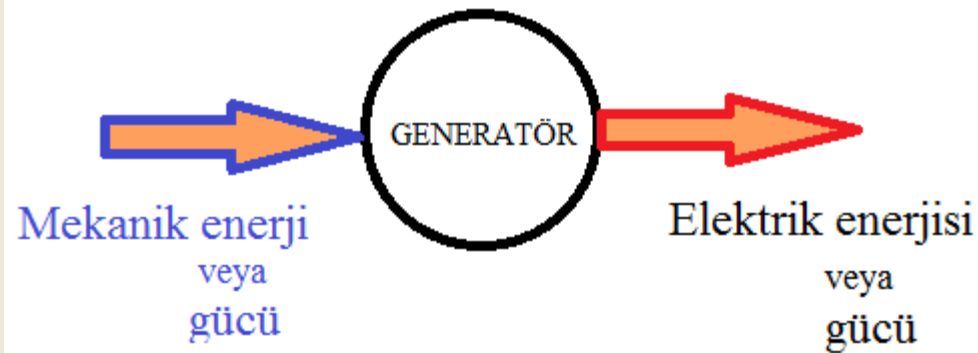
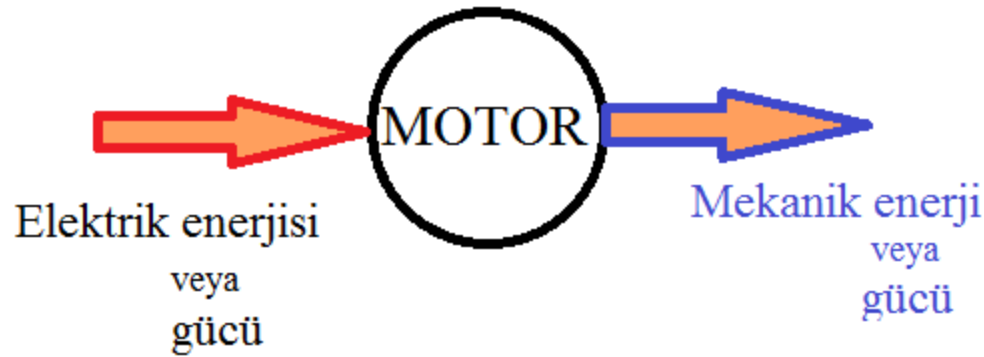


1. Bölüm: Makina İlkelerine Giriş

Doç. Dr. Ersan KABALCI

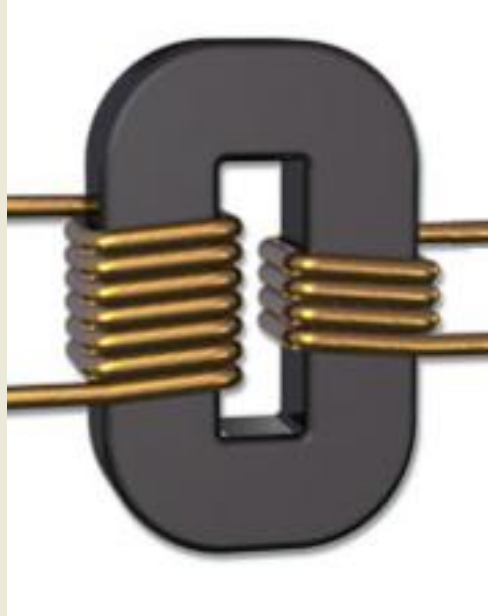
Makine İlkeleri

Elektrik Makinaları elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır.



Makine İlkeleri

Transformatörler, alternatif akımda gerilim veya akım seviyesini yükseltmek veya düşürmek için kullanılırlar.

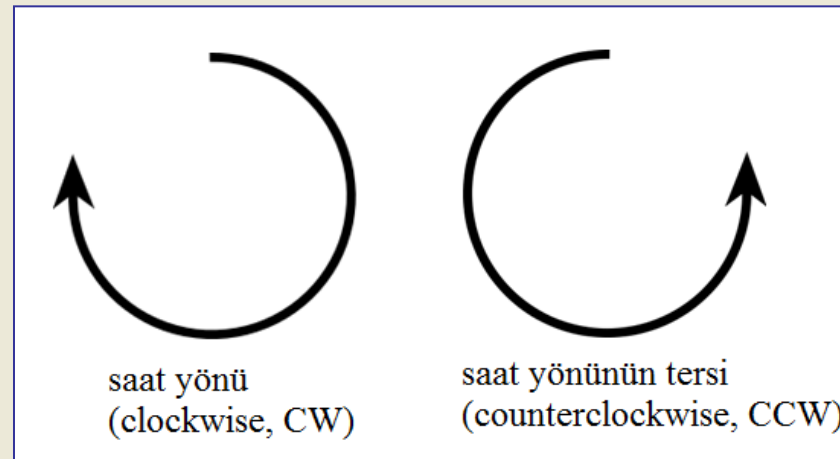


Transformatörler, manyetik devre yapısı bakımından motor ve generatörlere benzediklerinden bu makineler ile birlikte değerlendirilmektedirler.

Makine İlkeleri

1.1. Dairesel Hareketler

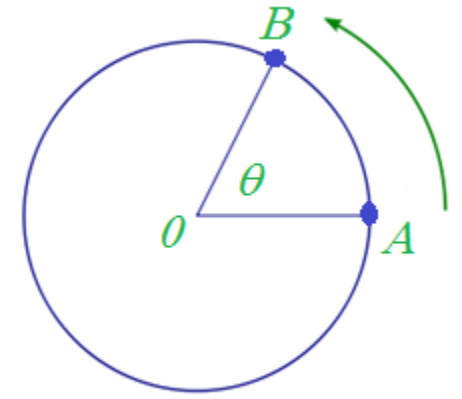
- Elektrik makinalarının büyük çoğunluğu bir eksen etrafında dönerler.
- Makinanın eksenine mil denir.
- Makinaların mil dönüş yönü saat yönü (CW) veya saat yönünün tersi (CCW) olarak ifade edilir.



Makine İlkeleri

1.1.1 Açısal Konum (Pozisyon) θ

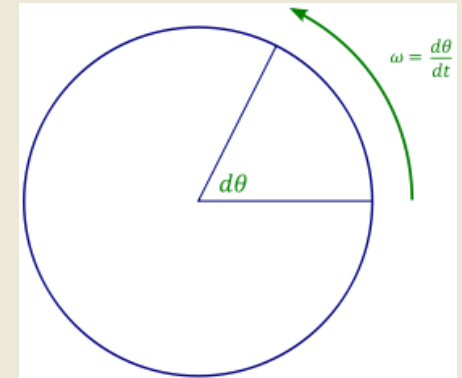
Bir nesnenin açısal konumu, nesnenin döndürölme açısıdır ve keyfi bir referans noktasına göre ölçölür. Açısal konum genellikle radyan veya derece olarak ölçölür, θ sembolöl ile gösterilir.



1.1.2 Açısal Hız ω

Açısal hız (veya devir sayısı) açısal konumun zamana göre değışim oranıdır.

Dönüş yönü saat yönünün aksine doğru ise, hareket pozitif olarak kabul edilmektedir.



$$\text{Açısal hız } \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\text{Doğrusal hız } v = \frac{dr}{dt}$$

Makine İlkeleri

Genel elektrik makinalarında **hız** terimi çok **sık** kullanılır.

Hız radyan/saniye (rad/s) veya devir/dakika (d/d) olarak verilir.

Hızla ilgili semboller:

ω_m açısal hız (radyan/saniye, rad/s)

f_m açısal hız (devir/saniye, d/s)

n_m açısal hız (devir/dakika, d/d)

Burada alt indis m mekanik büyüklükleri temsil etmektedir.

Mil (şaft) hızı ve açısal hız arasındaki ilişkiler:

$$n_m = 60 f_m \quad f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} \quad \omega_m = n_m \frac{2\pi}{60}$$

Makine İlkeleri

1.1.3 Açısal Hızlanma (İvme) α

- Açısal hızlanma, zamana göre açısal hızdaki değişim oranıdır.
- Açısal hızlanma sayısal olarak artıyorsa pozitif kabul edilir ve bir hat üzerindeki hızlanmanın dairesel (döner) benzeridir.
- Doğrusal hızlanma
- Açısal hızlanma

Açısal hızın birimi rad/s ise açısal hızlanmanın birimi rad/s^2 olur.

Makine İlkeleri

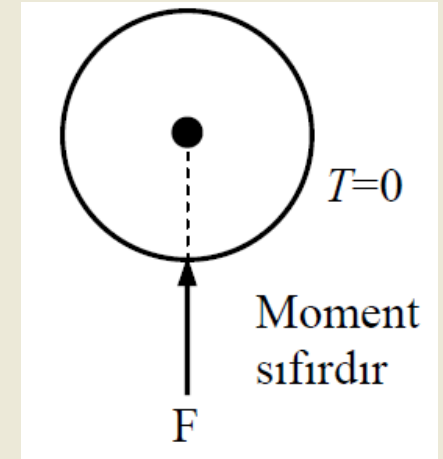
1.1.4 Moment T

- Doğrusal bir hareket halindeki bir nesneye uygulanan kuvvet nesnenin hızını değiştirmesine neden olur.
- Nesne üzerinde net bir kuvvetin bulunmaması nesnenin hızını değiştirmez.
- Nesne üzerine uygulanacak kuvvet büyük olursa, nesne hızında da büyük artış olur.
- Dönme hareketinde de benzer durumlar vardır. Bir nesne dönerken üzerine bir moment uygulanmazsa, açısal hızı sabittir.

Makine İlkeleri

- Dönen nesne üzerine büyük bir moment (döndürme kuvveti) uygulanırsa, nesnenin açısal hızı da büyük bir oranda artar.
- Bir nesne üzerindeki **döndürme kuvvetine moment** veya **tork** denir.

Eksenini etrafında serbestçe dönebilen bir silindire ekseninden geçecek dik bir kuvvet uygulanırsa, silindir dönmeyecektir.



Makine İlkeleri

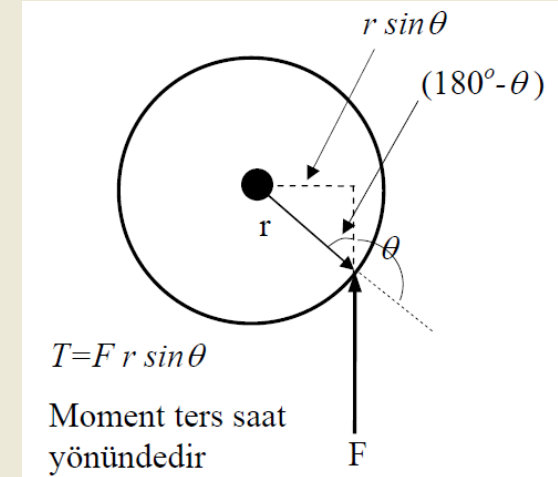
Kuvvet, silindir ekseninden kayık olarak silindirin sağ tarafından uygulanırsa, silindir ters saat yönünde dönecektir.

$$T = (\text{uygulanan kuvvet})(\text{dikine uzaklık})$$

$$T = (F)(r \sin \theta) \quad T = r F \sin \theta$$

Burada θ sembolü, \mathbf{F} ve \mathbf{r} vektörleri arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Uluslararası standard birimine (SI) göre momentin birimi newton-metredir (Nm).



Silindir üzerindeki moment veya döndürme kuvveti:

- (1) Uygulanan kuvvetin genliğine
- (2) Dönme eksenini ile kuvvet hattı arasındaki mesafeye bağlıdır.

Makine İlkeleri

1.1.5 Newton Kanunu

Düz bir hat boyunca hareket eden nesne için Newton Kanunu, nesneye uygulanan kuvvet ve sonucunda meydana gelen hareket arasındaki ilişkiyi tanımlar.

$$F = ma$$

veya hızlanma

$$a = \frac{F}{m}$$

F nesneye uygulanan net kuvvet (N)

m nesnenin kütlesi (kg)

a oluşan hızlanma (m/s^2)

Benzer bir denklem, nesneye uygulanan moment ile sonucunda meydana gelen açısal hızlanma arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu ilişkiye dönme hareketi için Newton Kanunu denir :

$$T = J\alpha$$

T nesneye uygulanan moment (Nm)

J atalet momenti (kg.m^2)

α oluşan hızlanma (m/s^2)

Makine İlkeleri

1.1.6 İş W

Doğrusal bir hareket için iş, bir mesafe boyunca uygulanan bir kuvvet olarak tanımlanır. Matematiksel olarak iş ifadesi:

$$W = \int F dr$$

Burada, uygulanan kuvvet hareket ile aynı yöndedir. Bu durumda iş denklemi:

$$W = F r$$

SI sisteminde işin birimi joule'dur.

Döner bir harekette ise iş, bir açı boyunca uygulanan momenttir.

$$W = \int T d\theta$$

Eğer uygulanan moment sabit ise iş:

$$W = T\theta$$

Makine İlkeleri

1.1.7 Güç P

Güç, birim zamanda yapılan iştir ve denklemi:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Güç genellikle joule/saniye (watt) veya beygir gücü olarak ölçülür.

Sabit kuvvete göre
doğrusal hareket için güç:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(F r) = F \frac{dr}{dt}$$

$$P = F v$$

Sabit momente göre
döner hareket için güç:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(T \theta) = T \frac{d\theta}{dt}$$

$$P = T \omega$$

Makine İlkeleri

Elektrik makinaları konusunda yapılan çalışmalarda

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(T\theta) = T \frac{d\theta}{dt}$$

$$P = T\omega$$

denklemini çok önemlidir. Çünkü bu denklem, motor veya generatör miline bağlı mekanik gücü tanımlar.

Güç watt, moment newton-metre, hız radyan/saniye olarak ölçülürse/verilirse, bu denklem ile güç, moment ve hız arasındaki ilişki doğru olarak tanımlanmış olur.

Makine İlkeleri

PROBLEMLER

1. 3000 d/d ile dönen bir motorun açısal hızını rad/s olarak bulunuz?

ÇÖZÜM: $f_m = n_m/60 = 3000/60 = 50 \text{ d/s}$

$$\omega_m = 2\pi f_m = 2\pi 50 = 314.16 \text{ rad/s}$$

2. Bir motor 60 Nm yükü 1800 d/d hızla dönmektedir. Motor gücünü watt ve beygir gücü olarak bulunuz.

ÇÖZÜM:

$$P_1 = T \omega_m = T(n_m \cdot 2\pi/60) = 60(1800 \cdot 2\pi/60) = 11309.733 \text{ W}$$

$$P_2 = P_1/746 = 15.16 \text{ BG}$$

Makine İlkeleri

3. 2 kgm^2 atalet momentine sahip volan başlangıçta durmaktadır. Volana aniden 5 Nm değerinde bir moment saat ibresinin tersi yönde uygulanırsa, 5 s sonra volanın hızı ne olur?

ÇÖZÜM:

$$\omega = \alpha t = \left(\frac{T}{J} \right) t$$

$$\omega = \frac{5 \text{ N} \cdot \text{m}}{2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} (5 \text{ s}) = 12.5 \text{ rad/s}$$

$$n = (12.5 \text{ rad/s}) \left(\frac{1 \text{ devir}}{2\pi \text{ rad}} \right) \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ dakika}} \right) = 119.4 \text{ d/d}$$

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

- Manyetik alanlar, elektrik makinelerinde enerji dönüşümünü sağlayan temel mekanizmadır.
- Manyetik alanların elektrik makinelerinde kullanılması dört ana prensip ile açıklanır:
 1. Akım taşıyan bir tel etrafında bir manyetik alan üretilir.
 2. Zamanla değişen bir manyetik alan eğer bir sargıyı keserse, sargıda bir gerilim endüklenir. Bu olay *transformatör* prensibini açıklar.
 3. Akım taşıyan bir iletken manyetik alan içinde bulunursa, iletkeninde bir kuvvet üretilir. Bu olay *motor* prensibini açıklar.
 4. Manyetik alan içindeki bir iletken hareket ederse, üzerinde bir gerilim endüklenir. Bu olay *generatör* prensibini açıklar.

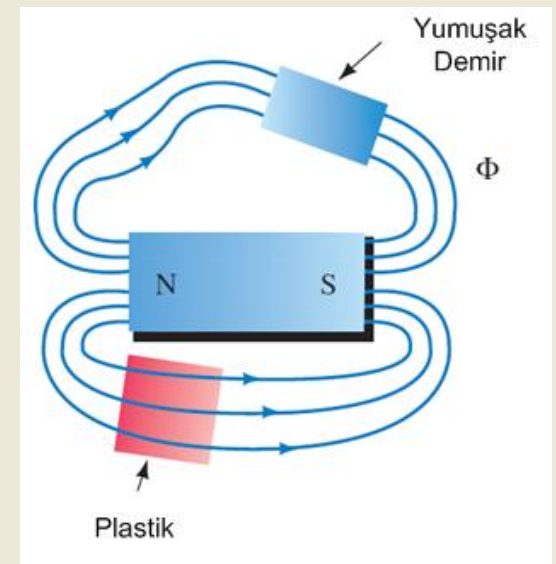
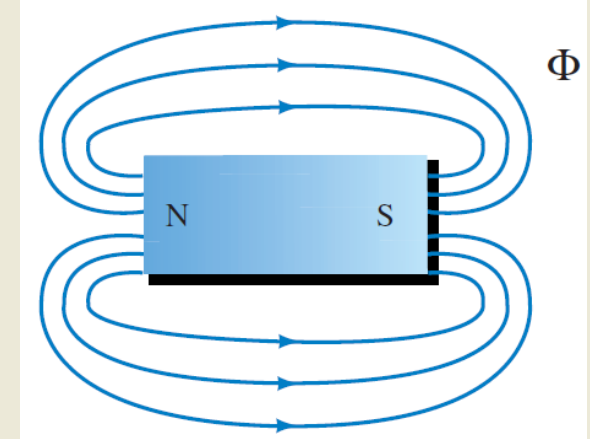
Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

- Manyetik alan kavramını daha iyi anlayabilmek için bir mıknatısı ele alalım.
- Bir mıknatıs demir gibi manyetik bir malzemeye yaklaştırıldığında, belirli bir mesafeden sonra demir parçasını kendisine doğru çektiği görülür.
- Bu durumda, demir parçasına bir kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvet **manyetik alan** olarak tanımlanır. Manyetik alanı göstermek için kullanılan çizgiler **kuvvet çizgisi** veya **akı** olarak tanımlanır.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.2.1 Manyetik Akı

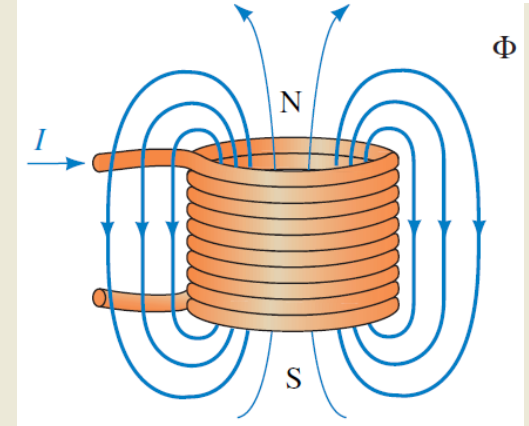
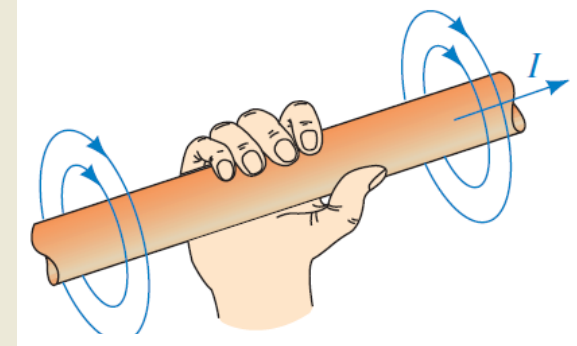
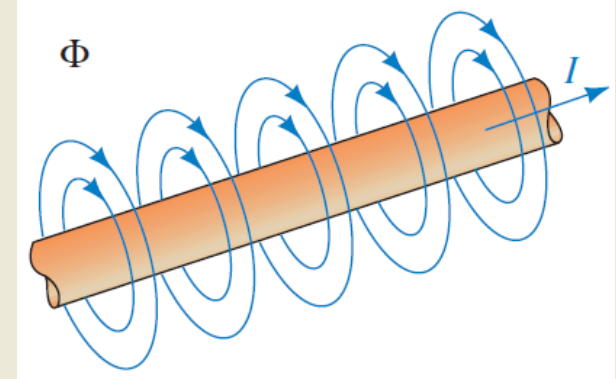
- Bir mıknatısta manyetik alan yönünü gösteren **kuvvet çizgileri manyetik akı** olarak tanımlanır ve F sembolü ile gösterilir, birimi **weber** dir.
- Manyetik akı yönü N kutbundan S kutbuna doğru olup kapalı bir devre oluşturur.
- Manyetik alandaki kuvvet çizgilerinin sayısı manyetik akının değerini verir.
- Manyetik akı yolunda demir gibi bir manyetik malzeme varsa, manyetik akı yolunu değiştirir. Plastik gibi manyetik olmayan bir malzeme varsa, yolunu değiştirmez.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.2.2 Elektromanyetik Alanın Üretilmesi

- İçinden akım geçen bir iletkenin etrafında bir manyetik alan meydana gelir.
- Oluşan manyetik alanın büyüklüğü geçen akım miktarına bağlıdır ve yönü sağ el kuralı ile bulunur.
- Eğer iletken bir bobin şeklinde sarılırsa, toplam manyetik alan her bir iletkenden geçen manyetik alanların toplamına eşit olur.



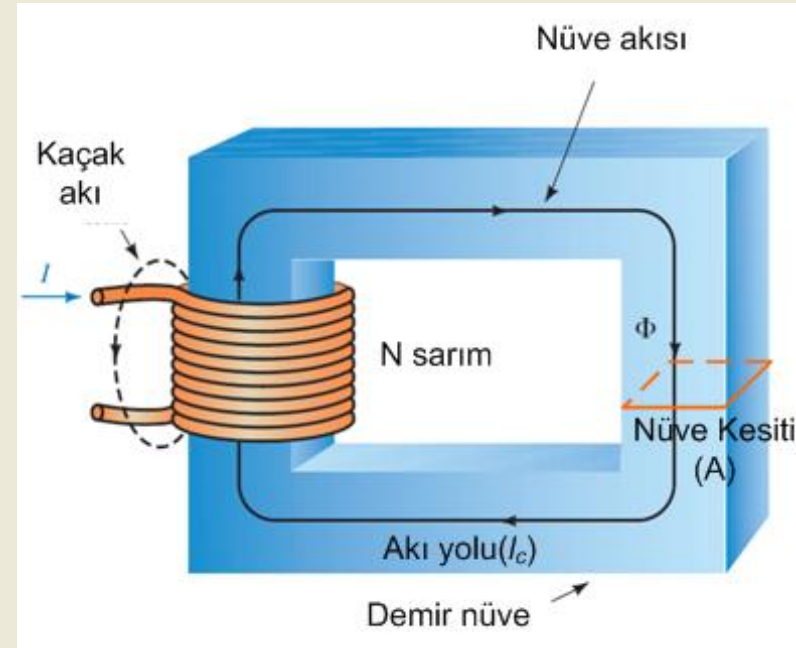
Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.2.2 Elektromanyetik Alanın Üretilmesi

- İletken bir manyetik nüve (çekirdek) üzerine sarılır ise, manyetik akı nüve üzerinden devresini tamamlar.
- Bir nüve etrafına sarılı sargıdan geçen akım tarafından manyetik alanın üretilmesini açıklayan temel kanun *Ampere Kanunu*'dur.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net}$$

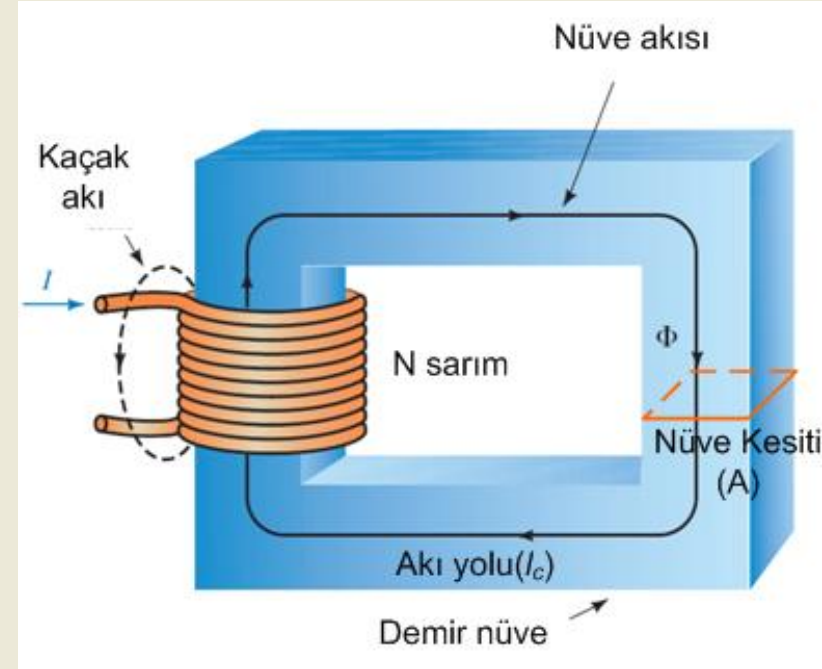
Burada \mathbf{H} manyetik alan şiddeti olup \mathbf{I}_{net} akımı tarafından üretilir. SI sisteminde \mathbf{I} amper (A) ve \mathbf{H} amper-tur/metre (At/m) olarak ölçülür. \mathbf{l} manyetik akı yolunun uzunluğudur ve birimi metredir.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.2.2 Elektromanyetik Alanın Üretilmesi

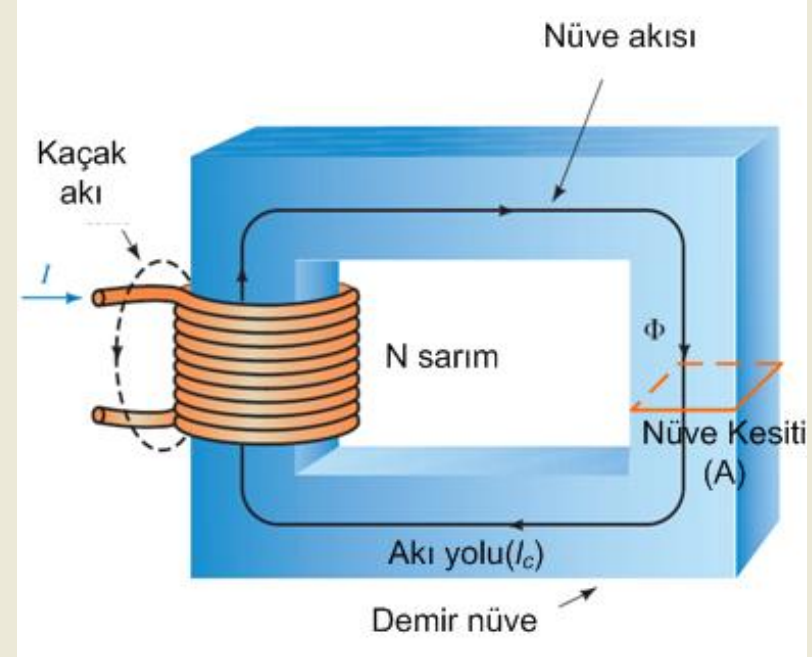
- Bu denklemin neyi ifade ettiğini daha iyi anlamak için bu denklemi örnek olarak yandaki şekilde verilen manyetik yapıya uygulamak daha yararlı olacaktır.
- Şekilde, dikdörtgen nüvenin bir kolu üzerine sarılı N sarımlı bir sargı bulunan manyetik yapı gösterilmektedir.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.2.2 Elektromanyetik Alanın Üretilmesi

- Çekirdek (nüve); demir veya ferromanyetik malzemeler olarak bilinen belirli diğer metallerin alaşımından yapılmış ise, akım tarafından üretilen bütün manyetik alanın nüve içerisinde kaldığı varsayılacaktır.
- Böylelikle, Ampere Kanunu'ndaki integralin yolu, nüvenin ortalama yol uzunluğu l_c olacaktır. Akım taşıyan sargı telleri integralin yolunu N defa keserler.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

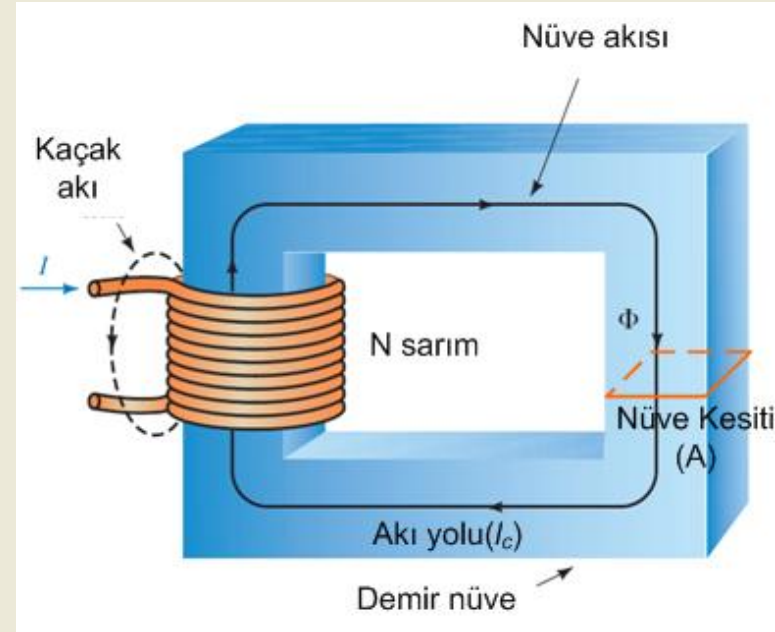
1.2.2 Elektromanyetik Alanın Üretilmesi

- Böylece integral alanı içinden geçen akım I_{net} , manyetik alan şiddeti ile manyetik alan yolu uzunluğunun çarpımına eşit olur.
- Bu tanımlamalardan sonra ampere kanunu:

$$H l_c = N i$$

Burada H , manyetik alan şiddeti vektörünün genliği, l_c nüvenin ortalama yol uzunluğudur. Uygulanan akım yüzünden nüve içinde üretilen manyetik alan şiddetinin genliği:

$$H = \frac{N i}{l_c}$$



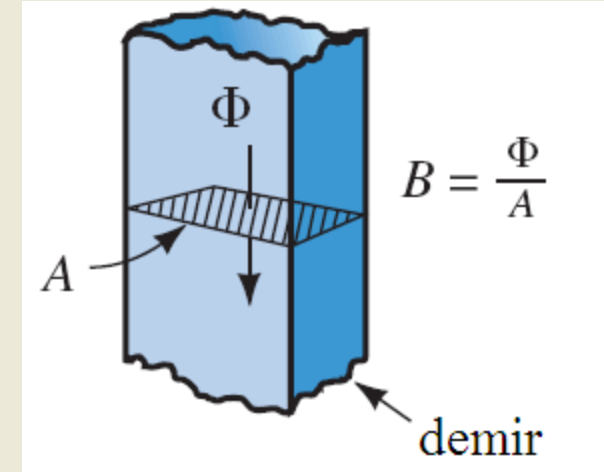
Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.2.3 Manyetik Akı Yoğunluğu

Elektrik makinalarında kullanılan önemli bir manyetik büyüklük de manyetik akı yoğunluğudur.

- Manyetik akı yoğunluğu manyetik alana dik bir birim alandan geçen akı miktarıdır.

Manyetik akı B harfi ile gösterilir ve birimi Wb/m^2 veya Tesla'dır (T).



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.2.4 Manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki

- Manyetik alan şiddeti H , bir anlamda akımın manyetik alanı meydana getirmek için gösterdiği çabanın bir ölçüsüdür.
- Manyetik alan şiddeti H ve bir malzemede üretilen manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişki:

$$B = \mu H$$

Burada;

μ malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m)

B manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²)

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Manyetik geçirgenlik

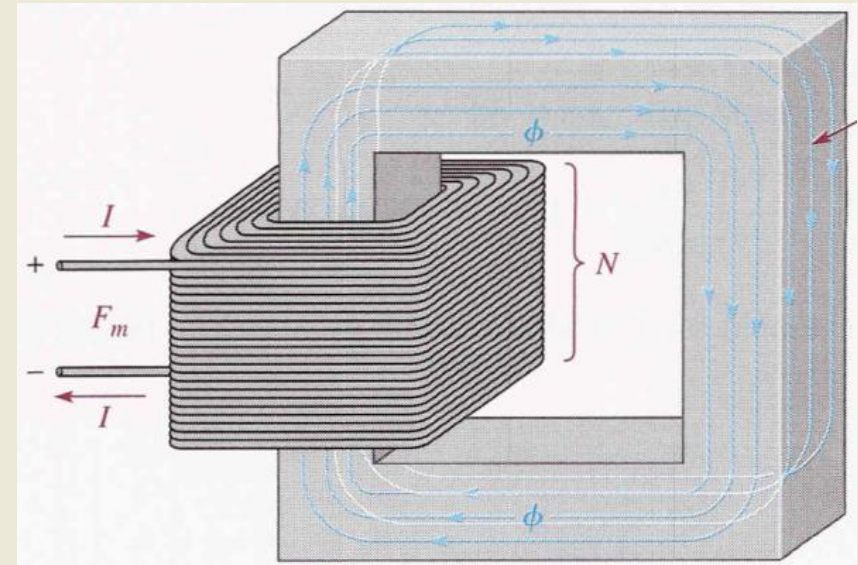
- Manyetik geçirgenlik (μ), malzeme içerisinde manyetik alanın geçişini tanımlayan bir parametredir. Her malzeme bir manyetik geçirgenliğe sahiptir.
- Manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemelerde daha kolay manyetik alan oluşur.
- Boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir ve değeri sabittir, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$.
- Herhangi bir malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliğinin oranlanması bağıl geçirgenliği μ_r verir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Manyetik geçirgenlik

- Bağlı geçirgenliğin yüksek olması malzemenin manyetik özelliğinin yüksek olduğu anlamına gelir.
 - Örneğin elektrik makinalarında kullanılan çeliğin bağlı manyetik geçirgenlikleri 2000-6000 arasındadır. Bu nedenle elektrik makinalarında manyetik akı, hava yerine 2000-6000 kat daha geçirgen olan çelik üzerinden geçmektedir.
- Şekilde verilen manyetik devreden görüldüğü gibi manyetik akı hava (boşluk) yerine daha geçirgen olan nüve üzerinden akmaktadır.
 - Bu devrede kaçak akılar bulunmakla birlikte toplam akıya oranla çok küçüktür.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik akı

- Bir nüvedeki akı yoğunluğunun genliği:

$$B = \mu H = \frac{\mu N i}{l_c}$$

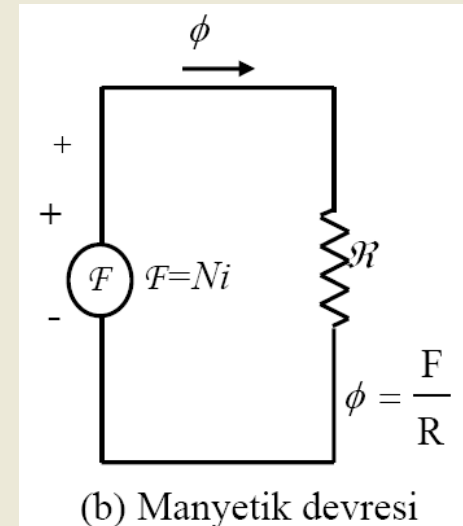
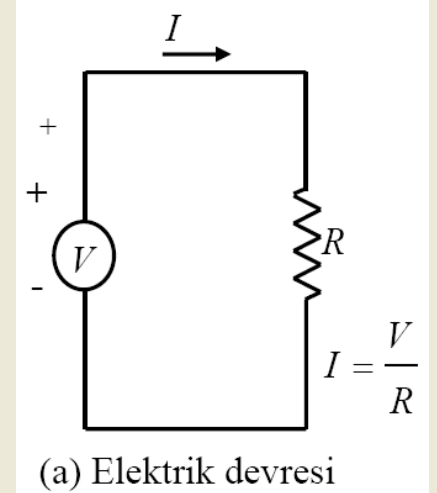
- Toplam manyetik akının değeri:

$$\phi = B A = \frac{\mu N i A}{l_c}$$

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.3 Manyetik Devreler

- Bir elektromanyetik devrede manyetik akı, nüveye sarılı sargıdan geçen akım tarafından üretilir. Bu olay elektrik devresinde gerilimin devreden akım geçirmesine benzerdir.
- Basit bir elektrik devresinde gerilim $V = I R$ ifadesi ile tanımlanır. Elektrik devresinde gerilim veya elektromotor kuvvet (emk) akımın akmasını sağlar. Direnç ise devre akımını sınırlar.
- Manyetik devrede ise gerilimin yerini manyetomotor kuvvet (mmk) alır. Bir sargıdan geçen akım, mmk (F) değerini belirler. $F = N i (At)$
- Manyetik devrede, uygulanan mmk devrede bir akı (ϕ) üretilmesini sağlar.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

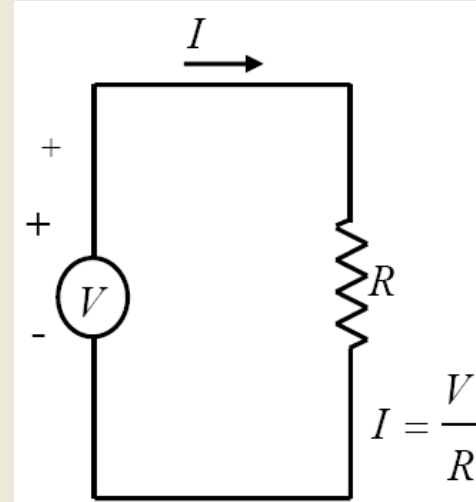
Manyetik Devreler

- mmk ile akı arasındaki ilişki:

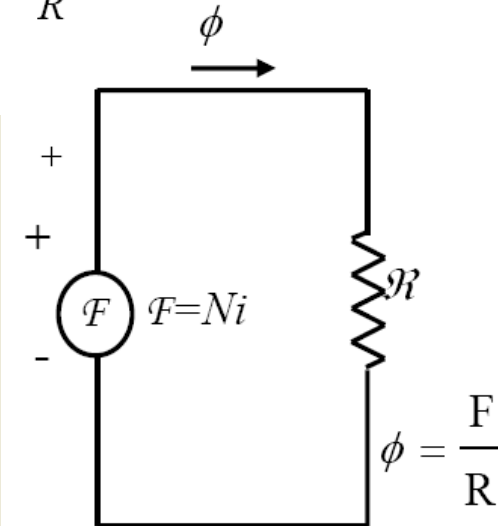
$$\Phi = \mathcal{F} / \mathcal{R} \quad (\text{Wb})$$

Burada \mathcal{R} relüktansı temsil eder ve birimi At/Wb dir.

- Relüktans akıyı sınırlar.
- Elektrik devresindeki gerilim kaynağına benzer olarak manyetik devrede mmk 'in de bir polaritesi vardır. mmk kaynağının pozitif ucu manyetik akının çıktığı uçtur, negatif ucu ise manyetik akının tekrar kaynağa girdiği uçtur.



(a) Elektrik devresi

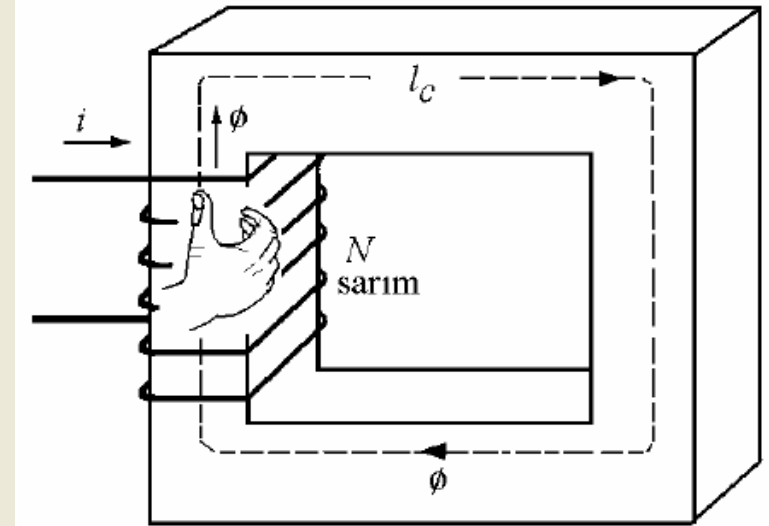


(b) Manyetik devresi

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Relüktans

mmk'in yönü **sağ el kuralının** bir sargıya uyarlanmış şeklinden elde edilebilir. Şekildeki manyetik yapıda sağ el parmakları sargıdan geçen akım yönünde sargıyı kavrar ise, parmaklara dik tutulan başparmak akının ve dolayısıyla **mmk'in yönünü** gösterir.



- **Relüktans** (manyetik direnç) bir elektrik devresindeki dirence karşılık gelirken, elektrik devresindeki iletkenliğin manyetik devredeki karşılığı da **permeans** olarak ifade edilir.

$$\mathcal{P} = 1/\mathcal{R} \quad \text{ve} \quad \Phi = \mathcal{F}\mathcal{P}$$

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Relüktans

- Bir manyetik devrede relüktansı bulmak için önce nüve içindeki akı denkleminden yararlanılır.

$$\phi = N i \frac{\mu A}{l_c}$$

$$\phi = \mathfrak{F} \frac{\mu A}{l_c}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu A}$$

- Manyetik devrenin relüktansı:
- Manyetik devredeki relüktanslar için de elektrik devresindeki dirençlere uygulanan kurallar geçerlidir.

Seri manyetik devrenin eşdeğer relüktansı:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 + \dots$$

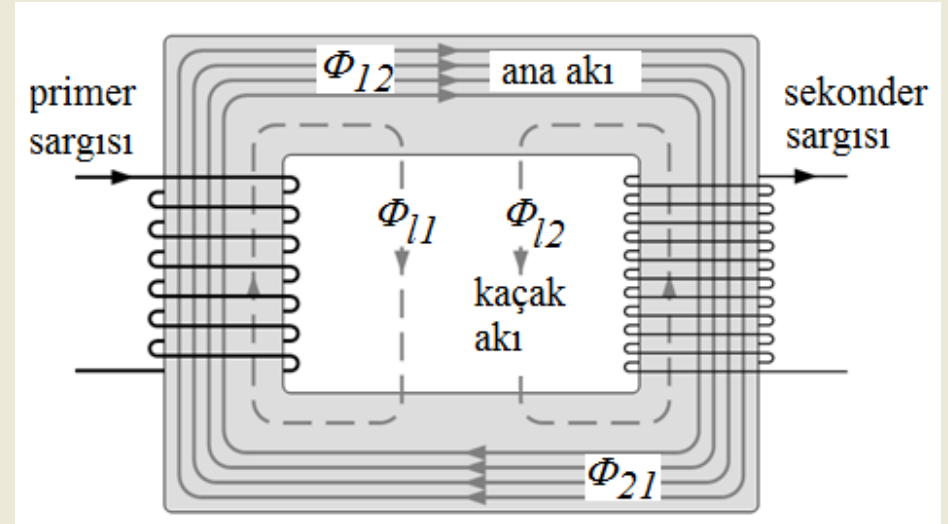
Paralel manyetik devrenin eşdeğer relüktansı:

$$1/\mathcal{R}_{eq} = 1/\mathcal{R}_1 + 1/\mathcal{R}_2 + 1/\mathcal{R}_3 + \dots$$

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Gerçek manyetik devre-Varsayımlar

- Bir nüvede manyetik akının hesaplanması için kabuller yapılır ve bulunan değerler yaklaşık değerler olup yaklaşık %5 hata ile sonuçlar elde edilir. Hesap sonucunun hassasiyetini etkileyen tabi nedenler vardır.
- Bunlar:
 - kaçak akı
 - akının dengesiz dağılımı
 - geçirgenliğin değişmesi
 - saçak etkisi



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

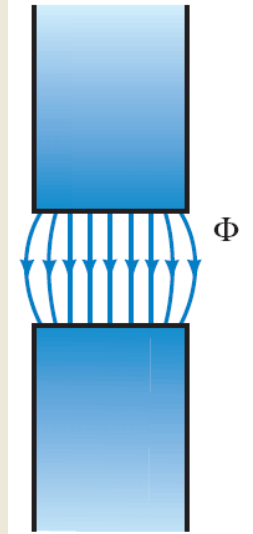
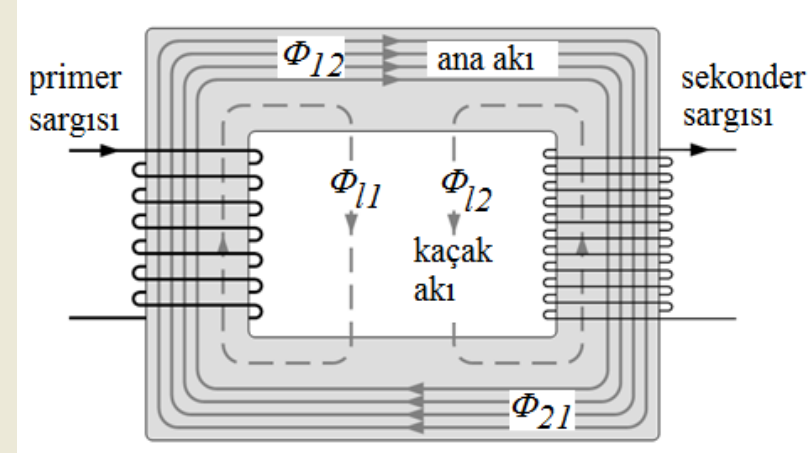
Gerçek manyetik devre-Varsayımlar

1. Manyetik devrede bütün akının bir manyetik nüve içinde tutulduğu varsayılır. Bu kabul çok gerçekçi değildir. Akının bir kısmı havadan devresini tamamlar. Bu akıya **kaçak akı** denir.

2. Relüktansın hesaplanmasında **akının** nüvenin her yerine **dengeli dağıldığı** kabul edilir. Nüve köşelerinde bu varsayım çok doğru değildir.

3. Ferromanyetik malzemelerde geçirgenlik malzeme içindeki akının artması ile değişir. Sabit kabul edilen **relüktans** değeri hesaplamamanın sonucuna etki eder.

4. Nüve içinde hava aralıkları var ise hava aralığının etkin kesit alan değeri, nüve kesit alanının her iki tarafından taşarak nüvenin kesit alanından daha geniş olacaktır. Hava aralığı kesit alanındaki bu fazlalık, hava aralığındaki manyetik alanın **saçak etkisi** tarafından meydana getirilir.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

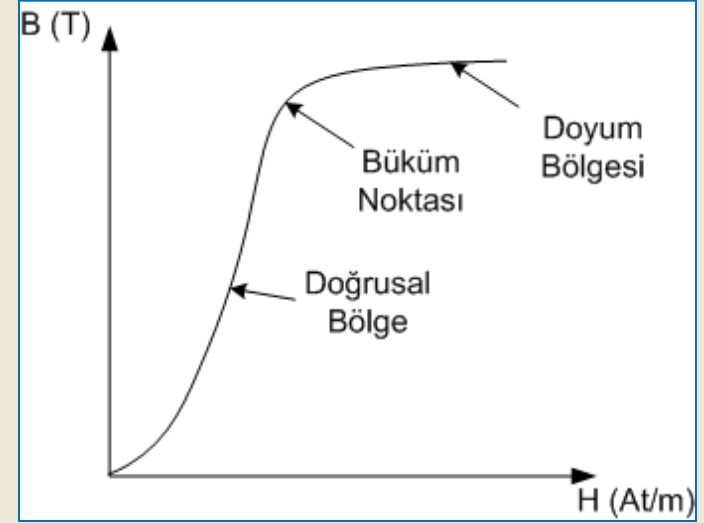
1.4 Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları

- Bir malzemenin manyetik akı yoğunluğu $B = \mu H$ bağıntısı ile ifade edilmektedir. Manyetik geçirgenliği düşük olan malzemelerde μ değerinin sabit olduğu kabul edilir ve B değeri H değeri ile doğru orantılıdır.
- Ferromanyetik malzemelerde ise bu yaklaşım doğru değildir. Çünkü ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenliği μ , H değeri ile değişim göstermektedir. Bu değişimi ölçmek son derece zordur. Fakat önemli olan manyetik geçirgenliğin değişimi değil, manyetik alan şiddetine göre manyetik akı yoğunluğunun değişimidir.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

BH Grafiđi-Mıknatıslama (doyum) Eğrisi

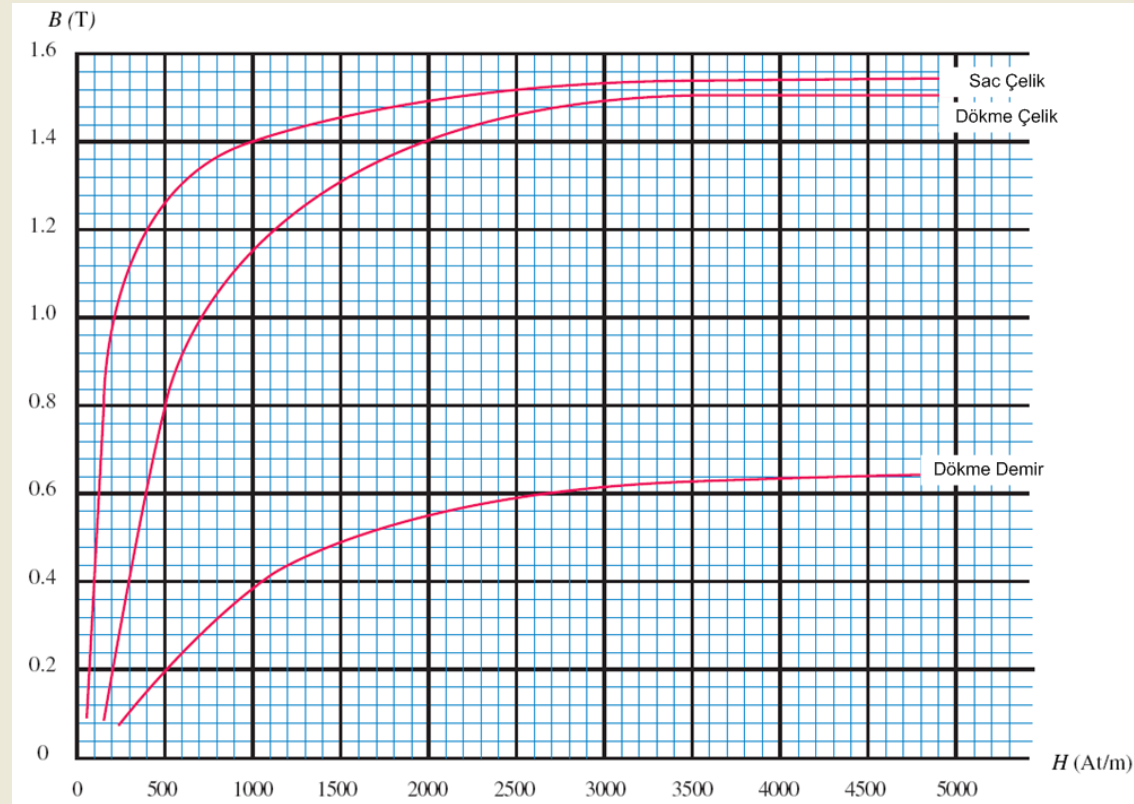
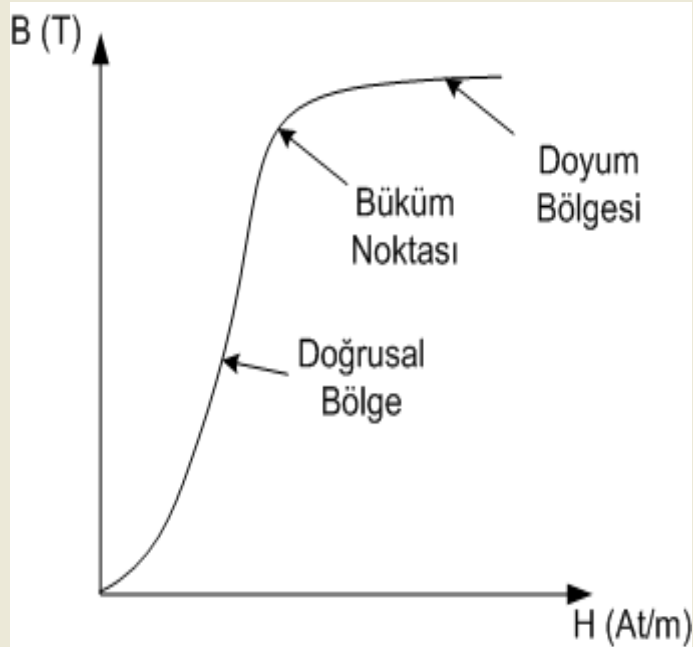
- Manyetik alan şiddetine göre manyetik akı yoğunluğunun değışimini gösteren grafik BH grafiği olarak adlandırılır.
- BH grafiđi 3 bölge olarak incelenebilir.



1. **Doğrusal bölge:** H ile B doğrusal değışir. Bu bölge mıknatıslanmanın sağlandığı bölgedir.
2. **Büküm bölgesi:** H ile B daha az bir oranla değışim göstermektedir.
3. **Doyum bölgesi:** Ferromanyetik malzeme manyetik doyuma ulaşmıştır. Bu noktadan sonra H değeri ne kadar artırılırsa artırılınsın B değeri bir değışim olmaz.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

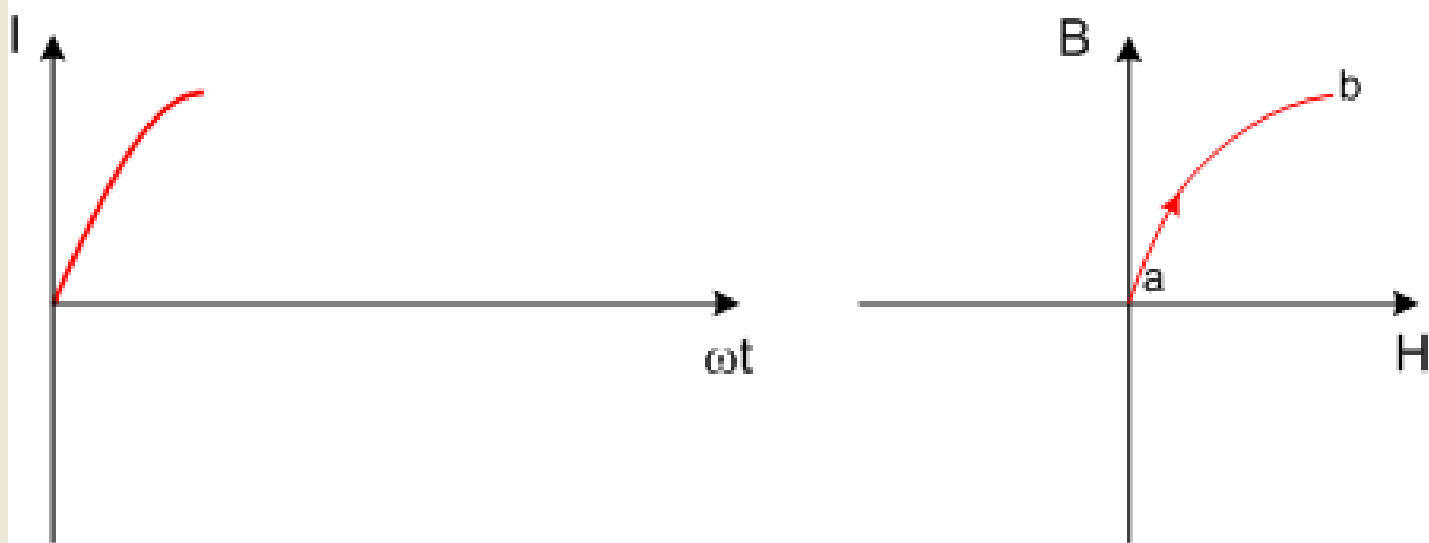
Bazı metallerin mıknatıslanma eğrileri



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.4.1 Histerisis Çevrimi

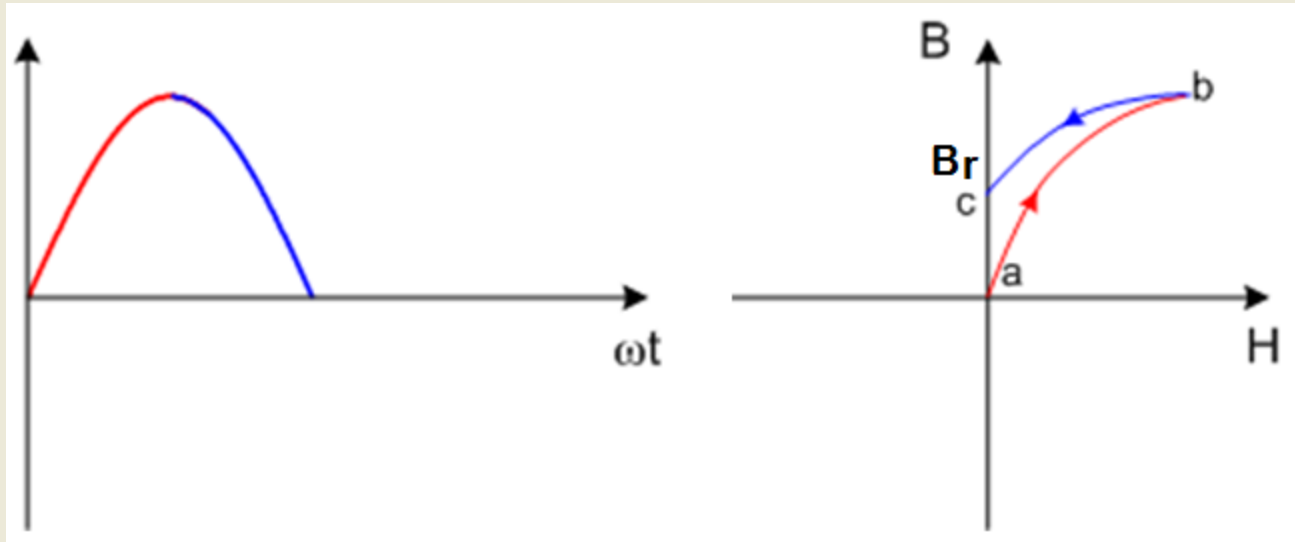
- Daha önceden mıknatıslanmamış bir ferromanyetik nüveye sarılı sargılara AA uygulandığında, AA'ın yükselen kenarında nüvede a-b yönünde mıknatıslanma meydana gelir



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Histerisis Çevrimi

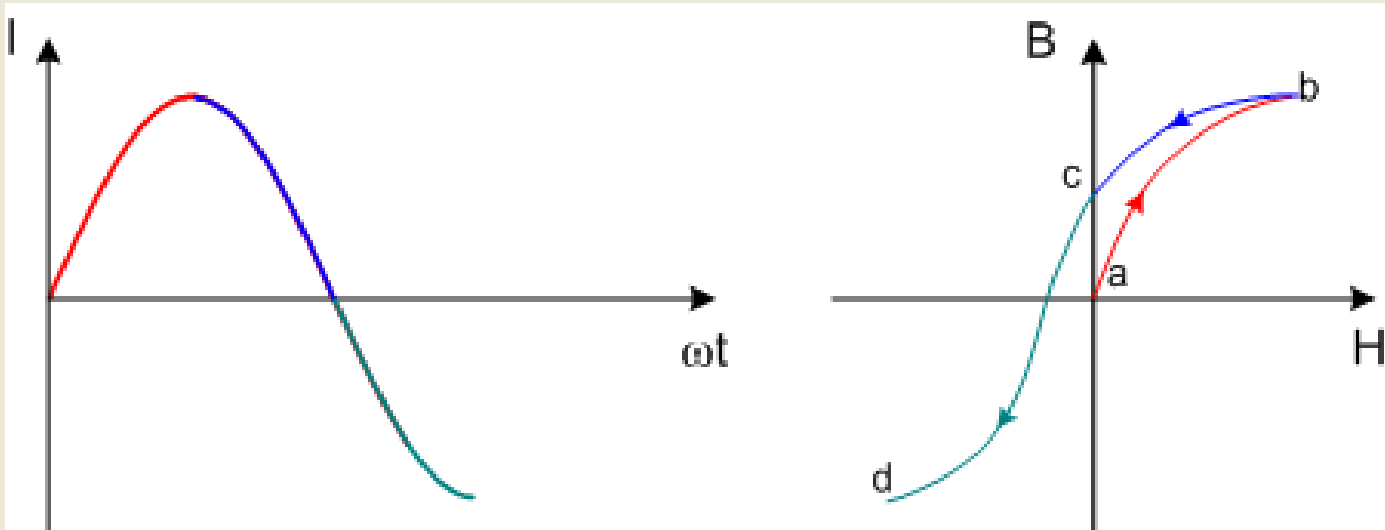
- AA azalmaya başladığında H değeri buna bağlı olarak da B değeri azalacaktır. Fakat AA değeri sıfır olduğunda B değeri sıfır olmayacaktır (b-c eğrisi). Ferromanyetik malzeme üzerinde **artık mıknatısiyet** dediğimiz bir B_r değeri olacaktır.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Histerisis Çevrimi

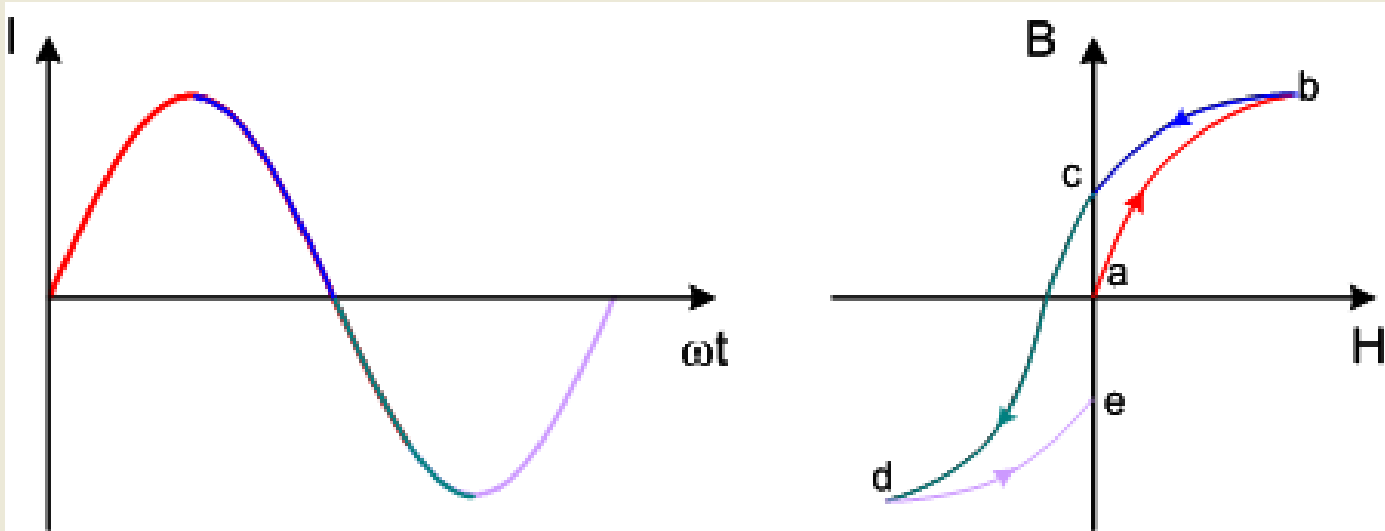
- AA yön değiştirdiğinde mıknatıslanma eğrisi de yön değiştirecektir. Önce artık mıknatısiyet gidecek daha sonra c-d yönünde bir değişim meydana gelecektir.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Histerisis Çevrimi

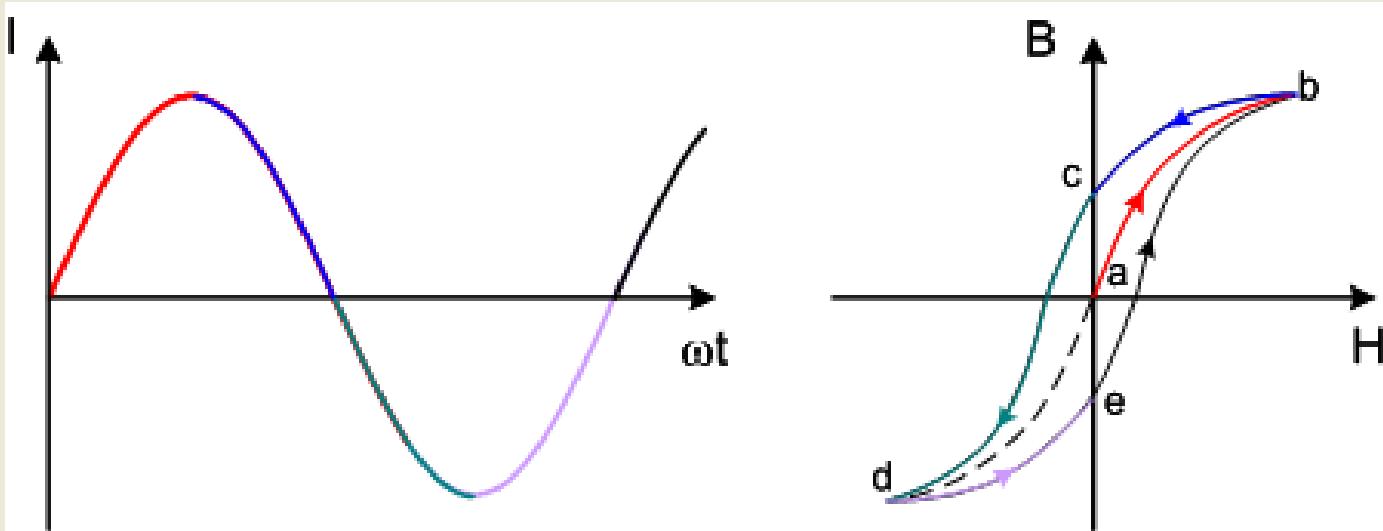
- AA –maksimum değerdan sıfıra doğru yaklaşırken ferromanyetik malzemenin BH eğrisi d-e yönünde olacaktır.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Histerisis Çevrimi

- AA'ın tekrar pozitif olması durumunda eğri e-b yönünde değişecektir. Bundan sonra BH eğrisi b-c-d-e yönünde değişim gösterecektir. b-c-d-e kapalı çevrimi **histerisiz çevrimi** olarak adlandırılmaktadır.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

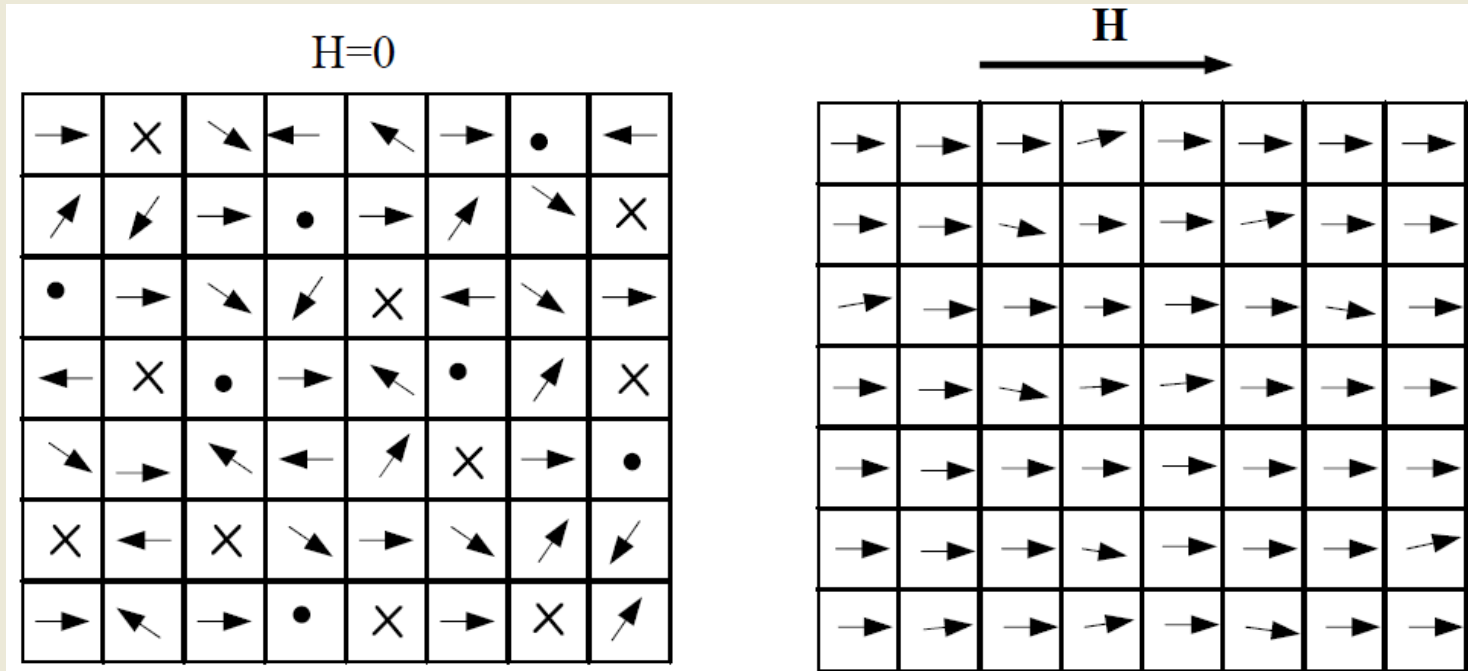
Histerisis Çevrimi

- Histerisiz çevrimin oluşumunu anlamak için ferromanyetik malzeme yapısını incelemek gerekir.
- Ferromanyetik malzemelerin atom yapıları aynı yönde manyetik alana meyillidir.
- Bu malzemeler domain olarak adlandırılan çok küçük bölgelerden meydana gelir. Her domain içinde atomlar manyetik alanları ile aynı yönde sıralanırlar. Böylece her domain bir mıknatıs parçası olarak görev yapar.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Mıknatıslanma Özelliği

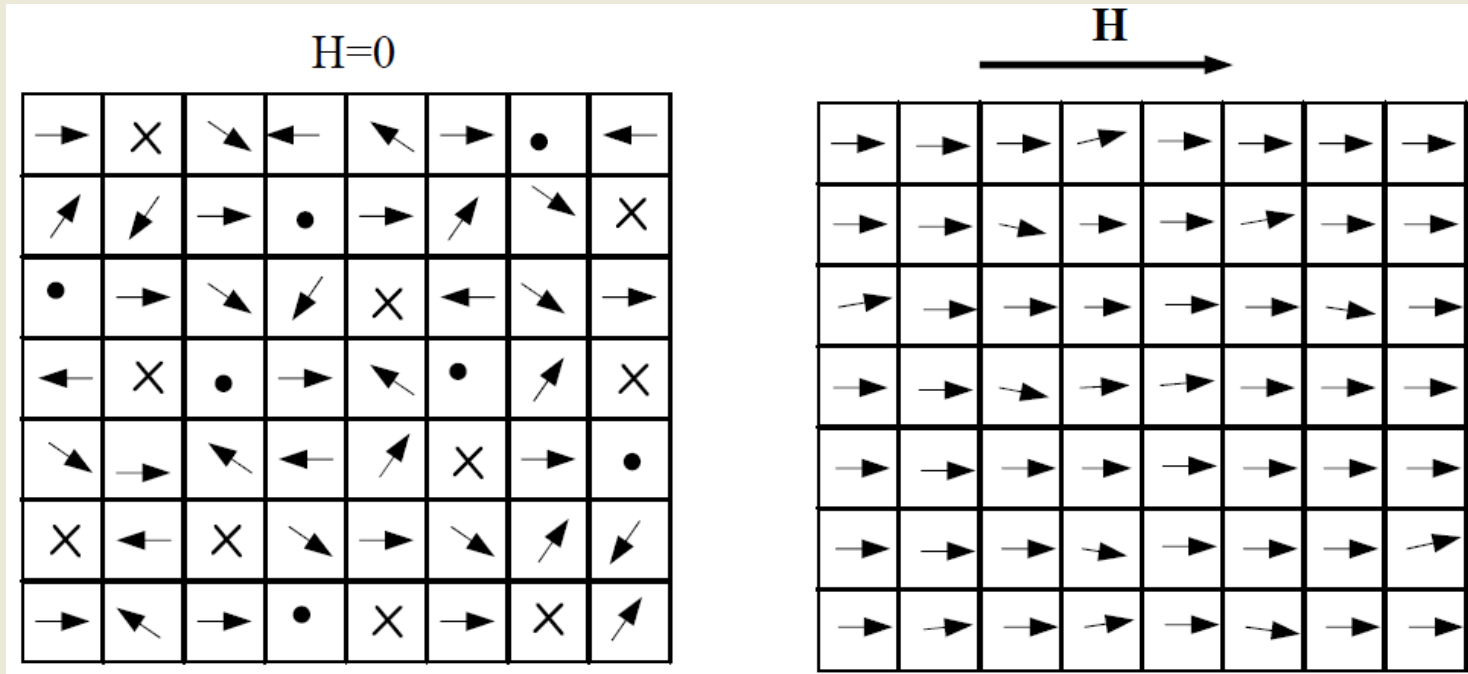
- Bir demir malzemenin mıknatıslık özelliği göstermemesinin nedeni başlangıçta atomların gelişigüzel dağılmış olmasıdır. Bu durumda toplam akı değeri sıfır olmaktadır.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Mıknatıslanma Özelliği

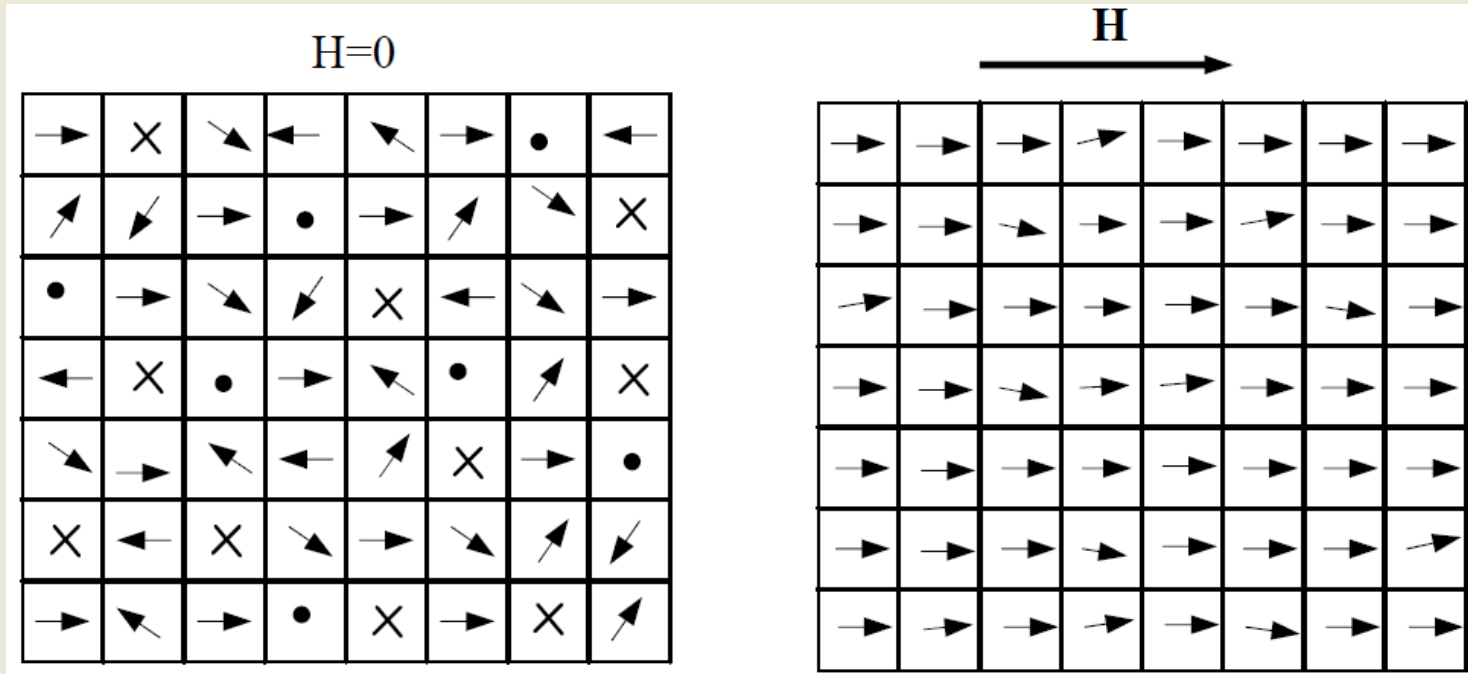
- Demir malzeme harici bir manyetik alan etkisinde kaldığında domainlerdeki atomlar harici manyetik alanı destekleyecek yönde akı oluşturlar. Harici manyetik alanın değeri artırılırsa, bütün domainler aynı yönü gösterirler.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Mıknatıslanma Özelliği

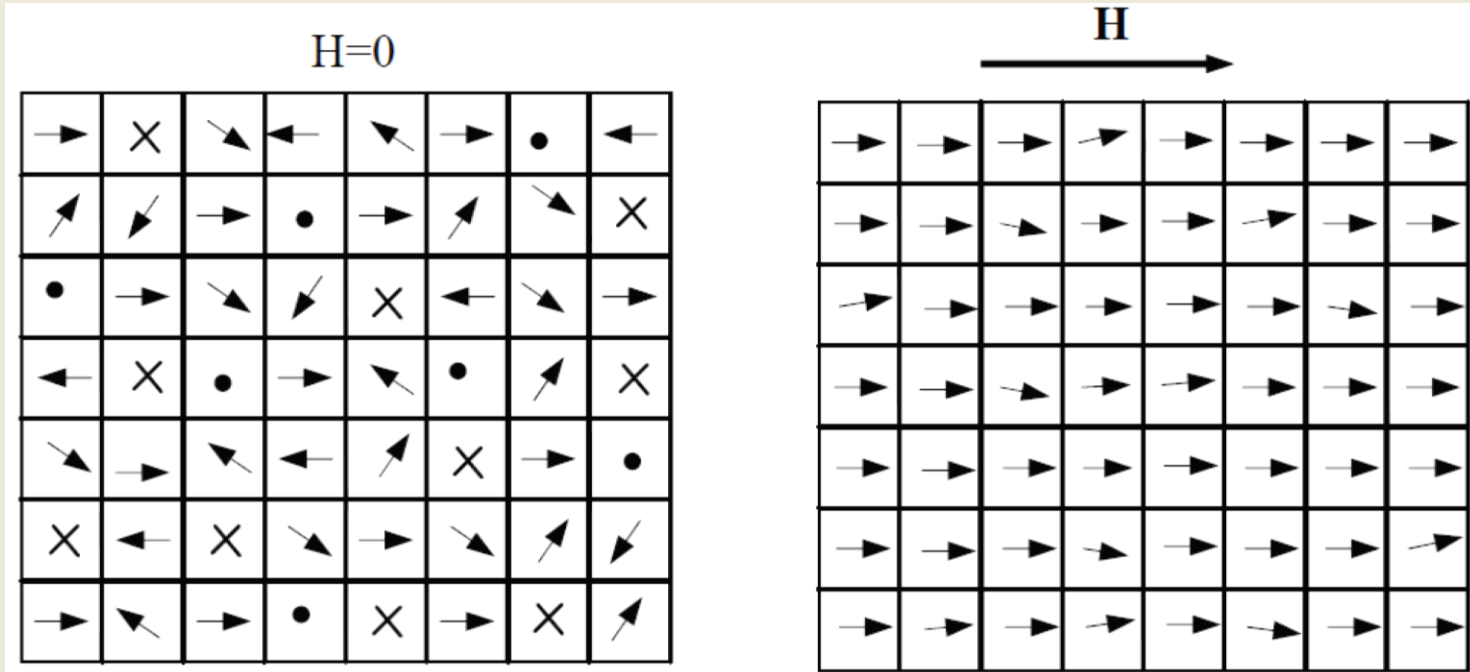
- Domainlerin tamamı manyetik alanı destekleyecek yöne döndüklerinde manyetik alan şiddeti ne kadar artırılırsa artırılınsın akı değerinde bir değişme olmayacaktır. Bu durumda nüve doymuştur.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Mıknatıslanma Özelliği

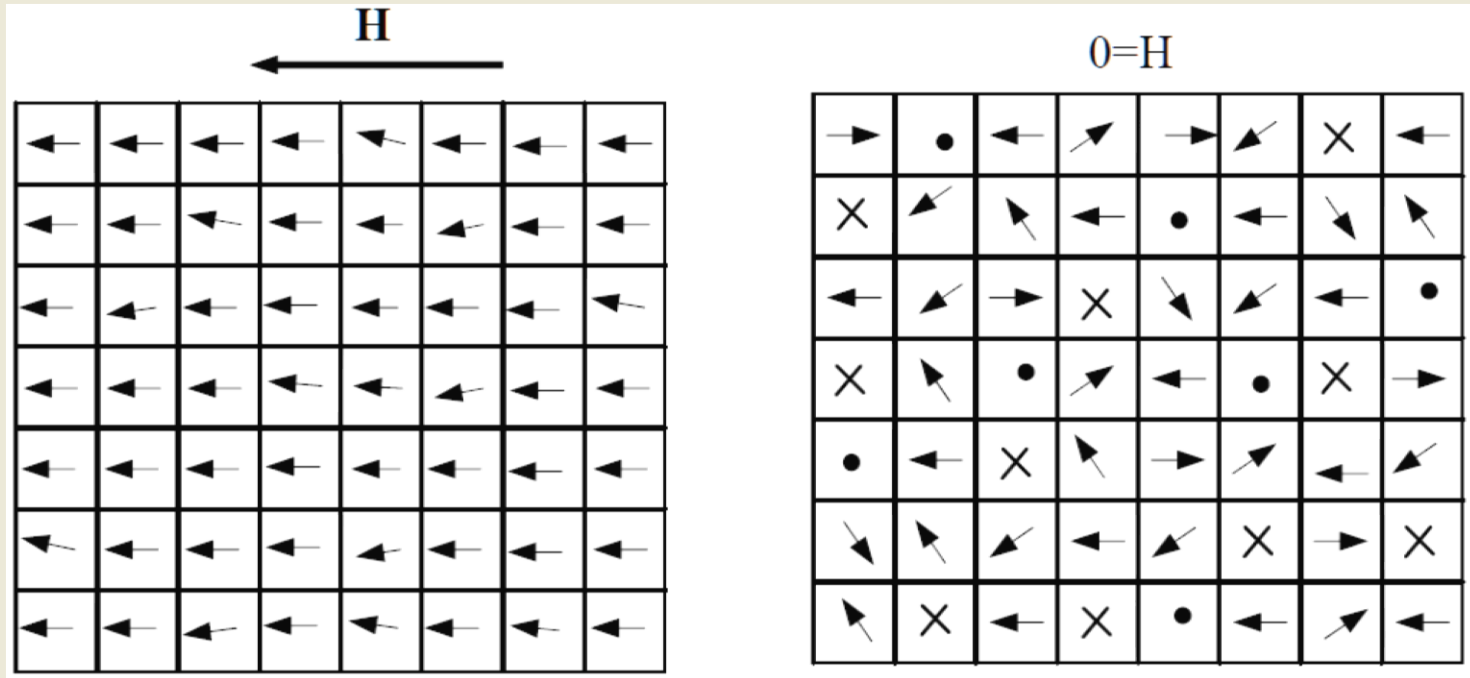
- Demir malzeme üzerindeki harici manyetik alan kaldırıldığında domainler tamamen başlangıç konumuna dönemezler. Bir bölümü manyetik alan etkisinde kaldığı konumunu devam ettirir. Bu da nüvede **artık mıknatıslıyeti** oluşturur.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Mıknatıslanma Özelliği

- Benzer durum ters yön için de geçerlidir. Eğer harici manyetik alanın yönü değişirse, domainlerin yönü de değişecektir.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Mıknatısiyetin Giderilmesi

- Ferromanyetik malzemeler ancak dış etkiler ile mıknatıslık özelliklerini tamamen kaybederler.

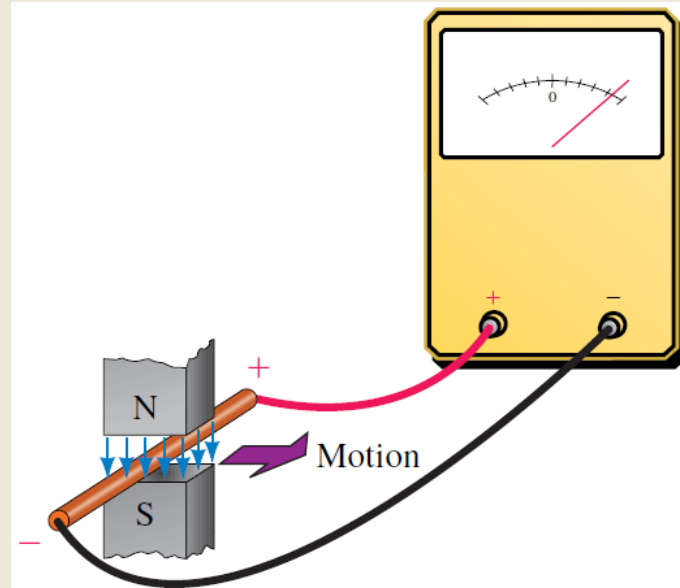
Bu dış etkenler:

1. Ters yönde bir manyetomotor kuvveti uygulanması
2. Büyük bir mekanik darbe uygulanması
3. Aşırı ısınma

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

1.5 Zamanla değişen manyetik alanın endüklediği gerilim, *Faraday kanunu*

Faraday, değişken bir manyetik akı tarafından kesilen sargı uçlarında bir gerilim endüklendiğini ve bu gerilim değerinin manyetik akının zamanla değişimine bağlı olduğunu ifade etmiştir.



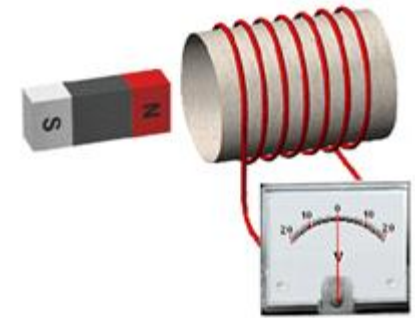
Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Zamanla değişen manyetik alanın endüklediği gerilim, *Faraday kanunu*

- Değişken manyetik akı N sarımlı sargıyı keserse, sargı uçlarındaki toplam gerilim her bir sargıda endüklenen gerilimler toplamına eşittir.

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

Faraday'ın endükleme kanunu



- Denklemdaki (-) negatif işaret Lenz kanununun bir ifadesidir. **Lenz kanununa göre;** bir sargıda endüklenen gerilim, eğer sargı uçları kısa devre edilirse, sargıdan bir akım dolaştıracak ve bu akımın üreteceği akı orijinal akının değişimine karşı koyacaktır. Endüklenen gerilim kendisini meydana getiren değişikliğe karşı koyduğu için denklemden negatif işareti kullanılır

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

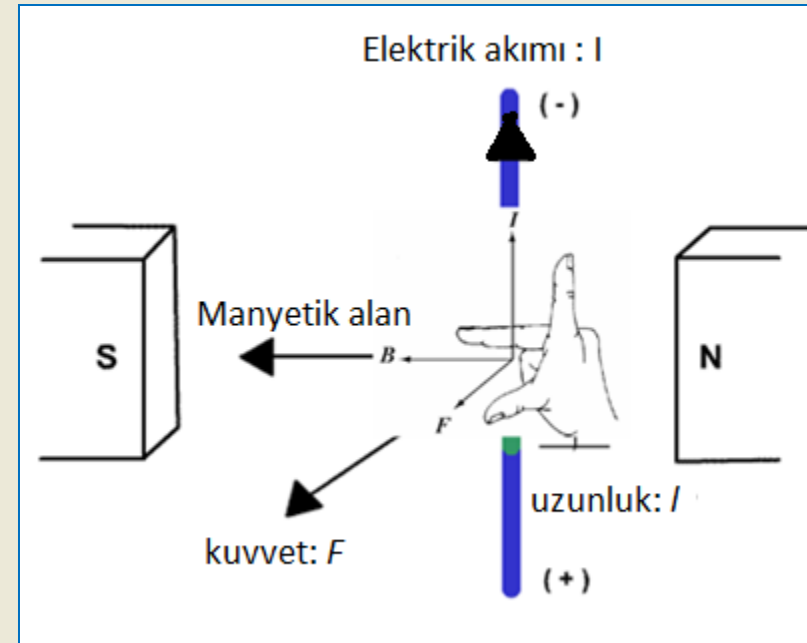
1.6 Bir İletkende Endükleme Kuvvetinin Üretilmesi

- Manyetik alanın ikinci önemli etkisi ise çevrelediği iletkenler üzerinedir. Manyetik alan, manyetik alan içerisinde olan ve akım taşıyan bir iletken üzerinde bir kuvvet endükler. Bu kuvvete **elektromanyetik kuvvet** veya **Lorentz kuvveti** denir.
- Elektromanyetik kuvvet :

$$F = i(\ell \times B)$$

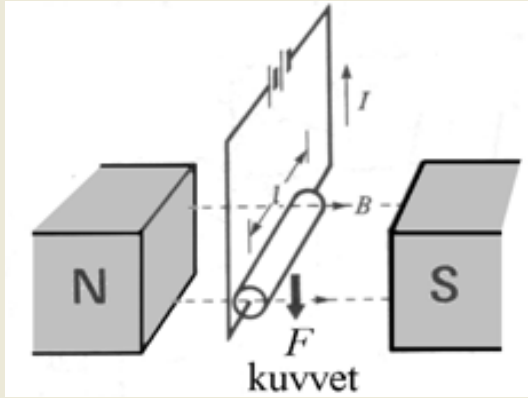
$$F = i l B \sin \theta$$

- i iletken içindeki akım (amper)
- l İletkenin uzunluğudur. İletkenin yönü akımın yönündedir.
- B Manyetik akı yoğunluğu vektörü

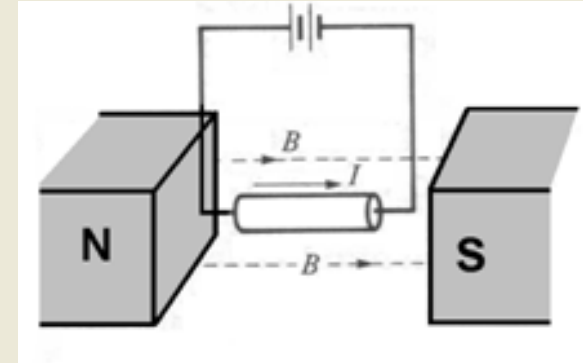


Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

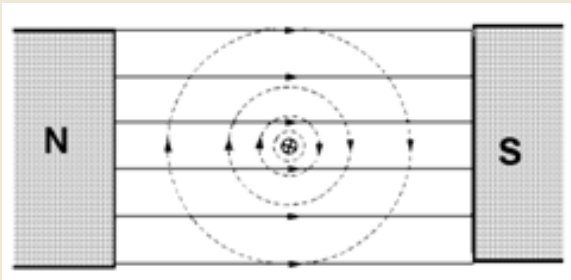
Manyetik alan içindeki akım taşıyan iletken üzerindeki kuvvet



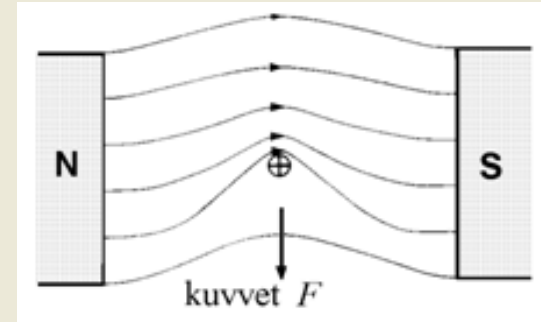
iletken manyetik alana dik,
kuvvet maksimumdur



iletken manyetik alana paralel,
kuvvet sıfırdır



Kutup ve iletken
manyetik akılarının yönleri



Meydana gelen manyetik akı
iletkeni aşağı doğru iter.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Manyetik alan içinde hareket eden bir iletkende endükleme geriliminin üretilmesi

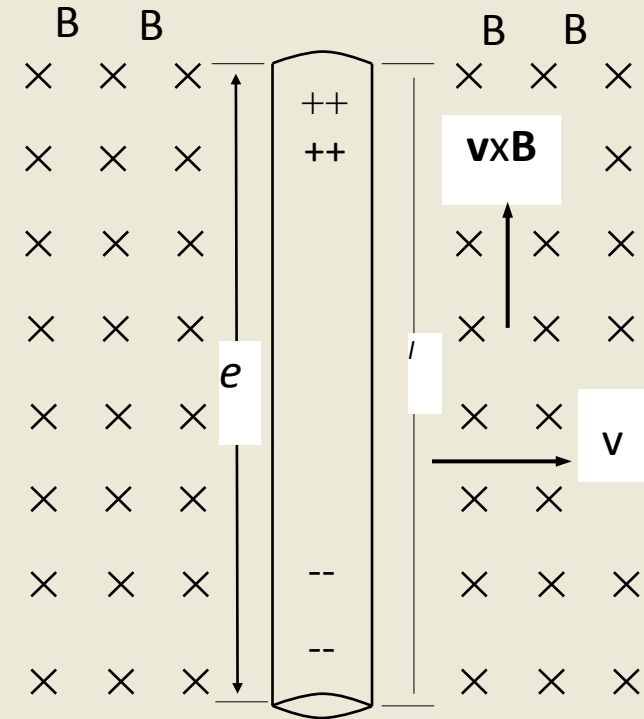
Manyetik alanın çevresi ile etkileşiminin üçüncü bir yolu daha vardır. Eğer uygun konumdaki bir iletken manyetik alan içinde hareket ederse, üzerinde bir gerilim endüklenir.

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{I}$$

\mathbf{v} iletkenin hızı,

\mathbf{B} manyetik akı yoğunluğu vektörü

\mathbf{I} manyetik alan içindeki iletkenin uzunluk vektörü



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları

1.Histerisis Kayıpları:

- Demir içinde domainlerin yönünü değiştirmek için gerçekte bir enerjiye gerek duyulması, bütün makinalarda ve transformatörlerde ortak olan bir enerji kaybına neden olur.
- Bir demir nüveye uygulanan alternatif akımın her bir saykılı boyunca domainlerin yön değiştirmesi için harcanan enerjiye *histerisis kayıpları* denir.
- Histerisis çevrimini, nüveye uygulanan alternatif akım şekillendirir ve histerisis çevriminin alanı her bir saykıldaki enerji kayıpları ile oranlıdır.

$$P_h = K_h f B_m^n V$$

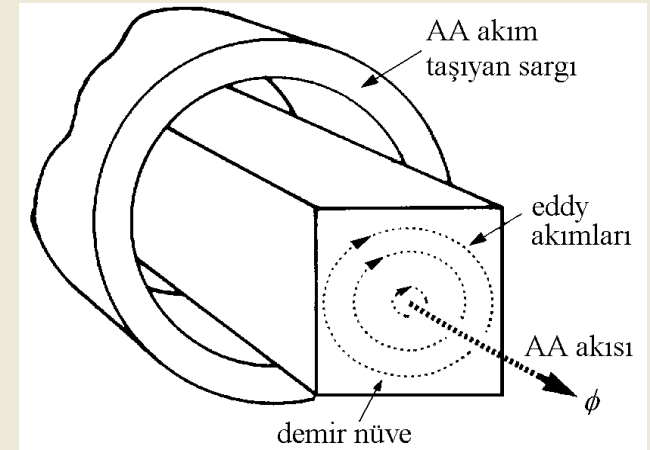
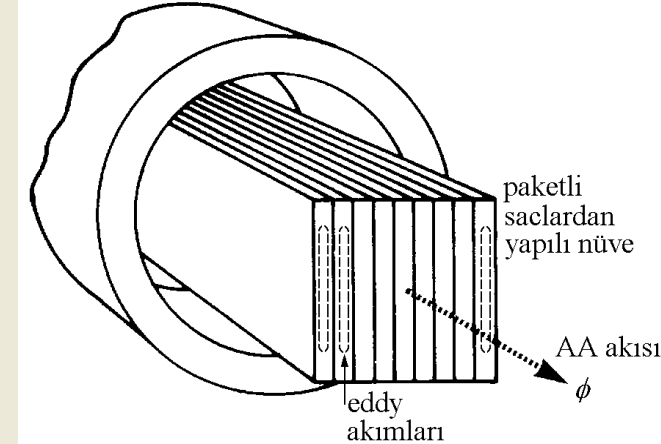
P_h histerisis kayıplar (W), K_h bir sabit olup manyetik malzemeye bağlıdır, n değeri deneysel olarak bulunur ve 1.5-2.5 arasında alınır, V nüvenin hacmidir (m^3).

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları

2.Eddy (girdap) Akımı Kayıpları:

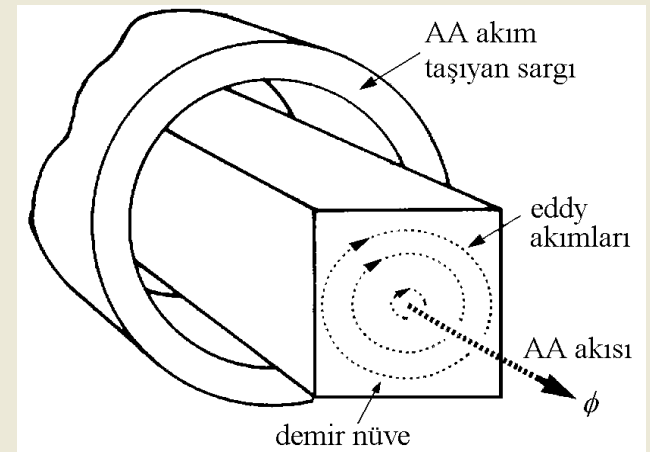
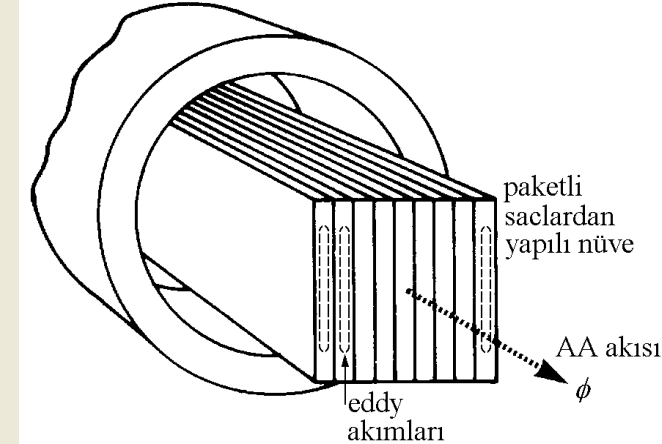
Nüve içinde değişen manyetik alanlar tarafından üretilir. Faraday kanununa göre; zamanla değişen akı, nüve etrafına sarılı sargılarda bir gerilim endüklediği gibi manyetik bir nüve içersinde de bir gerilim endükler. Bu gerilimler nüve içersinde akımın bir halka şeklinde dolaşmasına neden olurlar. Bu olay su akıntısındaki girdaplara da benzetilir ve ismini de oradan almıştır.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları

- **Eddy akımları** demir nüve gibi rezistif (omik) özelliği olan malzemeler içinden akarlar ve enerji nüve içinde ısı şeklinde harcanır.
- Eddy akımları yüzünden kaybolan enerji miktarı eddy akımlarının nüve içersinde izledikleri yolların boyutları ile orantılıdır.
- Bu sebepten dolayı değişen akıya maruz kalan ferromanyetik nüvenin bir çok **ince levhalardan yapılması** ve levhaların bir yüzünün **silikon ile yalıtılması** artık klasik bir tekniktir.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları

- Silisli saclardan yapılan nüvede eddy akımları için akım yolları çok kısaltılarak yol direnci artırılır ve böylece eddy akımı ile beraber eddy kayıpları da azaltılır.
- Birim hacim başına eddy akımı güç kayıpları:

$$P_e = K_e (f \cdot B_m \cdot t_1)^2 \quad \text{W/m}^3$$

- Nüvenin toplam eddy akımı güç kayıpları:

$$P_e = K_e (f \cdot B_m \cdot t_1)^2 V \quad (\text{W})$$

t_1 sac levha kalınlığı, K_e manyetik malzemenin iletkenliğine bağlı sabit. V manyetik nüvenin hacmidir (m^3).

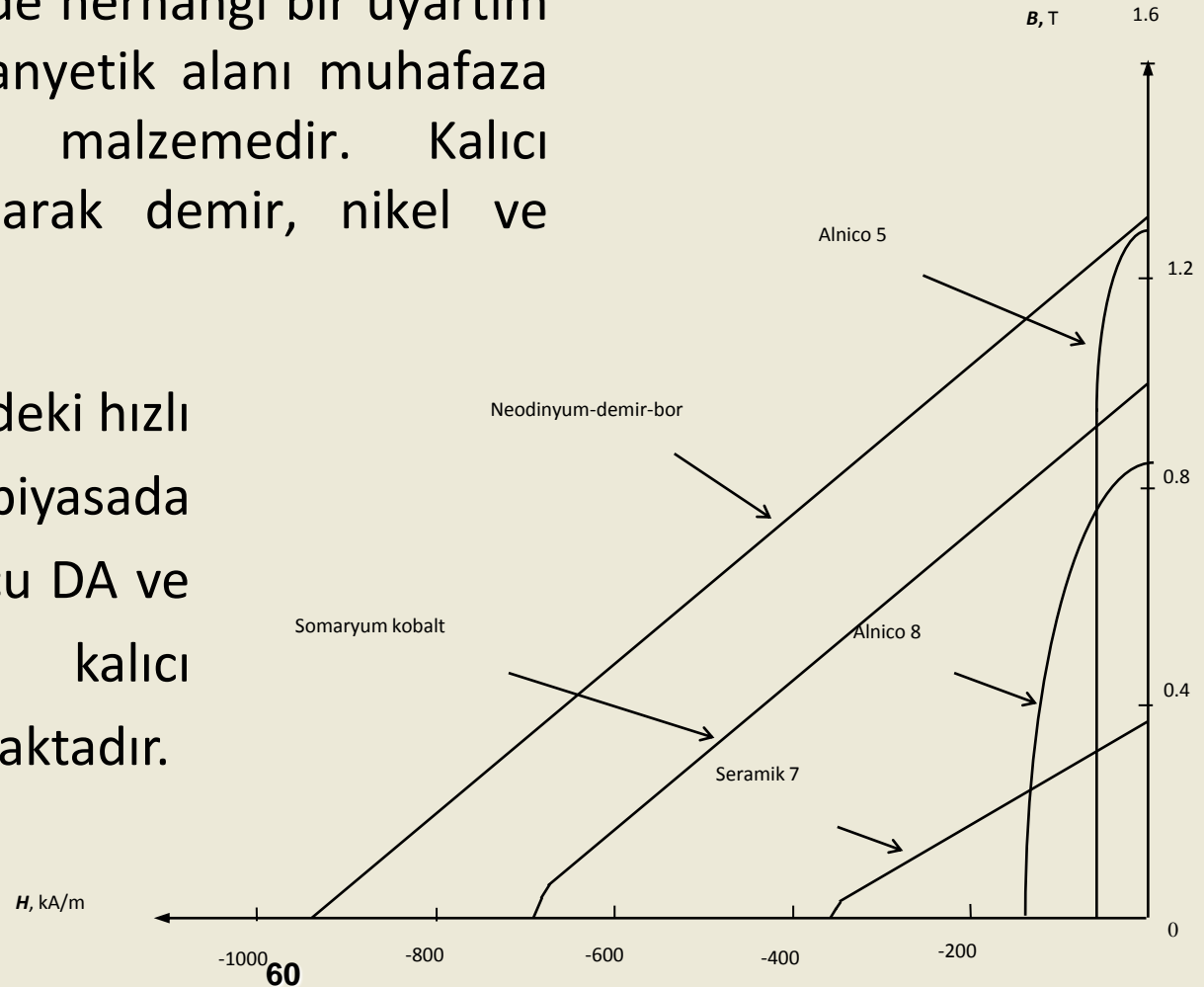
- Hem histerisis hem de eddy akımı kayıpları nüvenin ısınmasına neden olduklarından makina ve transformator tasarımında özellikle dikkate alınmalıdırlar.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Kalıcı Mıknatıslar

- Kalıcı mıknatıs, üzerinde herhangi bir uyarım mmk'i yok iken bir manyetik alanı muhafaza etme özelliği olan malzemedir. Kalıcı mıknatıslar normal olarak demir, nikel ve kobalt alaşımlarıdır.

- Yeni kalıcı malzemelerdeki hızlı gelişmeler ve bunların piyasada yerlerini almaları sonucu DA ve senkron makinalarda kalıcı mıknatıs kullanımı artmaktadır.



Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Özellikleri

- Gerekli olan manyetik akısı kalıcı mıknatıs ile sağlanan bütün makinalarda, kullanılan kalıcı mıknatıs malzemedede iki önemli özelliğin bulunması gerekir.
- Bunlar:
 1. Yüksek bir kalıcı (artık) mıknatısiyet yoğunluğuna sahip olmalıdır. Böylece mıknatıs “kuvvetli” olur ve istenen akıyı sağlar.
 2. Büyük bir giderici kuvvete (kalıcı mıknatısiyeti yok edici kuvvete) sahip olmalıdır. Böylece, dış etkiler tarafından kolaylıkla mıknatısiyeti yok edilemez.

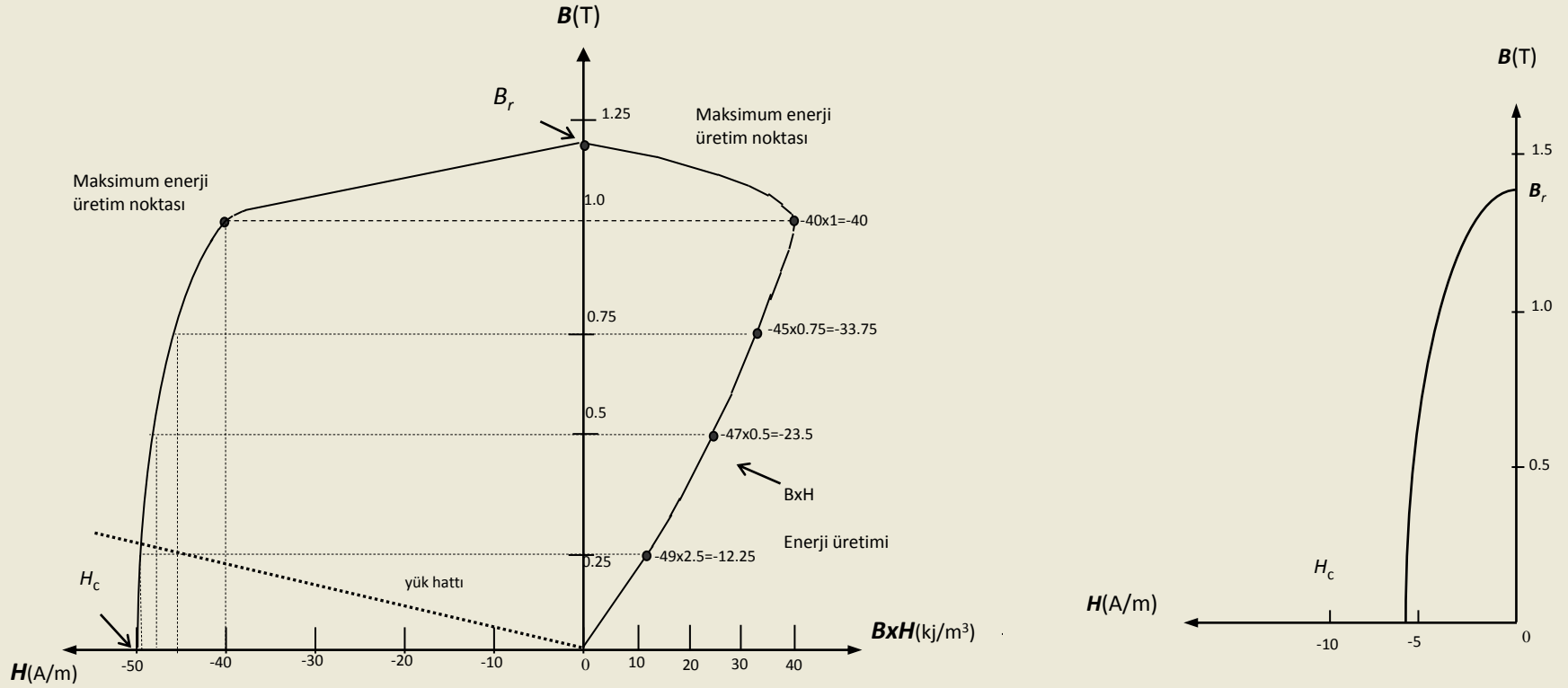
Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Özellikleri

- İdeal bir kalıcı mıknatıs malzemedен dikdörtgene yakın ve **şişman bir histerisis** eğrisine sahip olması beklenir.
- Böylece, uygulanan alan kaldırıldığı zaman kalıcı mıknatısiyet yüksek bir seviyede olur. Diğer bir ifadeyle, histerisis eğrisi tarafından çevrelenen alan çok geniş olur. Pratikte çok az manyetik malzeme bu bahsedilen gerekleri karşılar.
- Bir kalıcı mıknatıs malzemenin uygun **seçimi** için malzemenin histerisis eğrisinde ikinci bölge ile temsil edilen **giderici kuvvet** ve **artık mıknatısiyet** eksenleri arasında kalan bölge kullanılır.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Özellikleri

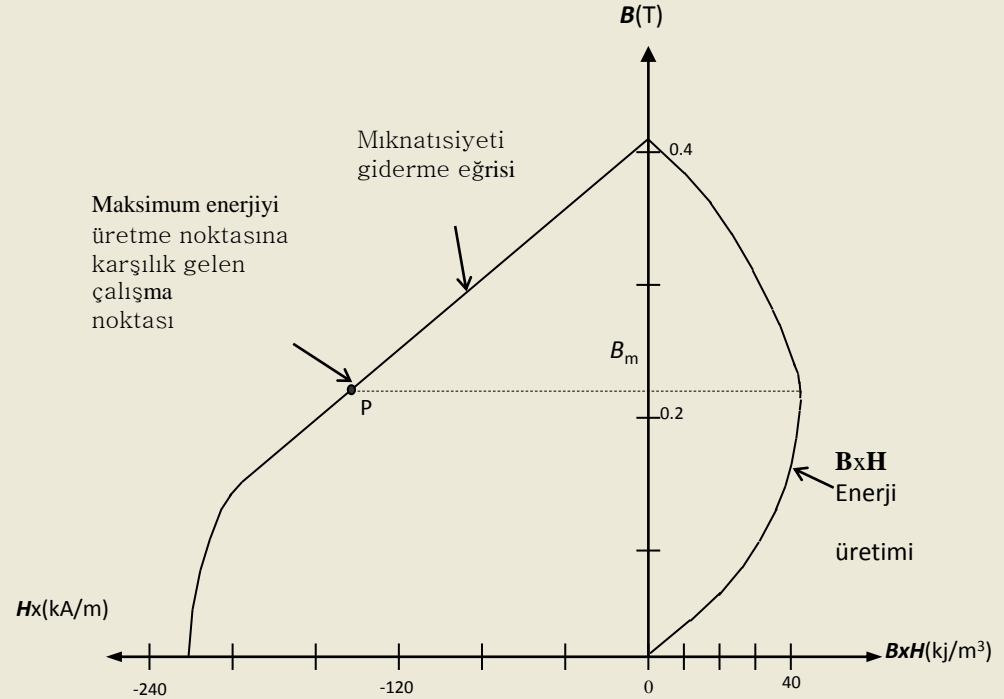


Şekil 'de yumuşak (Alnico-5) ve sert (M-5) çelik malzemeler için histerisis eğrisinin ikinci çeyreği gösterilmiştir. Her iki malzeme yüksek B_r (kalıcı mıknatısiyet) değerlerine sahiptir. Alnico-5 için $B_r=1.22 \text{ Wb/m}^2$, $H_c=-49\text{kA/m}$ ve M-5 çelik için $B_r=1.4\text{Wb/m}^2$, $H_c=-6 \text{ A/m}$.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Özellikleri

Şekilde bir kalıcı mıknatısın giderici kuvvet ve enerji üretim eğrileri gösterilmiştir. **Giderici kuvvet**, bir malzemenin hava aralığı da bulunan bir manyetik devrede akı üretebilme yeteneğinin de bir ölçüsüdür. İyi bir kalıcı mıknatıs olan malzemeler büyük giderici kuvvetler ile karakterize edilirler ($H_c \geq 1 \text{ kA/m}$ gibi).



Bir kalıcı mıknatısın **akı üretme yeteneği** için kullanışlı bir ölçü, mıknatısın **maksimum enerji üretim** noktasıdır. Bu nokta histeresis çevriminin ikinci çeyreğinde BH çarpımının $(BH)_{max}$ en büyük olduğu noktaya karşılık gelir. BH çarpımının birimi joule/m³'dür. Maksimum enerji üretme noktasında çalışma, hava aralığında istenen akıyı üretmek için gerekli en küçük malzeme hacmini sağlar.

Makine İlkeleri 1.2 Manyetik Alan

Kalıcı Mıknatısiyetin Önemi

- Kalıcı mıknatısiyet, uyartım akımı veya manyetik alan şiddeti sıfır iken manyetik devrede manyetik akının bulunması sonucu meydana gelir.
- Kalıcı mıknatıs malzemeler (sert manyetik malzemeler, Alnico-5 gibi) ile yumuşak manyetik malzemeler (M-5 elektrik çeliği gibi) arasındaki önemli farklılık bu malzemelerin giderici kuvvetleri arasındaki büyük fark ile karakterize edilir.
- Giderici kuvvet malzemenin mıknatısiyetini yok etmek için gerekli mmk miktarının bir ölçüsü olarak düşünülebilir.

Alnico-5 için $H_c = -49000 \text{ A/m}$

M-5 çelik için $H_c = -6 \text{ A/m}$

M-5 çelike göre Alnico-5 için giderici kuvvet yaklaşık 7500 defa daha büyüktür.

KAYNAKLAR

1. Prof. Dr. Güngör BAL, “**Doğru Akım Makinaları ve Sürücüleri**”, Seçkin Yayınevi, Ankara 2008
2. Prof. Dr. Güngör Bal, “**Transformatörler**”, Seçkin Yayıncılık, 2012
3. Stephen J. Chapman, “**Elektrik Makinalarının Temelleri**”, Çağlayan Kitabevi, 2007, Çeviren: Prof. Dr. Erhan AKIN, Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN