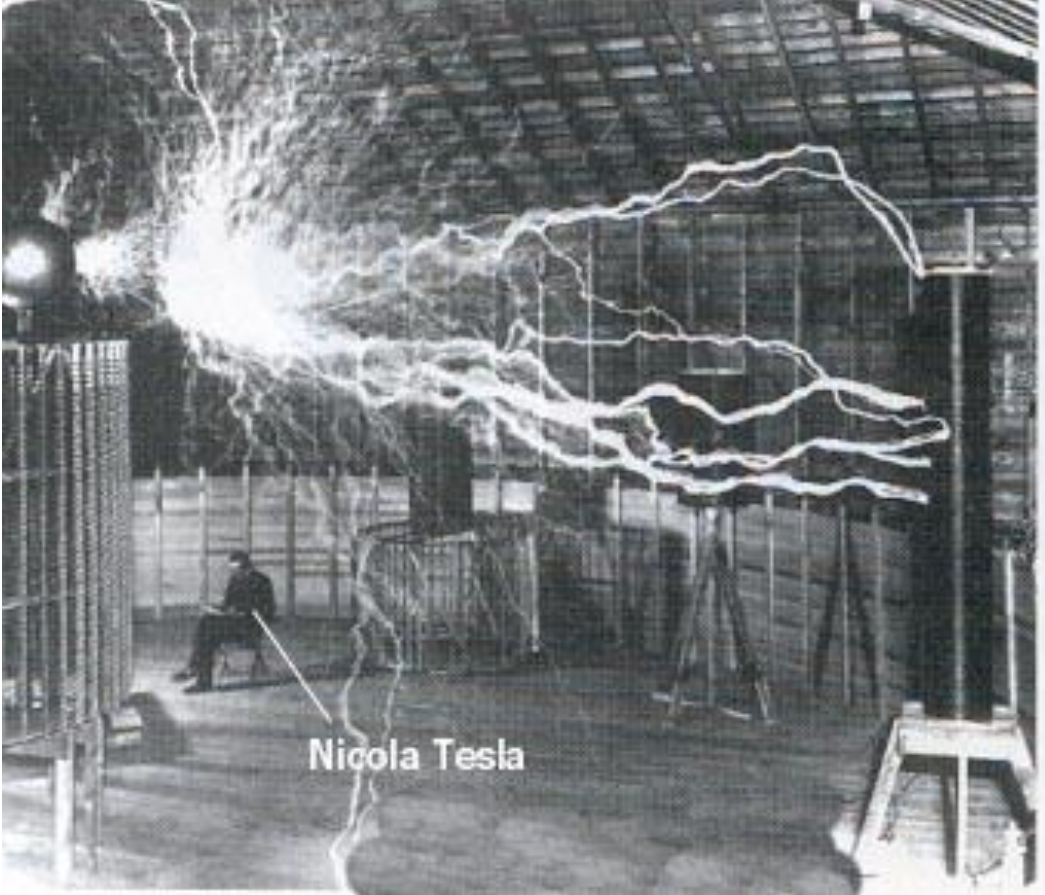


TEMEL YASALAR VE KURALLAR



Manyetik alan nasıl modellenir? Tek kutup var mıdır?

İndükleme nasıl olur? Kuvvet nasıl indüklenir?

Basit bir makinenin hangi yöne hareket edeceğini belirleyebilir misiniz?

Manyetik eşdeğer devreyi elde edebilir misiniz? Malzemelerin mıknatıslanma karakteristikleri hakkında neler söyleyebilirsiniz? Endüktans nedir?

Amaç:

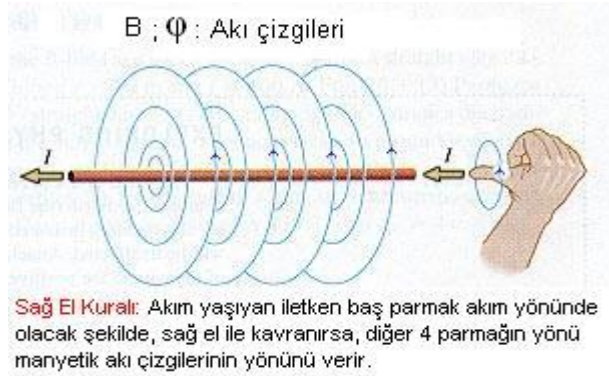
Tüm elektrik makineleri manyetik alanlar sayesinde enerji dönüşümü yapar. Bu kısımda manyetik alanların oluşumunu, bu konudaki önemli bilgileri ve kuvvet oluşumunu inceleyeceğiz.

Manyetik Alanlar ve Kuvvetler

Tüm elektrik makineleri elektromanyetik enerji dönüşümü yaptıklarından, elektrik makinelerinin anlaşılabilmesi için manyetik alan prensiplerinin bilinmesi gerekir.

1820'de Hans Christian Ørsted, elektrik akımı ile pusulanın sapmasını fark ederek elektrik ile manyetizma arasındaki bağlantıyı ortaya koymuştur. Bundan bir yıl sonra, elektrik akımı ile manyetik alan ilişkisini ise André-Marie Ampère matematiksel olarak ifade etmiştir. Böylelikle elektromanyetizma çalışmaları hız kazanmıştır.

Elektrik akımı manyetik alan oluşturur

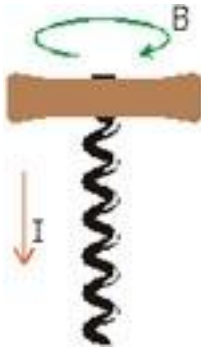


ϕ : Manyetik akı [Wb: Weber]

H, B manyetik akı ile aynı yöndedir.

H : Manyetik alan şiddeti [A/m; At/m: Amper x sarım/metre]

B : Manyetik akı yoğunluğu [$\frac{Wb}{m^2} = T$; T : Tesla]

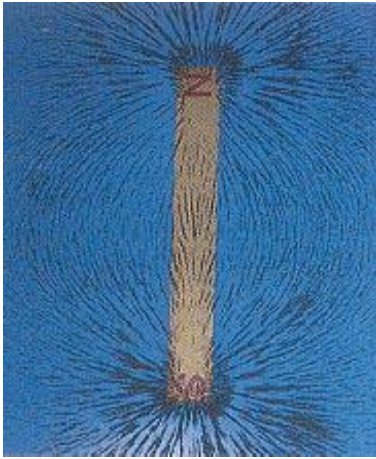


Bu kural; manyetizma ve manyetik kuvvetleri açıklayan iki sağ el kuralından ilkidir. Sağ el tirbuşon kuralı olarak bilinir.



Hans Christian
Ørsted
(1777-1851)

Demir Tozları Manyetik Akı Çizgilerinin Yönünü Gösterir



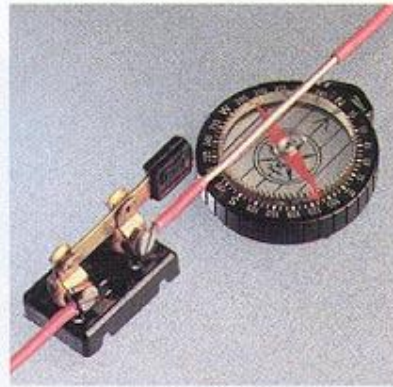
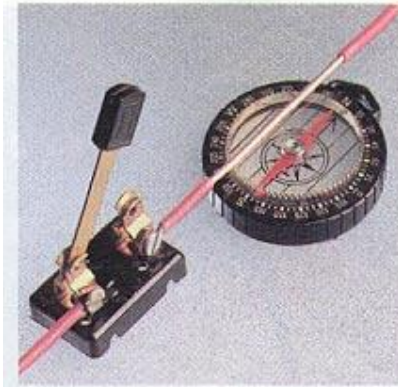
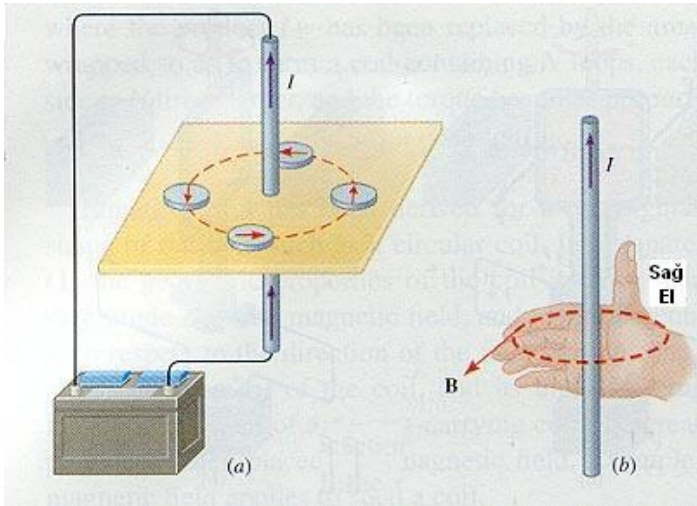
Mıknatısın manyetik alanı demir tozlarını mıknatıslar.



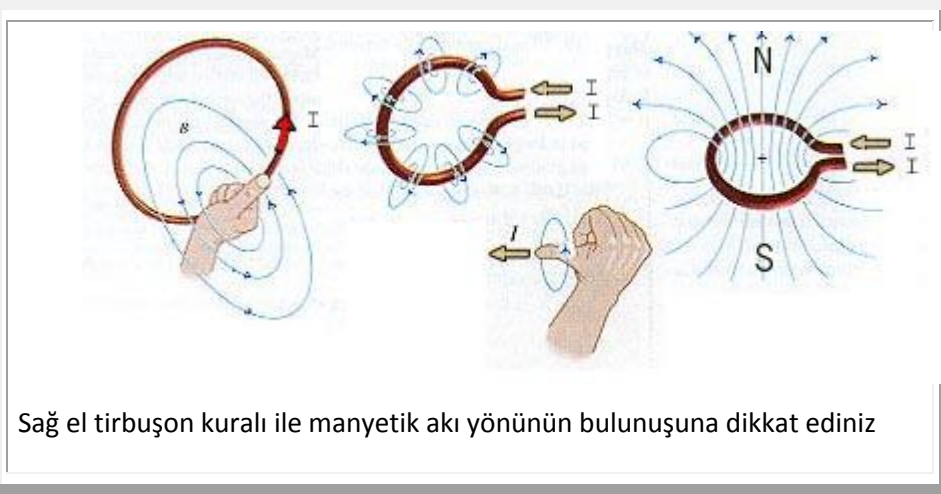
Demir tozları çok küçük çubuk mıknatıslar olarak değerlendirilebilir.

Bu bağlamda demir tozları B manyetik endüksiyonuna paralel çizgiler halinde yönelir.

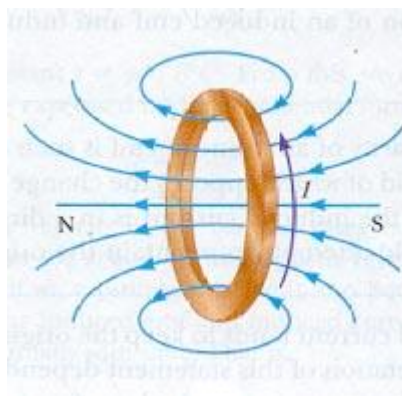
Pusula; İğnesi B ile yönlenen bir Mıknatıstır



Bir sarımın oluşturduğu manyetik akı

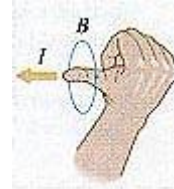
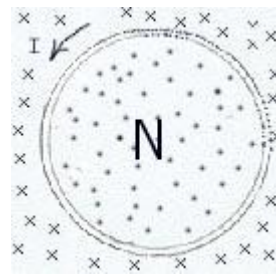


Sarımın oluşturduğu akıya detaylı bakış



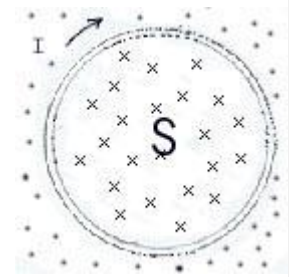
Sarımın oluşturduğu manyetik akı, aynen çubuk mıknatıstakine benzer. Burada, akım yönü, akı yönü ve N-S kutuplarının oluşum yönüne dikkat ediniz.

Akı çizgileri, mıknatısın dışında N'den S'e; mıknatısın içinde ise S'den N'ye doğrudur



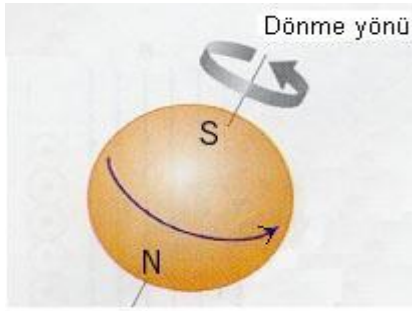
Kuralın diğer bir ifadesi: Şayet sargıdaki akım saatin tersi yönde ise, mıknatısın N (kuzey) kutbunu görüyorsunuzdur.

“.” size doğru; “x” tahtaya doğru olan akışı gösterir.



B endüksiyonu merkezde en güçlüdür. Yukarıdaki sarımda, sarımın size bakan iç kısmı S kutbudur. Sağ el tirbuşon kuralı ile kutuplaşmayı kendiniz de bulunuz.

Elektron manyetik bir dipol oluşturur



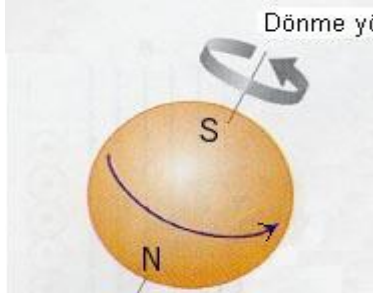
Kuralı uygulayarak, geleneksel olarak kullanılan akım yönünün, elektron yönünün (akışının) tersi yönünde olduğunu görünüz.

Elektron kendi ekseninde döner ve elektron akımı dönme yönündedir.

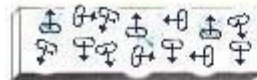
Geleneksel olarak elektrik akımının yönü elektron akımının tersi yönündedir.

Elektron; N ve S kutupları bulunan mikro bir mıknatıs gibidir. Bu temel (ikili) oluşuma manyetik dipol denir.

Demirdeki manyetik spin dipolleri



Kuralı uygulayarak, geleneksel olarak kullanılan akım yönünün, elektron yönü (akışının) tersi yönünde olduğunu görünüz.



Mıknatıslanmamış demir

Dipoller rasgele yönelmiştir.
Oklar, B'nin yönünü gösteriyor.

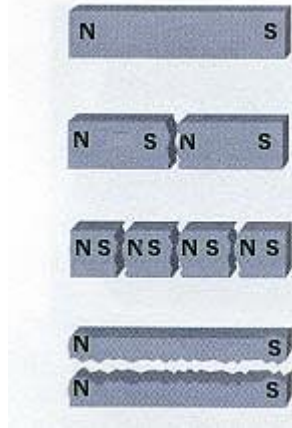


Tamamıyla
mıknatıslanmış demir



Bir mıknatıs 2 parçaya
ayrılırsa,
yandaki gibi 2 mıknatıs
oluşur.

N ve S Kutupları Birbirinden Ayrılmaz

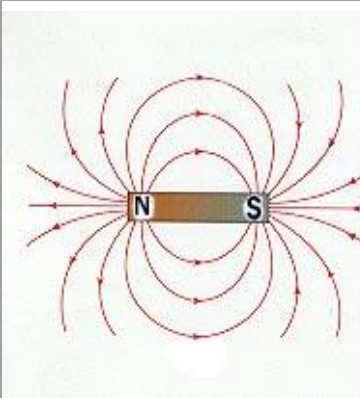


Bir mıknatısın ikiye parçalayarak, birbirinden ayrı N ve S kutupları elde edilmez. Açığa çıkan her bir parça müstakil N ve S kutupları olan yeni bir mıknatıstır. Parça sayısı arttıkça oluşum aynen devam eder.

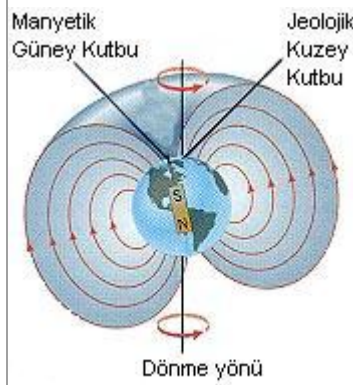
Bu süreç teorik olarak tek bir elektronun spin dipolüne kadar parçalanabilir. Elektronda da N ve S dipol kutuplaşmasının olduğu hatırlanırsa, tek kutuplu bir mıknatıs hiçbir zaman elde edilemez.

Boyuna yönde de kesilse sonuç değişmez.

Çubuk Mıknatıs ve Yerkürenin Manyetik Alanı



Çubuk mıknatısın manyetik alanı, yerkürenin manyetik alanına benzerdir. Akı çizgileri S'den (manyetik güney) çıkar ve N'ye (manyetik kuzey) girer.



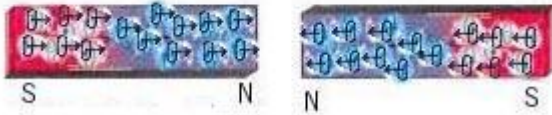
Yerküre içindeki konveksiyon akımları manyetik alan oluşturur.

Çubuk Mıknatıslar

Spinler aynı yönde yönlerise çekme, aksi durumda itme oluşur

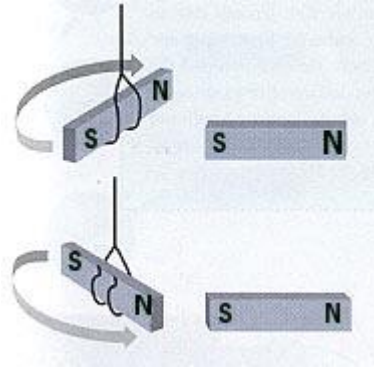


ÇEKME



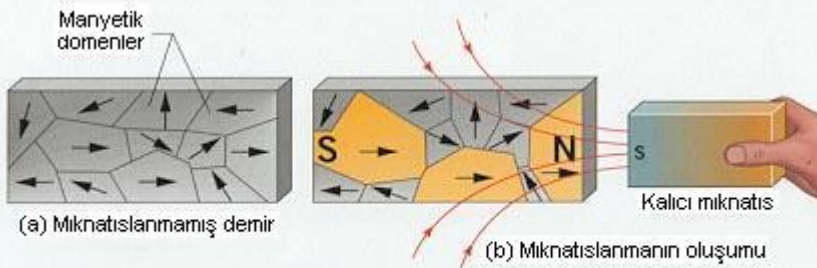
İTME

Komşu uçlardaki manyetik dipol çevrimleri aynı yönde ise mıknatıslar birbirini çeker.

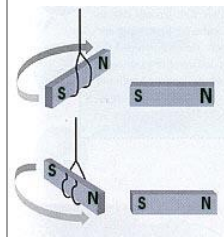


Sabit konumlandırılan S kutbu;
N kutbunu çekerken,
S kutbunu iter.

Mıknatıslanma Oluşumu

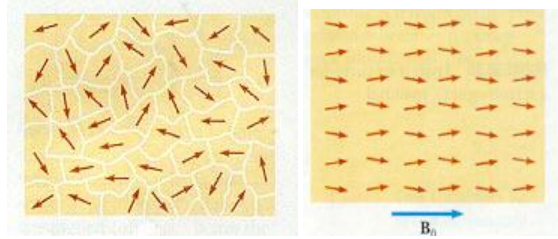


Domen; aynı yönde mıknatıslanma gösteren, manyetik tanecik kümesine denir.

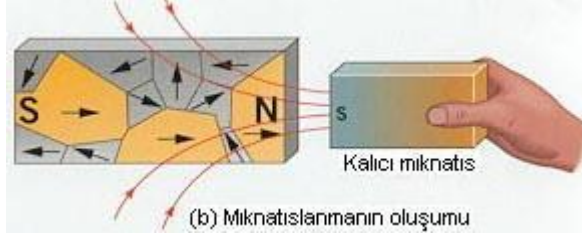


Böyle bir durum karşısında, demir içindeki elektron spin dipollerinin yönlenmesi ve kümelenmesi soldaki şekillerde görülmektedir.

Mıknatıslanma ve Mıknatıslanmış Demir



Yönlensiz dipoller | Yönlensiz dipoller



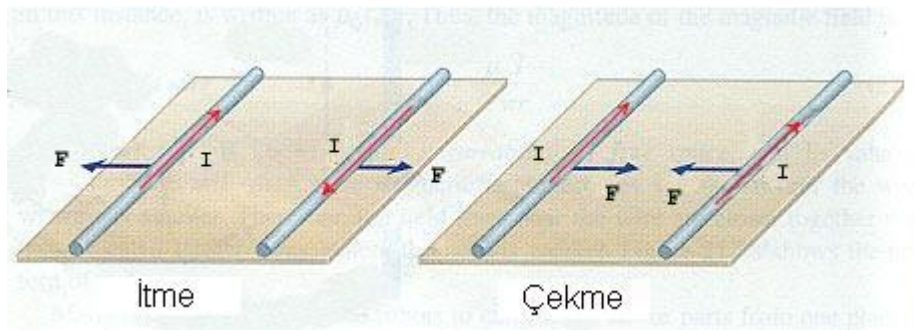
(b) Mıknatıslanmanın oluşumu

Kalıcı mıknatıs askıdaki demirin dipollerini etkiler ve mıknatısın akı çizgileri yönünde hizaya sokar. Demirdeki yönlenen dipollerin sayısı, kalıcı mıknatısın B akı yoğunluğunun büyüklüğüne bağlıdır.

Pusulada, yerkürenin manyetik S kutbu (jeolojik N kutbu; kuzey), pusula iğnesini benzer şekilde yönledirir ve pusula iğnesinin manyetik N kutbu yerkürenin manyetik S kutbunu gösterir.

Pusula iğnesinin gerçekte kalıcı mıknatıstan yapılmış olduğunu hatırlayınız.

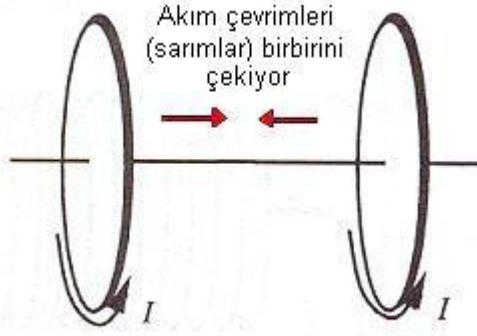
Akım Geçen İletkenler Arasındaki Kuvvet



Akımların aynı yönde olması halinde, iletkenler birbirini çeker. Zıtlık halinde itme vardır. Bu durum yükler arası çekime terstir: aynı cins yükler birbirini iter, zıt cinsler birbirini çeker (+ yükler, - yükleri çeker gibi).

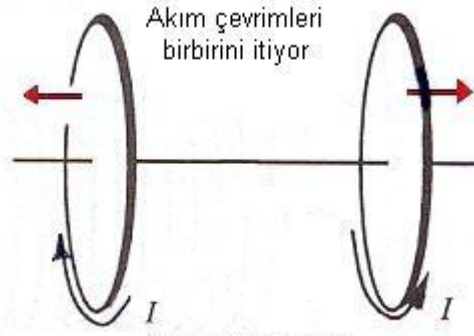
Önce iletkenlerden birine sağ el tirbuşon kuralını uygulayarak akımın oluşturacağı kutuplaşmayı belirleyip, daha sonra diğer iletkeni aynı kuralı uygulayarak oluşacak kutuplaşmaların itme ya da çekme yönünde etkileyeceğini gösterip, yukarıdaki durumu ispatlayınız.

Akım Çevrimleri Birbirini İter ya da Çeker



Her iki çevrimde de akım aynı yönde

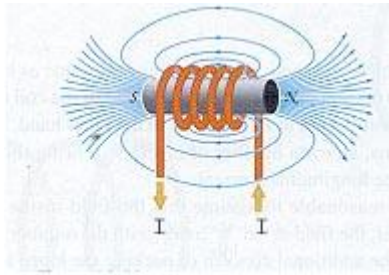
Akım çevrimleri manyetik dipol (ikili) oluşturuyor.



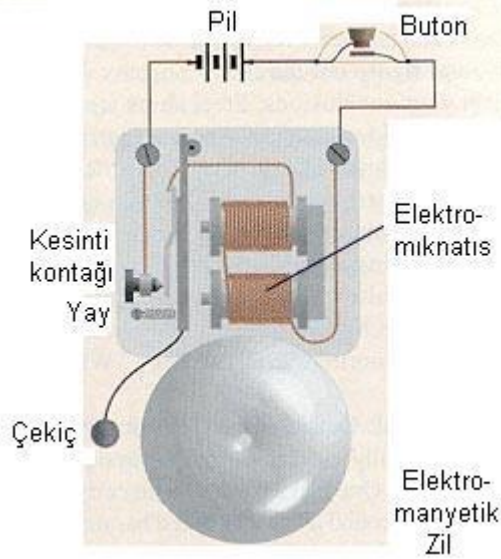
Akımlar zıt yönlü

Akım çevrimlerine ilişkin N ve S kutuplarını belirleyiniz.

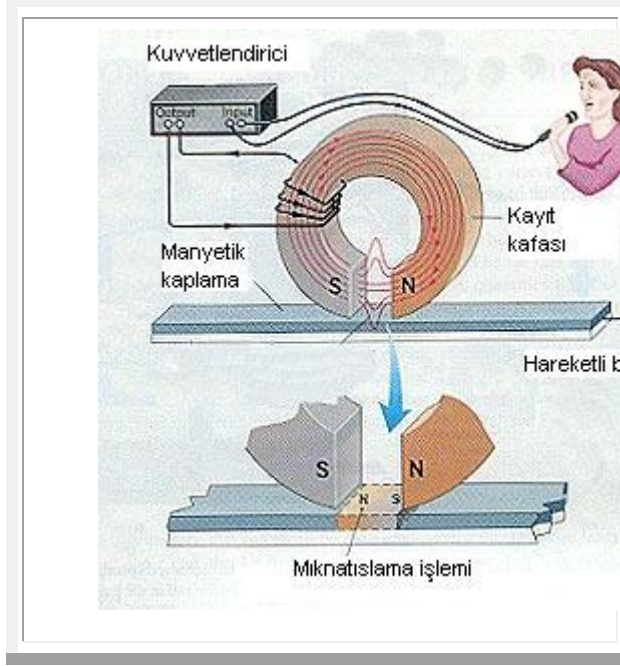
Elektromıknatıs ve Elektromanyetik Kapı Zili



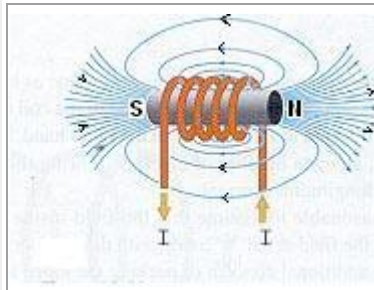
Elektrik akımının oluşturduğu manyetik akı bobin içerisindeki (akı yolu üzerinde) demirin manyetik dipollerini güçlü bir şekilde yönlendirir. Bu durum karşısında demir, elektrik akımı etkisi ile mıknatıslanmış olur. Bu oluşuma elektromıknatıs denir.



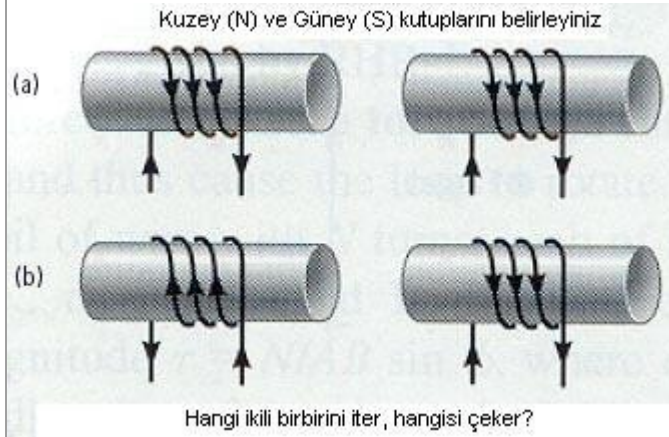
Manyetik Kayıt



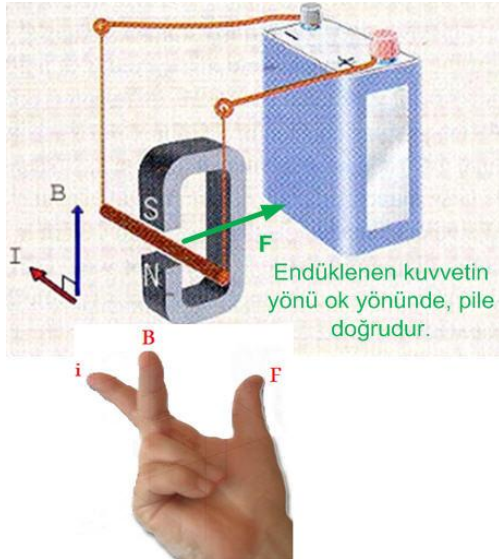
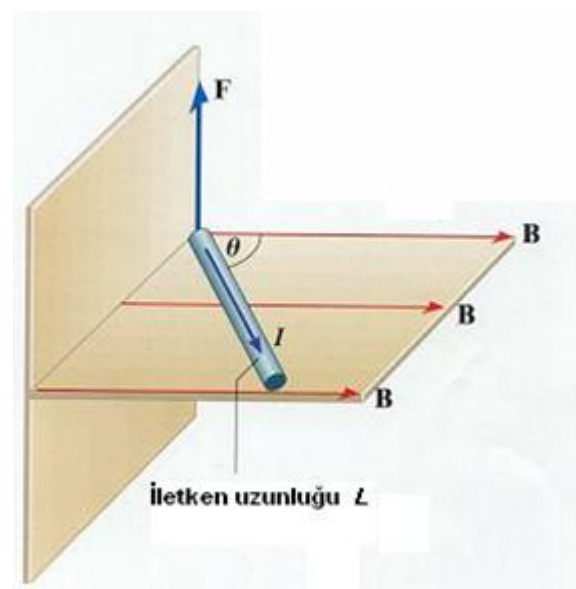
İtme ve Çekmenin Belirlenmesi



Akım geçen sarımların oluşturduğu manyetik alan, demir içerisindeki manyetik dipolleri yönlendirerek elektromıknatısı oluşturur.



Akım Geçen İletkene Etkiyen Manyetik Kuvvet



Lorentz kuvveti olarak bilinen bu kuvvet:

$$F = BIL \cdot \sin \theta$$

dir.

F: İletkene etkiyen manyetik kuvvet
[N: Newton]

B: Manyetik akı yoğunluğu [$\frac{Wb}{m^2} = T$]

Manyetik alan içerisinde, içinden akım geçen bir iletkene etkiyen manyetik kuvvetin yönü diğer bir sağ el kuralı ile bulunur.

Karıştırmayınız:

Önceden bahsedilen sağ el tirbuşon kuralı ile B'nin yönü (manyetik endüksiyon) belirlenir.

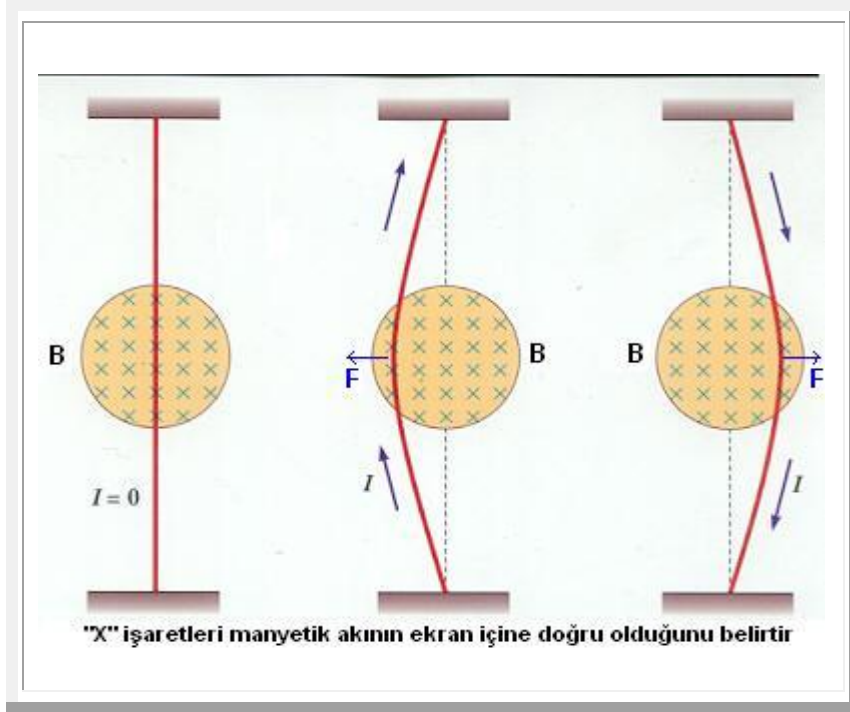
Kuvvet oluşumunda, iletkene dik olarak etkiyen akı esastır. Bu yüzden $\sin \theta$ çarpanı gelmektedir.

Buradan da anlaşılacağı üzere iletkenin akıya dik bileşeni önemlidir.

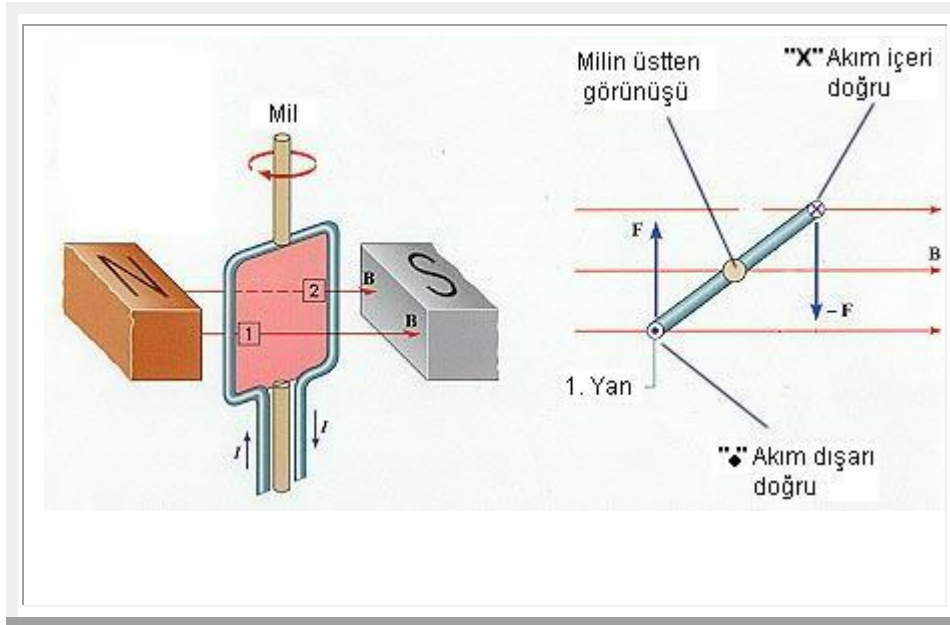
Soldaki örneğe sağ el 3 parmak kuralını uygulayarak iletkende endüklenen hareketin yönünü bulunuz:

$$F = BIL$$

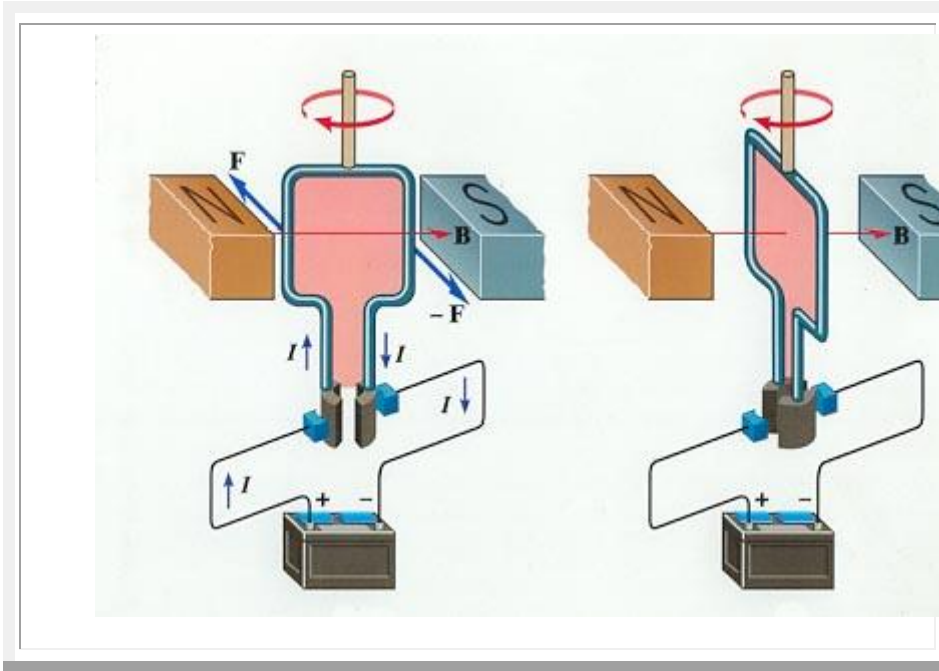
Sağ El 3 Parmak Kuralı ile Kuvvetin Yönünün Belirlenmesi



Manyetik Alan İçinde Bulunan Akım Çevrimine Etkiyen Moment



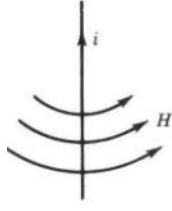
Doğru Akım (DA) Motorunun Prensibi



Magnetohidrodinami (MHD)



Yamato II

i - H bağıntısı

Öncelikle, bir sargıdan akan akım ile bu akımın oluşturduğu manyetik alan şiddeti (H) ile olan ilişkisini incelemek gerekir. Eğer bir iletkenin bir akım akıyorsa, etrafında bir manyetik alan meydana gelir (şekil 1.1.)

Amper Yasası

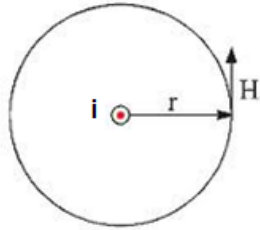
$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int \mathbf{J} d\mathbf{A} = \sum I = I_1 + I_2$$



Andre Marie Ampere

Kapalı bir çevre boyunca H manyetik alanının integrali, çevre içerisindeki toplam (Net) akımı verir.

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int \mathbf{J} d\mathbf{A} = \sum I = I_1 + I_2$$

Amper Yasası'nın Düz Bir İletkene Uygulanması

i akımını taşıyan bir iletkenin r kadar uzaktaki manyetik alan şiddeti (H) nedir?

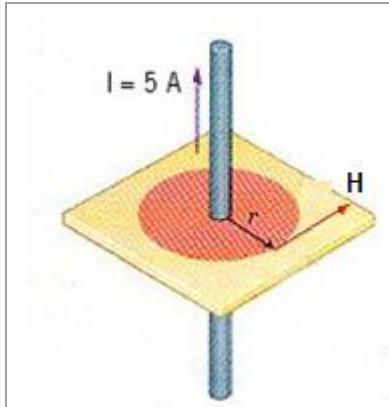
$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I = i$$

$$H 2\pi r = i$$

$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

Birimi [A/m] dir.

Soru



$r = 0.04 \text{ m}$ mesafedeki H 'i siz hesaplayınız

B-H ilişkisi

Nerede oluşturulmuş olursa olsun, manyetik alan şiddeti H [A/m; At/m]; bir manyetik akı ϕ [Wb: Weber] ve manyetik akı yoğunluğu B [Wb/m²: T: Tesla] oluşturur. Bu iki kavram arasındaki bağıntı ise aşağıdaki şekildedir:

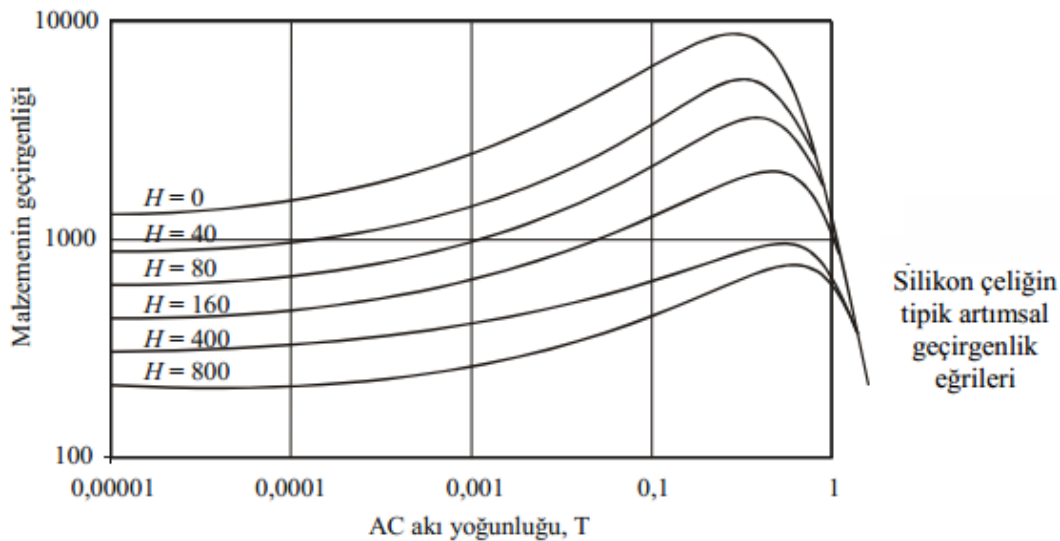
$$B = \mu \cdot H$$

Burada μ permeabilite olup (manyetik geçirgenlik) birimi [H/m] 'dir (H: Henry).

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

μ_0 =Boşluğun permeabilitesi olup $4\pi 10^{-7}$ [H/m];

μ_r ise ortamın boşluğa göre rölatif permeabilitesidir ve birimsizdir. Ferromanyetik malzemelerdeki doyma özelliğinden dolayı μ_r değişken özellik gösterir. Elektrik makineleri B-H eğrisinin lineer kısmında (permeabilitenin kısmen sabit kaldığı aralıkta) çalışacak şekilde tasarlanır.



Mıknatıslanma ve Manyetik Malzemeler

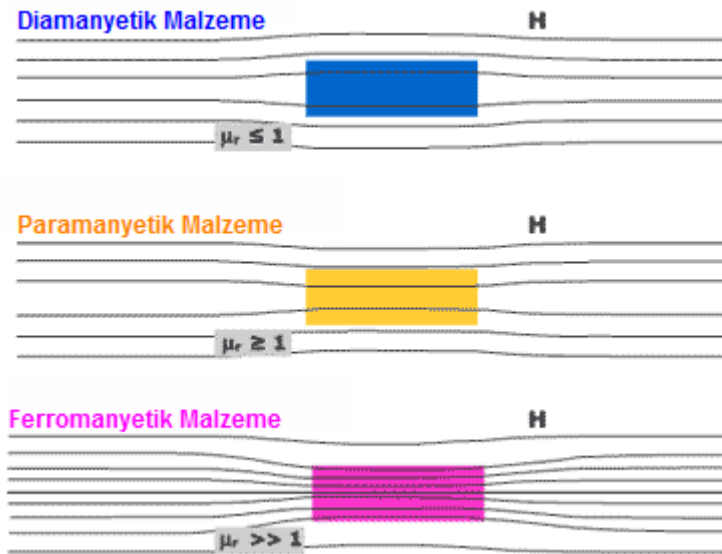
Mıknatıslanma, malzemelerin uygulanan manyetik alana (H) cevap verme özelliğidir. Sabit mıknatıslar, ferromanyetizmadan kaynaklanan kalıcı manyetik akı oluşturlar. Bu halk arasında yaygın bilinen en güçlü mıknatıslanma türüdür. Aslında, her malzeme manyetik alandan farklı bir şekilde etkilenir. Hatta bazı malzemeler manyetik alan tarafından çekilirken (ferromanyetik malzemeler), bazı malzemeler de itilir (diamanyetik malzemeler). Manyetik alandan ihmal edilir ölçüde etkilenen malzemeler manyetik olmayan malzemeler olarak adlandırılır. Malzemelerin manyetik durumu; sıcaklık, basınç (maddenin halleri) ve uygulanan manyetik alanın şiddeti ile değişebilmektedir.

Diamanyetik özellik tüm malzemelerde uygun şartlar oluştuğunda dış bir manyetik alan altında gözükür ve seyrektr. Normal şartlarda zayıf etkisi vardır. Bizmut (Bi) ve Antimon (Sb) diamanyetik malzemelere örnektir. Diamanyetik malzemelerin rölatif permeabilitesi 1'den küçüktür. Süperiletkenler ideal diamanyetik malzemelerdir ($\mu_r = 0$).

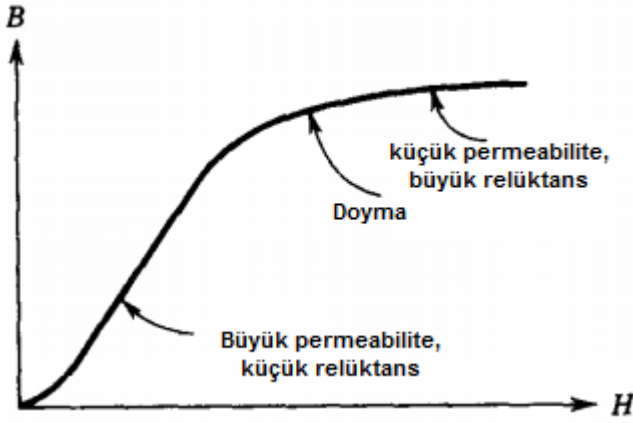
Paramanyetik malzemeler yine bu davranışını dış manyetik alan altında gösterir. Üzerlerinde kalıcı mıknatıslanma oluşmaz. Fakat dış manyetik alan altında hafifçe çekilirler. Molibden (Mo), Lityum (Li) ve Tantal (Ta) paramanyetik malzemelere örnek olarak verilebilir. Paramanyetik malzemelerin rölatif permeabilitesi 1 den biraz büyüktür ($\mu_r > 1$).

Manyetik malzeme olarak bilinen malzemeler ferromanyetik malzemelerdir. Bu malzemelerde permeabilite 1 den çok büyüktür ($\mu_r \gg 1$). Bilinen ferromanyetik malzemelerde rölatif permeabilite 100 (çelik) ile 1000000 (Metglas) arasındadır. Elektrik makinelerinde yaygın kullanılan manyetik malzemelerde permeabilite 3000-8000 arasındadır. Ferromanyetik malzemeler doyumludur.

Aşağıdaki şekilde farklı karakterli malzemelerin manyetik alana cevapları gözükmemektedir.

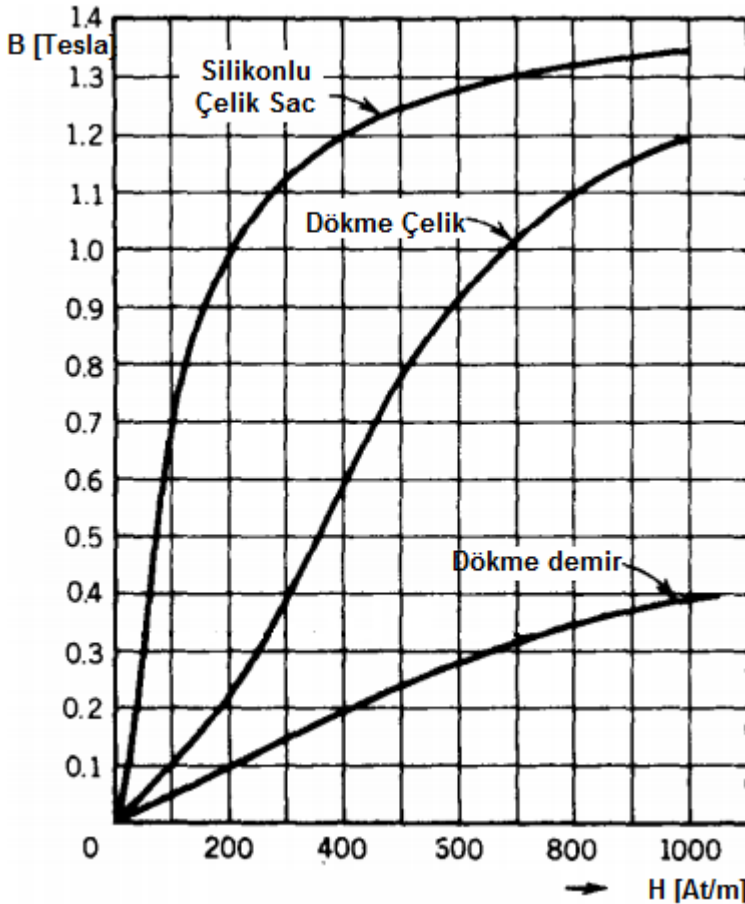


MIKNATISLANMA EĞRİSİ



Manyetik alan (H) artış yönünde değiştirilerek, arttırılırsa akı yoğunluğunun doyma noktasına kadar yaklaşık olarak lineer arttığı ve doyma noktasından sonra akı yoğunluğunun daha artmadığı görülmektedir. $B = \mu \cdot H$ bünye ilişkisindeki μ permeabilitenin ve dolayısı ile \mathcal{R} relüktansında doymaya (B ye) göre değiştiği

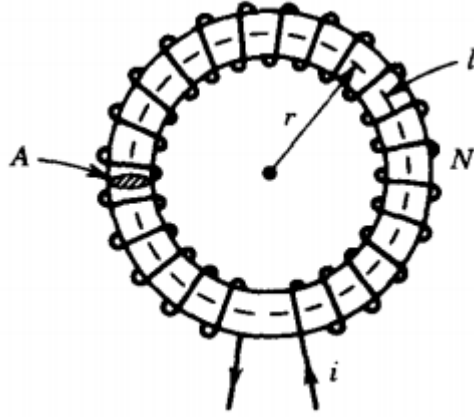
görülmektedir.



Yandaki şekilde üç farklı manyetik çekirdeğin (döküm demir, döküm çelik ve silikonlu çelik sac) B-H karakteristikleri görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere, belli bir B akı yoğunluğunu oluşturmak için, farklı malzemeler için gerekli H_a alanı (akım, MMK) değerleri de farklıdır.

Büyük B değeri veren malzemelerin kullanılması halinde makine boyutlarının küçüleceğini görmeye çalışınız.

Manyetik Eşdeğer Devre



Yanda halka şeklinde manyetik çekirdeği olan basit bir manyetik devre görülmektedir. Bu yapı toroid çekirdek olarak adlandırılır. Toroid çekirdek üzerine N sarımlı bir bobin sarılmış olup, bobinden i akımı geçmektedir. Toroid yapıda bobinin ürettiği manyetik akının hemen hemen tamamı çekirdek içerisinde kalır, toroidin dışındaki kaçak akı ihmal edilebilir düzeydedir. r yarıçapı (ortalama akı yolu) üzerindeki manyetik alan şiddeti H ise, Amper yasasından hareket

ederek,

$$\oint H dl = Ni$$

$$Hl = Ni$$

$$H2\pi r = Ni$$

Olur. Burada Ni büyüklüğüne manyetomotor kuvvet (MMK) denir; birimi [At/m] (AmperxSarımlı/metre) olup F ile gösterilir. $l = 2\pi r$ ise ortalama manyetik yoldur.

$$F = Ni \quad [At/m]$$

$$H = \frac{Ni}{l} = \frac{F}{l}$$

$$B = \mu \cdot H \text{ olduğundan } B = \mu \cdot \frac{Ni}{l} \quad [T]$$

elde edilir. Toroidin kaçığının olmadığını kabul edersek, toroidin kesitindeki manyetik akı (Gauss Yasasından);

$$\phi = \int B dA$$

B nin kesit üzerinde homojen dağıldığı varsayılırsa;

$$\phi = BA \quad [Wb]$$

bulunur. Burada A manyetik akıya dik kesittir [m^2].

$$\phi = BA = \mu \cdot \frac{Ni}{l} \cdot A = \frac{Ni}{l/\mu A} = \frac{F}{\mathcal{R}}$$

elde edilir.

Burada \mathcal{R} manyetik yolun relüktansıdır. Relüktansın tersine de \wp permeans denir:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{1}{\wp}$$

Son ifadeler içerisinde manyetik devreler için Ohm Yasasını görmek mümkündür:

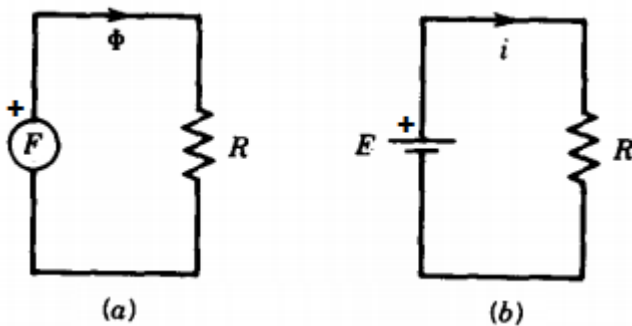
$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

Bilindiği üzere elektrik devrelerinde işi yapan şey elektronlar; elektrik akımıdır. İne elektrik devresinden akım akmasını sağlayan şey; üretilmiş bir gerilimdir (EMK). Diğer taraftan elektrik akımına karşı gösterilen güçlük ise dirençtir.

Benzerlik kurmaya çalışırsak; manyetik devrelerde de işi yapan şey manyetik akıdır. Benzerliklerin devamı için aşağıdaki tabloyu inceleyiniz.

Parametre	Elektrik Devresi	Manyetik Devre
Sürücü kuvvet (uç değişken)	EMK (E) [V]	MMK (\mathcal{F}) [At/m]
Oluşan büyüklük (iç değişken)	Akım (I) [A]	Akı (ϕ) [Wb]
Sınırlayıcı etki	Direnç (R) [Ω]	Relüktans (\mathcal{R}) [1/H]
Ohm Yasası	$i = \frac{E}{R}$	$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$
Sınırlayıcı etkinin oluşumu	$R = \frac{l}{\chi q}$ l uzunluğundaki bir telin direnci	$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}$ l uzunluğundaki bir manyetik yolun relüktansı
Ortamın özelliği	χ özgül iletkenlik [m/($\Omega \cdot mm^2$)]	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ Permeabilite [H/m]
Ortamın kesidi	q [mm^2]	A [m^2] akıya dik kesit

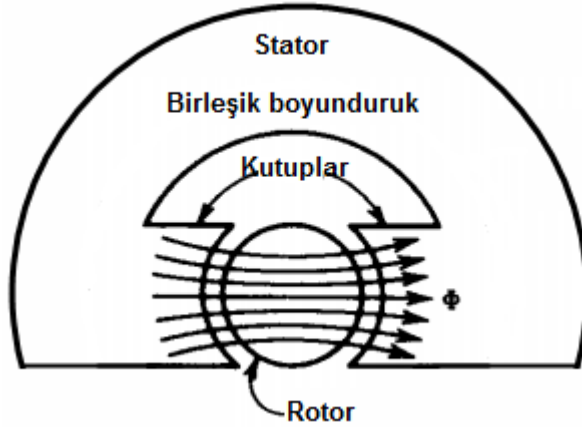
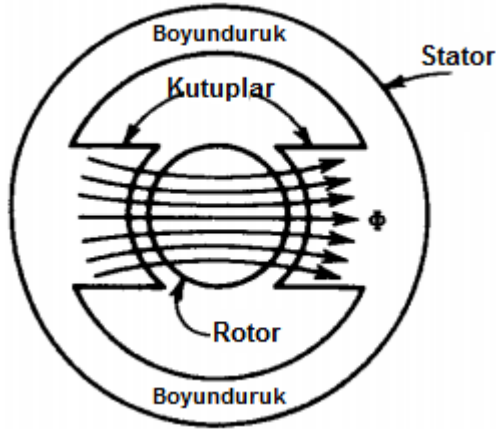
Buraya kadar elde edilen benzerlikler ile, yukarıdaki toroid yapıli manyetik devre aşağıdaki elektrik devresine benzetilebilir. Burada bir çeşit değişken dönüşümü yapılmıştır. Bu sayede artık, manyetik devrelerin çözümünde, elektrik devreleri konusundaki bilgi birikimimizi kullanabilir hale geliriz.



Şekil: Benzerlikler (a) Manyetik devre (b) Elektrik devresi

Hava Aralıklı Manyetik Devre

Hareketli elektrik makinelerinde stator (duran kısım) ile rotor (döner hareket yapan kısım) arasında hava boşluğu vardır. Bu hareket serbestisi için gereklidir. Bilindiği üzere hava boşluğunda permeabilite μ_0 'dır ve demir çekirdeğe göre $100-10^5$ kat kötü bir geçirgenliğe sahiptir. Hava aralığının manyetik geçirgenliği kötü olmakla beraber doyumlu değildir, oysa demir çekirdek doyumludur. Bu durum, hele hele karmaşık geometrik yapıların bulunması halinde, kompozit olarak varsayabileceğimiz bu hava aralıklı yapıda demir çekirdeğin farklı noktalarında farklı B değerlerinin veya doymaların olabileceği sonucunu getirir.



Yukarıdaki manyetik devreyi modellemeye çalışalım. Kutuptan geçen akı, bağlı bulunduğu iki boyunduruk parçasından eş olarak gelir. Kolaylık açısından iki boyunduğu üst üste koyduğumuzu varsayarsak yandaki yapıyı elde ederiz.



Amacımız kolay-temsili bir eşdeğer devre elde etmek olduğundan, ortalama akı yolunu koruyup yaklaşıkıklar yaparak şekilde yapı ve eşdeğer devreyi elde edebilir.

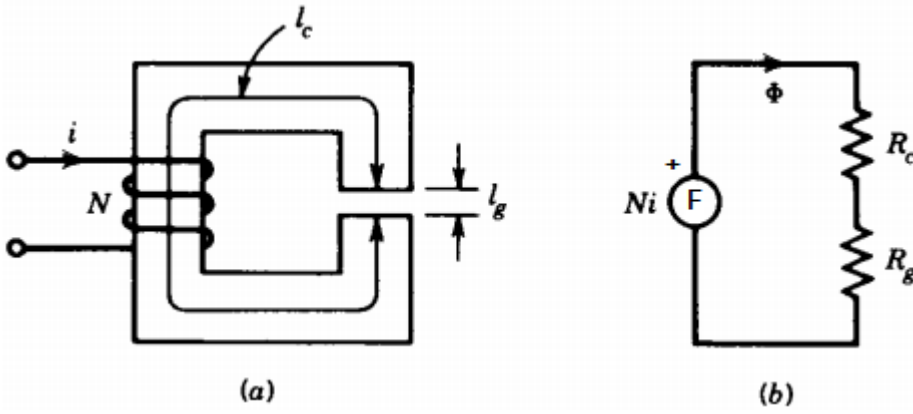
Bu sadeleştirme karşımıza toplam demir yol ve toplam hava boşluğu olarak iki farklı ortamı getirir. Şimdi ilgili parametreleri hesaplayarak

manyetik eşdeğer devreyi elde edebiliriz:

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} ; \quad \mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

$$\phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g} ; \quad \mathcal{F} = Ni = H_c l_c + H_g l_g$$

Burada, soldaki eşitlik Ohm Yasası, sağdakinin de Kirchhoff'un Gerilimler Yasası olduğuna dikkat ediniz.

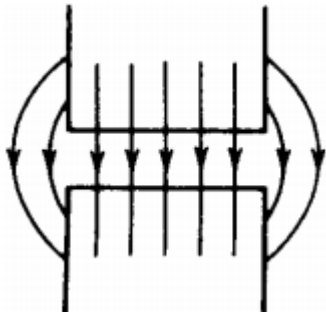


Şekil: Kompozit yapı. (a) Hava aralıklı manyetik çekirdek. (b) Manyetik eşdeğer devre.

Burada; l_c demirin ortalama akı yolu, l_g hava aralığının uzunluğudur.

Bu devrede akı yoğunlukları;

$$B_c = \frac{\phi_c}{A_c} ; B_g = \frac{\phi_g}{A_g}$$

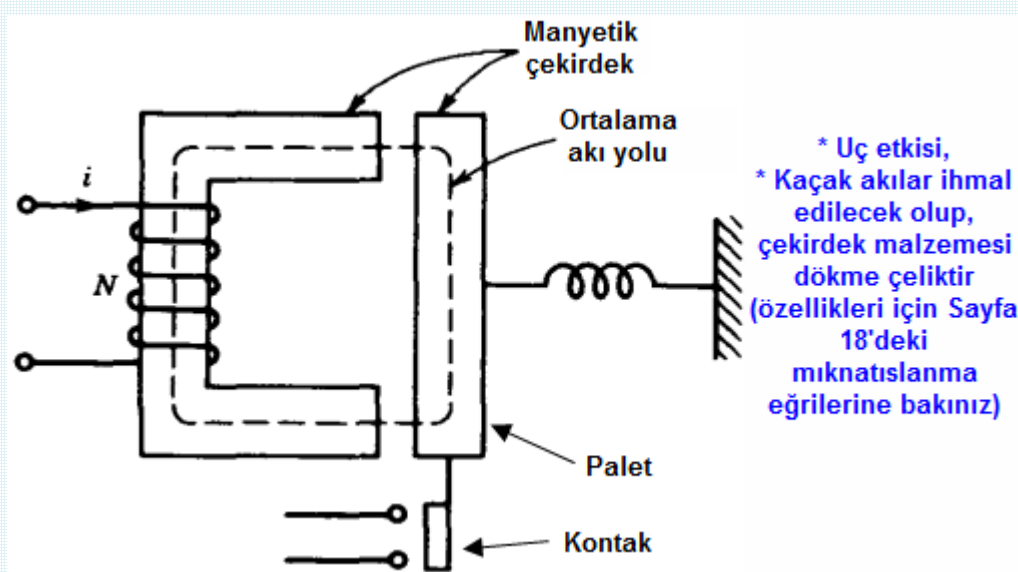


Hava aralığından akılar yüzeye dik çıkar. Bu durum bazı saçaklanmalara neden olur. Buna uç etkisi denir. Uç etkisi hava aralığı kesidinin artması ile artar. Küçük hava aralıklarında ise bu etki ihmal edilebilir düzeydedir. Dersimiz kapsamında uç etkisini ihmal edeceğiz. Böyle bir durumda:

$$A_g = A_c ; B_g = B_c = \frac{\phi}{A_c}$$

elde edilir.

Örnek: Şekilde basit bir rölenin manyetik devresi görülmektedir. Bobinde $N=500$ sarım olup, ortalama çekirdek uzunluğu $l_c = 360 \text{ mm}$ dir. Hava aralığının her biri 1.5 mm dir. Röleyi aktive etmek için 0.8 Tesla 'lık akı yoğunluğuna ihtiyaç vardır. Çekirdek ise döküm çeliktir.



- (a) Bobin akımı? (b) Çekirdeğin permeabilitesi ve rölatif permeabilitesi nedir?
(c) Hava aralığı $= 0$ ise, bobin akımı $0,8 \text{ T}$ akı yoğunluğu için ne olur?

Çözüm:

(a) Sayfa 18'deki B-H eğrisinden döküm çelik için 0.8 T yi sağlayacak H_c değeri okunur;

$$B_c = 0.8 T \quad ; \quad H_c = 510 [At/m]$$

$$mmk \quad \mathcal{F}_c = H_c l_c = 510 \cdot 0.36 At$$

Hava aralığı için;

$$mmk \quad \mathcal{F}_g = H_g \cdot 2 \cdot l_g = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot 2 \cdot l_g = \frac{0.8}{4\pi 10^{-7}} \cdot 2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} = 1910 At$$

Sistemi bu çalışma noktasında sürebilmek için gerekli toplam mmk;

$$\mathcal{F} = Ni = \mathcal{F}_c + \mathcal{F}_g = 184 + 1910 = 2094 At$$

gerekli akım;

$$\mathcal{F} = Ni \quad ; \quad i = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{2094}{500} = 4.19 A$$

Hesaplamalardan görüleceği üzere; manyetik çekirdek akı yolu $l_c = 360 mm$ toplam hava aralığı olan $2 \cdot l_g = 3 mm$ yanında çok daha uzun olmasına rağmen, **mmk'nın çoğu** havayı mıknatıslamada kullanılır.

(b) Çekirdeğin permeabilitesi;

$$\mu_c = \frac{B_c}{H_c} = \frac{0.8}{510} = 1.57 \cdot 10^{-3} H/m$$

Çekirdeğin rölatif permeabilitesi;

$$\mu_r = \frac{\mu_c}{\mu_0} = \frac{1.57 \cdot 10^{-3}}{4\pi 10^{-7}} = 1250$$

(c)

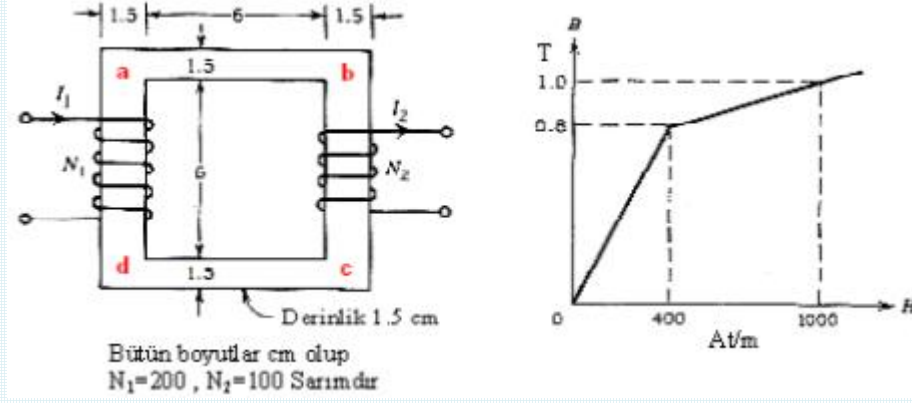
$$\mathcal{F} = H_c \cdot l_c = 510 \cdot 0.36 = 184 At$$

$$i = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{184}{500} = 0.368 A$$

Dikkat edilirse, hava aralığının olmadığı durumda, manyetik çekirdekte aynı akı yoğunluğunu elde etmek için çok daha küçük uyarma akımına ihtiyaç duyulmaktadır.

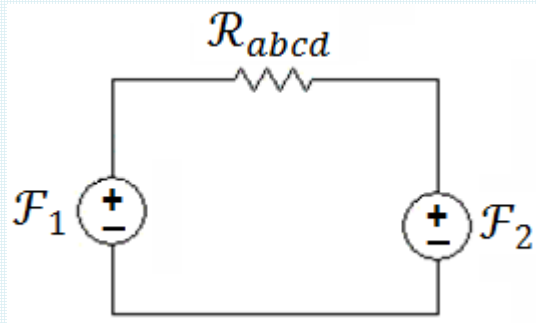
Örnek: Bir doyumlu reaktöre ilişkin manyetik devre aşağıdaki şekilde verilmiştir. Çekirdek malzemesi için B-H eğrisi iki doğru parçası şeklinde verilmiştir.

$I_1=2A$ olması halinde, bacaklarda $0.6T$ 'lık akı yoğunluğu oluşturmak için gerekli I_2 akımı değerini belirleyiniz (*Kaçak akıları ihmal ediniz*).



Çözüm:

Devrenin elektrik eşdeğerini çizerek aşağıdaki gibi olur (*sağ el tirbuşon kuralını kullanarak \mathcal{F}_1 ve \mathcal{F}_2 MMK kaynaklarının yönlerini dikkatle bulunuz*):



$$\mathcal{F}_1 = N_1 \cdot I_1 = 200 \cdot 2 = 400 \text{ At}$$

$$\mathcal{F}_2 = N_2 \cdot I_2 = 100 \cdot I_2 \text{ At}$$

$$l_{abcd} = 4 \cdot \left(\frac{1.5}{2} + 6 + \frac{1.5}{2} \right) = 30 \text{ cm} = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

0.6 T 'lık akı yoğunluğu için, önce mıknatıslanma (B-H) eğrisinin $0-0.8 \text{ T}$ aralığındaki eğimden permeabilite bulunmalıdır:

$$\mu_c = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{B_{son} - B_{ilk}}{H_{son} - H_{ilk}} = \frac{0.8 - 0}{400 - 0} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}$$

$$A = 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} = 2.25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\mathcal{R}_{abcd} = \frac{l_{abcd}}{\mu_c \cdot A} = \frac{30 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2.25 \cdot 10^{-4}} = 6.66 \cdot 10^5 \text{ 1/H}$$

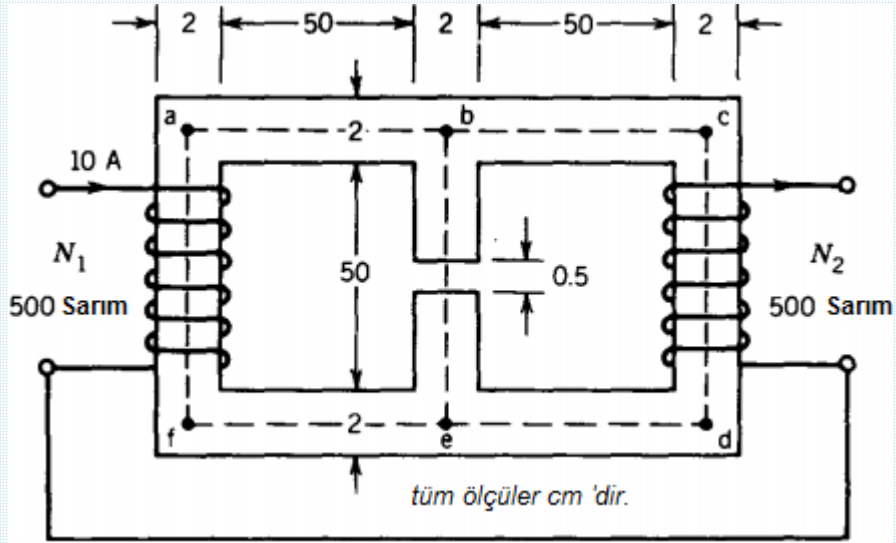
$$\phi = B \cdot A = 0.6 \cdot 2.25 \cdot 10^{-4} = 1.35 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2 = \mathcal{R}_{abcd} \cdot \phi ; \quad 400 - 100 \cdot I_2 = 6.66 \cdot 10^5 \cdot 1.35 \cdot 10^{-4} = 89.91$$

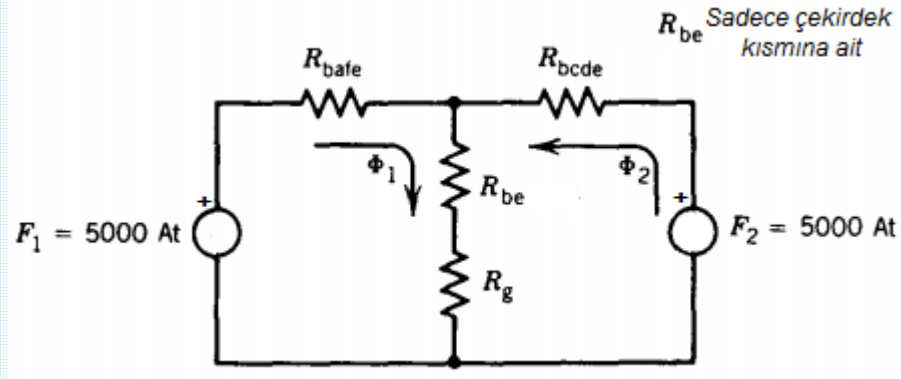
$$-100 \cdot I_2 = 89.91 - 400 ; \quad I_2 = \frac{-310.09}{-100} = 0.31 \text{ A}$$

Örnek:

Şekildeki manyetik devrede, ferromanyetik malzemenin bağıl geçirgenliği (permeabilitesi) 1200'dür. Kaçak akılar ve uç etkileri ihmal edilmektedir. Şekildeki uzunluklar (cm) cinsinden olup, manyetik malzemenin kesiti karedir. Hava aralığı akısı, hava aralığı akı yoğunluğu ve hava aralığındaki manyetik alan şiddetini bulunuz.

**Çözüm:**

Öncelikle ortalama manyetik yolu dikkate alıp orta noktalara a, b, c,... gibi etiketler koyalım. Sonrasında, manyetik devreye eşdeğer elektrik devresini aşağıdaki gibi oluşturalım (*MMK kaynaklarının polaritelerine dikkat ediniz*).



$$\mathcal{F}_1 = N_1 \cdot I_1 = 500 \cdot 10 = 5000 \text{ At}$$

$$\mathcal{F}_2 = N_2 \cdot I_2 = 500 \cdot 10 = 5000 \text{ At}$$

$$\mu_c = 1200 \cdot \mu_0 = 1200 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\mathcal{R}_{bafe} = \frac{l_{bafe}}{\mu_c \cdot A_c} = \frac{3 \cdot (52 \cdot 10^{-2})}{1200 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 2.58 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{H}} \text{ veya } \frac{\text{At}}{\text{Wb}}$$

Çekirdek simetrisinden;

$$\mathcal{R}_{bcde} = \mathcal{R}_{bafe}$$

Hava aralığının relüktansı;

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_g} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 9.94 \cdot 10^6 \frac{\text{At}}{\text{Wb}}$$

Orta kolun relüktansı (hava aralığı hariç)

$$\mathcal{R}_{be} = \frac{l_{be}}{\mu_c \cdot A_c} = \frac{51.5 \cdot 10^{-2}}{1200 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 0.82 \cdot 10^6 \frac{At}{Wb}$$

Eşdeğer devredeki çevre denklemleri;

$$\phi_1(\mathcal{R}_{bafe} + \mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) + \phi_2(\mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) = \mathcal{F}_1$$

$$\phi_1(\mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) + \phi_2(\mathcal{R}_{bcde} + \mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) = \mathcal{F}_2$$

Değerler yerine konursa;

$$\phi_1(13.34 \cdot 10^6) + \phi_2(10.76 \cdot 10^6) = 5000$$

$$\phi_1(10.76 \cdot 10^6) + \phi_2(13.34 \cdot 10^6) = 5000$$

Buradan (aslında simetrik geometrik ve elektriksel yapıdan dolayı daha en baştan görülebilir);

$$\phi_1 = \phi_2 = 2.067 \cdot 10^{-4} Wb$$

Hava aralığı akısı ise, Kirchoff Yasasından;

$$\phi_g = \phi_1 + \phi_2 = 4.134 \cdot 10^{-4} Wb$$

Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu;

$$B_g = \frac{\phi_g}{A_g} = \frac{4.134 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-4}} = 1.034 T$$

Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti;

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.034}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0.822 \cdot 10^6 \frac{At}{m}$$

Olarak elde edilir.

Kaynaklar

- [1] Mergen, A. Faik; Zorlu, Sibel, 'Elektrik Makineleri 1 - Transformatörler', Birsen Yayınevi, 2005, İstanbul
- [2] Sen, P.C., 'Principles of Electric Machines and Power Electronics', John-Wiley & Sons, 1989.
- [3] Osman Gürdal, "Elektrik Makinalarının Tasarımı", Nobel Atlas Yayınevi, 2001
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetism#Paramagnetism>, <http://en.wikipedia.org/wiki/Diamagnetism>, [http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism)) Eylül 2012
- [5] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/MagneticMatls.htm> , Eylül 2012