على النحو التالي:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m} \qquad (1.9)$$

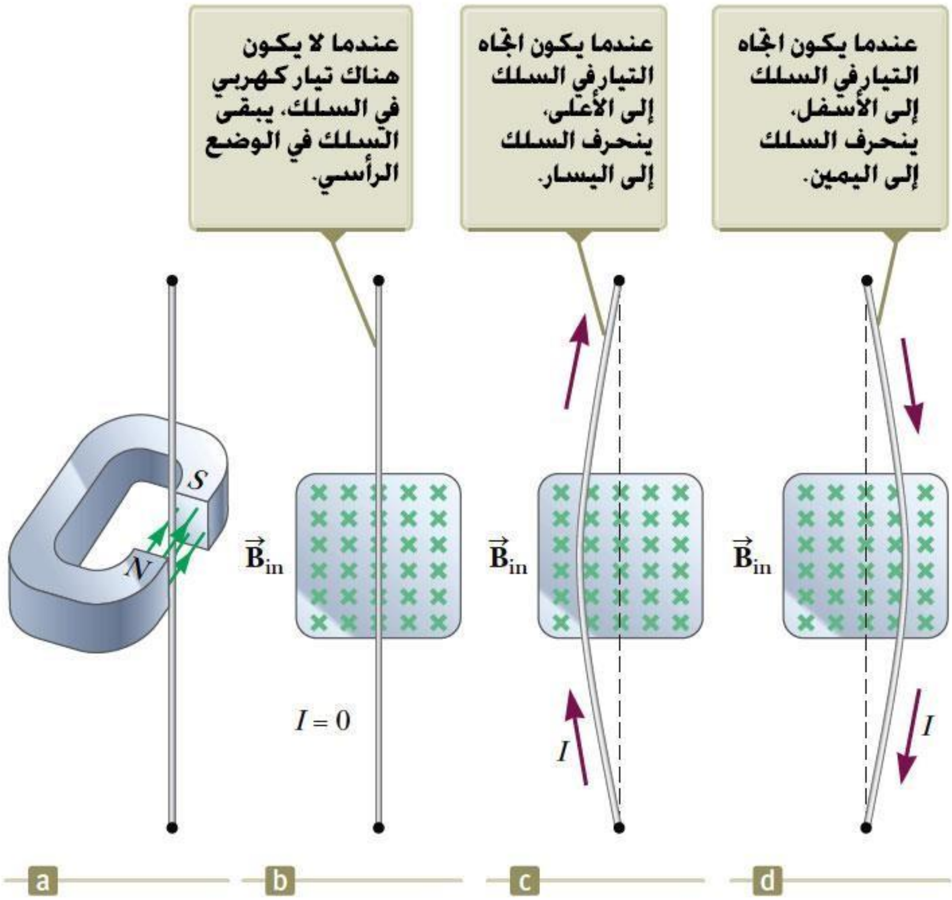
عندما تزيد طاقة الايونات في السيكلترون عن 20 MeV تقريبا فان سرعتها تصبح قريبة من الضوء وتظهر الخصائص النسبية عليها)سوف نقوم بشرح ظواهر الفيزياء النسبية في كتاب منفصل مع الفيزياء الحديثة(. اثبتت الملاحظات العلمية ان T تزداد وحركة الايونات لا تبقى في نفس الطور مع فرق الجهد المطبق. بعض المعجلات تتغلب على هذه المشكلة من خلال تعديل الفترة الزمنية لفرق الجهد المطبق حتى تبقى الايونات مع فرق الجهد المطبق في نفس الطور.

ملاحظة: لا يعتبر معجل السيكلترون من المعجلات المتطورة. يعد السيكلترون من المعجلات الهامة من الناحية التاريخية لانه اول معجل جسيمات تم استخدامه للحصول على جسيمات تتحرك بسرعات كبيرة. لا يزال السيكلترون مستخدما في المستشفيات للتطبيقات الطبية ولكن معظم المعجلات المستخدمة في البحوث العلمية لا تعتمد فكرة عملها على السيكلترون. المعجلات الحديثة تعمل من خلال مبدأ مختلف وتعرف عامة باسم المعجل الدرواني التزامني او السينكروترون synchrotrons.

1.4 القوة المغناطيسية المؤثرة على موصل يمر فيه تيار

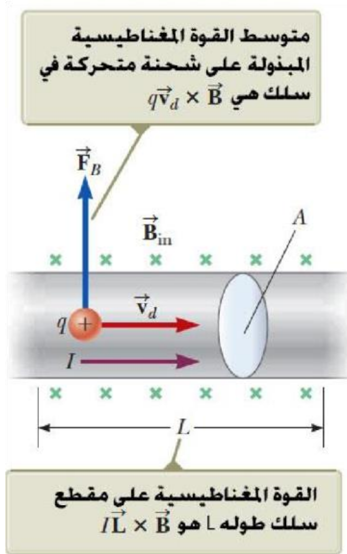
Magnetic Force Acting in a Current-Carrying Conductor

اذا بذلت قوة مغناطيسية على جسيم مشحون عندما يتحرك الجسيم في مجال مغناطيسي ،فانه من غير المستغرب ان سلك يمر فيه تيار كهربي سوف يتعرض أيضا إلى قوة مغناطيسية عندما يوضع في مجال مغناطيسي .التيار الكهربي عبارة عن مجموعة من الجسيمات المشحونة في حالة حركة وعليه فان القوة المحصلة المبذولة بواسطة المجال المغناطيسي على السلك الذي يمر فيه تيار كهربي هي المجموع الاتجاهي لكل قوة تبذل على كل جسيم مشحون يشارك في التيار الكهربي المار في السلك. القوة المبذولة على الجسيمات تنتقل إلى السلك عندما تتصادم هذه الجسيمات مع ذرات السلك.



الشكل 1.17)a(سلك معلق رأسيا بين قطبي مغناطيسي) .b(و)c(و)d(نفس الترتيب الموضح في) a(كما ينظر له من عند القطب الجنوبي للمغناطيس حيث ان المجال المغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة)إشارات الضرب × باللون الأخضر.(

يمكن توضيح القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك موصل يمر فيه تيار كهربي من خلال تعليقه بين قطبي مجال مغناطيسي كما في



الشكل 1.17 a . يكون اتجاه المجال المغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة ويغطي المنطقة داخل المربعات المظللة .عندما يكون التيار المار في السلك يساوي صفرا فان السلك يبقى في وضعه الرأسي الموضح في الشكل 1.17 b . عندما يمر تيار في السلك في الاتجاه من الأسفل إلى الأعلى كما هو موضح في الشكل

1.17 c فان السلك سوف ينحرف إلى اليسار. اما الشكل 1.19 مقطع من سلك اذا كان اتجاه التيار في السلك من الأعلى إلى الأسفل يمر فيه تيار في مجال كما هو موضح في الشكل 1.17 d فان السلك سوف مغناطيسي $\vec{B}$.
ينحرف إلى اليمين.

دعنا الان نناقش ماذا يحدث بالتفصيل من خلال اعتبار ان القطة المستقيمة من السلك طولها L ومساحة مقطعها A تحمل تيار مقداره I في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}$ كما هو موضح في الشكل 1.18 .

القوة المغناطيسية المبذولة على الشحنة q التي تتحرك بسرعة انجراف $\vec{v}_d$ هي

لايجاد القوة الكلية المؤثرة على السلك، سوف نقوم بضرب القوة $q\vec{v}_d \times \vec{B}$ المبذولة على شحنة واحدة في عدد الشحنات في مقطع السلك. حيث ان حجم مقطع السلك هو AL فان عدد الشحنات في هذا المقطع سوف تكون nAL، حيث ان n هو عدد الشحنات لكل وحدة حجوم. وعليه فان القوة المغناطيسية الكلية المؤثرة على مقطع سلك طوله L هي على النحو التالي:

$$\vec{F}_B = (q\vec{v}_d \times \vec{B})nAL$$

يمكننا ان نكتب صيغة رياضية بشكل مناسب بالاستعانة بعلاقة التيار الكهربي مع سرعة انجراف الشحنات والتي هي $I = nqv_dA$. وبهذا نحصل على

$$\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B} \qquad (1.10)$$

حيث ان $\vec{L}$ هو متجه يشير في اتجاه التيار I وله مقدار يساوي طول مقطع السلك L. هذه الصيغة تنطبق فقط على سلك مستقيم في مجال مغناطيسي منتظم.

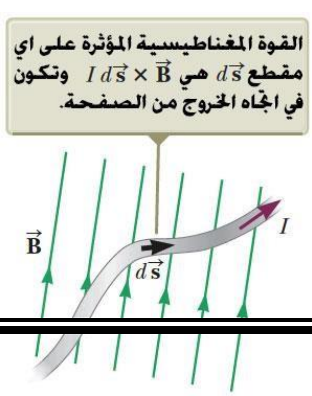
الان اعتبر سلك له شكل غير منتظم ولكن له مساحة مقطع منتظمة في مجال مغناطيسي كما هو موضح في الشكل 1.19. من المعادلة 1.10 تكون القوة المغناطيسية المبذولة على مقطع صغير له متجه طول $d\vec{s}$ في وجود مجال مغناطيسي $\vec{B}$ على النحو التالي:

$$d\vec{F}_B = Id\vec{s} \times \vec{B} \qquad (1.11)$$

حيث ان اتجاه $d\vec{F}_B$يكون خارجا من الصفحة $d^{\rightarrow}$ لاتجاهي كلا من $\mathbf{B}$ و s في الشكل 1.19. يمكن اعتبار المعادلة 1.11 على انها تعريف بديل للمجال المغناطيسي $\bar{B}$. أي ان يمكننا ان نعرف المجال

المغناطيسي $\vec{B}$ بدلالة قوة $\vec{B}$ مقاسة مبذولة على عنصر سلك يمر فيه تيار ،وتكون القوة اكبر ما يمكن عندما تكون عمودية على عنصر السلك وتساوي صفر عندما B تكون موازية لعنصر السلك.

لحساب القوة المغناطيسية الكلية $\vec{F}_B$ المؤثرة على السلك الموضح في الشكل



1.19 نقوم باجراء عملية التكامل للمعادلة 1.11 على طول السلك على النحو التالي:

$$d\vec{\boldsymbol{F}}_B = I\int_a^b d\vec{\boldsymbol{s}} \times \vec{\boldsymbol{B}} \qquad (1.12)$$

حيث ان a وb تمثلان نقطتي البداية والنهاية

للسلك. عندكا نقوم باجراء هذا التكامل فان مقدار الشكل 1.19 مقطع سلك له المجال المغناطيسي واتجاه المجال الذي يصنعه مع تيار شكل غير كهربي I منتظم في يمر مجال فيه
المتجه $d\vec{\boldsymbol{s}}$ يمكن تختلف من نقطة إلى نقطة على مغناطيسي $\vec{\boldsymbol{B}}$ يتعرض إلى السلك. قوة مغناطيسية.