# BÖLÜM 4
# ELEKTRONİK ve MANYETİK MALZEMELER
## *(Malzemelerin Elektrik ve manyetik özellikleri)*

**Malzemelerin fiziksel davranışları**, çeşitli elektrik, manyetik, optik, ısıl ve elastik özelliklerle tanımlanır.
**Bu özellikler** çoğunlukla, *atomik yapı(elektronik yapı, bandlar), atomik dizilme ve malzemenin kristal yapısı* ile belirlenir.

**Atomik yapıda**, iletken ve valans bandlar, elektronlar arasındaki geçişleri belirleyerek, malzemelerin **iletken, yarı iletken ya da yalıtkan** olmalarını sağlamaktadır. Bunun yanında, **ferromanyetik davranış, yayınma ve saydamlık** gibi özellikler de atomik yapıya bağlıdır.

**Fiziksel özellikler, atomların kısa mesafeli ve uzun mesafeli diziliş** düzenini değiştirmekle ve de atomik dizilmede **yabancı atomları katmakla** ve kontrol etmekle önemli ölçüde değiştirilebilmektedir.
Metal işleme tekniklerinin, metallerin elektrik iletkenliği üzerine büyük etkisi bulunmaktadır. **Geliştirilmiş mıknatıslar, kafes hataları ile ya da tane boyutu denetlemekle** elde edilebilmektedir.

**Atom gruplarının elektronik yapıları** incelenerek, *elektriksel özellikleri* saptanmakta ve buna bağlı olarak **elektrik ve elektronik malzemeler** seçilebilmektedir. Benzer biçimde, **bir malzemenin** elektrik alanına ya da *manyetik alana tepkisi* saptanarak **manyetik malzeme** seçimi yapılabilmektedir. Elektrik alana tepki **dielektrik özellikler** ve değerler yardımıyla saptanmaktadır. Dielektrik malzemelerin diğer özelliklerini kutuplaşma, piezoelektrik ve ferroelektrik özellikler belirlemektedir.

Optik, ısıl ve elastik özellikler, bir malzemenin yaydığı ya da aldığı elektromanyetik enerji parçacıklarının dalga yapısı ve/ya da etkileşimiyle ilgilidir. Frekans, dalga boyu ve elektromanyetik enerji kaynakla ilgilidir. Kaynağın yaydığı enerji türüne göre malzemede bazı kalıcı ya da geçici değişimler ortaya çıkar.

! !!!!!! asetat el yazısı notlar 2 sayfa

# ELEKTRONİK MALZEMELER

***Bugün*** *elektronik malzemeler denilince akla ilk gelenler "elektronik" seramik malzemeler olmaktadır. Bu konuda "elektriksel özellikler" temel rol oynamaktadır*.

**Elektronik seramikler**, ileri teknoloji malzemelerinin en fazla uygulama alanı bulan grubunu oluşturmaktadır. Bu amaçla seramikler kullanılmaktadır. 1985 yılında üretilen *ileri seramiklerin % 90 'ından* fazlasını elektronik seramikler oluşturmaktadır. Elektronik seramikler en çok, integre devrelerin bir araya getirildiği taban(substrate) malzemesi olarak tercih edilmektedir.

Bu amaçla kullanılacak malzemelerde **ohm yasası**, band teorisi gibi temel konuların çok iyi anlaşılması gerekmektedir.

Bu amaçla kullanılacak malzemelerin **çok saf olması ve** bunların **çok iyi** bir şekilde **karıştırılmaları** gerekmektedir. Ayrıca, özellikle çok ince ve ufak parçaların üretimi için *gelişmiş şekillendirme yöntemlerine* gerek vardır. *Bileşimin yanısıra, kristal yapısının, tane sınırlarının, boşluk miktarının ve yüzey yapısının çok iyi denetlenmesi* gerekmektedir. Aşağıdaki Çizelge 4.1 'de belli başlı yapılar ve kullanım alanları gösterilmektedir.

***Bu bölümde, Çizelge 4.1 de adı geçen ve çok yaygın kulanılan bazı malzemeler hakkında bilgi verilecek, "elektriksel özellikler" nedeniyle en çok kullanılan malzeme türü olduğunda, temel elektriksel bilgiler incelenecektir.***

# ÇİZELGE 4.1 Elektronik seramikler ve sınıflanması

| İşlev | Malzeme ve durumu* | Ugulama |
|---|---|---|
| İzolasyon | $Al_2O_3$(st,sc)<br>SiC(+BeO, st)<br>C (elmas, sc, fl) | IC taban |
| Dielektrik | $BaTiO_3$ (st) | Kapasitör |
| Piezoelektrik | $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (st,pl)<br>ZnO (fl,or)<br>$SiO_2$ (sc)<br>PZT (pd, PVDF içinde gömülmüş) | Piezoateşleyici, piezofiltre<br>Yüzey dalga transducer<br>Piezo-vibratör<br>Esnek piezodedektör |
| Piroelektrik | PZT (sc,pl) | IR dedektör |
| Ferroelektrik | PLZT (sc,pl) | Optik kapak<br>Optik bellek |
| Yarı-iletken | SiC (st), $LaCrO_3$ (st)<br>$SnO_2$ (st,po)<br>Geçiş metal oksitleri (st)<br>ZnO (+$Bi_2O_3$, st)<br>$BaTiO_3$ (+$La_2O_3$, st) | Isıtıcı, elektrot<br>Gaz dedektör<br>Termistör<br>Varistör<br>PTC-termistör |
| İyonik İletken | β-$Al_2O_3$ (st)<br>$ZrO_2$ (+$Y_2O_3$, st) | Na-S pili<br>$O_2$ sensörü |
| Elektron yayınımı | $LaB_6$ (sc) | Elektron ışını katodu |
| Lüminesans | $Y_2O_2S$ : Eu (pd)<br>$ThO_2$ : Nd (st)<br>$Al_2O_3$ : Cr (sc) | Katod lüminesans<br>IR lazer<br>VL lazer |
| Translusans | $Al_2O_3$ (+MgO, st)<br>$SnO_2$ (fl) | Sodyum lamba tüpü<br>Translusent elektrot |
| Polarizasyon | PLZT (st, pl) | Optik kapak |
| Harmonik olmayan osilasyon | $Ba_2NaNb_5O_{15}$ (sc) | IR dedektör |
| Işık kılavuzu | $SiO_2$ (b)<br>$SiO_2$-$GeO_2$ (fb) | Optik fiber |
| Yumuşak manyetizma | $Zn_{1-x}.Mn_xFe_2O_4$ (st,sc)<br>γ-$Fe_2O_3$ (pd) | Manyetik kafa<br>Manyetik band |
| Sert manyetizma | $SrO.6Fe_2O_3$ (st)<br>$SrO.6Fe_2O_3$ (pd, lastik içine gömülmüş) | Mıknatıs<br>Mıknatıs seal |
| Yansıtma | $SnO_2$ (fl)<br>$TiO_2$ (fl)<br>Ferrit (fl) | Enerji tasarrufu sağlayan plaka cam |

* fb = fiber, fl = film, po = tercihli yükleme, pd = toz, pl = polarize, po = gözenekli,
sc = tek kristal, st = sinterlenmiş kitle

## MALZEMELERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Pek çok uygulamada malzemelerin **elektriksel davranışı mekanik davranışlarından daha önemlidir.**
Uzun mesafelere akım *ileten metal tel*, ısınma sonucu oluşan güç kaybını azaltmak için yüksek bir elektrik iletkenliğe sahip olmalıdır.
*Seramik yalıtkanlar, iletekenler arasındaki arkı* önlemelidir.
Güneş enerjisini elektriksel güce dönüştürmek için kullanılan *yarıiletken cihazlar*, güneş hücreleri uygulanabilir alternetif bir enerji kaynağı yapmak için mümkün olduğu kadar etkin olmalıdır.
**Elektrik ve elektronik uygulamalar için malzeme seçmek ve kullanmak elektrik iletkenliği gibi özelliklerin nasıl üretildiğinin ve denetlendiğinin anlaşılmasını gerektirir**. Ayrıca, elektriksel davranışın, malzeme yapısından, malzemenin işlenişinden ve malzemenin maruz kaldığı çevreden etkilendiği bilinmelidir. Bu nedenle malzemelerin **atomik yapı ve eletronik düzenlerinin** iyi bilinmesi, temel elektrik yasalarının hatırlanması gerekmektedir.
Çizelge 14.2 ‘de bazı element gruplarının elektronik yapıları ve elektriksel özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 17-2 s.512 erdoğan cilt 2
(1 sayfa)
ÇİZELGE 4.2

Bu amaçla **elektrik iletimi ile temel kavramlar**, özellikle metaller üzerinde, incelenecektir. Daha sonra, ***katışkıların, alaşım elementlerinin ve sıcaklığın*** elektriksel iletekenlik üzerindeki etkileri ile katışkıların ve sıcaklığın ***yarı iletken*** malzemelerdeki elektrik iletkenliğine etkisi incelenecektir.

### Metallerde elektrik iletimi

**Metalik katılarda atomlar kristal yapıda** (YMK, HMK, SDH) dizilir ve birbirlerine en dış değerlik elektronlarının oluşturduğu **metalik bağla** bağlanır. Katı metallerdeki bağda elektronlar belirli bir atoma bağlı olmayıp birçok atom tarafından paylaşıldığından, metalik bağda **değerlik elektronları** serbestçe

hareket eder . Bazı durumlarda elektronların bir *elektron bulutu* oluşturduğu, bazı durumlarda ise elektronların kendi başlarına *serbest elektronlar* olduğu, herhangi bir atoma bağlı olmadığı varsayılır.

Geleneksel modelde, malzemede yük taşıyıcı sayısı denetlenerek elektriksel iletkenlik denetlenebilmektedir. **Elektronlar (*dış değerlik elektronları*), iletkenlerde, yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda yük taşıyıcılardır.**
**İyonik bileşiklerde** ise, yükü iyon taşır.
Hareketlilik, atomik bağa, kafes düzensizliklerine, mikroyapıya ve iyonik bileşiklerde difüzyon hızına bağlıdır.

Şekil 17-2 s.507 erdoğan
Kınıkoğlu şekil 5.2 s.171
ŞEKİL 4.1

Oda sıcaklığında ***artı yüklü*** iyonları kafes üzerindeki yerlerinde titreştiren ***kinetik enerjiye*** sahiptir. Sıcaklık arttıkça iyonların titreşme genlikleri artar ve ***iyonlarla değerlik elektronları arasında sürekli bir enerji değişimi*** vardır.
Bir elektrik potansiyelinin ***yokluğunda***, değerlik elektronlarının hareketi rastgele ve sınırlıdır, dolayısıyla, herhangi bir yönde *net elektron akışı ve elektrik akımı yoktur.*
Bir ***elektrik potansiyelinin uygulanması*** halinde elektronlar, uygulanan alanla orantılı fakat zıt yönde bir ***sürüklenme hızı*** kazanır.

**Ohm yasası – elektriksel iletkenlik**

Bir bakır telin uçlarına bir pil bağlandığında**,** R direncindeki telden, uygulanan V potansiyeline bağlı olarak, bir I akımı geçecektir. ***Elektriksel iletkenlik***, **ohm yasasından** yola çıkılarak saptanabilir.

$$V = IR$$

Burada, V (gerilim farkı) : volt(V), I (elektrik akımı) : amper(A) ve R(telin direnci) : ohm(Ω) ‘dur.
***Direnç*** malzeme özelliğine, yani elektrik özdirencine, bağlıdır.

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A}$$

Burada; l = iletkenin boyu, m; A = iletkenin kesit alanı, $m^2$ ; ρ = iletkenin özdirenci, ohm.m

$\sigma = 1/\rho$ = öziletkenlik, $ohm^{-1}.m^{-1}$

Elektrik iletkenliğinin birimi $(ohm\text{-}metre)^{-1} = (\Omega.m)^{-1}$ 'dir.
SI birimiyle ohm 'un tersi siemens 'tir.
Çizelge 4.2 'de görüldüğü gibi saf altın, gümüş ve bakır en iyi iletken, $10^7(\Omega.m)^{-1}$, metallerdir. Buna karşın polietilen, polistiren gibi ***elektrik yalıtkanları*** $10^{-14}$ $(\Omega.m)^{-1}$ civarında çok düşük bir iletekenlik gösterirler. Silisyum ve germanyum, metaller ve yalıtkanlar arasında bir iletkenlik gösterdiklerinden ***yarı iletkenler*** diye adlandırılırlar.

Bu iki eşitlikten ohm kanunun ikinci biçimi elde edilir.

$$\frac{l}{A} = \sigma \frac{V}{l}$$

J(akım yoğunluğu,$A/cm^2$ ) = I/A ve ξ (elektrik alanı, V/m)= V/l ise
(*Bazı kitaplarda ξ yerine E kullanılmaktadır*)

$$J = \rho\xi \qquad \text{elde edilir.}$$

$$J = nq\bar{v}$$

Burada; n = yük taşıyıcılar sayısı (taşıyıcılar/$m^3$ ) , q = her taşıyıcı üzerindeki yük ($1.6x10^{-19}$ C) ve $\bar{v}$ = ortalama sürüklenme hızı, m/s

$$\sigma = nq\frac{\bar{v}}{\xi} \quad ; \quad \mu = \frac{\bar{v}}{\xi} \text{ ve } \boxed{\rho = nq\mu} \text{ elde edilir.}$$

(*İletkenlik α yük sayısı)*

Burada; μ = hareketlilik $[m^2.(V/s)^{-1}]$ olup, elektriksel iletkenliğin ölçüsüdür.
Bu son eşitlikler ohm yasasının *boyutlu biçimi* olarak adlandırılmaktadır.

**Metallerin enerji kuşağı modeli (Band kuramı)**

Metallerde **elektrik iletiminin mekanizmasının** anlamaya yardımcı olduğundan, önce katı metallerdeki elektronların kuşak modelini(band kuramı) gözden geçirelim.

Atomların elektronları, pauli ilkesine göre, farklı enerji seviyelerini doldurmaktadır. 1 atom, 2 atom ve N atom içermesine göre, enerji bandları birbiri içine karışarak genişler.

Şekil 17-3 s.509 erdoğan
ŞEKİL 4.2

Na(sodyum) atomu için durum Şekil 4.3 'de özetlenmektedir.

Kınıkoğlu s. 179 şek.5.10
Şekil 17-4 ve 17-5 s.510 erdoğan
ŞEKİL 4.3

Burada, gölgeli alanlar, enerji seviyeleri elektronlarla tamamen doldurulmuş band kısmını göstermektedir. $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$ eletronları çekirdeğe sıkı bağlıdır ve sodyumun **çekirdek elektronlarıdır**. En dıştaki 3s valans bandının en düşük enerjili yarısı doludur. Bu nedenle $3s^1$ elektronu **değerlik elektronu** adını alır.

Bir **katı metal parçasında metal atomları birbirine değecek kadar** yakındır. *Değerlik elektronları sadece kendi atomlarına ait olmakla kalmazlar, birbirlerini etkilerler*(Şekil 4.4),

KINIKOĞLU S. 180 ŞEK.5.11
ŞEKİL 4.4

*ve birbirlerinin arasına karışırlar*; bu nedenle, başlangıçtaki keskin enerji düzeyleri ***enerji kuşakları*** haline genişler. Değerlik elektronları tarafından çevrilmiş **içteki elektronlar kuşak oluşturmaz**. Metale doğru hareket eden bir elektron, valans bandında yüksek bir seviyeyi doldurmak için yeterli enerjiyi kazandığında elektriksel yükü iletir. Elektron, elektrik alanının hareketi ve dayanımı ile belirlenen bir hızda hareket eder ve devrenin pozitif ucuna doğru hızlanır. Alkali metallerin, iyi elektrik iletkenliği yarı dolu s bandından kaynaklanır(Çizelge 4.2).

Şekil 4.5, metalik sodyumun enerji kuşağı çizgesinin bir kımını, atomlar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak vermektedir.

Kınıkoğlu s.181 şek.5.12

Şekil 4.5

Katı sodyum metalinde 3s ve 3 p enerji kuşakları birbiri üzerine biner. Fakat sodyum atomunda sadece bir 3s elektronu olduğundan bu kuşağın yarısı doludur(Şekil 4.6).

Kınıkoğlu s.181 şek.5.13

ŞEKİL 4.6

Bunun bir sonucu olarak sodyumdaki elektronları, dolmuş en yüksek durumdan boş en düşük duruma uyarmak için çok az enerji gerekir. Dolayısıyla, içinde elektron akışını sağlamak çok az enerji gerektirdiğinden sodyum iyi bir iletkendir. Bakır, gümüş ve altının dış s kuşakları da yarı doludur.

Metal magnezyumda her iki 3s durumu da doludur. Fakat, 3s kuşağı 3p kuşağıyla üst üste geldiğinden (çakıştığından) bazı elektronlar 3p kuşağına geçerek kısmen dolu bir 3sp bileşik kuşağı yaratırlar (Şekil 4.6).
Bunun içindir ki dolu 3s kuşağına rağmen magnezyum iyi bir iletkendir. Aynı şekilde, alüminyumun hem 3s hem de 3p durumları dolu olduğu halde, kısmen dolmuş 3p kuşağı dolu 3s kuşağıyla çakıştığından alüminyum iyi bir iletkendir.

Çizelge 4.2 ‘den görüldüğü gibi, diğer metallerin **iyi elektrik iletkenlikleri** ise, dolu olan s bandları yanında, dolu olmayan p ya da d bandlarının enerjilerinin s **bandları üzerine binmesi** ve bir birleşmenin oluşması nedeniyledir.

Şekil 17-7 s.513 erdoğan

ŞEKİL 4.7

Şekil 4.8 ‘de ise bir elektronun değişik kristal yapılarda, sıcaklığın etkisiyle, hareketi özetlenmiştir.

s.515 şekil 17-9 erdoğan

ŞEKİL 4.8

Çünkü, sıcaklık arttıkça atom titreşimlerinde de artış söz konusudur. Ve özdirenç sıcaklığa aşağıdaki eşitlikle bağlıdır.

$$\rho = \rho_r (1 + a\Delta T)$$

Burada; a = bir katsayı, $\rho_r = 25\ ^oC$ deki özdirenç 'tir.

**Yalıtkanların enerji kuşağı modeli**

Yalıtkanlarda, **değerlik elektronları iyonik ya da ortaklaşım bağıyla atomlarına sıkı bir şekilde bağlı olduklarından**, yüksek düzeyde enerji $E_a$ verilmediği takdirde serbest hale geçerek elektriği iletemezler. Bir yalıtkanın elektrik kuşağı modeli, aşağıda bir dolu değerlik kuşağı ve yukarısında bir boş iletim kuşağı şeklindedir ve değerlik kuşağı iletim kuşağından yaklaşık **6-7 eV** değerinde bir enerji aralığıyla ayrılmıştır. Bu nedenle, bir yalıtkanın elektriği iletebilmesi için değerlik elektronlarının aralığı atlamasına yetecek **kadar büyük bir enerji** altında olması gerekir.

Kınıkoğlu şek.5.14
ŞEKİL 4.9

**Katıksız yarı iletkenler**

Katıksız yarı iletkenler elektrik iletimleri kendine ait iletim özellikleriyle belirlenen saf yarı iletkenlerdir. **Saf silisyum ve germanyum** bu tür iletekenlerdir. IVA grubunda bulunan bu elementler **yüksek yönlenmişlikteki ortaklaşım bağlarıyla kübik elmas** yapısındadır.
Bu yapıda her bir silisyum ve germanyum atomu **dört değerlik elektronunu** verir. Şekil 4.10 'da durum çizgi resimle özetlenmiştir.

Kınıkoğlu s.182 şek.5.15
Şekil 5.16 s.183 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.10

Katıksız yarı iletkenlerde, **değerlik ve iletim kuşakları** arasında **0.7 ile 1.1 eV** arasında değişen, nispeten küçük bir enerji aralığı bulunur.
Katıksız yarı iletkenler **katışkı atomlarıyla katkılanarak katkılı yarı iletkenler** haline getirildiklerinde elektrik iletimin sağlamak için gerekli enerji büyük çapta azalır.

**Katkılı yarı iletkenler**

Katkılı yarı iletkenler **çok seyreltik asalyer katı çözeltileridir** ve çözünen katkı atomları çözen **atom kafesinden farklı değerliğe** sahiptir. Bu yarı iletkenlere

katılan katkı atomlarının derişimi çoğunlukla 100-1000 parça/milyon(ppm) arasındadır.

Katkılı yarı iletkenler **n-türü ya da p-türü** olarak iki türdür**.**
**n-türü(eksi) yarı iletkenlerin** çoğunluk taşıyıcıları *elektronlardır.* **P, As ve Sb** gibi grup VA katkı atomları silisyum ya da germanyuma katıldığında elektrik iletimi için kolaylıkla iyonlaşan elektron verirler. Bu atomlar *verici katkı atomları* olarak bilinir.

Kınıkoğlu s.190 şek. 5.21
S.191 ŞEK.5.22
ŞEKİL 4.11

**Bor** gibi üç değerlikli bir IIIA grubu elementi silisyumun dörtyüzlü bağının kafesine asal yer olarak girecek olursa bağ yörüngemsilerden birisi eksi olacak ve silisyumun bağ yapısında bir delik meydana gelecektir.
**p-türü (artı) yarı iletkenlerde** *delikler* (yerinde olmayan elektronlar) çoğunluk taşıyıcılarıdır. Yeterli enerjiye sahip bir diğer elektron bu boşluğa hareket edecektir.

Kınıkoğlu s.192 şek.5.24 ve s.193 şek.5.25
ŞEKİL 4.12

**Yarı iletken devre elemanları**

**Elektronik sanayinin** gelişmesinde en önemli pay **yarı iletken kullanımından** dolayıdır. Bilgisayarlarda bu uygulama ile, 1994 yılında geliştirilmiştir, 1 $cm^2$ 'lik ve 200 μm kalınlıkta bir yongaya silisyum asıllı yarı ileteken elektrik devrelerin binlercesinin konulması bu işin temelini oluşturmuştur.

**Silisyum** gibi bir yarı iletkenden tek kristalde pn eklemleri oluşturularak çeşitli yarı iletken devre elemanları yapılabilir. Bu elemanlar p-türü ve n-türü malzemeler arasındaki sınırın özelliğinden yararlanmaktadır. Örneğin pn eklem diyotları ve npn transistorları bu tür eklemler kullanılarak üretilir. Bir pn eklam diyotu, bir katıksız silisyum tek kristali büyütülerek ve daha sonra bu kristali önce n-türü bir malzemeyle, ardından p-türü bir malzemeyle katkılayarak üretilebilir(Şekil 4.13).

Kınıkoğlu s.199 şek.5.28
s.200 şek.5.29
ŞEKİL 4.13

Fakat, pn ekleminin daha yaygın bir üretim yöntemi, bir tür katkının (örneğin p-türü) varolan bir n-türü malzemeye katı halde yayındırılması şeklindedir(Şekil 4.13).

**Si ve Ge bugün elektronik sanayinde kullanılan eşsiz birer yarı iletkendir**. 1990 'lı yıllardan sonra inanılmaz bir atılım gerçekleştirilmiştir.

## ELEKTRONİK MALZEMELER ve KULLANIM ALANLARI

Belli başlı kullanım alanları,

1) Seramik taban malzemeleri
2) Piezoelektrik seramikler
3) Taneleri yönlendirilmiş seramikler
4) Piezoelektrik ince filmler
5) Piroelektrik malzemeler
6) Seramik katı elektrolitler

şeklinde yaygındır.

### Seramik taban malzemeleri (substrate 'ler)

Günümüzde, **integre devrelerin bir araya getirilerek monte edildiği** zemin, ya plastik ya da seramiktir.
Son yıllarda geliştirilen integre devreler küçülmüş ve hızları artmış olup, bunun sonucu açığa çıkan ısı da artmıştır. Bu nedenle seramik taban malzemelerinin önemi artmıştır.
İyi bir seramik malzemede(4 özellik); **iyi elektrik izolasyonu, kimyasal kararlılık, yüksek ısı iletimi ve dayanım, yarı-iletken malzeme ile ısıl genleşme katsayılarının** uyumlu olması gerekliliği gibi özellikler ön plana çıkmaktadır. Bir malzemede tüm bu özellikleri sağlamak olanaklı değildir.

Bununla beraber, (1)**% 94-99,5 saflıktaki $Al_2O_3$** bu özellikleri çok büyük oranda karşılayabilmektedir.
Ancak, **çok gelişmiş sistemlerde** açığa çıkan ısının çok olması bu malzemenin de yetersiz olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, $Al_2O_3$ yanında,(2) **% 5 ten çok olmamak koşuluyla, BeO kullanılarak** bu sakınca azaltılabilmektedir.
**BeO ısı iletkenliği yüksek, elektrik özellikleri çok iyi** bir bileşiktir.
Daha yeni uygulamalarda da**, (3)alüminyum nitrür ve (4)silisyum karbür karışımları** kullanılmaktadır.
Çizelge 4.3 'de bazı taban seramikleri ve özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 **Bazı taban seramikleri** ve özellikleri

| Malzeme | Isı İletkenliği, W/m.K | Isıl genleşme katsayısı, $x10^{-6}/K$ | Elektriksel direnç, Ω.cm | Dielektrik sabiti, 1 MHz 'de |
|---|---|---|---|---|
| Yeni SiC | 270 | 3,7 | $> 10^{13}$ | 45,15 |
| Yapısal SiC | 60-80 | 4,2 | $< 10^{3}$ | - |
| BeO (% 99,5) | 240 | 7,5 | $> 10^{14}$ | 6,7 |
| $Al_2O_3$ ( % 92) | 17 | 6,5 | $> 10^{14}$ | 8,5 |
| AlN | 100 | 4,5 | $> 10^{14}$ | 8,8 |
| Al | 239 | 26,5 | $2,7x10^{-6}$ | - |
| Si | 125 | 3,5 | $10^{-3}$ - $10^{3}$ | 12 |

BeO 'in ısıl iletkenliği % 99 saflıktaki alüminyumdan sekiz kat daha iyidir.
BeO seramiklerinin ısıl genleşmesi, yarı-iletken silisymunkinden iki kat fazladır. Bu nedenle BeO taban üzerine yerleştirilen Si yongasının bağlantı yerlerinde genleşmeler, deformasyonlar oluşmaktadır.

## Piezoelektrik seramikler

**Piezoelektrik malzemeler**, ***sıkıştırıldıklarında***, *mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ya da, elektrik gerilimi uygulandığında, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren akustik aygıtlardır.*
Piezoelektrik aygıtlar, ivmemetreler, **basınç sensörleri**, otoların antiknock ve çok sayıda diğer sensör uygulamalarında kullanılmaktadır.

**Akustik uygulamalar**, transmitter'leri, alıcıları, **ultrasonik uygulamaları** ve bazı mikrofonları içermektedir.

**$PbTiO_3$**, ***kurşun titanat*** **düşük dielektrik sabite (~190), yüksek mekanik kalite, kararlılık ve Curie sıcaklığına (~490 $^oC$)** sahip olması nedeniyle, **yüksek frekans ve yüksek sıcaklık** uygulamaları için arzu edilen piezoelektrik malzemedir.

***$PbTiO_3$ içerisinde Ti yerine az miktarda Nb ya da Ta eklenmesi, nispeten yoğun (~ % 90 teorik) $PbTiO_3$ seramiklerin üretiminde etkin bir rol oynamaktadır. Bunun yanında, kübik yapıdan tetragonal yapıya dönüşümde oluşan ani deformasyon nedeniyle $PbTiO_3$ seramikleri poroz ve gevrektir.***

Poisson sayısının düşük olması nedeniyle $PbTiO_3$ seramikler üçüncü harmonik mod 'da **vibrasyon enerjisini yutabilmektedir**. Böylece yüksek frekans rezonatörlerinde kullanılmaya uygundur.

**Taneleri Yönlendirilmiş Seramikler**

**Antimon sülfür iyodür** (SbSI) gibi **bazı kristaller**, c-ekseni yönünde *ince iğne biçiminde büyür* ve bunlar "doktor-blade" döküm yönüne paralel ve sıcak presleme yönüne dik olacak şekilde **yönlenerek** kuvvetli **anizotropik ve piezoelektrik özellik** gösterirler.
Bu malzemeler, elektromekanik transdüzerler için çok kullanışlıdır.
Taneleri yönlendirilmiş seramikler, Bi tabaka tipi ferrolektrik malzemeler ($PbBi_2Nb_2O_9$) ve volfram-bronz yapısına sahip oksitler $(Sr,Ba)Nb_2O$ tarafından üretilmektedir.

**Piezoelektrik ince filmler**

CdS, ZnO, PbTiO, AlN, PLZT, $LiNbO_3$, $Bi_{12}PbO_{19}$ ve $K_3Li_2Nb_5O_{15}$ gibi çeşitli **piezoelektrik filmler** geliştirilmiştir. Bunlardan ZnO ve AlN, ya **tek-kristal** olarak ya da c-ekseni **yönlendirilmiş piezolelektrik film** olarak üretilmelidir. Bu nedenle, CVD ya da reaktif moleküler film epitaksi yöntemleri ile üretimleri söz konusudur. Yönlendirilmiş ZnO filmleri, cam, ergimiş kuvars, silisyum, safir ve metal substrate üzerine sentezlenebilmektedir. İnce film halinde AlN, "surface acoustic wawe" (SAW) gibi **yüksek frekans uygulamaları için en uygun malzemelerden birisidir.**

## Piroelektrik seramikler

Trigliserin sülfat, infrared ışın hedefi olarak, $LiTaO_3$, $Pb(Zr,Ti)O_3$ infrared sensör olarak mutfak fırınlarında, otomatik kapı sistemlerinde ve gizli giriş alarmlarında kullanılmaktadır.

## Seramik katı elektrolitlerin metallurjik işlemlerde kullanımı

**Oksijen iyonunun taşınmasına dayanan katı elektrolitler**, oksijen içeren sistemlerde, termodinamik ve kinetik özelliklerin saptanmasına yönelik temel araştırmalarda geniş biçimde kullanılmaktadır.
Katı elektrolitler, **yüksek sıcaklık** yakıt hücrelerinde, yanma kontrolunda ve oksijen sensör olarak tıpta ve metallurji sanayinde kullanılmaktadır.

Şekil 9-4 s.204 geçkinli
ŞEKİL 4.14

Katı elektrolitler, **kübik yapıda olan $ZrO_2$, $HfO_2$, $ThO_2$ ve $CeO_2$ katı eriyikleridir.** Bu katı eriyiklerden herhangi birinin kullanımında, sistemde toprak alkali, nadir toprak ya da $Y^{+3}$ iyonları ile dop edilerek oksijen boşluklarının oluşması sağlanır. Metallurjik uygulamalarda aşağıda belirtilen Zirkonya temelli elektrolitler kullanılmaktadır.

a) Kısmen stabilize edilmiş, içerisinde % 2.5-3 MgO bulunan Zirkonya. Bu problar, ergimiş metaller için uygundur.
b) İçerisinde % 5-7.5 MgO bulunan tamamen stabilize edilmiş Zirkonya. Bu prob, özellikle ticari gaz analizörlerinde kullanılmaktadır.

Diğer taraftan, % 5 CaO ile stabilize edilmiş $HfO_2$ ve % 5-10 Yitria katılmış $ThO_2$ elektrolitler laboratuvar koşullarında çok düşük oksijen potansiyelini ölçmede kullanılmaktadır.

# MANYETİK MALZEMELER
# (*MIKNATISLI MALZEMELER)*

***Bugün "manyetik" ve "mıknatıslı" malzemeler eşanlamlı olup, malzemelerin "manyetik alandaki" davranış özellikleri ile belirlenmektedir.***
***Bu amaçla dikkate alınan en önemli özellik "dielektrik sabiti" dir.***

*Manyetik malzemeler 1930 'lu yıllardan beri kullanılmaktadır.*
*Önceleri,* ***demir metal ve γ-$Fe_2O_3$ tozları*** *kaydedicilerde manyetik malzeme olarak kullanılmıştır.*
*Video kaydedicileri gibi yoğun bilgi kaydı gereksinimi nedeniyle bu amaca uygun olarak* ***$CrO_2$ ve Co ile modifiye edilmiş*** *γ-$Fe_2O_3$ partikülleri geliştirilmiştir.*
*Son yıllarda ise****, baryum ferrit partikülleri*** *manyetik malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Klasik kaydedicilerde kayıt ortamı uzunlamasına olup, kaydetme yoğunluğu mıknatısların uzunluğuna bağlıdır. Oysa, baryum ferrit malzemelerde kayıt ortamı dikine olup, kaydetme yoğunluğu, hegzagonal yapıda çubuk şeklindeki partiküllerin boyutuna bağlıdır. Bu nedenle, kayıt etme özelliği daha yoğundur.*

*Yapılan araştırmalar daha çok partikül boyutlarının mikron altına düşmesi ve 0.1 μm 'nin* ***altında çok ince metal*** *(kobalt) film kaplamaların kullanılması üzerine yoğunlaşmıştır.*

Manyetik malzemeler, özellikle elektrik mühendisliği alanındaki mühendislik tasarımlarının çoğunda kullanılan önemli endüstriyel malzemelerdir. Genel olarak **iki ana sınıfa** ayrılırlar:

- *Yumuşak mıknatıslı malzemeler* ya da *yumuşak mıknatıslar*
- S*ert mıknatıslı malzemeler* ya da *sert mıknatıslar*

***Yumuşak mıknatıslı malzemeler***, güç transformatörleri göbekleri, küçük elektronik transformatörleri, motorlar ve üreteçlerin stator ve rotorları gibi, **kolaylıkla mıknatıslanabilen ve mıknatıslığı giderilebilen** malzemelerin gerektiği yerlerde kullanılır.

Buna karşılık, mıknatıslığı kolayca giderilemeyen ***sert mıknatıslı malzemeler*** , **kalıcı mıknatıslık** gerektiren yerlerde, örneğin hoparlör, telefon alıcıları, eşzamanlı ve fırçasız motorlar, otomotiv başlatıcı motorlarında kullanılır.

# TEMEL KAVRAMLAR

## Mıknatıslı Alanlar

Manyetik malzemeler üzerindeki çalışmalar mıknatıslık ve mıknatıslı alanlarla ilgili temel özelliklere dayanmaktadır. ***Demir, kobalt ve nikel***, oda sıcaklığında mıknatıslandığında, çevrelerinde güçlü bir mıknatıs alanı yaratan üç metalik elementtir ve ***asal mıknatıslar*** diye adlandırılır. Altında mıknatıslanmış bir demir çubuk bulunan bir kağıdın üzerine serpilen küçük demir tozlarının dağılması ***mıknatıs alanın varlığını*** gösterir. **Mıknatıslanmış çubuk iki kutba** sahiptir ve **mıknatıs çizgileri bir kutuptan** çıkıp diğerine girer.

*Genel olarak, **doğada mıknatıslık çift kutuplu olup**, bugüne kadar tek kutuplu mıknatıs bulunamamıştır.
* Bir mıknatıs alanın, birbirinden belirli bir uzaklıkla ayrılmış iki mıknatıs kutbu ya da merkezi vardır ve bu çift kutup davranışı, bazı atomlarda bulunan, küçük, mıknatıslı çift kutuplara kadar gider.

**Mıknatıslı alanlar akım taşıyan iletkenler tarafından** da oluşturulur.
***Sarmal (solenoid)*** adı verilen, uzunluğu yarıçapına oranla çok uzun bir bakır **sargı** etrafındaki mıknatıslı alanın nasıl oluştuğu aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

Şekil 11.3 s.621 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.15

Sarım sayısı $n$ ve uzunluğu $l$ olan bir sarmalın $H$ mıknatıslı alan şiddeti

$$H = \frac{0.4\,\pi\,ni}{l}$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada, $i$ akımdır.
H nin birimi SI sisteminde amper/metre (A/m) , cgs birimi ise oersted(Oe) 'dir.

1 A/m = 4 $\pi$ x$10^{-3}$ Oe

**Mıknatıs akısı yoğunluğu(manyetik endüksiyon)**

**Mıknatıslığı giderilmiş bir demir çubuk, yukarıdaki şekilde olduğu gibi, sarmal içine yerleştirilirse** ve **akım uygulanırsa**, sarmal dışındaki mıknatıs alanın, sarmal içinde demir çubuk varken daha güçlü olduğu görülmektedir.
Burada sarmal alan ile mıknatıslanmış demir çubuğun mıknatıs alanları toplam etkisi gözlenmektedir. Bu toplam mıknatıs alanı ***mıknatıs akısı yoğunluğu*** ya da *akı yoğunluğu* diye adlandırılır ve *B* simgesiyle gösterilir.

*B*, uygulanan mıknatıs alanı H ile, sarmal içindeki çubuğun mıknatıslanması sonucu oluşan alanın toplamıdır. Çubuk nedeniyle birim hacimde oluşan mıknatıs momenti *mıknatıslanma şiddeti* ya da sadece *mıknatıslanma* diye adlandırılır ve M ile gösterilir. SI birim sisteminde,

$$B = \mu_o H + \mu_o M = \mu_o (H+M)$$

$\mu_o$ = boşluğun geçirgenliği = 4 $\pi$ x $10^{-7}$ tesla-metre/amper (T.m/A) 'dir.
$\mu_o$ sadece bu eşitlikte kullanılabilen ve fiziksel anlamı olmayan bir simgedir.
SI birim sisteminde, B, Weber/metrekare ( $W/m^2$ ) ya da T 'dir. (1 Wb = 1 V.s)
H ve M için, birim A/m 'dir. Cgs birim sisteminde ise, B için, gauss(G), H için (Oe) kullanılır.

**Genel olarak, asal mıknatıslarda, M >> H olduğundan, B ≈ $\mu_o$M eşitliği geçerlidir.**
**Bu durumda B ve M değerleri birbiri yerine kullanılabilmektedir**.

**Mıknatıs Geçirgenliği**

**Bir asal mıknatıs mıknatıs alanı içine konulduğunda mıknatıs alanın yoğunluğu artar**. Mıknatıs alandaki **bu artış *mıknatıs geçirgenliği*** $\mu$ adı verilen nicelikle ölçülür ve mıknatıs akısı yoğunluğunun uygulanan alana oranıyla bulunur.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Uygulanan alanda sadece boşluk varsa,

$$\mu_o = \frac{B}{H}$$

olur. $\mu o = 4\ \pi\ x10^{-7}$ T.m/A olarak boşluk geçirgenliği olarak bilinir.

Mıknatıs geçirgenliği için bir başka tanım,

$$\mu_b = \frac{\mu}{\mu_o} \quad \text{ve} \quad B = \mu_o\ \mu_b\ H \qquad \text{ile verilir.}$$

$\mu_b$ boyutsuz bir gruptur.

***Asal mıknatısların bağıl geçirgenliği malzeme mıknatıslandıkça değişir***.
Bu nedenle, genellikle, bağıl geçirgenlik ya başlangıç geçirgenliği $\mu_i$ ya da en büyük geçirgenlik $\mu_{enb}$ cinsinden ölçülür. Bu değerler B - H mıknatıslanma eğrisinin eğimlerinden bulunur.
**Kolayca mıknatıslanan mıknatıslı malzemeler yüksek mıknatıs geçirgenliğine sahiptir**.

***Mıknatıs duyarlığı***

***Mıknatıs malzemenin mıknatıslığı uygulanan alanla orantılı olduğundan, orantı faktörü mıknatıs duyarlığı $\chi_m$, boyutsuz bir büyüklüktür ve***

$$\chi_m = M / H$$

***şeklinde tanımlanır.***

*Malzemelerin zayıf mıknatıslı tepkileri çoğunlukla mıknatıs duyarlığı cinsinden ölçülür.*

## MIKNATISLANMA TÜRLERİ

**Mıknatıs alanları ve kuvvetleri, temel elektrik yük olan elektronun hareketinden kaynaklanmaktadır**.

Elektronlar iletken bir telde hareket ederken, yukarıdaki şekilde olduğu gibi, bir mıknatıs alanı oluşturur. ***Malzemelerdeki mıknatıslanma elektronların hareketlerine de bağlıdır***, fakat, bu durumda, mıknatıs alanları ve kuvvetleri
$1^o$ elektronların kendi etraflarındaki dönüşlerinden ve
$2^o$ çekirdek çevresindeki yörüngesindeki dönüşlerinden, kaynaklanmaktadır.

Şekil 11.5 s. 624 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.16

**Eksi duyarlı mıknatıslık(diamanyetizm)**

***Bir malzemenin atomlarını etkileyen bir dış mıknatıs alanı, yörüngede dönen elektronların dengesini hafifçe bozar ve atomların içinde uygulanan alana zıt, küçük mıknatıs çiftkutupları yaratır***. Bu olay *eksi duyarlık* diye adlandırılan eksi bir mıknatıs etki yaratır. Eksi duyarlık, $\chi_m \approx -10^{-6}$ değerinde, çok küçük bir eksi mıknatıs duyarlığı oluşturur. Tüm malzemelerde eksi duyarlık bulunmakta, fakat çoğunda artı mıknatıs etkiler tarafından yok edilir. Bu olay mühendislik açısından önemsizdir.

Çizelge 4.4 Bazı eksi duyarlı ve artı duyarlı elementlerin mıknatıs duyarlıkları

| **Eksi duyarlı elementler** | Mıknatıs duyarlığı, $\chi_m$ x $-10^{-6}$ | **Artı duyarlı elementler** | Mıknatıs duyarlığı, $\chi_m$ x $-10^{-6}$ |
|---|---|---|---|
| Kadmiyum | -0,18 | Alüminyum | +0,65 |
| Bakır | -0,086 | Kalsiyum | +1,10 |
| Gümüş | -0,20 | Oksijen | +106,2 |
| Kalay | -0,25 | Platin | +1,10 |
| Çinko | -0,157 | Titanyum | +1,25 |

**Artı duyarlı mıknatıslık (paramanyetizm)**

***Bir mıknatıs alanı altında, küçük bir artı mıknatıs duyarlığı gösteren malzemeler artı duyarlı malzemeler, gösterdikleri mıknatıs etki ise artı duyarlık diye adlandırılır***.
Artı duyalık, atomların ya da moleküllerin mıknatıslı çift kutup momentlerinin *uygulanan alanla aynı yönde dizilmeleri* sonucudur. Uygulanan alan kaldırıldığıda malzemedeli artı duyarlık etkisi yok olur. Artı duyalık, malzemede, $10^{-6}$ – $10^{-2}$ arasında bir mıknatıs duyarlığı oluşturur ve pek çok malzemede görülür.

**Asal mıknatıslık**

Eksi duyarlık ve artı duyarlık, uygulanan mıknatıs alanla ortaya çıkar ve alan olduğu sürece varolur.
*Asal mıknatıslık* diye adlandırılan, **mühendislik açısından çok önemli**, üçüncü tür bir mıknatıslık daha vardır.
**İstendiği zaman oluşturulan ya da kaldırılan büyük mıknatıs alanları, asal mıknatıslar tarafından yaratılır.**
Sanayide en önemli asal mıknatıs elementler **demir (Fe), kobalt (Co) ve nikel** (Ni) ‘dir.
Bir nadir-toprak elementi olan **gadolinyum (Gd),** 16 $^{o}$C ‘nin altında asal mıknatıs olmasına rağmen sanayideki uygulamaları çok azdır.

Fe, Co ve Ni geciş elementlerinin asal mıknatıslık özellikleri, ***iç kabuktaki çiftlenmemiş elektronların dönülerinin kristal kafeslerinde aynı yönde dizilmelerinden kaynaklanmaktadır.***
Her atomun iç kabuğu birbirlerine ters yönde dönüye sahip elektronlarla dolu olduğundan, bunlardan doğan net mıknatıs çift kutup momenti sıfırdır. Katılarda, dış değerlik elektronları birbirleriyle birleşerek bağ oluştururlar, dolayısıyla önemli bir mıknatıs momenti yaratmazlar.
**Fe, Co ve Ni ‘in çiftleşmemiş 3d elektronları, bu elementlerin mıknatıslığının nedenidir**. Demir atomu dört, kobalt üç ve nikel iki tane çiftlenmemiş 3d elektronu içerir.

Şekil 11.6 s.625 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.17

Oda sıcaklığında, katı Fe, Co ve Ni örnekte, komşu atomların 3d elektronlarının dönüleri birbirlerine paralel dizilir ve buna *istemli mıknatıslanma* adı verilir. Ancak, atomların mıknatıs çift kutuplarının bu şekilde paralel dizilmesi, *mıknatısçık* adı verilen mikroskobik mıknatıslı bölgelerde görülür. Eğer

mıknatısçıklar rastgele yönleminde ise kütlede net bir mıknatıslanma görülmeyecektir. Fe, Co ve Ni atomlarının mıknatıslı çift kutuplarının paralel dizilmesi, aralarında oluşan artı değişim enerjisi sonucudur. Bu paralel dizilmenin olması için atomlar arası uzaklığın, 3d yörüngesinin çapına oranının 1.4 – 2.7 aralığında olması ile olanaklıdır.

Şekil 11.7 s.626 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.18

**Bu nedenle, Fe, Co ve Ni asal mıknatıs iken, manganez(Mn) ve krom(Cr) değildir.**

## SICAKLIĞIN ASAL MIKNATISLIĞA ETKİSİ

**0 K üzerideki her hangi bir sıcaklıkta, ısıl enerji, asal mıknatıs bir malzemenin mıknatıslı çift kutuplarındaki mükemmel paralel dizilmeyi bozar**.
Asal mıknatıs malzemelerde mıknatıslı çift kutupların dizilmesine neden olan değişim enerjisi, ısıl enerjinin dizilmeyi rastgele hale getiren etkisini dengeler.

Şekil 11.9 s. 629 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.19

**Sonuç olarak, sıcaklık arttıkça asal mıknatıs bir malzemede asal mıknatıslığı tamamen yok olduğu bir sıcaklığa ulaşılır ve malzeme tümüyle artı duyarlı mıknatıs haline gelir. Bu sıcaklığa *Curie sıcaklığı* denir.**
Curie sıcaklığının üstündeki bir sıcaklıktan soğutulursa, asal mıknatısın mıknatısçıkları yeniden oluşur ve malzeme tekrar asal mıknatıs haline gelir.
Fe, Co ve Ni için Curie sıcaklıkları, sırasıyla, 770, 1123 ve 358 $^{o}$C dir.

## ASAL MIKNATIS MALZEMENİN MIKNATISLANMASI ve MIKNATISLIĞININ GİDERİLMESİ

**Fe, Co ve Ni gibi asal mıknatıs malzemeler, bir mıknatıs alana konulduklarında büyük miktarda mıknatıslanır ve mıknatıs alanı uzaklaştırıldıktan sonra mıknatıslığı az da olsa korurlar.**

Bir asal mıknatıs malzemenin mıknatıslanması ve mıknatıslığının giderilmesi sırasında, aşağıdaki şekilde **H karşı B eğrisiyle** verildiği gibi, uygulanan H alanının B mıknatıs akısı yoğunluğu üzerinde etkisi vardır. Önce, demir gibi asal mıknatıs malzemeyi Curie sıcaklığından üzerinden yavaşca soğutarak mıknatıslığını giderelim. Daha sonra örneğe mıknatıs alanı uygulayarak, uygulanan alanın örneğin mıknatıs akısı yoğunluğuna etkisini görelim.

Şekil 11.18 s.636 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.20

Uygulanan alan sıfırdan yükseldikçe, B, sıfırdan başlayarak OA eğrisi boyunca yükselir ve A noktasında *doyma akısı yoğunluğuna* ulaşır. Uygulanan alan sıfıra düşürüldüğünde dönüş başlangıçtaki mıknatıs eğrisini izlemez., kalıntı akı yoğunluğu $B_k$ (C noktası) denen bir mıknatıs akısı yoğunluğu malzeme üzerinde kalır. Mıknatıs akısı yoğunluğunu sıfıra düşürmek için, $H_b$ miktarında, *baskı kuvveti* denen ters(eksi) bir alan uygulamak gerekir (D noktası). Şayet uygulanan eksi alan daha da arttırılacak olursa, sonunda malzeme ters alanda, E noktasında tekrar doyma akısı yoğunluğuna ulaşacaktır. Ters alanın kaldırılması halinde mıknatıs akısı yoğunluğu F noktasındaki kalıntı akısı yoğunluğuna ulaşacak ve artı alanın uygulanmasıyla, B kş H eğrisi FGA noktalarının takip ederek halkayı kapatacaktır. Ters ve düz alanların doyma akısı yoğunluğuna kadar tekrarlanması halinde ACDEFGA halkası tekrar tekrar çizilir. **Mıknatıslanma eğrisi ya da halkasına *histerezis halkası* adı verilir**, halkanın iç alanı mıknatıslanma ya da mıknatıslığını giderme çevriminde kaybolan enerjinin ya da yapılan işin bir ölçüsüdür.

**YUMUŞAK MIKNATISLI MALZEMELER**

*Yumuşak mıknatıslı malzeme* kolayca mıknatıslanır ve mıknatıslığı giderilir, buna karşılık *sert mıknatıslı bir malzemenin* mıknatıslanması ya da mıknatıslığının giderilmesi güçtür.
İlk yıllarda yumuşak ve sert mıknatıslı malzemeler fiziksel olarak yumuşak ve sert olduklarından bu terimler yerleşmiştir.
Bugün, bu malzemelerin **fiziksel olarak yumuşak ya da sert olmaları zorunlu** değildir. Ancak, mıknatıslanmanın kolaylığı ve güçlüğü anlamındadır.

**Demir - % 3-4 Si** alaşımı gibi yumuşak mıknatıslı malzemeler ya da yumuşak mıknatıslar, transformatör çekirdeklerinde, motorlarda ve jeneratörlerde kullanılmakta olup, düşük baskı kuvvetli **dar bir histerezis halkasına** sahiptir.

Şekil 11.19 s.637 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.21

Diğer taraftan, **kalıcı mıknatısların** yapımında kullanılan sert mıknatıslı malzemeler ya da sert mıknatıslar, yüksek baskı kuvvetli **geniş histerezis** halkasına sahiptir.

**Yumuşak mıknatıslı malzemelerden istenen özellikler**

Bir asal mıknatıs malzemenin yumuşak olması için baskı **kuvvetinin mümkün olduğu kadar düşük olması** istenir. Yani, malzemenin kolayca mıknatıslanabilmesi ve yüksek mıknatıs geçirgenliğine sahip olabilmesi için **histerezis halkası mümkün olduğu kadar ince olmalıdır**. Birçok uygulamada, yüksek bir doyma akısı yoğunluğu da yumuşak mıknatıslı malzemelerde istenen bir özelliktir. Buna göre, çok ince ve yüksek bir histerezis halkası yumuşak mıknatıslı malzemelerin çoğu için istenen bir özellik olmaktadır.

***Yumuşak mıknatıslı malzemelerin enerji kayıpları***

***Histerezis enerji kayıpları*** **:** Nedeni, mıknatıslanma ve mıknatıslığın giderilmesi sırasında, mıknatıscık sınırlarının ileri geri hareketi için gerekli enerjinin harcanmasıdır. Yumuşak mıknatıslı malzemelerdeki **katışkılar, kristal düzensizlikleri ve çökeltiler** mıknatıslanma çevrimi sırasıda mıknatıscık sınırlarının hareketine engel olduklarından, histerezis enerjisi kayıplarını arttırırlar. Yoğruk gerinme, mıknatıs malzemenin aykırı yerleşim yoğunluğunu arttırdığından yine **histerezis kayıplarını yükseltir**.
Genel olarak, histerezis çevrimi sırasındaki enerji kayıplarının bir ölçüsüdür. Elektromıknatıslı cihazların elektrik giriş frekansının yükselmesi (örneğin 50 ‘den 60 çevrim/s ‘ye) histerezis enerji kayıplarını arttıracaktır.

***Girdap akımı enerji kayıpları*** : Mıknatıslı bir iletken çekirdeğe dalgalı akım elektriği girişiyle oluşan dalgalanan bir mıknatıs alanı, elektrik akımı yaratan geçici gerilim eğimceleri oluşturur. Yaratılan bu akımlara girdap akımları adı verilir ve elektrik dirençli ısıtmadaki enerji kayıplarının nedenidir. Elektrik transformatörlerindeki **girdap akımı kayıpları mıknatıs çekirdeği katmanlı ya da saçlardan yapılarak** azaltılabilir. İletken mıknatıslı malzeme arasındaki yalıtım tabakası, girdap akımlarının bir katmandan diğerine geçmesini önler.

Girdap akımlarının azaltmanın, özellikle yüksek frekanslarda kullanılan bir diğer yolu, bir yalıtkan olan yumuşak mıknatıslı bir malzeme kullanmaktır. Bazı yüksek frekans elektromıknatıs uygulamalarında, artı kutuplu mıknatıs oksitler ve ileride anlatılacak olan diğer bazı tür mıknatıs malzemeler kullanılmaktadır.

**Önemli mıknatıs malzeme türleri**
**1) Demir-Silisyum alaşımları**

**En yaygın kullanılan yumuşak mıknatıslı malzemeler demir - % 3-4 silisyum alaşımlarıdır**.
1900 yılından önce transformatörler, motorlar ve jeneratörler gibi düşük frekanslı (60 frekans) güç makinelerinde, düşük karbonlu ***alaşımsız karbon çelikleri kullanılmaktayd***ı. Fakat, bu tür mıknatıslı malzemelerdeki ***çekirdek kayıpları oldukça yüksekti.***

Demir-silisyum alaşımı yapmak amacıyla demire % 3-4 silisyum katılması mıknatıslı malzemelerde **çekirdek kayıplarını azaltıcı etkiler** yapmaktadır.

1. Silisyum, düşük karbonlu çeliğin elektrik direncini arttırmakta, dolayısıyla girdap akımları kaybını azaltmaktadır.

2. Silisyum, demirin mıknatıs yönelim enerjisini azaltmakta, mıknatıs geçirgenliğini arttırmakta, dolayısıyla histerezis çekirdek kayıplarını azaltmaktadır.

3. % 3-4 silisyum katılması aynı zamanda mıknatıs gerinmesini azaltarak da histerezis kayıplarını düşürmekte ve transformatör uğultusunu hafifletmektedir.

Bunun yanında, silisyumun **bazı zararlı etkileri** de bulunmaktadır.
Demirin **sünekliği azalmakta** ve ancak % 4 ‘e kadar Si **demirle alaşım** yapabilmektedir. Aynı zamanda, doyma akısı yoğunluğunu ve demirin **Curie sıcaklığını azaltmaktadır.**

Transformatörlerin **girdap akımı kayıplarını azaltmanın bir diğer yolu da üst üste konmuş saçlar** kullanmaktır. Modern güç transformatörlerinin çekirdekleri, *aralarında ince bir yalıtkan tabaka* yerleştirilmiş 0.025 - 0.035 cm

kalınlığında, ince demir-silisyum saçların üst üste konmasıyla yapılır. Bu saçların her iki tarafına kaplanan ince yalıtkan malzeme, girdap akımlarının saca dik olarak hareket etmesini önlemektedir.

1940 'ta elde edilen bir diğer gelişme sonucu, **taneleri yönlenmiş demir-silisyum saçlar kullanarak transformatör çekirdeği enerji kayıplarında bir düşüş** daha sağlanmıştır. *Fe- % 3 Si saçlar, soğuk işlendikten sonra uygulanan yeniden kristalleştirme ısıl işlemiyle* tane yönelimli malzeme olarak sanayi boyutlarında üretilebilmiştir. Yönlenmenin kolay olduğu mıknatıslanma yönü dikkate alınarak, saçın haddelenme yönü bu yöne paralel olacak şekilde işlem yapılmasına gerek duyulmaktadır. Bu nedenle, rastgele dokudaki Fe-Si sacına göre, taneleri yönlenmiş mıknatıs malzemenin geçirgenliği daha yüksek, histerezis kayıpları daha düşüktür.

Çizelge 4.5 **Yumuşak mıknatıslı malzemelerin bazı mıknatıs özellikleri**

| **Malzeme ve bileşimi** | **Doyma akısı yoğunluğu $B_d$, T** | **Baskı kuvveti $H_b$, A/cm** | **Başlangıçtaki bağıl geçirgenlik $\mu_i$** |
|---|---|---|---|
| Mınatıslı demir, 0.2 mm sac | 2,15 | 0,88 | 250 |
| M36 soğuk haddelenmiş Si-Fe(rastgele) | 2,04 | 0,36 | 500 |
| M6 (110)[001], % 3.2 Si-Fe (yönlenmiş) | 2,03 | 0,06 | 1500 |
| 45 Ni-55 Fe (45 permalloy) | 1,6 | 0,024 | 2700 |
| 75 Ni-5 Cu-2 Cr-18 Fe (Mumetal) | 0,8 | 0,012 | 30000 |
| 79 Ni-5 Mo- 15 Fe-0.5 Mn (supermalloy) | 0,78 | 0,004 | 100000 |
| % 48 $MnO$-$Fe_2O_3$, % 52 $ZnO$-$Fe_2O_3$ (yumuşak ferrit) | 0,36 | | 1000 |
| % 36 $NiO$-$Fe_2O_3$, % 64 $ZnO$-$Fe_2O_3$ (yumuşak ferrit) | 0,29 | | 650 |

## 2) Metalik Camlar

**Normal metaller gibi kristal yapısı olmayan, içbiçimsiz ve nispeten yeni bir metal türüdür**. Normal metaller ve alaşımlar sıvı durumdan katı duruma geçerken atomları düzenli bir kristal yapıda dizilir. Aşağıdaki çizelgede

**mühendislikte önem taşıyan sekiz metalik camın atom bileşimleri** verilmektedir. Bu malzemeler **önemli mıknatıs özelliklere** sahiptir ve

Çizelge 4.6 **Metalik camlar : Bileşimleri, Özellikleri ve Uygulamaları**

| **Alaşım, % atom** | **Doyma akısı yoğunluğu $B_d$, T** | **En yüksek geçirgenlik** | **Uygulamalar** |
|---|---|---|---|
| $Fe_{78}B_{13}Si_9$ | 1,56 | 600000 | Güç transformatörleri, düşük çekirdek kayıpları |
| $Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$ | 1,61 | 300000 | Vurulu transformatörler, mıknatıslı şalterler |
| $Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_1$ | 1,90 | 4000000 | Vurulu transformatörler, mıknatıslı şalterler |
| $Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$ | 1,41 | 35000 | Akım trnasformatörleri,duymaç çekirdekleri |
| $Fe_{74}Ni_4Mo_3B_{17}Si_2$ | 1,28 | 100000 | Yüksek frekansta düşük çekirdek kayıpları |
| $Co_{69}Fe_4Ni_1Mo_2B_{12}Si_{12}$ | 0,70 | 600000 | Mıknatıslı duyarlar, ses kayıt kafaları |
| $Co_{66}Fe_4Ni_1B_{14}Si_{15}$ | 0,55 | 1000000 | Mıknatıslı duyarlar, ses kayıt kafaları |
| $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$ | 0,88 | 800000 | Mıknatıslı duyarlar, ses kayıt kafaları |

**Fe, Co, Ni asal mıknatıslarına B ve Si metalsileri katılarak elde edilir**. Son derece yumuşak olan bu mıknatısların uygulama alanlarına, çekirdekleri düşük enerji kayıplı transformatörleri, mıknatıslı duyarları(sensor) ve ses kayıt kafalarını örnek olarak verebiliriz.

**Metalik camlar hızlı katılaştırma tekniği ile üretilir**. Bu teknikle 0,0025 cm kadar kalınlıkta ve 10-30 cm genişlikte metalik cam şeritler elde edilebilmektedir.

Metalik camların çok ilginç bazı özellikleri vardır. **Yüksek dayanımları ( 4500 MPa ‘ kadar), eğilebilir olmakla birlikte çok sert ve korozyona çok dirençli** olmaları en belirgin olanlardır. Çok yumuşak olduklarında, **kolayca mıknatıslanabilmekte ve mıknatıslığı** giderilebilmektedir. Özellikle tane

sınırlarının ve uzun mesafeli kristal yönlülüğünün olmaması nedeniyle mıknatıscık sınırları son derece kolay hareket edebilmektedir.
Histerezis halkası dar olduğundan histerezis enerjisi kayıpları çok düşüktür. Bu sayede, çekirdek kayıpları geleneksel Fe-Si çekirdeklerinin % 70 'i kadar olan, çok katlı transformatörler yapılmıştır.

### 3) Nikel-Demir alaşımları

Düşük bir alan altında, **ticari saflıktaki demir-silisyum alaşımlarının** mıknatıs geçirgenliği nispeten düşüktür. Bu durum güç uygulamalarında önem taşır. Buna karşılık, **küçük sinyalleri taşıma ya da saptırmada kullanılan yüksek duyarlıktaki** haberleşme cihazlarında, düşük alanlardaki geçirgenlikleri çok daha yüksek olan nikel-demir alaşımları kullanılır.

Ticari olarak **çoğunlukla iki ana Ni-Fe alaşım üretilmekte**, birisi % 50 Ni, diğeri % 79 Ni içermektedir.(Yukarıdaki çizelgede bazı değerler bulunmaktadır) %50 Ni alaşımının geçirgenliği ortada bir değerde ($\mu_i$ = 2500, $\mu_{enb}$ = 25000), doyma akısı yoğunluğu yüksektir.[$B_d$ = 1.6 T (16000G)] % 79 Ni alaşımının geçirgenliği yüksek ($\mu_i$ = 100000, $\mu_{enb}$ = 1000000), fakat doyma akısı yoğunluğu düşüktür. [$B_d$ = 0.8 T (8000G)] Bu alaşımlar ses ve cihaz transformatörlerinde, alet rölelerinde, rotor ve stator saclarında kullanılır. Elektronik transformatörlerinde kullanılan şerit sarımlı çekirdekler de Ni-Fe alaşımıdır.

Bu tür alaşımların geçirgenliklerinin bu kadar yüksek olmasının nedeni, kullanılan bileşimlerde **mıknatıs yönlülük enerjisi ve mıknatıs gerinmesi enerjisinin düşük olmasıdır.** En yüksek başlangıç geçirgenlik % 78.5 Ni- % 21.5 Fe alaşımı ile elde edilmektedir. Ancak, bu alaşım, düzenli yapı oluşmasını önlemek için 600 $^oC$ nin altında hızla soğutulmalıdır. Ni-Fe sistemindeki düzenli denge yapısı, Ni atomlarının yüzeylerde Fe atomlarının yüzey köşelerinde yer aldığı YMK birim hücreden kaynaklanmaktadır. % 78.5 Ni içeren alaşıma % 5 Mo katılması düzenli yapı oluşmasını bastırdığından, 600 $^oC$ üzerinden orta bir hızla soğutmak ile düzenli yapı oluşumu engellenir.

% 56-58 Ni içeren alaşımları, olağan yüksek sıcaklık tavlamasından sonra mıknatıslı alan altında tavlayarak başlangıç geçirgenliklerini 3-4 kat arttırmak olanaklıdır. Mıknatıs alanda tavlama, Ni-Fe kafes atomlarının yönlenerek dizilmelerine, dolayısıyla alaşımların başlangıç geçirgenliklerinin yükselmesine neden olur. Mıknatıslı tavlamanın % 65 Ni- % 35 Fe alaşımında histerezis eğrisi üzerinde etkisi aşağıdakişekilde görülmektedir.

Şekil 11.23 s.643 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.22

## SERT MIKNATISLI MALZEMELER

**Sert mıknatıslar ya da kalıcı mıknatıslar**, yüksek baskı kuvveti $H_b$ ve yüksek kalıntı mıknatıs akı yoğunluğu $B_k$ ile kendilerini gösterirler. Bu nedenle, sert mıknatıslı malzemelerin **histerezis halkaları geniş ve yüksektir**. Bu malzemeler, mıknatıscıklarını uygulanan alan yönünde yönlendirecek kadar **kuvvetli bir alan altında mıknatıslanırlar.** Uygulanan alan enerjisinin bir kısmı, üretilen kalıcı mıknatıs içinde biriken potansiyel enerji haline dönüşür. Tümüyle mıknatıslanmış bir kalıcı mıknatıs, mıknatıslığı giderilmiş bir mıknatıs malzemeye göre daha yüksek enerjili durumdadır.

Sert mıknatıslı malzemeler **bir kez mıknatıslanmışlarsa mıknatıslığı gidermek güçtür.** Sert mıknatıslı bir malzemenin mıknatıslığını giderme eğrisi olarak histerezis eğrisinin ikinci dörtte birinden yararlanılır ve bu kısım kalıcı mıknatısların kuvvetlerini karşılaştırmak için kullanılır. Aşağıdaki şekilde bu durum gösterilmiştir.

Şekil 11.24 s.644 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.23

**Kalıcı mıknatıs bir malzemenin kuvveti ya da dış enerjisi, histerezis halkasının boyutuyla doğrudan ilişkilidir**. Sert mıknatıslı bir malzemenin mıknatıs potansiyeli, B (mıknatıs akısı yoğunluğu) ile H 'nin (mıknatıslığın giderildiği alan) çarpımının en büyük değerinden belirlenir ve malzemenin mıknatıslığını giderme eğrisinden elde edilir. Aslında, sert mıknatıslı bir malzemenin en büyük eneji çarpımı, malzemenin histerezis halkasının ikinci dörtte birine sığdırılabilecek en büyük dörtgenin alanıdır. BH 'nin birimi, SI sisteminde $kJ/m^3$ 'dür.

## Önemli kalıcı mıknatıs malzemeler
## 1)Alnico Alaşımları

***Özellikleri ve bileşimleri***. Alnico (Al-Ni-Co) alaşımları, günümüzde en yaygın olarak kullanılan sert mıknatıslı malzemelerdir. Aşağıdaki çizelgede bazı alaşımlar ve özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 **Sert mıknatıs malzemelerin bazı mıknatıs özellikleri**

| Malzeme ve bileşimi | Kalıntı akı yoğunluğu $B_k$, T | Baskı kuvveti $H_b$, kA/m | En büyük enerji çarpımı $(BH)_{enb}$,kJ /$m^3$ |
|---|---|---|---|
| Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, kalanı Fe | 0,72 | 37 | 11,0 |
| Alnico 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, kalanı Fe | 1,28 | 51 | 44,0 |
| Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, kalanı Fe | 0,72 | 150 | 40,0 |
| Nadir toprak elementi-Co, 35 Sm, 65 Co | 0,90 | 675-1200 | 160 |
| Nadir toprak elementi-Co, 25.5 Sm, 8 Cu, 15 Fe, 1.5 Zr, 50 Co | 1,10 | 510-520 | 240 |
| Fe-Cr-Co, 30 Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe | 1,17 | 46 | 34,0 |
| Mo.$Fe_2O_3$ (M=Ba,Sr)(sert ferrit) | 0,38 | 245-240 | 28,0 |

Bu alaşımlar yüksek enerji çarpımları [ $(BH)_{enb}$ = 40-70 kJ/$m^3$ ] , yüksek kalıntı akı yoğunluğu [$B_k$ = 0,7-1,35 T (7-13,5 kG)] ve orta baskı kuvvetleri [$H_b$ = 40-160 kA/m] ile tanınır

**Alnico ailesi alaşımlar Al, Ni, Co ve % 3 civarında Cu içeren demir asıllı alaşımlardır**. Yüksek baskı kuvvetli alaşımlara (Alnico 6-8) % 1-2 civarında Ti katılır. İlk alaşım Japonya 'da 1931 yılında Mishima tarafından keşfedilmiştir. Alnico 1 ile Alnico 4 arasındakiler izotropik(yönsüz), Alnico 5-9 arasındakiler ise (anizotropik) yönlüdür. Anizotropik olanlar çökeltileri oluşurken mıknatıslı alanda ısıl işlem görmektedir. **Kırılgan olan bu alaşımlar dökümle ya da toz metallurjisi ile şekillendirilir. T**oz halinde, birinci derecede, çok sayıdaki küçük parçacıkların ve karmaşık şekillerin yapılmasında kullanılır.

***Yapı***. Alnico alaşımları, yaklaşık 1250 $^{o}$C deki çözündürme ısıl işlemi sıcaklığının üzerinde **tek fazlı HMK kristal** yapısındadır. Soğuma sırasında, yaklaşık 750-800 $^{o}$C arasında, $\alpha$ ve $\alpha$' HMK fazlarına bozunurlar. Anafaz olan $\alpha$, Ni ve Al 'ca zengin ve mıknatıslığı zayıftır. $\alpha$' çökelti ise Fe ve Co 'ca zengindir ve mıknatıslanması diğer faza göre daha iyidir. $\alpha$' fazı, yönlenme eğiliminde olup, 10 nm çapında ve 100 nm uzunluğunda çubuksu bir şekil alma eğilimindedir.
800 $^{o}$C ısıl işlemi bir mıknatıslı alanda yapılacak olursa, $\alpha$' çökelti, $\alpha$ anafazı içinde, mıknatıs alanı yönünde, ince uzun parçacıklar halinde biçimlenir. Alnicoların yüksek baskı kuvvetlerinin, biçimsel yönlülüğe sahip, tek mıknatıscıklı $\alpha$' fazı parçacıklarının döndürülme güçlüğünden kaynaklandığı varsayılmaktadır. Çubukların boy-genişlik oranı büyüdükçe ve yüzeyleri düzgünleştikçe alaşımın baskı kuvveti artmaktadır. Bu amaçla, alnicolara Ti katılması sağlanmaktadır.

## 2) Nadir toprak elementleri alaşımları

**Mıknatıs kuvvetleri ticari malzemelerin hepsinden üstündür**. En büyük enerji çarpımları $(BH)_{enb}$ 240 kJ/m$^3$ ve baskı kuvvetleri 3200 kA/m değerlerine ulaşmaktadır. Nadir toprak elementlerinde mıknatıslığın temeli hemen hemen tümüyle, Fe, Co ve Ni elementlerindeki çiftlenmemiş 3d elektronları gibi, çiftlenmemiş 4f elektronlarıdır. Ticari nadir toprak elementli mıknatıslı malzemelerin ***iki ana grubu*** vardır; **Biri tek fazlı $SmCo_5$ asıllı malzeme, diğeri yaklaşık $Sm(Co,Cu)_{7,5}$ bileşimindeki çökelti sertleştirmeli alaşımdır.**

En yaygın kullanılanlar $SmCo_5$ tek fazlı mıknatıslardır. Bu malzemelerdeki baskı kuvvetinin mekanizması, mıknatıscık sınırlarının yüzeylerde ve tane sınırlarındaki çekirdeklenmesi ve/ya da yüzeylere ve tane sınırlarına tutunmasıdır. Bu malzemeler toz metallurjisi tekniğiyle, 1-10 μm inceliğindeki tozlardan üretilir. Presleme sırasında tozlar mıknatıslı alan içinde yönlenir. Daha sonra, preslenen parçalar, tane büyümesini önlemeye dikkat edilerek sinterlenir. Bu malzemelerin mıknatıslık kuvveti yüksek olup, $(BH)_{enb}$ değerleri 130-160 kJ/m$^3$ arasında değişmektedir.

Çökelti sertleştirmeli $Sm(Co,Cu)_{7,5}$ alaşımında, $SmCo_5$ alaşımındaki Co atomlarının bir kısmının yerini Cu aldığından, düşük yaşlandırma sıcaklığında (400-500 $^{o}$C) ince çökeltiler (yaklaşık 10 nm) elde edilebilmektedir. Elde edilen çökelti, $SmCo_5$ yapısıyla uyumludur. Buradaki uyum mekanizması, birinci derecede, mıknatıscık sınırlarının çökelti parçacıklarında benzeşik tutunmasıdır. Bu malzemeler de, ticari olarak, toz metallurjisi tekniğiyle ve tozlar mıknatıs

alanında yönlendirilerek üretilmektedir. Küçük miktarlarda demir ve zirkonyum katılması baskı kuvvetini güçlendirmektedir. $Sm(Co_{0,68}\ Cu_{0,10}\ Fe_{0,21}\ Zr_{0,01})_{7,4}$ ticari alaşımın örneksel değerleri, $(BH)_{enb}$ = 240 kJ/m$^3$ ve $B_k$ = 1.1 T (11000)G) 'dir.

Sm-Co mıknatısları implantable pompalardaki motor ve vanalarda ve göz kapağı hareketli yardımcılarında, elektronik kol saatlerinde ve hareketli dalga tüplerinde kullanılmaktadır. Boyutları küçük olabildiğinden, doğru akım motorları, eşzamanlı motorlar ve jeneratörlerde bu tür mıknatıs kullanmak daha uygundur.

**3) Neodim-demir-bor mıknatıs alaşımları**

**1984 yılında keşfedilen Nd-Fe-B sert mıknatıslı malzemesinin** $(BH)_{enb}$ çarpımı 300 kJ/m$^3$ olup, günümüzde hem toz metallurjisi hem de eriyik sürüklemeli hızı katılaştırma yöntemleriyle üretilmektedir. Bu yapıda, $Nd_2Fe_{14}B$ anafaz taneleri, asal mıknatıslı olmayan, Nd 'ce zengin, ince, taneler arası fazla çevrilmiştir. Bu malzemenin yüksek baskı kuvveti ve

şekil 11.29 s.650 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.24

$(BH)_{enb}$ enerji çarpımı, çoğunlukla anafaz tanelerinin tane sınırlarında çekirdeklenen ters mıknatıscıkların çekirdeklenmesindeki güçlüğün bir sonucudur. Malzemenin mıknatıslığını tersine çevirmek için, asal mıknatıs olmayan taneler arası Nd 'ce zengin faz, $Nd_2Fe_{14}B$ anafaz tanelerini, kendi ters mıknatıscıklarını çekirdeklemek için zorlar. Bu süreç, tüm malzemenin $H_b$ ve $(BH)_{enb}$ değerlerini en büyüğe çıkarır. Bu malzeme tüm elektrik motorları, özellikle de otomotiv başlatma motorları gibi ağırlık azaltmanın ve küçüklüğün önemli olduğu motorlarda, önem taşır.

**4) Demir-krom-kobalt mıknatıs alaşımları**

**Metallurji yapıları ve kalıcı mıknatıslık** özellikleri alnico alaşımlarına benzeyen, oda sıcaklığında soğuk şekillendirilebilen bir tür Fe-Cr-Co alaşımı olup, 1971 yılında geliştirilmiştir. Örneksel bileşim % 61 Fe- % 28 Cr- % 11 Co içerir. $B_k$ = 1,0-1,3 T, $H_b$ = 150-600 A/cm ve $(BH)_{enb}$ = 10-45 kJ/m$^3$ dolaylarındadır.

Bu alaşımların 1200 $^{o}$C üzerindeki yüksek sıcaklık yapıları HMK 'dır. 650 $^{o}$C üzerindeki bir sıcaklıktan yavaşca soğutulduklarında (15 $^{o}$C/h hızla), demirce zengin $\alpha_1$ fazının içinde, 30 nm büyüklüğünde, Cr 'ca zengin $\alpha_2$ fazı oluşur. Mıknatıscıklar her iki faza da yayıldığından, Fe-Cr-Co alaşımlarının baskı kuvveti mekanizması, mıknatıscık sınırlarının çökelti parçacıkları tarafından bulundukları yere çivilenmesidir. Son yaşlandırma ısıl işleminden önceki biçim değiştirme sonucu çökeltilerin uzaması bu alaşımların baskı kuvvetini büyük ölçüde arttırır. Bu nedenle çökelti parçacığının şekli çok önemlidir.

**Oda sıcaklığında yüksek hızda şekillendirmeyi gerektiren, sünekliğin önemli olduğu uygulama alanlarında Fe-Cr-Co alaşımları özellikle önemlidir**. Modern telefon alıcılarındaki kalıcı mıkantısla, soğuk şekillendirilebilen kalıcı mıknatıs alaşımına iyi bir örnektir.

**FERRİTLER;** ***ARTIK KUTUPLU MIKNATISLAR***

**Ferritler ve seramik mıknatıs malzemeler, demiroksit ($Fe_2O_3$) toz haldeki diğer oksit ve karbonatlara karıştırılarak elde edilir**. Tozlar daha sonra sıkıştırılarak yüksek sıcaklıklarda sinterlenir. Bazen parçalara son şeklini vermek için işlenmeleri gerekebilir. Ferritlerdeki mıknatıslık parçalara ticari değer verecek kadar yüksek olmakla birlikte doyma mıknatıslıkları asal mıknatıs malzemeler kadar yüksek değildir. Ferritlerdeki mıknatıscık yapıları ve histerezisleri asal mıknatıslara benzer. Yumuşak mıknatıslı ve sert mıknatıslı ferritler bulunmaktadır.

**Yumuşak mıknatıslı ferritler**

**Artık kutuplu mıknatıslanma davranışı gösterirler**. Zıt yönlerdeki, çiftlenmemiş iki takım iç elektronun dönü momentleri birbirlerini yoketmediği için, yumuşak ferritler net bir mıknatıs momentine sahiptir.

***Kübik yumuşak ferritlerin bileşimi ve yapısı*** : Kübik yumuşak ferritlerin çoğu **$MO.Fe_2O_3$ bileşiminde olup**, M iki değerlikli bir metal iyonunu (Fe, Mn, Ni ya da Zn gibi) göstermektedir. Yumuşak ferritlerin yapıları, ($MgO.Al_2O_3$) spinel madeninin değişik bir şekli olan, ters spinel yapısındadır.

Şekil 11.34 s.653 kınıkoğlu

ŞEKİL 4.25

Hem spinel hem de ters spinel yapı sekiz alt hücreden oluşan bir birim hücreye sahiptir. Alt hücrelerin her biri bir $MO.Fe_2O_3$ molekülünden oluşmaktadır. Her bir alt birim, bir $MO.Fe_2O_3$ molekülü içerdiğinden ve bir molekülde yedi iyon bulunduğundan her birim hücrede 7 x 8 = 56 iyon bulunacaktır. Her alt birim hücrenin, $MO.Fe_2O_3$ molekülünün dört iyonunun oluşturduğu bir YMK kristali yapısı vardır. Çok daha küçük olan, yaklaşık 0,07-0,08 nm çapındaki iyonlar ($M^{+2}$ ve $Fe^{+3}$) , daha büyük oksijen atomları arasındaki ara yerleri (iyonik yarıçap ≈ 0,14 nm) doldurur.

Bir YMK hücrede, dört sekizyüzlü ve dört dörtyüzlü ara yere eşdeğer boşluk vardır. Normal spinel yapıda sekizyüzlü yerlerin yarısı doludur. Bu durumda 16 sekizyüzlü yeri doldurulmuştur. Normal spinel yapıda bulunan 64 dörtyüzlü yerin sadece 8 'i doludur.

Çizelge 4.8 **$MO.Fe_2O_3$ bileşimindeki bir spinel ferritin bir birim hücresinde metal iyonlarının dizilimi**

| **Arayer türü** | **Mevcut yer sayısı** | **İşgal edilen yer sayısı** | **Normal spinel** | **Ters spinel** |
|---|---|---|---|---|
| Dörtyüzlü | 64 | 8 | 8 $M^{+2}$ | 8 $Fe^{+3}$ ← |
| Sekizyüzlü | 32 | 16 | 16 $Fe^{+3}$ | 8 $Fe^{+3}$, 8 $M^{+2}$ ← |

Normal spinel yapıda 8 adet $MO.Fe_2O_3$ molekülü bulunur. Bu yapıda 8 $M^{+2}$ iyonu, 8 dörtyüzlü yeri ve 16 $Fe^{+3}$ iyonu, 16 sekizyüzlüyeri doldurmaktadır. Fakat, ters spinel yapıda iyonların dizilim farklıdır; 8 $M^{+2}$ iyonu, 8 sekizyüzlü yeri, 16 $Fe^{+3}$ iyonunun, 8 'i sekizyüzlüyeri, kalan 8 'i de dörtyüzlü yerleri doldurmaktadır.

***Ters spinel ferritlerdeki net mıknatıs momentleri*** : Her bir **$MO.Fe_2O_3$** molekülünün net mıknatıs momentini bulmak için ferrit iyonlarının 3d iç elektron kurulumunu bilmemiz gerekmektedir. Aşağıdaki şekil bu durumu göstermektedir.

Şekil 11.35 s.654 kınıkoğlu
ŞEKİL 4.26

Fe atomları $Fe^{+2}$ iyonu oluşturduğunda, iki 4s elektronu kaybolur ve dört eşleşmemiş 3d elektronu kalır. $Fe^{+3}$ iyonu oluştuğunda ise, iki 4s ve bir 3d elektronu kaybından sonra geriye beş eşleşmemiş elektron kalır.

Her bir eşlenmemiş 3d elektronu 1 Bohr megatonu değerinde mıknatıs momentine sahip olduğundan, $Fe^{+2}$ iyonunun momenti 4 Bohr megaton, $Fe^{+3}$ iyonunun momenti de 5 Bohr megatondur. Uygulanan mıknatıs alanında, sekizyüzlü ve dörtyüzlü iyonların mıknatıs momentleri birbirine karşı çıkar. Böylece $MO.Fe_2O_3$ ferritinde, sekizyüzlü yerlerdeki sekiz $Fe^{+3}$ iyonu, dörtyüzlü yerlerdeki sekiz $Fe^{+3}$ iyonunun mıknatıs momentini yok eder. Bu durumda, bu ferritin sonuçtaki mıknatıs momentini, sekizyüzlü yerlerde bulunan, her biri 4 Bohr megaton olan sekiz $Fe^{+3}$ iyonu oluşturur.

Demir, kobalt ve nikel ferritlerin hepsi de ters spinel yapıdadır. İyonik yapılarının net mıknatıs momentleri nedeniyle, artık kutuplu mıknatıslardır. Ferrit karışımlarıyla daha yüksek doyma mıknatıslanması elde edilebildiğinden, sanayide kullanılan ferritler genellikle karışımdır. En yaygın kullanılanlar; nikel-çinko ferriti ($Ni_{1-x}\ Zn_x\ Fe_{2-y}\ O_4$) ve mangan-çinko ferriti ($Mn_{1-x}\ Zn_x\ Fe_{2-y}\ O_4$) 'dir.

## Yumuşak ferritlerin özellikleri ve uygulama alanları

***Mıknatıs malzemelerde girdap akmı kayıpları*** : *Yumuşak ferritler, faydalı mıknatıs özellikleri yanında, yalıtkanlığa ve yüksek özgül direncine sahip olduklarından, önemli mıknatıs malzemelerdir.* Mıknatıs malzemenin iletken olması halinde yüksek frekanslarda girdap akımları kaybı çok yüksek olduğundan, yüksek frekans uygulamalarında, yüksek elektrik özgül direnci önemlidir. Girdap akımlarının nedeni, oluşan gerilim eğimcesidir, dolayısıyla frekans arttıkça girdap akımlarındaki artış büyür. Yumuşak ferritler yalıtkan olduklarından, yüksek frekansta çalışan transformatör çekirdeklerinde kullanılır.
***Yumuşak ferrit uygulamaları*** : En önemli uygulama alanları, düşük sinyalli hafıza çekireği, ses ve görüntü cihazları ve kayıt kafalarıdır. Düşük sinyal düzeylerinde, trnasformatörler ve düşük enerji indükleyicilerde yumuşak ferritler kullanılır. Saptırma sargısı çekirdeği, geri uçuş transformatörleri ve televizyon alıcılarının ayar sargıları ferritlerin en çok kullanıldığı yerlerdir.

Mn-Zn ve Ni-Zn spinel ferritleri mıknatıslı bantların kayıt kafalarında kullanılır. Çalışma frekansları, yüksek girdap akımı kayıpları nedeniyle, metal alaşımı kafalar için çok yüksek olduğundan, kayıt kafaları çok kristalli Ni-Zn ferrit malzemeden yapılmaktadır.

0 ve 1 ikili mantık (logic) temelli mıknatıs çekirdek hafızalar bazı bilgisayarlarda kullanılmaktadır. Mıknatıs kafalar güç akım kesilmesinin bilgi kaybına yol açmaması istenen yerlerde yararlıdır. Mıknatıs çekirdek hafızaların hareketli parçası olmadığından, bazı askeri uygulamalarda olduğu gibi yüksek darbe direncinin istendiğyerlerde kullanılır.

**Sert mıknatıslı ferritler**

**$MO.6Fe_2O_3$ yapısındaki sert ferritler kalıcı mıknatıs olarak** kullanılmaktadır. Bu yapının hekzagonal kristal yapısı vardır. En öneml yapı 1952 'de piyasaya sürülen $BaO.6Fe_2O_3$ 'dür. Bugün ise, özellikleri daha iyi olan $SrO.6Fe_2O_3$ yapısında olanlar tercih edilmektedir. Bu ferritler hemen hemen yumuşak ferritlerle aynı yöntemle, çoğunlukla da kolay mıknatıslanma eksenlerini uygulanan alanla aynı hizya getirmek için, mıknatıs alanında, yaş preslenerek üretilmektedir.

Hegzagonal ferritlerin maliyeti ve yoğunluğu düşük olup baskı kuvveti yüksektir. Yüksek mıknatıs kuvvetlerinin birinci derecedeki nedeni, mıknatıslı kristallerin yönlülüğüdür. Tane boyutları tek mıknatıscıklı davranış için çok büyük olduğundan, bu malzemelrin mıknatıslanmalarının mıknatıscık sınırı çekirdeklenmesi ve hareketi sonucu olduğuna inanılmaktadır. $(BH)_{enb}$ değerleri 14-28 $kJ/m^3$ arasındadır.

Sert ferrit seramik kalıcı seramikler, jeneratörlerde, rölelerde ve motorlarda geniş bir uygulama alanı bulur.Hoparlör mıknatısları, telefon zilleri ve alıcılarında çok kullanılır. Kapı kapama tutaçlarında, contalarında ve mandallarında, oyuncaklarda da kullanım alanı vardır.