**المجال المغناطيسي**

**The Magnetic Field**

**المغناطيسيةMagnetism**

**المجال المغناطيسي**

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 القابلية والقدرة 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 عُرِف لهذه الأحجار خاصية أخرى وهي أن الحجر المعلّق من وسطه يميل عندما يترك حر الحركة بحيث أن طرفيه يشيران إلى اتجاهي كل من الشمال والجنوب الجغرافيين، وإذا غير اتجاه هذا الحجر المعلّق فانه يتحرك تلقائياً ليعود إلى وضعه الأول. وقد أمكن نقل الخواص التي تتميز بها تلك الأحجار إلى قطع من الحديد غير الممغنط وذلك بدلك قضيب من الحديد المطاوع بقطعة من هذه الأحجار لبعض الوقت في اتجاه واحد، فتنتقل بذلك بعض من القوى المغناطيسية الموجودة بالحجر المغناطيسي إلى قضيب الحديد ويتحول بذلك إلى قضيب مغناطيسي. وقد استعملت مثل هذه القضبان أو الإبر الحديدية المصنّعة بهذه الطريقة في تحديد اتجاهي الشمال والجنوب المغناطيسيين، وقد كانت هذه هي أول الطرق المستعملة لتصنيع البوصلة المغناطيسية Compass. وبالطبع فقد تطورت مثل هذه البوصـلة البدائية حتى وصلت إلى شـكلها الحالي المتطـور كما في الشكل (1).

البوصلة المغناطيسية عبارة عن إبرة مغناطيسية رقيقة ترتكز عل 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.

0

N

W/N N/E

270 W E 90

S/W E/S

S

180

البوصلة المغناطيسية .

في عام 1820 اكتشف ألدانماركي هانز كريستيان اورستيد (1770-1867) إن التيارات الكهربائية تولد مجالات مغناطيسية. فقد تحقق ذلك عندما كان يجري تجاربه الكهربائية ، وكان بجوار السلك الذي يمرر 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 )، وعندما غيّر من وضع السلك بحيث أصبح أسفل الإبرة كما في الشكل ( 2b )، لاحظ انحراف الإبرة بعكس الاتجاه الأول. وقد علّلَ السبب في ذلك إلى أن مرور التيار في السلك يتسبب في نشوء مجال مغناطيسي في المنطقة المحيطة بهِ. وهكذا فان 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 مغانط متحركة. ويُذكَرْ إن فاراداي كان قد نشر اكتشافاته رسمياً بعد اثني عشرَ عاماً من اكتشاف اورستيد في حين كان هنري قد توقع اكتشافات فاراداي قبل عام من نشرها.

*I* *I*

-a- -b-

الشكل (2) : a- السلك فوق الإبرة المغناطيسية.

1. السلك أسفل الإبرة المغناطيسية.

**الأقطاب المغناطيسية والقوى المغناطيسية**

**Magnetic Poles and Magnetic Forces**

عند تعليق قضيباً مغناطيسياً تعليقاً حراً من وسطه، فان أحدى 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)، فان كل واحدة منها تصبح قضيباً مغناطيسياً متكاملاً جديداً له قطب شمالي وآخر جنوبي. وهذا يعني إن الاستمرار في تقطيع المغناطيس إلى أجزاء اصغر فأصغر ستتوصل في الأخير إلى أن الذرة، ما هي سوى قطب مغناطيسي متناهٍ في الصغر من المغناطيس الأصلي.

N S

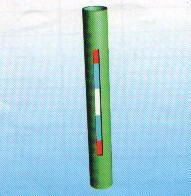
N S N S N S

الشكل (3) : الاقطاب المغناطيسية.

أن القوة المغناطيسية بين قطبين مغناطيسيين هي ذلك التأثير المتبادل بين القطبين سواء بالتنافر إذا تشابه القطبان أو بالتجاذب إذا اختلفا. وتُقدّر 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. نطوي الورقة بحيث تأخذ شكل أنبوب اعرض قليلاً من القضيب، ثم نعمل شقاً طولياً على جانبي الأنبوبة الورقية شكل(4a) . 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).

الآن إذا استبدلنا المغناطيسين السابقين بآخرين قوتهما المغناطيسية اكبر مع مراعاة أن يكون القطبان المتشابهان متقابلين،سنشاهد ارتفاع المغناطيس العلوي مسافة اكبر (4c). وهذا يعني انه كلما زادت القوة المغناطيسية زادت قوة التنافر بين الأقطاب المتشابهة. نَذكر 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 ابعد 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.

الان 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) : القوة المغناطيسية بين قطبين مغناطيسيين.

**إظهار المجال المغناطيسAppearance of Magnetic field**

درسنا كيف أن الشحنات الكهربائية تؤثر على أي شحنة قريبة منها بقوة كهربائية، أي أن للشحنة الكهربائية مجالاً يسمى بالمجال الكهربائي. وبالمقارنة نتساءل هل المغناطيس أيضا يؤثر على المواد المغناطيسية القريبة منه بقوة أم لا ؟ لنتأمل مغناطيساً قد وضع أفقياً على قطعة خشبية وعلِّق مجموعة من الإبر المغناطيسية حوله (5) ، نجد أن المغناطيس سوف يؤثر على بعضها ولا يؤثر على البعض الآخر إذا كانت بعيدة، أي أن قوة الجذب المغناطيسي تتركز في قطبيه وتقل في المناطق الأخرى. من هذا يتبين هناك منطقة محيطة بالمغناطيس من جميع الجهات يظهر فيها

**N S**

الشكل (5): قوة الجذب متركزة في قطبي المغناطيس وتقل في المناطق الأخرى .

تأثير القوة المغناطيسية يطلق عليها المجال المغناطيسي، وبما أن المجال غير مرئي لذلك يمكن إظهار أثره باستعمال برادة حديد أو بوصلات دقيقة الحجم كما في الأشكال (6,7).

-a- -b-

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

N S



N

N

S

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

**N S**

**(12-4) 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) تشير بعيداً عن القطب الشماليN ونحو القطب الجنوبي S، فان 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 لايمكن أن يوجد قطب مغناطيسي منفرد عملياً كما بينّا سابقاً، على عكس المجال الكهربائي الذي يمكن أن تتواجد فيه الشحنة الكهربائية منفردة حيث يكون خطاً مفتوحاً ينتهي نظرياً في المالانهاية.

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



الشكل (8) : اتجاه المجال المغناطيسي.

N

S

يبدو واضحاً من هذه المخططات إن خطوط القوة المغناطيسية لا تتقاطع مع بعضها مطلقاً (شأنها في ذلك شأن خطوط القوة الكهربائية)، لان 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 تكدساً 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، فان خطوط القوة المغناطيسية تُظهر تنافراً في المجال بجوار القطبين كما في الشكل ( a 9 )، أما في الحالة الأخرى التي يكون فيها وضع القطبين المتواجهين مختلفين كما في الشكل ( b 9 )، فيبدو شكل خطوط القوة المغناطيسية كما لو كانت لقطب مغناطيسي واحد أي يكاد يشابه شكل خطوط القوة المغناطيسية في الشكل ( a 6 ).

- a - - b -

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

**N S**

**N S**

**S N**

**N S**

تُرسم خطوط القوة المغناطيسية بحيث تعطي للقارئ فكرة عن طبيعة المجال المغناطيسي، فالنظر إلى المخططات في الشكل ( 10 a,b,c,d ) يعطينا انطباعاً واضحاً عن أن المجال المغناطيسي في جميعها منتظماً. فخطوط القوة في a وb وc تظهر مستقيمة ومتوازية وتحصر 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 تدلّلْ على أن المجال غير منتظم ، ففي 1 أشد مما هو عليه في 2.

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

• • • • •

• • • • •

• • • • •

• • • • • • •

**× × × × ×**

**× × × × ×**

**× × × × ×**

**× × × × × × ×**

*I*

خطوط القوة المغناطيسية عبارة عن دوائر مغلقة منتظمة ومتحدة المركز

- d –

2

1

خطوط القوة المغناطيسية غير منتظمة الكثافة.

- e -

خطوط القوة المغناطيسية عمودية على الصفحة خارجة قريبةً من القارئ.

- a -

خطوط القوة المغناطيسية عمودية على الصفحة داخلة مبتعدةً عن القارئ.

- b -

خطوط القوة المغناطيسية منطبقة على الصفحة باتجاه الشرق.

- c -

**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 تأثرها 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 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 صفراً) 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  تصنع زاوية  مع المجال.

أما إذا كانت سرعة الشحنة ليست عمودية على اتجاه المجال وإنما تصنع زاوية  مع المجال فعندئذ يكون مقدار القوة المغناطيسية يتناسب طردياً مع مركبة السرعة العمودية على المجال ومقدارها  إضافة إلى مقدار الشحنة *q* كما في الشكل ( 11).

*F* *F*

*B*



+*q*  *B*





*F*

الشكل (12): تحديد قيمة واتجاه القوة *F* المؤثرة على الشحنة*q*.



v

*B*

v

*F*

كما 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 وعلى النحو الآتي:



 ………(1)

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

 ………(2)

ومن خصائص هذه المعادلة أن القوة  تكون دائماً عمودية على كل من  و . ويمكن تحديد اتجاه القوة المغناطيسية باستعمال قاعدة اليد اليسرى الموضحة في الشكل (11)، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه *F* أما الإصبع الوسطى فيشير إلى اتجاه حركة الشحنة أي السرعة  فيما تشير السبابة إلى اتجاه المجال المغناطيسي *B*.

ويجب الانتباه إلى أن قاعدة اليد اليسرى تطبّق على الشحنات الموجبة، أما في حالة تطبيقها على الشحنات المتحركة السالبة فيتحتم عكس اتجاه القوة كما في الشكل (11). عند قياس *F* بالنيوتن و *q* بالكولوم وv بالمتر/ثانية تصبح وحدة *B*  أو  وهذا يساوي تسلا وفي نظام الوحدات cgs يقاس *B* بوحدة الكاوس حيث أن 1 تسلا تعادل 104  كاوس.

**مثال (1)**

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

الحل:

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 نحو القارئ، حيث يتم عكس اتجاه القوة المؤثرة على الشحنة السالبة عند تطبيق قاعدة الكف الأيسر عليها. وفي c لايحصل انحراف وهذا واضح من تطبيق المعادلة  حيث  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 بعيداً عن القارئ.

*B*in *Bup*

-a- -b-

*Bright**B* at 45o

-c- -d-

الشكل (12)

× × × × × × × × × × × ×

+

+

+

-

**مثال ( 2 )**

ما مقدار واتجاه القوة المؤثرة على إلكترون يتحرك بسرعة  شاقولياً إلى الأعلى حال دخوله مجال مغناطيسي منتظم *B*=0.5*T* يؤثر باتجاه الغرب.

الحل :

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



واتجاه القوة نحو الشمال.

**الفيض المغناطيسي Magnetic Flux**

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 **.

ويمكن التعبير عن **** المخترق لسطح مساحته *A* بصيغة معادلة أسوة بنظيره الفيض الكهربائي، إذ نرى :

 ……....(3)

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



*dA*  *B*

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

وإذا تأملنا الحالة التي يكون فيها *B* منتظماً عندئذ تصبح معادلة الفيض المغناطيسي:

 ..…....(4)

لنناقش الحالة التي يكون فيها متجه *dA* عمودياً على متجه *B* شكل (14). عندئذ تكون قيمة **** صفراً، وذلك لعدم وجود خطوط قوة مغناطيسية تخترق المساحة. بينما تكون قيمة **** اكبر ما يمكن عندما تكون  وهنا أما أن يكون الفيض المغناطيسي موجباً أو سالباً، عندئذ تأخذ المعادلة (12-4) الصيغة الآتية :

 ……..(5)



*B*

*dA*

الشكل ( 14): 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 فان المعادلة (5) تشير إلى الحالة التي يكون فيها المجال المغناطيسي منتظماً وعمودياً على السطح وبكلام آخر المتجه  يكون موازياً لمتجه المجال المغناطيسي  كما في الشكل (15).

*dA* 



الشكل ( 15 ): يكون موازياً لاتجاه المجال المغناطيسي .

في نظام الوحدات SI يعبَّرْ عن الفيض المغناطيسي بوحدة الويبر (*Wb*) نسبة إلى الفيزيائي الألماني ويبر W.E. Weber (1804-1891). يتضح من المعادلة ( 5) أن الويبر يعادل تسلا.متر مربع (*Tm2*) وعلى هذا نجد أن شدة المجال المغناطيسي *B* الذي يقاس بوحدة التسلا يكون له وحدة مكافئة هي الويبر لكل متر مربع (*Wb/m2*). وفي النظام الكهرومغناطيسي يعبَّرْ عن الفيض المغناطيسي بوحدة الماكسويل عندئذ يكون لشدة المجال المغناطيسي تعبير الكاوس، وهي عبارة عن ماكسويل لكل سنتمتر مربع. وأخيرا تسمى شدة المجال المغناطيسي أحيانا بكثافة الفيض المغناطيسي أو كثافة التدفق المغناطيسي طالما أن  *B*في نقطة ما تساوي الفيض في وحدة المساحة.

سطح مستوي مساحته 600*cm2* يخترقه مجال مغناطيسي منتظم *B*=0.4*T*. جد الفيض المغناطيسي المخترق للسطح. 1- إذا كان المجال يؤثر بصورة عمودية على السطح، 2- إذا كان اتجاه المجال يصنع زاوية مقدارها 60o مع اتجاه السطح.

**مثال (12-3)**

الحل :

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

1-



2-



**مثال (12-4)**

الشكل (12-16) المجال المغناطيسي يوازي المحور *z* وتتغير شدته وفق المعادلة . جد الفيض المغناطيسي المخترق للمستطيل المبين في الشكل.

*z*

*B*

10*cm* 30*c*m

*x*

20*cm*

الشكل ( 16).



