

## الفصل الثاني عشر / المجال المغناطيسي The Magnetic Field

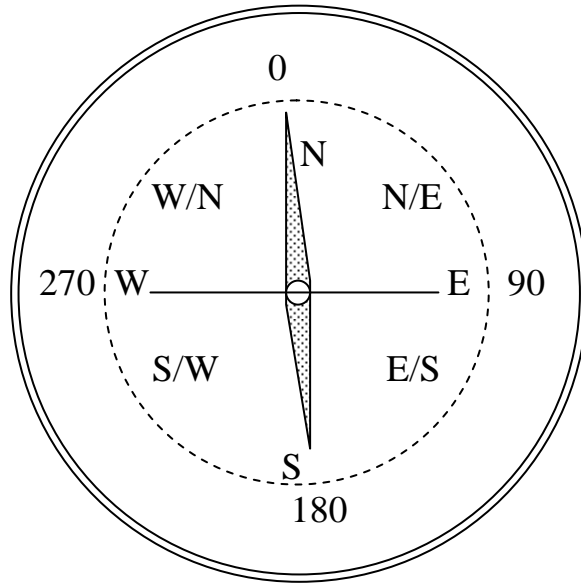
### Magnetism

### (1-12) المغناطيسية

منذ زمن الإغريق أي قبل أكثر من ألفي عام اكتشف في منطقة مغنيسيا بوسط آسيا الصغرى أحجار طبيعية سوداء، وهي قطع من الصخور الحاملة للحديد\*، لها قابلية والمقدرة على جذب بعض المعادن كقطع الحديد الصغيرة والقريبة منها، أطلق على هذه الأحجار اسم الأحجار المغناطيسية نسبة إلى اسم منطقة اكتشافها. وفي أواخر القرن الثاني عشر للميلاد عُرف لهذه الأحجار خاصية أخرى وهي أن الحجر المعلق من وسطه يميل عندما يترك حر الحركة بحيث أن طرفيه يشيران إلى اتجاهي كل من الشمال والجنوب الجغرافيين، وإذا غير اتجاه هذا الحجر المعلق فإنه يتحرك تلقائياً ليعود إلى وضعه الأول. وقد أمكن نقل الخواص التي تتميز بها تلك الأحجار إلى قطع من الحديد غير المغنط وذلك بدلك قضيب من الحديد المطاوع بقطعة من هذه الأحجار لبعض الوقت في اتجاه واحد، فتنقل بذلك بعض من القوى المغناطيسية الموجودة بالحجر المغناطيسي إلى قضيب الحديد ويتحول بذلك إلى قضيب مغناطيسي. وقد استعملت مثل هذه القضبان أو الإبر الحديدية المصنعة بهذه الطريقة في تحديد اتجاهي الشمال والجنوب المغناطيسيين، وقد كانت هذه هي أول الطرق المستعملة لتصنيع البوصلة المغناطيسية (Compass). وبالطبع فقد تطورت مثل هذه البوصلة البدائية حتى وصلت إلى شكلها الحالي المتطور كما في الشكل (1-12).

البوصلة المغناطيسية عبارة عن إبرة مغناطيسية رقيقة ترتكز على محور من منتصفها ويحيط بهذه الإبرة تدريج دائري لتقدير الانحراف بالدرجات بالنسبة لاتجاهي الشمال والجنوب الجغرافيين حيث أن الإبرة المغناطيسية لا تشير تماماً إلى اتجاهي الشمال والجنوب الجغرافيين ولكنها تنحرف قليلاً عن هذا الاتجاه، ويطلق على الاتجاه الذي تشير إليه الإبرة المغناطيسية باتجاه الشمال والجنوب المغناطيسي.

\* يُذكر أن الحديد واحد من مواد قليلة إضافة إلى النيكل والكوبلت لها قابلية على التمغنط بشكل دائم وهذه المواد تسمى بالمواد الفيرومغناطيسية .

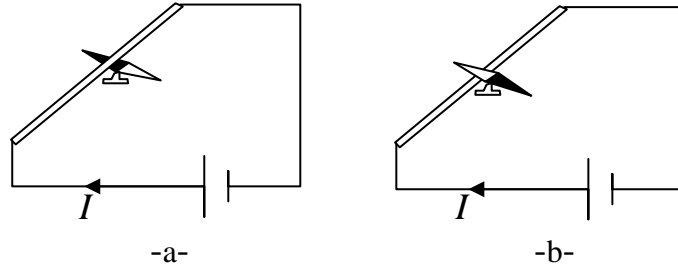


الشكل (1-12) : البوصلة المغناطيسية .

في عام 1820 اكتشف الدانماركي هانز كريستيان اورستيد (1770-1867) إن التيارات الكهربائية تولد مجالات مغناطيسية. فقد تحقق ذلك عندما كان يجري تجاربه الكهربائية ، وكان بجوار السلك الذي يمر فيه تيار كهربائي إبرة مغناطيسية تدور حرة الحركة، فلاحظ عند غلق الدائرة الكهربائية ومرور التيار في السلك انحراف الإبرة في اتجاه كما في الشكل (2a-12)، وعندما غير من وضع السلك بحيث أصبح أسفل الإبرة كما في الشكل (2b-12)، لاحظ انحراف الإبرة بعكس الاتجاه الأول. وقد علّل السبب في ذلك إلى أن مرور التيار في السلك يتسبب في نشوء مجال مغناطيسي في المنطقة المحيطة به. وهكذا فإن التأثيرات المغناطيسية يمكن أن تنشأ من التأثيرات الكهربائية\* . تلا ذلك سلسلة من الاكتشافات قام بها علماء كثيرون تتعلق بالمغناطيسية وعلاقتها بالتيارات والمجالات الكهربائية، أمثال الأمريكي جوزيف هنري Joseph Henry (1797-1878)، والدانماركي مايكل فاراداي Michael Faraday (1791-1867) حيث بيّنت أعمالهما ، أن التيار الكهربائي يمكن توليده بواسطة مغناط متحركة. ويُذكر

\* إن الترابط الوثيق بين الكهربائية والمغناطيسية حمل بعض المفكرين إلى اعتبارهما وجهين لعملة واحدة.

إن فاراداي كان قد نشر اكتشافاته رسمياً بعد اثني عشر عاماً من اكتشاف اورستد في حين كان هنري قد توقع اكتشافات فاراداي قبل عام من نشرها.

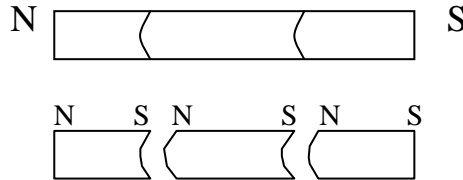


الشكل (1-12) : -a- السلك فوق الإبرة المغناطيسية.  
-b- السلك أسفل الإبرة المغناطيسية.

## (2-12) الأقطاب المغناطيسية والقوى المغناطيسية

### Magnetic Poles and Magnetic Forces

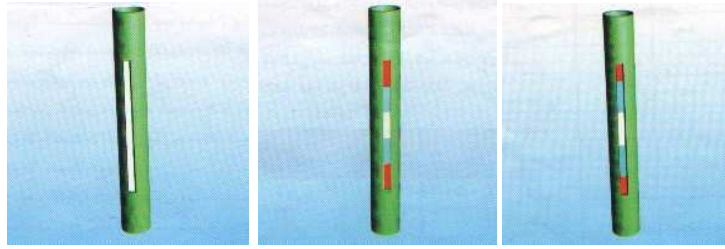
عند تعليق قضيباً مغناطيسياً تعليقاً حراً من وسطه، فإن إحدى نهايتيه تتجه نحو الشمال الجغرافي والأخرى نحو الجنوب الجغرافي وعليه سميت النهاية الأولى للمغناطيس الباحثة عن الشمال على الكرة الأرضية بالقطب الشمالي للمغناطيس والنهاية الثانية الباحثة عن الجنوب على الكرة الأرضية بالقطب الجنوبي للمغناطيس. ولقد أوضحت الاختبارات العلمية أن أقطاب المغناطيس لا يمكن فصلها عن بعضها البعض. فمن المعروف، عند كسر قضيب مغناطيسي وفصله إلى أجزاء كما في الشكل (3-12)، فإن كل واحدة منها تصبح قضيباً مغناطيسياً متكاملًا جديداً له قطب شمالي وآخر جنوبي



الشكل (3-12) : الاقطاب المغناطيسية.

وهذا يعني إن الاستمرار في تقطيع المغناطيس إلى أجزاء أصغر فأصغر ستتوصل في الأخير إلى أن الذرة، ما هي سوى قطب مغناطيسي متناهٍ في الصغر من المغناطيس الأصلي.

أن القوة المغناطيسية بين قطبين مغناطيسيين هي ذلك التأثير المتبادل بين القطبين سواء بالتنافر إذا تشابه القطبان أو بالتجاذب إذا اختلفا. وتُقَدَّر هذه القوة غير المرئية بوحدة يطلق عليها النيوتن حسب نظام الوحدات SI وفي نظام cgs للوحدات هناك وحدة اصغر هي الداين. ولكي نبين مستوى ذلك التأثير تجريبياً، نأتي بشريحة من الورق المقوى وقضيبين مغناطيسيين متماثلين في القوى المغناطيسية والأبعاد. نظوي الورقة بحيث تأخذ شكل أنبوب اعرض قليلاً من القضيب، ثم نعمل شقاً طويلاً على جانبي الأنبوبة الورقية (شكل 4a-12). نضع القضيبين في الأنبوبة الورقية على استقامة واحدة بحيث تكون الأقطاب المتشابهة متقابلة، سنشاهد ارتفاع المغناطيس العلوي في الهواء مبتعداً عن المغناطيس السفلي لمسافة معينة (شكل 4b-12). الآن إذا استبدلنا المغناطيسين السابقين بآخرين قوتهم المغناطيسية أكبر مع مراعاة أن يكون القطبان المتشابهان متقابلين، سنشاهد ارتفاع المغناطيس العلوي مسافة أكبر (شكل 4c-12). وهذا يعني انه كلما زادت القوة المغناطيسية زادت قوة التنافر بين الأقطاب المتشابهة. نذكر هنا أن قوة التنافر بين الأقطاب المتشابهة تشكل قوة هائلة يمكن استعمالها في رفع أجسام ثقيلة. وقد استعمل العلماء هذه الظاهرة في المصانع لعمل ممرات مغناطيسية خاصة لنقل وتحريك المعدات الثقيلة بسهولة بدلاً من السيور المتحركة، بل ذهب العلماء إلى ابعاد من ذلك حيث استعمل هذا المبدأ في تسيير قطارات سريعة تسبح في الهواء ولا تسير على قضبان حديدية كما في القطارات العادية، وقد أطلق عليها اسم قطارات ماجليف. ألان لو أجرينا التجربة نفسها في الحالتين b و c ولكن بجعل القطبين المختلفين متقابلين، سنشاهد تلامسهما أي أن الأقطاب المختلفة تتجاذب وان قوة التجاذب تعتمد على مقدار القوة المغناطيسية للقضيبين.



-a-

-b-

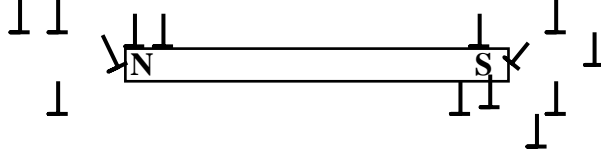
-c-

الشكل (4-12) : القوة المغناطيسية بين قطبين مغناطيسيين.

## Appearance of Magnetic field

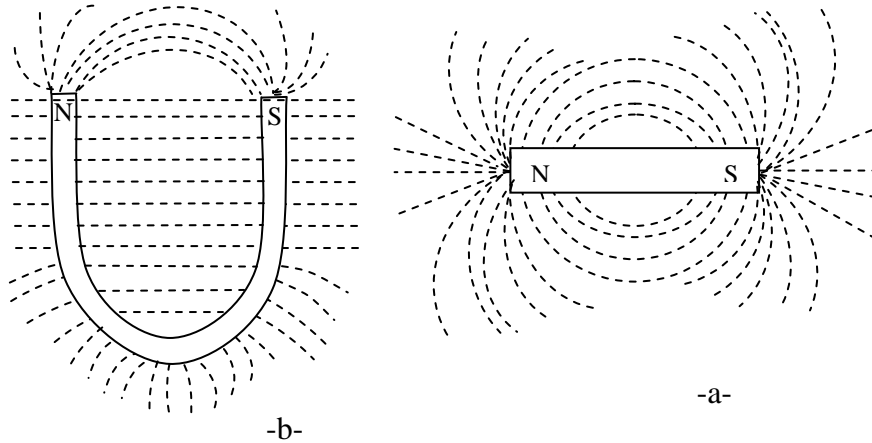
(3-12) : إظهار المجال المغناطيسي

درسنا من قبل كيف أن الشحنات الكهربائية تؤثر على أي شحنة قريبة منها بقوة كهربائية، أي أن للشحنة الكهربائية مجالاً يسمى بالمجال الكهربائي. وبالمقارنة نتساءل هل المغناطيس أيضاً يؤثر على المواد المغناطيسية القريبة منه بقوة أم لا؟ لتأمل مغناطيساً قد وضع أفقياً على قطعة خشبية وعلق مجموعة من الإبر المغناطيسية حوله، نجد أن المغناطيس سوف يؤثر على بعضها ولا يؤثر على البعض الآخر إذا كانت بعيدة، أي أن قوة الجذب المغناطيسي تتركز في قطبية وتقل في المناطق الأخرى، كما مبين في الشكل (5-12).

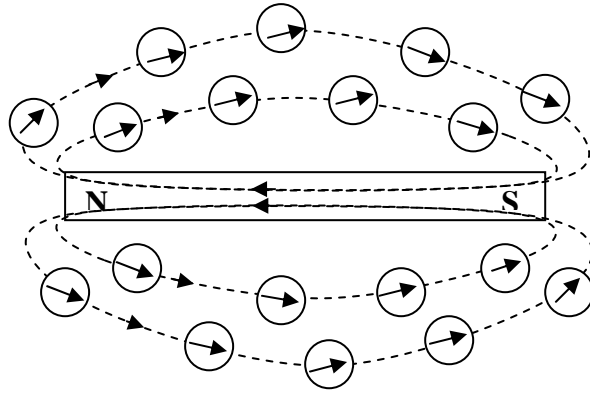


الشكل (5-12) : قوة الجذب المغناطيسي متركرة في قطبي المغناطيس وتقل في المناطق الأخرى .

من هذا يتبين هناك منطقة محيطة بالمغناطيس من جميع الجهات وفي جميع المستويات يظهر فيها تأثير القوة المغناطيسية يطلق عليها اسم المجال المغناطيسي ، وبما أن المجال المغناطيسي غير مرئي لذلك يمكن إظهار أثره بواسطة برادة الحديد أو باستعمال عدة بوصلات دقيقة الحجم كما في الأشكال (6-12) و (7-12) على التوالي.



الشكل (6-12) : انتظام جزيئات برادة الحديد على لوح من الزجاج لمغناطيس على هيئة قضيب (a) حدوة حذاء الفرس (b) مشكلاً أنماط المجالات المغناطيسية.

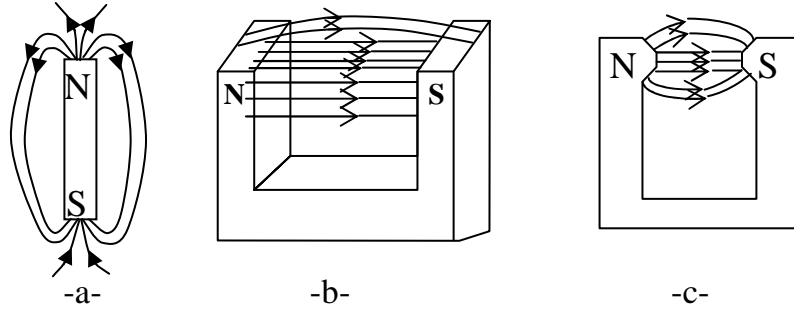


الشكل (7-12): إظهار نمط المجال المغناطيسي بجوار قضيب مغناطيسي باستعمال عدد كبير من أبر البوصلة المغناطيسية دقيقة الحجم.

#### (4-12) خطوط القوة المغناطيسية Lines of Magnetic Force

إن تأثير إبرة بوصلة مغناطيسية موضوعة في نقطة ما داخل مجال مغناطيسي تعطي طريقة لرسم خطوط القوة المغناطيسية بجوار قضيب مغناطيسي. فهي خطوط وهمية تبين المسار الذي يتخذه قطب شمالي لو ترك حر الحركة في منطقة تأثير المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي. وحيث أن إبرة البوصلة المبينة في الشكل (7-12) تشير بعيداً عن القطب الشمالي N ونحو القطب الجنوبي S، فإن خطوط القوة المغناطيسية تخرج وتتجه بعيداً عن القطب الشمالي وتصب وتتجه نحو القطب الجنوبي خارج المغناطيس، ثم من القطب الجنوبي إلى الشمالي داخله. إن هذا يبين أن خطوط القوة المغناطيسية هي خطوط مغلقة وذلك لأنه لا يمكن أن يوجد قطب مغناطيسي منفرد عملياً كما بيننا سابقاً، على عكس المجال الكهربائي الذي يمكن أن تتواجد فيه الشحنة الكهربائية منفردة حيث يكون خطاً مفتوحاً ينتهي نظرياً في المالا نهاية.

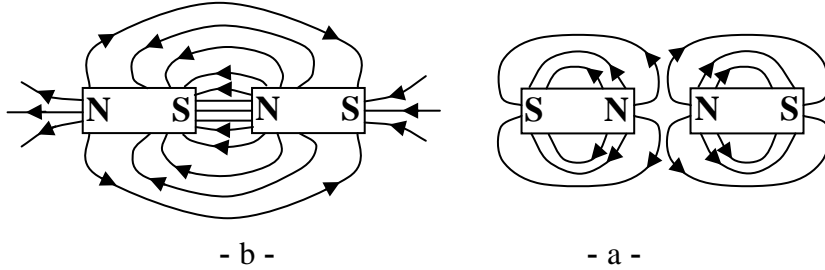
أن اتجاه خط القوة المغناطيسية في أي نقطة هو اتجاه المجال المغناطيسي من تلك النقطة، فإذا كان خط القوة منحنياً فإن المماس عند نقطة ما فيه يمثل اتجاه المجال المغناطيسي وإذا كان مستقيماً فإن اتجاهه يمثل اتجاه المجال مباشرة. وتوضح المخططات كالتالي ترى في الشكل (8-12) خطوط القوة المغناطيسية لثلاث مغناطيسات ذات أشكال مختلفة.



الشكل (8-12) : أوجه المجال المغناطيسي.

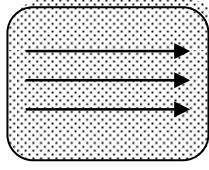
يبدو واضحاً من هذه المخططات إن خطوط القوة المغناطيسية لا تتقاطع مع بعضها مطلقاً (شأنها في ذلك شأن خطوط القوة الكهربائية)، لأن تقاطعها في أي نقطة في المجال المغناطيسي يعني أن هناك أكثر من اتجاه للمجال المغناطيسي عند تلك النقطة وهذا مرفوض عملياً، الأمر الذي يجعلنا أن نفترض صفة التنافر فيما بينها. إن خطوط القوة المغناطيسية تكون أكثر تكديساً حيث يكون المجال المغناطيسي اشد ما يمكن.

نرى من المفيد هنا أن نعرض الكيفية التي تتنافر أو تتلاحم بها خطوط القوة المغناطيسية لقضيبين مغناطيسيين متقابلين. ففي الحالة التي يكون فيها القضيبان المتشابهان متقابلين، فإن خطوط القوة المغناطيسية تُظهر تنافراً في المجال بجوار القطبين كما في الشكل (9 a-12)، أما في الحالة الأخرى التي يكون فيها وضع القطبين المتواجهين مختلفين كما في الشكل (9 b-12)، فيبدو شكل خطوط القوة المغناطيسية كما لو كانت لقطب مغناطيسي واحد أي يكاد يشابه شكل خطوط القوة المغناطيسية في الشكل (6 a-12).



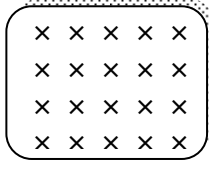
الشكل (9-12) : a- تنافر خطوط القوة المغناطيسية لقطبين مغناطيسيين متشابهين. b- التحام خطوط القوة المغناطيسية لقطبين مغناطيسيين مختلفين.

تُرسم خطوط القوة المغناطيسية بحيث تعطي للقارئ فكرة عن طبيعة المجال المغناطيسي، فالنظر إلى المخططات في الشكل (10a,b,c,d-12) يعطينا انطباعاً واضحاً عن أن المجال في جميعها منتظماً. فخطوط القوة في a و b و c تظهر مستقيمة ومتوازية وتتحصر فيما بينها مسافات متساوية وفي نفس الاتجاه، وعلى هذا يكون المجال متساوياً في المقدار والاتجاه عند جميع النقاط، أما خطوط القوة في d تظهر على شكل دوائر مغلقة منتظمة متحدة في المركز مركزها السلك وفي مستوي عمودي عليه. أما صورة خطوط القوة في e تدلّ على أن المجال غير منتظم، ففي 1 أشد مما هو عليه في 2.



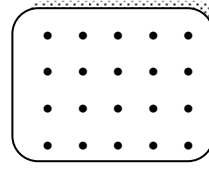
خطوط القوة المغناطيسية  
منطبقة على الصفحة  
باتجاه الشرق.

- c -



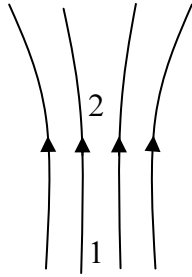
خطوط القوة المغناطيسية  
عمودية على الصفحة داخلية  
مبتعدة عن القارئ.

- b -



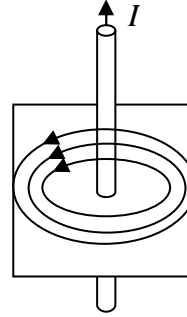
خطوط القوة المغناطيسية  
عمودية على الصفحة  
خارجة قريباً من القارئ.

- a -



خطوط القوة المغناطيسية غير منتظمة  
الكثافة.

- e -



خطوط القوة المغناطيسية عبارة عن  
دوائر مغلقة منتظمة ومتحدة المركز

- d -

الشكل (10-12) : مخططات ذات أشكال مختلفة لخطوط القوة المغناطيسية.

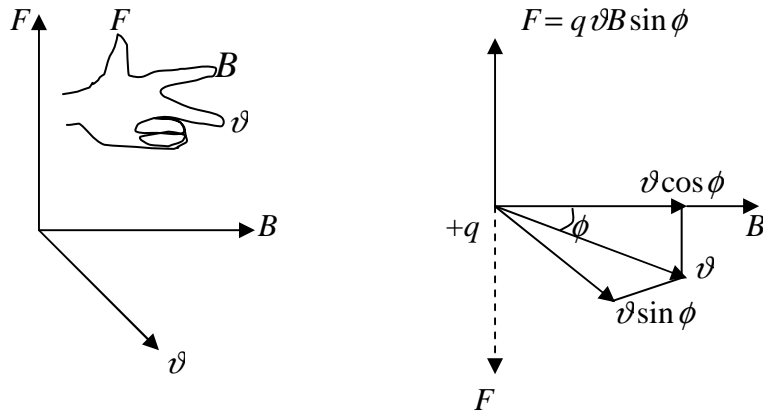


## (5-12) شدة المجال المغناطيسي Magnetic Field Strength

ذكرنا في البند الأول من هذا الفصل أن الإبرة المغناطيسية تنحرف عند وضعها بالقرب من سلك يحمل تياراً كهربائياً، والتيار كما عرفناه هو نتيجة لحركة شحنات كهربائية وان انحراف الإبرة المغناطيسية هو بسبب تأثيرها بقوة المجال المغناطيسي الذي أنتجته هذه الشحنات الكهربائية المتحركة. وهكذا ساد الاعتقاد منذ ذلك الوقت على أن جميع الظواهر المغناطيسية تتولد من قوى تنتج من شحنات كهربائية متحركة، لذا وجدنا من الأفضل البحث في المجال المغناطيسي المتولد في الفضاء حول شحنة متحركة ثم في القوى التي يسلطها هذا المجال على شحنة أخرى تتحرك فيه.

أن أي شحنة متحركة تولد مجالاً مغناطيسياً في الفضاء المحيط بها إلى جانب المجال الكهربائي المحيط بها في حالتي الحركة والسكون. وهنا لابد من الإشارة إلى أن أي شحنة كهربائية سواء كانت ساكنة أم متحركة داخل مجال كهربائي سوف تتأثر به بينما يشترط أن تكون هذه الشحنة متحركة لكي تتأثر بالمجال المغناطيسي. كما أن المجال الكهربائي المتولد من الشحنات الكهربائية المتحركة أو من التيارات الكهربائية، غالباً ما يكون صغيراً بحيث يمكن إهمال القوة الكهربائية التي يسلطها هذا المجال على شحنة متحركة إذا ما قورنت بالقوة المغناطيسية المؤثرة على تلك الشحنة.

تتأثر المواد المغناطيسية (كإبرة البوصلة) وكذلك الشحنات الكهربائية المتحركة بقوة المجال المغناطيسي عند تواجدها في المجال المؤثر لمغناطيس. فإذا ما تحركت شحنة كهربائية خلال ذلك المجال لتأثرت بقوة جانبية بالإضافة إلى ما كان عليها من قوى سابقة (إلا إذا كانت الشحنة الكهربائية متحركة باستقامة المجال حيث مقدار القوة المؤثرة عليها صفرًا) تحرفها عن اتجاه حركتها الأصلي. أن هذه القوة التي تدعى بالقوة المغناطيسية تبلغ أقصى قيمة لها عندما تكون حركة الشحنة الكهربائية باتجاه عمودي على المجال، أي الحالة التي تكون بها سرعة الشحنة المتحركة  $v$  تصنع زاوية مقدارها  $90^\circ$  مع المجال. أما إذا كانت سرعة الشحنة ليست عمودية على اتجاه المجال المغناطيسي وإنما تصنع زاوية مقدارها  $0 < \phi < 90$  مع المجال فعندئذ يكون مقدار القوة المغناطيسية يتناسب طردياً مع مركبة السرعة العمودية على المجال ومقدارها  $v \sin \theta$  إضافة إلى مقدار الشحنة  $q$  كما موضح في الشكل (11-12).



الشكل (11-12): تحديد قيمة واتجاه القوة  $F$  المؤثرة على الشحنة  $q$ .

وكما هو الحال في تعريف شدة المجال الكهربائي سوف نعطي تعريفاً لشدة المجال المغناطيسي  $B$  في أية نقطة بدلالة القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة متحركة في المجال المغناطيسي وعلى النحو الآتي:

$$B = \frac{F}{q v \sin \phi}$$

أو

$$F = B(q v \sin \phi) \quad \dots\dots\dots(1-12)$$

ويمكن كتابة المعادلة (1-12) بجبر المتجهات على النحو الآتي:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \dots\dots\dots(2-12)$$

ومن خصائص هذه المعادلة أن القوة  $\vec{F}$  تكون دائماً عمودية على كل من  $\vec{B}$  و  $\vec{v}$ . ويمكن تحديد اتجاه القوة المغناطيسية باستعمال قاعدة اليد اليسرى الموضحة في الشكل (11-12)، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه  $F$  أما الإصبع الوسطى فيشير إلى اتجاه حركة الشحنة أي السرعة  $v$  فيما تشير السبابة إلى اتجاه المجال المغناطيسي  $B$ . ويجب الانتباه إلى أن هذه القاعدة تطبق على الشحنات الموجبة، أما في حالة تطبيقها على الشحنات المتحركة السالبة فيتحتتم عكس اتجاه القوة كما ترى في الشكل (11-12). عند قياس  $F$

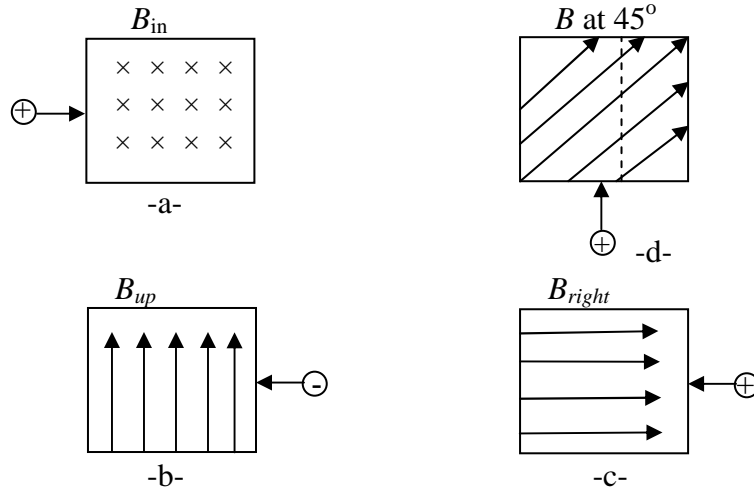
باليوتن و  $q$  بالكولوم و  $v$  بالمتر/ثانية تصبح وحدة  $B$   $\frac{\text{نيوتن}}{\text{كولوممتر} / \text{ثانية}}$  أو

نيوتن /مببر-متر وهذا يساوي تسلا وفي نظام الوحدات cgs يقاس  $B$  بوحدة الكاوس حيث أن 1 تسلا =  $10^4$  كاوس.

### مثال (1-12)

عَيِّن اتجاه انحراف الجسيمات المشحونة الداخلة إلى المجالات المغناطيسية كما تظهر في الحالات المبينة في الشكل (12-12).

الحل:



الشكل (12-12)

باستعمال قاعدة الكف الأيسر ينحرف الجسيم موجب الشحنة في  $a$  باتجاه عمودي على المجال المغناطيسي نحو الأعلى. وفي  $b$  ينحرف الجسيم سالب الشحنة في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي نحو القارئ، حيث يتم عكس اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنة السالبة عند تطبيق قاعدة الكف الأيسر عليها. وفي  $c$  لا يحصل انحراف وهذا واضح من تطبيق المعادلة  $F = qvB \sin \phi$  حيث  $\phi$  تساوي  $180$  وعليه فان  $F=0$  أي أن الجسيم الموجب المقذوف إلى المجال لا يتأثر بقوة المجال لذا لا يعاني انحراف. وفي  $d$  ينحرف الجسيم الموجب الشحنة في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي بعيداً عن القارئ.

مثال (2-12)

ما مقدار واتجاه القوة المؤثرة على إلكترون يتحرك بسرعة  $12 \times 10^5 \text{ m/sec}$  شاقولياً إلى الأعلى حال دخوله مجال مغناطيسي منتظم  $B=0.5T$  يؤثر باتجاه الغرب.

الحل : من المعادلة (1-12) نجد أن مقدار القوة التي تؤثر على إلكترون هي :

$$F = q v B \sin 90$$

$$= 1.6 \times 10^{19} \times 12 \times 10^5 \times 0.5 \times 1$$

$$= 2.6 \times 10^{-14} \text{ N}$$

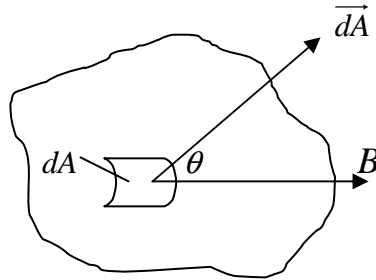
واتجاه القوة نحو الشمال.

**Magnetic Flux** (6-12) الفيض المغناطيسي

بإمكاننا إعطاء تعريف لشدة المجال المغناطيسي في نقطة ما بدلالة خطوط القوة المغناطيسية كما فعلنا مع المجال الكهربائي. فعدد خطوط القوة المغناطيسية في وحدة المساحة التي تجتاز سطحاً عمودياً على مجال مغناطيسي قريب من نقطة ما تسمى بشدة المجال المغناطيسي في تلك النقطة. وسوف نطلق على العدد الكلي لخطوط القوة المغناطيسية التي تجتاز السطح بفيض المجال المغناطيسي  $\phi$ . ويمكن التعبير عن الفيض المغناطيسي المخترق لسطح مساحته  $A$  بصيغة معادلة أسوة بنظيره الفيض الكهربائي وذلك بالرجوع إلى البند (6-8) من الفصل الثامن حيث نرى :

$$\phi = \int B \cos \theta dA \quad \dots\dots\dots(3-12)$$

والشكل (13-12) يمثل عنصر المساحة  $dA$  من سطح غير منتظم بحيث أن العمود على جزء السطح  $dA$  يصنع زاوية  $\theta$  مع اتجاه المجال المغناطيسي  $B$ .



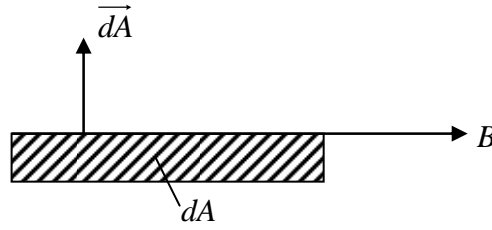
الشكل (13-12) : المجال المغناطيسي يصنع زاوية مع العمود على عنصر المساحة.

وإذا تأملنا الحالة التي يكون فيها المجال المغناطيسي  $B$  منتظماً عندئذ تصبح معادلة الفيض المغناطيسي  $\phi$ :

$$\phi = BA \cos \theta \quad \dots\dots\dots(4-12)$$

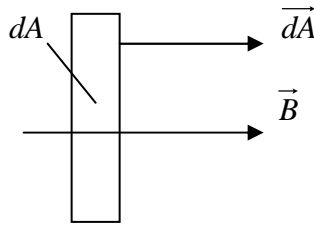
لنناقش الحالة التي يكون فيها متجه عنصر المساحة  $dA$  عمودياً على متجه المجال  $B$  أي عندما  $\theta = 90$  (انظر الشكل 14-12). عندئذ تكون قيمة الفيض المغناطيسي صفراً، وذلك لعدم وجود خطوط قوة مغناطيسية تخترق المساحة. بينما تكون قيمة الفيض المغناطيسي أكبر ما يمكن عندما تكون  $\theta = 0$  or  $180$  وهنا إما أن يكون الفيض المغناطيسي موجباً أو سالباً، عندئذ تأخذ المعادلة (4-12) الصيغة الآتية:

$$\phi = \mp BA \quad \dots\dots\dots(5-12)$$



الشكل (14-12): عنصر المساحة  $dA$  باستقامة المجال المغناطيسي.

فالحالة التي يكون فيها الفيض المغناطيسي موجباً تشير إلى أن خطوط القوة المغناطيسية في اتجاه الخروج من السطح، أما إذا كانت إشارة الفيض المغناطيسي سالبة فهذا يشير إلى أن الخطوط داخلة إلى السطح. وفي كلتا الحالتين فإن المعادلة (5-12) تشير إلى الحالة التي يكون فيها المجال المغناطيسي منتظماً وعمودياً على السطح وبكلام آخر المتجه  $\vec{dA}$  يكون موازياً لمتجه المجال المغناطيسي  $\vec{B}$  كما في الشكل (15-12).



الشكل (15-12):  $\vec{dA}$  يكون موازياً لاتجاه المجال المغناطيسي  $\vec{B}$ .

في النظام الدولي SI للوحدات يعبر عن الفيض المغناطيسي بوحدة الوبير ( $Wb$ ) نسبة إلى الفيزيائي الألماني ويبر W. E. Weber (1804-1891). ويتضح من المعادلة (5-12) أن الوبير يعادل تسلا. متر مربع ( $Tm^2$ ) وعلى هذا نجد أن شدة المجال المغناطيسي الذي يقاس بوحدة التسلا يكون له وحدة مكافئة أخرى هي الوبير لكل متر مربع ( $Wb/m^2$ ). وفي نظام آخر يسمى بالنظام الكهرومغناطيسي يعبر عن الفيض المغناطيسي بوحدة الماكسويل عندئذ يكون لشدة المجال المغناطيسي تعبير آخر وهو الكاوس، وهي عبارة عن ماكسويل لكل سنتيمتر مربع ( $M/cm^2$ ). وأخيراً تسمى أحيانا شدة المجال المغناطيسي بكثافة الفيض المغناطيسي أو كثافة التدفق المغناطيسي طالما أن شدة المجال المغناطيسي في نقطة ما تساوي الفيض في وحدة المساحة.

### مثال (3-12)

سطح مستوي مساحته  $600cm^2$  يخترقه مجال مغناطيسي منتظم  $B=0.4T$ .  
 جد الفيض المغناطيسي المخترق للسطح. 1- إذا كان المجال يؤثر بصورة عمودية على السطح، 2- إذا كان اتجاه المجال يصنع زاوية مقدارها  $60^\circ$  مع اتجاه السطح.  
 الحل :

من المعادلة (4-12) نجد مقدار الفيض المغناطيسي المخترق للسطح في الحالتين:  
 -1

$$\begin{aligned}\phi &= BA \cos 0 \\ &= 0.4 \times 600 \times 10^{-4} \times 1 = 24 \times 10^{-3} Wb\end{aligned}$$

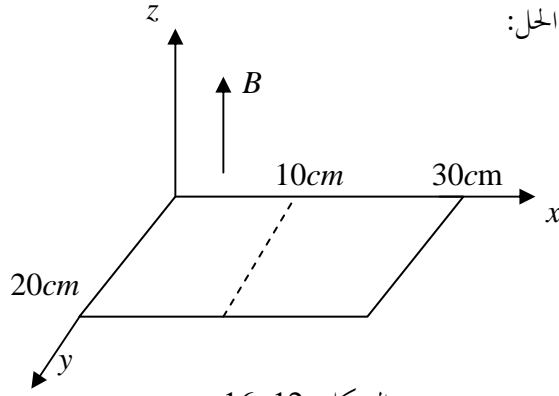
-2

$$\begin{aligned}\phi &= BA \cos 60 \\ &= 0.4 \times 600 \times 10^{-4} \times 0.5 \\ &= 12 \times 10^{-3} Wb\end{aligned}$$

### مثال (4-12)

الشكل (16-12) المجال المغناطيسي يوازي المحور  $Z$  وتتغير شدته وفق المعادلة  $B = (3x^2 + 2)T$ . جد الفيض المغناطيسي المخترق للمستطيل المبين في الشكل.

الحل:



الشكل (16-12).

$$\phi = \int B dA \cos 0$$

$$\phi = \int B dA$$

$$\phi = \int_0^{0.2} \int_{0.1}^{0.3} (3x^2 + 2) dx dy$$

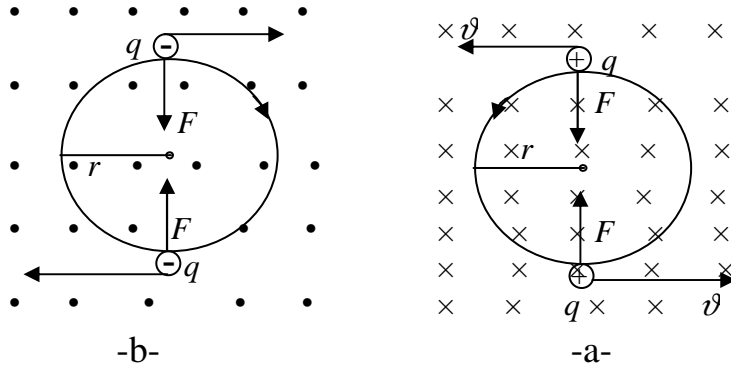
$$\phi = \int_0^{0.2} (x^3|_{0.1}^{0.3} + 2x|_{0.1}^{0.3}) dy$$

$$\phi = \int_0^{0.2} (0.3)^3 - (2 \times 0.3 - 2 \times 0.1) dy$$

$$\phi = 0.0852 \text{ Wb}$$

### (7-12) حركة جسيم مشحون داخل مجال مغناطيسي منتظم Motion of Charged Particle in Organized Magnetic Field

يمثل الشكل (17-12) حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم  $B$ ، في  $a$  من الشكل الجسيم يحمل شحنة موجبة  $(+q)$ ، وفي  $b$  يحمل شحنة سالبة  $(-q)$ ، وقد قذفنا الاثنين بسرعة واحدة  $v$  وباتجاه عمودي على المجال  $B$ .



-b-  $B$  مقترباً من القارئ

-a-  $B$  بعيداً عن القارئ

الشكل (17-12): دوران جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم.

من خلال الشكل نجد أن كلا الجسيمين المشحونين يتأثر بقوة مقدارها  $qvB$  تكون دائماً عمودياً على كل من  $B$  و  $v$ . وكما هو معروف من قوانين الميكانيك الكلاسيكي فإن هذه القوة تعمل على تغيير اتجاه سرعة الجسيم المتأثر بما فقط دون تغيير قيمتها. وهكذا فمسار الحركة لكلا الجسيمين يكون دائرياً طالما أن سرعة الجسيم المماسية للمسار تكون عمودية على خطوط المجال. ومن الملاحظات الجديرة بالذكر هو أن الجسيم سالب الشحنة يدور بعكس اتجاه دوران الجسيم موجب الشحنة أي باتجاه حركة عقارب الساعة، ويرجع ذلك الاختلاف إلى أن القوة المغناطيسية المؤثرة على الجسيم سالب الشحنة تكون بعكس اتجاه القوة المؤثرة على الجسيم موجب الشحنة، وهذا ما تشير إليه طريقة اختيار اتجاه القوة المؤثرة على الجسيم بواسطة قاعدة اليد اليسرى سالفة الذكر، وعلى هذا أصبح لدينا طريقة حاسمة لتعيين نوعية شحنة الجسيم، هي سالبة أو موجبة، إذ يشكّل اتجاه انحناء مسار الجسيم المشحون في المجال المغناطيسي دليلاً على ذلك. ويمكن حساب نصف قطر دوران الجسيم  $r$  بالطريقة الآتية :

لنعتبر الجسيم  $(+q)$  في الشكل (12 a-16). كتلته  $m$  وسرعته  $v$  والقوة المغناطيسية المركزية  $qvB$  تكون مساوية للقوة الطاردة  $\frac{mv^2}{r}$ ، أي أن :

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

ومنها

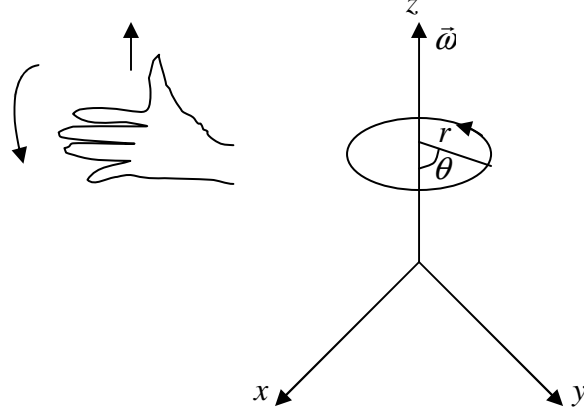
$$r = \frac{mv}{qB} \quad \dots\dots\dots(6-12)$$

من هذه المعادلة نستنتج أن  $r$  يعتمد على سرعة الجسيم المقذوف إلى مجال مغناطيسي منتظم، على افتراض أن قيمة المجال  $B$  وكتلة الجسيم  $m$  وشحنته  $q$  ثابتة. وبدلالة السرعة الزاوية  $\omega$  يمكن كتابة المعادلة (6-12) على الوجه الآتي:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad \dots\dots\dots (7-12)$$



ومن المهم أن نذكر أن اتجاه السرعة الزاوية يكون عادةً عمودياً على مستوي الحركة ويعين باستعمال قاعدة الكف الأيمن، وذلك بلف أصابع اليد اليمنى الأربعة باتجاه حركة الجسيم على الدائرة، فيشير الإبهام إلى اتجاه السرعة الزاوية كما في الشكل (18-12).



الشكل (18-12) : تحديد اتجاه السرعة الزاوية

أصبح بإمكاننا معرفة عدد الدورات التي يعملها الجسيم في الثانية الواحدة  $f$  حسب المعادلة:

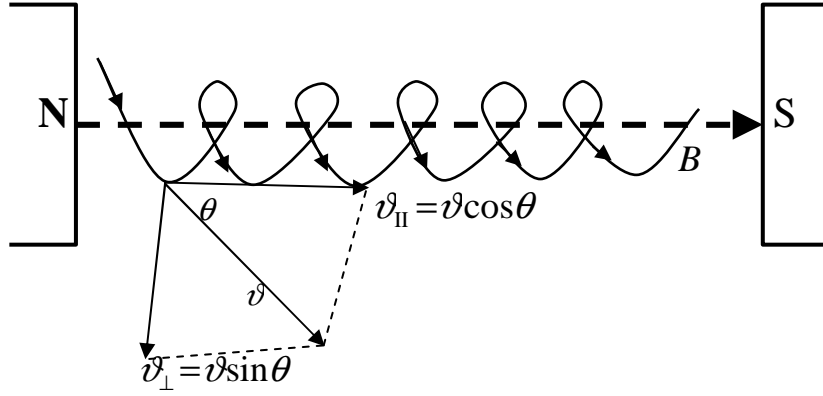
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m} \quad \dots\dots\dots(8-12)$$

ومن هذه المعادلة يتضح أن  $f$  مقدار ثابت لا يعتمد على السرعة فالجسيمات السريعة تدور في دوائر كبيرة بينما الجسيمات البطيئة تعمل دوائر صغيرة حيث أن نصف قطر الدوران  $r$  يتناسب طردياً مع السرعة  $v$  حسب المعادلة (6-12).

لنأخذ حالة جسيم مقذوف باتجاه غير عمودي على المجال. عندئذ سيتحرك في مدار لولبي (شكل 19-12) المقطع العرضي له دائرة نصف قطرها يعطى بالمعادلة:

$$r = \frac{m v}{qB} \sin \theta \quad \dots\dots\dots(9-12)$$

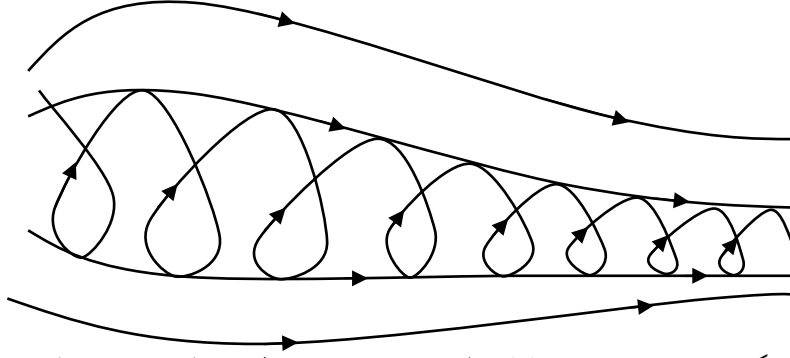
إذ أن  $\theta$  هي الزاوية المحصورة بين اتجاه  $B$  و  $v$  ، و  $v \sin \theta$  هي مركبة السرعة العمودية على المجال المغناطيسي المسؤولة عن تغيير اتجاه حركة الشحنة فقط دون قيمتها.



الشكل (12-19) : الحركة اللولبية لجسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم .

### (8-12) حركة جسيم مشحون داخل مجال مغناطيسي غير منتظم Motion of Charged Particle in-non-organized Magnetic Field

يبين الشكل (12-20) حركة جسيم مشحون داخل مجال مغناطيسي غير منتظم.



الشكل (12-20) : مسار لولبي لجسيم مشحون في مجال مغناطيسي غير منتظم.

أن نصف قطر المسار اللولبي الذي يسلكه الجسيم داخل المجال المغناطيسي سوف يتناقص كلما تقدم الجسيم باتجاه تزايد شدة المجال المغناطيسي، وهذا يعني حصول تقارب في لفات المسار اللولبي أكثر فأكثر كلما تقدمنا نحو منطقة تناقص المجال المغناطيسي. أن ذلك يمكن استنباطه بالنظر إلى المعادلة (12-6)، حيث  $r$  (نصف قطر المسار اللولبي) تتناسب عكسياً مع  $B$  (شدة المجال المغناطيسي) وطردياً مع سرعة الجسيم  $v$ ، وهذا يعني أن ديناميكية حركة الجسيم داخل المجال يصاحبها نقصان في مركبة السرعة الأفقية

الموازية للمجال، ومتى ما اشتد المجال المغناطيسي إلى الحالة التي يكون فيها سرعة الجسيم قد انعدمت أي أصبحت صفراً، أنعكس الجسيم وأصبح يتقدم بالاتجاه المعاكس. وهكذا نستنتج أن المجال المغناطيسي عندما تزداد شدته يبدأ العمل كعاكس للجسيمات المشحونة ويدعى بالمرآة المغناطيسية Magnetic Mirror.

### مثال (5-12)

تحرك بروتون من السكون خلال فرق جهد كهربائي مقداره  $4 \times 10^5 V$  ثم دخل بصورة عمودية في مجال مغناطيسي منتظم  $B=0.4T$ ، جد نصف قطر دوران البروتون وسرعته الزاوية والتردد.  
الحل:

$$r = \frac{m v}{qB}$$

وبالتعويض عن  $v$  من معادلة الطاقة الحركية للبروتون وهي:

$$\frac{1}{2} m v^2 = qV$$

نحصل على:

$$r = \frac{m}{qB} \left[ \frac{2qV}{m} \right]^{1/2}$$

$$= \frac{1.67 \times 10^{-27}}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.4} \left[ \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^5}{1.67 \times 10^{-27}} \right]^{1/2}$$

$$= 0.228m$$

$$= 22.8cm$$

من المعادلة (7-12) نحسب سرعة البروتون الزاوية وهي:

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

$$= \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.4}{1.67 \times 10^{-27}}$$

$$= 3.8 \times 10^7 \text{ rad / sec}$$

ومن المعادلة (8-12) نحسب تردد البروتون  $f$  وهو:

$$f = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.4}{2\pi \times 1.67 \times 10^{-27}}$$

$$= 60.99 \times 10^5 \text{ HZ}$$

$$= 6.099 \text{ mHZ}$$

مثال (6-12)

بروتون يتحرك بانطلاق  $2 \times 10^5 \text{ m/sec}$  داخل منطقة مجال مغناطيسي منتظم  $B=0.01T$  وباتجاه يصنع زاوية مقدارها  $60^\circ$  مع اتجاه المجال. جد: 1- نصف قطر الدوران، 2- المسافة التي يقطعها البروتون باستقامة المجال خلال مدة الدورة الواحدة.  
الحل :

1- من المعادلة (9-12) نجد نصف قطر دوران البروتون وهو :

$$r = \frac{m v}{qB} \sin 60$$

$$= \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 2 \times 10^5}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.01} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.1807 \text{ m} = 18.07 \text{ cm}$$

$$x = v_1 T$$

$$v_1 = v \cos \theta = 2 \times 10^5 \cos 60$$

$$= 2 \times 10^5 \times 0.5$$

$$= 10^5 \text{ m/sec.}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{qB / 2\pi m} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$= \frac{2 \times 3.14 \times 1.67 \times 10^{-27}}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.01}$$

$$= 6.558 \times 10^{-6} \text{ sec}$$

$$\therefore x = 10^5 \times 6.558 \times 10^{-6}$$

$$= 0.655$$

من التطبيقات المثيرة للاهتمام هو استعمال الجسيمات المشحونة كاليونات أو البروتونات أو الالكترونات ذات الطاقات العالية جداً في التعرف على بعض التفاصيل الداخلية لتركيبة النواة الذرية عن طريق قذفها بهذه الجسيمات. وقد أثار هذا الموضوع اهتمام علماء ثلاثينيات القرن العشرين، حيث كان من الأعمدة البحثية الفعالة في مجال الدخول إلى عالم الذرة.

في عام 1930 تمكن الفيزيائي الأمريكي لورنس (Lorentz) من تصميم جهاز سمي بالسايكلوترون تم صنعه في جامعة كاليفورنيا، تستعمل فيه القوة المغناطيسية للتحكم بمسار حركة الجسيمات المشحونة المتأثرة بالمجال المغناطيسي المسلط والحصول على طاقات عالية للغاية لهذه الجسيمات، كما يوضح عمل الجهاز كيفية استعمال المعادلات (6-12) و (7-12) عملياً. يبين الشكل (12-21) رسماً تخطيطياً لهذا الجهاز تظهر فيه الأجزاء الأساسية للسايكلوترون، حيث يتكون قلب الجهاز من زوج من الحجر المعدنية  $D_1$  و  $D_2$  المفرغة، تفصلهما فسحة مفرغة من الهواء أيضاً. ويسلط على الحجرتين وبشكل عمودي مجال مغناطيسي منتظم ينتج عن قطبين مغناطيسيين. تربط الحجرتان إلى مصدر فرق جهد متناوب عالي التردد يصل إلى عدة ملايين ذبذبة في الثانية وبهذا تحصل الحجرتان  $D_1$  و  $D_2$  على شحنات سالبة وموجبة بشكل متناوب. تنبعث الجسيمات المشحونة (البروتونات) من المصدر  $S$  الكائن في مركز الفسحة بين الحجرتين. فإذا فرضنا أن هذه الجسيمات انبعثت من مصدرها في الوقت الذي كانت فيه الحجر  $D_1$  موجبة الشحنة، عندئذ فإن كل جسيم سوف يتعجل عبر الفسحة بين الحجرتين بواسطة قوة كهربائية تؤثر عليه بسبب المجال الكهربائي المتولد في الفسحة بين قطبي مصدر الفولتية المتناوبة، داخلاً الحجر  $D_2$  سالبة الشحنة بسرعة معينة، وبما أن المجال المغناطيسي المسلط على الجهاز هو بمستوى سطح الحجرتين، لذا فإن دخول الجسيم إلى  $D_2$  سيكون عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي، وستؤثر عليه قوة مغناطيسية تجعله ينحرف في دائرة ويخرج من الغرفة  $D_2$  في نفس اللحظة تماماً التي تنعكس فيها الفولتية فينجذب إلى الغرفة  $D_1$  بسرعة أكبر ويدور في دائرة أكبر (وهذا ما جرى الحديث عنه في البند 7-12 وهو تحقيق عملي للمعادلة 6-12). وهكذا تتكرر هذه العملية عدة مرات وفي كل مرة يُعجّل الجسيم

المشحون إلى سرعات أكبر فأكبر وكذلك نصف قطر دائرة دورانه. وفي النهاية تُحرّف الجسيمات عن محيط السايكلوترون بواسطة مجال مغناطيسي آخر لتخرج على هيئة حزمة ذات طاقة عالية نحو الخارج من خلال المنفذ  $y$  بهدف استعمالها في قصف هدف محدد. ومن المعادلة (6-12) نجد:

$$v = \frac{qB}{m} r$$

وبما أن أقصى مسار دائري تستطيع أن تسلكه الجسيمات المشحونة بقدر نصف قطر يعادل نصف قطر السايكلوترون  $R$  لذا فإن أقصى سرعة يمكن الحصول عليها للجسيمات هي:

$$v_{\max} = \frac{qB}{m} R \quad \dots\dots\dots(10-12)$$

وان أقصى طاقة حركية تكتسبها هذه الجسيمات هي:

$$E_K = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \frac{B^2 q^2}{2m} R^2 \quad \dots\dots\dots(11-12)$$

وتؤكد تجربة السايكلوترون حقيقة أن الزمن الذي تستغرقه الجسيمات في إنجاز دورة كاملة هو نفسه لا يختلف أن كانت الدورة كبيرة أو صغيرة، بمعنى أن هذا الزمن المنجز يفترض أن لا يعتمد لا على سرعة الجسيمات ولا على نصف قطر المسار الدائري فالزمن الدوري  $T$  هو:

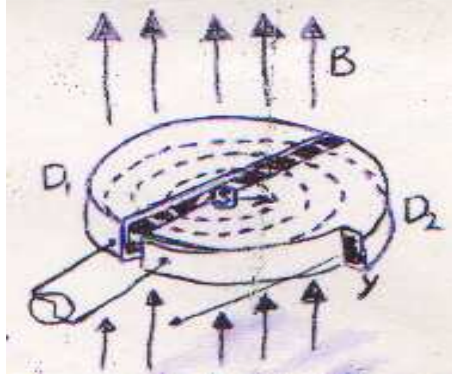
$$\dots\dots(12-12) T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r m}{qBr} = \frac{2\pi m}{qB}$$

وهذا تحقيق عملي لما جاء في المعادلة (8-12). حيث التردد  $f$  هو:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

أخيراً نُذكر بملاحظة مهمة وهي يجب أن لا يذهب البعض إلى التفكير في محاولة زيادة نصف قطر المسار الدائري للجسيمات من خلال زيادة السرعة المكتسبة من قبل هذه الجسيمات، وبالتالي الوصول إلى جسيمات ذات طاقة عالية غير محدودة. أن هذا لا يمكن تقبله عملياً وذلك لان اقتراب سرعة الجسيمات من سرعة الضوء يصاحبها زيادة مطردة في كتلتها (كما جاء ذلك في فرضيات النظرية النسبية الخاصة لأينشتاين)، وهذا

يؤدي إلى عدم السيطرة عليها من قبل المجال الكهربائي المتغير أثناء وجودها داخل الفسحة بين قطبي مصدر الفولتية وكنتيجة لذلك لا يحدث أي زيادة في السرعة وكذلك في الطاقة.



### مثال (7-12)

لو حظ أن جسيمات ألفا تصنع دائرة نصف قطرها  $0.4m$  قبل أن تخرج من جهاز السايكلوترون، فإذا علم أن تردد الفولتية المستعملة هو  $10^7 Hz$ . احسب: 1- شدة المجال المغناطيسي، 2- سرعة جسيمات ألفا عند خروجها من الجهاز، 3- طاقة جسيمات ألفا بوحدات الإلكترون فولت. علماً بأن كتلة جسيم ألفا هي  $4.003aum$ .

الحل:

-1

من المعروف أن نواة النظير الثاني لعنصر الهليوم  ${}^4_2He$  يطلق عليها جسيمة ألفا وهي تحتوي على بروتونين و نيوترونين ويدور حولهما إلكترونان، لذا فان شحنة جسيمة ألفا تساوي ضعف شحنة الإلكترون أو البروتون، أي:

$$q = 2 \times 1.6 \times 10^{-19} C = 3.2 \times 10^{-19} C$$

ومن المعروف أيضا أن وحدة الكتلة الذرية  $um$  تعادل  $1.6604 \times 10^{-27} kg$ . لذا فإن كتلة جسيمة ألفا المعطاة في المثال تعادل :

$$4.003 \times 1.6604 \times 10^{-27} kg = 6.64658 \times 10^{-27} kg$$

و بتطبيق المعادلة:

$$B = \frac{2\pi f_o m}{q}$$

نجد شدة المجال المغناطيسي، أي:

$$B = \frac{2\pi \times 10^7 \times 6.64658 \times 10^{-27}}{3.2 \times 10^{-19}}$$

$$= 13.05 \times 10^{-1} T$$

$$= 1.3 T$$

-2

$$v_{\max} = \frac{Bq}{m} R = \frac{1.3 \times 3.2 \times 10^{-19} \times 0.4}{6.64658 \times 10^{-27}}$$

$$= 25 \times 10^6 m/sec$$

-3

$$E_K = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \frac{B^2 q^2 R^2}{2 m}$$

$$E_K = \frac{1.3^2 \times (3.2 \times 10^{-19})^2 \times 0.4^2}{2 \times 6.64658 \times 10^{-27}}$$

$$E_K = \frac{1.69 \times 10^{-24} \times 0.16}{13.29316 \times 10^{-27}}$$

$$E_K = 20.8294792 \times 10^{-13} J$$

$$E_K = \frac{20.8294792 \times 10^{-13}}{1.6 \times 10^{-19}} = 13 \times 10^6 eV$$

حيث

$$1 eV = 1.6 \times 10^{-19} J$$



## (10-12) القوة المغناطيسية المؤثرة على موصل يحمل تياراً كهربائياً

بيّن العالم أوريستد عام 1819 التأثير المغناطيسي لسلك يمر به تيار كهربائي يؤثر على إبرة مغناطيسية موضوعة بجواره. أما العالم ميشيل فاراداي فقد بيّن التأثير المعاكس لهذه الظاهرة وهي أن المغناطيس من خلال مجاله يمكن أن يؤثر بقوى مغناطيسية متساوية على السلك الموصل. ولدراسة هذا الموضوع علينا أن نبدأ باستعمال ما توصلنا إليه فيما يتعلق بالقوة المغناطيسية المؤثرة على جسيم مشحون يتحرك بحرية في مجال مغناطيسي. ولكي نفعل ذلك نقيم تجربة تمكّن من تحقيقها فاراداي، أستعمل فيها سلكاً مستقيماً طوله  $L$  ومساحة مقطعه العرضي  $A$  ضمن دائرة مكونة من بطارية ومفتاح وقد وضع السلك بصورة عمودية على مجال مغناطيسي خارجي منتظم بين فكي مغناطيس دائمي. فعندما تكون دائرة السلك مفتوحة لا يبدي المجال المغناطيسي أي تأثير على السلك كما في الشكل (12-22a). ولكن عند غلق الدائرة يسري تيار من الشحنات السالبة في السلك ويؤثر المجال عليه بقوة مغناطيسية تدفعه إلى الأسفل  $\otimes$  كما في الشكل (12-22 b). وفي حالة عكس الفولتية ينعكس اتجاه التيار في السلك ليندفع إلى الأعلى  $\ominus$  بتأثير قوة المجال المغناطيسي كما في الشكل (12-22c). نستنتج مما تقدم أن القوة المغناطيسية لا تؤثر على السلك نفسه إنما على الشحنات المتحركة داخله وبالتالي السلك. لنفرض أن عدد الإلكترونات المتحركة في وحدة الحجم من السلك هو  $n$  وان كلاً من هذه الإلكترونات تتأثر بقوة مغناطيسية يمكن إيجادها حسب المعادلة (12-1):

$$F = e v_d B$$

$$F = e \left( \frac{I}{neA} \right) B$$

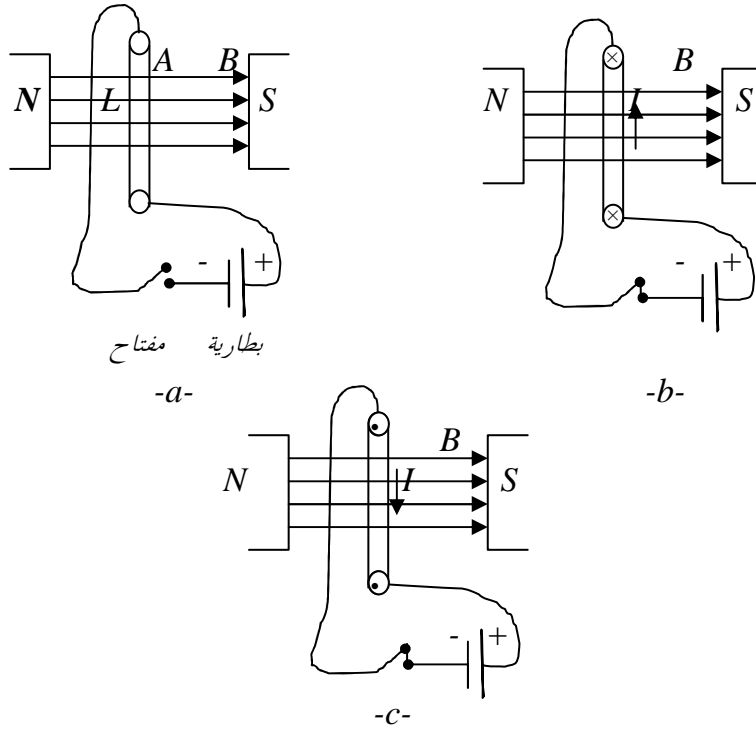
أما محصلة القوة الكلية التي تؤثر على جميع الإلكترونات الطليقة في السلك فهي :

$$F = Nf = (nAL) \frac{eIB}{neA}$$

حيث  $N=nAL$  وهو العدد الكلي للإلكترونات الطليقة التي يجوبها السلك بأكمله.

ويجاء الاختصارات نجد القوة المؤثرة على السلك الذي طوله  $L$  وهي:

$$F = ILB \dots\dots\dots(12-12)$$



شكل (12-22): *a*-دائرة السلك مفتوحة ولا تأثير للقوة المغناطيسية، *b*-دائرة السلك مغلقة والقوة المغناطيسية تدفع السلك إلى الأسفل  $\otimes$ ، *c*-دائرة السلك مغلقة والقوة المغناطيسية تدفع السلك إلى الأعلى بسبب عكس أقطاب البطارية.

والآن لنأخذ الحالة التي يكون فيها السلك وضع بزاوية مقدارها  $\theta$  مع اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. عندئذ تكتب المعادلة (12-12) بالصورة:

$$L = IBL \sin \theta \quad \dots\dots\dots(13-12)$$

وعند استعمال جبر المتجهات تكتب المعادلة (13-12) على النحو الآتي:

$$\vec{F} = I(\vec{L} \times \vec{B}) \quad \dots\dots\dots(14-12)$$

حيث  $\vec{L}$  يشير إلى متجه الإزاحة الذي ينطبق على السلك باتجاه التيار  $I$  أما اتجاه القوة  $F$  فيمكن تحديده بتطبيق قاعدة الكف الأيسر على الضرب المتجهي للكميتين

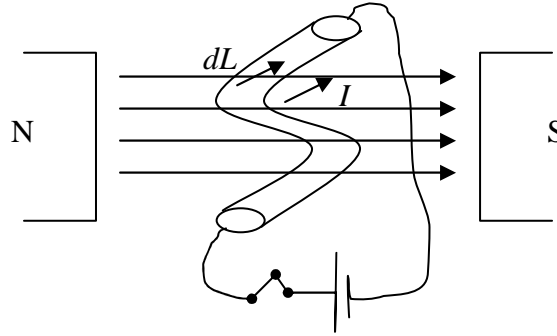
$\vec{L}$  و  $\vec{B}$  مع الانتباه إلى أن الإصبع الوسطى يشير إلى اتجاه  $L$ .

في الحالة التي يكون فيها السلك غير منتظم كما في الشكل (12-23) يكون:

$$d\vec{F} = I(d\vec{L} \times \vec{B})$$

$$\therefore \vec{F} = I \int_a^b d\vec{L} \times \vec{B} \quad \dots\dots\dots(15-12)$$

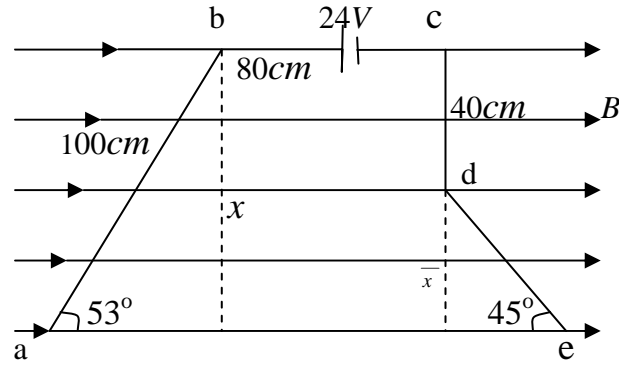
وهي القوة المغناطيسية الكلية المؤثرة على كل السلك.



الشكل (12-23): تأثير القوة المغناطيسية على سلك غير منتظم يحمل تياراً كهربائياً.

**مثال (8-12)**

في الشكل (12-24) الدائرة الكهربائية واقعة في مستوى الصفحة والحال المغناطيسي  $B=0.2T$  منتظم يؤثر في مستوى الصفحة وبالاتجاه المبين، جد مقدار واتجاه القوة على كل سلك علماً بان مقاومة الدائرة تساوي  $8\Omega$ .  
الحل :



الشكل (12-24).

$$F_{ab} = IBL \sin \theta$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{8} = 3A$$

$$\therefore F_{ab} = 3 \times 0.2 \times 1 \times \sin 53 = 0.48 N$$

باتجاه عمودي على الصفحة ومتجه نحو القارئ

$$F_{bc} = F_{ae} = 0$$

وبسبب أن الزاوية  $\theta = 0$  وبالتالي  $\sin 0 = 0$  فإن

$$F_{cd} = IBL \sin \theta$$

$$= 3 \times 0.2 \times 0.4 \sin 90$$

$$= 0.24 N$$

باتجاه عمودي على الصفحة ومتجه بعيداً عن القارئ

$$F_{de} = IBL \sin \theta$$

$$\sin 53 = \frac{x}{1} \Rightarrow x = 0.798 m$$

$$\bar{x} = x - 0.4 = 0.798 - 0.4 = 0.398 m$$

$$\sin 45 = \frac{\bar{x}}{ed}$$

$$\therefore ed = \frac{0.398}{0.707} = 0.562 m$$

$$\therefore F_{ed} = 3 \times 0.2 \times 0.562 \times \sin 45$$

$$= 0.24 N$$

باتجاه عمودي على الصفحة ومتجه بعيداً عن القارئ.

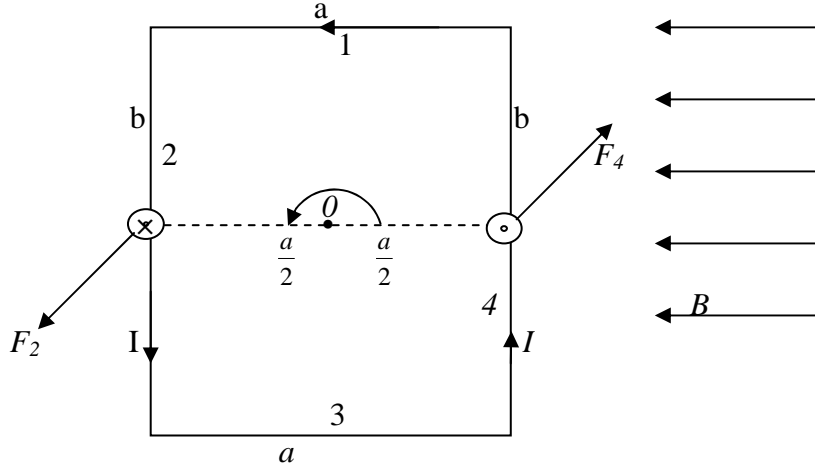
## (11-12) العزم المغناطيسي للملف

### Magnetic Moment of Coil

نتأمل ملفاً مستطيل الشكل يتكون من لفة واحدة، يحمل تياراً  $I$  وموضوعاً في مجال مغناطيس منتظم موازي لمستوي الملف كما مبين في الشكل (12-25): الضلعان 1 و3 المؤشران بالحرف  $a$  لا يتأثران بقوة المجال المغناطيسي كونهما موازيين للمجال المغناطيسي الخارجي وهذا واضح من خلال تطبيق المعادلة (12-13) وفق ما يأتي:

$$F = IBL \sin \theta$$

حيث الضلع 1 يصنع زاوية 0 مع المجال المغناطيسي، أما الضلع 3 فيصنع زاوية 180 مع المجال المغناطيسي وعليه فان:



الشكل (12-25): العزم الدوراني المؤثر على ملف مستطيل الشكل لحالة مجال مغناطيسي موازي لمستوي الملف.

$$F = F_1 = F_3 = IBa \sin(0 \text{ or } 180) = 0$$

أما الضلعان 2 و 4 المؤثران بالحرف  $b$  فيتأثران بقوة المجال المغناطيسي إذ كل منهما يصنع زاوية قائمة مع اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي، لذا فان القوة المؤثرة على كل من هذين الضلعين تساوي:

$$F = F_2 = F_4 = IBb \sin 90 = IBb$$

وحسب قاعدة الكف الأيسر ستكون القوتان المؤثرتان على الضلعين 2 و 4 باتجاهين متعاكسين. فالقوة المغناطيسية  $F_2$  المؤثرة على الضلع 2 تكون باتجاه نحو الأسفل، أما القوة المغناطيسية  $F_4$  المؤثرة على الضلع 4 تكون باتجاه نحو الأعلى كما معلم ذلك على الرسم بالعلامة  $\otimes$  و  $\ominus$  على التوالي. وعلى الرغم من بقاء محصلة القوة المؤثرة على الملف صفراً، فان القوتين المتعاكستين  $F_4$  و  $F_2$  وبسبب كونهما لا تعملان على خط العمل نفسه سوف تجعل الملف تحت تأثير عزم دوراني حول  $O$  يجعل الملف يدور باتجاه عكس عقارب الساعة. أن قيمة هذا العزم الدوراني  $\tau_{\max}$  يعطى بالمعادلة:

$$\tau_{\max} = F_2 \frac{a}{2} + F_4 \frac{a}{2} = IbB \frac{a}{2} + IbB \frac{a}{2} = IbaB \quad \dots(16-12)$$

حيث  $\frac{a}{2}$  تمثل ذراع العزم حول O بكلتا القوتين  $F_2$  و  $F_4$ .

لكن  $ba$  تساوي مساحة الملف المستطيل (A) لذا يمكن كتابة المعادلة أعلاه بالصيغة :

$$\tau_{\max} = IAB \quad \dots\dots\dots(17-12)$$

أن  $\tau_{\max}$  هي أقصى قيمة للعزم الدوراني يمكن الحصول عليها فقط في الحالة التي يكون فيها المجال المغناطيسي موازياً لمستوي الملف. ومن المفيد أن نذكر بأنه في حالة عكس اتجاه التيار الكهربائي في الملف فان اتجاه القوى  $F_2$  و  $F_4$  سينعكس، وان اتجاه دوران الملف سيكون باتجاه حركة عقارب الساعة.

لنأخذ الحالة التي يكون فيها المجال المغناطيسي المنتظم يصنع زاوية  $90 > \theta$  مع العمود المقام على مستوي الملف (شكل 12-26). من الملائم أن نختار  $B$  عمودي على الضلعين 1 و 3 عندئذ تكون القوة المغناطيسية المؤثرة على كل من هذين الضلعين هي :

$$F = IaB$$

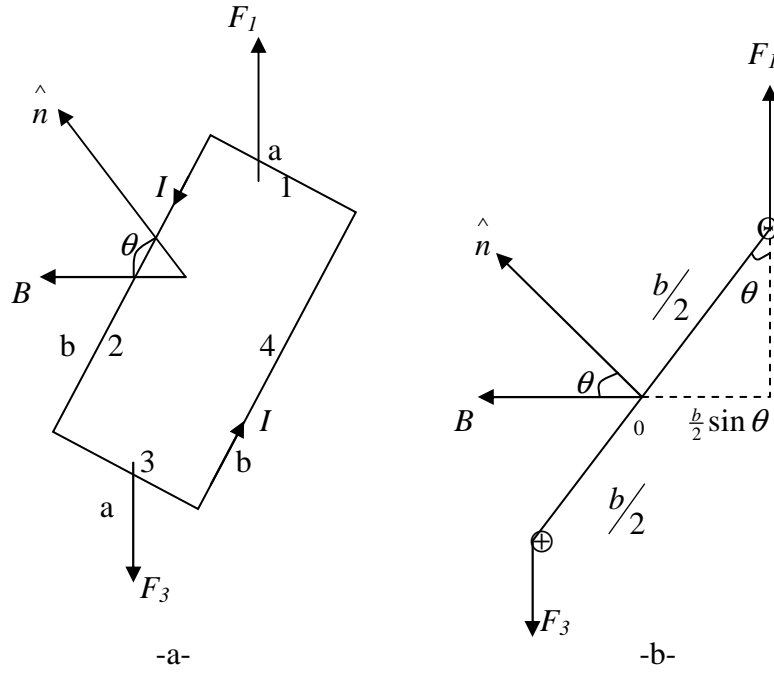
في الحالة المعطاة تكون محصلة القوتين المتقابلتين  $F_2$  و  $F_4$  صفراً، ولا يكون لهما تأثير لأنهما قوتان متقابلتان تعملان على خط العمل نفسه. في حين أن القوتين  $F_1$  و  $F_3$  تشكلان ما يدعى بالمزدوج Couple الذي يسبب عزم دوراني حول أي نقطة.

ومما يلاحظ من الرسم التوضيحي في الشكل (12-b-26)، حيث تظهر فيه القوتان  $F_1$  و  $F_3$  المؤثرتان على الضلعين 1 و 3، أن ذراع العزم للقوة  $F_1$  حول O هو  $\frac{b}{2} \sin \theta$  ، وبطريقة مماثلة فان ذراع العزم للقوة  $F_3$  حول O هو  $\frac{b}{2} \sin \theta$  أيضاً. عندئذ تكون محصلة العزم الدوراني حول O هي :

$$\tau = F_1 \frac{b}{2} \sin \theta + F_3 \frac{b}{2} \sin \theta$$

$$\tau = IaB \left( \frac{b}{2} \sin \theta \right) + IaB \left( \frac{b}{2} \sin \theta \right)$$

$$\tau = IabB \sin \theta = IAB \sin \theta \quad \dots\dots\dots(18-12)$$



الشكل (12-26): العزم الدوراني المؤثر على ملف مستطيل الشكل لحالة مجال مغناطيسي يؤثر بزاوية  $\theta$  على مستوي الملف .

هذه النتيجة تدل على ان اقصى قيمة للعزم الدوراني يمكن الحصول عليها عندما هذه النتيجة تدل على ان اقصى قيمة للعزم الدوراني يمكن الحصول عليها عندما  $\theta = 90$  ويساوي صفرًا عندما  $\theta = 0$  . ويمكن التعبير عن العزم الدوراني في المعادلة (12-18) بصيغة جبر المتجهات بالمعادلة الآتية :

$$\vec{\tau} = I \vec{A} \times \vec{B} \dots\dots\dots(19-12)$$

ولو كان الملف يتكون من  $N$  من اللفات فان العزم يتضاعف بقدر عدد اللفات ويصبح:

$$\tau = (NIA)B \sin \theta \dots\dots\dots(20-12)$$

ومن المواضيع التي أصبح بمقدور الطالب إدراكها هي أن الملف الذي يمر فيه تيار كهربائي ينشأ حوله مجال مغناطيسي، أي يمكن اعتباره مكافئاً لقطيب مغناطيسي وذلك بان نعتبر احد وجهيه بمثابة القطب الشمالي للمغناطيس والآخر القطب الجنوبي. وهكذا يمكن أن نعتبر الملف في حالتنا هذه ثنائي قطب مغناطيسي Dipole Magnetic والعزم المغناطيسي له هو  $(NIA)$  . وعليه فالعزم المغناطيسي  $M$  هو:

$$M = NIA \dots\dots\dots(21-12)$$

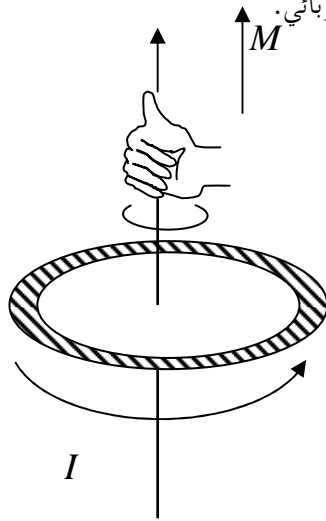
ووحداً هي  $amp.m^2$  وعليه فان المعادلة (20-12) تصبح :

$$\tau = MB \sin \theta \quad \dots\dots\dots(22-12)$$

أو

$$\vec{\tau} = \vec{M} \times \vec{B} \quad \dots\dots\dots(23-12)$$

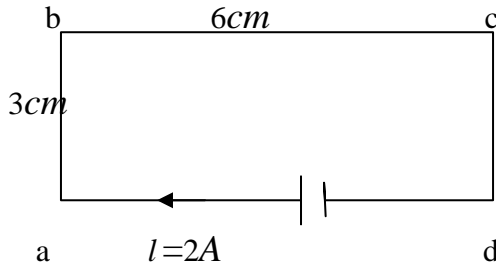
أما اتجاه العزم المغناطيسي للملف فيمكن تحديده حسب قاعدة الكف الأيمن حيث تشير لفة الأصابع إلى اتجاه التيار والإبهام إلى اتجاه العزم المغناطيسي (شكل 27-12). المعادلة (23-12) تذكرنا بالمعادلة  $\vec{\tau} = \vec{P} \times \vec{E}$  في فصل المجال الكهربائي حيث  $P$  تمثل عزم ثنائي القطب الكهربائي.



الشكل (27-12): تحديد اتجاه العزم المغناطيسي .

**مثال (9-12)**

جد مقدار واتجاه القوة على كل ضلع من الشكل (28-12) عند تسليط مجال



مغناطيسي منتظم  $B=0.5T$

1- باتجاه عمودي على

السطح ومتجه نحو القارئ.

الشكل (28-12).



$$F_{ab} = F_{dc} = I l B \sin \theta$$

$$= 2 \times 3 \times 10^{-2} \times 0.5 \times \sin 90 = 0.03 N$$

في مستوى السطح نحو الداخل

$$F_{bc} = F_{ad} = 2 \times 6 \times 10^{-2} \times 0.5 \times \sin 90$$

$$= 6 \times 10^{-2} = 0.06 N$$

في مستوي السطح نحو الداخل

2- باتجاه يوازي سطح المستطيل ويوازي الضلع ab:

$$F_{ab} = F_{dc} = 0$$

$$F_{bc} = 2 \times 6 \times 10^{-2} \times 0.5 \times \sin 90 = 0.06 N$$

باتجاه عمودي على السطح نحو القارئ .

$$F_{da} = 2 \times 6 \times 10^{-2} \times 0.5 \times \sin 90 = 0.06 N$$

باتجاه عمودي على السطح مبتعداً عن القارئ.

3- جد عزم الازدواج في كل حالة.

• في الحالة الأولى:

$$\tau = I A B \sin \theta$$

$$\tau = 2 \times (6 \times 3) \times 10^{-4} \times 0.5 \times \sin 0 = 0$$

• وفي الحالة الثانية:

$$\tau = 2 \times (6 \times 3) \times 10^{-4} \times 0.5 \times \sin 90$$

$$= 0.0018 Nm$$

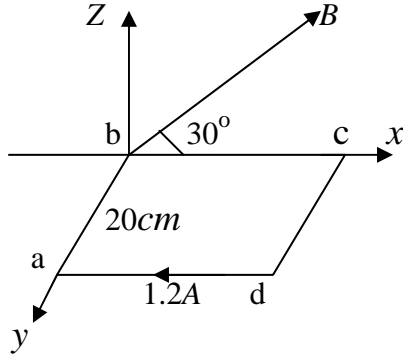
في مستوي السطح وبتجاه  $\vec{bc}$



حلّ المثال أعلاه في حالة أن المجال المغناطيسي يؤثر بصورة موازية لسطح

المستطيل وبتجاه يصنع زاوية مقدارها 30 مع ab؟ (يترك الحل للطالب)

في الشكل (12-29) مستطيل يمر خلال تيار كهربائي ثابت الشدة مقداره  $1.2A$ . سلط على المستطيل مجالاً مغناطيسياً منتظماً  $B=0.2T$  بصورة موازية للسطح  $xz$  وباتجاه يصنع زاوية مقدارها  $30^\circ$  مع السطح  $xy$ ، جد:



الشكل (12-29).

- 1- مقدار واتجاه القوة على كل ضلع.
  - 2- عزم الازدواج.
  - 3- الفيض المغناطيسي خلال السطح.
- الحل :

-1

$$F_{ab} = IBL \sin 90^\circ$$

$$= 1.2 \times 0.2 \times 20 \times 10^{-2} \times 1 = 0.048 N$$

باتجاه يوازي السطح  $xz$  ويصنع زاوية  $60^\circ$  مع محور  $x$  الموجب.

$$F_{cd} = 0.048 N$$

باتجاه يوازي السطح  $xz$  ويصنع زاوية  $150^\circ$  مع محور  $x$  الموجب.

$$F_{bc} = 1.2 \times 0.2 \times 40 \times 10^{-2} \times \sin 30^\circ = 0.048 N$$

باتجاه محور  $y$  الموجب.

$$F_{ad} = 0.048 N$$

باتجاه محور  $y$  السالب.

2- من المعادلة (12-18) نجد :

$$\tau = IAB \sin 60^\circ$$

$$= 1.2 \times 0.2 \times 0.4 \times 0.2 \times 0.866$$

$$= 0.016627 \text{ Nm}$$

3- من المعادلة (12-4) نجد:

$$\phi = BA \cos 60^\circ$$

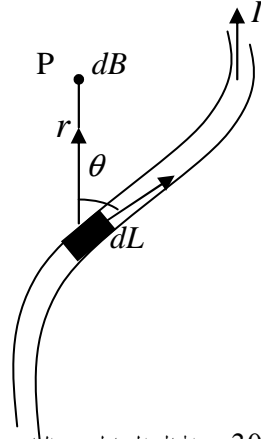
$$= 0.2 \times 0.2 \times 0.4 \times 0.5 = 0.008 \text{ Wb}$$

## (12-12) مصادر المجال المغناطيسي Magnetic Field Generators

درسنا حتى الآن تعريف المجال المغناطيسي وميزاته وتأثيره على الشحنات الكهربائية المتحركة في مجاله، وقد حدّدنا اتجاه المجال المغناطيسي بدلالة سلوك البوصلة المغناطيسية. وأن سلكاً حاملاً للتيار الكهربائي إذا وضع في مجال مغناطيسي يتعرض لقوة مغناطيسية كما يتعرض لها ملف يمر به تيار ويؤثر عليه بازدواج. وقد عرفنا بعض الظواهر التي تشير إلى أن التيار مصدر للمجال المغناطيسي الذي يظهر تأثيره على بوصلة بجواره، لكننا لم نتعرض إلى دراسة تفصيلية لمصدر المجال المغناطيسي وكيفية حسابه. وفي هذا البند سندرس قانونين نتعرف من خلالهما على العلاقة بين التيار المار في سلك والمجال الناتج عنه عند أية نقطة في الفراغ وهما قانون بايوت - سافارت وقانون أمبير.

## (1-12-12) قانون بايوت وسافارت Biot - Savart Law

بعد اكتشاف أوريستد التأثير المغناطيسي لسلك يمر فيه تيار عام 1819، قام بايوت وسافارت بعدة تجارب كانت حصيلتها بناء علاقة رياضية بواسطتها يمكن حساب شدة المجال المغناطيسي عند أية نقطة في الفراغ حول سلك موصل يحمل تياراً كهربائياً. لتأمل سلكاً طوله  $L$  يسري خلاله تيار كهربائي، وان المجال المغناطيسي لعنصر صغير من السلك طوله  $dL$  عند نقطة  $p$  في الفراغ يكون دائماً عمودي على المستوي الذي يضم  $dL$  ومنتجه الإزاحة  $r$  (شكل 12-30). ولقد وجد بايوت وسافارت أن مقدار  $dB$  يتناسب عكسياً مع مربع المسافة  $r$  وطردياً مع مقدار التيار المار في السلك.



الشكل (12-30): المجال المغناطيسي الناشئ من سلك حامل للتيار .

ولقد عبّر العالمان عن هذه النتائج بقانون عرف باسميهما (على الرغم من أن بايوت لوحده صاحب المقترح الأول لهذا القانون) بالصيغة الآتية:

$$dB = k \frac{IdL \sin \theta}{r^2} \dots\dots\dots(24-12)$$

وبصيغة جبر المتجهات

$$\vec{dB} = k \frac{Id\vec{L} \times \vec{r}}{r^3} \dots\dots\dots(25-12)$$

من الصيغة الاتجاهية للمعادلة (24-12) يتبين أن  $\theta$  هي الزاوية المحصورة بين متجهه الإزاحة  $r$  وعنصر السلك  $dL$ .

يتبين مما تقدم أن مقدار  $k$  ووحداتها تعتمد على وحدات مكونات المعادلة (25-12) وعلى نوع الوسط. فإذا كان نظام الوحدات المستعمل هو النظام الدولي للوحدات SI وان الوسط هو الهواء أو الفراغ فان  $k=10^7 \text{Wb/amp.m}$ .

وغالباً ما يستبدل الثابت  $k$  بالمقدار  $\frac{\mu}{4\pi}$  حيث  $\mu$  كمية ثابتة تسمى بالنفوذية المغناطيسية Magnetic Permeability. فإذا كان الوسط هواءً أو فراغاً فإنها

تأخذ الرمز  $\mu_0$  وقيمتها  $\frac{Wb}{amp.m} = 12.57 \times 10^{-7}$  . وفي دراستنا لهذا

الموضوع سوف تكتب المعادلة (20-12) للوسط الهواء أو الفراغ بالشكل الآتي:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{IdL \sin \theta}{r^2} \dots\dots\dots(26-12)$$

وبصيغة جبر المتجهات:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3} \dots\dots\dots(27-12)$$

واضح من المعادلة (26-12) أن  $dB$  المتأتية من الجزء  $dL$  تأخذ أعلى قيمة لها في جميع النقاط الواقعة في المستوي (الفضاء) الذي يجمع متجه الإزاحة  $r$  بعنصر المسافة  $dL$  حيث  $\theta = 90$ . كما أن  $dB$  تساوي صفراً على جميع نقاط محور السلك طالما أن  $\theta = 0$ . وبإجراء التكامل  $dB$  نحصل على  $B$  في النقطة  $p$  المتأتية من جميع أجزاء السلك ، أي :

$$B = \int dB = \frac{\mu_o I}{4\pi} \int \frac{dL \sin \theta}{r^2} \quad \dots\dots\dots(28-12)$$

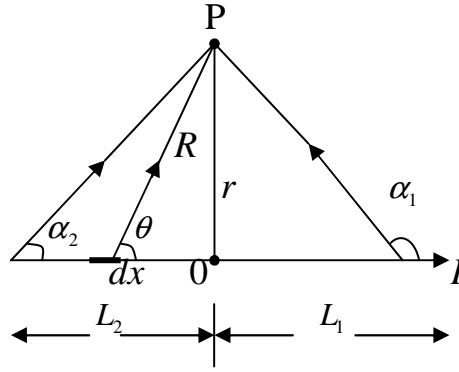
$$\vec{B} = \int dB = \frac{\mu_o I}{4\pi} \int \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3} \quad \dots\dots\dots(29-12)$$

الآن علينا أن نجد وبدقة المجالات المغناطيسية المتكونة من تشكيلات مختلفة من التيارات ولنبدأ بإيجاد المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار يمر في سلك مستقيم طويل.

لو كان لدينا سلك مستقيم طوله  $L$  يسري فيه تيار كهربائي  $I$  بالاتجاه المبين بالشكل (31-12). والمطلوب إيجاد  $B$  في نقطة  $p$  التي تبعد عن السلك مسافة  $r$ .

سنفترض عنصراً تفاضلياً من السلك طوله  $dx$ . نطبق عليه المعادلة (26-12) فنجد:

$$dB = \frac{\mu_o I}{4\pi} \frac{dx \sin \theta}{r^2}$$



الشكل (31-12).

واضح أن المتغيرات في هذه المعادلة هي فقط  $R$  و  $\theta$  و  $x$  ، ولإجراء التبسيطات الرياضية نجد من الشكل أن:

$$x = -r \cot \theta, R = r \csc \theta$$

$$dx = r \csc^2 \theta d\theta$$

وبالتعويض عن هذه المتغيرات في المعادلة أعلاه نحصل على:

$$dB = \frac{\mu_o I}{4\pi} \frac{r \csc^2 \theta d\theta}{(r \csc \theta)^2} \sin \theta$$

$$\therefore B = \frac{\mu_o I}{4\pi} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_o I}{4\pi r} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad \dots(30-12)$$

$$\cos\alpha_1 = -\frac{L_1}{(L_1^2 + r^2)^{1/2}}, \quad \cos\alpha_2 = \frac{L_2}{(L_2^2 + r^2)^{1/2}}$$

وإذا كان السلك طويلاً جداً أو أن النقطة P قريبة جداً من محور السلك فان :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \dots\dots\dots (31-12)$$

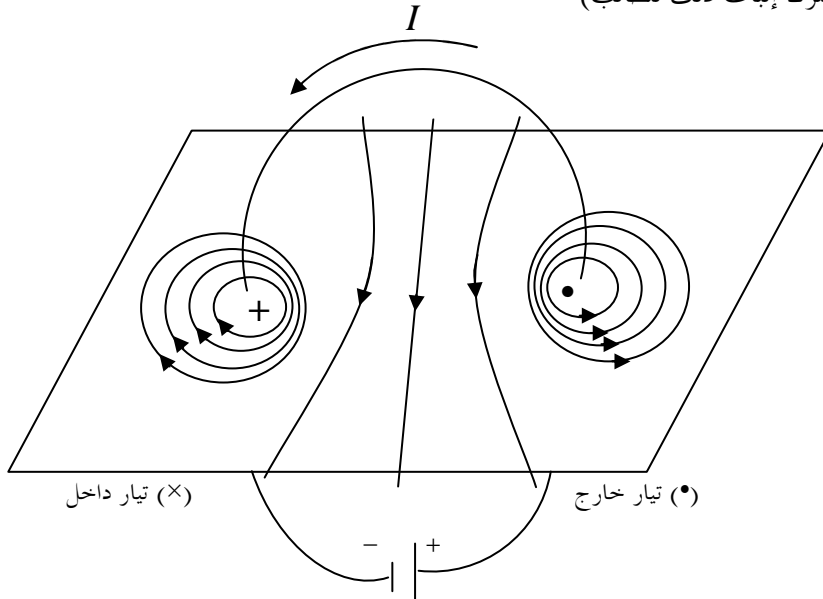
الآن لنفترض أننا قمنا بعمل حلقة دائرية من السلك تحمل تياراً I حيث تظهر الدوائر التي تمثل خطوط الفيض المغناطيسي تتزاحم بالقرب من السلك وتتباعدها بتباعد عنها كما موضح ذلك في الشكل (32-12). يُفهم من ذلك أن شدة المجال المغناطيسي للتيار تزداد بالاقتراب من السلك وتقل بالابتعاد عنه. فإذا كان نصف قطر الحلقة a، يكون مقدار شدة المجال المغناطيسي أو ما يسمى بالحث المغناطيسي عند مركز الحلقة هو:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a} \quad \dots\dots\dots(32-12)$$

ولـ N من الحلقات المتماثلة يكون:

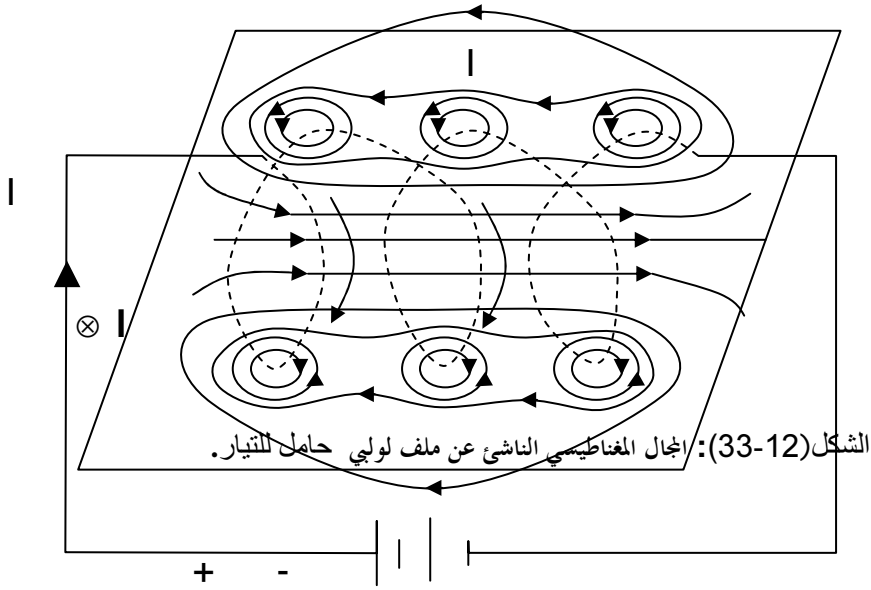
$$B = \frac{N\mu_0 I}{2a} \quad \dots\dots\dots (33-12)$$

(ويترك إثبات ذلك للطالب)



الشكل (32-12): المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف حلقي حامل للتيار .

ويمكننا أيضاً عمل ملف لولبي وذلك بلف السلك على اسطوانة بشكل حلزوني كما في الشكل (12-33). حيث الملف عُملَ بصياغة تختلف عن المعتاد، إذ أن اللفات



الشكل (12-33): المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف لولبي حامل للتيار.

الشكل (12-33) : المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف لولبي ملفوف بدون إحكام حامل للتيار . المتجاورة متباعدة بدلاً من أن تكون متلامسة. وكما يدل عليه الشكل فإن المجال المغناطيسي بداخل الملف يكون منتظماً تقريباً وخطوطه موازية لمحور الملف. ولما كانت خطوط الحث المغناطيسي مغلقة فإنها ستعمل دورتها خارج الملف، فإذا كان الملف طويلاً فإن الخطوط الواقعة خارج الملف ستكون بعيدة عنه باستثناء المناطق القريبة من طرفيه. وهكذا فإن مقدار الحث المغناطيسي داخل ملف لولبي مجوف يحمل تياراً  $I$  هو:

$$B = \mu_0 nI \quad \dots\dots\dots(34-12)$$

حيث  $n$  هي عدد لفات وحدة الطول من الملف الحلزوني (يترك إثبات ذلك للطالب).

**Ampere's Law**      **قانون أمبير (2-12-12)**

قانون أمبير هو تعبير آخر للعلاقة بين التيار والمجال المغناطيسي الناشئ عنه في صورته التكاملية. وينص على أن التكامل الخطي لشدة الحث المغناطيسي مأخوذاً عند كل منحنى مغلق أياً كان شكله وفي أي وسط كان يساوي التيار الكلي المار خلال

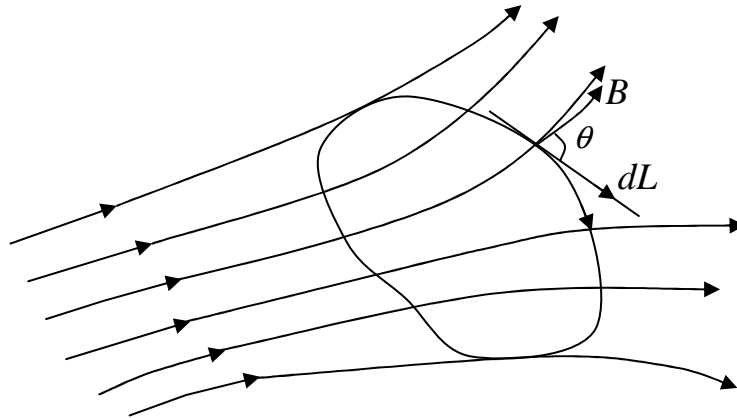
المساحة التي يطوقها المنحني مضروباً في ثابت سماحية ذلك الوسط. ويأخذ الصيغة الرياضية الآتية:

$$\oint B dL \cos \theta = \mu_o I$$

or

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_o I \quad \dots\dots\dots (35-12)$$

حيث  $\theta$  هي الزاوية المحصورة بين متجهي  $B$  وعنصر الطول  $dL$  المماس للمنحني في نقطة ما (شكل 12-34)، و  $B \cos \theta$  المركبة المماسية للحث المغناطيسي باتجاه  $dL$ .



الشكل (12-34): التكامل الخطي للحث المغناطيسي حول أي مسار مغلق يساوي مجموع حاصل الضرب  $B \cos \theta dL$ .

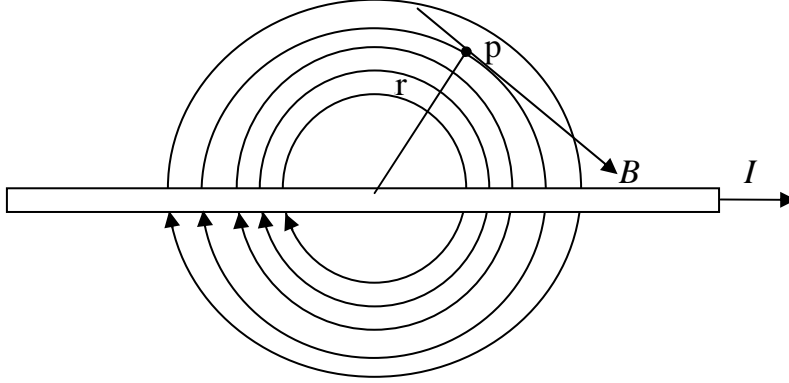
لقد دلت التجارب على أن قانون أمبير يطبق على كل المجالات المغناطيسية الناشئة عن تشكيلات مختلفة من التيارات ثابتة القيمة ولأي مسار مغلق محيط بتلك التيارات. ومن خصوصيات هذا القانون هو أن حساب التكامل الخطي  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{L}$  يصبح ممكناً فقط في الحالات التي يكون فيها المجال المغناطيسي ذا توزيع متناظر، وهو في ذلك يشبه قانون كاوس حيث كان استعماله كما رأينا في الفصل الثامن مقتصرًا على المجالات الكهربية ذات التوزيع المتناظر.

لنتأمل الآن سلك مستقيم طويل يحمل تياراً قدره  $I$  بالاتجاه كما مبين في الشكل (12-35)، والمطلوب حساب  $B$  في نقطة  $p$  التي تبعد عن مركز السلك مسافة



$r$ . باستعمال قاعدة اليد اليمنى نجد أن خطوط المجال المغناطيسي تكون بشكل دوائر متحدة المركز مع محور السلك وهي تقع في مستويات عمودية على السلك. والآن لو اعتبرنا الدائرة التي تمر بالنقطة  $p$  مساراً مغلقاً وطبقنا قانون أمبير لحصلنا على:

$$\oint B dL \cos \theta = \mu_0 I$$



الشكل (12-35): المجال المغناطيسي حول سلك مستقيم طويل حامل للتيار.

واضح من الشكل (12-35) أن  $\theta$  تساوي صفرًا لجميع أجزاء المسار المغلق وعليه:

$$\oint B dL = \mu_0 I$$

وظالما  $B$  كان ثابتاً لجميع نقاط المسار الذي نصف قطره  $r$ ، كونه يعتمد فقط على بعد النقطة  $p$  من محور السلك لذا فان:

$$B \oint dL = \mu_0 I$$

وبما أن:

$$\oint dL = L = 2\pi r$$

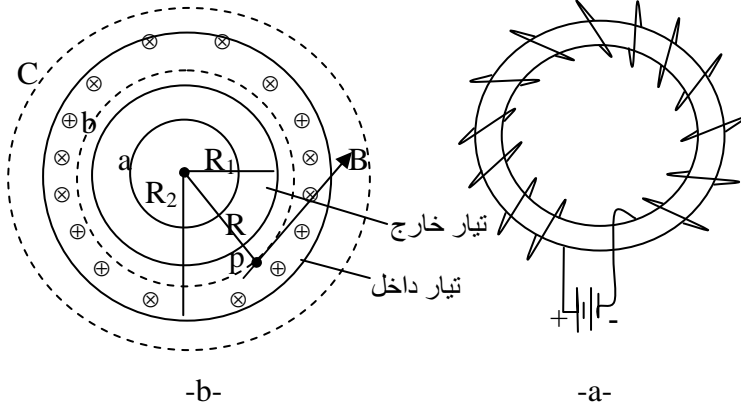
فان

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

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

وهذه هي النتيجة ذاتها التي حصلنا عليها باستعمال قانون بايرت وسافارت وهي المعادلة (12-31).

لنأخذ الآن حالة ملف على شكل حلقة عدد لفاته  $N$  ويمر فيه تيار شدته  $I$ ، نصف قطره الداخلي  $R_1$  والخارجي  $R_2$  كما يظهر ذلك من خلال المخطط التوضيحي للشكل (12-36)، الذي يبين مقطعاً للملف بموازاة سطحه. وهنا تكون خطوط الحث المغناطيسي على شكل دوائر متحدة المركز داخل الملف. وسنأخذ إحدى هذه الدوائر



شكل (12-36): المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف على شكل حلقة  
 -a- ملف على شكل حلقة. -b- مقطع للملف بموازاة سطحه.

ونجد  $B$  في النقطة  $p$  الواقعة على محيط دائرة نصف قطرها  $R$  باستعمال قانون أمبير. طالما أن جميع نقاط مسار الدائرة متناظرة الوضع بالنسبة للملف، فإن مقدار  $B$  ستكون لجميع نقاط المسار المغلق.

$$\therefore \oint B dL \cos \theta = \mu_o I$$

واضح من الشكل (12-36) أن الزاوية  $\theta$  بين  $\vec{dL}$  و  $\vec{B}$  تساوي صفرًا وان التيار الكلي سيتضاعف بقدر عدد اللفات أي يساوي  $NI$

$$\therefore \oint B dL \cos 0 = \mu_o NI$$

ومن هنا

$$BL = \mu_o NI$$

$$\therefore B = \frac{\mu_o NI}{L} = \frac{\mu_o NI}{2\pi R} \dots\dots\dots(36-12)$$

حيث  $L$  محيط الدائرة ويساوي  $2\pi R$ .

المعادلة (12-36) تعني أن  $B$  تختلف باختلاف نصف قطر المسار المغلق  $R$  وعليه تكون القيمة الصغرى لـ  $B$  هي:

$$B = \frac{\mu_o NI}{2\pi R_1}$$

والقيمة الصغرى لـ  $B$  هي:

$$B = \frac{\mu_o NI}{2\pi R_2}$$

وفي حالة  $R_1 = R_2$  فإن  $B$  تكون متساوية في جميع النقاط الواقعة داخل الملف ويعبر عنها بالمعادلة (12-36).

الآن لنفترض أننا قمنا بعمل ملف لولبي وذلك بلف السلك على اسطوانة بشكل حلزوني كما عملنا في حالة الملف اللولبي، حيث يبين الشكل (12-37) مقطعاً طولياً لجزء من الملف اللولبي يحمل تياراً  $I$ . فإذا كان المطلوب إيجاد  $B$  في نقطة  $p$  باستعمال قانون أمبير، نجد من المناسب أن يكون المنحني المغلق على شكل مربع (أو مستطيل) بحيث أن النقطة  $p$  تقع على احد أضلاعه الموازية لمحور الملف أي الضلع  $ab$ . فإذا اخترنا أن يكون الملف طويلاً فسوف نحصل على مجال مغناطيسي أكثر انتظاماً في داخله وموازياً لمحوره. ولما كانت خطوط الحث المغناطيسي مغلقة فإنها ستعمل دورتها خارج الملف وستكون بعيدة عنه باستثناء المناطق القريبة من طرفيه. إذا كان  $ab$  طوله  $L$  فأن عدد اللفات التي يحتويها هذا الطول هي  $nL$  وان التيار الكلي المخترق لهذا المسار (المربع) يساوي  $nIL$  حيث  $n$  هي عدد لفات وحدة الطول من الملف اللولبي.

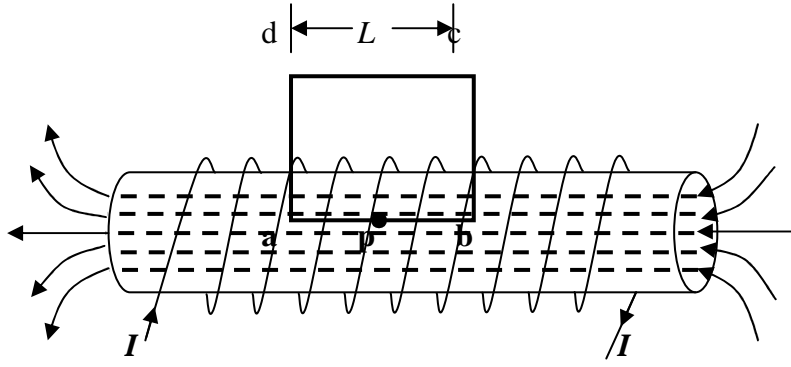
$$\oint B dL \cos \theta = \mu_o I = \mu_o nIL$$

وبتطبيق المعادلة على جميع أضلاع المربع نجد:

$$\oint B dL \cos \theta = \int_{ab} B dl \cos 0 + \int_{bc} B dL \cos 90 + \int_{cd} (0)L \cos \theta + \int_{da} BL \cos 90$$

$$\oint B dL \cos \theta = BL + 0 + 0 + 0 = \mu_o nIL$$

$$B = \mu_o nI$$



الشكل (12-37): المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف لولبي حامل للتيار .

وهذه هي النتيجة ذاتها التي حصلنا عليها باستعمال قانون بايوت وسافارت وهي المعادلة (12-34). وهكذا فان قيمة  $B$  متساوية لجميع النقاط داخل الملف على شرط أن تكون بعيدة عن طرفي الملف.

### مثال (11-12)

ملفٌ حلقي يتكون من  $N$  من اللفات ويحمل تياراً قدره  $I$  كما مبين في الشكل (12-36). بتطبيق قانون أمبير اثبت أن المجال المغناطيسي للملف يكون محصوراً داخل لفات الملف، ولا وجود للمجال خارج لفات الملف .

الحل :

نطبق قانون أمبير على المسارين  $a$  و  $c$  .

لنأخذ المسار  $c$  :

واضح من الشكل (12-36) أن هذا المسار لا يحوي على أي تيار ( $I=0$ ).

لذا فان التكامل الخطي لشدة المجال على المسار  $c$  حسب قانون أمبير يكون:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_o I$$

$$\oint B dL \cos \theta = \mu_o I$$

$$\oint B dL \cos 0 = \mu_o (0)$$

$$\therefore B(2\pi R) = 0$$

أي أن:

$$B=0$$

الآن نأخذ المسار  $b$  :

واضح من الشكل نفسه أن كل لفة من لفات الملف تقطع المساحة المحصورة ضمن المسار مرتين، مرة يدخل التيار ومرة أخرى يخرج بعد أن يلف نصف لفة. ولما كان عدد لفات الملف  $N$ ، فإن ذلك يعني أن التيار يقطع المساحة  $N$  من المرات نحو الداخل، و  $N$  من المرات نحو الخارج. وبتطبيق قانون أمبير على هذا المسار نجد :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 (NI - NI)$$

$$\therefore B(2\pi r) = 0$$

$$B=0$$

أي أن:

وبهذا يتضح أن المجال المغناطيسي للملف الحلقي المثالي ينحصر كلياً داخل لفات الملف.

## (13-12) الحث الكهرومغناطيسي Electromagnetic Induction

لنتناول في البدء الأساس النظري للحث الكهرومغناطيسي:

### (1-13-12) أساس نظرية الحث الكهرومغناطيسي

درسنا في البند (1-12) أن التيارات الكهربائية تولد مجالات مغناطيسية وهو واحد من ثلاثة إنجازات علمية رئيسية قامت على أساسها الثورة الصناعية في العالم منذ أكثر من مئة عام من الزمن. وقد كان هذا الإنجاز على يدي العالم الدانمركي اوريستد عام 1820. والسؤال الذي يتبادر إلى الأذهان الآن هو إذا كانت المجالات المغناطيسية تولدها تيارات كهربائية، فهل يمكن للمجالات المغناطيسية أن تولد تيارات؟  
لقد مضت أكثر من عشر سنين حتى استطاع مايكل فاراداي (1791-1867) في إنكلترا وجوزيف هنري (1797-1878) بالولايات المتحدة الأمريكية وبشكل

\* يقال أن هنري قد سبق فاراداي في هذا الإنجاز إلا أن عمله الذي أجراه في سرية نسبية في الباني

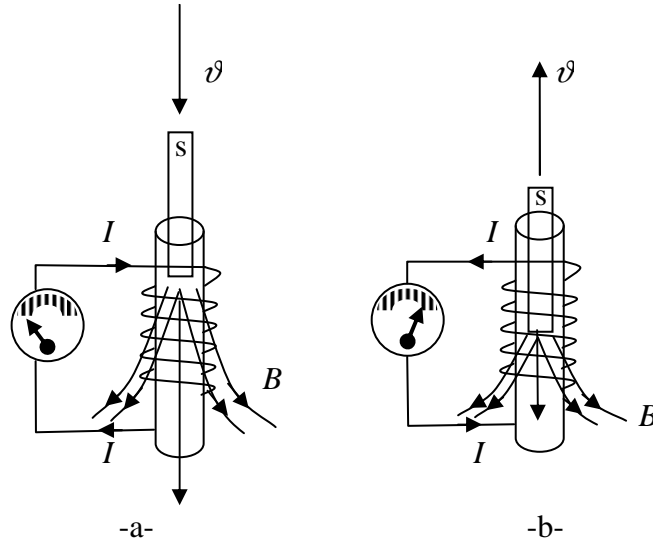
بالولايات المتحدة فقط وعُرف به عدد قليل من الناس، لذا فقد أعطى الفضل لفاراداي وسمي القانون باسمه فيما بعد.

مستقل عن بعضهما من الإجابة التأكيدية على هذا السؤال في العام 1831، وسنقدم الآن تجربة تبين هذا التأثير بشكل واضح.

لدينا ملف متصل على التوالي مع جهاز كلفانومتر (يرمز له بالرمز  $\odot$ ) ضمن دائرة لا تحتوي على أية بطارية كما في الشكل (12-38). الآن إذا أدخلنا قضيباً مغناطيسياً في قلب الملف ينمو الفيض المتخلل للملف، وإذا قُطِعَ الملف خطوط المجال المغناطيسي للقضيب تسبب في توليد تيار كهربائي في الملف يشار إليه من خلال انحراف مؤشر الكلفانومتر إلى احد اتجاهي مقياسه كما في الشكل (12-38a). ويظل هذا التيار في الملف طالما ظل المغناطيس متحركاً نحو الملف، وعندما يقف المغناطيس عن الحركة فلن يكون هناك قطع لخطوط المجال من قبل الملف أي لا يكون هناك تغيير في الفيض المغناطيسي فلا يُستحث تياراً كهربائياً في الملف ويعود مؤشر الكلفانومتر إلى الصفر.

والآن لو سحبنا المغناطيس بالاتجاه المعاكس بعيداً عن الملف فان الفيض يأخذ في التناقص وسينحرف مؤشر الكلفانومتر إلى الاتجاه المعاكس، دلالة على أن التيار في هذه المرة عكس اتجاهه كما في الشكل (12-38b). أن التيار المتولد بهذه الطريقة يعرف بالتيار المحتث Current Induction وتُعرف العملية بالحث الكهرومغناطيسي

### .Electromagnetic Induction



الشكل (12-38): اتجاه حركة المغناطيس تحكم اتجاه التيار المحتث.

الآن لو أعدنا التجربة نفسها وحركنا المغناطيس بسرعة أكبر، يلاحظ أن انحراف جهاز الكلفانومتر سيكون كذلك، وهذا مرتبط مع عدد خطوط المجال التي تقطع من قبل الملف في الثانية. ونفس النتيجة السابقة يمكن الحصول عليها إذا تم تثبيت القضيب المغناطيسي وكان الملف هو الذي يتحرك ويقطع خطوط المجال المغناطيسي للقضيب. ويمكن تحليل هذا الأثر بالطريقة الآتية: على الرغم من أن الحالة في الشكل (12-38) تشير إلى أن المغناطيس هو الذي يتحرك إلا أن نفس الشيء تماماً يحدث إذا ظل المغناطيس ثابتاً وكان المتحرك الملف. لننظر ماذا يحدث عندما يتحرك موصل طوله  $L$  بسرعة  $v$  باتجاه مغناطيس فيضه  $B$ . أن الإلكترونات الحرة داخل الموصل تتعرض لقوة مغناطيسية مقدارها  $F = e v B_{\perp}$  عندما تتحرك في المجال المغناطيسي للمغناطيس. هنا  $v$  هي أيضاً تعبير عن سرعة كل إلكترون داخل الموصل و  $e$  شحنة الإلكترون. أن الشغل الذي تنجزه القوة  $F$  لتحريك كل إلكترون في داخل موصل طوله  $L$  هو:

$$W = FL$$

وحيث

$$F = e v B_{\perp}$$

فان

$$W = e v B_{\perp} L \dots\dots\dots(12-37)$$

ومن تعريف الشغل فان القوة الدافعة الكهربائية هي المسؤولة عن إدامة سريان التيار في الدائرة. إذن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بالحث ( $\mathcal{E}$ ) في موصل طوله  $L$  ويتحرك بسرعة  $v$  في مجال مغناطيسي فيضه  $B$  هو الشغل المبذول على كل إلكترون. ومن المعادلة (12-37) نجد:

$$\mathcal{E} = \frac{W}{e} = v B_{\perp} L \dots\dots\dots(12-38)$$

وهذه المعادلة تعد أحد أشكال قانون فاراداي في الحث. المعادلة (12-38) هي حالة خاصة افترض فيها أن السرعة منتظمة والحث المغناطيسي ثابت المقدار والاتجاه ويؤثر باتجاه عمودي على كل من السرعة وطول الموصل. فإذا فقدت هذه الشروط من المعادلة (12-38) سوف لا تصح في هذه الحالات وإنما تصح المعادلة العامة الآتية :

$$\varepsilon = BL v \sin \theta \cos \phi \quad \dots\dots\dots (39-12)$$

حيث  $\theta$  هي الزاوية المحصورة بين  $B$  و  $L$  أما  $\phi$  فهي الزاوية المحصورة بين  $v$  والمستقيم العمودي على المستوي الذي يضم  $B$  و  $L$ .

**مثال (12-12)**

في الشكل (39-12) السلك AP يتزلق بدون احتكاك على السكة الموصلة بسرعة منتظمة  $9m/sec$  متجهاً نحو DC، فإذا كان  $B=1.6T$  ومقاومة الدائرة ثابتة  $12\Omega$ . جد: 1- القوة الواجب استعمالها لإدامة السلك AP متحركاً بسرعيته، 2- معدل الطاقة الحرارية المتولدة في الثانية، 3- العلاقة بين القدرة الميكانيكية ومعدل الطاقة الحرارية المتولدة في الثانية.

الحل :

-1

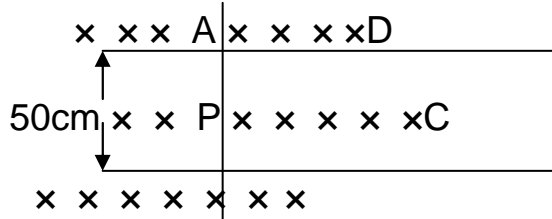
$$F = ILB = \frac{\varepsilon}{R} LB = \frac{BLv}{R} LB$$

$$= \frac{B^2 L^2 v}{R} = \frac{(1.6)^2 \times (0.5)^2 \times 9}{12} = 0.48 N$$

$$W = e\varepsilon = eBL v = e(1.6 \times 0.5 \times 9) = 1(7.2) = 7.2 eV \quad -2$$

-3

$$P = \varepsilon i = 7.2 \times 0.6 = 4.32 Watt$$

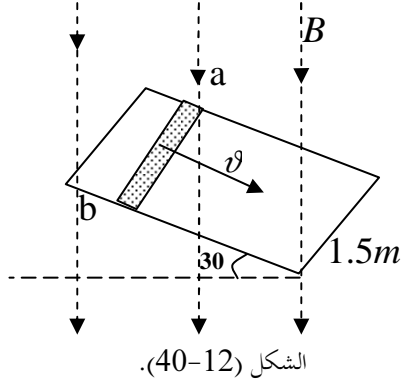


الشكل (39-12).



مثال (12-13)

في الشكل (12-40) المجال المغناطيسي منتظم فيضه  $B=0.5T$  والقضيب المغناطيسي ab مقاومته  $0.2 \Omega$  ، وكتله  $10gm$  ويتلزل بدون احتكاك على السكة الموصلة. المقاومة الكهربائية للسكة صغيرة جداً بحيث يمكن إهمالها، جد السرعة الحدية Terminal Velocity للقضيب.



الحل :

$$\mathcal{E} = BLv \sin \theta \cos \phi$$

$$Mg \cos 30 = BLv \sin 30 \cos 0$$

$$\therefore v = \frac{10 \times 10^{-3} \times 9.8 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{0.5 \times 0.15 \times 0.5 \times 1} = 2.3 \text{ m/sec}$$

مثال (12-14)

طائرة المسافة بين طرفي جناحيها  $48m$  تطير بصورة أفقية بسرعة  $800K/hr$  نحو الجنوب، فإذا كانت المركبة الشاقولية للحث المغناطيسي الأرضي هي  $5 \times 10^{-5} T$ ، جد القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في طرفي جناحي الطائرة.

الحل :

$$\mathcal{E} = BLv \sin \theta \cos \phi$$

$$= 5 \times 10^{-5} \times 48 \times 800 \times \frac{10^3}{60 \times 60} \sin 90 \cos 0$$

$$= 0.53 V$$

موصل طوله  $50\text{cm}$  يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم فيضه  $1.6\text{T}$  وبسرعة  $1.5\text{m/sec}$  فإذا كان الموصل جزء من دائرة كهربائية مقاومتها  $5\ \Omega$  وقيمت هذه المقاومة ثابتة دون تغيير. جد مقدار كل من القوة الدافعة الكهربائية المحتثة والتيار المحتث إذا كانت  $B-1$  تؤثر بصورة عمودية على الموصل،  $B-2$  تؤثر بصورة عمودية على الموصل وان اتجاه الحركة يميل بزاوية مقدارها  $30^\circ$  مع العمود المقام على السطح.  
الحل:

1- من معطيات الحالة تكون :

$$\theta = 90 \text{ و } \phi = 0$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon &= BLv \sin 90 \cos 0 \\ &= 1.6 \times 0.5 \times 1.5 \times 1 \times 1 = 1.2\text{V} \end{aligned}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1.2}{5} = 0.24\text{A}$$

2- من معطيات الحالة تكون:

$$\theta = 90 \text{ و } \phi = 30$$

$$\varepsilon = BLv \sin 90 \cos 30 = 1.6 \times 0.5 \times 1.5 \times 1 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.6\sqrt{3}\text{V}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0.6\sqrt{3}}{5} = 0.12\text{A}$$

### (12-13-2) قانون فاراداي وقانون لنز Faraday's Law and Lenz's Law

أجرى فاراداي العديد من التجارب كنتلك الموضحة في الشكل (12-38) ثم استنتج أن القوة الدافعة الكهربائية المحتثة تتولد فقط عندما يكون هناك تغير في الفيض المغناطيسي الذي يتخلل الملف. وقد أدرك أن القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في دائرة الملف تساوي التغير السالب لمعدل الفيض المغناطيسي في الثانية، أي :

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(40-12)$$

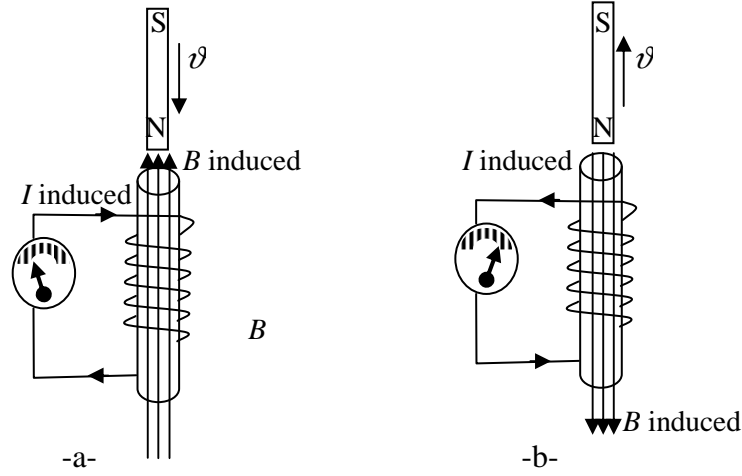
فالفيض المغناطيسي الذي يخترق الملف كما في التجربة المبينة في الشكل (12-38) يتغير من  $\phi_1$  إلى  $\phi_2$  في زمن قدره  $\Delta t$ . فإذا كان الملف يتكون من عدد  $N$  من اللفات المتماثلة، عندئذ تكون متوسط القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في الملف خلال هذا التغير هي:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -N \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{\Delta t} \dots\dots\dots (12-41)$$

وهو ما يطلق عليه قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي، الذي يعتبر احد أكثر مبادئ الكهرباء والمغناطيسية أهمية، بل ويعتبر أساس عمل المولدات الكهربائية والمحركات والمحولات وعدد كبير من الأجهزة المهمة.

وكما هو شأن أي تيار آخر فان التيار المحتث ينتج مجالاً خاصاً به. والشكل (12-41) يبين اتجاهات هذا المجال المحتث  $B_{ind}$  والناشئ من تحركات المغناطيسين المرسومين في أ و ب من الشكل ذاته. وعلى الطالب التأكد من أن الاتجاهات المبينة للمجال  $B_{ind}$  تتفق مع قاعدة الكف الأيمن .

أن التيار المحتث في هذه الحالة يخلق فيضاً مغناطيسياً يتخلل الملف بحيث يعرقل التغير في الفيض الناتج عن المجال المغناطيسي الخارجي المتغير، أي أن الفيض المحتث يميل إلى المحافظة على ظروف الفيض الأصلي.

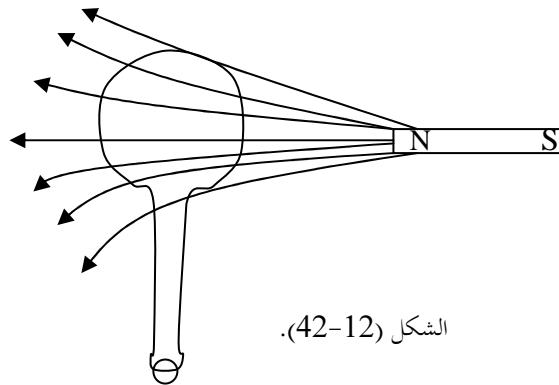


الشكل (12-41): المجال المغناطيسي المتولد ( $B_{ind}$ ) بسبب التيار المحتث ( $I_{ind}$ ) في دائرة الملف.

لقد اتضح أن هذه الملاحظة تعتبر مبدأً عاماً وتسمى قانون ليزر. وينص على أن:  
القوة الدافعة الكهربائية المحسنة تتخذ اتجاهًا بحيث تعرقل السبب المنتج لها. أي أن التيار  
المحث سيتخذ اتجاهًا بحيث أن الفيض المغناطيسي الناتج عنه يعرقل التغير في الفيض الذي  
أنتج التيار المحث. وتشير الإشارة السالبة في قانون فاراداي إلى هذه المعارضة.

### مثال (16-12)

الشكل (12-42) يمثل حلقة من مادة موصلة وقضيب مغناطيسي يولد فيض  
مغناطيسي. فهل تتولد قوة دافعة كهربائية في الحلقة في الحالات: 1- إذا بقي كل من  
المغناطيس والحلقة دون حركة، 2- إذا دوّرنا الحلقة حول محور ما مع بقاء المغناطيس  
ثابتاً، 3- إذا أبقينا الحلقة ثابتة وحركنا المغناطيس جانباً أو دورناه حول محور ما.



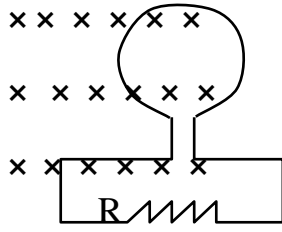
الحل :

الشكل (12-42).

- 1- لا تتولد قوة دافعة كهربائية في الحلقة لان الفيض المخترق للحلقة ثابت المقدار.
- 2- تتولد قوة دافعة كهربائية في الحلقة وذلك بسبب تغير الفيض المخترق للحلقة.
- 3- تتولد قوة دافعة كهربائية في الحلقة وذلك بسبب تغير الفيض المخترق للحلقة.

### مثال (17-12)

الملف في الشكل (12-42) يتألف من 40 لفة ومقاومته  $16\ \Omega$  يخترقه مجال  
مغناطيسي بصورة عمودية على سطحه. فإذا كان الفيض المغناطيسي للملف  
يتغير وفق المعادلة  $\phi = (0.02t^2 + 0.06t + 12)$ ، حيث  $t$  مقدرة بالثواني و  $\phi$  بالويبر.  
جد مقدار واتجاه التيار المحث عندما تكون: 1-  $t=0$ ، 2-  $t=20\text{sec}$ .



الشكل (12-43).

الحل:

من المعادلة (12-40)

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$\therefore \varepsilon = -N \frac{d}{dt} (0.02 t^2 + 0.06 t + 12)$$

$$\varepsilon = -40 (0.04 t + 0.06)$$

-1 عندما  $t=0$

$$\varepsilon = -40(0 + 0.06) = -2.4V$$

$$\therefore I = \frac{-2.4}{16} = 0.15A$$

-2 عندما  $t=2sec$

$$\varepsilon = -40(0.04 \times 2 + 0.06) = -5.6V$$

$$\therefore I = \frac{-5.6}{16} = 0.35A$$

الإشارة السالبة تدل على أن اتجاه المجال المغناطيسي للتيار المحتث بعكس اتجاه

المجال المسلط على الملف.

مثال (12-18)

ملف عدد لفاته 50 نزع في 0.02 ثانية من بين قطبي مغناطيس، حيث تقطع

مساحته أيضاً مقداره  $3.1 \times 10^{-4} Wb$ ، إلى مكان فيه الفيض المقطوع هو

$0.1 \times 10^{-4} Wb$ . احسب مقدار متوسط القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في الملف.

الحل :

أن ما يهمنا هنا هو مقدار متوسط القوة الدافعة الكهربية لذا تكتب المعادلة

(41-12) بالشكل الآتي :

$$|\mathcal{E}| = N \left| \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \right|$$
$$= 50 \frac{(3.1-0.1) \times 10^{-4} \text{Wb}}{0.2} = 0.75 \text{V}$$

مثال (19-12)

ملف عدد لفاته 6 ومساحته  $10 \text{cm}^2$  موجود في مجال مغناطيسي منتظم  $B=0.1 \text{T}$ ، أزيل المجال خلال فترة زمنية مقدارها  $1 \times 10^{-3} \text{sec}$ . جد مقدار القوة الدافعة الكهربية المحتثة المتولدة في الملف إذا كان المجال المغناطيسي يؤثر، 1- بصورة عمودية على سطح الملف، 2- باتجاه  $30^\circ$  مع اتجاه سطح الملف.

الحل :

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt}(BA \cos \theta) = -NA \cos \theta \frac{dB}{dt} \quad -1$$

$$\therefore \mathcal{E} = -6 \times 10 \times 10^{-4} \times \cos(0) \times \frac{0.1}{10^{-3}} = -0.6 \text{V}$$

-2

$$\mathcal{E} = -6 \times 10 \times 10^{-4} \cos(30) \times \frac{0.1}{10^{-3}} = -0.3\sqrt{3} \text{V}$$

مثال (20-12)

ملف عدد لفاته 100 ومساحته  $5 \text{cm}^2$  موجود في مجال مغناطيسي منتظم  $B=0.25 \text{T}$  يؤثر باتجاه عمودي على السطح، سحب الملف بسرعة فأصبح خلال  $0.01 \text{sec}$  خارج المجال المغناطيسي، جد القوة الدافعة الكهربية المحتثة والشحنة الكهربية المارة خلال الملف علماً بان مقاومة الملف تساوي  $20 \Omega$ .

الحل :

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt}(BA \cos \theta) = -NA \cos \theta \frac{dB}{dt}$$

$$= -100 \times 5 \times 10^{-4} \times 1 \times \frac{0.25}{0.01} = -1.25V$$

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1.25}{20} = 0.0625 \text{ A}$$

$$q = it$$

$$\therefore q = 0.0625 \times 0.01 = 0.000625 \text{ C} = 625 \mu\text{C}$$

## (14-12): التيار المتناوب Alternating Current

يعرف الجهد المتناوب (A.C.) بأنه الجهد الذي يتغير دائماً طبقاً لمنحني جيبية sine curve . ويقصد بتغير الجهد هو تغير قطبيته، أي أن هذا الجهد تكون له قيمة موجبة في لحظة وتتناقص هذه القيمة إلى الصفر، ثم تكون له قيمة سالبة تصل إلى قيمة معينة وتتناقص إلى الصفر، يبدأ بعدها الجهد في أن يكون له قيمة موجبة مرة أخرى، وتكرر هذه العملية بصورة دورية مع الزمن.

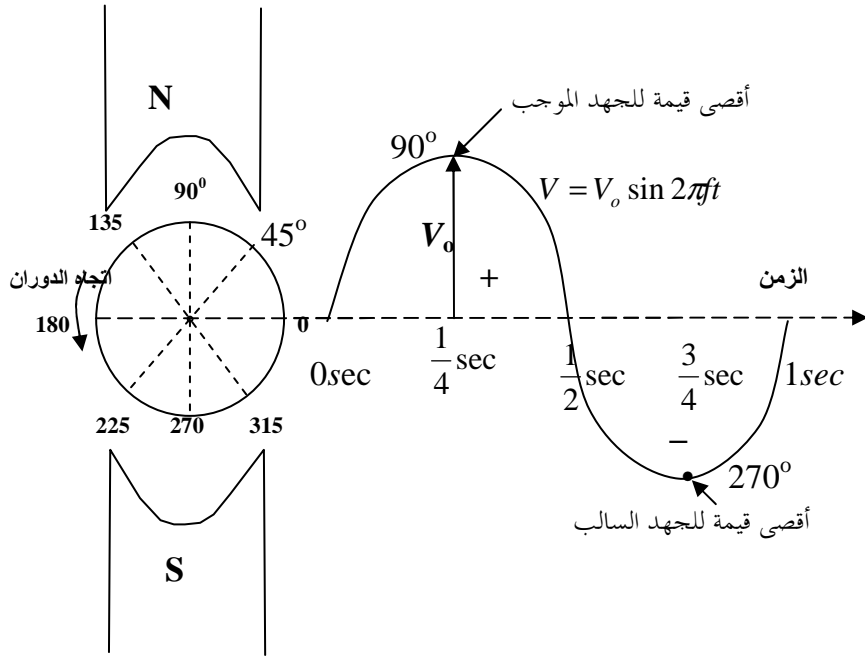
تولّد الشركات الجهود المتناوبة بواسطة المولدات ذات الملف الدوار نتيجة لدوران ملف بين قطبي مغناطيس وقطّعه خطوط المجال المغناطيسي، وتتغير قيمة الجهد المتولد في السلك وقطبيته تبعاً للزاوية التي يقطع بها سلك الملف خطوط المجال المغناطيسي. وبين الشكل (12-44) العلاقة بين زاوية قطع الملف للمجال المغناطيسي والجهد المتولد وذلك بفرض أن الملف يدور دورة كاملة في الثانية الواحدة. وسوف نتذكر أن جهد جيبية (أو فولتية جيبية) يعطى بالعلاقة:

$$V = V_o \sin 2\pi ft \quad \dots\dots\dots(42-12)$$

إذ أن  $V_o$  تمثل أقصى قيمة للفولتية الجيبية، أما  $V$  فتمثل القيمة الآنية لتلك الفولتية، وان  $f$  هو تردد الدوران للملف المولد حيث يرمز إلى عدد ما يحدث من دورات كاملة من التغيرات في الثانية الواحدة.

أن التردد الزاوي ورمزه  $\omega$  يقاس بعدد الزوايا النصف قطرية التي تحدث في الثانية الواحدة، وذلك لان الدورة الواحدة تتكون من  $2\pi$  زاوية نصف قطرية، لذا فمن الممكن التعبير عن المعادلة (12-42) بالشكل الآتي:

$$V = V_o \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(43-12)$$



الشكل (12-44) : العلاقة بين زاوية قطع الملف للمجال المغناطيسي والجهد المتولد وذلك بفرض أن الملف يدور دورة كاملة في ثانية واحدة.

وعندما يُطبَّق هذا النوع من الجهد (الفولتية المؤثرة) على مقاومة اومية خالصة (ليس لها حث)  $R$  فإنه ينتج تياراً أو تياراً جيبياً (شكل 12-45)، يعطى بالمعادلة:

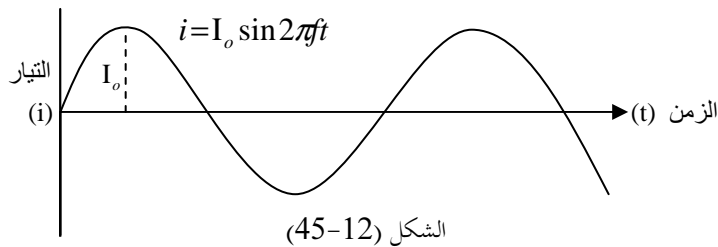
$$i = \frac{V}{R} = \frac{V_o}{R} \sin 2\pi ft$$

أو

$$i = I_o \sin 2\pi ft \quad \dots\dots\dots(12-44)$$

وأيضاً

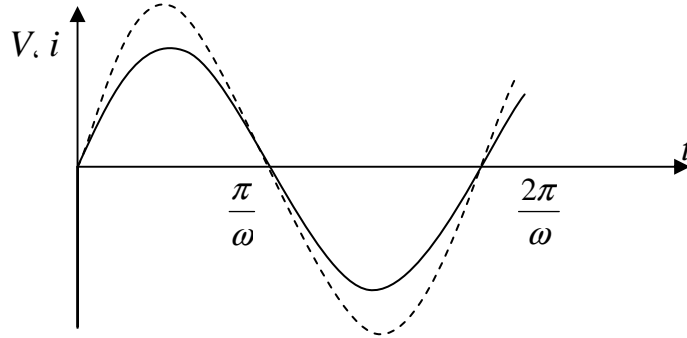
$$i = I_o \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(12-45)$$



الشكل (12-45)



وعمقارنة معادلة الفولتية (12-43). بمعادلة التيار (12-45) نجد أن كلاً من الفولتية المؤثرة (فرق الجهد بين طرفي المقاومة) والتيار الناتج عنها في طور واحد كما موضح في الرسم البياني لهما في الشكل (12-46).



الشكل (12-46): التيار والفولتية لدائرة مقاومة خالصة.

وعندما يكون تطبيق الفولتية على متسعة ذات سعة خالصة  $C$  بدلاً من المقاومة الخالصة  $R$ ، فإن هذه المتسعة في لحظة معينة عندما تكون قيمة الفولتية  $V$  بين طرفيها ستملك شحنة آنية في تلك اللحظة مقدارها :

$$q = CV = CV_o \sin \omega t$$

عندئذ تصبح قيمة التيار الآني:

$$i = \frac{dq}{dt} = \omega CV_o \cos \omega t$$

أو

$$i = i_o \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (46-12)$$

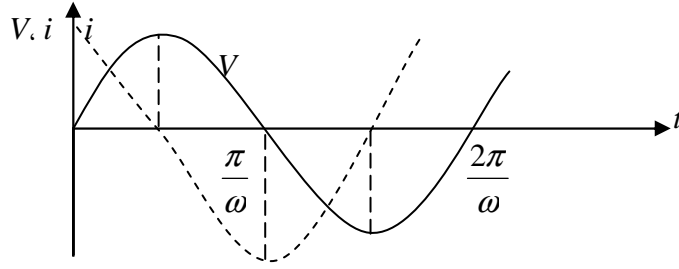
إذ أن :

$$i = \omega CV_o \quad \dots\dots\dots (47-12)$$

وهذا يعني عندما تكون الفولتية المؤثرة على المتسعة دالة جيب فإن التيار عبر المتسعة هو دالة جيب تمام. وإذا كتبنا المعادلة (12-47) بالصيغة الرياضية الآتية :

$$i = I_o \sin(\omega t + 90^\circ) \quad \dots\dots\dots (48-12)$$

لتبين أن التيار يتقدم على الفولتية بزاوية مقدارها  $90^\circ$ . أن هذا الاختلاف في الطور بين التيار والفولتية يوضحه الرسم البياني في الشكل (12-47).



الشكل (47-12): التيار والفولتية لدائرة متسعة خالصة.

المعادلة (47-12) يمكن كتابتها بالشكل الآتي :

$$i_o = \frac{V_o}{1/\omega c} \dots\dots\dots(49-12)$$

حيث الكمية (  $1/\omega c$  ) تمثل معاوقة المتسعة لمرور التيار المتناوب خلالها. وهذه الكمية تدعى بالراداة السعوية Capacitive Reactance، ويرمز لها بالرمز  $X_c$  أي أن :

$$X_c = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi f c} \dots\dots\dots(50-12)$$

ويذكر أن  $X_c$  لها نفس وحدة المقاومة الاومية  $R$  وهي الاوم لكنها تختلف عنها، حيث أنهما لا تخضع لقانون اوم. وعندما يكون تطبيق الفولتية على ملف خالص الحثية، فان قوة دافعة كهربائية مضادة قدرها  $L \frac{di}{dt}$  ستتولد فيه في لحظة معينة من تجهيزه بتيار متناوب. وبتطبيق قانون كيرتشفوف على دائرة الملف ينتج:

$$V - L \frac{di}{dt} = 0$$

$$di = \frac{V}{L} dt$$

وبالتعويض عن  $V$  من المعادلة (43-12) ينتج:

$$di = \frac{V_o}{L} \sin \omega t dt \dots\dots\dots(51-12)$$

وبإجراء التكامل لطرفي المعادلة (51-12) نجد:

$$i = -\frac{V_o}{\omega L} \cos \omega t$$

$$i = I_o \cos \omega t$$

$$i = I_o \sin(\omega t - 90)$$

.....(52-12)

إذ أن  $-\frac{V_o}{\omega L}$  تمثل القيمة العظمى للتيار، أي أن :

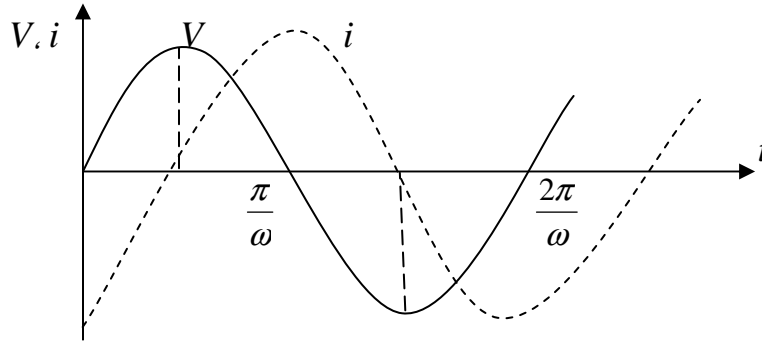
$$I_o = \frac{V_o}{\omega L}$$

..... (53-12)

يتبين من المعادلة (52-12) أن الفولتية تتقدم على التيار بزاوية قدرها  $90^\circ$ . أن هذا الاختلاف في الطور بين التيار الفولتية يوضحه الشكل (12-48). المعادلة (53-12) صيغة مشابهة لقانون اوم، حيث الكمية  $L\omega$  تمثل معاوقة الملف لمرور التيار المتناوب خلالها وهذه الكمية تدعى بالراداة الحثية Inductive Reactance، ويرمز لها بالرمز  $X_L$  ووحداتها كذلك الاوم.

$$\therefore X_L = \omega L = 2\pi fL$$

.....( 54-12)



الشكل (12-48): التيار والفولتية لدائرة ملف خالص الحثية.

ومن المثير للاهتمام أن القيمة المتوسطة عبر دورة كاملة للفولتية أو التيار المتناوب لا بد أن تكون صفراً. فكلما يمكنك من دراسة الأشكال أعلاه فان الدالة الجيبية (وكذلك دالة الجيب تمام) ذات قيمة سالبة بقدر حالها من قيم موجبة تماماً. ومن ثم فان قيمتها المتوسطة تكون صفراً. وعلى ذلك وبالنسبة لفولتية أو تيار متناوبين فان:

$$V_{av} = i_{av} = 0$$

ولهذا السبب لا يمكن استعمال التيارات المتناوبة في شحن البطاريات أو في التطبيقات المماثلة. فلو أن البطارية شحنت عندما يكون التيار موجباً فإنها ستمت بقدر مساوٍ من التفريغ عندما يكون التيار سالباً. ولا بد أن نذكر هنا أن الكهربائية المنقولة بكلا النوعين من التيارات المتناوبة أو المستمرة تستعمل للإضاءة وتشغيل المحركات. غير أن التيار المتناوب قد انتصر في النهاية لأن جهده يمكن تحويله بسهولة إلى قيم أعلى أو أقل بواسطة المحولات كما سنأتي للتعرف عليها في بند قادم.

والآن نناقش الأسباب وراء ممانعة المتسعة كلياً لمرور التيارات المستمرة ( $f=0$ ) فيما تسمح للتيارات المتناوبة المرور بقيم متفاوتة اعتماداً على التردد. أن التناسب العكسي بين الرادة السعوية  $X_C$  والتردد  $f$  كما يظهر في المعادلة (12-50)، يقودنا إلى القول بأن التيارات ذات الترددات العالية تسهل مرورها خلال المتسعة إذ أن قيمة الرادة السعوية منخفضة. في حين نجد التيارات ذات الترددات المنخفضة صعوبة بالغة في المرور خلال المتسعة بسبب قيمة الرادة السعوية كبيرة. والحقيقة أن المتسعة تمتع كلياً بمرور التيارات المستمرة (غير المتناوبة). إذ تصبح الرادة السعوية لانهائية القيمة لذلك تستعمل المتسعة في الدوائر الكهربائية للسيطرة على مرور التيار المتناوب والتحكم في قيمته. كما تستعمل كذلك لفصل التيار المتناوب عن التيار المستمر.

#### مثال (12-21)

وصّلت متسعة سعوتها  $1\mu F$  بمصدر للتيار المتناوب. اوجد القيمة القصوى للتيار إذا علمت أن القيمة القصوى لفولتية المصدر هي  $90V$  وأن التردد الزاوي يساوي  $500rad/sec$ .

الحل:

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{V_o}{1/\omega c} = V_o \omega c \\ &= 90 \times 500 \times 1 \times 10^{-6} \\ &= 0.045 \text{ A} \end{aligned}$$

مثال (12-22)

إذا وصل ملف حثيته  $10H$  (ذو مقاومة قليلة يمكن إهمالها) بنفس المصدر في المثال السابق. فما مقدار القيمة القصوى للتيار المار في الملف.  
الحل:

$$I_o = \frac{V_o}{\omega L}$$

$$= \frac{90}{500 \times 10}$$

$$= 0.018 \text{ A}$$

مثال (12-23)

ما قيمة التردد الذي عنده تصبح الرادة السعوية لمتسعة سعيتها  $3\mu F$  مساوية  $600\Omega$ ؟ وما قيمة التردد الذي عنده تصبح الرادة الحثية للملف حثيته  $0.4H$  مساوية  $600\Omega$  كذلك؟  
الحل :

$$X_c = \frac{1}{2\pi fc}$$

$$\therefore f = \frac{1}{2\pi X_c c} = \frac{1}{2\pi \times 600 \times 3 \times 10^{-6}} = 88.46 \text{ HZ}$$

$$X_L = 2\pi fL$$

$$\therefore f = \frac{X_L}{2\pi L} = \frac{600}{2\pi \times 0.4} = 238.73 \text{ HZ}$$

(12-15) القيمة الفعالة للتيار المتناوب والفولتية المتناوبة

**Effective Value of Alternating Current and Voltage**

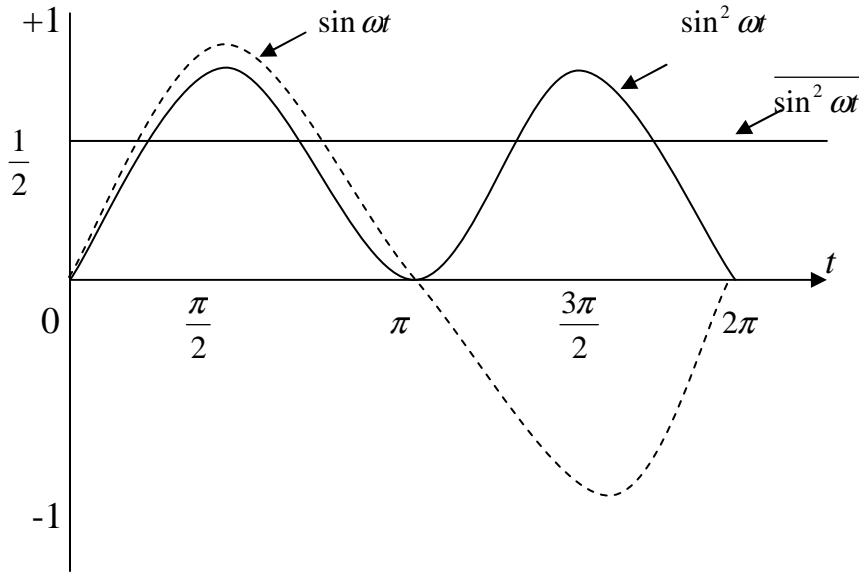
أصبح معلوماً عند الحديث عن التيار المتناوب يقتضي التعامل مع التغيرات المتعاقبة للقيم الآنية للتيار والفولتية المتناوبة وفقاً للدوال الجيبية المعبرة عنها. غير أننا دائماً نتحدث عن التيار والفولتية المتناوبة وكأنهما مقادير ثابتة، فنقول أن هذا الجهاز كالمصباح مثلاً من فئة  $60Watt$  يعمل على تيار متناوب شدته  $0.272A$ ، والمصباح فئة  $100Watt$  يحتاج لتشغيله تيار متناوب قدره  $0.454A$  عندما تكون الفولتية المتناوبة المجهزة لهما  $220V$ . ونحن نجد في جميع أجهزة القياس كالفولتميتر والاميتر تدرج يشير

إلى قياس قيمة ثابتة للتيار والفولتية المتناوبة وهذا يخالف ما درسنا عن طبيعة التيار المتناوب. إذن ما المقصود بهذه التسمية؟

لنفرض أن تياراً كهربائياً مرَّ في مقاومة وولد فيها قدرة مقدارها  $2Watt$  في فترة زمنية مقدارها  $1sec$ ، ثم مرَّ في المقاومة تيار مستمر مقداره  $1A$  فولد نفس القدرة ولنفس الفترة الزمنية، عندئذ يمكننا أن نطلق على هذا التيار الثابت الشدة  $(1A)$  اسم التيار الفعال للتيار المتناوب، أي أن القيمة الفعالة Effective Value للتيار المتناوب تساوي  $1A$ . أن معدل القدرة في مقاومة عند مرور التيار المتناوب  $i = I_o \sin \omega t$  هو :

$$\overline{i^2 R} = I_o^2 R \overline{\sin^2 \omega t} \dots\dots\dots(55-12)$$

$$\overline{\sin^2 \omega t} = \frac{1}{2} \quad \text{من الشكل (49-12) نجد أن :}$$



الشكل (49-12) : القيمة الفعالة للتيار المتناوب

وبالتعويض عن هذه القيمة في المعادلة (49-12) نحصل على القيمة الفعالة للتيار بدلالة قيمته القصوى  $I_o$ ، أي:

$$I_{rms}^2 R = \frac{I_o^2}{2} R$$

أو

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{2} I_o^2$$

وبأخذ جذر طرفي المعادلة ينتج:

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_o = 0.707 I_o \quad \dots\dots\dots(56-12)$$

وان قيمته القصوى تساوي:

$$I_o = 1.414 I_{rms} \quad \dots\dots\dots(57-12)$$

حيث  $I_{rms}$  هو التيار الفعال للتيار المتناوب، فالتيار الفعال هو جذر متوسط مربع التيار واختصارها بالإنكليزية rms وهي الأحرف الأولى من root-mean-square value وبالعربية (ج. م. ت.).

وياتباع الأسلوب نفسه في المناقشة يمكن الحصول على العلاقة نفسها للفولتية:

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_o = 0.707 V_o \quad \dots\dots\dots(58-12)$$

وان قيمتها القصوى تساوي :

$$V_o = 1.414 V_{rms} \quad \dots\dots\dots (59-12)$$

**مثال (12-24)**

مقاومة قدرها  $10\Omega$  ربطت إلى طرفي مصدر متناوب فإذا كانت الفولتية المؤثرة  $V=220\sin 50t$  جد. 1- الفولتية الفعالة بين طرفي المقاومة، 2- التيار الفعال المار في المقاومة.

الحل: 1- من معادلة الفولتية المعطاة في المثال نجد أن :

$$V_o = 220V$$

$$\therefore V_{rms} = 0.707 \times 220 = 155.5V$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{220}{10} = 22A$$

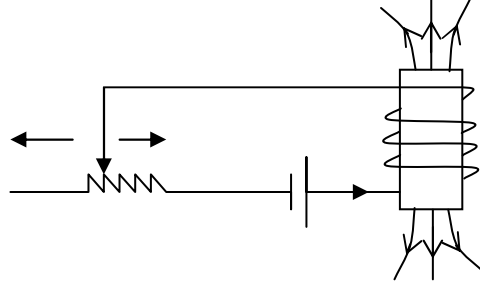
2- لدينا

$$\therefore I_{rms} = 0.707 \times 22 = 15.55A$$

يبين الشكل (12-50) ملفاً من مادة موصلة ذا  $N$  لفة، مربوطاً على التوالي مع دائرة مصدرٍ للقوة الدافعة الكهربائية ومقاومة متغيرة، فإذا مرَّ خلال دائرة الملف تياراً كهربائياً شدته  $I$  تولَّد في الملف ذاته مجالاً مغناطيسياً فيضه  $\phi$ . ويتغير المقاومة بتغير شدة التيار المار خلال الملف ويتغير نتيجة ذلك الفيض المخترق له، وعليه تتولد قوة دافعة كهربائية محتثة في دائرة الملف. أن عدد خطوط الفيض المغناطيسي المخترق للملف في وحدة التيار يسمى بالحث الذاتي لدائرة الملف، أي :

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad \dots\dots\dots(60-12)$$

إذ أن  $L$  تعرف بمعامل الحث الذاتي (Coefficient of Self Inductance). ومن المعادلة (60-12) نجد أن وحدات  $L$  هي  $\frac{\text{ويبير. لفة}}{\text{امبير}}$  وهي المهري تحليداً لاسم العالم الفيزيائي جوزيف هنري Joseph Henry ويرمز لها عادةً بالرمز  $H$ .



الشكل (12-49) : تولد قوة دافعة كهربائية محتثة في دائرة الملف.

هناك بعض النقاط الأساسية التي يجب أن توضع في الاعتبار، وهي كلما كان حجم الملف كبيراً وكذلك عدد لفاته، كلما كان مقدار معامل الحث الذاتي للملف كبيراً، وكذلك يزداد الحث الذاتي للملف لولبي أبعاده معروفة لو لُفَّ على مقطع من الحديد بدلاً من ترك داخله فارغاً (لماذا؟). ويمكن كتابة المعادلة (60-12) كالآتي:

$$LI = N\phi$$

فإذا كان  $\phi$  و  $I$  يتغيران مع الزمن، فعندئذ:



$$N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{dI}{dt}$$

ولما كانت القوة الدافعة الكهربائية المحتثة ذاتياً تساوي :

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

فعندئذ

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt} \dots\dots\dots(61-12)$$

**مثال (12-25)**

ملف يتألف من 800 لفة متقاربة جداً، يمر فيه تيار شدته  $6mA$ . جد معامل الحث الذاتي للملف إذا كان الفيض المخترق له بسبب التيار يساوي  $3 \times 10^{-8} Wb$ .  
الحل :

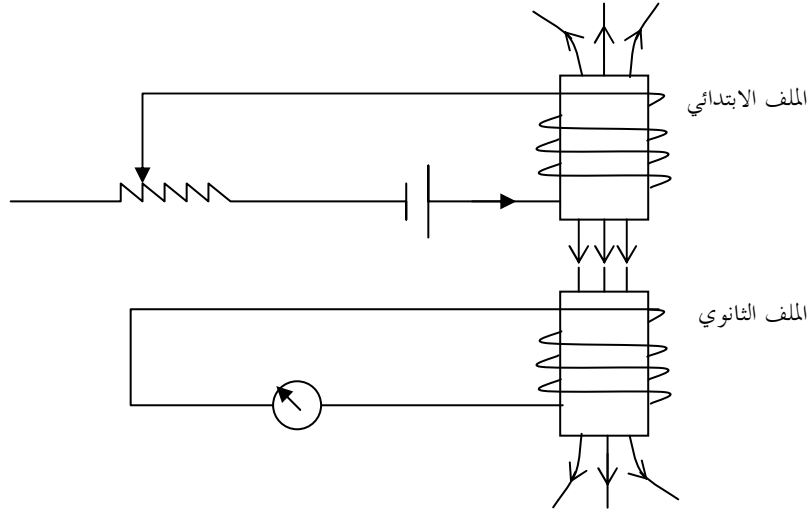
$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{800 \times 3 \times 10^{-8}}{6 \times 10^{-3}} = 4 \times 10^{-3} H$$

**Mutual Inductance (17-12) الحث المتبادل**

إذا اعتبرنا الملف في الشكل (12-50) هو الملف الابتدائي (Primary Coil) ووضع بجواره ملف آخر اعتبر الملف الثانوي (Secondary Coil) (شكل 12-51)، سوف يتولد فيض مغناطيسي يتخلل الملف الثانوي. فيتغير المقاومة تتغير شدة التيار مع الزمن وتظهر قوة دافعة كهربائية في الملف الثانوي طبقاً لقانون فاراداي، هذه العملية تسمى بالحث المتبادل، وعند زيادة التيار في الملف الابتدائي فالقوة الدافعة الكهربائية المحتثة في الملف الثانوي تولد تياراً الذي بتأثيره المغناطيسي يعاكس الزيادة في التيار في الملف الابتدائي، وعندما يكون التيار في قيمته النهائية وتُخفَّضُ يحاول التأثير المغناطيسي للتيار المحتث في الملف الثانوي إبقاء التيار الابتدائي على قيمته السابقة.  
أن القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في الملف الثانوي هي دالة لمعدل تغير التيار بالملف الابتدائي، إذن :

$$\mathcal{E} = -M \frac{dI}{dt} \dots\dots\dots(62-12)$$

حيث  $M$  تعرف بمعامل الحث المتبادل بين دائرتي الملفين Coefficient of Mutual Inductance وهي كمية ثابتة وقيمتها تعتمد على التركيب أو الوضع الهندسي لدائرة الملفين. ومن المعادلة (12-62) نجد أن وحدات  $M$  هي  $\frac{\text{ويبير. لفة}}{\text{أمبير}}$  وتسمى هنري  $H$ . وعلى الطالب أن يثبت أن بالإمكان التعبير عن  $M$  بالوحدات  $\frac{\text{ويبير. لفة}}{\text{أمبير}}$  وهي وحدة هنري أيضاً.



الشكل (12-51) : تولد قوة دافعة كهربائية محتثة في دائرة الملف الثانوي.

### مثال (12-26)

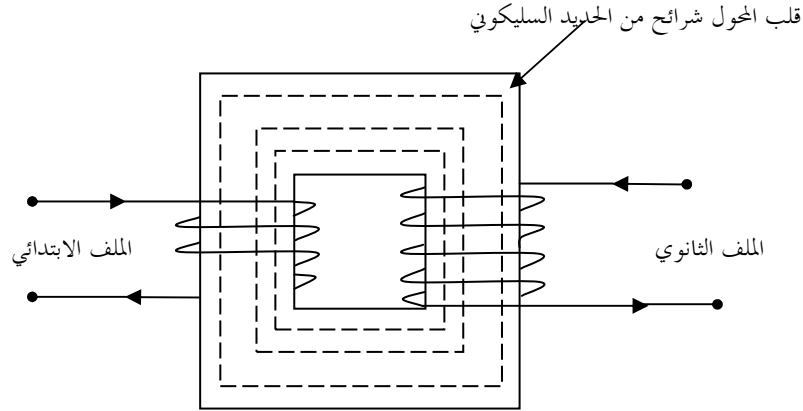
الملفان في الشكل (12-51) لهما محاثة متبادلة مقدارها  $0.4H$  ما مقدار القوة الدافعة الكهربائية المتوسطة التي تتولد في الملف الثانوي عندما يتغير التيار في الملف الابتدائي بمعدل واحد أمبير في عشر ثانية.

الحل :

$$\varepsilon = L \frac{dI}{dt}$$

$$= 0.4 \times \frac{1}{0.1} = \frac{0.4}{0.1} = 4V$$

تعتبر المحولات من القطع الكهربائية الواسعة الاستعمال في دوائر التيار المتناوب فهي تستعمل لرفع أو خفض الفولتية. فالمحول يتكون من مجموعة من الشرائح الحديدية يطلق عليها قلب المحول Core، يلتف حولها ملفان منفصلان، الملف الابتدائي عبارة عن عدد بسيط من لفات سلك النحاس المعزول بالورنيش والملف الثانوي عدد كبير نسبياً من لفات السلك المعزول بالورنيش أيضاً ولكن اقل من ذلك المستعمل في الملف الابتدائي انظر الشكل (12-52).

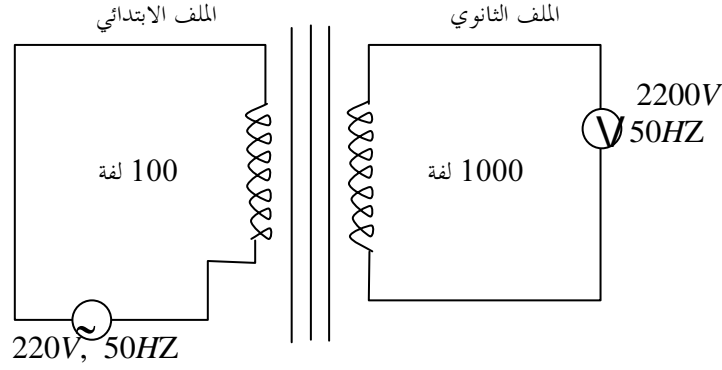


الشكل (12-52) : تركيب المحول ((الترانسفورمر)).

إذا وصل طرفا الملف الابتدائي للمحول بمصدر للجهد المتناوب مقداره 220V وكان عدد لفات هذا الملف 100لفة، فانه يمكن الحصول على فرق جهد متناوب قدره 2200V على طرفي الملف الثانوي إذا كان عدد لفات هذا الملف 1000لفة في دائرة مفتوحة (لا يوجد حمل متصل بالملف الثانوي) كما في الشكل (12-53). وبالطبع يمكن الحصول على أية قيمة من فرق الجهد على طرفي الملف الثانوي للمحول إذا غيّرنا من عدد لفات هذا الملف ، إذ أن فرق الجهد المتولد عليه يتناسب مع عدد اللفات والجهد على الملف الابتدائي تبعاً للمعادلة الآتية :

$$T = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(63-12)$$

حيث تمثل  $T$  نسبة التحويل و  $E_1$  و  $E_2$  فرق الجهد حول الملف الابتدائي والثانوي على التوالي، وان  $N_1$  و  $N_2$  عدد لفات الملف الابتدائي والثانوي على التوالي. لاحظ أن تردد فولت الملف الثانوي هو نفس تردد فولت الملف الابتدائي. ويطلق على هذا النوع من المحولات الذي يكون فيه قيمة فرق الجهد وعدد لفات الملف الثانوي اكبر من فرق الجهد وعدد لفات الملف الابتدائي بالمحول الراجع للجهد (Step-up Transformer).



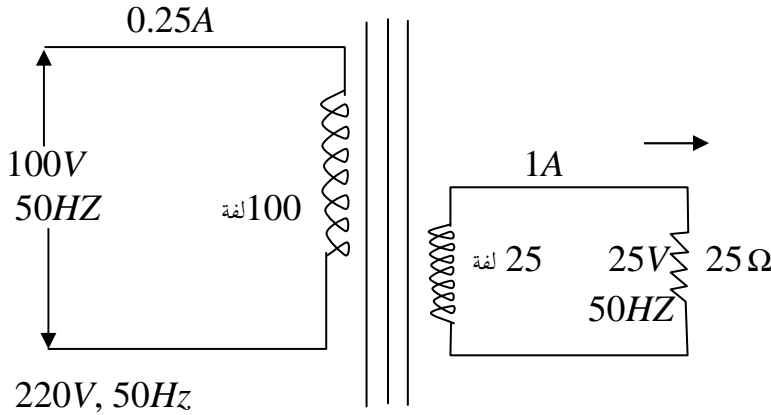
الشكل (12-53) : محول رفع لرفع قيمة الفولتية بنسبة عدد لفات الملف الثانوي إلى عدد لفات الملف الابتدائي.

يمكن أيضا استعمال المحول في خفض قيمة الجهد الواصل إلى طرفي ملفه الابتدائي إلى قيم معينة. في المثال السابق يمكن الحصول على فرق جهد متناوب مقداره 22V فقط إذا كان عدد لفات الملف الثانوي 10 لفات، ويطلق على المحول في هذه الحالة المحول الخافض للجهد (Step-Down Transformer).

إن العلاقة (12-63) تصح في مجال محدود من الترددات فالنسبة  $E_2/E_1$  تصبح صفراً عند مرور تيار مستمر في الملف الابتدائي وكذلك تقترب من الصفر في حالة استعمال الترددات العالية جداً عند مدخل المحول ذو القلب الحديدي المغلق. يكون المحول رافعاً للفولتية عندما تكون  $T > 1$  ويكون خافضاً لها عندما تكون  $T < 1$  ويستفاد من ذلك في كثير من الاستعمالات بالدوائر الكهربائية وخاصة في نقل الطاقة من المولدات إلى مناطق الاستهلاك.

أن المحولات لا تستعمل إلا في رفع وخفض قيمة الجهد أو التيار المتناوب (A.C.) فقط و لا تعمل على التيار المستمر (C. D.) وذلك لان تغير قطبية التيار المتناوب الموصل إلى طرفي الملف الابتدائي تتسبب في نشوء مجال مغناطيسي متغير يتدفق في الشرائح الحديدية المكونة لقلب المحول ويتسبب قطعه لأسلاك الملف الثانوي في توليد جهد ذاتي يتناسب مع شدة هذا المجال في عدد لفات هذا الملف. ولتوضيح فكرة العلاقة بين التيار المار في كل من الملف الابتدائي والثانوي للمحول وكذلك قدرة وكفاءة المحول لنقل هذه القدرة نتأمل المحول الخافض المبين دائرته في الشكل (12-54). من خلال معطيات الدائرة وقيمة التيار المار في الملف الثانوي وهي 1A يمكن استنتاج العلاقة العكسية التي تربط التيار المار في ملفي المحول وعدد لفات كل منهما :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(64-12)$$



الشكل (12-54): محول خفض لخفض قيمة الفولتية.

حيث  $I_1$  و  $I_2$  تيار الملف الابتدائي والثانوي على التوالي، ويمكن أيضا استنتاج أن القدرة power في الملف الابتدائي ( $I_1V_1$ ) تساوي القدرة في الملف الثانوي ( $I_2V_2$ ) حيث: شدة التيار بالأمبير في فرق الجهد بالفولت = القدرة بالواط. ففي الملف الابتدائي  $25=100 \times 0.25$  واط، وفي الملف الثانوي  $25 = 25 \times 1$  واط أي أن:

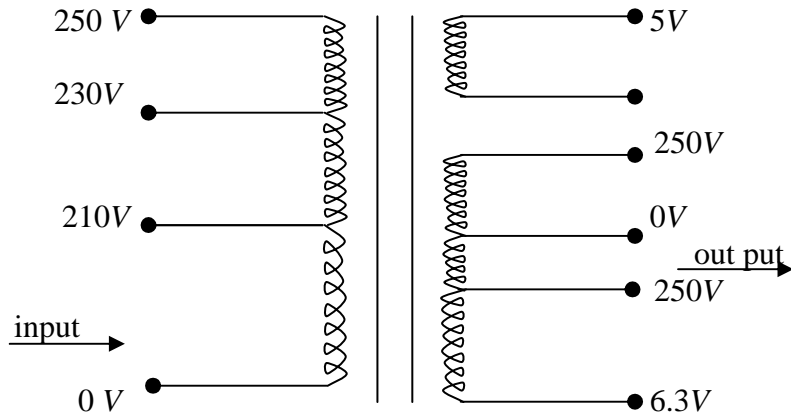
$$I_1V_1 = I_2V_2 \dots\dots\dots(65-12)$$

ولكن في الواقع العملي فان قدرة الملف الثانوي تكون اقل بنسبة ضئيلة عنها في الملف الابتدائي، والفرق بين القدرة الداخلة Input إلى الملف الابتدائي والقدرة الخارجة Output من الملف الثانوي يطلق عليه مقدار فقد الطاقة، إذ تفقد على شكل حرارة نتيجة لمقاومة أسلاك الملفات و التيارات الدوامية Eddy Currents التي تمر في قلب المحول الحديدي وتظهر الطاقة المفقودة كطاقة حرارية تسخن قلب المحول إضافة إلى نضوح خطوط الفيض والمهسترة في القلب الحديدي. وللتقليل من مقدار الفقد ورفع كفاءة المحول في نقل الطاقة يصنع قلب المحول من الحديد السليكوني وعلى هيئة شرائح معزولة بالورنيش وذلك لان الحديد السليكوني له خواص كهربائية تجعله أصلح المعادن، لذلك غالباً ما تكون كفاءة المحولات التي تصنع بهذه الطريقة عالية وتصل إلى 98%.

وفي دائرة المحول الذي يتصل ملفه الثانوي بحمل مستهلك للطاقة وبفرض تحويل جميع القدرة الداخلة إلى الملف الثانوي، فان ممانعة الملف الثانوي  $Z_2$  تحسب من العلاقة:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(66-12)$$

حيث  $Z_1$  تمثل ممانعة مدخل المحول (دائرة الملف الابتدائي). وعليه يمكن الاستفادة من المحول كمغير لممانعة الحمل حيث تعتمد على تردد الإشارة المستعملة عند مدخل المحولة. هناك بعض الاستعمالات يكون فيها للمحول أكثر من ملف ثانوي وذلك لتغذية دوائر مختلفة في الأجهزة الكهربائية بجهود مختلفة وتكون قدرة خرج مثل هذه المحولات تساوي مجموع قدرات الملفات الثانوية كما في الشكل (12-55).



الشكل (12-55): محول متعدد أطراف الملف الثاني كالمستعمل في أجهزة الراديو والتليفزيون.

## Exercises التمارين

(1-12) : قذف إلكترون في مجال مغناطيسي شدته  $10T$ . احسب القوة المغناطيسية المسلطة على إلكترون وقارنها مع وزنه.

(2-12) : ما مقدار واتجاه القوة المؤثرة على إلكترون يتحرك بسرعة مقدارها  $12 \times 10^5 m/sec$  شاقولياً إلى الأعلى حال دخوله مجال مغناطيسي منتظم شدته  $B=0.5T$  يؤثر باتجاه الغرب.

(3-12) : برهن على أن وحدة شدة المجال المغناطيسي (التسلا) تعادل

$$\frac{\text{نيوتن ثانية}}{\text{كولوم متر}}$$

(4-12) : تحرك إلكترون على مسار دائري نصف قطره  $1.2cm$  في مجال مغناطيسي منتظم. فإذا كانت سرعة الإلكترون تساوي  $10^6 m/sec$ . احسب الفيض المغناطيسي الكلي الذي يطوق المجال.

(5-12) : أطلق إلكترون طاقته  $2 \times 10^3 eV$  داخل مجال مغناطيسي منتظم شدته  $0.1T$  وبزاوية قدرها  $89^\circ$  مع اتجاه المجال. احسب: 1- السرعة التي قذف بها الإلكترون، 2- نصف قطر المسار اللولبي للإلكترون، 3- الزمن الذي يتطلبه الإلكترون كي يعمل لفة كاملة، 4- المسافة بين لفتين لولبيتين متجاورتين.

(6-12) : عجلت بروتونات بواسطة جهاز سايكلو ترون نصف قطره  $0.35m$  وشدة المجال المغناطيسي المستعمل فيه تساوي  $1.5T$ . 1- ما عدد المرات التي يجب أن تنعكس فيها الفولتية المستعملة في الثانية الواحدة، 2- ما مقدار أقصى سرعة يمكن أن تحصل عليها البروتونات، 3- ما مقدار فرق الجهد الواجب تسليطه على البروتونات لكي تتسارع وتصل إلى نفس السرعة التي حصلت عليها البروتونات باستعمال السايكلوترون.

(7-12) : عجلت جسيمات ألفا ( $m = 6.68 \times 10^{-27} kg, q = +ze$ ) من السليكون خلال فرق جهد قيمته  $1KV$ ، ثم دخلت مجالاً مغناطيسياً شدته  $B=0.2T$  عمودياً على اتجاه حركتها. احسب نصف قطر مسارها.

(8-12) : بروتون يدخل مجالاً مغناطيسياً شدته  $1.5T$ ، بسرعة  $2 \times 10^7 m/sec$

عند زاوية قدرها  $60^\circ$  مع اتجاه المجال. احسب القوة المؤثرة على البروتون.

(9-12) : أطلق إلكترون بسرعة  $5 \times 10^6 m/sec$  من نقطة أصل الإحداثيات

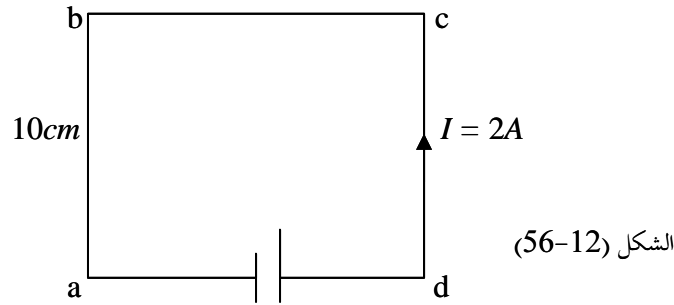
وكانت سرعته الابتدائية تصنع زاوية  $20^\circ$  مع المحور  $+x$ . صف حركته إذا

وجد مجال مغناطيسي شدته  $B=2mT$  في اتجاه  $+x$ .

(10-12) : جد مقدار واتجاه القوة على كل ضلع من مربع (شكل 12-56) إذا

وجد داخل مجال مغناطيسي منتظم شدته  $B=0.5T$  باتجاه يوازي سطح

المربع ويوازي الضلع  $bc$ ، ثم احسب عزم الازدواج المؤثر عليه.



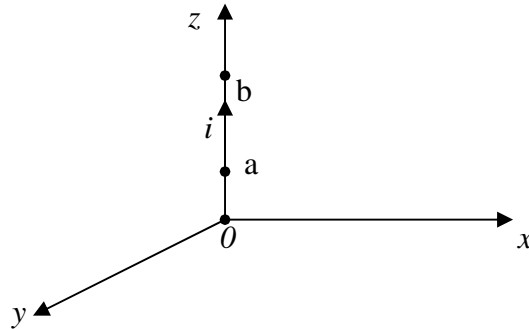
(11-12) : يوضح الشكل (12-57) سلك مستقيم طوله  $70cm$  يحمل تياراً شدته

$1.5A$  بحيث أن  $oa=30cm$ ، موجود في مجال مغناطيسي منتظم

$B=0.2T$ . ما القوة المؤثرة على السلك إذا كانت  $B$  تؤثر، 1- باتجاه المحور

$+x$ ، 2- في مستوي موازاة السطح  $zy$  وباتجاه يصنع زاوية قدرها  $60^\circ$

مع محور  $z$ ، 3- باتجاه المحور  $+z$ .



الشكل (57-12)

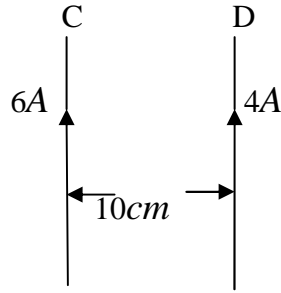


(12-12) : سلكان مستقيمان طويلان متوازيان تفصلهما مسافة عمودية قدرها  $2R$ . احسب شدة المجال المغناطيسي عند منتصف المسافة بين السلكين، 1- عندما يمر تياران متساويان في السلكين وباتجاهين متعاكسين 2- عندما يكون التياران باتجاه واحد.

(13-12) : ملف حلزوني قلبه هواء وعدد لفاته 2000 لفة وطوله  $60\text{cm}$  وقطره  $2\text{cm}$ . إذا مر خلاله تيار شدته  $5\text{A}$ ، فكم تكون كثافة الفيض المغناطيسي  $B$  بداخله.

(14-12) : ملف حلزوني هوائي طوله  $50\text{cm}$  وعدد لفاته 4000 لفة احسب  $B$  بداخله عندما يمر في الملف تيار شدته  $0.25\text{A}$ .

(15-12) : يوضح الشكل (12-58). سلكان طويلان متوازيان تفصلهما مسافة  $10\text{cm}$  ويحملان تيارين  $60\text{A}$  و  $40\text{A}$ . اوجد القوة المؤثرة على طول  $1\text{m}$  من السلك D، إذا كان التياران يسريان، 1- في نفس الاتجاه، 2- في اتجاهين متضادين.



الشكل (12-58)

(16-12) : ملف من أسلاك موصلة عدد لفاته 500 ومساحته  $600\text{cm}^2$  ومقاومته  $50\Omega$ ، سلط عليه مجال مغناطيسي يميل مع اتجاه السطح بزاوية  $60^\circ$ ، فإذا كانت  $B$  تتغير بمعدل  $10\text{mT/sec}$ ، جد شدة التيار المحتث.

(17-12) : ملف اسطواني طوله  $2.2\text{m}$  وعدد لفاته 8800 ومساحة مقطعة  $24\text{cm}^2$ ، لف حول وسطه ملف قصير عدد لفاته 200. فإذا كان التيار المار في الملف الطويل يتغير بمعدل  $0.2\text{A/sec}$ ، جد القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف القصير إذا كانت مساحة مقطعه تساوي  $24\text{cm}^2$ .

- (18-12) : قضيب نحاسي طوله  $30\text{cm}$  عمودي على مجال مغناطيسي شدته  $0.8T$  ويتحرك في اتجاه زاوية  $60^\circ$  مع العمود المقام على السطح الذي يضم المجال  $B$  وطول القضيب  $L$  وبسرعة  $0.5\text{m/sec}$ . احسب القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في القضيب.
- (19-12) : وصل مصدر فولتية تيار متناوب يعطي  $120V$  عبر مكثف  $2\mu F$  في الحالة الأولى ، وعبر محث نقي  $0.7H$  في الحالة الثانية. احسب التيار الواصل إلى المكثف ثم إلى المحث، إذا كان تردد المصدر هو،  $1-60\text{HZ}$  ،  $2-60000\text{HZ}$ .
- (20-12) : وصلت مقاومة  $5\Omega$  في دائرة توالي مع محاثة نقية  $0.2H$  ومكثف سعته  $40\mu F$ . وضعت المجموعة عبر مصدر قدرة يعطي  $30V$  بتردد  $1780\text{HZ}$ . احسب: 1- التيار المار في الدائرة، 2- زاوية الطور بين فولتية المصدر والتيار.
- (21-12) : تيار متردد في مقاومة  $10\Omega$  فينتج طاقة حرارية بمعدل  $360W$ . احسب القيمة الفعالة لكل من التيار والفولتية.
- (22-12) : محول خافض يعمل على خط فرق جهده  $2.5KV$  ويمد حملاً بتيار شدته  $80A$ . النسبة بين عدد لفات الملف الابتدائي وعدد لفات الملف الثانوي هي  $20:1$  بفرض أن الكفاءة  $100\%$ . احسب: 1- فرق جهد الملف الثانوي  $V_2$ ، 2- تيار الملف الابتدائي  $I_1$ ، 3- خرج القدرة  $P_2$ .
- (23-12) : محول رافع يعمل على خط  $110V$  ويمد حملاً بتيار شدته  $2A$ ، النسبة بين الملف الابتدائي والملف الثانوي هي  $25:1$ . احسب: 1- فولتية الملف الثانوي، 2- تيار الملف الابتدائي، 3- خرج القدرة. (اعتبر أن الكفاءة  $100\%$ ).