

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**ELEKTRİK TRAFOLARINDA OLUŞAN GÜÇ  
KAYIPLARININ UZAKTAN MANYETİK ALGILAMA  
YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MEHMET AYGÖREN**

**BALIKESİR, MAYIS - 2016**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**ELEKTRİK TRAFOLARINDA OLUŞAN GÜÇ  
KAYIPLARININ UZAKTAN MANYETİK ALGILAMA  
YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MEHMET AYGÖREN**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Mehmet BAYIRLI (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. Ziya MERDAN**

**Doç. Dr. Tayfun UZUNOĞLU**

**BALIKESİR, MAYIS - 2016**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

MEHMET AYGÖREN tarafından hazırlanan “ELEKTRİK TRAFOLARINDA OLUŞAN GÜÇ KAYIPLARININ UZAKTAN MANYETİK ALGILAMA YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 30.05.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Mehmet BAYIRLI

Üye  
Prof. Dr. Ziya MERDAN

Üye  
Doç. Dr. Tayfun UZUNOĞLU

*M. Bayırlı*  
.....  
*Z. Merdan*  
.....  
*T. Uzunoglu*  
.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**ELEKTRİK TRAFOLARINDA OLUŞAN GÜÇ KAYIPLARININ  
UZAKTAN MANYETİK ALGILAMA YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MEHMET AYGÖREN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. MEHMET BAYIRLI)**

**BALIKESİR, MAYIS - 2016**

Bu çalışmada, özel olarak geliştirilen deneysel sistemde transformatörün çekirdeğini oluşturan silisyum-demir (SiFe) levhalardaki manyetik akı davranışı algılayıcılar yardımıyla incelenmiştir. Manyetik akı dağılımı hesaplama yöntemi kullanılarak malzemenin manyetik indüksiyon-manyetik alan (B-H) karakteristiği incelenmiştir. B-H karakteristiğinden malzemedeki en yüksek verimin alınabileceği optimum manyetik indüksiyon değeri belirlenmiştir. Ayrıca, boşta çalışma durumunda meydana gelen demir kayıpları histerisiz ve fuko kayıpları ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları yorumlanarak kayıpların transformatörlerin özelliklerini nasıl etkilediği tartışılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:**Transformatör, manyetik akı, demir kayıpları, sensör, histerisiz kaybı, fuko kaybı.

## **ABSTRACT**

### **THE DETERMINATION OF POWER LOSSES IN ELECTRICAL TRANSFORMERS BY MAGNETIC REMOTE SENSING SYSTEM**

**MSC THESIS**

**MEHMET AYGÖREN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**PHYSICS**

**(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. MEHMET BAYIRLI)**

**BALIKESİR, MAY 2016**

The magnetic flux behavior in silicon-iron (SiFe) tin plates forming core of the transformer has been investigated via sensors. Magnetic induction-magnetic field characteristic (B-H) of the material was obtained using the magnetic flux distribution calculation method. The optimum magnetic induction value was determined from B-H characteristic in order to get the maximum efficiency. Besides that, iron losses which occur at no-load operation were calculated as hysteresis and fauolt losses. The effect of magnetic losses on characteristics of transformer was discussed by interpreting results from obtained experiments.

**KEYWORDS:**Transformer, magnetic flux, iron losses, sensor, hysteresis loss, fauolt loss

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
SEMBOL LİSTESİ .....	v
ÖNSÖZ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. DENEYSEL SİSTEM .....	10
3. METOT VE MATERYAL .....	15
4. BULGULAR .....	20
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	29
6. KAYNAKLAR.....	30

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Transformatörlerin genel çalışma prensibi.....	2
Şekil 1.2: Çekirdek tipi trafo. ....	3
Şekil 1.3: Mantel tipi trafo.....	4
Şekil 1.4: Dağıtılmış tip trafo. ....	4
Şekil 1.5: Kat sargı. ....	6
Şekil 1.6: Devrik sargı. ....	7
Şekil 1.7: Kuru tip transformatör.....	8
Şekil 1.8: Genleşme depolu transformatör. ....	8
Şekil 1.9: Hermetik transformatör.....	9
Şekil 2.1: Örnek transformatörün görünümü.....	11
Şekil 2.2: Transformatör modeli üzerinde ek yerlerinde oluşacak manyetik kaçak akının belirlenmesi. ....	12
Şekil 2.3: Manyetik akının karşılaştığı süreksizliğe bağlı olarak gösterdiği davranış.....	12
Şekil 2.4: Transformatör levhalarının birleşme bölgelerinde oluşan kaçak akının yakından görünümü.....	13
Şekil 2.5: (a) $B_z$ yönündeki manyetik akının ölçüleceği 10 sarımlı dairesel search coil. (b) $B_x$ , $B_y$ yönlerindeki manyetik akının ölçüleceği 10 sarımlı search coil.....	13
Şekil 2.6: Örnek transformatör üzerinde yapılan ölçümlerde manyetik akı bileşenlerinin yönleri.....	14
Şekil 2.7: Ölçümler sırasında kullanılan deneysel sistem. ....	14
Şekil 3.1: Histerisiz döngüsü. ....	16
Şekil 3.2: Eddy akımlarının neden olduğu kayıp. ....	19
Şekil 4.1: Transformatörün manyetik akı haritası.....	21
Şekil 4.2: Manyetik akının köşe ve kenar davranışı.....	22
Şekil 4.3: Manyetik akının köşe ve kenar davranışı.....	23
Şekil 4.4: Manyetik akının köşe ve kenar davranışı.....	24
Şekil 4.5: Manyetik akının dizilim deliklerindeki davranışı.....	25
Şekil 4.6: Manyetik akının dizilim deliklerindeki davranışı.....	25
Şekil 4.7: Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma eğrileri.....	26
Şekil 4.8: Transformatörde histerisiz kayıpları.....	27
Şekil 4.9: Transformatörde fuko kayıpları.....	28
Şekil 4.10: $f=50$ Hz'de çalıştırılan transformatörde boşta çalışma kayıpları.....	28
Şekil 4.11: $f=60$ Hz'de çalıştırılan transformatörde boşta çalışma kayıpları.....	29

## SEMBOL LİSTESİ

$H$	:	Manyetik alan şiddeti
$B$	:	Manyetik akı yoğunluğu (Manyetik indüksiyon)
$M$	:	Manyetizasyon
$\mu_o$	:	Boşluğun manyetik geçirgenliği
$\mu$	:	Manyetik geçirgenlik
$\phi$	:	Manyetik akı
$f$	:	Frekans
$N$	:	Bobin sarım sayısı
$A$	:	Bobin kesit alanı
$I$	:	Akım



## ÖNSÖZ

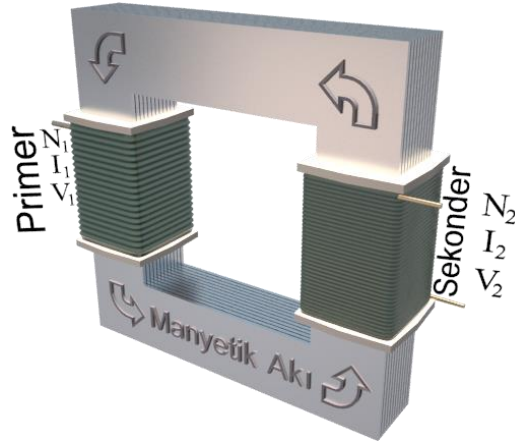
Bu çalışma boyunca bana desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa GÖKTEPE'ye ve Doç Dr. Mehmet BAYIRLI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışma arkadaşlarım Deniz PERİN'e ve Aykut ILGAZ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Deney düzeneklerinin yapılmasında ve tam zamanlı çalışmaların ortalarında izinlerimi geri çevirmeyen yöneticilerime ve şirketim BEST A.Ş. sonsuz teşekkürler.

Ayrıca her zaman maddi ve manevi yanımda olan özellikle kızıma ve aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

# 1. GİRİŞ

Alternatif akımlı sistemlerde, frekansı değiştirmeden elektromanyetik indüksiyon yardımıyla elektrik enerjisinin gerilim ve akım değerlerini istenilen oranda yükseltip alçaltabilen makinelere *transformatör* denir. Transformatörler, santraller tarafından üretilen elektriğin elektromanyetik alan yardımıyla iletiminde ve dağıtımında görevlidirler. Transformatörlerde herhangi bir enerji dönüşümü olmadığından mekanik enerji mevcut değildir. Yani hareketsiz makineler olan transformatörlerde sistem statiktir [1]. Kısaca *trafo* olarak adlandırılan transformatörler santral çıkışında yükseltici olarak, enerjinin kullanıldığı tüketim merkezlerinde ise düşürücü olarak kullanılırlar.

Trafo, kermit ile yalıtılmış 0,3-0,5 mm kalınlığında silisli (silisyum dioksit) ince saclar ile ferromanyetik malzemedan yapılmış bir manyetik nüveden (çekirdek) vesargılardan oluşmaktadır. Manyetik nüve, bacak ve boyunduruk olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Bacak kısmı, sargıların sarıldığı bölümdür ve boyunduruk tarafından iki bacak birbirlerine birleştirilir. Alternatif akım kaynağına bağlı olan ve şebeke geriliminin uygulandığı ilk bobin grubuna primer (giriş), enerjinin giriş değerinden farklı bir gerilimde elde edildiği bobin grubuna sekonder (çıkış) adı verilir [2]. Şekil 1. 1'de görüldüğü gibi primer sargıya (bobin) uygulanan şebeke gerilimi, zamana bağlı olarak değişen bir manyetik alan oluşturur. Değişen bu manyetik alan çekirdek yardımıyla sekonder sargıya iletilir ve bu sargıda bir elektromotor kuvvet meydana getirir. Sonuç olarak aralarında elektriksel kontak olmaksızın girişe uygulanan alternatif akım, sekonder sargıda aynı frekanslı bir gerilim indükler.



**Şekil 1.1:** Transformatörlerin genel çalışma prensibi.

Transformatöre doğru akım uygulandığı zaman primer sargıdan geçen akım gövde üzerinde bir manyetik alan oluşturur. Fakat ilk durumun aksine bu alan şiddeti ve yönü zamanla değişmeyen sabit bir manyetik alandır. Değişmeyen manyetik alan içinde kalan sekonder sargıda ise herhangi bir gerilim indüklenmez. Sadece doğru akımın kesildiği zamanlar değişim meydana gelir ve geçici bir elektromotor kuvveti indüklenir. Dolayısıyla sekonderden sürekli bir akım geçirmenin yolu zamana göre değişen bir gerilim uygulanmasıdır.

Uçlar arasındaki gerilim değerlerinin oranı, primer ve sekonder sargı sayılarının oranına eşittir. Sekonderin sarım sayısı, primerin sarım sayısından fazla ise transformatör *yükseltici*, az ise transformatör *düşürücü* transformatör olarak adlandırılır. Buna karşılık, gerilimlerin oranı ile bobinlerdeki akımlar birbirine ters orantılıdır. Dönüştürme oranı olarak bilinen ilişki eşitlik (1. 1) de verilmiştir.

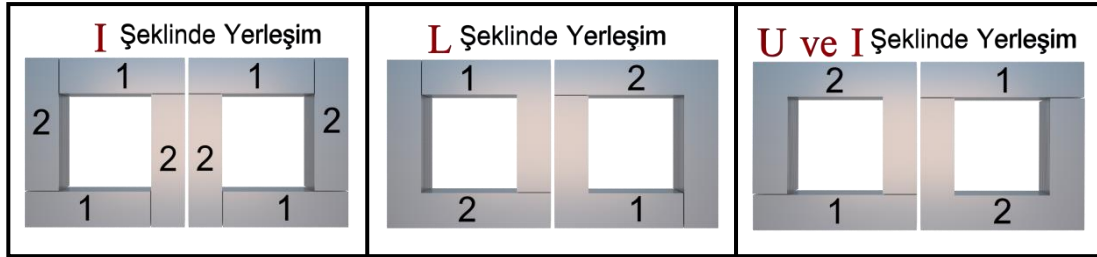
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.1)$$

Burada  $V_1$ ; primere uygulanan gerilim,  $V_2$  ise sekonderden alınan gerilim değeridir.  $N_1$  ve  $N_2$ , sırasıyla primerin ve sekonderin sarım sayılarıdır.  $I_1$  ve  $I_2$  ise primer ve sekonderden geçen akım değerleridir.

Uygulama alanlarının çeşitliliğine bağlı olarak farklı tipte transformatörler bulunmaktadır. Nüve tipine, kullanım amacına, sargı tiplerine ve soğutma şekillerine göre trafolar sınıflandırılabilir.

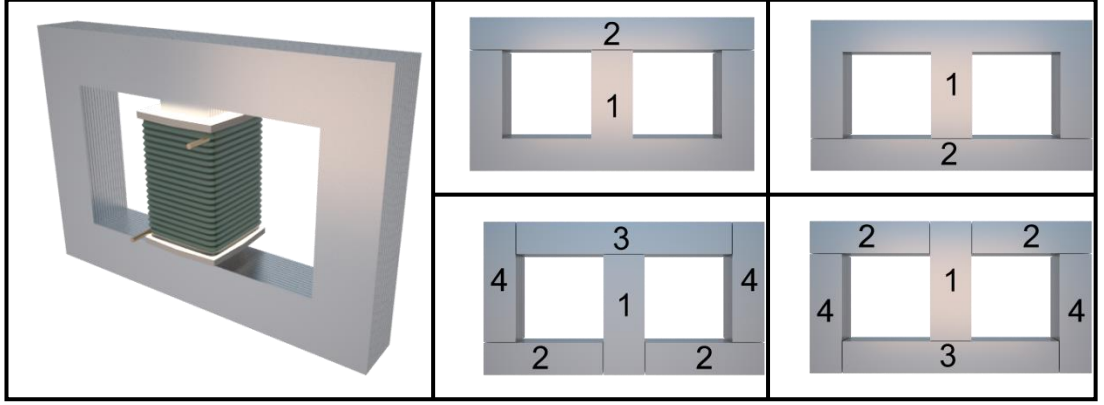
Manyetik gövdeyi oluşturan nüve tipine göre 3 çeşit trafo mevcuttur. Bunlar çekirdek tipi, mantel (ceket) tipi ve dağıtılmış tip trafolardır [3].

**Çekirdek Tipi Trafo:** Çekirdek tipi nüve tek gözlüdür. Sargı kontrolünün kolay olmasından dolayı yüksek gerilimli transformatörlerde tercih edilirler. Şekil 1. 2’de çekirdek tipi nüve ve sac şekillerinin çeşitli dizilişleri görülmektedir. Çekirdek tipi trafolarla saclar genellikle L, U ve I şeklinde yerleştirilir. Saclar yerleştirilirken ek yerlerinin üst üste gelmemesine dikkat edilir.



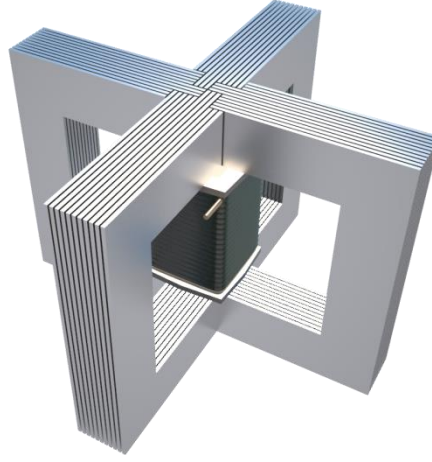
Şekil 1.2: Çekirdek tipi trafo.

**Mantel Tipi Trafo:** Şekil 1. 3’de gösterilen Mantel tipi nüvede sargılar nüvenin orta bacağına sarılıdır, nüve tarafından çevrelenir ve iyi korunurlar. Bu tip nüvelerde manyetik akının izlediği yol, çekirdek tipi trafolarla nazaran daha kısadır. Buna bağlı olarak oluşan mıknatıslanma akımı küçük olacağından mantel tipi trafolar genellikle düşük gerilimli trafolarla kullanılırlar. Mantel tipi trafolarla kullanılan demir miktarı çekirdek tipi trafolarla göre daha fazla olduğundan ağırdırlar. Mantel tipi transformatörler maliyet bakımından yüksek olup imalat aşaması çekirdek tipi trafoya göre daha zordur.



**Şekil 1.3:** Mantel tipi trafo.

**Dağıtılmış Tip Trafo:** Şekil 1. 4’de görüldüğü gibi dağıtılmış trafoda bobinler orta ayağa sarılmıştır ve dört taraftan kuşatılarak korunmaktadır. Bu şekilde hareketsiz ve sağlam bir sistem çalışma durumunda titreşimi azaltarak daha az gürültü oluşmasını sağlar. Böyle sistemlerde kaçak akı miktarı en düşük düzeydedir.



**Şekil 1.4:** Dağıtılmış tip trafo.

Endüstriyel uygulamalarda transformatörlerden çeşitli şekillerde yararlanılmaktadır. Düşürücü, yükseltici, ölçü, yalıtım ve oto transformatörleri bunlardan başlıca olanlarıdır.

**Düşürücü (Alçaltıcı) Transformatör:** Primer sargıya uygulanan gerilimin daha düşük değerde sekonderden sargıdan alınmasına dayanan trafo tipidir. Evlerdeki

şarjlı süpürgelerde, bilgisayarlarda, gece lambalarında bulunan düşürücü tip transformatörler en yaygın kullanılan transformatör tipidir.

**Yükseltici Transformatör:** Girişe uygulanan gerilimi daha yüksek seviyelere çıkartan trafo tipidir. Televizyonlarda ve enerji nakil hatlarındaki yüksek gerilim bu transformatörler yardımıyla elde edilir.

**Ölçü Transformatörü:** Alternatif akım uygulamalarında gerilim ve akımın yüksek değerlerini cihaz yardımıyla ölçmek çok zordur. Bu ölçümün zor olmasının yanı sıra tehlikeli olduğundan bu iş için ölçü transformatörleri kullanılır. Ölçü transformatörlerinin birer çeşidi olan akım ve gerilim transformatörleri, yüksek akım ve gerilimleri ölçü aletlerinin ölçebileceği değerlere indirger.

**Yalıtım(Güvenlik) Transformatörü:** Girişe uygulanan şebeke geriliminin ve sargıdan geçen akım değerinin aynısı çıkıştan da alınıyorsa bu tip transformatörler yalıtım transformatörüdür. Yalıtım transformatörlerinde amaç gerilim dönüşümü değil iki devreyi birbirinden yalıtarak güvenli bir ortam oluşturmaktır. Hastanelerin ameliyathanelerinde, okul laboratuvarlarında elektrik çarpması gibi tehlikeli durumları ortadan kaldırmak için kullanılır.

**Oto Transformatörü:** Üzerinde hem primer hem de sekonder sargı görevini üstlenen tek bir sarımın bulunduğu transformatörlerdir. İkinci bir sargıya ihtiyaç duyulmadığı için bobin ve işçilik kazancının olduğu bu trafolarla primer ve sekonder sargı aynı manyetik alan etkisindedir. Bundan dolayı girişte oluşturulan manyetik alan direk olarak sekondere aktarılır. Bunun sonucunda kaçak akı en aza indirilerek verim yükseltilmiş olur. Asenkron motorlara yol vermede, gerilim yükseltmekte ve enerji nakil hatlarında gerilimdeki düşüşleri karşılamakta kullanılır. Ayrıca oto transformatörlerinde manyetik gövdeyi oluşturan demir nüve ve sargıyı oluşturan bakır bobin sayısı az olduğundan demir ve bakır kayıpları da çok düşüktür [4-6].

Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte bobin sarımı için geçmiş yıllarda kullanılan yuvarlak emaye bakır tellerin yerine bant veya folyo şeklindeki iletkenler tercih edilmektedir. Bu sargıların kullanımı sonucunda hem ani akım değişimlerine hem de kısa devreye dayanıklı bir sistem ortaya çıkmıştır. Bunun yanında böyle bir

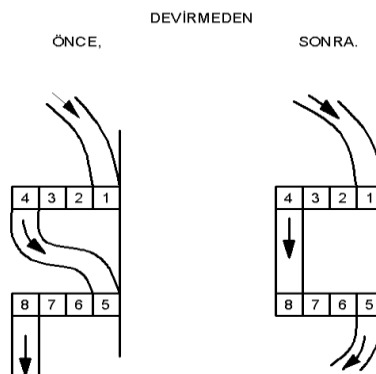
sarım sistemi ile transformatörün sessiz biçimde çalışması sağlanmıştır. Transformatörler, sarımlarına göre ikiye ayrılır:

**Kat Sargı:** Silindirik yapıda sürekli olarak sarılan bu sargı tipinde, birinci kattan sonra araya çıtalar koyularak soğutma kanalı teşkil etmek suretiyle çok katlı bir sistem elde edilebilir (Şekil-1.5). Sargı iletkeni olarak yassı profil veya örgülü bakır kullanılmaktadır. Yapısı gereği kat sargılar genellikle Alçak gerilim sargılarında kullanılmakta olup, genellikle bu sınır 45 kV 'dur. Bu sargıların işletme esnasında soğumalarını katlar arasından geçen transformatör yağı sağlamaktadır. Transformatör gücü büyük, alçak gerilim değeri küçük olduğunda sargıdan geçen akım çok büyük değerlere ulaşabilir. Bu durumda sargı ısınması sorun yaratabilir. Önlem olarak her katta spirler arasına izole ara parçalar yerleştirilerek yağın sadece sargı boyunca değil, yatay olarak da sarımlar arasından geçerek soğutmayı daha iyi hale getirmesi sağlanır.



**Şekil 1.5:** Kat sargı.

**Devrik Sargı:** Kısmi bobinlerden oluşan, sargı girişinde linear bir dağılım sağlayan, yüksek seri kapasitelere sahip bu sargılar özel bir sarım tekniği ile içten dışa doğru çift bobin sarılır, ikinci bobinin telleri devirme usulu ile yer değiştirilerek devam edilir (Şekil-1.6). Devrik sargılarda da tekli yassı, çoklu yassı iletkenle örgülü bakır iletkenler kullanılmaktadır. Her bobin arasına izole ara parçalar monte edilerek yağın radyal yönde sargının içine kadar işlemesi sağlandığı gibi, bobin içindeki spirler arasında da kanal teşkil edilerek aksiyal yönde de ilave soğutma imkanı sağlanabilir. İletkenler izolasyon kağıdı ile kaplanmış olup izolasyon kalınlıkları, sarımları, katlar ve bobinler arasında oluşan gerilim farklarını karşılayacak şekilde seçilir.



### Şekil 1.6: Devrik sargı.

Soğutma şekillerine göre trafolar, kuru tip ve yağlı tip olmak üzere iki grupta incelenebilir.

**Kuru Tip Trafo:** Çalışma esnasında cihaz içinde oluşan ısıyı hava dolaşımı (konveksiyon) ve ışıınım (radyasyon) yoluyla dışarı atan trafolarla kuru tip trafo denir. Şekil 1.7'de görülen kuru tip trafo içinde ısınan sargılara temas eden havanın yoğunluğu azalır ve yükselerek bir hava sirkülasyonu oluşturur. Trafo üzerindeki hava kanalları vasıtasıyla ısınan hava cihaz dışına atılarak trafonun soğuması sağlanır. Radyasyon yolu ile soğutma daha çok trafonun fiziki özelliklerine bağlı olarak değiştiğinden soğutmaya katkısı küçüktür. Güçlü trafoların soğutma işlemi sırasında yukarıda bahsedilen iki yöntem yeterli gelmez ise dışarıdan cebri olarak üzerlerine hava üflenir ve daha serin bir ortamda muhafaza edilirler.

Kuru tip trafolarla yüksek gerilim sargısını oluşturan bobinlerin etrafı cam elyaf ile sarılır. Epoksi reçine vakum altında dökülerek fırında kurumaya bırakılır. Kuruyup sertleşen sargılar kalın bir epoksi reçine tabaka ile kaplanmış olup nemden ve darbelerden yalıtılmış hale gelir. Alçak gerilim sargılarında ise alüminyum ve bakırdan oluşan bantlar kullanılmaktadır [7].

Kuru tip trafonun içeriğinde herhangi bir sıvı madde bulunmadığından sızdırma riski bulunmaz. Yalıtım seviyesi yüksek olduğundan kısa devre oluşumlarına karşı dayanıklıdır. Yanıcı değildir ve çevreye zarar vermez. Bu özellikleri sayesinde okul, hastane, maden ocakları, metro işletim sistemleri gibi tesislerde ve kurumlarda tercih edilir [8].





**Şekil 1.7:**Kuru tip transformatör.

**Yağlı Tip Trafo:** Sargıları tamamen yağın içinde olan transformatörlere yağlı tip transformatörler adı verilir. Yağlı tip trafolar, genişleme depolu ve hermetik olmak üzere iki çeşittir.

**Genleşme Depolu Trafo:** Yağlı tip trafolarının, kuru tip trafolardan farkı soğutma işleminin yağ ile yapılmasıdır. Şekil 1.8’de gösterilen genişleme depolu transformatör çalışırken kayıpların neden olduğu ısı yağa geçer. Böylece yağın sıcaklığı artar ve ısınan yağ genişlemeye başlar. Genleşme sonucu meydana gelen hacimsel büyüme genişleme deposu ile giderilir. Isınan yağın yoğunluğu azalır ve yükselerek genişleme deposunda toplanır.



**Şekil 1.8:** Genleşme depolu transformatör.

Genleşme depolu transformatörlerin içinde oluşabilecek kısa devreleri önlemek amacıyla Buchholz koruma tertibatı kullanılmaktadır. Sadece iç arızalara karşı koruma sağlayan Buchholz bobinlerinin yanı sıra dışa arızalara karşı koruyan diferansiyel koruma röleleri de vardır. Bunun dışında aşırı yüklenmeleri önlemek amacıyla trafoların kapağının altına bimetal levhalar yerleştirilir.

Genleşme depolu transformatörler atmosfere açık olduğu için bu tip trafolarda havadaki nemin yağa geçişini engelleyen hava kurutucu sayesinde hava alışverişi sağlanır. Hava kurutucu aynı zamanda filtreye benzer şekilde toz tutucu olarak da görev yapar. Trafonun bir diğer parçası da transformatör yağının sıcaklığını gözlemlemek amacıyla kullanılan alkollü termometredir. Manyetik yağ seviye göstergesi ise genleşme deposundaki yağın seviyesini gözlemlemek amacıyla kullanılmaktadır.

**Hermetik Trafo:** Şekil 1.9’da hermetik tip trafo görülmektedir. Genleşme depolu trafonun aksine hermetik trafoda yağ, sızdırmaz ve vakuma dayanıklı bir kazanda bulunduğu için atmosfer ortamına kapalıdır. Isınma ve soğuma gibi olayların sonucunda yağın genleşme ve büzülme durumu elastik ve dalga biçimli olan kazan duvarları sayesinde kontrol edilmektedir. Ayrıca kazanda bulunan yağ atmosfer ile temas etmediğinden nemden etkilenmez ve oksitlenme problemi yaşanmaz.



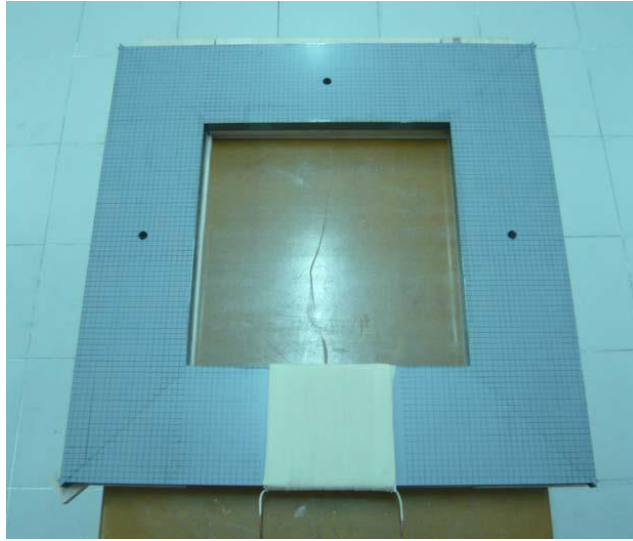
**Şekil 1.9:** Hermetik transformatör.

Genleşme depolu trafolarında yağ zamanla yalıtkanlık özelliğini kaybederek bozulmaya uğrar ve bu durum genleşme depolu transformatörlerin daha kısa ömürlü olmasına neden olur. Bu tip trafolarında, belirli zaman aralıklarında yağ değişiminin yapılması ve trafonun kurutulması gerekmektedir. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha uzun ömürlü, daha az bakım gerektiren ve düşük maliyetli bir sistem olan hermetik trafolar tercih edilmektedir.

Hermetik trafoların genleşme deposu ve onunla ilgili bağlantı kabloları olmadığından ağırlığı ve yüksekliği daha küçüktür. Bu durum küçük mekânlarda çalışma imkânı sağlarken güvenlik açısından da diğer trafolarına göre daha üstün özellikler sağlar.

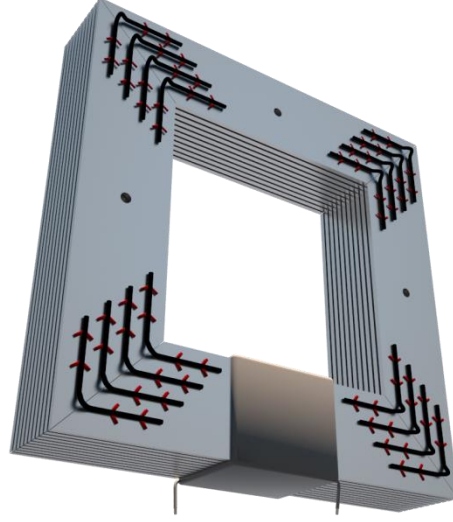
## 2. METOT VE MATERYAL

Transformatör sistemlerinde manyetik akı dağılımlarının incelenmesinin önemli kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu düşünceden hareketle geliştirilen manyetik akı dağılımının incelenmesi yöntemi ile transformatörde meydana gelen manyetik akı davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bununla birlikte SiFe sacların kenarlarına yaklaşıldığında transformatörün bacaklarındaki manyetik akı dağılımı da bu çalışma kapsamında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Planlanan bu çalışma kapsamında kare yapıdaki demir çekirdek ( $90cm \times 90cm$ ) boyutlarında hazırlanmıştır. Levha genişliği ( $20cm$ ) boyunda olup içteki boş alan ( $50cm \times 50cm$ ) boyutlarındadır. Manyetize etmek için  $N_1 = 50$  sarımlı bir primer bobin kullanılmıştır. Şekil 2.1’de hazırlanan örnek transformatör görülmektedir.



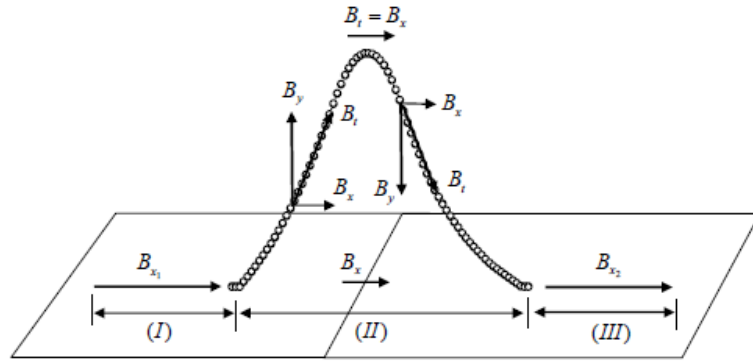
**Şekil 2.1:** Örnek transformatörün görünümü.

Üretilen manyetik akı, transformatörü oluşturan SiFe levhalar içinde yayılırken köşe noktalarındaki eksenler üzerinden z-ekseni boyunca kaçak akı olarak levha yüzeyinden Şekil 2.2’de görüldüğü gibi uzaklaşacaktır.



**Şekil 2.2:** Transformatör modeli üzerinde ek yerlerinde oluşacak manyetik kaçak akının belirlenmesi.

Manyetize edilen transformatör levhalar üzerinde akan manyetik akı her zaman levha yüzeyinden akmayı tercih edecektir. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere (I) numaralı bölgede sürekli levha üzerinde akan manyetik akı  $\vec{B}_{x_1}$ , (II) numaralı bölge içinde bir süreksizlikle karşılaştığında var olan manyetik akının büyüklüğü  $\vec{B}_x$  ve  $\vec{B}_y$  olmak üzere iki bileşene ayrılır. Manyetik akının  $\vec{B}_x$  bileşeni levha yüzeyine paralel yönde ortaya çıkmış olup  $\vec{B}_y$  bileşeni ise levha yüzeyine dik yönde ortaya çıkmıştır.



**Şekil 2.3:** Manyetik akının karşılaştığı süreksizliğe bağlı olarak gösterdiği davranış.

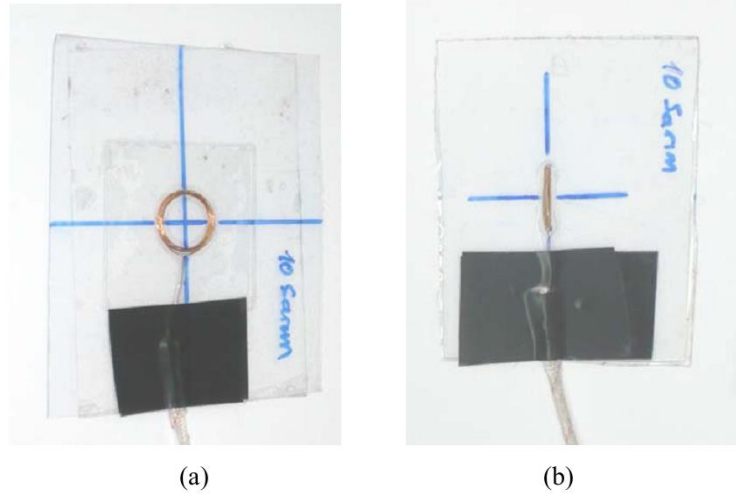
Bu iki bileşenin vektörel toplamı  $\vec{B}_t$  vektörünü vermektedir.  $\vec{B}_t$  vektörünün eğimi eğrinin başlangıcında pozitif yöndedir. Tam tepe noktasına ulaşıldığında ise  $\vec{B}_t = \vec{B}_x$  olacaktır. Tepe noktasını geçtikten sonra  $\vec{B}_t$  vektörünün eğimi negatif yönde

olur. Manyetik akının bu şekildeki davranışı levha üzerinde bir süreksizlikle karşılaşıldığında hemen levha yüzeyine dik bir bileşen oluşturma eğilimi içinde olduğunu göstermektedir. Bu durum transformatör çekirdeğinin steplap bölgesine bakıldığında Şekil 2.4’de gösterilen levha yüzeyine dik doğrultuda ortaya çıkan  $\vec{B}_y$  bileşeninin oluşumuyla açıklanabilmektedir.



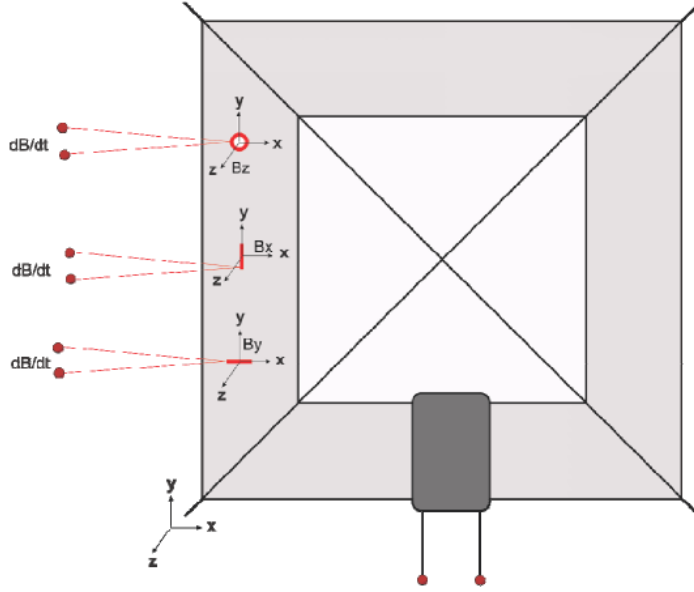
**Şekil 2.4:** Transformatör levhalarının birleşme bölgelerinde oluşan kaçak akının yakından görünümü.

Tasarlanan örnek transformatör çekirdeği üzerinde yapılacak olan ölçümler için üç adet sensör tasarlanmıştır. Şekil 2.5’de görülen bu sensörler 10 sarımlı dairesel ve dik olup “search coil” olarak isimlendirilmektedir.



**Şekil 2.5:** (a)  $B_z$  yönündeki manyetik akının ölçüleceği 10 sarımlı dairesel search coil. (b)  $B_x$ ,  $B_y$  yönlerindeki manyetik akının ölçüleceği 10 sarımlı search coil.

Ölçümler Şekil 2.1 de verilen tüm çekirdek üzerinde çizilen mesh üzerindeki noktalarda yapılmıştır. Bu sensörler yardımıyla Şekil 2.6’da gösterilen x, y, z yönlerindeki manyetik akı bileşenleri  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  değerleri bulunmuştur.



**Şekil 2.6:** Örnek transformatör üzerinde yapılan ölçümlerde manyetik akı bileşenlerinin yönleri.

Örnek transformatör  $f = 50$  ve  $60$  Hz'de çalıştırılmış olup varyak ile  $230$  V şebeke geriliminin belli yüzde değerleri transformatör bobinine uygulanmıştır. Şekil 2.7'de görülen deneysel sistemle yapılan ölçümlerde varyak %50-55 arasında tutulup  $120$  V AC gerilimde uygulanmıştır. Bu şekilde uygulanan gerilim oranları ile ölçümler yapılırken düşük gerilimlerde çalışılarak iş güvenliğinin sağlanmasına önem verilmiştir. Burada tanımlanan search coil sensörlerin her üçü de hava çekirdekli ve  $10$  sarımlıdır. Sinyal seviyeleri toplam kazancı  $100$  olan arka arkaya eklenmiş işlemsel yükselteçler kullanılarak yükseltilmiştir. Sonuç olarak deneysel çalışmalardan elde edilen manyetik akı bileşenleri kullanılarak transformatörde oluşan güç kayıpları hesaplanmıştır.



**Şekil 2.7:** Ölçümler sırasında kullanılan deneysel sistem.

### 3. TEORİK YAKLAŞIM

Son yıllarda gerek endüstriyel sektörde gerekse günlük hayatın her alanında enerjiye olan bağımlılık giderek artmaktadır. Bununla birlikte, teknolojinin hızlı gelişimi, elektronik cihazların artışı enerji tüketimini günden güne arttırmaktadır. Bu tüketimi karşılamak için yurdun çeşitli yerlerinde enerji santralleri kurulmaktadır. Her yeni kurulan santral maliyet açısından masraflı olup çevreye saldığı zararlı gazlar bakımından ideal bir çözüm değildir. Bundan dolayı yüksek verimle çalışacak şekilde tasarlanan cihazlar, enerji tasarrufu bakımından çok önemli yararlar sağlayacaktır.

Endüstriyel uygulamalarda çok sık kullanılan trafolarla verim, sekonderden alınan gücün giriş gücüne oranı olarak tanımlanır. Trafoların hareketli parçaları olmadığından mekanik anlamda sürtünme gibi kayıpları yoktur ve diğer elektrik makinelerine göre verimleri daha yüksektir. Trafo, jeneratör, motor gibi elektrikli cihazlardan daha çok verim alınabilmesi için kayıplar tüm dinamikleriyle incelenmelidir. Transformatörlerde verimi azaltan kayıplar imalat kusurları, demir ve bakır kayıpları olarak 3 ana başlıkta incelenebilir. Buna göre;

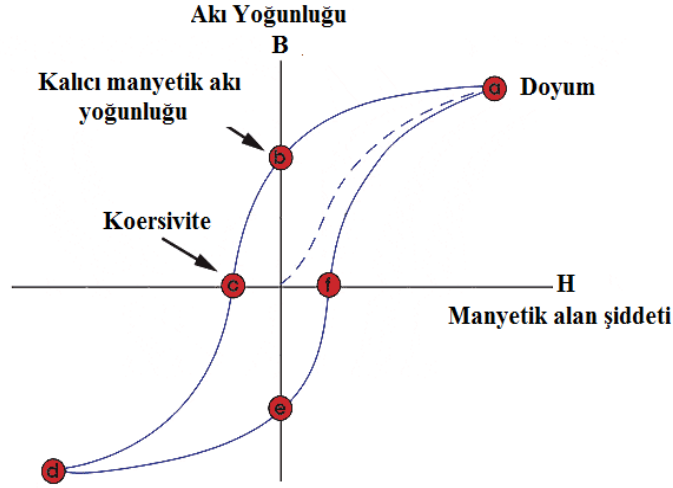
**1. İmalat hatalarının neden olduğu kayıplar:** Manyetik gövdeyi oluşturan silisli sacların düzenli bir şekilde bir araya getirilememesi kaçak akı artışına sebep olur. Yine sacların birleşim noktalarının bağlantılarının iyi yapılamaması bu bölgelerde boşluklar oluşturur. Böyle bir durum manyetik akı çevriminin devrede kesintisiz biçimde dolaşmasını engeller. Kullanılan yalıtım malzemesinin içinde boşluk olması durumu da trafonun verimini azaltan faktörlerden birisidir.

**2. Transformatörün boş ve yüklü çalışma durumundaki kayıplar:** Transformatörde primere bir gerilim uygulandığında sekonderin yüksüz durumda olması boş çalışma durumu olarak adlandırılır. Boş çalışma durumunda trafoda oluşan kayıplar *demir kayıplarıdır*. Meydana gelen bu demir kayıpları transformatör maliyetlerini etkileyen faktörlerden biridir [9]. Demir kayıpları *histerisiz ve fuko (Foucault)* kayıpları olmak üzere ikiye ayrılır [10].

Manyetik malzemeler hakkında önemli bilgiler elde edebildiğimiz histerisiz döngüsü, transformatörün girişine zamana bağlı olarak periyodik bir şekilde değişen



alternatif akımın uygulandığı zaman elde edilir. Kelime anlamı geri kalma olan histerisiz, akının mıknatıslanma kuvvetindeki değişime göre geride kalmasını ifade eder [11]. Şekil 3.1’de gösterilen histerisiz döngüsü şu şekilde gerçekleşir:



**Şekil 3.1:** Histerisiz döngüsü.

Ferromanyetik bir malzemeye manyetik alan uygulanmaya başladığında manyetik akı yoğunluğu alan ile birlikte önce hızlı bir şekilde yükselmeye daha sonra ise doyum noktasına kadar yavaşlayarak lineer olmayan bir davranış sergiler (Şekil 3.1-a).

Manyetik malzeme doyuma ulaştığında ise sahip olduğu mıknatıslık özelliği üzerine uygulanan manyetik alan kaldırılrsa dahi devam eder (Şekil 3.1-b).

Malzemede kalıcı hale gelen bu artık mıknatıslık *remanans* olarak adlandırılır. Malzemeye ters kutuplanma yönünde bir manyetik alan uygulandığı zaman akı yoğunluğu azalmaktadır. Artık mıknatıslığın 0 (sıfır) olduğu bu nokta ile başlangıç noktası arasındaki mesafe giderme (koersivite) manyetik alanı olarak bilinir (Şekil 3.1-c).

Manyetik indüksiyonu sıfırlamak için, ters yönde bir manyetik alan uygulanmalıdır. Uygulanan alan arttıkça, çubuk ters yönde mıknatıslanmış olur ve doyum noktasına ulaşır (Şekil 3.1-d).

Doyuma ulaşan manyetik alan azaltıldığında, malzeme kalıcı mıknatıslanmaya ters ancak eşit büyüklükte bir mıknatıslanmaya sahip olur (Şekil 3.1-e).

Malzemeyi ilk durumdaki mıknatıslanma noktasına getirmek için ters yönde zorlayıcı alan uygulandığında histerisiz eğrisi tamamlanır (Şekil 3.1-f).

Demir kayıplarından olan histerisiz kayıpları malzemenin histerisiz döngüsünün büyüklüğü yani alanı ile doğru orantılıdır [1]. Alternatif akım uygulandığı zaman bobinlerde indüklenen gerilim

$$\varepsilon = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N sarım sayısı ve  $\Phi$  manyetik nüvedeki akı değerini gösterir.  $\Delta t$  süresince transfer olan enerji miktarı ise

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon I dt \quad (3.2)$$

olur. Eşitlik (3.1) kullanılıp  $\Phi=BA$  ve  $I=HL_c/N$  yerlerine yazılırsa

$$W = A \cdot L_c \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (3.3)$$

elde edilir. Denklemden A alan,  $L_c$  uzunluk olup  $A \cdot L_c$  çarpımı nüvenin hacmini ( $V_{nüve}$ ) verir. İntegral çarpanı histerisizin alanını göstermektedir. Sonuç olarak histerisizin neden olduğu güç kaybı

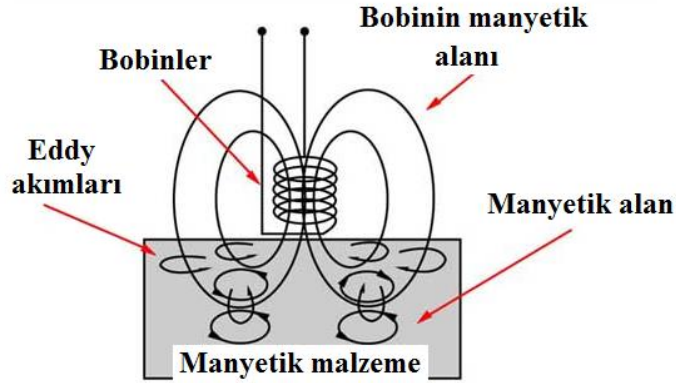
$$P_h = \sigma \cdot (B_{max})^n V_{nüve} \cdot f \quad (3.4)$$

olmaktadır. Bu eşitlikte  $\sigma$  histerisiz katsayısı,  $B_{max}$  nüvedeki akı yoğunluğunun pik değeri, n Steinmetz sabiti, f alternatif akımın frekansıdır. Burada  $\sigma$  malzemenin cinsine, hacmine ve akı yoğunluğuna bağlı bir sabit olup çeşitli manyetik malzemeler için değeri farklıdır. Steinmetz sabiti n ise 1,5 ile 2,5 arasında değişen bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan malzeme için  $\sigma = 1.10^{-5}$  ve n = 1,6 olarak alınmıştır.

Manyetize olmamış malzemede domenler gelişigüzel dağılmış bir durumda bulunurlar. Bu durumda malzemenin toplam manyetik momenti sıfır olup materyal herhangi bir manyetik özellik göstermez. Manyetik malzeme mıknatıslanmaya

başladığında malzemedeki domen duvarları hareket etmeye başlar. Bununla birlikte domen hareketi, malzemedeki yabancı atomlar, safsızlıklar ve iç gerilimler gibi nedenlerden etkilenir. Mıknatıslanma kuvveti bu etkileri yendiği zaman domenler yönelimlerini tamamen değiştirmeye başlarlar. Domenler yönelimlerini değiştirirken birbirlerine sürtünmeye başlarlar. Bu sürtünme kuvveti sonucu ısı şeklinde bir enerji kaybı meydana gelir. Bu kayıp histerisiz kaybı olarak adlandırılır. Bu kayıplar ferromanyetik nüveyi oluşturan ince sacların manyetik geçirgenliklerine göre değişmektedir. Pek çok araştırmacı ve cihaz tasarımcısı bu kayıplar ile ilgili olarak çalışma yapmıştır [12]. Çeşitli manyetik malzemelerin farklı mıknatıslanma özellikleri olduğundan dolayı manyetik nüveyi oluşturan malzeme seçimi bu kayıpları etkileyen önemli bir faktördür. Teknoloji geliştikçe malzemenin özelliklerini geliştirmek suretiyle manyetik akının daha iyi bir şekilde iletilerek bu kayıpların önüne geçilmeye çalışılmaktadır [13].

Manyetik bir gövde üzerine sarılmış olan bobinden frekansı zamana bağlı olarak değişen bir akım geçirildiği zaman Faraday indüksiyon yasasına göre gövde üzerinde bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilim akımın kapalı bir halka şeklinde dolaşmasına neden olur. Şekil 3.2’de görülen su yüzeyindeki girdaplara benzeyen bu akım halkalarına Fuko akımları (Eddy akımları) denir. Bu girdap akımları manyetik alan çizgilerinin dolanım yapmasını zorlaştırır. Bu akım halkalarının neden olduğu kayıplar malzeme içinde izledikleri yolun uzunluğu ve sac kalınlığının karesi ile orantılıdır. Sacın kalınlığı artarsa levhanın direnci azalır ve Eddy akımları da artmış olur. Bunun sonucunda levhalarda ısınma problemleri ortaya çıkmaya başlar ve transformatörün sağlıklı çalışmasını engeller [14].



**Şekil 3.2:** Eddy akımlarının neden olduğu kayıp.

$$P_e = K_e F^2 (B_{\max})^2 t^2 V \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir [10]. Burada  $K_e$  malzemeye bağlı olarak değişen Eddy akımı sabiti,  $F$  saniyedeki mıknatıslanma döngü sayısı ve  $t$  sacların kalınlığıdır. Bu tür kayıpları azaltmanın yolu akım yollarını mümkün olduğunca kısaltarak yol direncini arttırmaktan geçer. Bundan dolayı trafoların imalat aşamasında manyetik nüve, birçok ince levhalardan oluşturulur ve sacların içerisine küçük oranlarda silisyum ve karbon maddesi eklenir. Bu hem kayıpları azaltır hem de sacların daha az aşınarak uzun bir ömre sahip olmasını sağlar.

Transformatördeki demir kayıpları tüm kayıpların aynı fazda olmasından dolayı  $P_{\text{demir}} = P_{\text{his.}} + P_{\text{fuko}}$  şeklinde ifade edilir.

**3. Harmoniklerin neden olduğu ek kayıplar:** Son yıllarda endüstriyel sektörde sistemlerin verimini arttırmak için kullanılan doğrultucu devreler, fotovoltaik sistemler, transformatörler gibi lineer olmayan cihazlarda akım ve gerilimin sahip olduğu sinüs dalga formunda bozulmalar görülmektedir. Bu durum harmoniklerin oluşmasına neden olur. Sistemin akım dalgasında oluşan harmonikler, bakır kayıplarında ve çekirdek kayıplarında kendini gösterirken gerilim harmonikleri ise demir kayıplarında artışa neden olur. Şebekeye uygulanan alternatif akımın frekansı arttıkça histerisiz ve fuko kayıpları artacağından sistemlerdeki yüksek frekanslı harmonikler daha önem arz etmektedir [16].

Harmonikler, transformatörlerde kayıpları arttırarak aşırı ısınmaya neden olur. Isınma sonucu ise kablolarda ve cihazlarda mekanik arızalar meydana gelir. Elektromanyetik cihazlarda veri kayıpları, gürültü ve kilitleme gibi sorunlara yol açar. Bunlardan başka harmoniklerin etkisi sonucu enerji sistemlerinde gözlemlenen olumsuzluklardan bazıları

- Ses ve görüntü sistemlerinde parazit oluşumu,
- Dielektrik malzemelerin yapısının bozulması ve delinmesi,
- Enerji tüketiminde önemli derecede artış olması,
- Üretilen elektrik enerjisinin kalitesinin düşmesi,
- Sistemlerde bulunan koruma elemanlarının hatalı şekilde çalışması,

– Sistemlerden yüksek akım geçmesine neden olan rezonans olayının meydana gelmesidir.

Harmonikli akım ve gerilimdalgaları Fourier analizi yardımıyla matematiksel olarak ifade edilebilir. Bu analizde, frekansları ve şiddetleri birbirinden farklı sonsuz sayıda sinüs formuna sahip dalgaların toplamı olarak yazılır [16].

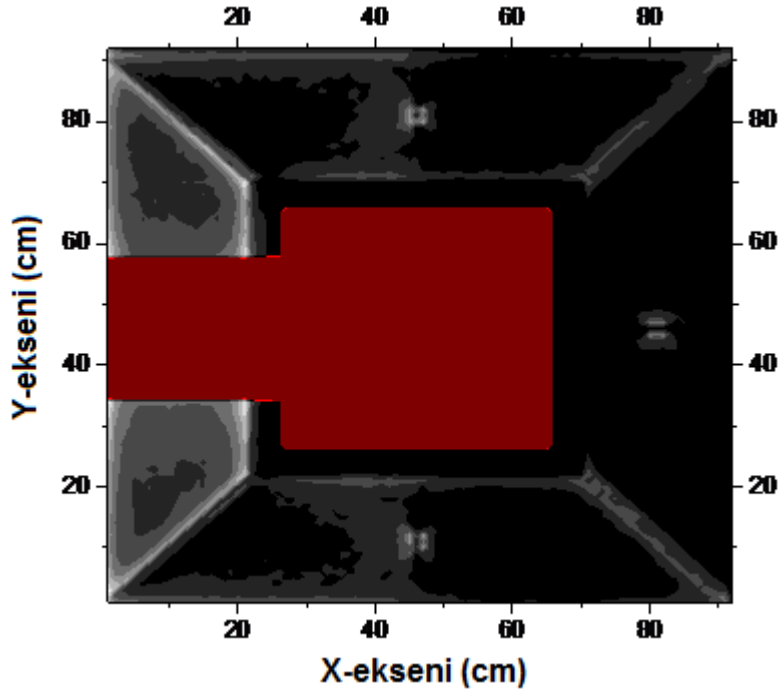
Trafonun boşa çalışma olayının aksine sekonder devreye bir yük bağlandığı zaman buradan akım geçmeye başlar. Sargılardan geçen akımlar sargıların ısınmasına yol açar ve ısı kaybı yaratırlar. Meydana gelen toplam bakır kaybı

$$P_{\text{bakır}} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (3.6)$$

şeklinde yazılır. Burada  $I_p$  primer devreden geçen akım,  $R_p$  primer devredeki direnç,  $I_s$  sekonder devreden geçen akım,  $R_s$  sekonder devredeki dirençtir. Sargılarda meydana gelen kayıp ısı yoluyla gerçekleştiğinden bakır kayıplarına Joule kayıpları da denir.

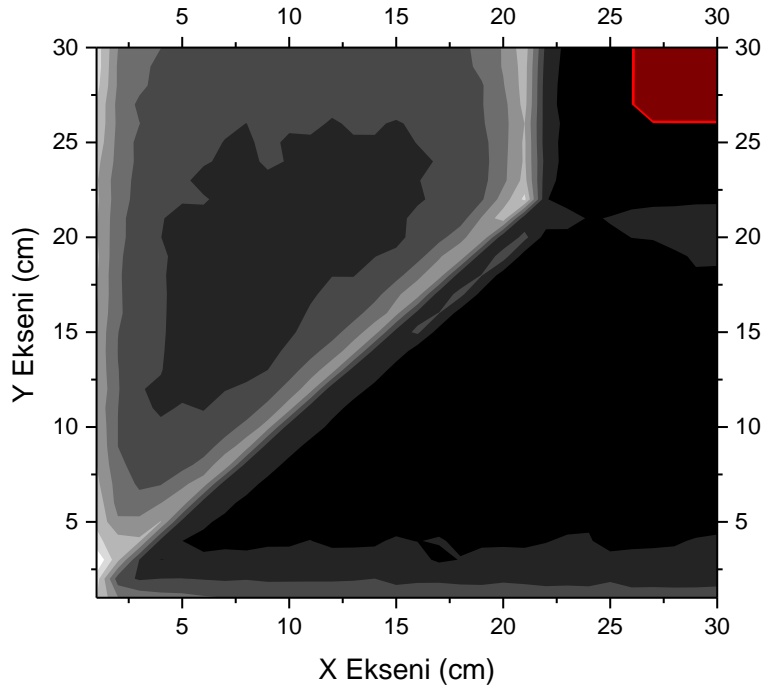
#### 4. BULGULAR

Hazırlanan ölçüm transformatöründe bütün sensörlerin uygun bir şekilde ölçüm alabilmesi için yüzey ile teması sağlanmıştır. Sağlanan bu temas ile yüzeye çıkan akı miktarının en iyi şekilde ölçülebildiği kabul edilmektedir. Y eksenı boyunca belirli bir aralıktaki sarılı olan bobin yardımıyla oluşturulan manyetik akı çekirdek nüve içerisinde ve etrafında kapalı devre oluşturmaktadır. Bağlantı noktaları ve sacların düzgün bir şekilde sıralanmasına yardımcı olan delikler etrafında yüzeye çıkan akı gri renkte Şekil 4. 1’de yer almaktadır. Detaylı olarak incelenilecek olan bu grafik genel olarak trafoda yer alan kaçak bölgeleri göstermektedir. Bağlantı köşelerinde griye doğru gözlenen kaymalar düz ve sağlam bölgelerde siyah şeklindedir. Siyah bölgelerde kaydedilen sensör sinyali gri bölgelerdekine göre düşüktür. Kırmızı bölgelerde herhangi bir ölçüm yapılmamasının sebebi ise kaçak akının yüzeyde ve kenar bölgelerdeki davranışının anlaşılmaya çalışılmasıdır.



Şekil 4.1: Transformatörün manyetik akı haritası.

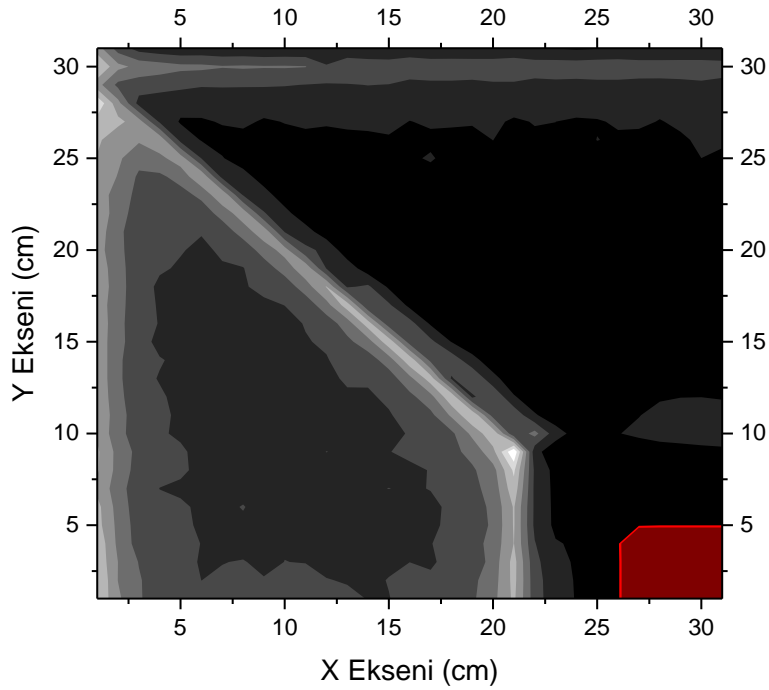
Grafikler ile verilen manyetik akı kayıpları köşe noktalarında ve dizim deliklerinde meydana gelmektedir. Bu kaçaklar manyetik akının kapalı bir yol izlerken karşılaştığı süreksiz bölümlerde, malzemenin kaynaklı safsızlıklardan kaynaklanmaktadır. Genel akı haritası Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.2’de kaçak akı bölgeleri rahatlıkla görülebilmektedir. Detaylı yapılan çizimlerde kırılma kuyruğu olarak adlandırılan köşe birleşim noktaları sensör değerinin yükseldiği ve gri bölgeye kaydığı noktalardır. Bobinin sarılı olduğu alt bölgelerde yoğun olan manyetik akı sensör değerini üst seviyelere çıkarmaktadır. Bunun görüntüsü ise gri olarak y eksenini boyunca belli olmaktadır. Köşe noktasından sonra aktarılan manyetik akı değeri başlangıç değerine göre daha azdır. Y eksenini boyunca uzanan gri bölgeden x eksenini boyunca uzanan bölgeye aktarılan manyetik akının azaldığı açıkça görülmektedir. Dikkat edilecek olunursa en yüksek sensör sinyal değeri köşelerde kaydedilmiştir. Şekil 4.2’de bulunan kırmızı bölgede herhangi bir ölçüm yapılmamıştır. Dolayısıyla bu bölgede herhangi bir renklendirme mevcut değildir.



**Şekil 4.2:** Manyetik akının köşe ve kenar davranışı.

Benzer şekilde bobinin diğer tarafında aynı davranış gözlemlenmiştir. Şekil 4.3’de belirtilen manyetik akı davranışı bobinin diğer tarafı ile benzerlik göstermektedir. Birleşme noktalarında diyagonal olarak belirgin hale çıkan sensör

sinyali, xy düzleminden z doğrultusuna çıkan manyetik akıyı temsil etmektedir. Uzaya çıkan manyetik akı sistemde kaçak akı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.5'te gösterilen ve anlatılan manyetik akı davranışı sensörler yardımı ile görüntülenmiş ve şekil 4.8'de verilmiştir. Bobin yardımı ile elde edilen manyetik alan çekirdek tarafından kapalı bir devre oluşturmaktadır. İlk elde edilen manyetik alan malzemenin manyetizasyonuna ve uzaya olan kaçaklar ile birlikte azalarak diğer bölgelere aktarılmaktadır. Gri tonlar sensör sinyalinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Gri tonlar kesişim bölgesinden sonra siyah tonlara kaydığı görülmektedir. Buradaki manyetik akının değer olarak azaldığı üretilen tüm akının bu bölgeye taşınmadığı söylenebilir. Kırmızı bölge yine herhangi bir ölçümün olmadığı sensör sinyalinin kaydedilmediği bölgedir.

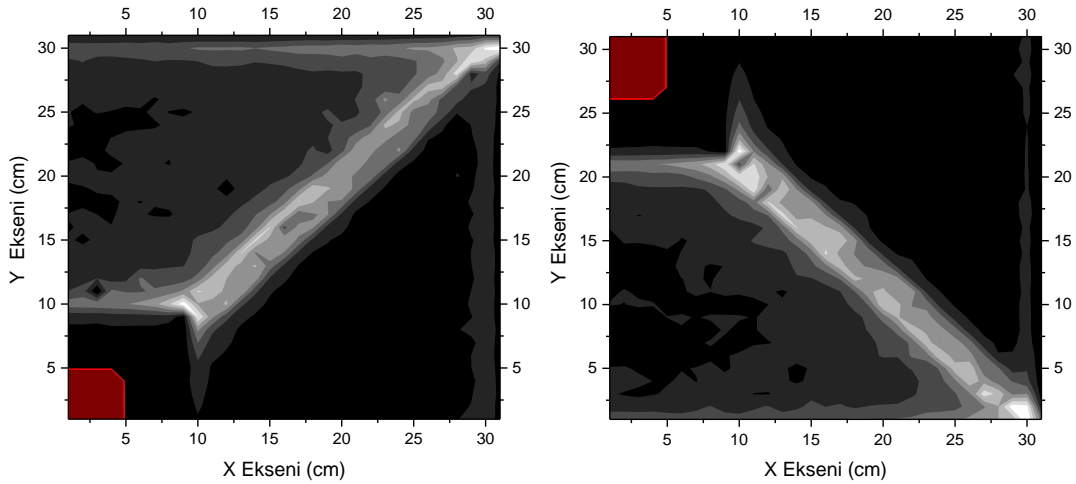


**Şekil 4.3:** Manyetik akının köşe ve kenar davranışı.

Köşe birleşim noktalarında uzaya çıkan manyetik akı alt köşelerde açıkça belli olmaktadır. Üst köşelerde olduğu gibi alt köşelerde manyetik akı aktarılırken değer olarak düşüş kaydedilmiştir. Köşe noktalarından uzaya kaçan akı daha geniş bir bölgede kaydedilmiştir. Manyetik akının güçlü olduğu bölgelerde uzaya çıkış bölgeleri daha dar bir alanda gerçekleşirken alt bölgelerde yani manyetik akının daha

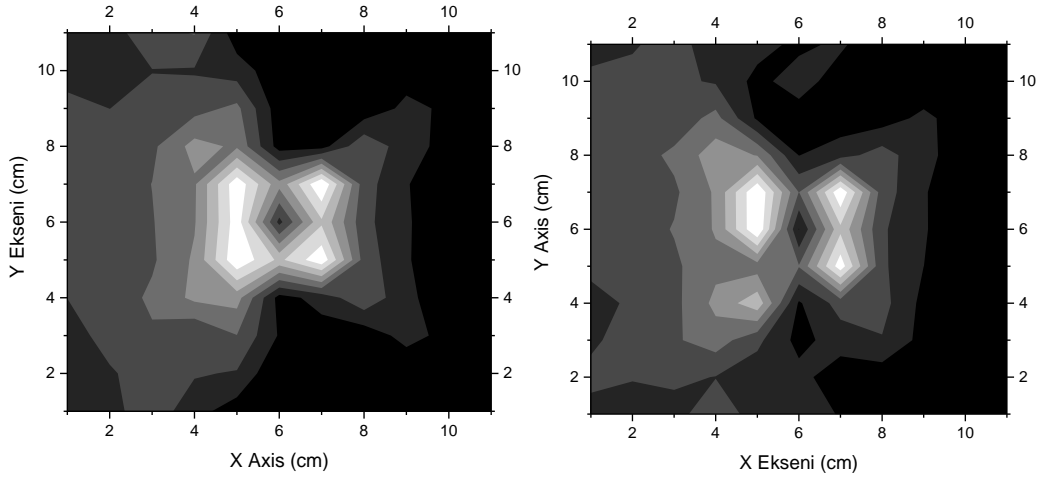


zayıf olduğu noktalarda uzaya çıkış bölgeleri daha geniş bir alana yayılmıştır. Gri bölgelerin genişlediği açıkça belli olmaktadır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de dar bir alandan uzaya çıkan manyetik akının, Şekil 4.4’de daha geniş bir bölgeye yayıldığı gözlenmiştir. Manyetik akının zayıflayarak geldiği alt kesişim noktalarında z eksenidoğrultusunda daha çok hareket serbestliği gösterdiği açıkça belli olmaktadır. Kırmızı bölgeler ölçüm kaydedilmeyen bölgelerdir. Köşe noktalarında aktarılmadan sonra sensör sinyalinin düştüğü grafikte griden siyaha kayma ile anlaşılabilir. Manyetizasyon ve kaçak akı, sensör sinyalinin bobinden uzaklaştıkça azalttığı görülebilmektedir. Her sistemde olduğu gibi üretilen manyetik alan diğer bölgelere tam olarak taşınamamıştır.



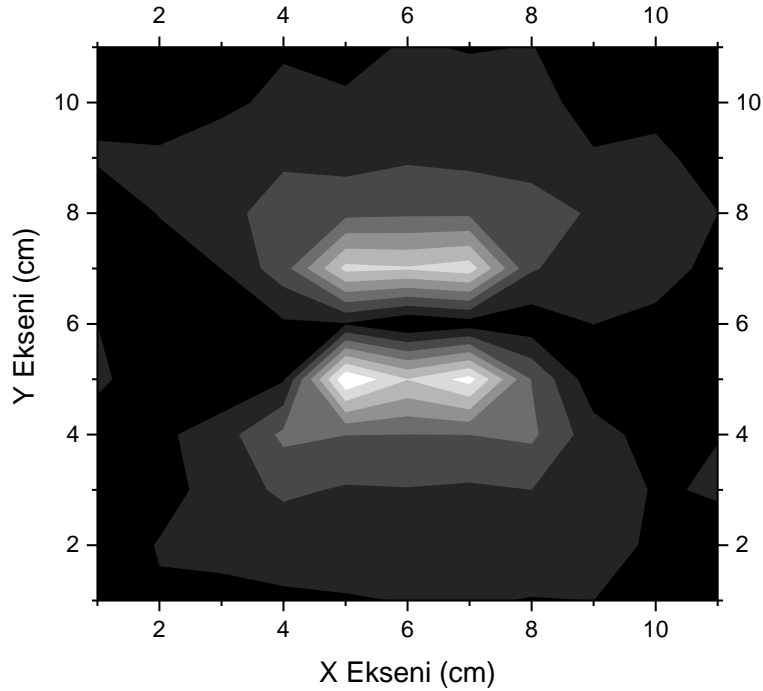
**Şekil 4.4:** Manyetik akının köşe ve kenar davranışı.

Köşe bağlantı noktalarında manyetik akının davranışı incelendikten sonra sacların dizilimi kolaylaştırmak için oluşturulan ve her sacın tam ortasında yer alan dizilim deliklerinde kaçak akı bulunduğu kaydedilmiştir. Kaçak akının uzaya çıkarken belirgin sensör sinyali veren noktalar gri ölçeklendirmede açıkça belli olmaktadır. Kaçak akının oluştuğu bölgeler griye kaçarken, yoğunlaştığı bölgeler ise beyaza doğru kaymıştır. Şekil 4.5’de verilen aynı miktarda akının geçtiği kabul edilen ve sensör sinyalleri ile desteklenen dizilim delikleri benzer sinyaller vermiştir. Bu ölçümlerden sonra herhangi bir süreksizlik karşısında manyetik akının Z eksenine doğru kaydığı söylenebilir.



**Şekil 4.5:** Manyetik akının dizilim deliklerindeki davranışı.

Alt kısımda yer alan dizilim deliği ise bobine en uzak dizilim deliğidir. Manyetik akının bobinden uzaklaştıkça azaldığını kaydedilen köşe sinyallerinden elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile manyetik akının azaldığı alt kolda bulunan dizilim deliğinde sensör sinyali biraz farklılık göstermiştir.

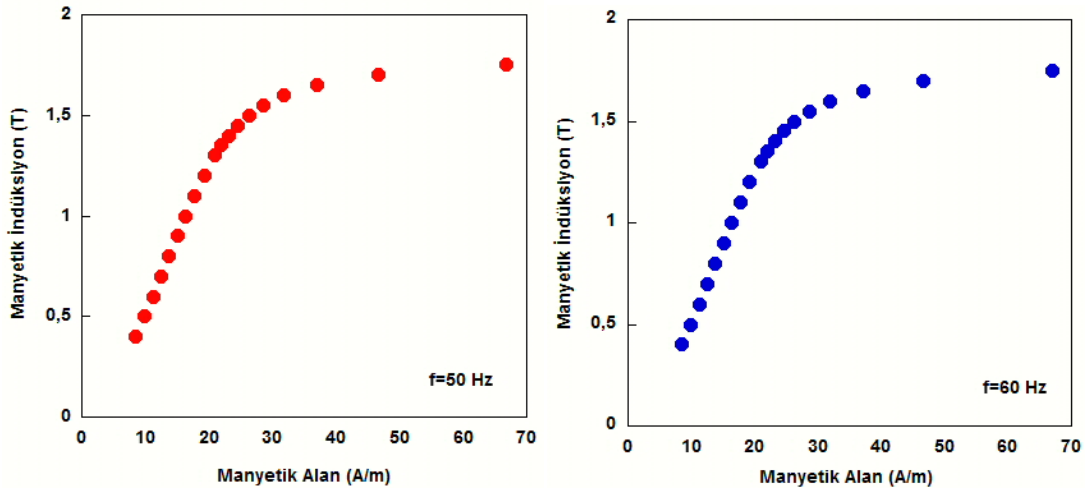


**Şekil 4.6:** Manyetik akının dizilim deliklerindeki davranışı.

Şekil 4.6'da verilen alt dizilim deliğinin sinyali dikey bir süreksizlik bölgesi gibi davranmıştır. Kaçak akı sadece en uzak bölgelerden geçiş yapmıştır. Yuvarlak bölgenin etrafında manyetik akı çizgileri bükülmeye uğramıştır. Bu bükülme

kenarlardaki sensör değerinin normal kalmasını sağlamıştır. Manyetik akı sadece birbirinden uzak bölgelerde uzaya çıkıp karşıya geçmiştir. Doğrusal bir süreksizlik gibi davranan bu yuvarlak dizilim deliği, manyetik akının bobinden uzaklaştığında azalan bir değer kaydettiğini göstermiştir. Diğer iki dizilim deliği yüksek akı değeri içinde olduğu için Şekil 4.10'da verilen dört köşeli sensör sinyali oluşturmuştur. Ama azalan akı değeri yuvarlak deliğin etrafından dolaşan akı çizgilerini oluşturmuştur. Akı yoğunluğunun az olduğu bu bölgelerde uzaya çıkan akılar doğrusal bir süreksizlik varmış gibi davranmaktadır.

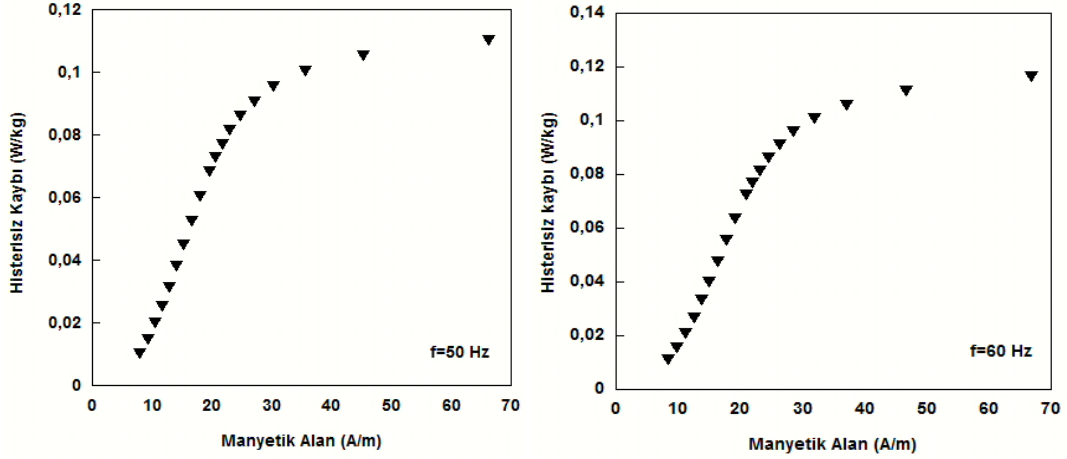
Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma eğrisi 50 Hz ve 60 Hz frekanslar için Şekil 4.7'de görülmektedir. Transformatör çekirdeğinde mıknatıslanmanın gerçekleştiği yer olan düşük alan bölgesi manyetik alan ile manyetik indüksiyonun orantılı olarak artmasından dolayı doğrusal bölge olarak adlandırılmıştır. Manyetik alan artmaya devam ettiğinde belirli bir noktada manyetik indüksiyonun aynı oranda artmadığı görülmektedir. Bu kritik nokta büküm noktasıdır. Bu noktadan ileriye gidildikçe manyetik alan artsa bile akı yoğunluğu bu değişime aynı oranda karşılık veremez ve doyuma ulaşır.



Şekil 4.7: Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma eğrileri.

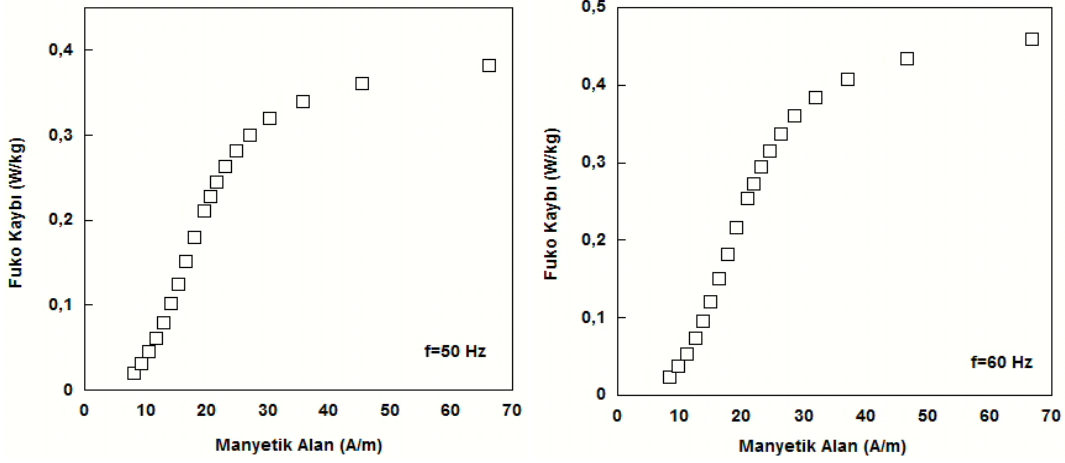
Bir transformatör tasarımı yapılırken gerekli manyetik akı yoğunluğu (B) değeri doğrusal ve doyum bölgesinde seçilmemelidir. Doğrusal bölgede B değerinin küçük olması nüvenin kesit alanının büyümesine ve dolayısıyla gücün azalmasına yol açar. Yüksek indüksiyon değerlerinde yani doyum bölgesinde bobinlerin aşırı

yüklenmesi nedeniyle ciddi ısınma problemleri ortaya çıkar. Ortaya çıkan ısı enerjisi ise bakır kayıplarını arttırarak verimin düşmesine neden olur. Bu nedenlerden dolayı manyetik induksiyon büküm bölgesinde seçilir. Büküm bölgesinde malzemenin optimum özelliklerine ulaşılır ve kayıplar en az seviyeye indirilerek en büyük verim değerine ulaşılır.



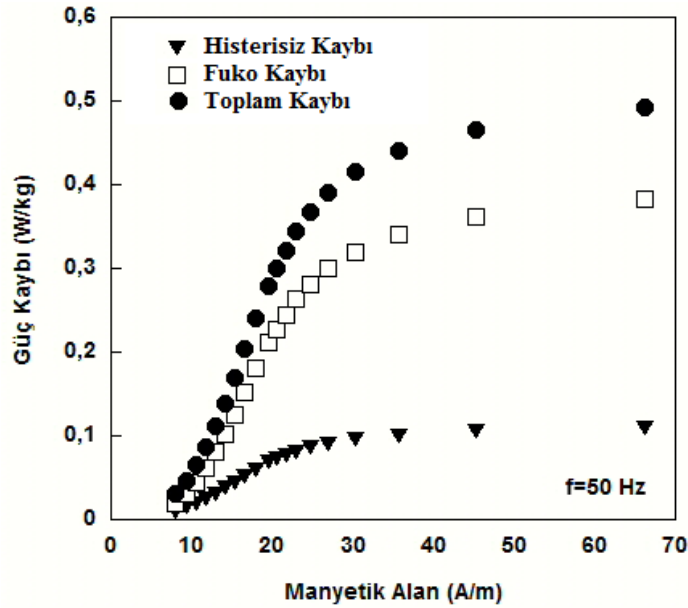
Şekil 4.8: Transformörde histerisiz kayıpları.

Ferromanyetik malzeme mıknatıslandığında, manyetik nüve moleküllerinin yönelimleri değişmeye başlar ve bu moleküller birbirlerine değerek ve sürterek bir ısı enerjisi açığa çıkarırlar. Statik kayıp olarak da adlandırılan histerisiz kaybının manyetik alan ile değişimi Şekil 4.8'de görülmektedir. 50 Hz'de çalışan transformör için 8 A/m lik manyetik alan uygulandığı zaman malzemedeki kg başına 0.01 W değerinde histerisiz kaybı meydana gelirken 60 Hz için bu değer 0.012 W'dır. Artan manyetik alan ile birlikte bu kayıplar da artar ve yaklaşık 67 A/m lik alan değerine ulaşıldığı zaman bu kayıp 50 Hz için 0.10 W değerine çıkarken 60 Hz'de çalışan transformör için bu değer 0.12 W'dır.



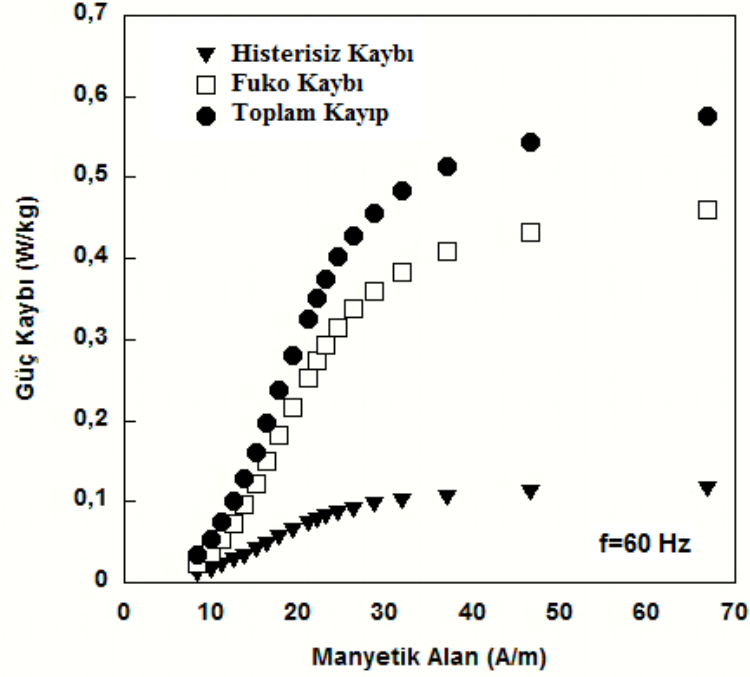
**Şekil 4.9:** Transformatörde fuko kayıpları.

Şekil 4.9, Feko akımları nedeniyle transformatörde meydana gelen kaybın manyetik alanla değişimini göstermektedir. Nüve üzerinde indüklenen akı yoğunluğunun zamana göre değişmesinden kaynaklanan Feko kaybı 50 Hz için düşük manyetik alanlarda 0,02 W/kg seviyelerinde iken manyetik alan artışı malzemedeki indüklenen akımı ve gerilimi artırarak Feko kayıplarının da artmasına neden olur. Bu durumda girdap akımları manyetik alan çevrimini zorlaştırarak kaybın yaklaşık 0,48 W/kg'a çıkmasına neden olur. Yine frekans arttıkça kayıp değerleri arttığından bu değerler 60 Hz için biraz daha yüksektir.



**Şekil 4.10:** f= 50 Hz de çalıştırılan transformatörde boşa çalışma kayıpları.

Şekil 4.10,  $f= 50$  Hz de çalıştırılan transformatör için boşa çalışma durumunda manyetik çekirdekte meydana gelen güç kayıplarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Uygulanan voltaja bağlı olarak değişen boştaki demir kayıpları artan manyetik alan ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi malzemede oluşan Fuko kaybı manyetik alanın her değeri için histerisiz kayıbdan daha çoktur. Bu fark düşük alanlarda küçük değerde iken özellikle artan manyetik alanda malzemede indüklenen gerilimin artmasıyla birlikte Fuko kayıpları daha baskın hale gelmektedir. Benzer şekilde  $f= 60$  Hz’de çalıştırılan transformatör için demir kayıpları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11:  $f=60$  Hz de çalıştırılan transformatörde boşa çalışma kayıpları.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada %3 Si içeren SiFe malzemelerden oluşan transformatörde boşa çalışma durumunda meydana gelen kaçak akı kayıpları ve demir kayıpları, malzemenin manyetik akı dağılımı incelenerek belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre boşa çalışma durumunda kaybedilen enerjinin çok büyük kısmı histerisiz ve Fuko kayıpları nedeniyle meydana gelir. Manyetik alan artışı her iki kayıp türünü artırırken yüksek alanlara doğru Fuko kaybı daha baskın hale gelmektedir. Yüksek manyetik alanlarda toplam kayıp yaklaşık olarak 1,1 W/kg olarak bulunmuştur. Takip edilen IEC prosedürüne göre 50 Hz'de çalıştırılan bir transformatör için 1,7 T değerindeki manyetik akı yoğunluğunda toplam güç kaybı 1,30 W/kg olarak verilmektedir. Geriye kalan kayıpların kaçak akı ve anormal kayıplardan kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Bu kayıpların önceden hesabının yapılması, imalat aşamasından başlayarak transformatörlerin fiziksel ve yapısal özelliklerinin gelişimine katkıda bulunacaktır. Bu özelliklerin gelişimi ile transformatörlerin verimlerinde önemli kazanımlar elde edilecektir.

Manyetik nüveyi oluşturan sacların; yönelmesini geliştirmek, içerisindeki manyetik olmayan maddeleri azaltmak, iç gerilmeleri gidermenin histerisiz kayıplarını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Sac kalınlığını inceltmek, silisyum katkısını çoğaltmak, yüzeyi ince bir filmle kaplamak, fiziksel yöntemlerle domenleri inceltmenin ise (Lazer ve mekanik çizme işlemi) fuko kayıplarını en aza indireceği düşünülmektedir. Ayrıca, manyetik nüve geometrisinin, anizotropi özelliklerinin ve kalınlığının bu kayıplar üzerindeki etkisi araştırılırsa kayıpların daha da azaltılabileceği buna bağlı olarak da verimin artırılabilceği düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Mergen, A.F., *Elektrik Makineleri I Transformatörler*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 22-55, 79-119, (2005).
- [2] Güzelbeyoğlu, N., *Elektrik Makinaları I, II*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Makinaları Ana Bilim Dalı, 20-23, (1992).
- [3] Keljik, J., *Electricity: Power Generation and Delivery*, Delmar Cengage Learning, (2013).
- [4] Orosz, T., Sleisz, A., Tamus, Z. A., “Metaheuristic Optimization Preliminary Design Process of Core-Form Autotransformers”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 52, (2016).
- [5] Barrios, E. L., Urtasun, A., Ursua, A., Marroyo, L., Sanchis, P., “High-Frequency Power Transformers with Foil Windings: Maximum Interleaving and Optimal Design”, *IEEE Trans. Power Electronics*, 30, 5712-5723, (2015).
- [6] Aleem, S., Balci, M. E., Sakar, S., “Effective Utilization of Cables and Transformers Using Passive Filters For Non-linear Loads”, *Int. J. Elec. Power & Energy Systems*, 71, 344-350, (2015).
- [7] AEG ETİ – GETİ-Dökme Reçineli Kuru Tip Transformatörler-Planlama Bilgileri, *AEG ETİ Elektrik Endüstri A.S. Ürün Katalogları*, 1-15, (2005).
- [8] ALSTOM, *GETİ-Dökme Reçineli Kuru Tip Transformatörler 100-20000kVA ALSTOM & AREVA Ürün Katalogları*, 1-39, (2005).
- [9] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, R. Ahuja, *Transformer Design Principles, with Applications to Core-Form Power Transformers*, CRC Press, (2010).
- [10] Zhu R., Liu Y., Wu X., Zhang L., Ye J. and Zhang Z., "Study of On-Line Detecting System for Capacity and Loss of Distribution Transformer," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 1,4, (2011).



- [11] Leon, F. de. and Semlyen, A., “A simple representation of dynamic hysteresis losses in power transformers”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 10, 315–321, (1995).
- [12] Zhong, W.L., Wang, Y.G., Zhang, P.L., Qu, B.D., “Phenomenological study of the size effect on the phase transitions in ferroelectric particles”, *Phys. Rev. B*, 50, 698–703, (1994).
- [13] Daneshmand, S. V., Heydari, H., “Hysteresis Loss Improvement in HTS Transformers Using Hybrid Winding Schemes”, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 22, (2012).
- [14] Sorbi, M., Marinozzi, V., “Magnetization Heat in Superconductors and in Eddy Current Problems: A classical thermodynamic approach”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26, (2016).
- [15] Ewald F.Fuchs, Yildirim, Deniz, Grady, W.M., “Measurement of Eddy – Current Loss Coefficient PEC-R, Derating of Single Phase Transformers, and Comparison with K-Factor Approach.”, *IEEE Trans. Power Delivery.*, 15, 1, (2000).
- [16] Eralp, F., *Yüksek Mühendisler İçin Fourier Yöntemi İle Dalga Analizi*, (1985).