

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**STATİK ELEKTRİK MAKİNALARINDA FARKLI  
ORANLARDA SİLİSYUM İÇEREN SACLAR  
KULLANILARAK MAKİNANIN PERFORMANS  
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Serhan AYBAR**

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında**

**Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı:** Prof. Dr. Ahmet EKERİM

**İSTANBUL, 2008**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİKSEL ÇELİKLER .....	3
2.1 Elektriksel Çeliklerin Sınıflandırılması .....	3
2.1.1 Yönlendirilmiş çelikler.....	3
2.1.1.1 Yönlendirilmiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması.....	4
2.1.2 Yönlendirilmemiş çelikler.....	5
2.1.3 Düşük Silisyumlu Çelikler.....	6
2.1.4 Orta Silisyumlu Çelikler .....	6
2.1.5 Yüksek Silisyumlu Çelikler.....	7
2.1.6 Yönlendirilmemiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması .....	7
2.2 Temel Bazı Tanımlar .....	9
2.2.1 Magnetik Alan .....	9
2.2.2 Magnetik Akı Yoğunluğu .....	11
2.2.3 Magnetik Akı.....	13
2.2.4 Ferromagnetik Malzemeler.....	14
2.2.5 Ferromanyetizma .....	16
2.2.6 Domen (Bölge) Yapısı.....	17
2.2.7 Manyetikleşme-Alan Eğrisinin Uygulanması .....	18
2.3 Elektriksel Bir Makine İçin İdeal Çelik.....	21
2.4 Kayıpları Etkileyen Üretim Prosesleri.....	21
2.4.1 Tavlama .....	21
2.4.2 Çekirdek Hücre Malzemelerin Yüzey Yalıtımı .....	23
2.4.3 Tabaka Kalınlıkları .....	25
2.5 Silisli Saclar Ve Özellikleri .....	26
2.5.1 “ Sİ ” Elementinin Çeliğe Etkileri .....	26
3. TRANSFORMATÖRLER .....	28
3.1 Temel Bilgiler.....	28
3.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması .....	30
3.3 Bir Fazlı Transformatörlerin Yapılışları.....	30
3.4 Üç Fazlı Transformatörlerin Yapılışı.....	33

3.5	Transformatör Sargıları .....	34
4.	BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLER .....	36
4.1	Bir Fazlı Transformatörün Kayıplarının Dikkate Alınmadan İncelenmesi .....	36
4.2	Bir Fazlı Transformatörlerin Kayıplarının Dikkate Alınarak İncelenmesi.....	38
4.3	Bir Fazlı Transformatörün Boşta Çalışmasının İncelenmesi.....	42
4.4	Transformatörün Sürekli Kısa Devre Durumunun İncelenmesi.....	45
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
5.1	(1) kVA Transformatör.....	49
5.1.1	Bir Fazlı (1) kVA Transformatör İçin Boşta Çalışma Deneyi.....	51
5.1.2	Bir Fazlı (1) kVA Transformatör İçin Kısa Devre Çalışma Deneyi .....	52
5.1.3	Bir Fazlı (1) kVA Transformatör İçin Demir Açısının Bulunması Deneyi.....	54
5.2	(2) kVA Transformatör.....	54
5.2.1	Bir Fazlı (2) kVA Transformatör İçin Boşta Çalışma Deneyi.....	56
5.2.2	Bir Fazlı (2) kVA Transformatör İçin Kısa Devre Çalışma Deneyi.....	57
5.2.3	Bir Fazlı (2) kVA Transformatör İçin Demir Açısının Bulunması Deneyi.....	58
5.3	(3) kVA Transformatör.....	58
5.3.1	Bir Fazlı (3) kVA Transformatör İçin Boşta Çalışma Deneyi.....	61
5.3.2	Bir Fazlı (3) kVA Transformatörler İçin Kısa Devre Çalışma Deneyi .....	62
5.3.3	Bir Fazlı (3) kVA Transformatör İçin Demir Açısının Bulunması Deneyi.....	63
5.4	Transformatörlerin Performansları .....	63
6.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	65
	KAYNAKLAR.....	67
	ÖZGEÇMİŞ.....	70

## SİMGE LİSTESİ

$\psi, \phi(t)$	Akı
$e, E$	Endüklenen elektromotor kuvveti
$N$	Transformatörlerin sarım sayıları
$v$	Gerilim
$R_1$	Primer sargı direnci
$R_2$	Sekonder sargı direnci
$S, P$	Güç
$I$	Akım
$a$	Transformasyon oranı
$X$	Reaktans
$R$	Direnç
$Z$	Empedans
$F$	Magneto motor kuvvet
$I_\mu$	Mıknatıslanma akımı
$\beta$	Demir açısı
$V$	Hacim
$M$	Kütle
$K_w$	Wattmetre katsayısı

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	a) Bir elektronun yörüngesel hareketi b) Bir elektronun magnetik momenti.....	10
Şekil 2.2	Değişik mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde magnetik alan a) Çubuk mıknatıs b) At nalı mıknatıs c) Akım taşıyan bir iletken d) Hava çekirdekli selonoid e) Demir çekirdekli selonoid f) Hava ve demir çekirdekli.....	10
Şekil 2.3	Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri .....	11
Şekil 2.4	Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki.....	12
Şekil 3.5	Akım taşıyan bir çevrede kuvvet çizgileri.....	12
Şekil 2.6	Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan .....	13
Şekil 2.7	Magnetik akı tanımı.....	14
Şekil 2.8	Nüve malzemesinin akı yoğunluğu üzerine etkisi (Altun., 2007).....	15
Şekil 2.9	Ferromanyetizma (Altun, 2007) .....	16
Şekil 2.10	Bitişik atomlardaki manyetik momentler domenler arasındaki sınırlar boyunca sürekli olarak yön değiştirir(Altun, 2007). .....	17
Şekil 2.11	Ferromanyetik histerisiz döngüsü manyetik alanın indüktans veya manyetikleşme üzerine etkisini göstermektedir. Kutup çiftlerin hizaya gelmesi manyetikleşmenin doymasına neden olur (nokta 3), kalıcı nokta 4, zorlayıcı alan nokta (Altun, 2007). .....	17
Şekil 2.12	Ferromanyetik malzemelerin üç uygulaması için histerezis döngüsünün kıyaslanması elektrik uygulamaları, bilgisayar uygulamaları ve kalıcı mıknatıslar (Altun, 2007).....	19
Şekil 2.13	Eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir. ....	26
Şekil 3.1	Transformatör kısımlarının şematik gösterilişi .....	28
Şekil 3.2	Bacaklar ve boyundurukların düz bağlantısı .....	29
Şekil 3.3	Bacaklar ve boyundurukların; (a) Dik, (b) Diyagonal bağlantısı.....	29
Şekil 3.4	Çeşitli bacak kesitleri .....	30
Şekil 3.5	Çekirdek tipi transformatörün genel görüntüsü .....	31
Şekil 3.6	Mantel tipi transformatörün genel görüntüsü.....	31
Şekil 3.7	Bir fazlı çekirdek tipi transformatörün şematik gösterilişi.....	32
Şekil 3.8	Bir fazlı mantel tipi transformatörün şematik gösterilişi .....	32
Şekil 3.9	Simetrik üç fazlı çekirdek tipi transformatörün şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.10	Simetrik olmayan üç fazlı çekirdek tipi transformatörler .....	34
Şekil 3.11	Mantel tipi üç fazlı transformatörler .....	34
Şekil 3.12	Silindirik sargı .....	35
Şekil 3.13	Dilimli sargı.....	35
Şekil 4.1	Bir fazlı transformatörün şematik gösterilişi.....	36
Şekil 4.2	Yüklü çalışan transformatörde değişik akılar.....	39
Şekil 4.3	Yüklü transformatörün eşdeğer devresi .....	39
Şekil 4.4	Amper sarım ve akım üçgenleri .....	41
Şekil 4.5	Yüklü çalışan bir transformatörün fazör diyagramı .....	41
Şekil 4.6	Transformatör boşa çalışırken meydana gelen akılar.....	43
Şekil 4.7	Boşa çalışan transformatörün eşdeğer devresi .....	43
Şekil 4.8	Transformatörün boşa çalışma fazör diyagramı ( $a=1/1$ ).....	44
Şekil 4.9	Demir açısının deneysel olarak bulunması.....	45
Şekil 4.10	Kısa devre edilmiş transformatörün eşdeğer devresi .....	46
Şekil 4.11	Kısa devre gerilim üçgeni.....	46
Şekil 5.1	(1) kVA lık Transformatörün şematik çizimi.....	49
Şekil 5.2	(1) kVA lık transformatörün açık resimleri.....	50

Şekil 5.3	(1) kVA lık transformatörün etiket değerleri ( $V_1= 110 V_2=220 \dots$ ) .....	51
Şekil 5.4	Bir fazlı transformatörün boşta çalışma deneyine ait montaj şeması.....	51
Şekil 5.5	Bir fazlı transformatörün kısa devre çalışma deneyine ait montaj şeması .....	52
Şekil 5.6	(2) kVA lık Transformatörün şematik çizimi.....	54
Şekil 5.7	(2) kVA lık transformatörün kapalı ve açık resimleri .....	55
Şekil 5.8	(2) kVA lık transformatörün etiket değerleri ( $V_1= 110 V_2=220 \dots$ ).....	55
Şekil 5.9	Bir fazlı transformatörün boşta çalışma deneyine ait montaj şeması.....	56
Şekil 5.10	Bir fazlı transformatörün kısa devre çalışma deneyine ait montaj şeması.....	57
Şekil 5.11	(3) kVA lık Transformatörün şematik çizimi.....	59
Şekil 5.12	(3) kVA lık transformatörün kapalı ve açık resimleri .....	60
Şekil 5.13	(2) kVA lık transformatörün etiket değerleri ( $V_1= 110 V_2=220 \dots$ ).....	60
Şekil 5.14	Bir fazlı transformatörün boşta çalışma deneyine ait montaj şeması.....	61
Şekil 5.15	Bir fazlı transformatörün kısa devre çalışma deneyine ait montaj şeması .....	62
Şekil 5.16	Verim eğrileri .....	64

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Elektriksel çelik sac ve şeritlerin silisyum içerikleri, kütle yoğunlukları ve uygulamaları (Altun, 2007)..... 8
Çizelge 2.2	Bazı yumuşak elektriksel malzemelerin özellikleri ..... 20
Çizelge 2.3	Elektriksel çelikler için tavlama tipleri ve amaçları ..... 22
Çizelge 2.4	Silisli çeliklere uygulanan izolasyon tipleri (Altun, 2007)..... 24
Çizelge 5.1	Boşta çalışma deneyinden elde edilenler ..... 52
Çizelge 5.2	Kısa devre deneyinden elde edilenler..... 53
Çizelge 5.3	Omik çalışma için hesapla elde edilen değerler ..... 53
Çizelge 5.4	Boşta çalışma deneyinden elde edilenler ..... 56
Çizelge 5.5	Kısa devre deneyinden elde edilenler..... 57
Çizelge 5.6	Omik çalışma için hesapla elde edilen değerler ..... 58
Çizelge 5.7	Boşta çalışma deneyinden elde edilenler ..... 61
Çizelge 5.8	Kısa devre deneyinden elde edilenler..... 62
Çizelge 5.9	Omik çalışma için hesapla elde edilen değerler ..... 63

## **ÖNSÖZ**

Bu tezin hazırlanmasında bilgi ve birikimiyle bana yol gösteren tez danışmanım Hocam Prof. Dr. Ahmet EKERİME'e, tez çalışmam boyunca tecrübe ve ilgisiyle bana destek olan değerli Hocam Yrd.Doç.Dr. Öznur ÇAKIR'a ve her zaman yanımda olan elektrik mühendisliği ailesine çok teşekkür ederim.

Bu tezin hazırlanmasına, bilgisiyle ve değerli fikirleriyle katkıda bulunan ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Mustafa Gürkan Aydeniz'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana sabır gösteren, ilgilerini, desteklerini ve sevgilerini her zaman yanımda hissettiğim aileme de çok teşekkür ederim.



# STATİK ELEKTRİK MAKİNALARINDA FARKLI ORANLARDA SİLİSYUM İÇEREN SACLAR KULLANILARAK MAKİNANIN PERFORMANS PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada metalurji ve malzeme mühendisliği ile elektrik mühendisliğinin uzmanlık alanlarından incelemeler yapılarak hem ekonomik hem de verim konularında önemli kayıplar görülen transformatör performansları incelenmiştir. Performansı etkileyen silisli saclar, üretim koşulları ve transformatör tipleri, transformatör çalışma şekilleri ve performans hesaplamaları analitik olarak incelenmiştir. Dört ana bölümden oluşan çalışmada tüm literatür bilgisi ve incelemeler kayıpların giderilmesini hedefleyerek ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Birinci bölümde elektriksel çeliklerin üretim prosesleri, çeşitleri ve elektriksel özelliklerini incelememizde faydalı olacak temel elektriksel bazı kavramların tanımlamaları yapılmıştır. Özellikle genel tanımlamalardan sonra üretilen silisli saclardaki mikroyapı ve üretim koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan elektriksel kayıplar açıklanmıştır.

İkinci bölümde ise elektriksel kayıplarda asıl ele alacağımız statik elektrik makinası olan transformatörün yapısı, çalışma prensibi ve kullanım alanları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bu bölümde özellikle üretim, performans ve kullanım açısından bir fazlı transformatörler incelenmiştir.

Üçüncü bölümde bir önceki bölümde anlatılan bir fazlı transformatörlerin genel özelliklerinin yanında deneysel kısımlardaki verim hesaplamalarında ihtiyaç duyacağımız analitik formüller ve hesaplama yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Analitik ifadelerin yoğunluğu dolayısıyla ve konunun anlaşılabilirliği açısından en basit analitik ifadeden en son elde edeceğimiz verim formülüne kadar tüm analitik ifadeler adım adım metalurjik faktörlerle irdelenerek açıklanmaya çalışılmıştır.

Son bölüm olan dördüncü bölüm ise deneysel çalışmalara ayrılmıştır. Analitik ifadeleri ve genel özellikleri önceki bölümde anlatılmış olan üç farklı gerilim değerine sahip tranformatöre verim testleri uygulanmıştır ve transformatörde kullanılan sacın önemine değinilmiştir. Elektriksel kayıpların önlenmesi sonucu ülkemiz kazancı belgelerle açıklanmış ve çalışma referansların tanıtılmasıyla sona ermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Silisyumlu sac, transformatör, demir kayıpları, mikroyapı.

# **USING DIFFERENT SILICON RATIOS in SILICON SHEETS to STUDY PERFORMANCE PARAMETERS of THE MACHINE in STATIC ELECTRIC MACHINES**

## **ABSTRACT**

In this study we researched transformers performance in the case of economical and energy losses with the professions of metalurgical and material engineering with electrical engineering. Also paramaters of affectional to performans as silisium sheets production conditions and transfomer types are studied analytically. This study is composed of four section and in all parts we benefit from literatur knowledge to reduce electrical losses.

In the first part production, spesifications and kinds of electrical steels are explained. After the explanation of these parts also microstructure and electrical loses due to production methods is explained.

In the second part main static electric device transformer is handled for electrical loses and parts of the device, principles of working and usege areas are given as general information. In this part mono phase transformers is explained.

In the third part after explanation of mono phase transformers general informations also analytical formulas and calculating methods is explained because of we need these formulas and methods to calculate efficiency. Despite complication of the formulas all analytical expression is researched step by step with metalurjical expression.

In the forth last part of the study contains experiments about the efficiency of transformers. All three transformers have different voltage values so first of all efficiency values are tested and different transformers are compared between themselves about the efficiency rates. At the end important of reducing of electricity loses is explained and proved with documents and than the study is ended with introducing of references.

**Keywords:** Silicon steel, transformer, iron losses, microstruture.

## 1. GİRİŞ

Statik elektrik makinelerinde ağırlıklı olarak kullanılan silisli saclar dünya çapında özellikle son dönemde üzerinde çalışılan önemli bir konu haline gelmiştir. Bunun başlıca sebebi kullanılan silisli sacın makineden alınan verim üzerinde direkt olarak etkisinin olmasıdır. İlk olarak 19. Yüzyılın başlarından beri üzerinden çalışılan histerisiz kayıpları (Burgess ve Aston., 1910), ve alaşımlı saclar konusunda oluşturulan Preisach modeli (1938) kayıpları tane boyutunda incelemiştir. Öncelikli olan statik elektrik makinesi ise transformatördür çünkü transformatörler elektriğin dağıtımında en önemli rolü üstlenir.

Elektrik santrallerinde generatörler ile üretilen gerilimin değeri çok yüksek olmadığından genellikle ekonomik anlamda dağıtım elverişli değildir. Yarı sünek mıknatısların geliştirilmesi ve kendinden soğutmalı kuru transformatörlerin üretimiyle başlayan gerilimin düzenlenmesi üzerine yapılan çalışmalar sonuç vermiştir (Chin 1978). Generatör çıkış gerilimleri transformatörlerle yükseltilecek kullanılacağı yere taşınır ve orada tekrar transformatörler kullanılarak alçaltılır. Bu işlemin günümüzde daha da verimli hale getirilebilmesi için kullanılan bu transformatörler devamlı olarak incelenip verim testlerine tabi tutulmaktadır, konuyla ilgili olarak magnetik akı ve magnetik yoğunluk vektör çizgileri üzerine yoğunlaşmıştır (Enokizono vd., 1994). Bu testlerin genel kapsamı elektriksel anlamda bazı veriler elde edilerek gözlemlenmede aslında geliştirilmek istenen transformatörün genel yapısında kullanılan malzemelerdir. İşte bu noktada Gao (2006) nun yaptığı gibi Ar-Ge çalışmaları özellikle silisli sacların üretimine yoğunlaşmaktadır.

Bölgesel kristalleri yönlendirilmiş silisli saclar güç transformatörlerinde özellikle kullanılan silisli sac tipidir. Chaudhury ve Khatirkar (2007) nin çalışmalarında silisin buradaki etkisi anizotropik bir malzeme olarak çelik içerisindeki tanelerin yönlenmesine sebep olmakta ve manyetik özelliklerin yönlendirilmemiş çeliğe oranla son derece iyi değerlere ulaşmasına yardımcı olmaktadır. Altun (2007) nun çalışmasındaki önemli bir nokta da atomik boyuttaki bu etkinin yanında elektriksel çeliklerin üretimi de çok önemlidir özellikle haddaleme ve tavlama işlemleri çelik içerisindeki yönlenmede en önemli faktördür.

Yönlenmiş çeliklerde her tane (100) yönünde oluşan bir levha dokusu hizaya getirir. Burda ki yönlendirilmiş taneler çeliğin manyetikleşmesiyle ortaya çıkan demir kayıplarını minimuma indirir ve direkt olarak verimin yükselmesine aracı olur. Unutulmaması gereken önemli nokta silis ilavesi belli bir oranda elektriksel özellikleri verimli hale getirirde belli bir oranın üstünde tam tersi etki gösterir bunun sebebi esasta Tacer (2005) nin makalesinde açıkladığı

gibi paramagnetik bir malzeme olmasıdır.

Transformatör nüvelerinde kullanılan silisli saclarda atomik boyutta yapılan çalışmaların yanında üretim parametreleri de önemli bir verim faktörüdür. Kayıpların temelde sebebi sac kalınlığı-verim arasındaki ters orantıdır. Metalurjik üretimlerde kullanılan indüksiyon fırınlarındaki çalışma prensibinin tersine transformatörlerde kullanılan saclar mümkün olduğunca ince üretilmelidir. Sarioğlu (1970) nın da çalışmasında açıkladığı dilimler halinde üretilen bu saclar sonrasında katmanlar halinde birleştirilir, üretimdeki püf nokta her bir dilimi birbirinden bağımsız kılan yalıtkan tabalardır. Böylece sargıların yarattı manyetik alandan etkilenen demir nüve minimum eddy kayıplarına sebep olur (Gao, 2006).

Bu çalışmada elektriksel çeliklerin üretiminden başlanarak metalurji ve malzeme konularında üretime değinilmiş ve giriş yapılmıştır. Atomik boyutlarda konu açıklandıktan sonra asıl olarak kullanılan transformatörlerin yapıları elektriksel olarak açıklanmış ve verim arttırıcı özelliklere Şenol (2005) un kitabında yer alan analitik ifadelerle yorumlar getirilmiştir. Tüm bu açıklanan metalurjik ve elektriksel ifadeler deneylerde desteklenmiş ve son olarak ülkemizin kazancı açısından yapılması gerekenler açıklanmıştır.

## 2. ELEKTRİKSEL ÇELİKLER

Pratikte elektriksel çelikler iki ana başlık ve birçok alt başlığa bölünerek sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma malzemenin manyetik özelliklerine, şekline, cinsine veya üretim yöntemine dayandırılarak yapılır. İki ana başlık ise;

1. Yönlenmiş çelikler
2. Yönlendirilmemiş çeliklerdir.

Yönlendirilmemiş çelikler tam mamul ve yarı mamul olarak üretilirler.

### 2.1 Elektriksel Çeliklerin Sınıflandırılması

#### 2.1.1 Yönlenmiş çelikler

Bu terim elektriksel çelikleri yani manyetik özelliklere sahip ve haddeleme yönüne karşı güçlü bir dağılıma sahip çelikleri tanımlar. Haddeleme ve tavlama prosesi sayesinde uygun alaşım kompozisyonu ve metalik kristal yapı birlikte üretilebilir ve tanelerin dizilimi ile haddeleme yönünde ki manyetik özellikler çok çok üstün olur. Bu sonuçlar farklı yönlerde daha düşük özellikler gösterir ama yine de transformatör çekirdeği olarak büyük oranda ve düşük hızlı senkronik makineler için çekirdek olarak çeşitli şekillerde üretilirler.

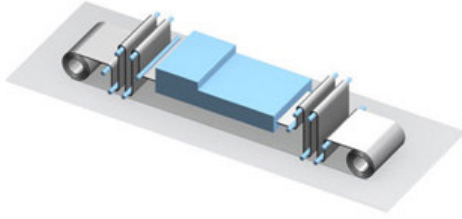
Silisli çelikte tane boyutu; watt kaybı, düşük akı-yoğunluğu geçirgenliği konuları önemlidir. Bununla beraber yüksek akış yoğunluğu geçirgenliği için kristalografik oryantasyon büyük bir kontrol unsurudur. Silisli çelikler demir gibi, {100}, küp-köşe yönünde kolaylıkla manyetize olurlar.

Önceden bahsedildiği gibi, saf demirdeki silisyum içeriği yaklaşık olarak %21/2 'yi aştığı zaman, demirin  $\alpha$ 'dan  $\gamma$ 'ta allotropik dönüşümü engellenir. Dönüşümdeki bu aksaklık daha yüksek silisyum demir alaşımının ergime noktasına kadar tamamen ferritik yapıda olmasına neden olur. Bu davranış, son tavlama da ikincil yeniden kristalleşmenin önlenmesi için üreticiye bu şerit ürünlerin özel soğuk haddeleme ve ısıl işlem teknikleri uygulanmasına olanak verir. Bu işlemin sonuçları iyi gelişmiş bir kristalografik tekstürde {110}{001}haddeleme yönüne paralel küp-köşe yönünde, küp-köşe oryantasyonunu gösterir. 1970'lerde {110}{001} kristalografik tekstürü kompozisyonun ve prosesin modifikasyonu ile geliştirildi. Geliştirilmiş yüksek geçirgenliğe sahip malzeme genellikle %2,9 ile 3,2 oranında Si içeriyordu. Geleneksel tane yönlenmiş çelik, %3,15 Si'li çeliğin tane çapı yaklaşık olarak 3mm'dir. Yüksek geçirgenlik kabiliyeti olan silisli çeliklerin tane boyutu çapları yaklaşık

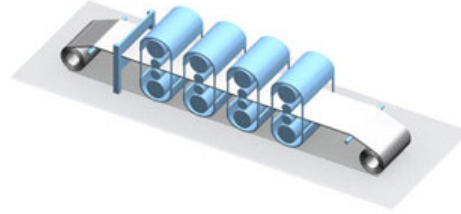
olarak 8 mm ya da daha büyüktür. İdeal olarak, aşırı eddy akımı etkilerini en aza indirmek için tane çapı 3mm'den az olmalıdır. Özel kaplamalar elektriksel yalıtımı sağlar ve çeliğin alt-yapısındaki çekme gerilmelerinin azaltılmasını sağlar.

### 2.1.1.1 Yönlendirilmiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması

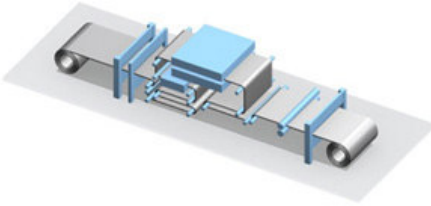
1-Asitle temizleme



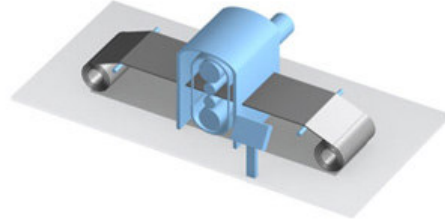
2-İlk soğuk haddeleme



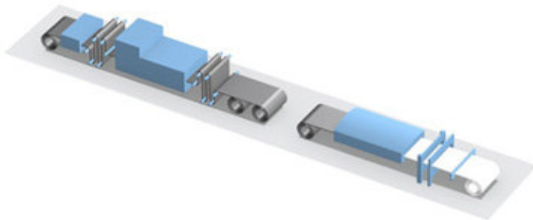
3-Yeniden kristalleşme ve dekarbürizasyon



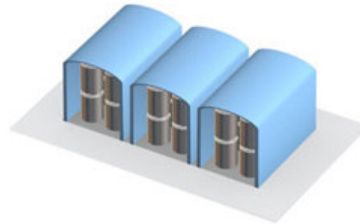
4-Soğuk haddeleme ve son inceltme



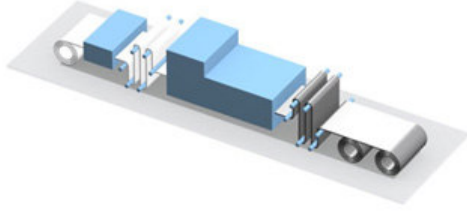
5-MgO Uygulanması



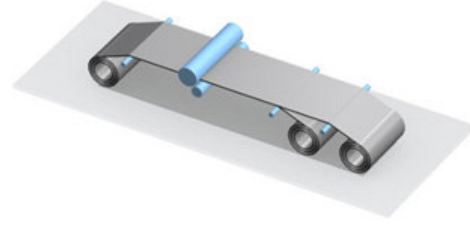
6-Yüksek sıcaklıkta ısıtma işlemi



### 7-Yalıtım kaplaması ve ısı yassılaştırma



### 8-Bitirme, kesme, sarma



### 9-Paketleme



## 2.1.2 Yönlennmemiş çelikler

Elektriksel çeliklerin bu sınıfı malzemenin düzleminde her yöndeki manyetikliği aynı olan bir manyetik özellik gösterirler. Yönlennmemiş terimi bu malzemeleri kesin bir oryantasyon veya yöne bağlı manyetik özellikleri yaratan proseslerle üretilmiş malzemelerden ayırır. Bu tür çelikler endüstriyel elektrik motorları ve jeneratörlerin çekirdeklerinin çok büyük bir kısmını oluşturan çeliklerdir.

Yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin, yönlendirilmiş elektrik çeliklerine göre güç kayıpları fazladır, manyetik geçirgenlikleri düşüktür ve daha ekonomiktirler.

Yönlennmemiş (izotropik) yassı haddelenmiş ürünler %0,5'ten 3,5'e kadar Si içerenler yarı mamul ve tam mamul şartlara uygundur. Tam mamul yönlennmemiş silisli çeliklerin büyük bir çoğunluğu ya tam genişlikte (8602dan 1230 mm'ye) ya da bazıları makaslanmış biçimde kesilerek satılırlar. Tam mamul elektriksel çelikler tabaka kümelerindeki eddy akımlarını azaltmak için tavlandıktan sonra organik veya inorganik malzemelerle kaplanır.

Yarı mamul seviye; yarı mamullerin karbon seviyesi genel olarak düşüktür genellikle 0,30'un altındadır. Buna rağmen, yarı mamul ürün genel olarak yeterli derecede dekarbürize edilemez. Bu yüzden potansiyel manyetik kaliteyi geliştirmek ve manyetik yaşlanmadan kaçınmak için

dekarbürizasyon ve tavlama kullanıcı tarafından yapılmalıdır. Bu tür tavlama genellikle 790 ile 9400 C sıcaklıkları arasında uygun bir dekarbürizasyon atmosferinde yaklaşık 1 saat süreyle yapılır. Metaldeki aşırı oksitlenmeyi önleyip dekarbürizasyonu teşvik etmek için dekarbürizasyon atmosferi yeterli seviyede nem içermelidir.

Yarı mamul ürünler genellikle yüzey yalıtımı kaplaması yapılmadan veya sadece ince sıkı bir yapışkan oksitle yalıtma direnci sağlarlar. Tam mamul seviyedekiler karbonu azaltmak için yaklaşık 8250C'de nemli hidrojen ortamında üretici tarafından tavlama yapılır. Üretici tarafından yapılan son tavlama işlemi, yüksek bir sıcaklıkta (11000C'den yukarıda sürekli şeritler için) tane büyümesinin engellenmesi ve manyetik özelliklerin geliştirilmesi için yapılır. Arzu edilen manyetik özellikler böylece üretim sırasında elde edilir ve genellikle alıcı tarafından ek ısı işlemlere gerek kalmaz. Bu ürünlerin öncelikli amacı ticari güç frekansı (50-60 Hz) uygulamalarında, belirli bir akımda maksimum watt kaybı sınırları (tipik olarak 1,5T ) için satılır (Altun,2007).

Tipik taneleri yönlendirilmemiş elektriksel çeliklerin üretim prosesi, sıvı metal üretimi sürekli veya slab döküm sıcak ve soğuk haddeleme proseslerini içerir. Sıvı metal üretimi sırasında silisyum oranı %0'dır. Si ve Al deoksidasyon sırasında eklenir. Aynı zamanda termomekanik proses genellikle tane boyutu ve kristolografik tekstürü geliştirir.

Bu gelişim sırasında sıcak bant yönlenmesi, soğuk haddeleme redüksiyonu ve tane büyütme işlemi önemli rol oynar. Geçirgenlik ve watt kaybı gibi manyetik özellikler, bu metalurjik faktörlere bağlı olarak incelenir. Bu faktörler, Si çeliği tane boyutu ve kristolografik yönlenmedir (Chaudhury, 2007).

### **2.1.3 Düşük Silisyumlu Çelikler**

Yaklaşık olarak % 0.5 – 1.5 Si içerirler. Bu tür çelikler genellikle elektrik bobinlerinde ve motorların sabit gövdelerinde kullanılırlar. Yüksek hassasiyet ve mekanik mukavemet istenen büyük makinelerin manyetik kutupları bu saclardan üretilir. Bu tip saclar sadece doğru akımda kullanıldığı için çekirdek kaybı önemli değildir.

Armatür sacları takriben %0.5 – 0.6 Si içerirler. Bu saclar geçirgenlik istenen, çekirdek kayıplarının pek önemli olmadığı yerlerde, küçük motorlarda ve dinamolarda kullanılırlar. Yumuşak ve haddeleme özelliği iyi olan malzemelerdir. (Genç, 2007)

### **2.1.4 Orta Silisyumlu Çelikler**

Yaklaşık olarak %2.5 – 3.5 Si içerirler. Bu tip çelikler ortalama yüksek verim jeneratör ve



motorlarında, orta büyüklükte aralı hizmet transformatörlerinde, reaktörlerde ve motorlarda kullanılırlar.

Motor saclarının silisyum içeriği %2.75'tir. Çekirdek kaybı az, haddeleme özelliği iyi ve düşük akı yoğunluklarında geçirgenlikleri yüksektir. Yüksek verimli motor, jeneratör, küçük ve orta boy transformatör, elektrik motoru yapımında ve genel olarak düşük çekirdek kaybı istenen yerlerde kullanılır. (Genç,2007)

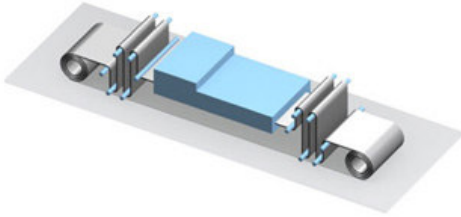
### 2.1.5 Yüksek Silisyumlu Çelikler

Bu tür çeliklerde Si içeriği %3.75 – 7 arasındadır. Güç transformatörlerinde, yüksek verim motorlarında, jeneratörlerde ve haberleşme aletlerinde kullanılırlar.

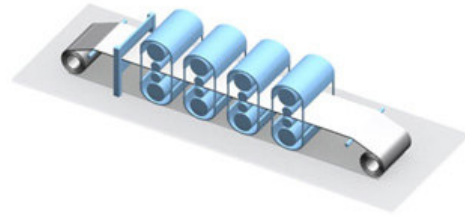
Transformatör saclarının haddeleme özelliği iyi, manyetik özellikleri zamanla değişmezdir. Silisyum oranı ile çekirdek kaybı ve sünekliliği değişir. Bu oran azalırken çekirdek kaybı ve sünekliliği azalır, indüksiyon geçirgenliği ve elektrik direnci artar. ASTM sınıflandırmasına göre Transformer – 72 (%3.8 Si), 65 (%3.8Si), 52 (%4.50Si) sacları transformatör saclarıdır. (Genç, 2007)

### 2.1.6 Yönlendirilmemiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması

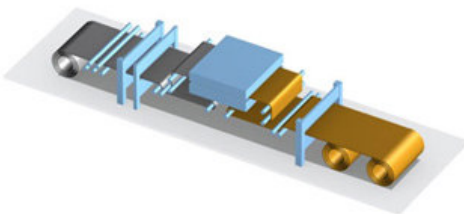
1-Asitle Temizleme



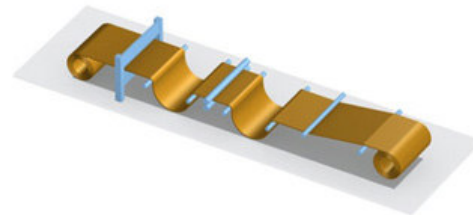
2-Soğuk Haddeleme



3-Dekarbürizasyon ve yüzey temizleme



4-Bitirme, Kesme ve Sarma



Çizelge 2.1: Elektriksel çelik sac ve şeritlerin silisyum içerikleri, kütle yoğunlukları ve uygulamaları (Altun, 2007).

ASTM Tanımlaması	AISI	Nominal (Si+Al) İçeriği	Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	Özellikler ve uygulamalar
Laminasyon çelikler A726veyaA840			7,85	Yüksek manyetik doygunluk, manyetik özellikler garanti edilemez. Zaman zaman küçük motorlarda kullanılır.
Yönlenmemiş elektriksel çeliklerle  A677 veya A677M(tam mamül) ve A683 veya A683M(yarı mamül)...	M-47	1,05	7,80	Sünek, iyi basma özellikleri, yüksek indüksiyonda iyi geçirgenlik. Küçük motorlarda, rölelerde
	M-45	1,85	7,75	İyi basma özellikleri, orta ve yüksek indüksiyonlarda iyi geçirgenlik, iyi watt kaybı. Küçük jeneratörlerde, yüksek verimli sürekli- döner makinelerde, ac ve dc.
	M-43	2,35	7,70	
	M-36	2,65	7,70	Düşük ve orta indüksiyonlarda iyi geçirgenlik, düşük watt kaybı. Yüksek reaktan çekirdeklerde, jeneratörlerde, yüksek verimli döner makinelerin statörlerinde.
	M-27	2,80	7,70	
	M-22	3,20	7,65	Düşük indüksiyonlarda mükemmel geçirgenlik, en düşük watt kaybı, küçük güç transformatörlerinde, yüksek verimle çalışan döner makinelerde
	M-19	3,30	7,65	
M-15	3,50	7,65		

Yönlenmiş elektiriksel çelikle  A876 ya da A876M	M-6	3,15	7,65	Taneleri yönlenmiş çelik yüksek yöne ait manyetik özellikleri, en düşük watt kaybı ve en yüksek geçirgenlik özellikleri akış yolu haddeleme yönünde paralel olduğunda geçerlidir. Kalın kalınlıklarda güç transformatörlerinde kullanılır, ince kalınlıklarda genellikle dağıtım transformatörlerinde kullanılır Enerji tasarrufları daha düşük watt kaybıyla gelişir.
	M-5	3,15	7,65	
	M-4	3,15	7,65	
	M-3	3,15	7,65	
Yüksek geçirgenlikli yönlenmiş çelik  Sadece ASTM A677		2,9-3,15	7,65	Yüksek indüksiyon işlemlerinde düşük watt kaybı

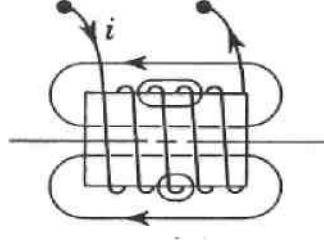
## 2.2 Temel Bazı Tanımlar

### 2.2.1 Magnetik Alan

Yukarıdaki ayrıtta da belirtildiği gibi elektromekanik sistemler, Faraday, Bio'Savart ve Amper yasaları üzerine kurulmuştur. Faraday yasasına göre, “ Bir magnetik alan içinde hareket eden ya da hareket etmeyen, ancak halkaladığı akısı zamanla değişen iletkenlerde bir gerilim meydana gelir”. Bio'Savart yasasına göre ise, “Bir magnetik alan içinde akım taşıyan iletkenlere bir kuvvet etki eder”. Bu iki yasa, elektromekanik enerji dönüşümü için bir magnetik alana gereksinim olduğunu ortaya koymaktadır (Tacer, 2005).

Magnetik alan, elektrik yüklerinin hareketi sonucunda ortaya çıkan bir etkidir. Bir maddenin en küçük parçası olan atomlarda negatif yüklü olan elektronlar, çekirdek etrafında yörüngesel bir hareket yaptıkları gibi, kendi eksenleri etrafında da bir dönme hareketi yaparlar (Şekil 2.1). Elektrik akımının yüklü parçacıkların hareketi sonucunda meydana gelmesi nedeniyle bu hareketlere, bir çeşit mikroskobik akımlar gözüyle bakılabileceği ve tabii ve yapay mıknatısların magnetik özellikler göstermesinde etkin oldukları ilk kez Ampere tarafından





Şekil 2.3 Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri

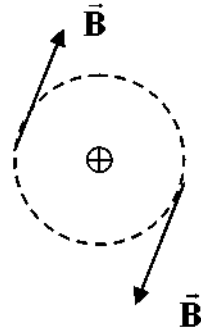
Şekil 2.2’de verilen çubuk ve at nalı mıknatıslardan da görüleceği üzere kuvvet çizgileri, N kutbundan çıkıp S kutbuna girerek mıknatıs içinden geçerek kapalı bir yol oluşturur. İletkenlerden oluşan bir bobin göz önüne alınır ve bu bobinden bir akım geçirilirse, yukarıda da belirtildiği gibi, bir magnetik alan meydana gelir. Bu alanın belirtilmesinde kullanılan kuvvet çizgileri, bobin eksenı yönünde olmak üzere bobinin bir tarafından girip diğer tarafından çıkarlar (Şekil 2.3). Mıknatıslarda olduğu gibi kuvvet çizgilerinin çıktığı bobin ucu N, çıktığı uç ise S kutbunu gösterir.

Magnetik alan oluşturulmasında üç değişik yol söz konusudur. Bunlar; elektrik akımı, daimi mıknatıslar ve elektrik alanının değişimidir. Bunlarla ilgili açıklamaları vermeden önce ilgili bazı kavramları açıklamak yerinde olacaktır (Tacer, 2005).

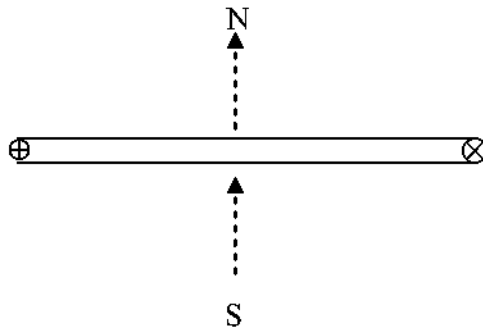
## 2.2.2 Magnetik Akı Yoğunluğu

Bir magnetik alan içinde birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu ya da magnetik indüksiyon olarak adlandırılır. Magnetik akı yoğunluğu vektörü, her noktada kuvvet çizgilerinin teğetleri doğrultusundadır. Magnetik alanın yönünü de belirten magnetik akı yoğunluğu yönü, bir N - S mıknatısında N kutbundan S kutbuna doğrudur. Akım taşıyan bir iletkende ise, merkezi iletken üzerinde olan daireye teğet olup, yönü ise akım yönüne bağlıdır. Akım ve magnetik akı yoğunluğu vektörlerinin doğrultuları arasındaki ilişki, sağ el burğu kuralıyla belirlenir. Başparmak akım yönünü göstermek üzere diğer parmakların doğrultusu, alanın ya da magnetik akı yoğunluğu doğrultusunu gösterir. Bir iletkende akım içeri doğru ise “+” simgesi ile dışarı doğru ise “x” ile gösterildiğinde sağ el burğu kuralına göre içeri doğru olan bir akım tarafından oluşturulan magnetik alan yönü Şekil 3.4 ’de gösterildiği gibi olur. B simgesi ile gösterilen magnetik akı yoğunluğu uluslararası birim sisteminde,  $[Wb/m^2]$  simgesi ile gösterilen weber/m<sup>2</sup> ile ölçülür.

Bir düzlemde bulunan ve kapalı bir çevrim oluşturan bir iletken göz önüne alınır ve bir akım taşıdığı varsayılırsa söz konusu düzlemde akımın girdiği ve çıktığı uçlarda kuvvet çizgileri ile gösterilen bir magnetik alan meydana gelir (Şekil 2.5). Yukarıda verilen açıklamalara göre, akım ve magnetik akı yoğunluğu şekilde gösterildiği gibi olur. Diğer taraftan gene yukarıda belirtildiği üzere bir mıknatısta kuvvet çizgileri N kutbundan S kutbuna doğrudur. Bu nedenle Şekil 2.5’de verilen iletkenin üst kısmı N kutbu, alt kısmı ise S kutbu olur. Kutup deyimi bir noktayı göstermesine karşın burada N kutbu, kuvvet ya da indüksiyon çizgilerinin iletkenden ya da bobinden dışa doğru, S kutbu ise bobinden içeri doğrudur. Bunun yanında kuvvet çizgilerinin kapalı bir yol oluşturduğu kısımlarda magnetik alan kuvvetli, kapalı yol oluşturmadığı kısımlarda ise zayıftır (Tacer, 2005).



Şekil 2.4 Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki



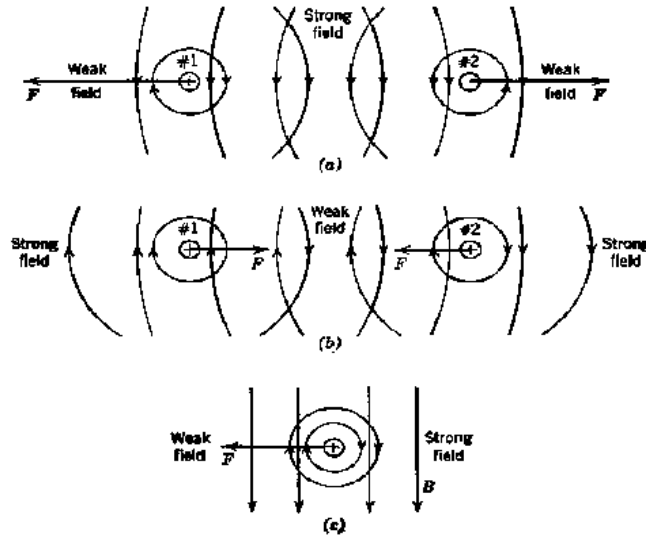
Şekil 3.5 Akım taşıyan bir çevrede kuvvet çizgileri

Şekil 2.6.a’da birbirine ters yönde akım taşıyan paralel iki iletken verilmiştir. Yukarıda tanımlanan burğu kuralına göre kuvvet çizgilerinin yönü şekilde gösterildiği gibi olacaktır. Kuvvet çizgilerinin yönleri, iletkenlerin arasında aynı olduğundan bileşke magnetik alan, bunların toplamı ile belirleneceğinden iletkenler arasında kuvvetli, dolayısı ile enerji iki iletken arasında toplanacak ve oluşacak tepki kuvveti iki iletkeni birbirinden ayırma

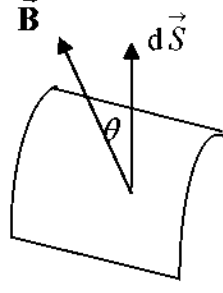
özelliğinde olacaktır. Buna karşın iletkenlerin dış kısımlarında kuvvet çizgileri ters yönlü olduklarından bunların farkı ile belirlenecek magnetik alan zayıf olacaktır. Şekil 2.6 b’de bu kez iletkenler aynı yönde akım taşımaktadır. Bu nedenle iletkenler arasında magnetik alan zayıf, dolayısı ile oluşacak kuvvet iletkenleri birbirine doğru çekecek özellikte olacaktır. Buna karşın dış kısımlarda ise magnetik alan kuvvetli olacaktır. Şekil 2.6 c’de ise düzgün bir magnetik alan içinde akım taşıyan bir iletken verilmiştir. Magnetik alan ve akım sonucunda oluşan kuvvet çizgisi yönleri şeklin sağ tarafında aynı olduğundan bileşke alan kuvvetli, sol tarafta ise yönler ters olduğundan bileşke alan zayıf olacaktır Kuvvet, magnetik akı yoğunluğu yüksek olan kısımdan alçak olan kısma doğru olacaktır (Tacer, 2005).

### 2.2.3 Magnetik Akı

Yukarıdaki ayrıttta da belirtildiği gibi birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu tanımdan hareketle magnetik alanda alınan belli bir yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı, magnetik akı olarak adlandırılır.  $\Phi$  simgesi ile gösterilen magnetik akı, uluslararası birim sisteminde [Wb] simgesi ile gösterilen weber ile ölçülür (Tacer, 2005).



Şekil 2.6 Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan



Şekil 2.7 Magnetik akı tanımı

Şekil 2.7’de verilen bir magnetik alan içindeki kapalı bir yol ya da akım taşıyan bir iletken oluşturulan bir çevrim için magnetik akı tanımı uygulandığında, genel olarak magnetik akı,

$$\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{S} \quad (2.1)$$

yüzeysel integrali ile belirlenir. Bu eşitlikte d S alan içinde alınan küçük dS yüzeyinin normali olan vektörü, B ise söz konusu küçük dS yüzeyindeki magnetik akı yoğunluğunun genliği ve doğrultusunu gösteren bir vektördür. Şekil 3.10’da B ve dS vektörleri arasındaki açı  $\theta$  ile gösterilmiştir. Bu iki vektör arasındaki açı  $\pi$  olduğunda, başka bir deyişle magnetik alan homojen olduğunda,

$$\Phi = BS \quad (2.2)$$

dolayısı ile,

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Magnetik akı biriminin [Wb] , S yüzeyi biriminin m<sup>2</sup> olduğu göz önüne alınırsa, yukarıda belirtildiği gibi magnetik akı yoğunluğu B’nin birimi [Wb / m<sup>2</sup>] olur. Bu da magnetik akı yoğunluğunun, birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı olduğunu gösterir (Tacer, 2005).

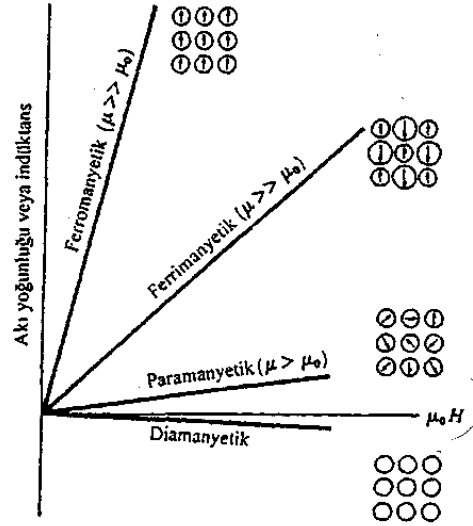
#### 2.2.4 Ferromagnetik Malzemeler

Faraday, yaptığı araştırmalar sonunda tüm maddelerin, magnetik alana bir tepki gösterdiğini ve bu tepki nedeniyle karşılıklı bir etkileşimin söz konusu olmasından dolayı maddelerin üç grupta toplanabildiğini göstermiştir (Altun, 2007).

1. Diamagnetik Maddeler: Bağlı magnetik geçirgenlikleri  $\mu_r < 1$  olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana dik şekilde kendilerini yönlendirirler. Diamagnetizma, tek



sayıda elektronlara sahip ve tamamlanmamış içi kabuğu olmayan maddelerde görünür. Radyum, potasyum, magnezyum, hidrojen, bakır, gümüş, altın ve su diamagnetik gruba girerler.



Şekil 2.8 Nüve malzemesinin akı yoğunluğu üzerine etkisi (Altun., 2007).

Diamanyetik malzemelerde manyetik moment üretilmez. Devamlı olarak güçlü momentler, aynı uygulanan alan için, paramanyetik, ferrimanyetik ve ferromanyetiklerde bulunur.

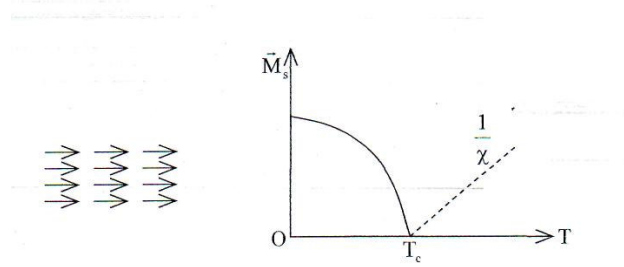
Herhangi bir atom üzerinde bir manyetik alan etkidiğinde yörünge elektronlarından dolayı manyetik momenti etkilemekle ve bütün atomlar için bir manyetik kutup çifti oluşur. Bu kutup çiftleri manyetik alana karşı koyarak manyetikliğin sıfırdan az olmasına neden olur. Bu davranış diamanyetizm olarak adlandırılır, nispeten yaklaşık 0,99995 geçirgenlik sağlar. Diamanyetik davranış, manyetik malzemeler ve cihazların uygulamaları için önemli değildir (Altun, 2007).

2. Paramagnetik Maddeler: Bağıl magnetik geçirgenlikleri  $\mu_r > 1$  olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana paralel şekilde kendilerini yönlendirirler. Paramagnetizma çift sayıda elektronlara sahip maddelerde görülür. Hava, alüminyum ve silisyum paramagnetik gruba girer. Paramanyetik davranış, manyetik alan uygulandığında kutup çiftleri alanla hizaya gelerek pozitif bir manyetikleşmeye neden olur. Buna karşın, kutup çiftleri etkileşmediği için, kutup çiftlerini hizaya getirmek amacıyla oldukça büyük bir manyetik alan gereklidir. Paramanyetizm olarak adlandırılan bu etki sadece yüksek sıcaklıklarda etkilidir. Nispi geçirgenlik 0,01'den azdır (Altun, 2007).

3. Ferromagnetik Maddeler: Demir, nikel, kobalt ve alaşımlarını içeren maddeler bu gruba girer. Ferromanyetik davranış 3d seviyesindeki (demir, nikel ve kobalt) veya 4f seviyesindeki (gadolinium) doldurulmamış enerji seviyelerinden dolayıdır. Ferromanyetik malzemelerde kalıcı çift olmayan kutup çiftleri uygulanan manyetik alanla kolayca hizaya gelir. Kutup çiftleri manyetik alanla kutup çiftlerinin tabii takviyesinden dolayı kolayca hizaya gelirler. Uygulanan alanın çok büyük bir büyüklüğü, yüksek bir nispi geçirgenlik sağlayan küçük manyetik alanlar için bile üretilir (Altun, 2007).

### 2.2.5 Ferromanyetizma

Ferromanyetizma durumunda spinler birbirine paralel olarak yönelmişlerdir. Böylece komşu spinler arasında kuvvetli bir pozitif etkileşme söz konusudur. Sıcaklık artarken, spin düzeni sıcaklıkla uyarılmaktadır. Böylece kendiliğinden olan mıknatıslanmanın sıcaklık bağımlılığı şeklindeki gibidir.



Şekil 2.9 Ferromanyetizma (Altun, 2007)

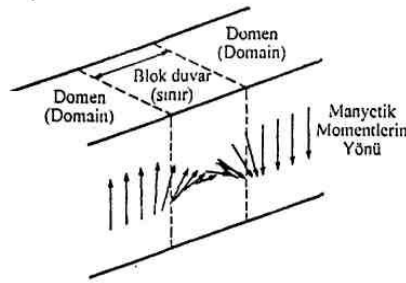
Mıknatıslanma sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır ve belli bir sıcaklıkta değeri sıfır olur. Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı ( $T_c$ ) denir. Alan sürekli olarak değiştiğinde alana karşı manyetikleşme ilişkisi, bir histerisiz döngüsü ortaya çıkarır. Histerisiz döngüsü, değişen bir manyetik alanda manyetikleşmenin şiddetini ve yönünü tarif eder (Altun, 2007).

Bir manyetik alanda domenlerin yönlenmesi; bir manyetik alan malzemeye uygulandığında, alanla hali hazırda hizaya gelen domenler hizaya gelmemiş domenlerin uzantısında büyür. Blok duvarları hareket etmek zorundadır. Uygulanan manyetik alan duvarların göç etmesi için gerekli kuvveti sağlar. Alanın şiddeti yükseldiğinde uygun bir şekilde yönlenmiş domenler büyümeye devam eder ve büyük bir net manyetikleşme olur. Manyetikleşmenin doyuma ulaşması bütün domenler uygun bir şekilde yönlendiğinde oluşur. Malzemede büyük miktarda bir manyetikleşme elde edilebilir (Altun, 2007).

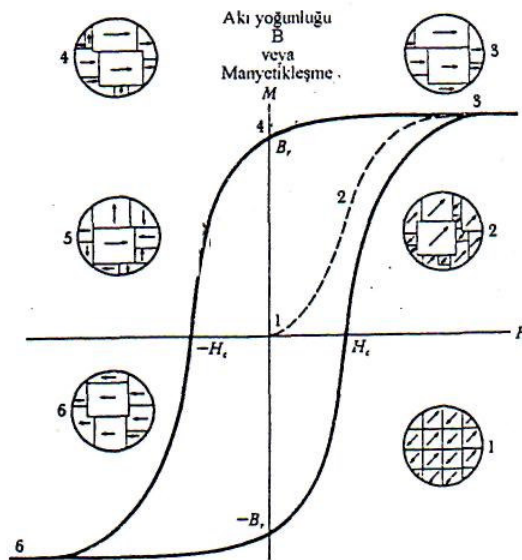
### 2.2.6 Dömen (Bölge) Yapısı

Ferromanyetik malzemeler, komşu atomların kutup çiftleri arasında pozitif etkileşmelerinden dolayı manyetikleşme üzerine kuvvetli bir etkiye sahiptir. Ferromanyetik bir malzemenin tane yapısı içerisinde manyetik dömenlerden oluşan bir alt yapı, dış alanın yokluğunda bile oluşur. Dömenler bütün kutup çiftlerinin hizaya geldiği malzemedeki bölgelerdir. Manyetik alana maruz kalmamış bir malzemede bireysel dömenler rasgele bir yönlenmeye sahiptir. Malzemedeki net manyetikleşme bütün olarak sıfırdır (Altun, 2007).

Blok duvarlar olarak adlandırılan sınırlar, tane sınırları gibi bireysel dömenleri ayırır. Blok duvarları, manyetik moment yönünün yavaş yavaş ve sürekli olarak bir dömeden diğerine değiştiği dar bölgelerdir (Altun, 2007).



Şekil 2.10: Bitişik atomlardaki manyetik momentler dömenler arasındaki sınırlar boyunca sürekli olarak yön değiştirir (Altun, 2007).



Şekil 2.11 Ferromanyetik histerisiz döngüsü manyetik alanın indüktans veya manyetikleşme üzerine etkisini göstermektedir. Kutup çiftlerin hizaya gelmesi manyetikleşmenin doymasına neden olur (nokta 3), kalıcı nokta 4, zorlayıcı alan nokta (Altun, 2007).

Bir manyetik alanda domenlerin yönlenmesi; bir manyetik alan malzemeye uygulandığında, alanla hali hazırda hizaya gelen domenler hizaya gelmemiş domenlerin uzantısında büyür. Blok duvarları hareket etmek zorundadır. Uygulanan manyetik alan duvarların göç etmesi için gerekli kuvveti sağlar. Alanın şiddeti yükseldiğinde uygun bir şekilde yönlenmiş domenler büyümeye devam eder ve büyük bir net manyetikleşme olur. Manyetikleşmenin doyuma ulaşması bütün domenler uygun bir şekilde yönlendiğinde oluşur. Malzemede büyük miktarda bir manyetikleşme elde edilebilir (Altun, 2007)

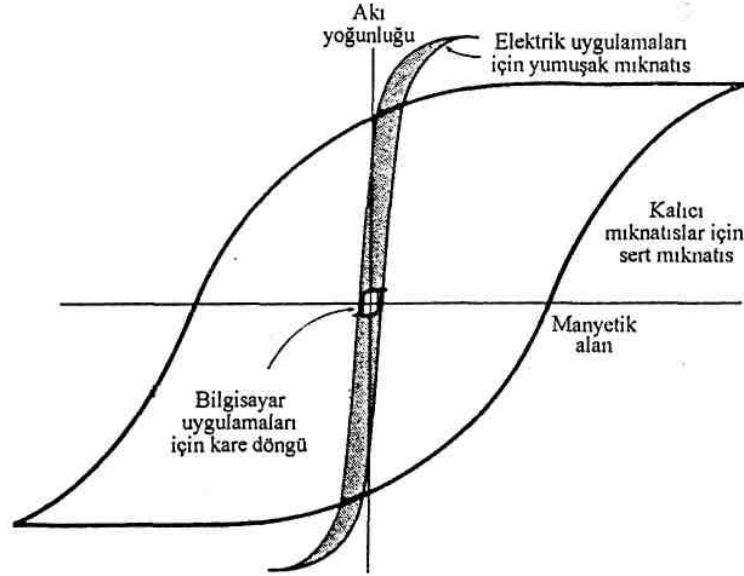
Alan uzaklaştırmasının etkisi; alan uzaklaştırıldığında domen duvarlarla oluşturulan direnç, domenlerin rastgele yönlenmelerde yeniden büyümesini önler. Sonuç olarak domenlerin çoğu orijinal alan yönüne yakın yönlenmiş kalır ve kalıcı olarak bilinen bir kalıntı manyetikleşme malzemelerde vardır. Malzeme kalıcı bir mıknatıs olarak davranır.

Bir alanı değiştirme etkisi; ters yönde bir alan uygulanırsa domenler zıt yönde hizaya gelerek büyür. Bir zorlayıcı alan H rastgele yönlenmiş domenleri zorlama ve birbirlerine etkilerini yok etmek için gereklidir. Alanın dayanımında daha da sonunda zıt yönde doyum için domenleri hizaya getirir.

Alan sürekli olarak değiştiğinde alana karşı manyetikleşme ilişkisi bir histerisiz döngüsü ortaya çıkarır. Histerisiz döngüsü değişen bir manyetik alanda manyetikleşmenin şiddetini ve yönünü tarif eder (Altun, 2007).

### **2.2.7 Manyetikleşme-Alan Eğrisinin Uygulanması**

Bir manyetik alanda malzeme davranışı histerisiz döngüsünün boyut ve şekli ile ilgilidir. Manyetik malzemeler için üç uygulamaya bakalım (Altun, 2007).



Şekil 2.12 Ferromanyetik malzemelerin üç uygulaması için histerezis döngüsünün kıyaslanması elektrik uygulamaları, bilgisayar uygulamaları ve kalıcı mıknatislar (Altun, 2007).

Elektrik uygulamaları için manyetik malzemeler; ferromanyetik malzemeler, bir elektrik akımı malzemeyi geçtiğinde oluşan manyetik alanın büyütülmesi için kullanılır. Daha sonra manyetik alanın çalışması beklenir. Uygulamaları elektromıknatislar için nüveleri, elektrik motorlarını, transformatörleri, jeneratörleri ve diğer elektrikselsel ekipmanları içerir.

Bu cihazlar, nüve malzemenin histerisiz döngüsünü sürekli olarak devretmesi için alan değişimini faydalı hale getirir (Altun, 2007).

Yumuşak mıknatislar olarak adlandırılan elektrikselsel manyetik malzemeler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Altun, 2007).

1. Yüksek bir manyetik doyum malzemenin daha çok iş yapmasına izin verir. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bir malzeme seçilirse manyetikleşmenin yüksek bir değeri elde edilir.
2. Döngüler, zorlayıcı alan çok küçükse uygulanan en küçük alanla yeniden yönlenebilir.
3. Küçük bir histerisiz döngüsü, bir malzeme değişen bir alana doğru devir yaparsa küçük bir enerji kaybı verir.
4. Küçük bir kalıcılık istenir. Yeniden kullanım için bir yük vagonundan bir çelik

fabrikasına hurda çelik transferi için kullanılan bir elektromıknatısta kalıcılık büyükse, uygulanan alan kaldırıldığında hurda bırakılmaz.

5. Kutup çiftleri, malzemenin çalıştığı frekansta kolaylıkla yeniden hizaya gelmelidir. Frekans çok yüksekse domenler her devirde yeniden hizaya gelemez daha sonra cihaz, kutup çifti sürtünmesinden dolayı dielektrik malzemelerdeki gibi ısınabilir.
6. Öz direnç çok küçükse akım eddy akımlarında olduğu gibi alandan sızabilir ve tekrar cihazın ısınmasına neden olabilir. Tipik yumuşak manyetik malzemeler tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Bazı yumuşak elektriksel malzemelerin özellikleri

	Maksimum	Doyum	Zorlayıcı
	Nispi	Manyetikleşmesi	Alan
Malzeme	Geçirgenlik	(tesla)	(A m <sup>-1</sup> )
% 99.91 saf demir	5,000	2,15	79.58
% 99.95 saf demir	180,000	2.15	3.98
%3 Fe Si (yönlenmiş)	30,000	2.00	11.93
%4 % Si (yönlenmemiş)	7.000	1.97	39.79
4S çok alaşımlı (%54.7 Fe %45 Ni %0.3 Mn)	25,000	1.60	23.87
Süper alaşımlı (%79 Ni, %15. Fe, %5 Mo, %0.3 Mn)	800.000	0.80	159.16
A6 Feroksküb (Mn,Zn) Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		0.40	
B2 Feroksküb (Ni.Zn) Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		0.30	

Demir nikel kobalt kolaylıkla manyetikleşirler (mıknatıslanırlar) ve kalıcı mıknatıslar olarak hizmet verirler. Buna karşın domenler bu saf metallerde kolaylıkla yönlendirler be B,H ürünleri daha karmaşık alaşımlara göre küçüktür. Manyetik özelliklerde bazı iyileşmeler mikro yapı içerisine hatalar katmakla kazanılır (Altun, 2007).

Sadece demir, nikel ve kobalttan oluşan küçük bir saf elementler grubunda, aynı sıradaki momentler normal ısıda ferromanyetizma meydana getirir. Bununla beraber, normal ısının biraz altında bu elementlerdeki ferromagnetizma etkilenmez. Isı sonucunda oluşan kuvvetler, tamamen komşu atomlarda magnetik moment oluşturan elektronlar arasındaki mesafeye

bağlıdır. Mesafenin belli bir değerinde ferromanyetik olan malzeme, bu değer altında magnetik olmayan malzeme durumuna geçer. Antiferromanyetik malzemelerde bu mesafe, magnetik olmayan malzemelerin alaşımıyla büyütülebilir. Böylece antiferromanyetik malzemedeki ferromanyetik alaşım meydana getirilebilir (Altun, 2007).

### **2.3 Elektriksel Bir Makine İçin İdeal Çelik**

Elektrikli makine tasarımcılarının ortak görüşünden; elektriksel bir makine için kullanılacak olan ideal çelik, düşük bir kayıba sahip olmalı yüksek geçirgenlik ve yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Ne yazık ki silisyumun elektriksel çeliklerde ana alaşım elementi olarak kullanılması kayıpları azaltıp, geçirgenlik ve iletkenliği arttırsa da üretim maliyetini artırıyor.

Elektriksel çelik üreticilerinin, farklı kayıp ve geçirgenlik özelliklerine sahip farklı tip ve kalitelerde çelik üretebilmek için hem çeliğin kimyasal bileşimi hem de üretim yöntemiyle ilgili kabul edilebilir fiyatlarda uzlaşmaya varmaları gereklidir.

Son yıllarda düşük kayıpları geliştirebilmek için çok düşük karbonlu çelikler üretebilmek için ve çok düşük sülfür içeriklerine ulaşabilmek için araştırmalar yapıyor. (Altun, 2007)

### **2.4 Kayıpları Etkileyen Üretim Prosesleri**

Çoğu çelik üretim prosesinin çelik kayıpları üzerinde bazı etkileri vardır, fakat alaşımlama dışında en önemli olanları;

1. Tavlama
2. Yüzey kaplama veya indükleme
3. Tabaka kalınlıkları

#### **2.4.1 Tavlama**

Elektriksel çelik üreticileri haddeleme proseslerini iyi yönde manyetik özelliklere sahip malzeme üretebilmek için ve üretilen çelik tipi için gereken özellikleri sağlayabilmek için organize ederler. Yine de eğer bu malzemelerin üreticisi zarar verebilecek olan faktörlerin kontrolünün yapılmasını kanıksamamışsa, bu malzemelerden optimum düzeyde özellikler beklenemez. Bu zararlı faktörler, malzemenin işlenmesiyle oluşan gerilimler, çatlak(ilerleyen) distorsiyon( slitter distortion), bası distorsiyonu(punching distortion), kenar, köşe çapakları, tabakaların tavlama sırasında tamamlanmamış karbonsuzlaşma, aşırı oksitlenme bunlardan bazılarının isimleridir. Şunu bilmek önemlidir ki en iyi manyetik kalite çekirdeklerin veya

tabakaların uygun ve hakkını verecek şekilde tavllanmasıyla mümkündür. Bu da gerilim içermeyen iyi bir şekilde dekarbürize edilmiş ve aşırı derecede oksitlenmemiş bir yapıyı anlatır. Tabakaların toplu halde de gerilim içermemesi gereklidir. Müşterinin yapacağı tavlamaı genellikle iki geniş sınıfa ayırmak mümkündür. Bir gerilim giderme tavlamaı tam mamül seviyesinde manyetik özelliklerin kazanımı için normal olarak kullanılan bir ısıı işlemidir. Bir 'kalite değerlendirme tavlamaı' sadece tabakalarda meydana gelen gerilimi gidermekle kalmaz aynı zamanda karbonsuzlaştırır ve tane büyümesine de katkıda bulunur.

Çizelge 2.3 Elektriksel çelikler için tavlama tipleri ve amaçları

Çelik tipleri	Tavlama Tipi	Tavlamanın öncelikli Amacı
Tane yönlenmiş	Gerilim giderme	Gerilimin giderilmesi işleme, sıyırma, şekil verme veya basma sırasında gelişen gerilimlerin giderilmesidir. Yönlenmiş çelik manyetik kaliteye zarar verecek olan oksitleyici ve karbürleyici ortamlardan dikkatlice korunmalıdır. Manyetik özelliklerin kazanımı sağlanır.
Yönlenmemiş tam mamül	Gerilim giderme	Merdaneler ve yıpratıcı operasyonlarla gelen gerilimlerin giderilmesidir. Manyetik özelliklerin kazanımı. Karbonu azaltmak için yaklaşık 825 <sup>0</sup> C'de nemli hidrojen ortamda yapılır.
Yönlenmemiş yarı mamül ve Zor parçalar	Kalite Değerlendirme	Manyetik kalite ve tane büyümesinin engellenmesi. Yüzeyde ayırıcı bir oksit tabakası şekillenmesi Gerilim giderme+karbonsuzlaştırma+ tane büyümesinin önlenmesi etkisi yapar.



Hem gerilim giderme hem de kalite değerlendirme tavlamaşı çoğunlukla sürekli metodlarla yapılır. Sürekli tavlama kontrollü gaz atmosferi sağlanarak çelik oksidasyondan korunur ve manyetik özellikler geliştirilir. Sürekli fırınlar genellikle aşağıdaki kısımlardan oluşur.

1. Yağlayıcıların yandığı kısım
2. Dekarbürizasyon ve tane büyümesi için yüksek ısı zonları ve
3. Soğutma kısımları aynı zamanda yalıtıcı yüzey oksidi oluşumu için hazırlık (Altun, 2007)

#### **2.4.2 Çekirdek Hücre Malzemelerin Yüzey Yalıtımı**

Eddy akımları kayıplarının sınırlaması, uygun dirençli elektrikli çeliklerle, uygun veriler, yeterli derecede ince tabakalar ve tabakaların etkili elektrikselle yalıtımını gerektirir. Eddy akımları tabakaların sadece birinin içinden geçmez, bir hücre gibi bütün çekirdeğin içinden geçerek, tabaka yüzeylerinden bir taraftan diğer bir tarafa akıp gidecektir. Manyetik bir hücreyi basitçe lamine ederken, eğer tabakaların yüzeyi uygun bir şekilde yalıtılmadıysa ve pürüzler, çapaklar çok küçük değilse manyetik hücre bütün hücreyi sirküle ederek gelen fazla akımı engelleyemez.

Tabaka yüzey yalıtımı direnci, tabakalar arası güç kaybı, toplam güç kaybının genellikle %1-2'si gibi küçük bir oranına düşürüldüğünde oldukça uygun olarak düşünülebilir. Ne kadar büyüklükteki yalıtım uygun ve hangi yüzey yalıtımı daha uygun gibi sorular bazı kompleks sorulardır. Bu soruların cevabı ise aparatın sadece arzu edilen verimliliğine bağlı değil aynı zamanda bir çok dizayn ve üretim faktörlerine bağlı olup bunların her biri tabakalar arası güç kaybının büyüklüğünü de etkilemektedir. Çok küçük beygirli motorlar gibi küçük elektrikli aletler yüzey yalıtımı gerektirmeyebilir bundan ötesi çelik yapımında veya gerilim giderme tavlamaşında doğal oksit filmi üretmeleri sağlanabilir. Fakat yalıtıma başka nedenlerden dolayı da ihtiyaç duyulabilir, örneğin korozif ortama maruz kalan aletlerin hücrelerine, oksit filmin bozulmasını ya da bundan kaynaklanan düşük direnci önlemek için yalıtıcı kaplama yapılabilir.

Yalıtıcı kaplamalar birinci alternatif olarak çeliğin zımbalanabilirliğini (preslenebilirliğini) arttırdığı için kullanılırlar ve kullanım gerekçeleri doğrudur çünkü onlar kalıp ömrünü uzatır ve zımbalama maliyetini düşürürler. Yarı mamül yönlenmemiş elektrikselle çeliklerde tabaka yapışmalarını azalttığından yapışmayan kaplamalar kullanılabilir. Kaplamalardaki yenilikler ve gelişmeler sıradan yapışmayan kaplamalara göre daha yüksek sıcaklıklarda tavlama

yapılmasına olanak verir, bu da manyetik kaliteyi geliştirip, üretkenliğin artmasıyla sonuçlanır.

Tabakalarda kullanılan kaplamanın tipi önemlidir çünkü farklı kaplamaların ısıl işleme olan dirençleri de farklıdır. Örneğin; kaplamanın erkenden bitmesi, yüzeyden gitmesi v.b.

Çizelge 2.4 Silisli çeliklere uygulanan izolasyon tipleri (Altun, 2007)

TİP	TANIMLAMA
C-O	Bu tanımlama sadece yassı haddelenmiş silisli çeliğin yüzeyinde oluşan doğal oksit yüzeyidir. Genellikle küçük hücrelerde ve gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanır ve ince fakat etkili tabaka yalıtımı sağlar
C-2	Bu tanımlama inorganik bir yalıtımı anlatan, tane-yönlenmiş silisli çeliğin yüksek sıcaklıkta hidrojen tavlaması sırasında, çeliğin yüzeyine uygulanmış MgO ve silikat kaplaması reaksiyonunun bir sonucu olarak oluşan camsı filmidir. Bu yalıtım havada-soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Normal gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanacak, transformatör hücrelerinin dağılımında kullanıldığı gibi yeterli tabakalar arası dirence de sahiptir. Kaplamanın aşındırıcı doğasından dolayı ezilmiş, basılmış, kalıplanmış tabakalara uygun değildir.
C-3	Bu yalıtım vernikli kaplamaları içerdiğinden havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Tabakalar arası direnç bu kaplama sayesinde sağlanır ve kalıp yağlayıcı olarak kullanılan C-1 kaplamasından daha üstündür. C-3 kaplaması bir de preslenebilirliği artırır. Normal işlem sıcaklıklarına dayanır fakat gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanamaz.
C-4	Orta derecede yalıtım direnci gerektiren havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Bu kaplama kimyasal muamele edilmiş veya fosfatlanmış yüzeyden oluşur. Gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına kadar dayanıklıdır ve preslenebilirliği artırır.
C-5	Bu yalıtım C-4 ile aynı ve inorganiktir fakat tabakalar arası direnci arttırmak için buna seramik dolgular eklenmiştir. Genellikle taneleri yönlenmiş silisli çeliklerde C-2 kaplamasının üzerine uygulanır. Havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreleri ve yüksek voltajlarda dönen kesilmiş tabakalarda kullanılır. Aynı zamanda yüksek seviyede tabakalar arası direnç gerektiren durumlarda da uygulama imkanı bulur. C-2 gibi nötr veya hassas redükleyici atmosferde gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına kadar dayanıklıdır.

Not: Isı, kaynak ve pres döküm gibi uygulamaları içeren üretim süreçlerinde, bırakılabilindiği kadar az kalıntı bırakabilmek için normal kaplamadan daha ince bir kaplama kullanılması istenebilir. Bu kaplamalar preslenebilirliği artırır ve üretici doğru kalınlığı kullandığından emin olmalıdır. \* C-3 genel olarak C-1'in yerini aldığından bu tablodan kaldırılmıştır.

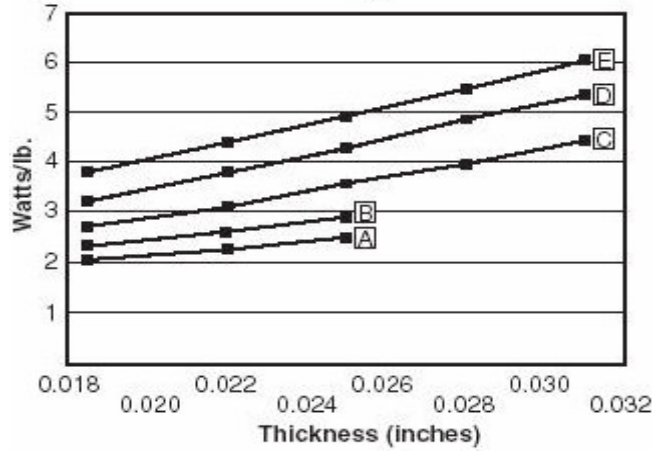
### 2.4.3 Tabaka Kalınlıkları

Eddy akımı kayıpları lineer olarak tabaka kalınlığını arttırlar. Hatta belirli bir çelik için kayıp 2 ise kalınlık da 2 artar denilir, fakat bu basit bir indirgemedir. Şekil eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir. Teoride, değerleri verilmiş bir çelik için indüklenmiş voltaj, kesit alan oranı arttıkça artar. Teorik olarak, tabakalar inceldikçe özellikler de iyi yönde gelişir. Pratikte ne de olsa daha ince tabakalar hem çelik üreticisi hem de motor üreticisi için pahalıya mal olmaktadır. 0.5 mm'den ince tabakaların işlenmesi zor ve tabakalaşma ve çekirdek hücre üretimi sırasında zarar görmeye meyillidir. Bu nedenle endüstriyel motorları çok azı bundan daha ince tabakalara sahiptir buna rağmen daha ince tabakalar yüksek sıklıkta ve başka özel amaçlı makineler için de kullanılır.

Tamircilerin parmak bastıkları nokta, tabakalar inceldikçe, eski izleri silmek için daha çok çaba ve dikkat gerekiyor. Bu kaplamasız (finger plate), üretilen hücreler için kısmen doğru bir saptamadır.

ABD'de ki motorlarda tipik olarak 0,47–0,64 mm arasında ki tabaka kalınlıkları kullanılır, fakat bu bir üreticiden diğerine göre değişir. Avrupa'da en çok bilinen tabaka kalınlığı hem küçük hem de büyük beygirli motorlarda 0,5 mm ve 0,65 mm'dir.

Çeliğin kalınlığını değiştirmek motor üreticisi için büyük bir masraftır. Zımba kalıpları belli bir tabaka kalınlığına göre ayarlanmıştır bundan dolayı eğer tabaka kalınlığı değişirse bunlar da yer değiştirmelidir. Zımba kalıplarının kullanımı malzeme kalınlığı belirlenmesinde etkin kılınırsa, bu çapak boyunu kötü bir şekilde etkileyecek ve kalıpların zımbalama sırasında yapışmasına veya kırılmasına neden olabilecektir. Bu yüzden çoğu motor veya tabaka üreticisi herhangi bir özel tabaka çapında ve tek bir tabaka kalınlığında standardize olurlar. Şekilde eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir. (Altun, 2007)



Şekil 2.13 Eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir.

## 2.5 Silisli Saclar Ve Özellikleri

Sac, levha haline getirilmiş metal özellikle demir malzemedir. Kalın levhaların silindirler arasından geçirilmesiyle yani haddelemeyle elde edilirler. Sıcak olarak yapılan ilk haddelemeden sonra düzgün bir yüzey elde edebilmek için soğuk haddeleme yapılır. Değişik kalınlıkta olan bu saclar, belirli standart ölçüler dahilinde veya şeritler halinde kesilir.

Çeşitli tekerlekli vasıtaların kapakları, gemi gövdeleri ve pek çok teknolojik uygulama sahası yanında sacların en önemli kullanıma alanlarından biri de elektrik araçlarıdır. Elektrik motorlarının rotor, stator sargılarının ve transformatör sargılarının çekirdeğini silisyumlu sac demetleri teşkil eder. Silisli sacların en önemli özelliği, taşıdığı silisyum sayesinde manyetik kayıpları minimuma indirmesi ve neticede verimi arttırmasıdır. Ayrıca demire katılan bu silis, demirin manyetik özelliklerinde zamanla meydana gelebilecek değişiklikleri azaltarak, demiri daha kararlı hale getirir. Haddeleme sırasında sac kristallerinin belirli bir doğrultuda yönelmesi sacın manyetik özellikler bakımından kalitesinin artmasına ve belirli bir manyetik devre için daha az saca ihtiyaç göstermesine sebep olur.

### 2.5.1 “Sİ” Elementinin Çeliğe Etkileri

Yassı-düz haddelenmiş elektrikselle çelikler özel kimyasal kompozisyonlardan çok manyetik özellik ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla üretilmişlerdir. Manyetik özellik en önemli parametredir ve kimyasal kompozisyona bağlı olduğu kadar üretim yöntemine de bağlıdır. Silisyum elektrikselle çelikler için en önemli alaşım elementidir. İlave edilir çünkü çeliğin öz direncini arttırır ve bu yolla çekirdek (iron) kaybının bir bileşeni olan eddy akımı kaybını

azaltır. Silisyum, çeliğin tane yapısını etkiler ve böylece yönlenmemiş elektriksel çeliklerde bir şekilde histerisiz bileşenini azaltarak çekirdek(iron) kaybını azaltır. Ürün tipine bağlı olarak elektriksel çeliğe ilave edilen diğer elementler alüminyum ve mangandır. Bunların her biri öz direnç gibi herhangi bir fiziksel etkiden çok metalurjik etkileri açısından eklenirler. Bu alaşım elementlerinden her biri çeliğin tane yapısını iyi bir şekilde etkiler, böylece çekirdek kaybının bir bileşeni olan histerisizi düşürmeye yardımcı olur. Diğer elementler elektriksel çeliklerde mevcuttur fakat bunlar sadece artık formda bulunan empüriteler şeklindedir. Karbon ergitmeden son ürüne kadar miktarı değişen tek elementtir. Haddemeleme prosesi sırasında özel ısıl işlemler tam mamulün karbon içeriğini çok düşük değerlere düşürür. Karbon müşteri tarafından tavlama işlemi sırasında yarı-mamül seviyesinde yapıdan ayrılır(örneğin; motor üreticisi) . Eğer taneleri yönlemiş bir çelik varsa üreticide, kükürt ve nitrojen gibi empüriteler son kristal oryantasyonu geliştirmeye yardımcı olmaları açısından başlangıç aşamasında istenirler fakat son tavlama yapıdan kaldırılırlar.

Yassı haddelenmiş silisli-demir saclar ve çubuklar düşük orandan kükürt içerirler, genel olarak %0,025 daha iyi kalitelere %0,01'dir. Mangan miktarı yaklaşık %0,70 'e kadar çıkabilir. Krom, molibden, nikel, bakır ve fosfor gibi artık elementler de kalabilir. Silisyumdan sonra en büyük alaşımlama katkısı %0,6'ya kadar Al (opsiyonel) (Altun,2007)

Geçirgenlikteki artış watt kaybındaki düşüş Si yüzdesi ile ayarlanır. Si içeriğindeki artışın direnci arttırması ve uygun bir şekilde watt kaybını düşürmesi istenir. Fakat; Si içeriği arttığında manyetik indüksiyon azalır ve geçirgenlikte bir düşüş oluşur. Düşük "Si" konsantrasyonları, metalurjik faktörler açısından incelendiğinde manyetik özellikleri kötü etkiler. Bu durum oksijen içeriği veya deoksidasyon ile ilgili bir şüphe yaratmıştır. Düşük "Si" konsantrasyonlarında çözülmüş oksijen konsantrasyonu tam olarak kontrol edilememektedir. (Chaudhry, 2007)

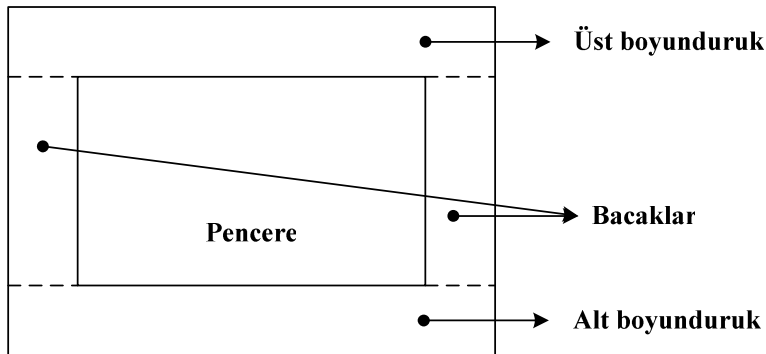
### 3. TRANSFORMATÖRLER

#### 3.1 Temel Bilgiler

Elektrik santrallerinde jeneratörler ile üretilen gerilimin değeri çok yüksek olmadığından genellikle ekonomik anlamda dağıtım elverişli değildir. Dolayısıyla generatör çıkış gerilimleri transformatörlerle yükseltılarak kullanılacağı yere taşınır ve orada tekrar transformatörler kullanılarak alçaltılır.

Bu açıklamalara dayanarak belli bir alternatif akım sistemini, aynı frekanslı ancak farklı şiddet ve gerilimde başka bir alternatif akım sistemine dönüştüren statik elektrik makinesine transformatör denir. Transformatörlerde hareket olmadığından sürtünme ve rüzgar kayıpları mevcut değildir, dolayısıyla transformatörler, verimi en yüksek (% 99% 99,5) olan elektrik makineleridir.

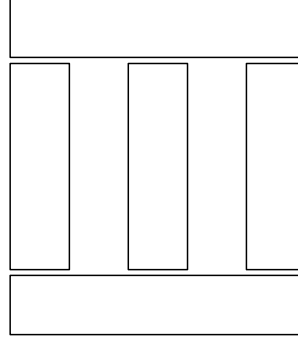
Transformatörler, demir çekirdek (nüve) üzerine sarılmış, birbirlerine ve toprağa göre izole edilmiş iki sargı grubundan oluşur. Bu sargılardan uyarılan sargıya primer sargı, diğer sargıya sekonder sargı denir. Çekirdeğin, sargıları üzerinde taşıyan kısmına bacak ve bunları alt ve üst kısımda birleştiren parçalara alt ve üst boyunduruk denir (Şekil 3.1). Ayrıca gerilimlerine göre, gerilimi küçük olan sargıya alçak (alt) gerilim sargısı, gerilimi büyük olan sargıya yüksek (üst) gerilim sargısı denir. Primer gerilimi, sekonder gerilimden büyükse bu çeşit transformatör düşürücü veya alçaltıcı transformatör, primer gerilimi sekonder geriliminden küçükse bu çeşit transformatörler de yükseltici transformatörler olarak isimlendirilirler.



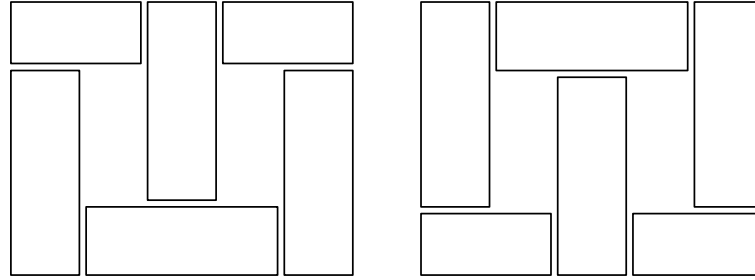
Şekil 3.1 Transformatör kısımlarının şematik gösterilişi

Transformatörlerde çekirdek iyice sıkıştırılmış ince, silisyumlu veya hipersil ismi verilen % 3 ila 3,5 silisyum içeren, çelik saçlardan yapılarak histerezis kayıpları azaltılır. Bacaklar ve boyundurukların birbirleriyle bağlantısı düz veya birbirine geçme şeklinde yapılır.

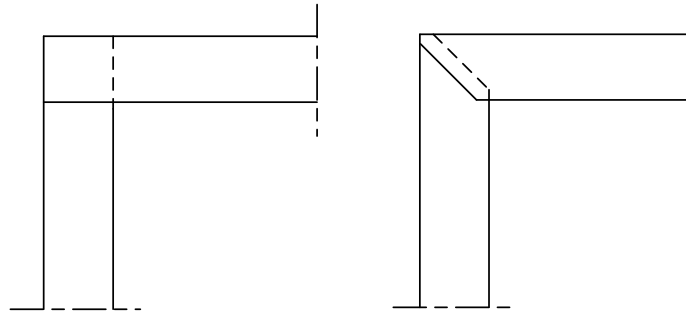
Bağlantının düz olduğu durumda, kısımlar ayrı ayrı imal edilir, sonradan birleştirilir (Şekil 3.2). Geçme şeklindeki bağlantı, dik veya diyagonal olabilir. Geçme şeklindeki bağlantıda ek yerlerinin aynı hat üzerinde olmamasına dikkat edilir (Şekil 2.3).



Şekil 3.2 Bacaklar ve boyundurukların düz bağlantısı



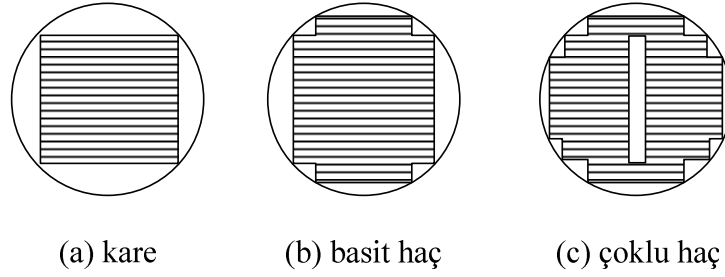
(a) Dik bağlantı



(b) Diyagonal bağlantı

Şekil 3.3 Bacaklar ve boyundurukların; (a) Dik, (b) Diyagonal bağlantısı

Küçük güçlü transformatörlerin bacak kesitleri; kare veya dikdörtgen, orta büyüklükteki transformatörlerin ise haç şeklinde olup, soğutma amacıyla sargılar ile bacaklar arasında hava kanalları bırakılır. Büyük güçlü transformatörlerin bacak kesitleri ise çoklu haç şeklindedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Çeşitli bacak kesitleri

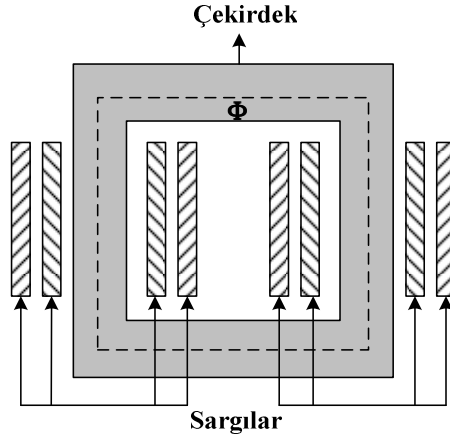
### 3.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması

Transformatörler faz sayısına göre tek, üç veya çok fazlı transformatörler olarak sınıflandırılabilir. nüvenin yapısına göre çekirdek tipi, mantel tipi ve spiral çekirdek tipi olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca sargı şekline göre silindirik sargılı ve dilimli sargılı olarak isimlendirilirken, sargı durumuna göre iki sargılı veya ototransformatörler olarak ikiye ayrılırlar. Transformatörlerde soğutma amacıyla hava, su veya yağ kullanılır. Dolayısıyla soğutma malzemelerine göre de transformatörler üç grupta toplanabilir.

### 3.3 Bir Fazlı Transformatörlerin Yapılışları

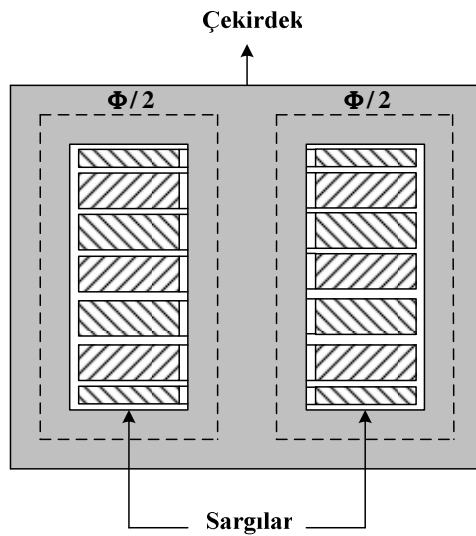
Bir fazlı transformatörlerde manyetik devre ve sargıların birbirlerine göre durumları dikkate alındığında transformatörler; çekirdek (nüve) tipi, mantel tipi (shell tipi), spiral çekirdek tipi (dağıtılmış nüveli tip) olmak üzere üç şekilde üretilmektedir. Çekirdek tipi transformatörde sargılar manyetik devreyi çevreleyecek şekilde, primer ve sekonder sargıların yarısı farklı iki bacak üzerine sarılır (Şekil 3.5). Mantel tipi transformatörde alt ve üst gerilim sargılarının tamamı orta bacağa sarılıp, sağ ve soldaki bacaklar boş bırakılır (Şekil 3.6). Spiral çekirdek tipi transformatörün yapısı Mantel tipine benzer. Bu tipte; spiral şeklinde sarılmış saçlardan oluşan ve ortaları boş bırakılan iki çekirdek birleştirilerek, bu boşluklara alçak ve yüksek gerilim sargıları yerleştirilir.



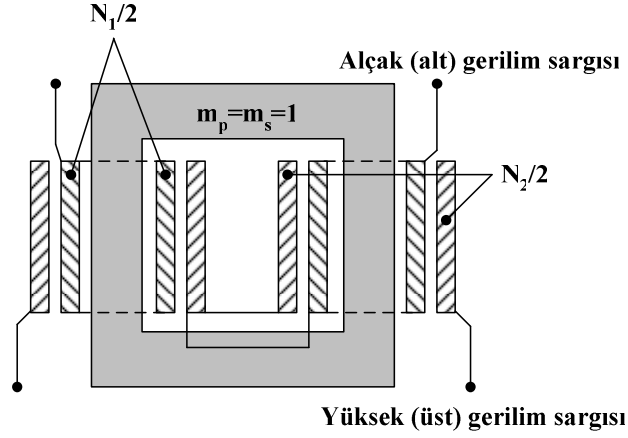


Şekil 3.5 Çekirdek tipi transformatörün genel görüntüsü

Transformatörler ister bir, ister üç fazlı olsun izolasyon nedeniyle alçak gerilim sargısı çekirdek üzerine, yüksek gerilim sargısı ise alçak gerilim sargısının üstüne yerleştirilir. Her iki sargı arasında bırakılan boşluk soğutma amacı ile dolaşacak yağ içindir. Şekil 3.7’de gösterilen bir fazlı çekirdek tipi transformatörde eğer alt ve üst gerilim sargılarının bütün sarımları bir bacak üzerine yerleştirilirse sarım uzunluğu arttığından bakır miktarı artar ve dolayısıyla bakır kayıpları daha fazla olur. Bunun için alçak ve yüksek gerilim sargıları her iki bacağa yarılmalı ve seri bağlanmalı suretiyle yerleştirilir. Bu tip Mantel tipine nazaran daha az demir gerektirir ve sargının yalıtılması daha kolay olduğundan yüksek gerilim için daha uygundur.



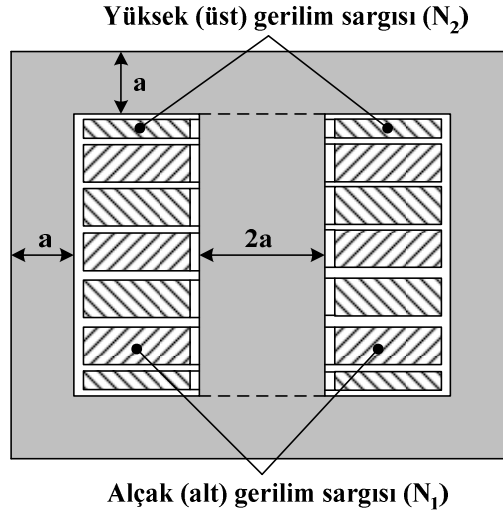
Şekil 3.6 Mantel tipi transformatörün genel görüntüsü



Şekil 3.7 Bir fazlı çekirdek tipi transformatörün şematik gösterilişi

Şekil 3.8'de gösterilen bir fazlı Mantel tipi transformatörlerde, alt ve üst gerilim sargıları orta bacağına yerleştirilmiş ve sargılar iki dış bacak tarafından örtülmüş durumdadırlar. Bu tip transformatörlerde manyetik akı yolu Şekil 3.6'da da gösterildiği gibi daha kısa olduğundan mıknatıslanma akımı küçüktür. Ayrıca sargılar dış etkilerden daha iyi korunabildiğinden çok büyük güçlerde tercih edilirler.

Diğer taraftan spiral çekirdek tipi transformatörlerde çekirdekte hava aralığı olmadığından demir kaybı en aza indirilmiştir ve genellikle küçük güçlerde tercih edilirler.



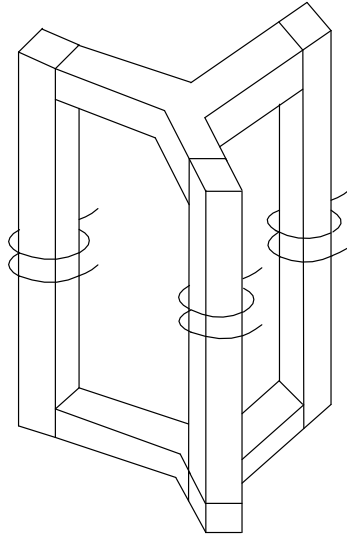
Şekil 3.8 Bir fazlı mantel tipi transformatörün şematik gösterilişi

### 3.4 Üç Fazlı Transformatörlerin Yapılışı

Üç fazlı transformatörlerde üzerinde aralarında  $120^\circ$ 'lik faz farkı olan üç değişik akım sistemini taşıyan sargılar bulunur. Bazen üç fazlı transformatör yerine üç adet bir fazlı transformatör de kullanılabilir. Bir fazlı üç adet transformatör kullanımının en büyük avantajı faz sargılarından birinde bir arıza olduğunda, yalnız o transformatörün onarılmak için devre dışı bırakılması, diğer ikisinin çalışmalarına devam etmesidir. Ayrıca büyük transformatörlerin taşıma problemi de bu yolla yenilmiş olur. Ancak bu avantajlara rağmen pahalıya mal olması ve fazla materyal gerektirmesi bu yöntemin dezavantajlarıdır.

Üç fazlı transformatörler de çekirdek ve mantel tipi olmak üzere iki kısma ayrılır.

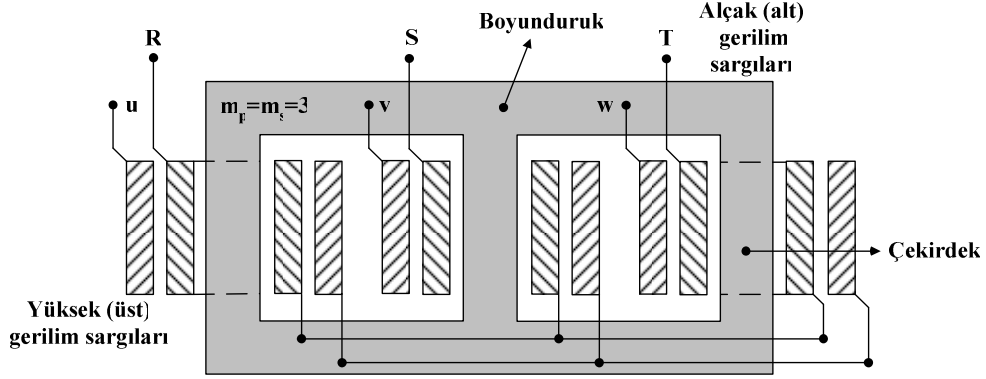
Ayrıca çekirdek tipi transformatörler simetrik olanlar ve simetrik olmayanlar olarak da ikiye ayrılabilir. Şekil 3.9'da üç fazlı simetrik çekirdek tipi transformatörün prensip şeması verilmiştir.



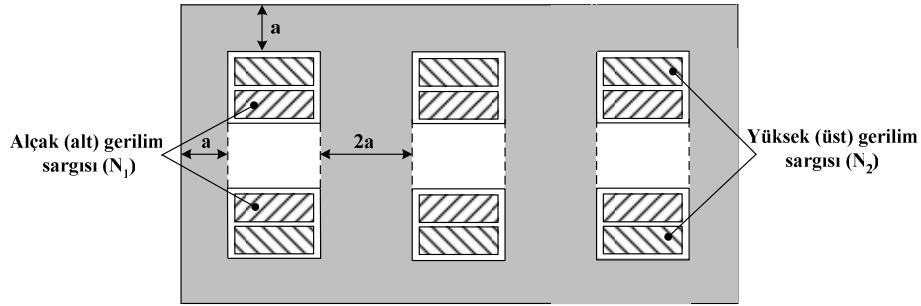
Şekil 3.9 Simetrik üç fazlı çekirdek tipi transformatörün şematik gösterimi

Bu tip transformatörde her bakımdan bütün fazlar simetriktir. Ayrıca üç fazın demir yolları da birbirine eşittir. Bugün, üretimi daha kolay ve daha ucuza mal olan simetrik olmayan üç fazlı çekirdek tipi transformatörlerin uygulama alanları çok yaygındır. Bu transformatörlerin simetrik olmayışının (Şekil 3.10) nedeni, orta faza ait demir yolunun diğer fazlarındakinden daha kısa oluşudur. Ayrıca bacakların bir düzlem içinde bulunması bu tip transformatörlerin üretimini de kolaylaştırmaktadır. Her bir bacağı o faza ait alçak ve yüksek gerilim sargısı yerleştirilmiştir.

Bu transformatörlerde fazların manyetik devreleri bağımsız değildir. Üç fazlı mantel tipi transformatörler Şekil 3.11'den de görüleceği gibi üç tane bir fazlı mantel tipi transformatörün bir araya gelmesinden oluşur. Burada her fazın manyetik devresi diğerinden bağımsızdır.



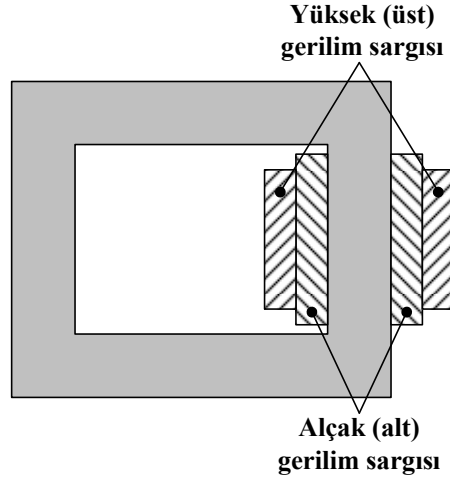
Şekil 3.10 Simetrik olmayan üç fazlı çekirdek tipi transformatörler



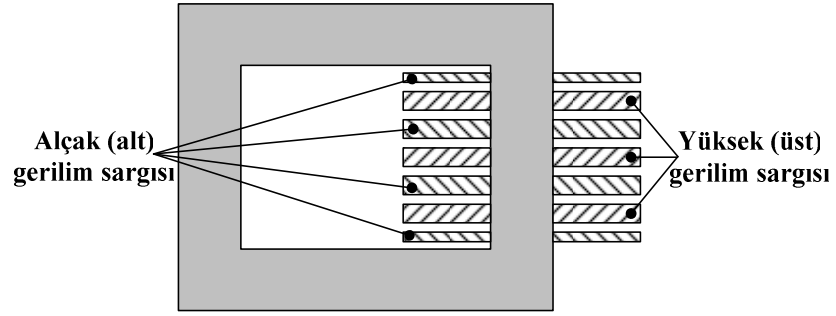
Şekil 3.11 Mantel tipi üç fazlı transformatörler

### 3.5 Transformatör Sargıları

Transformatör sargıları; silindirik sargı (Şekil 3.12) ve dilimli sargı (Şekil 3.13) tipinde olmak üzere yapılırlar. Silindirik sargıda üst gerilim sargısı silindiri, alt gerilim sargısı silindiri üzerine geçirilmiştir. Dağılma reaktansını azaltmak için alt gerilim sargısı iki silindire bölünür ve üst gerilim sargısı bu iki silindirin arasına yerleştirilebilir. Dilimli sargıda ise alt ve üst gerilim sargıları ayrı dilimler halinde bacaklar üzerine yerleştirilir. Şekil 3.13'de gösterildiği gibi başlangıç ve sondaki alt gerilim sargısına ait bobinler yarımşar sargı içerir. Üç sargılı transformatörlerde ise gerilimi en düşük olan sargı içte, orta gerilimdeki sargı ortada ve gerilimi yüksek olan sargı en dışta bulunur.



Şekil 3.12 Silindirik sargı



Şekil 3.13 Dilimli sargı

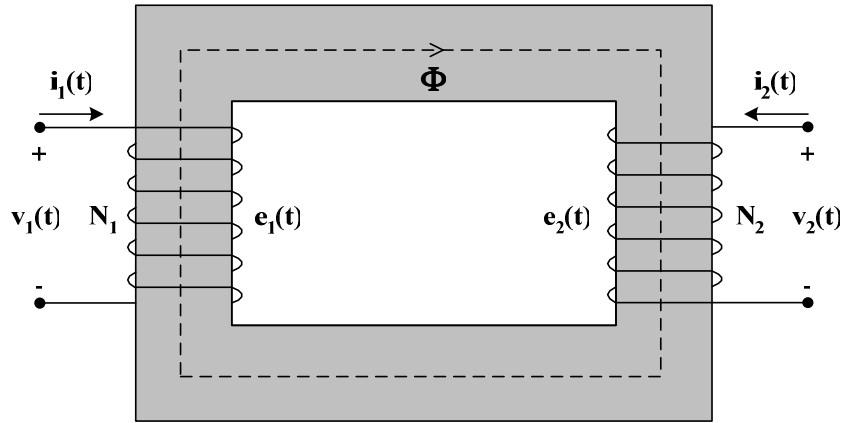
#### 4. BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLER

##### 4.1 Bir Fazlı Transformatorün Kayıplarının Dikkate Alınmadan İncelenmesi

Bir iletkende e.m.k. endüklenebilmesi için o iletkenin değişen bir manyetik alan içinde bulundurulması gerekliliği transformatorlerin çalışma prensibini oluşturur. Şekil 4.1'deki transformatorde hareket mevcut olmadığına göre endüklenen e.m.k.'i Lenz kanununa göre,

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad (4.1)$$

olarak yazılabilir.



Şekil 4.1 Bir fazlı transformatorün şematik gösterilişi

Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi teorik incelemede primer ve sekonder sargılar ayrı bacaklar üzerine yerleştirilmiş olup böylece iki devre oluşturulmuştur. Ancak bu iki devre arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, endüksiyon yolu ile oluşan manyetik bir bağlantı vardır. Transformatorün çalışması için primer sargıya  $v_1(t)$  alternatif gerilimi uygulandığında, bu gerilim primer sargıdan  $i_1(t)$  akımını geçirecektir. Geçen bu  $i_1(t)$  akımı çekirdek üzerinden devresini tamamlayan (Ampere ve Oersted yasaları gereği)  $\Phi$  akısını oluşturur ki geçen bu akı sekonder sargıda  $e_2(t)$  gerilimini endükler. Sekonder tarafta bir yük olduğu takdirde endüklenen  $e_2(t)$  geriliminin belirteceği  $i_2(t)$  akımı, dolayısı ile  $v_2(t)$  gerilimi sekonder sargıya ve yüke uygulanmış olur.

Şekil 3.1'de oluşturulan her iki devreye Kirchhoff gerilim ifadesini uygularsak;

$$v_1(t) = R_1 i_1(t) + \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (4.2)$$

$$v_2(t) = R_2 i_2(t) + \frac{d\Psi_2}{dt} \quad (4.3)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadelerde  $R_1$  ve  $R_2$  sargıların omik direncini,  $\Psi_1$  ve  $\Psi_2$  de endüklenen e.m.k.'leri meydana getirecek akıları gösterir.

Şekil 4.1'deki transformatör ideal olarak kabul edilirse; yani boyunduruk ve bacaklardan geçen faydalı akı ( $\Phi$ ) değerini değiştirmiyor ( $\Phi_1 = \Phi_2$ ) ve nüve kayıpları, kaçak akılar ile iç gerilim düşümlerinin sıfır olduğu var sayılırsa bu durumda transformatörün her iki sargısının her bir sarımında aynı değerde gerilim endüklenir.

Bir sargıdaki akı sarım sayısı ile çarpılırsa bobin akısı oluşur yani  $\Psi_1 = N_1 \Phi_1$  ve  $\Psi_2 = N_2 \Phi_2$  'dir. Bu durumda (4.2) ve (4.3) ifadeleri;

$$v_1(t) = \frac{d\Psi_1}{dt} = e_1(t) \quad (4.4)$$

$$v_2(t) = \frac{d\Psi_2}{dt} = e_2(t) \quad (4.5)$$

şeklini alır. Bu ifadeleri birbirine oranlarsak;

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{e_1(t)}{e_2(t)} \quad (4.6)$$

olur. Transformatörün primerinde oluşan  $e_1(t)$  e.m.k.'i Lenz kanununa göre kendisini oluşturan  $v_1(t)$  gerilimine ters yönde olup bu gerilime yaklaşık olarak eşittir ancak gerçekte  $v_1(t)$ 'den % 1-2 kadar küçüktür.  $\Phi_1 = \Phi_2$  olduğundan transformatörün her iki sargısında sarım başına endüklenen gerilimler aynı olacaktır. Dolayısıyla 1. ve 2. devre e.m.k.'lerinin birbirine oranı, sarım sayılarının oranına eşit yazılabilir. Yani;

$$\frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{\frac{N_1 d\Phi_1}{dt}}{\frac{N_2 d\Phi_2}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.7)$$

veya

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.8)$$

şeklindedir. Ayrıca transformatörlerin verimleri çok yüksek olduğundan 1. ve 2. devre yani primer ve sekonder devrelerin güçleri birbirine eşit yazılabilir. Buna göre (VA) olarak primer ve sekonder devre güçleri;

$$S_1 = v_1(t)i_1(t) \quad (4.9)$$

$$S_2 = v_2(t)i_2(t) \quad (4.10)$$

şeklinde belirtilir. Kayıpsız transformatörde;

$$S_1=S_2 \quad (4.11)$$

olduğundan,

$$v_1(t)i_1(t) = v_2(t)i_2(t) \quad (4.12)$$

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{i_2(t)}{i_1(t)} \quad (4.13)$$

yazılabilir. Ayrıca sinüzoidal olarak değişen akım ve gerilimlerin efektif değerleri dikkate alındığında;

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (4.14)$$

yazılır ki, transformatörlerin (a) ile belirtilen dönüştürme oranı bulunmuş olur.

Sonuç olarak; transformatörde uçlardaki gerilimlerin oranı, endüklenen gerilimlerin ve sarım sayılarının oranlarıyla doğru, akımların oranlarıyla ters orantılıdır. Bu da transformasyon oranı olarak tanımlanır.

#### 4.2 Bir Fazlı Transformatörlerin Kayıplarının Dikkate Alınarak İncelenmesi

Manyetik bir devrede meydana gelen manyetik akının tamamının devreden geçmesi istenir. Ancak manyetik devrenin relüktansı büyürse (yükli çalışma halinde) manyetik kuvvet çizgileri, manyetik devreden ayrılarak daha kısa yoldan devrelerini tamamlarlar. Manyetik yoldan ayrılarak, devrelerini bacakların iç ve dış kısmından tamamlayan bu akılara, kaçak manyetik akılar denir. Şekil 4.2'deki manyetik devrede her iki bacak kısmından geçen faydalı manyetik akı ( $\Phi$ ) ve kaçak akılar ( $\Phi_{\ell 1}, \Phi_{\ell 2}$ ) görülmektedir. Kaçak akılar devrede reaktansları oluşturur.

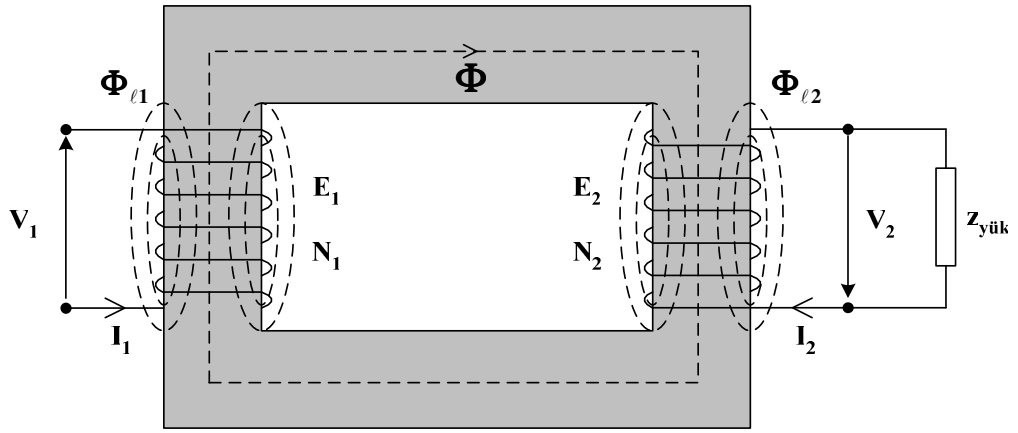


Şekil 4.3’de ise transformatörün yüklü çalışması halinde iç gerilim düşümlerini gösteren şeması çizilmiştir. Buradaki iç gerilim düşümleri; ideal bir transformatörün primer ve sekonder devrelerindeki omik dirençler ile bunlara seri bağlı reaktanslar üzerinde oluşur.

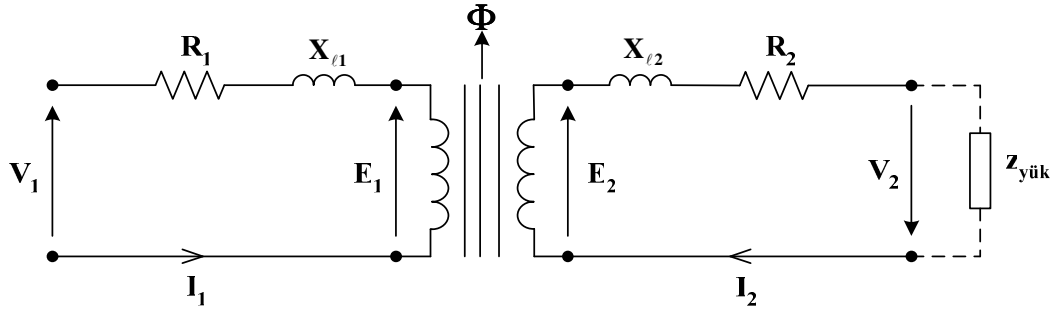
Şekil 7.3’e Kirchoff kanunu uygulanacak olursa aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_{\ell 1} \bar{I}_1 - \bar{E}_1 \quad (4.15)$$

$$\bar{E}_2 = R_2 \bar{I}_2 + jX_{\ell 2} \bar{I}_2 + \bar{V}_2 \quad (4.16)$$



Şekil 4.2 Yüklü çalışan transformatörde değişik akıllar



Şekil 4.3 Yüklü transformatörün eşdeğer devresi

Burada;  $\bar{I}_1 R_1$  ve  $\bar{I}_2 R_2$  omik gerilim düşümlerini,  $X_{\ell 1} \bar{I}_1$  ve  $X_{\ell 2} \bar{I}_2$  kaçak akıların oluşturduğu reaktif gerilim düşümlerini,  $\bar{V}_1$  ve  $\bar{V}_2$  ise primer ve sekonder sargı uç gerilimlerini göstermektedir. Fazör diyagramını çizerken bu gerilim düşümlerini dikkate alabilmek için kısa devre deneyi sonucunda elde edilen  $R_1$  ve  $R_2$  omik dirençlerinin ve bunlara ilaveten  $X_{\ell 1}$

ve  $X_{\ell 2}$  reaktif direnç değerlerinin bulunmuş olması gerekir. Ayrıca manyeto motor kuvvetler ya da diğer adıyla amper-sarımlar dikkate alınmalıdır. Miknatıslanma m.m.k fazörü, primer ve sekonder devre m.m.k. fazörlerinin toplamına eşittir. Yani;

$$\bar{F}_m = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 \quad (4.17)$$

olarak yazılır. Transformatorde endüklenen e.m.k.'ler;

$$E_1 = 4,44.f.N_1.\Phi.10^{-8} \text{ (V)} \quad (4.18)$$

$$E_2 = 4,44.f.N_2.\Phi.10^{-8} \text{ (V)} \quad (4.19)$$

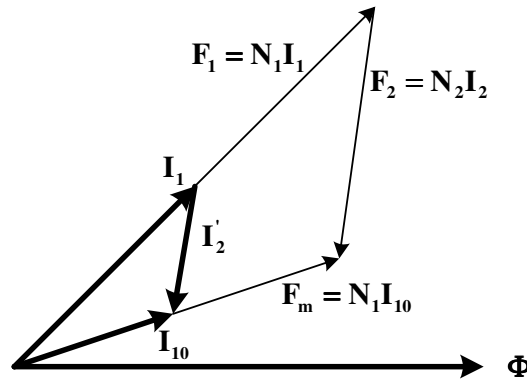
şeklindedir.  $\bar{V}_1$  şebeke gerilimi sabit kabul edildiğinde  $\bar{E}_1$  ve dolayısıyla  $\Phi$  de yaklaşık olarak sabit kalacaktır. Buna bağlı olarak  $\bar{F}_m$  de sabit olacaktır. Yani boşta ve yüklü çalışmada  $\Phi$  akısının değişmeyeceği söylenebilir ki  $\bar{F}_m$  aynı zamanda  $N_1 \bar{I}_{10}$ 'a (boşta) eşit olur. Bu ifadelerden,

$$N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_{10} \quad (4.20)$$

yazılır. Her iki taraf  $N_1$ 'e bölünürse,

$$\bar{I}_1 + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 = \bar{I}_{10} \quad (4.21)$$

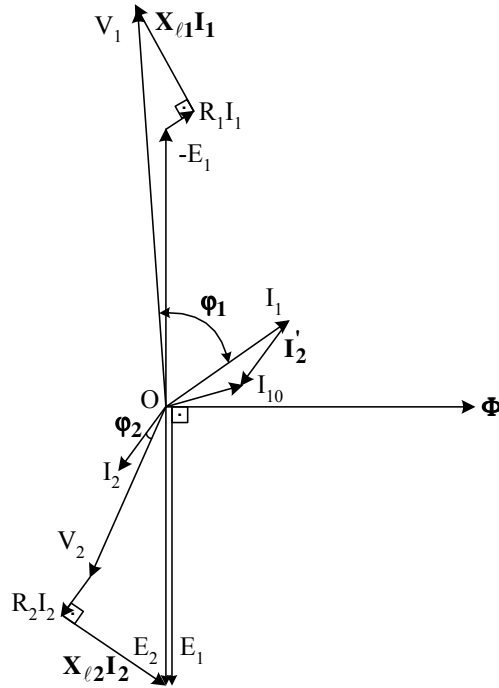
elde edilir ki bu bağıntı da boşta çalışma akımının, primer akım ile primere indirgenmiş sekonder akımın vektörel toplamına eşit olduğunu göstermektedir. Şekil 3.4'de denklem (4.20) ve (4.21)'e ait üçgenler gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Amper sarım ve akım üçgenleri

Yukarıda verilen değerlerden faydalanarak Şekil 4.5'deki fazör diyagramı şu şekilde çizilmiştir.  $\bar{V}_1$  ve  $\bar{I}_1$  fazörleri aralarında  $\phi_1$  açısı olacak şekilde çizilir. Primer ve sekonder devre için yazılan gerilim denklemlerinden faydalanılarak önce primer akımla aynı fazda yani primer akıma paralel olarak  $\bar{I}_1 R_1$  gerilim düşümü ve sonra primer akıma nazaran  $90^\circ$  ileride olan  $j\bar{I}_1 X_{\ell 1}$  reaktif gerilim düşümü  $\bar{V}_1$  geriliminden çıkartılarak  $\bar{E}_1$  fazörü bulunur.

Bundan sonra boşa çalışma akımı ve Şekil 4.4'de verilen akım üçgeni kullanılıp, bu fazör diyagramına taşınarak  $\bar{I}_2$  akımının yönü belirlenir. Tabii ki akım üçgeninden elde edilen sekonder akımın indirgenmiş değeridir. Sekonder akım da indirgenmiş değere paralel olarak işaretlenir. Bundan sonra primer tarafta yapıldığı gibi  $\phi_2$  açısından faydalanarak  $\bar{V}_2$  gerilim fazörü ve sonra da yukarıda açıklaması yapıldığı gibi  $\bar{I}_2 R_2$  ve  $j\bar{I}_2 X_{\ell 2}$  gerilim düşümleri belirlenir. Bu defa bu gerilim düşümleri  $\bar{V}_2$ 'ye eklenerek  $\bar{E}_2$  fazörü elde edilir.



Şekil 4.5 Yüklü çalışan bir transformatörün fazör diyagramı

Diğer bir yol olarak sekonder akımın yönü belirlendikten sonra, önce  $\bar{E}_2$  fazörü önce çizilir ve sonra sekonder sargıdaki omik ve reaktif gerilim düşümleri  $\bar{E}_2$ 'den çıkartılarak  $\bar{V}_2$  gerilim fazörü elde edilir. Şekil 4.3'deki eşdeğer devrenin sekonder uçlarına bağlanan yük empedansı

$Z_{yük} = R_{yük} + jX_{yük}$  şeklinde belirtilir. Diyagramda  $\bar{I}_2$  akımı,  $\bar{V}_2$  gerilimine kıyasla geri fazda olduğundan transformatörün endüktif bir yüküyle yüklendiği anlaşılır. Transformatörün yükü ayrıca omik veya kapasitif de olabilir, yükün bu değişikliğine “yükün cinsi” adı verilir. Ayrıca diyagramda aynı fazda gösterilen endüklenen e.m.k. değerleri, kendilerini meydana getiren faydalı akı ( $\Phi$ ) fazöründen  $90^\circ$  geride gösterilen  $\bar{E}_1$  ve  $\bar{E}_2$  değerleridir. “1” indisi ile gösterilen büyüklükler primere, “2” indisi ile gösterilen büyüklükler sekondere aittir. Çizilen fazör diyagramlarında primerde endüklenen  $\bar{E}_1$  e.m.k.’i,  $(-\bar{E}_1)$  olarak  $180^\circ$  faz farklı gösterilmiştir.

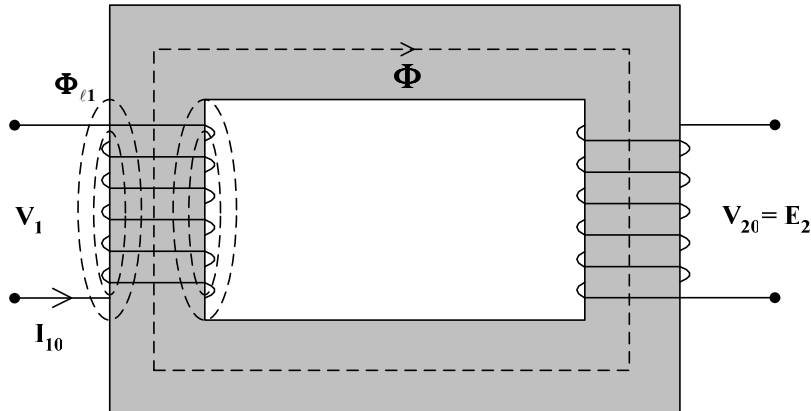
### 4.3 Bir Fazlı Transformatörün Boşta Çalışmasının İncelenmesi

Transformatörün boşta çalışması halinde sekonder uçlardaki  $Z_{yük}$  empedansı olmayacak ve sekonder uçlar açık devre olacaktır. Bu durumda sekonder akım  $I_2=0$ ’dır. Bu çalışmada primer devreye  $V_1$  gerilimi uygulandığında primer devreden geçen akım nominal akımın %2-10’u arasında olacaktır. Bu akıma boşta çalışma akımı denir ve  $I_{10}$  ile gösterilir. Boşta çalışmada sekonder devredeki direnç ve reaktans üzerindeki gerilim düşümleri olmayacağından sekonder devrede endüklenen gerilim sekonder uç gerilimine eşit olur ( $E_2=V_{20}$ ). Burada  $V_{20}$  boşta çalışmada sekonder uç gerilimidir. Boşta çalışan bir transformatördeki manyetik akılar Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

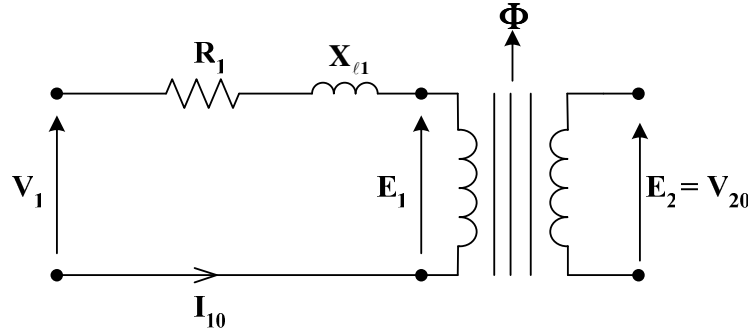
Şekil 3.6’da verilen transformatör için toplam akı bağıntısı;

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{\ell 1} \quad (4.22)$$

şeklinde yazılabilir.  $\Phi_{\ell 1}$  değeri, daha önce de belirtildiği gibi kaçak akı olup, boşta çalışmada, faydalı akı  $\Phi$ ’nin yaklaşık % 0.5’i kadardır. Boşta çalışan bir transformatöre ait eşdeğer devre Şekil 4.7’deki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.6 Transformatör boştta çalışırken meydana gelen akılar



Şekil 4.7 Boştta çalışan transformatörün eşdeğer devresi

Devreye ait gerilim denklemi Kirchhoff kanununa göre;

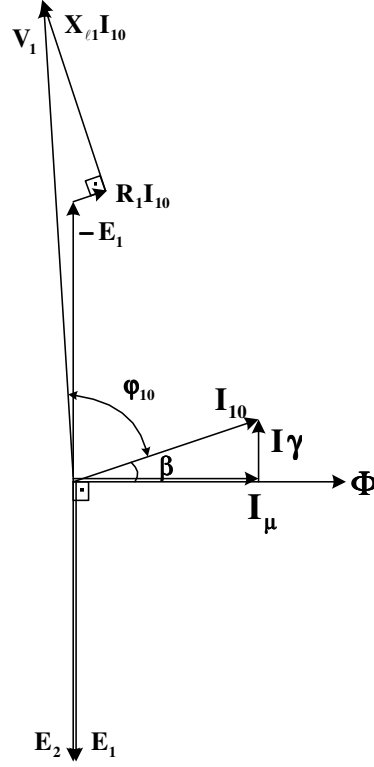
$$\bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_{10} + j X_{l1} \bar{I}_{10} - \bar{E}_1 \quad (4.23)$$

şeklinde yazılır. Şekil 3.7'deki eşdeğer transformatör yardımı ile fazör diyagramı çizilebilir. Bu diyagramı çizerken akımla primer gerilim arasındaki faz farkını bilmemiz gerekir ki bu değer, transformatörün boştta çalışırken şebekeden çektiği aktif güç bağıntısından elde edilebilir. Yani;

$$\cos \varphi_{10} = P_{10} / V_1 I_{10} \quad (4.24)$$

şeklinde. Bu açı saptandıktan sonra denklem (4.23) kullanılarak  $\bar{V}_1$  gerilimi elde edilir. Şekil 3.5'deki fazör diyagramının çizimindeki yol izlenerek boştta çalışma için fazör diyagramı çizilir. Endüklenen e.m.k., manyetik akıdan  $90^\circ$  geri fazda olduğu için  $\bar{E}_1$ 'den  $90^\circ$  geride  $\Phi$  fazörü çizilir (Şekil 4.8).

Boştta çalışma akımı, ideal transformatörlerde uygulanan gerilimden tam  $90^\circ$  geridedir ancak gerçekte boştta çalışma akımı ile uygulanan gerilim arasında  $90^\circ$ 'den daha küçük bir  $\varphi_{10}$  açısı vardır. Bu nedenle boştta çalışma akımının iki bileşeni söz konusudur. Bileşenlerden  $\bar{V}_1$  gerilimi ile aynı fazda olanına enerji bileşeni veya demir kayıplarını karşılayan bileşen ( $\bar{I}_\gamma$ ),  $\bar{V}_1$  geriliminden yaklaşık  $90^\circ$  geride olanına da mıknatıslanma bileşeni ( $\bar{I}_\mu$ ) denir.  $\bar{I}_\gamma$  akımı, demir kayıplarını karşılar.  $\bar{I}_\mu$  akımı, makinenin mıknatıslanmasını sağlayacak faydalı akıyı ( $\Phi$ ) meydana getirir.



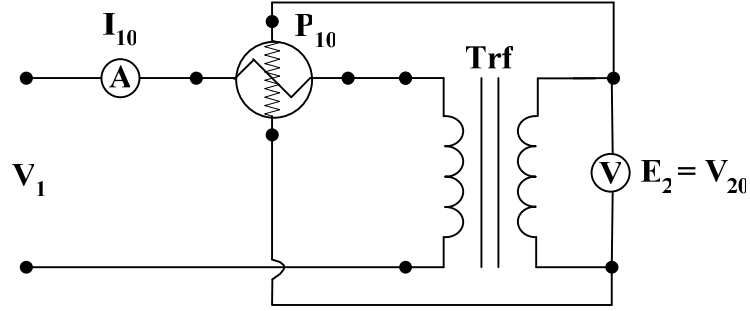
Şekil 4.8 Transformatörün boştaki çalışma fazör diyagramı ( $a=1/1$ )

Boştaki çalışma akımının küçük olması için bileşenlerinin küçük olması gerekir. Bunlardan manyetikleme bileşeni  $\bar{I}_\mu$ 'nin küçük olması, manyetik hava aralığının çok az olması veya hiç bulunmaması ile demir kayıplarını karşılayan bileşen olan  $\bar{I}_\gamma$ 'nin küçük olması da çok iyi kalitede sac kullanılması ile gerçekleşir.  $\bar{I}_\gamma$  yaklaşık olarak  $\bar{I}_{10}$ 'ın % 10'una eşittir. Dolayısıyla,  $\bar{I}_\mu$  yaklaşık olarak  $\bar{I}_{10}$ 'a eşittir.

Boştaki çalışma akımının primer sargılarda oluşturduğu bakır kayıpları ( $I_{10}^2 R_1$ ) çok küçük olduğundan dikkate alınmazsa, transformatörün boştaki çektiği güç demir kayıplarını verir.

Şekil 4.8'de  $\bar{I}_{10}$  ile  $\bar{I}_\mu$  arasındaki açı  $\beta$  ile gösterilmiştir. Bu açığa demir açısı denir ve Şekil 4.8'deki gibi çizimle saptanabileceği gibi deneysel olarak da bulunabilir. Şöyle ki:

Primer devrede bulunan wattmetrenin gerilim bobinine sekonder gerilim uygulanır (Şekil 4.9). Akım bobininden ise  $I_{10}$  boştaki çalışma akımı geçer. Bu durumda wattmetrenin göstermiş olduğu güç:



Şekil 4.9 Demir açısının deneysel olarak bulunması

$$P_{10} = I_{10} V_{20} \cos(\angle V_{20} I_{10})$$

$$P_{10} = I_{10} V_{20} \cos(90^\circ + \beta)$$

$$P_{10} = I_{10} V_{20} \sin \beta$$

$$\sin \beta = \frac{|P_{10}|}{|I_{10} V_{20}|}$$

kullanılarak;

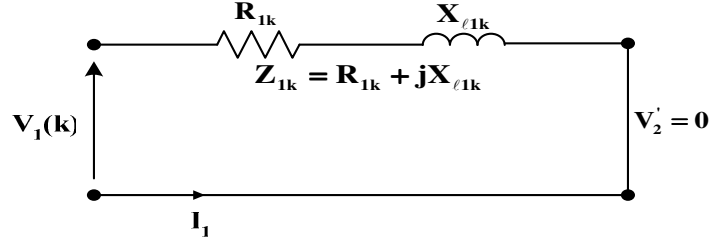
$$\beta = \arcsin \frac{|P_{10}|}{|I_{10} V_{20}|} \quad (4.25)$$

şeklinde bulunur. Açık ne kadar küçük ise  $\bar{I}_\gamma$  da o derecede küçük olacağından, kullanılan sağ demir kayıpları yönünden o kadar iyidir.

#### 4.4 Transformatörün Sürekli Kısa Devre Durumunun İncelenmesi

Kısa devre çalışmada sekonder uçlar kısa devre olur. Bu durumda  $R'_{Fe}$  ve  $X'_M$ ,  $R'_2$  ve  $X'_{\ell 2}$  'ne paralel ve bunlara nazaran oldukça büyük olduklarından eşdeğer devredeki boşta çalışma kolu ihmal edilebilir. Dolayısıyla kısa devre halinde primere uygulanan gerilim, transformatörün toplam empedansı  $Z_{1k}$  'ya uygulanmış olur.

Kısa devre; primer sargısından nominal akım geçerken yapılırsa, bu durumda primere uygulanacak gerilim transformatörün nominal kısa devre gerilimidir.



Şekil 4.10 Kısa devre edilmiş transformatörün eşdeğer devresi

Bu halde Şekil 4.10'ya göre nominal kısa devre gerilimi;

$$(\bar{V}_1)_k = \bar{I}_1 Z_{1k} \quad (4.26)$$

şeklinde olur. Bu gerilimin ( $V_1$ ) nominal gerilime oranına transformatörün bağlı kısa devre gerilimi denir ve ( $u_K$ ) ile gösterilir.

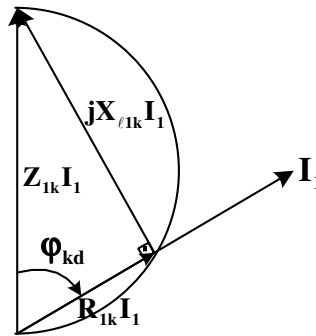
$$u_K = \frac{Z_{1k} \bar{I}_1}{\bar{V}_1} = \% \frac{(\bar{V}_1)_k}{\bar{V}_1} \cdot 100 \quad (4.27)$$

şeklinde yazılır. Transformatörlerde bağlı kısa devre gerilimi % 3–12 arasındadır, Bağlı kısa devre gerilimi, kısa devre esnasında sargılar üzerinde meydana gelen omik ve endüktif gerilim düşümlerinin bağlı değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne eşittir.

Şekil 4.11'de kısa devre fazör diyagramı çizilmiştir. Bu fazör diyagramından da görüldüğü gibi omik gerilim düşümü ve reaktif gerilim düşümü için şu bağıntılar yazılabilir;

$$R_{1k} I_1 = Z_{1k} I_1 \cos \varphi_{kd} \quad (4.28)$$

$$X_{l1k} I_1 = Z_{1k} I_1 \sin \varphi_{kd} \quad (4.29)$$



Şekil 4.11 Kısa devre gerilim üçgeni



olur.  $\phi_{kd}$  açısı, büyük trafo güçlerinde büyük ve küçük güçlerde de küçüktür. Normal olarak ( $\cos \phi_{kd}$ ) transformator gücüne göre 0,4 ile 0,8 arasında değişir. Kısa devre esnasında primer tarafta bağlı bulunan bir wattmetre ile okunan güce, trafonun kısa devre gücü denir ve pratik olarak transformatorün çalışma akımındaki toplam bakır kayıplarını gösterir.

Şekil 4.16'daki eşdeğer devrede bulunan  $R_{1k}$  kısa devre direnci toplam bakır kayıplarından;

$$R_{1k} = \frac{P_{cu}}{I_1^2} \quad (4.30)$$

olarak ve  $X_{\ell 1k}$  reaktansı da, kısa devre deneyinden elde olunan gerilim yardımı ile bulunan kısa devre empedansından;

$$X_{\ell 1k} = \sqrt{Z_{1k}^2 - R_{1k}^2} \quad (4.31)$$

olarak bulunur.

Kısa devre eğer nominal gerilimde oluşacak olursa meydana gelen kısa devre akımına sürekli kısa devre akımı denir ve  $(I_1)_{kd}$  indisi ile gösterilir.

$$(\bar{I}_1)_{kd} = \frac{\bar{V}_1}{Z_{1k}} \quad (4.32)$$

ifadesi ile verilir. Bu denklemi  $(\bar{I}_1)$  ile çarpar ve bölersek,

$$(\bar{I}_1)_{kd} = \frac{\bar{V}_1}{Z_{1k}} \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_1} = \frac{\bar{I}_1}{\frac{Z_{1k} \bar{I}_1}{\bar{V}_1}} = \frac{\bar{I}_1}{u_k} \quad (4.33)$$

elde edilir ve buradan,

$$u_k = \frac{\bar{I}_1}{(\bar{I}_1)_{kd}} \quad (4.34)$$

ifadesine ulaşılır.

Nominal gerilimle çalışan transformatorün çıkış uçları civarında kısa devre oluşursa, sürekli kısa devre akımının meydana gelişi darbe şeklinde olur. Geçici rejim esnasında kısa devre akımı ilk anda  $(I_1)_{kd}$  değerinin üstünde bir  $i_{kd}$  değerine çıkar ve kısa bir süre sonra sürekli

$(I_1)_{kd}$  değerine erişir. İşte bu  $i_{kd}$  akımına darbe kısa devre akımı denir. Bu akım;

$$i_{kd} = \sqrt{2}(I_1)_{kd} (1 + e^{-\pi(u_R/u_X)}) \quad (4.35)$$

bağıntısı ile hesaplanır.  $(1 + e^{-\pi(u_R/u_X)})$  değeri 1 ile 2 arasında değişir. Şayet 2 ise (bu durum omik direncin dikkate alınmayacağını gösterir) darbe kısa devre akımı en yüksek değerine ulaşır ve (7.40) denklemi,

$$i_{kd} = 2\sqrt{2}(I_1)_{kd} \quad (4.36)$$

şeklini alır. Ancak omik direncin bu akımı sınırlamasından dolayı bu değere ulaşılmaz ve yaklaşık olarak küçük transformatörlerde  $1.5(I_1)_{kd}$  ve büyük transformatörlerde de  $2.4(I_1)_{kd}$  kadar bir değer elde edilir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

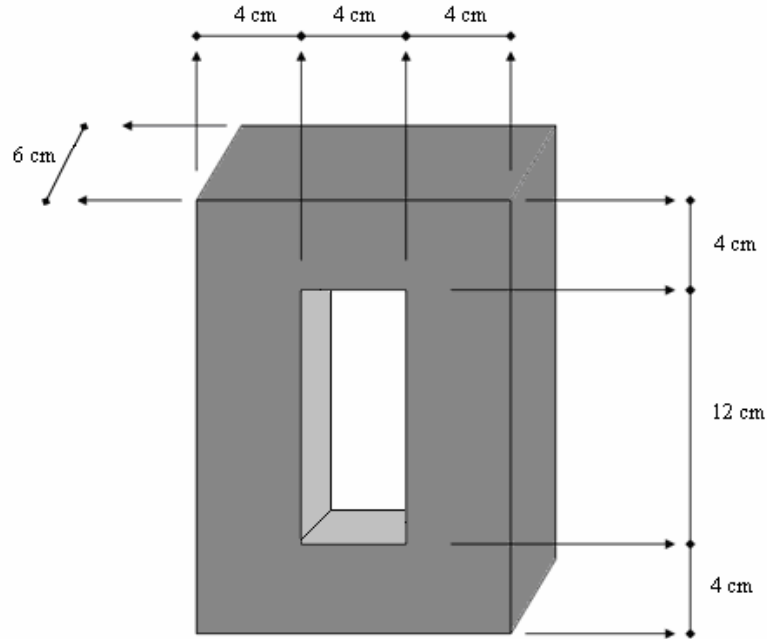
Bu bölümde 3 farklı etiket değerine sahip transformatör verim testine tabi tutulmuştur.

Deneyleerin montajının hazırlanması; Elektrik panosundan alınan faz ve nötr uçları anahtarın giriş uçlarına bağlanır. Anahtarın çıkış uçları oto transformatörün giriş uçlarına bir kablo ile bağlanır. Oto transformatörün çıkış uçlarından bir tanesi ampermetrenin giriş ucuna bir kablo ile bağlanır. Ampermetrenin çıkış ucu bir kablo ile watt metrenin akım bobininin giriş ucuna bağlanır. Watt metrenin akım bobininin çıkış ucu ise transformatörün primer uçlarının bir tanesine bağlanır. Transformatörün primer ucunun diğeri ise oto transformatörün diğeri ucu ile bir kablo vasıtası ile bağlanır. Watt metrenin gerilim bobini uçları birer kablo ile transformatörün primer sargısı uçlarına bağlanır. Voltmetrenin uçları ise oto transformatörünün çıkış uçlarına bağlanır. Transformatörün sekonder uçlarına ise; Boşta çalışma deneyi yapılırken voltmetre uçları ile bağlanır. Kısa devre deneyi yapılırken ikinci bir ampermetre kullanılarak bu ampermetrenin uçlarına bağlanır.

### 5.1 (1) kVA Transformatör

Etiket değerleri;

1 fazlı, (1) kVA, 220V (primer) / 110V (seconder), 4,54/9,09 A



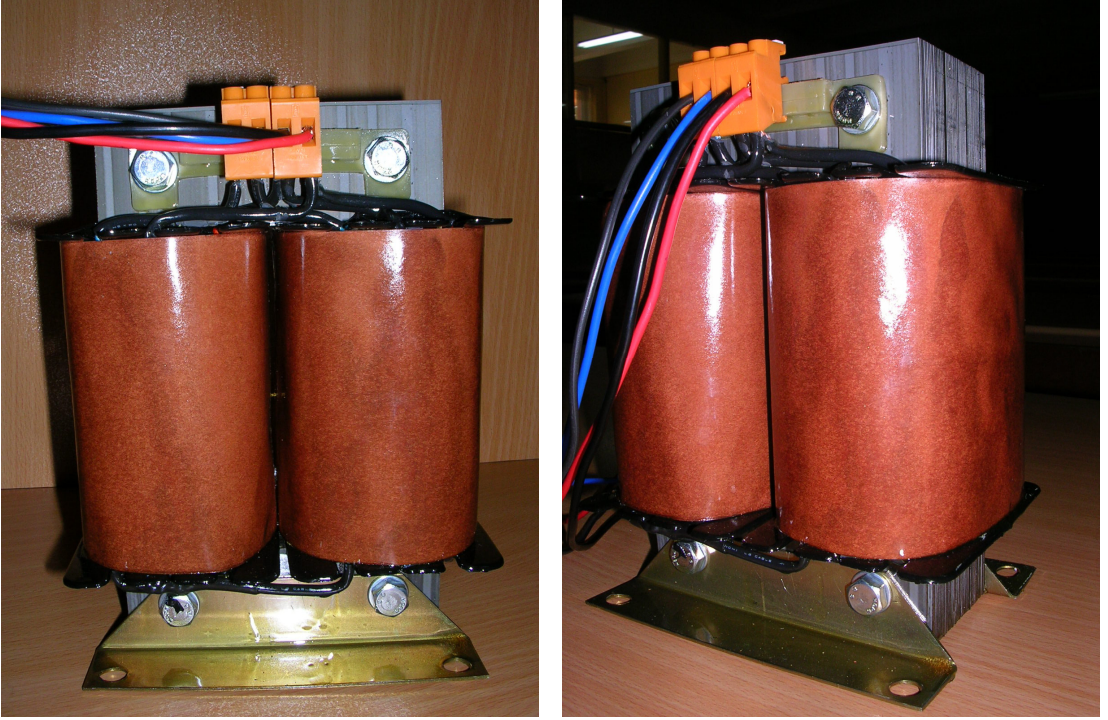
Şekil 5.1 (1) kVA lık Transformatörün şematik çizimi

Hacim hesabı;

$$V = (12 \times 20 \times 6) - (4 \times 12 \times 6) = 1152 \text{ cm}^3 \quad (5.1)$$

Elde ettiğimiz hacimden ağırlık hesabını yaparsak;

$$M = (1152 \times 7,8) / 1,1 = 8168,7 \text{ gr} = 8,17 \text{ kg} \quad (5.2)$$



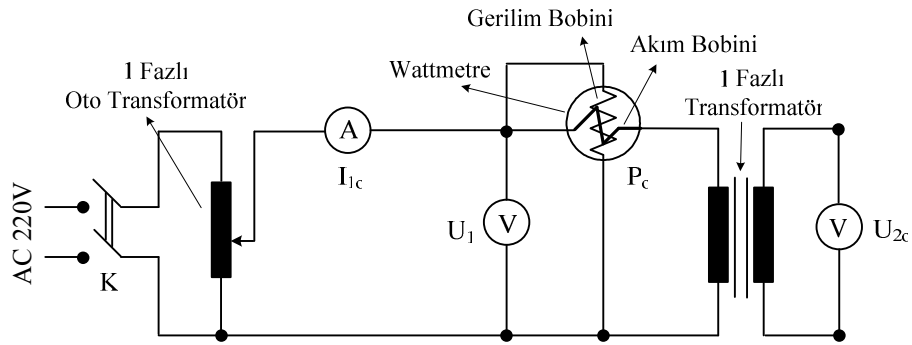
Şekil 5.2 (1) kVA lık transformatörün açık resimleri



Şekil 5.3 (1) kVA lık transformatörün etiket değerleri (  $V_1=110$   $V_2=220$  ... )

### 5.1.1 Bir Fazlı (1) kVA Transformatör İçin Boşta Çalışma Deneyi

(1) kVA, 220/110V, 4,54/9,09A  $f=50$ Hz değerlerine sahip olan bir fazlı transformatörün boşta çalışma deneyi için montaj şeması aşağıdadır (5.4). Buna göre Tablo 5.1 de görülen değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.4 Bir fazlı transformatörün boşta çalışma deneyine ait montaj şeması

Çizelge 5.1 Boşta çalışma deneyinden elde edilenler

BOŞTA ÇALIŞMA					
U <sub>1</sub>	U <sub>20</sub>	θ	I <sub>10</sub>	P <sub>o</sub> =P <sub>Fe</sub>	a
(V)	(V)	(skt)	(A)	(W)	
220	110	6,8	0,43	13,6	2

Burada :  $P_o = P_{Fe} = (K_w \times \theta)$  olarak hesaplanmış  $K_w$  katsayısı ölçümde kullanılan wattmetrenin dönüştürme katsayısıdır.

$$K_w = \frac{(U_{kul} \times I_{kul})}{\theta_{mak}} = \frac{1 \times 240}{120} = 2 \text{ olarak bulunur}$$

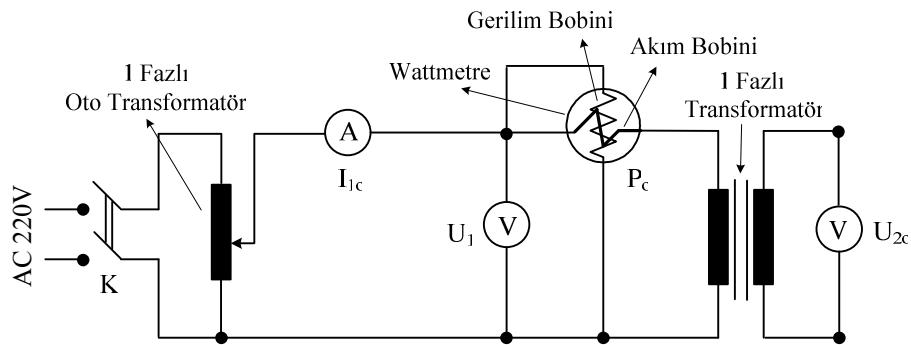
Tablo 5.1'den görüldüğü üzere 1 kVA gücündeki transformatörün demir kayıpları 13,6 W olarak bulunmuştur. Eşitlik 5.4'de hesapladığımız transformatör ağırlığını da kullanarak söz konusu transformatörün kg başına demir kaybı aşağıdaki gibidir.

$$\text{Kg başına demir kaybı} : P_{fe} / M \quad (5.3)$$

Kg başına demir kaybı =  $13,6 / 8,17 = 1,6664$  Watt/kg olarak elde edilir.

### 5.1.2 Bir Fazlı (1) kVA Transformatörler İçin Kısa Devre Çalışma Deneyi

(1) kVA, 220/110V, 4,54/9,09A f=50Hz değerlerine sahip olan bir fazlı transformatörün kısa devre deneyi için montaj şeması aşağıdadır (5.5). Buna göre Tablo 5.2 de görülen değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.5 Bir fazlı transformatörün kısa devre çalışma deneyine ait montaj şeması

Çizelge 5.2 Kısa devre deneyinden elde edilenler

KISA DEVRE ÇALIŞMA						
Sıra	$I_2$ (A)	$U_{1k}$ (V)	$\theta$ (skt)	$P_{kd}=P_{Cu}$ (W)	$R_{2k}=P_{kd}/(I_2)^2$	$(R_{2k})_{ort}$
1	10	10,09	100,5	50,25	0,5025	0,5388
2	8	8,20	65	32,5	0,5078	
3	6	6,37	38	19	0,5278	
4	4	4,29	17	8,5	0,5312	
5	2	2,35	5	2,5	0,625	

Kısa Devre Çalışma:  $K=K_W=5 \times 15 / 150 = 0,5$

Kısa devre gücü diğer bir adı ile bakır kayıpları  $P_{kd} = P_{cu} = (K \times \theta)$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3 Omik çalışma için hesapla elde edilen değerler

$\cos\phi_2 = 1$ (Omik Çalışma)				
Sıra	$\Delta U_2 = (R_{2k})_{ort} \cdot I_2$	$\%u = \Delta U_2 / U_{20}$	$U_2 = U_{20} - \Delta U_2$	$\eta = \frac{U_2 \times I_2}{U_2 \times I_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$
1	5,388	0,0489	104,61	94,25
2	4,3104	0,0392	105,69	94,83
3	3,2328	0,0294	106,77	95,16
4	2,1552	0,0196	107,84	95,13
5	1,0776	0,0098	108,92	93,12

### 5.1.3 Bir Fazlı (1) kVA Transformatör İçin Demir Açısının Bulunması Deneyi

Şekil 5.6'ya göre kurulan deney düzeneği ile (1) kVA gücündeki transformatör için elde edilen deney sonuçları aşağıdaki gibidir.

P <sub>10</sub>	V <sub>1</sub>	E <sub>2</sub> =V <sub>20</sub>	I <sub>10</sub>
(W)	(V)	(V)	(A)
7,5	220	110	0,428

Demir açısı Eşitlik 4.25'in kullanımı ile;

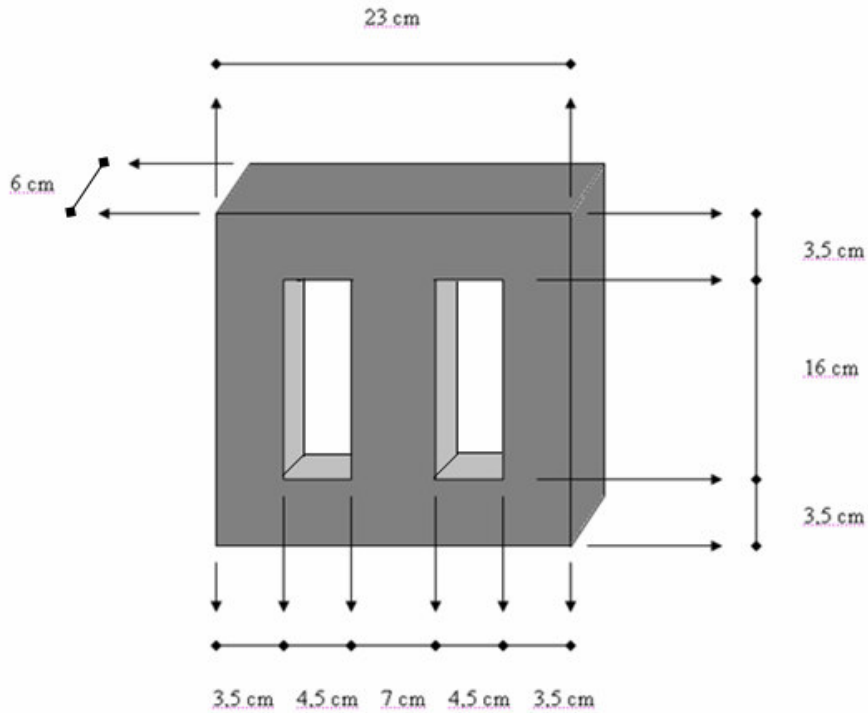
$$\beta = \arcsin \frac{|P_{10}|}{|I_{10} V_{20}|} = \arcsin \frac{7,5}{0,428 * 110}$$

$\beta = 9,166^\circ$  olarak elde edilir.

### 5.2 (2) kVA Transformatör

Etiket değerleri;

1 fazlı, (2) kVA, 220V (primer) / 110V (seconder), 7,2/14,5 A.



Şekil 5.6 (2) kVA lık Transformatörün şematik çizimi

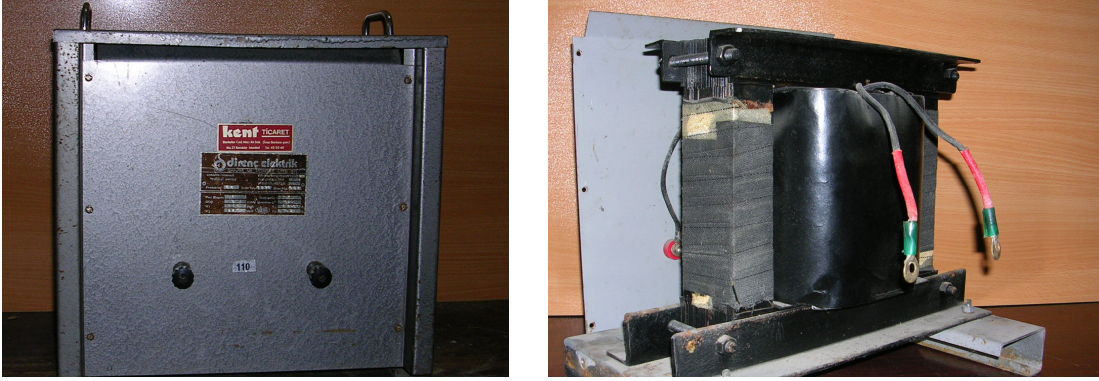


Hacim hesabı;

$$V = (23 \times 23 \times 6) - (16 \times 4,5 \times 6) = 2310 \text{ cm}^3 \quad (5.4)$$

Elde ettiğimiz hacimden ağırlık hesabını yaparsak;

$$M = (2310 \times 7,8) / 1,1 = 16380 \text{ gr} = 16,38 \text{ kg} \quad (5.5)$$



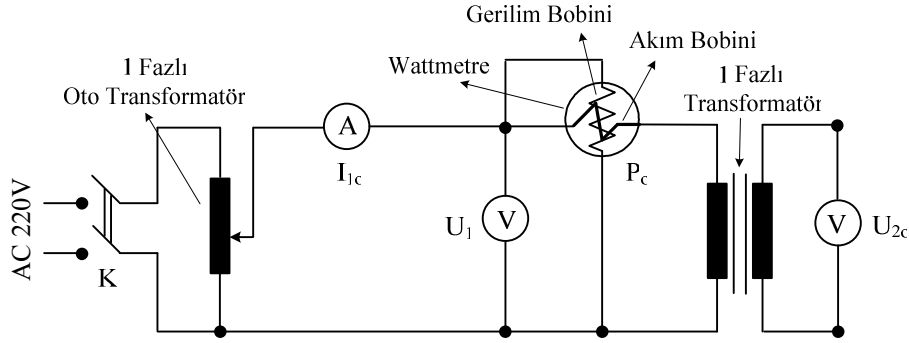
Şekil 5.7 (2) kVA lık transformatörün kapalı ve açık resimleri



Şekil 5.8 (2) kVA lık transformatörün etiket değerleri (  $V_1=110$   $V_2=220$  ... )

### 5.2.1 Bir Fazlı (2) kVA Transformator İçin Boşta Çalışma Deneyi

2kVA, 220/110V, 7.2/14.5A f=50Hz değerlerine sahip olan bir fazlı transformatorün boşta çalışma deneyi için montaj şeması aşağıdadır (5.9). Buna göre Tablo 5.2'de görülen değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.9 Bir fazlı transformatorün boşta çalışma deneyine ait montaj şeması

Çizelge 5.4 Boşta çalışma deneyinden elde edilenler

BOŞTA ÇALIŞMA					
$U_1$	$U_{20}$	$\theta$	$I_{10}$	$P_o=P_{Fe}$	a
(V)	(V)	(skt)	(A)	(W)	
220	109	28	0,43	56	2,01

Burada; boşta çalışma gücü diğer bir adı ile demir kayıpları  $P_o = P_{Fe} = (K_w \times \theta)$  olarak hesaplanmış,  $K_w$  katsayısı ölçümde kullanılan wattmetrenin dönüştürme katsayısıdır.

$$K_w = \frac{(U_{kul} \times I_{kul})}{\theta_{mak}} \text{ olarak bulunur.}$$

Boşta çalışma deneyinde cosφ metre ile yapılan ölçümlerde transformatorün cosφ değeri =0,58 olarak ölçülmüştür.

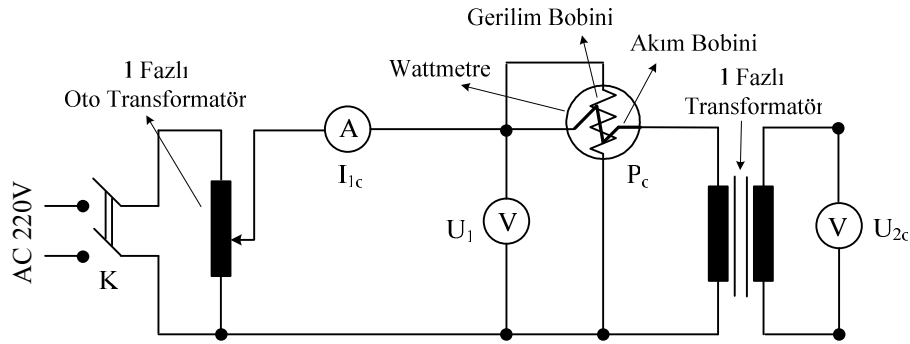
Tablo 5.4'den görüldüğü üzere 2 kVA gücündeki transformatorün demir kayıpları 56 W olarak bulunmuştur. Eşitlik 5.6'de hesapladığımız transformator ağırlığını da kullanarak söz konusu transformatorün kg başına demir kaybı aşağıdaki gibidir.

$$\text{Kg başına demir kaybı} : P_{fe} / M \quad (5.6)$$

Kg başına demir kaybı =  $56 / 16,38 = 3,418$  Watt/kg olarak elde edilir.

### 5.2.2 Bir Fazlı (2) kVA Transformator İçin Kısa Devre Çalışma Deneyi

3kVA, 220/110V, 13.6/29A  $f=50\text{Hz}$  değerlerine sahip olan bir fazlı transformatorün kısa devre deneyi için montaj şeması aşağıdadır(5.10). Buna göre Tablo 5.5'de görülen değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.10 Bir fazlı transformatorün kısa devre çalışma deneyine ait montaj şeması

Çizelge 5.5 Kısa devre deneyinden elde edilenler

KISA DEVRE ÇALIŞMA						
Sıra	$I_2$ (A)	$U_{1k}$ (V)	$\theta$ (skt)	$P_{kd}=P_{Cu}$ (W)	$R_{2k}=P_{kd}/(I_2)^2$	$(R_{2k})_{ort}$
1	14	14,3	9	90	0,459	0,535
2	7	8	3	30	0,612	

Kısa Devre Çalışma:  $K=K_a \times K_w = 2 \times 5 = 10$

$K_a$ : akım transformatorünün dönüştürme oranıdır.

Kısa devre gücü diğer bir adı ile bakır kayıpları  $P_{kd} = P_{cu} = (K \times \theta)$  olarak hesaplanmıştır.

Kısa devre deneyinde Cos $\phi$  metre ile yapılan ölçümlerde transformatorün cos $\phi$  değeri =0,98 olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.6 Omik çalışma için hesapla elde edilen değerler

<b>Cosφ<sub>2</sub> = 1 (Omik Çalışma)</b>				
<b>Sıra</b>	$\Delta U_2 = (R_{2k})_{ort} \cdot I_2$	$\%u = \Delta U_2 / U_{20}$	$U_2 = U_{20} - \Delta U_2$	$\eta = \frac{U_2 \times I_2}{U_2 \times I_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$
<b>1</b>	7,49	6,871	101,51	90,68
<b>2</b>	3,745	3,435	105,25	89,54

### 5.2.3 Bir Fazlı (2) kVA Transformator İçin Demir Açısının Bulunması Deneyi

Şekil 5.10'de göre kurulan deney düzeneği ile 2 kVA gücündeki transformator için elde edilen deney sonuçları aşağıdaki gibidir.

$P_{10}$	$V_1$	$E_2 = V_{20}$	$I_{10}$
(W)	(V)	(V)	(A)
29	220	109	0,442

Demir açısı Eşitlik 4.25'in kullanımı ile;

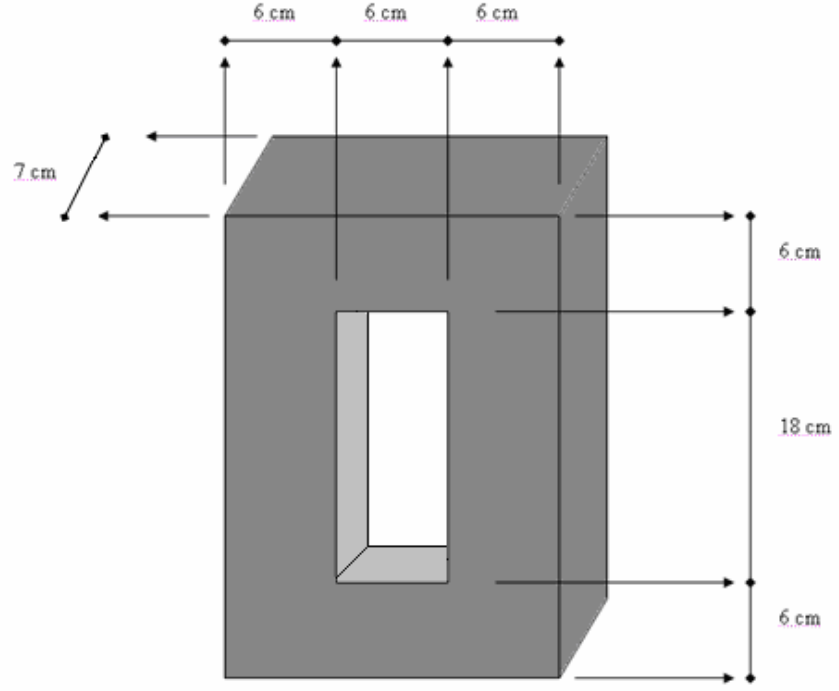
$$\beta = \arcsin \frac{|P_{10}|}{|I_{10} V_{20}|} = \arcsin \frac{29}{0,442 * 109} \quad (5.7)$$

$\beta = 37^\circ$  olarak elde edilir.

### 5.3 (3) kVA Transformator

Etiket değerleri;

1 fazlı, (3) kVA, 220V (primer) / 110V (seconder), 13,6/29 A



Şekil 5.11 (3) kVA lık Transformatörün şematik çizimi

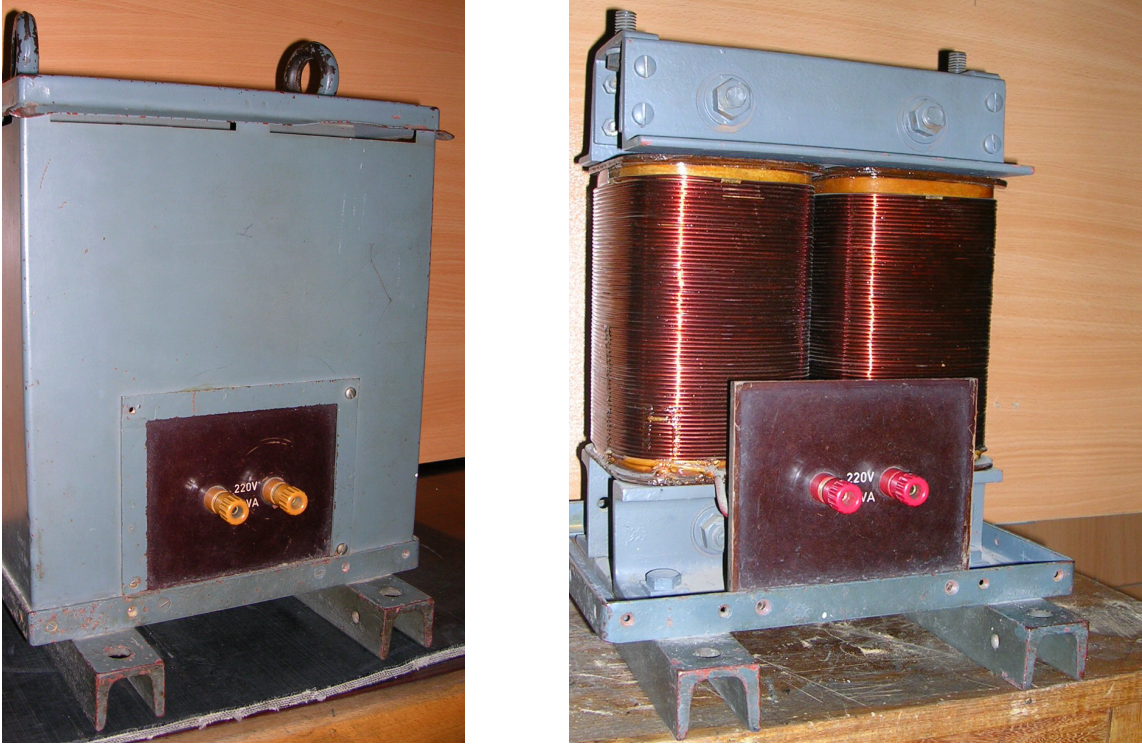
Hacim hesabı;

$$V = (18 \times 30 \times 7) - (18 \times 6 \times 7) = 3024 \text{ cm}^3 \quad (5.8)$$

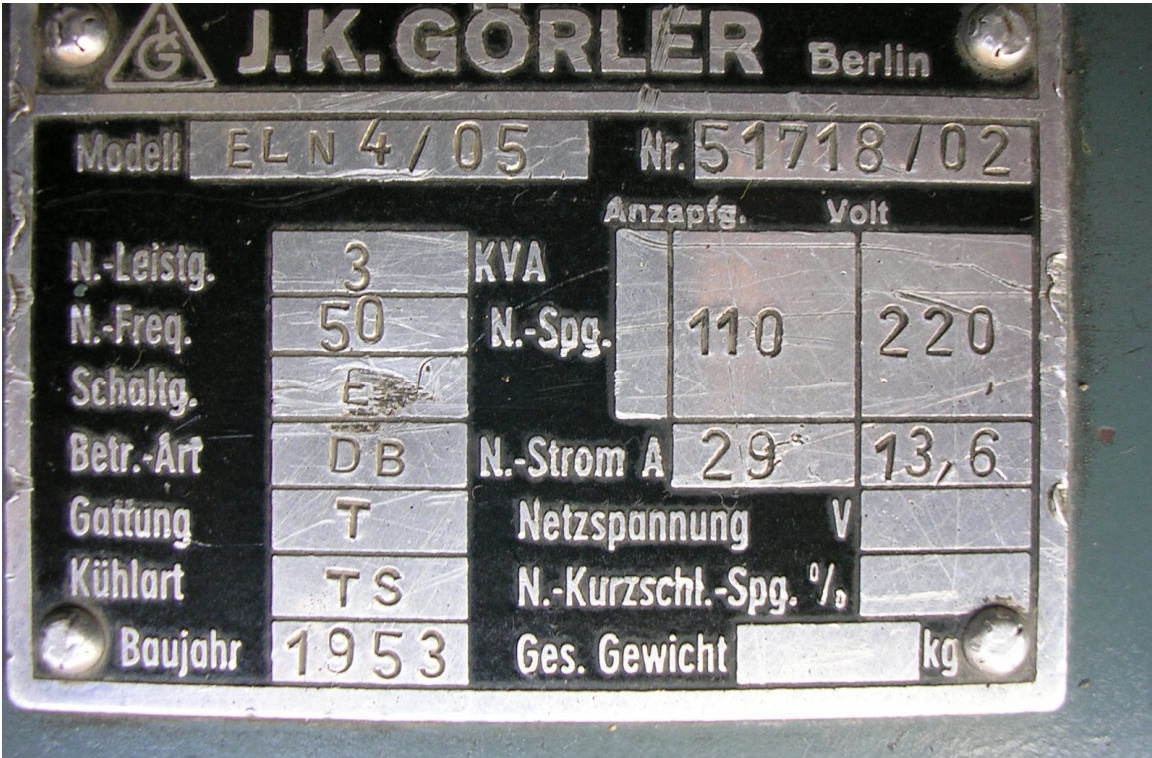
Elde ettiğimiz hacimden ağırlık hesabını yaparsak;

$$M = (3024 \times 7,8) / 1,1 = 21442,9 \text{ gr} = 21,44 \text{ kg} \quad (5.9)$$





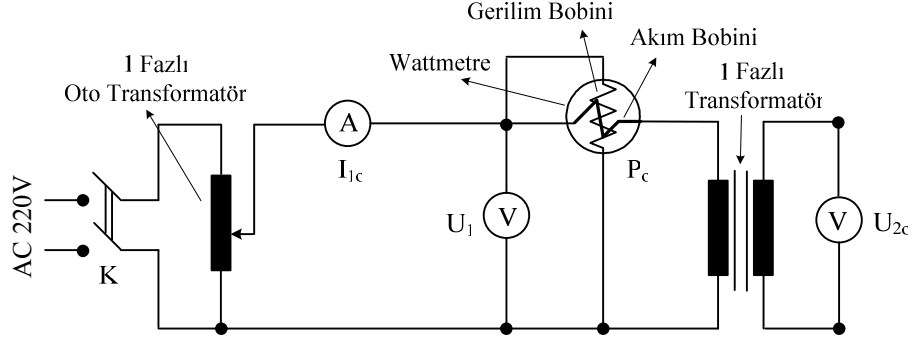
Şekil 5.12 (3) kVA lık transformatörün kapalı ve açık resimleri



Şekil 5.13 (2) kVA lık transformatörün etiket değerleri (  $V_1=110$   $V_2=220$  ... )

### 5.3.1 Bir Fazlı (3) kVA Transformator İçin Boşta Çalışma Deneyi

3kVA, 220/110V, 13.6/29A f=50Hz değerlerine sahip olan bir fazlı transformatorün boşta çalışma deneyi için montaj şeması aşağıdadır. Buna göre Tablo1'de görülen değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.14 Bir fazlı transformatorün boşta çalışma deneyine ait montaj şeması

Çizelge 5.7 Boşta çalışma deneyinden elde edilenler

BOŞTA ÇALIŞMA					
U <sub>1</sub>	U <sub>20</sub>	θ	I <sub>10</sub>	P <sub>o</sub> =P <sub>Fe</sub>	a
(V)	(V)	(skt)	(A)	(W)	
220	104,5	26	0,75	53	2,12

Burada :  $P_o = P_{Fe} = (K_w \times \theta)$  olarak hesaplanmış  $K_w$  katsayısı ölçümde kullanılan wattmetrenin dönüştürme katsayısıdır.

$$K_w = \frac{(U_{kul} \times I_{kul})}{\theta_{mak}} \text{ olarak bulunur.}$$

Boşta çalışma deneyinde Cosφ metre ile yapılan ölçümlerde transformatorün cosφ değeri =0,3 olarak ölçülmüştür.

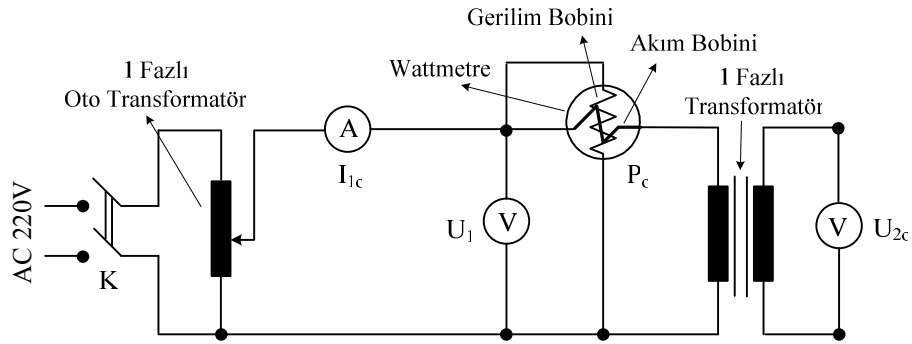
Tablo 5.7'den görüldüğü üzere 3 kVA gücündeki transformatorün demir kayıpları 53 W olarak bulunmuştur. Eşitlik 5.4'de hesapladığımız transformator ağırlığını da kullanarak söz konusu transformatorün kg başına demir kaybı aşağıdaki gibidir.

$$\text{Kg başına demir kaybı} : P_{fe} / M \quad (5.10)$$

Kg başına demir kaybı =  $53 / 21,44 = 2,472$  Watt/kg olarak elde edilir.

### 5.3.2 Bir Fazlı (3) kVA Transformatörler İçin Kısa Devre Çalışma Deneyi

(3) kVA, 220/110V, 13.6/29A  $f=50\text{Hz}$  değerlerine sahip olan bir fazlı transformatörün kısa devre deneyi için montaj şeması aşağıdadır. Buna göre Tablo2'de görülen değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.15 Bir fazlı transformatörün kısa devre çalışma deneyine ait montaj şeması

Çizelge 5.8 Kısa devre deneyinden elde edilenler

KISA DEVRE ÇALIŞMA						
Sıra	$I_2$ (A)	$U_{1k}$ (V)	$\theta$ (skt)	$P_{kd}=P_{Cu}$ (W)	$R_{2k}=P_{kd}/(I_2)^2$	$(R_{2k})_{ort}$
1	29	18	7	175	0,208	0,197
2	20	12	3	75	0,1875	

Kısa Devre Çalışma:  $K=K_a \times K_w = 5 \times 5 = 25$

$K_a$ : akım transformatörünün dönüştürme oranıdır.

Kısa devre gücü diğer bir adı ile bakır kayıpları  $P_{kd} = P_{cu} = (K \times \theta)$  olarak hesaplanmıştır.

Kısa devre deneyinde Cos $\phi$  metre ile yapılan ölçümlerde transformatörün cos $\phi$  değeri =0,91 olarak ölçülmüştür.



Çizelge 5.9 Omik çalışma için hesapla elde edilen değerler

Cosφ <sub>2</sub> = 1 (Omik Çalışma)				
Sıra	$\Delta U_2 = (R_{2k})_{ort} \cdot I_2$	$\%u = \Delta U_2 / U_{20}$	$U_2 = U_{20} - \Delta U_2$	$\eta = \frac{U_2 \times I_2}{U_2 \times I_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$
1	5,713	5,46	98,78	92,62
2	3,94	3,77	100,56	94,01

### 5.3.3 Bir Fazlı (3) kVA Transformatör İçin Demir Açısının Bulunması Deneyi

Şekil 5.6'ya göre kurulan deney düzeneği ile 3 kVA gücündeki transformatör için elde edilen deney sonuçları aşağıdaki gibidir.

P <sub>10</sub>	V1	E <sub>2</sub> =V <sub>20</sub>	I <sub>10</sub>
(W)	(V)	(V)	(A)
25,2	220	106	0,792

Demir açısı Eşitlik 4.25'in kullanımı ile;

$$\beta = \arcsin \frac{|P_{10}|}{|I_{10} V_{20}|} = \arcsin \frac{25,2}{0,792 * 106}$$

$\beta = 17,46^\circ$  olarak elde edilir.

### 5.4 Transformatörlerin Performansları

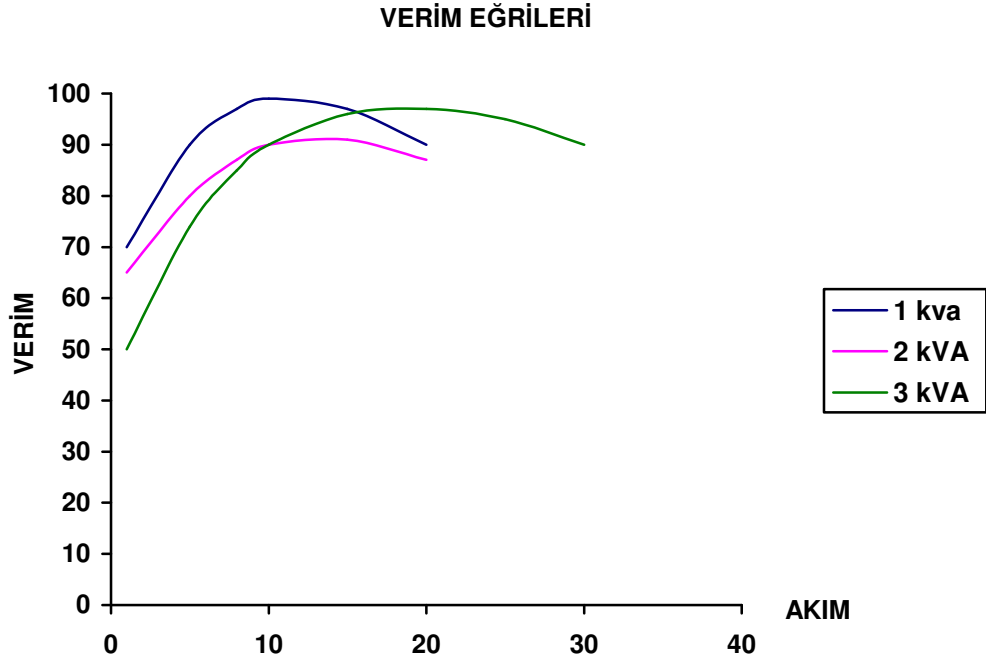
$\beta$ , demir açısı diğer adı ile mıknatıslanma eğrisi, bir transformatörün demir kayıplarına ilişkin önemli bilgi vermektedir.  $\beta$  açısı küçük olan saclardan imal edilmiş bir transformatörün demir kaybı  $\beta$  açısı büyük olana göre daha azdır. Deneyleri gerçekleştirilen transformatörlerin kayıpları ele alınacak olursa;

Demir açısı  $\beta = 17,46^\circ$  değerine sahip transformatör (3kVA'lık) için kg başına demir kaybı 2,472 Watt/kg iken, demir açısı  $\beta = 37^\circ$  değerine sahip olan transformatörün (2kVA'lık) kg başına demir kaybı ise 3,418 Watt/kg olarak karşımıza çıkmaktadır.

Verim çıkış gücünün giriş gücüne oranı veya çıkış gücünün, çıkış gücü ile kayıpların toplamına oranına eşittir. Bu oran Eşitlik 5.11'de gösterilmiştir.

$$\eta = \frac{U_2 \times I_2}{U_2 \times I_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \quad (5.11)$$

Deneyleti gerçekleştirilen her uç transformatöre ait verim eğrisi Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.16 Verim eğrileri

## 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Deneyleer sırasıyla (1) kVa (2) kVA ve (3) kVA lık transformatörler üzerinde yapılmıştır. Öncelikle transformatörlere boşta çalışma deneyi ve kısa devre çalışma değerleri uygulanmıştır, buradan elde edilen verilerle mıknatıslanma eğrisi değerleri elde edilmiştir.

**1-** Mıknatıslanma eğrileri bize transformatörler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır, 2 kVA lık transformatörün  $\beta = 37^\circ$  şeklindeki açısına karşılık (3) kVA lık transformatörde  $\beta = 17,46^\circ$  şeklinde hesaplanmıştır. Buradan çıkacak sonuç mikroskobik inceleme yapılamasada (3) kVA lık transformatördeki kullanılan silisli sacın kalitesi (2) kVA lık transformatörde kullanılan sacın kalitesine oranla çok daha iyidir. Mikroskobik incelemesi önceden yapılmış standart M-5 sacından üretilmiş (1) kVA lık transformatör beklenildiği gibi en düşük demir açısını yani  $\beta = 9,166^\circ$  değerini vermiştir.

**2-** Mıknatıslanma açılarından elde edilen önemli bir bilgi daha asıl olarak çalışmanın sebebini oluşturmuştur. Bu çıkartılan verim eğrileridir. Verim-gerilim eğrisi şeklinde çizilmiş olan bu verim eğrilerinden çıkan sonuç (3) kVA lık transformatörün verimi eşdeğerdeki akım altında (2) kVA lık transformatöre oranla çok daha iyidir. Yine en yüksek verim M-5 sacından üretilmiş referans tranformatörden alınmıştır.

**3-** Demir kayıplarına da değinirsek eğer (1) kVA lık transformatör için kayıp değer 1,666 Watt/kg, (2) kVA lık transformatör için kayıp değeri 3,418 Watt/kg olarak bulunurken (3) kVA lık transformatör için bu değer 2,472 Watt/kg şeklinde bulunmuştur.

Genel olarak elde ettiğimiz verileri değerlendirirsek karşımıza şu tablo çıkmaktadır (5.10),

	<b>(1) kVA</b>	<b>(2) kVA</b>	<b>(3) kVA</b>
	<b>Transformatör</b>	<b>Transformatör</b>	<b>Transformatör</b>
Hacim (cm <sup>3</sup> )	1152	2310	3024
Ağırlık (kg)	8,17	16,38	21,44
Giriş-Çıkış Gerilimleri (V)	220-110	220-110	220-110
Faz Sayısı	1	1	1
Güç (kVA)	1	2	3
Demir Açısı	9,166	37°	17,46°
Demir Kayıplar (Watt/kg)	1,666	3,418	2,472
Üretim yılı	2007	1977	1953

Ülkemizde elektrik enerjisinin kullanımı her geçen gün artmakla birlikte verimlilik de büyük önem kazanmaktadır. Elektrik santrallerinden son kullanıcıya enerjinin aktarılması enerji iletim ve dağıtım hatları ile gerçekleştirilmektedir. Söz konusu hatlardaki kayıpları azaltmak üzere; elektrik santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin gerilim değeri yükseltilerek iletimi gerçekleştirilip, dağıtım esnasında kademe kademe azaltılarak son kullanıcıya aktarılır. Gerilim değerinin yükseltilmesi ve azaltılması transformatörler ile gerçekleştirilir. Transformatörlerin kayıpları, enerji iletim ve dağıtım esnasındaki verimin azalmasına önemli etkenlerden biridir.

EÜAŞ'dan alınan verilere göre 2007 yılında ülkemizin kurulu gücü 40755 MWatt'tır. Söz konusu güç hem yükseltici transformatörlerden hem de indirici transformatörlerden geçmektedir.

Transformatörlerin veriminde %0,1'lik bir artışın ülke ekonomisine etkisi kabaca 81,51 MWatt olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, kayıpları %0,1 daha az olan bir transformatör kullanımı ile 81,51 MWatt'lık elektrik enerjisinin yok olması engellenebilir.

**KAYNAKLAR**

Alexander, H., Schmidt, U., Weber, E. ve Sander, W., (1974), ‘‘On The Magnetic Properties of Dislocations in Silicon’’, Solid State Communications, 14: 735-739.

Abbruzzese, G., Candiotti, M., Gubiotti, T., Marini, P., Onori, R. ve Songini, G., (1990), ‘‘Development of New Classes of Grain Oriented Silicon Steel with Improved Magnetic Properties for New Electrical Transformer Generation’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 83:416-418.

Arai K. I. ve Ishiyama K., (1994), ‘‘Recent Developments of New Soft Magnetic Materials’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 133: 233-237.

Abe M., Haiji H., Hiratani T., Okada K. ve Ninomiya M., (1996), ‘‘Magnetic Properties and Workability of 6.5% Si Steel Sheet’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 160: 109-114

Altun, A., (2007), Silisyumlu eliklerin Soğuk Haddelenebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YT Fen Bilimleri Enstitüsü.

Barros J., Houbaert Y., Ros T. ve Ruiz D., (2004), ‘‘Advances in The Production of High-Silicon Electrical Steel by Thermomechanical Processing and by Immersion and Diffusion Annealing’’, Journal of Alloys and Compounds, 369: 125-130

Burgess C. F. ve Aston. J. (1910), ‘‘Magnetic and Electrical Properties of Iron-Silicon Alloys’’, Journal of the Franklin Institute, 170: 212.

Bigot J. ve Schwartz F., (1988), ‘‘The Influence of The Substitution of Metallic Elements on The Thermal Stability and Magnetic Properties of Amorphous Fe-B-Si Alloys’’, Materials Science and Engineering, 99: 39-42.

Cech D. ve Wiglasz V., (1984), ‘‘Analysis of Inhomogeneity of Magnetic Properties in Grain-Oriented Silicon Steel Sheets’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 41: 31-34.

Chaudhury, A. ve Khatirkar, R. (2007), ‘‘Low Silicon Non-Grain-Oriented Electrical Steel: Linking Magnetic Properties with Metallurgical Factors’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 42: 23-27.

Chin G. Y., (1978), ‘‘New Developments in Technologically Important Magnetic Materials’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 9: 283-298.

Chunlin Q., Kemin Q. ve Xiuhua G., (2006), ‘‘Magnetic Properties of Grain Oriented Ultra-Thin Silicon Steel Sheets Processed by Conventional Rolling and Cross Shear Rolling’’, Materials Science and Engineering, 430: 138-141.

Chai K. H., Heo N. H., Kim J. C., Kim G. M., Na J. ve Woo J. S., (1998), ‘‘Effects of Rolling Conditions on Grain Orientation and Magnetic Properties of Thin-Gauged 3% Si-Fe Sheets’’, Scripta Materialia, 38: 1405-1409.

etin, İ., (1987), Transformatörler 1.Kısım, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Daniels, A.R., (1976), Introduction to Electrical Machines, William Clowes&Sons Limited, London.

- De Paepe A., Dilewijns J., Eloit K. ve Standaert C., (1996), "Effect of Hot Rolling Parameters on The Magnetic Properties of A Low-Silicon Ultra-Low-Carbon Steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 160: 129-130
- Degauque J. ve Ibarrondo I., (1999), "Study of Vacuum Levels in The Annealing of Silicon Non-Oriented Magnetic Steel Sheets Obtained by Rapid Guenching and Its Incidence on Grain Size, Texture and Core Losses", *Vacuum* 53: 75-78
- Enokizono M., Kanao S. ve Kawano S., (1994), "Two-Dimensional Magnetic Properties of Silicon Steel Sheet Subjected to an Alternating Field", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 133: 212-215.
- Enokizono M., Kanao S. ve Yuki K., (1994), "Permeability Tensor of Grain-Oriented Silicon Steel Sheet", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 133: 212-215.
- Enokizono M., Kumoi M. ve Todaka T., (1992), "Demagnetization and magnetic domain structure of silicon steel sheet", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 112: 207-211
- Fryskowski, B., (2008), "Experimental Evaluation of Magnetic Anisotropy in Electrical Steel Sheets", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320:515-522.
- Fortunati S., (1994), "On the Metallurgical Control of Texture Sharpness and Related Magnetic Properties in Grain-Oriented Silicon-Iron", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 133: 216-219.
- Genç, A., (2007), Yüksek Silisyumlu Çeliklerin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hou, K., (2008), "Effects of Sulfur Content and Slab Reheating Temperature on The Magnetic Properties of Fully Processed Nonoriented Electrical Steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320:1115-1122.
- Harase J., Okazaki Y., Nakamura Y. ve Takahashi N., (1994), "The Dc and Ac Magnetic Properties of a High-Purity Grain-Oriented Iron Sheet", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 133: 153-155.
- Hashimoto M., Kawaguchi E., Murashige S. ve Saito A., (1996), "Stress-Magnetization Properties of A Silicon Iron Single Crystal Under Stress", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 160: 57-58
- Hou K., (1996), "Effect of Silicon on The Loss Separation and Permeability of Laminated Steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 162: 280-290
- Komatsubara K.F., Kobayashi M., Katayama Y., Kotera N. ve Narita K., (1974), "Transport Properties of Conduction Electrons In n-type Inversion Layers In (100) Surfaces of Silicon", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 35: 723-740.
- Kaido C., Honda T., Takezawa M. ve Yamasaki J., (2003), "Domain Structure of Chemically Thinned Non-Oriented Electrical Sheet", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254-255: 167-169
- Li R., Shen Q., Zhang L. ve Zhang T., (2004), "Magnetic Properties of High Silicon Iron Sheet Fabricated by Direct Powder Rolling", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 281: 135-139.

Matsuo Y., Mizogami M., Mogi H. ve Nozawa T., (1994), ‘‘Domain Structures and Magnetic Properties of Advanced Grain-Oriented Silicon Steel’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 133: 115-122.

Marko P., Jiraskova Y., Schneeweiss O., Solyom A. ve Zak T., (1996), ‘‘High Temperature Magnetization of 3.5% Si Steel’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 157: 453.

Martin Littman F., ‘‘Grain-Oriented Silicon Steel Sheets’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 26: 1-10.

Namikawa M., Ninomiya H. ve Yamaji T., (2005), ‘‘High Silicon Steehts Realizing Excellent High Frequency Reactor Performance’’, Jee Tecnical Report, 6: 12-17.

Roadstrum, W.H., Wolaver, D.H., (1987), Electrical Engineering for all Engineers, John Wiley&Sons, London.

Sojka L. ve Szymura S., (1986), ‘‘The Effect of Silicon on The Structure and Properties of Fe-Cr-Co Permanent Magnet Alloys’’ Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 53: 379-389.

Sarıoğlu, M.K., (1970), Elektrik Makinelerinin Temelleri I, Özarkadaş Matbaası, İstanbul.

Şenol, İ., Bekiroğlu, N., Aybar, O., (2005), Elektrik Makineleri I, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Tanaka Y., Takada Y., Abe M. ve Masuda S., (1990), ‘‘Magnetic Properties of 6.5% Si-Fe Sheet and Its Applications’’, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 83: 375-376.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	13.05.1984	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1995-2002	Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi
Lisans	2002-2006	Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fak. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı