

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLERİN  
FARKLI İLETKEN VE NÜVE TİPİNE GÖRE  
MALİYET VE VERİMLİLİK ANALİZİ

Şakir ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Haziran, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLERİN  
FARKLI İLETKEN VE NÜVE TİPİNE GÖRE  
MALİYET VE VERİMLİLİK ANALİZİ**

Şakir ARSLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 19.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İsmail NAKİR, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Evren İŞEN, Üye  
Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Bir Fazlı Transformatörlerin Farklı İletken Ve Nüve Tipine Göre Maliyet Ve Verimlilik Analizi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Şakir ARSLAN

İmza

*Eşim, Çocuklarım ve bilimin ışığında tüm Öğretmenlerime,*

## TEŞEKKÜR

---

1990 yılında başladığım öğrenim hayatıma 41 yaşında hala devam ediyorum ve dileğim odur ki yaşlandığımda da son nefesime kadar öğrenmeye devam etmektir. Bu serüvenimde öğrenmekten vazgeçmeyen KENDİME teşekkür ediyorum.

Bir süreliğine hayat mücadelesi içerisindeyken öğrenim hayatımın duraklamasına sessiz kalmayarak benim tekrar fakülteye dönmem için ısrarla yanımda olan daha önemlisi hayatımdaki tüm kararlarımda güçlü olmamı sağlayan sevgili eşim Sümeyye Arslan'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisansa devam etme kararı aldığımda okul binasına henüz girmişken neredeyse 15 sene sonra beni okulda görmenin şaşkınlığı ile bir hayalim olduğunu söylediğim de benim bu hayalime inanıp her türlü desteği esirgemeyen Engin Ayçiçek hocama, Mustafa Aydeniz hocama ve İsmail Nakir hocama teşekkür ederim. Ayrıca elektrik mühendisi olamam da manevi etkisi çok olan merhum Adem Ünal hocama çok teşekkür ederim.

Bu çalışmaya sonradan katılsa da düzenleme konusunda muhteşem katkısı ve dikkatimin dağıldığı zamanlarda teze tekrar sıkıca sarılmamı sağlayan Beyza Nur Tezcan'a çok teşekkür ederim.

Bu tezin çalışma şartlarını bana hazır eden Varsan Elektrik firmasına, tüm çalışma arkadaşlarıma, bu firmayı kuran babam Ali Arslan, uzun süre yönetiminde bulunan abim Oğuzhan Arslan'a çok teşekkür ederim.

Ve varlığımı borçlu olduğum Anneme çok teşekkür ederim.

Şakir ARSLAN

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xiii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xv</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xviii</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2 TRANSFORMATÖRLERİN SINIFLANDIRILMASI</b>	<b>4</b>
2.1 Kullanım Amacına Göre Transformatörler .....	4
2.1.1 Güç Transformatörleri	4
2.1.2 Dağıtım Transformatörleri	5
2.1.3 Ölçü Transformatörleri	5
2.1.4 Oto Transformatörler	8
2.2 Yapılarına Göre Transformatörler .....	9
2.2.1 Çekirdek Tipi Transformatörler	9
2.2.2 Mantel Tipi Transformatörler	10
2.3 Faz Sayısına Göre Transformatörler.....	11
2.3.1 Bir Fazlı Transformatörler	11
2.3.2 Üç Fazlı Transformatörler	12
<b>3 BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLERİN MATEMATİKSEL MODELENMESİ</b>	<b>13</b>
3.1 Çalışma Prensibi .....	13
3.2 Elektriksel Modellenmesi .....	14

3.3	Transformatör Kayıpları .....	16
3.3.1	Demir Kayıpları	16
3.3.2	İletken Kayıpları	18
3.3.3	Kaçak Akı Kayıpları	18
3.3.4	İzolasyon Kayıpları	18
3.4	Ana Materyaller .....	18
3.4.1	Silisli Sac	18
3.4.2	İletken Yapılar	20
3.4.3	İzolasyon Malzemeleri	22
<b>4</b>	<b>ÇALIŞMADAKİ BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLERİN MATEMATİKSEL İFADELERİ VE HESAPLAMALARI</b>	<b>25</b>
4.1	Ölçülerin Belirlenmesi İçin Kullanılacak Matematiksel İfadeler .....	25
4.2	Ölçülerin Belirlenmesi ve Matematiksel Hesaplamaları .....	32
<b>5</b>	<b>TASARLANAN TRANSFORMATÖRLERİN DENEYİ</b>	<b>34</b>
5.1	Deney Setinin Tanıtımı .....	34
5.1.1	Kutulu Kuru Tip Ayarlanabilir Oto-Transformatör (Varyak)	34
5.1.2	Miliohm metre	34
5.1.3	Güç Analizörü	35
5.1.4	Data Logger	36
5.1.5	Pensampermetre	36
5.1.6	Düşürücü (Buck) İzolasyon Transformatörü	37
5.2	Transformatörlerin Yüksüz (Boşta) Test Edilmesi .....	40
5.2.1	Teorik Kısım	40
5.2.2	Uygulama Kısım	41
5.3	Transformatörlerin Kısa Devre Testi .....	42
5.3.1	Teorik Kısım	42

5.3.2 Uygulama Kısım	44
5.4 Verimlilik Analizi.....	47
5.5 Maliyet Analizi.....	48
<b>6 SONUÇ</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>53</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>57</b>

# SİMGE LİSTESİ

---

$I$	Akım
$J$	Akım Yoğunluğu
$G_{Al}$	Alüminyum Telin Ağırlığı
$G_{Cu}$	Bakır Telin Ağırlığı
$N_k$	Bir Kata Sığdırılabilen Spir Sayısı
$I_0$	Boşta Akım
$p_0$	Boşta Kayıplar
$X_m$	Çekirdeğin Magnetik Reaktansı
$R_{Fe}$	Çekirdek Kaybı Direnci
$p_{Fe}$	Demir Kaybı
$I_{Fe}$	Demir Kayıp Akımı
$G_{Fe}$	Demir Nüve Ağırlığı
$R$	Direnç
$p_e$	Eddy Akım Kayıpları
$R_{eş}$	Empedansın Reel Kısmı
$X_{eş}$	Empedansın Sanal Kısmı
$f$	Frekans
$I_1$	Genel Primer Akımı
$V_1$	Genel Primer Gerilimi
$N_1$	Genel Primer Sargı Spir (Tur) Sayısı
$I_2$	Genel Sekonder Akımı
$V_2$	Genel Sekonder Gerilimi
$N_2$	Genel Sekonder Sargı Spir (Tur) Sayısı

V	Gerilim
$S''_{Fe}$	Hesaplanan Sıkıştırılmamış Nüve Paket Alanı
$p_h$	Histerezis Kaybı
$G_{il}$	İletken Ağırlığı
$p_{il}$	İletken Kaybı
$\kappa$	İletkenin Özgül İletkenlik Katsayısı
$T_1$	İlk Sıcaklık
C	Karkasın İç Genişliği
n	Kat Sayı
$k_s$	Kat sayısı
$N_{ek}$	Katın Bitmesi İçin Eklenecek Hayali Spir Sayısı
$I_k$	Kısa Devre Akımı
$u_k$	Kısa Devre Gerilimi
$V_k$	Kısa Devre Gerilimi
$p_k$	Kısa Devre Kayıpları
d	Laminasyon Kalınlığı
B	Magnetik Akı Yoğunluğu
$B_m$	Magnetik Akı Yoğunluğu Maksimum Değeri
$I_m$	Magnetizasyon Akımı
$\eta$	Malzeme Sabiti
$\rho$	Malzemesinin Elektriksel Öz Direnci
$S_{Fe}$	Net Nüve Paket Alanı
$I_n$	Nominal Akım
$a_1$	Nüvenin İlk Sargı Uzunluğunun Kat Edeceği Mesafe
$C_{ort}$	Ortalama Çevre Uzunluğu
$l_{paket}$	Paket Boyu
$b_1$	Paket Boyu Uzunluğuna Bağlı Olan Mesafe

$N_{\text{sac}}$	Pakete Sığan Sac Miktarı
$\pi$	Pi Sayısı
$I_{\text{Pr}}$	Primer Akım
$G_{\text{Al-P}}$	Primer Alüminyum Telin Ağırlığı
$G_{\text{Cu-P}}$	Primer Bakır Telin Ağırlığı
$R_1$	Primer Direnç
$V_{\text{Pr}}$	Primer Gerilim
$S_{\text{Pr}}$	Primer Görünen Güç
$R_{\text{il-P}}$	Primer İletken Direnci
$C_{\text{ilk-P}}$	Primer İlk Çevre Uzunluğu
$k_{\text{s-P}}$	Primer Kat Sayısı
$C_{\text{ort-P}}$	Primer Ortalama Çevre Uzunluğu
$X_1$	Primer Reaktans
$N_{\text{Pr}}$	Primer Sargı Spir (Tur) Sayısı
$C_{\text{son-P}}$	Primer Son Çevre Uzunluğu
$R_2'$	Primer Tarafına Yansıtılmış Sekonder Direnç
$X_2'$	Primer Tarafına Yansıtılmış Sekonder Reaktans
$l_{\text{il-P}}$	Primer Tel Uzunluğu
$E_{\text{Pr}}$	Primerdeki Elektromotor Kuvvet
$A_{\text{rad}}$	Sargı Köşelerindeki Radüs Yay Uzunluğu
$A_{\text{gen}}$	Sargının Katlardan Dolayı Uzama Genliği
$N$	Sarım Sayısı
$I_{\text{Sec}}$	Sekonder Akım
$G_{\text{Al-S}}$	Sekonder Alüminyum Telin Ağırlığı
$G_{\text{Cu-S}}$	Sekonder Bakır Telin Ağırlığı
$R_2$	Sekonder Direnç
$V_{\text{Sec}}$	Sekonder Gerilim

$S_{sec}$	Sekonder Görünen Güç
$R_{il-S}$	Sekonder İletken Direnci
$C_{ilk-S}$	Sekonder İlk Çevre Uzunluğu
$k_{s-S}$	Sekonder Kat Sayısı
$C_{ort-S}$	Sekonder Ortalama Çevre Uzunluğu
$N_{sec}$	Sekonder Sargı Spir (Tur) Sayısı
$C_{son-S}$	Sekonder Son Çevre Uzunluğu
$l_{il-S}$	Sekonder Tel Uzunluğu
$E_{Sec}$	Sekonderdeki Elektromotor Kuvvet
$T_2$	Son Sıcaklık
$S_{il}$	Tel Kesiti
$D_{il}$	Telin Çapı
$D_{iz}$	Telin İzolasyonlu Çapı
$p_{tot}$	Toplam Güç Kaybı
$Z_{eş}$	Transformatörün Eşdeğer Empedansı
$S$	Transformatörün Görünen Gücü
$S'_{Fe}$	Yaklaşık Nüve Paket Alanı

## KISALTMA LİSTESİ

---

EMK	Elektromotor Kuvvet
LME	Londra Metal Borsası (London Metal Exchange)
USD	Amerikan Doları

## ŞEKİL LİSTESİ

---

Şekil 2.1 Güç transformatörü .....	24
Şekil 2.2 Dağıtım transformatörü.....	25
Şekil 2.3 Akım transformatörü.....	26
Şekil 2.4 Baralı akım transformatörü .....	27
Şekil 2.5 Gerilim transformatörü .....	28
Şekil 2.6 Oto transformatör devre şeması .....	28
Şekil 2.7 Varyak elektrik diagramı ve görseli.....	29
Şekil 2.8 Çekirdek tipi transformatör .....	30
Şekil 2.9 Mantel tipi transformatör .....	31
Şekil 2.10 Bir fazlı transformatör.....	31
Şekil 2.11 Üç fazlı transformatör .....	32
Şekil 2.12 Yükseltici transformatör - alçaltıcı transformatör.....	32
Şekil 3.1 Bir fazlı transformatörün magnetik devre diyagramı.....	34
Şekil 3.2 İdeal transformatör .....	35
Şekil 3.3 Histerezis döngüleri çizimi .....	37
Şekil 3.4 Histerezis döngüleri çizimi .....	37
Şekil 3.5 E-I tipi kesilmiş silisli sac .....	40
Şekil 3.6 Rulo yapıdaki silisli sac .....	40
Şekil 3.7 Bobin iletken tel.....	42
Şekil 3.8 Fiberglass .....	43
Şekil 3.9 Polyester film .....	43
Şekil 3.10 Poliamid folyo.....	44
Şekil 3.11 Vernik kaplı transformatör.....	44
Şekil 4.1 Nüve ve iletken tel kesiti.....	49
Şekil 4.2 Tel sarımı sırasında oluşan radüs .....	50
Şekil 5.1 Kutulu varyak.....	54
Şekil 5.2 Miliohmmetre.....	55
Şekil 5.3 Analizör.....	55
Şekil 5.4 Data logger .....	56

<b>Şekil 5.5</b> Pensampermetre .....	<b>57</b>
<b>Şekil 5.6</b> Düşürücü izolasyon transformatörü .....	<b>58</b>
<b>Şekil 5.7</b> Deney için hazırlanan mantel tip bakır sargılı transformatör .....	<b>58</b>
<b>Şekil 5.8</b> Deney için hazırlanan mantel tip alüminyum sargılı transformatör .....	<b>59</b>
<b>Şekil 5.9</b> Deney için hazırlanan çekirdek tip bakır sargılı transformatör.....	<b>59</b>
<b>Şekil 5.10</b> Deney için hazırlanan çekirdek tip alüminyum sargılı transformatör..	<b>60</b>
<b>Şekil 5.11</b> Boşta deney görseli .....	<b>61</b>
<b>Şekil 5.12</b> Boşta deney görseli .....	<b>62</b>
<b>Şekil 5.13</b> Kısa devre deney görseli .....	<b>64</b>
<b>Şekil 5.14</b> Kısa devre deney görseli .....	<b>65</b>

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 4.1</b> Çalışmada hazırlanan transformatörlerin seçimlerle belirlenen değerleri .....	<b>52</b>
<b>Tablo 4.2</b> Çalışma için hazırlanan transformatörlerin hesaplanması.....	<b>53</b>
<b>Tablo 5.1</b> Boşta devre deney ölçümleri .....	<b>62</b>
<b>Tablo 5.2</b> Kısa devre deneyi sonuçları ve karşılaştırması .....	<b>64</b>
<b>Tablo 5.3</b> Direnç Ölçümü ve 20°C değere kompanzasyonu.....	<b>66</b>
<b>Tablo 5.4</b> Hesaplanan direnç değerlerinin 20°C kompanze edilmiş direnç değerleri ile karşılaştırılması .....	<b>66</b>
<b>Tablo 5.5</b> Çalışma için hazırlanan transformatörlerin toplam iletken ve nüve ağırlıkları.....	<b>69</b>
<b>Tablo 5.6</b> Çalışma için hazırlanan transformatörlerin toplam iletken ve nüve maliyetleri.....	<b>70</b>

## **Bir Fazlı Transformatörlerin Farklı İletken ve Nüve Tipine Göre Maliyet ve Verimlilik Analizi**

Şakir ARSLAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Bu tez çalışmasında, aynı dönüştürme oranına, aynı güce sahip dört farklı transformatör modeli tasarlanmış, analiz edilmiştir. Tasarlanan transformatörler, mantel tip ve çekirdek tip olarak iki farklı nüve şekilli tasarımda gerçekleştirilmiş olup, her iki tasarımda da bakır ve alüminyum sargılar kullanılmıştır. Çalışmada, enerji kayıpları, verimlilik, toplam sahip olma maliyeti gibi parametreler üzerinden kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Transformatörlerin sargı ağırlıkları ile birlikte nüve ağırlıkları da güncel maliyetler göz önüne alınarak maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca verimlilik ölçümü açısından da transformatörler farklı tiplerde testlere tabii tutularak çekirdek kayıpları, bakır sargı ve alüminyum sargı kayıpları da ayrıca incelenmiş ve tablo olarak da sunulmuştur. Bunun yanı sıra, mantel ve çekirdek tipi tasarımların magnetik özelliklerinin, yapısal farklılıklarının enerji verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonuçlarının, transformatör tasarımında malzeme ve tip seçiminin ekonomik ve teknik boyutlarını ele alarak, uygulama alanlarında daha bilinçli ve etkili kararlar alınmasını desteklemesi amaçlanmıştır.

Kuru tip alçak gerilim transformatörlerindeki farklı yapıların incelenmesi ile literatüre katkı sağlanması da ana hedefler arasında yer almıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tasarım, verimlilik, transformatör, maliyet.

## ABSTRACT

---

### **Cost And Efficiency Analysis of One Phase Transformers According to Different Conductor and Core Types**

Şakir ARSLAN

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assistant Prof. Engin AYÇİÇEK

In this thesis, four different transformer models with the same conversion ratio and power are designed and analyzed. The designed transformers have two different core designs as mantel type and core type, and copper and aluminium windings are used in both designs. In the study, a comprehensive analysis has been made on parameters such as energy losses, efficiency and total cost of ownership. The winding weights and core weights of the transformers were compared in terms of cost by considering the actual costs. In addition, in terms of efficiency measurement, transformers were subjected to different types of tests and core losses, copper winding and aluminium winding losses were also examined and presented in tables. In addition, the effects of magnetic properties and structural differences of mantel and core type designs on energy efficiency were analyzed. The results of the study are intended to support more informed and effective decision making in application areas by addressing the economic and technical aspects of material and type selection in transformer design.

Contributing to the literature by examining different structures in dry type low voltage transformers was also among the main objectives.

**Keywords:** Design, efficiency, transformer, cost.

# 1 GİRİŞ

---

Elektrik enerjisi, modern toplumlarda çoğu endüstriyel ve bireysel faaliyetin temel taşıyıcısı olarak kritik bir öneme sahiptir. Bu enerjinin etkin bir şekilde iletilmesi ve dağıtılması sürecinde transformatörler hayati bir rol oynar. Transformatörler genel itibari ile enerji santrallerinde, lokomotif güç sistemlerinde, dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Transformatörün icadı 19. yüzyıl içerisinde vuku bulmuştur [1]. Elektrik enerjisi yüksek verimlilikle iletebilmesi için farklı tiplerde transformatörlere ihtiyaç duyar. İletim kısmında enerji kaybını önlemek için öncelikle üretilen elektrik gerilimini yükseltecek tipte transformatörler kullanılır ve gerilim yükseltilir burada amaç akımı düşürüp kayıpları minimize etmektir, akabinde ise iletim tamamlandıktan sonra gerilimin nihai tüketicinin kullanabileceği seviyelere indirmek için aksi yönde işlem yapabilecek gerilim düşüren tipte transformatör kullanılarak iletim işlemi tamamlanır. Bu şekilde en düşük kayıplara bağlı kalınarak iletilen elektrik enerjisinde verimlilik en yüksek seviyede olacaktır [18] [45].

İlk üretilen transformatörler kuru tip olarak üretilmiş olup daha sonraları yağa daldırarak soğutma yönteminin de keşfedilmesiyle özellikle büyük güçteki transformatörlerde bu tasarım şekli çoğunlukla tercih sebebi olmuştur. Yalıtımsal sorunlar ve çevre temizliği açısından yağlı tipin tercih edilemediği yerlerde ise kuru tip transformatörler mecburi olarak kullanılması kabul görmüştür [1] [2].

Transformatör tasarımında, çekirdek tipi, sargı iletken tipi ve tasarım parametreleri gibi faktörler hem teknik performans hem de ekonomik verimlilik açısından belirleyici ana unsurlardır. Bu çalışmanın odağı olan "Bir fazlı transformatörlerin farklı iletken ve nüve tipine göre maliyet ve verimlilik analizi", mevcut literatürün bilgi birikimine önemli bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

Transformatörün ilk icadında bakır sargılı transformatörler kullanılsa da 20. yy' a geldiğimizde alüminyum madeni de transformatörlerin sargıları için tercih edilecek ürünler arasına girmeyi başarmıştır. Bunun sebebi ise gönüllü bir tercihten ziyade 20. yy. içerisinde savaşların da etkisiyle (özellikle ikinci dünya savaşı) bakır madenine ulaşımın zorlaşması bunun aksine Alüminyum madenin ise rezervlerinin daha fazla ve kolay ulaşabilir olması münasebeti ile transformatör sargılarında alüminyum madeni tercih edilmeye başlanmıştır [3] [16] [17].

Transformatörler, nüve yapısına göre farklı tiplerde tasarlanır ancak temel olarak mantel tipi ve çekirdek tipi en yaygın tercih edilen nüve tipleridir [4]. Transformatörler doğru tasarım altında verimliliği en yüksek (%99-%99,5) olan makinelerdir. Çekirdek nüvenin üzerine sarılmış iki temel sargıdan teşekkül eder, bu sargılar primer sargı ve sekonder sargı olarak adlandırılır, sargıları taşıyan nüve kısımlarına bacak ismi verilirken bacakları birbirine bağlayan yatay nüve kısımlarına ise boyunduruk (Yorke) adı verilir [5] [6].

Sargı malzemesi olarak en yaygın şekilde kullanılan iletken türleri bakır ve alüminyum iletkenlerdir. Bakır iletkenler, yüksek iletkenlik katsayısına ve düşük elektriksel dirence sahiptir, bu da enerji kayıplarının azaltılmasında kritik bir avantaj sunar. Bununla birlikte, bakır iletkenin görece yüksek maliyeti, yatırım kararlarında önemli bir faktördür. Alüminyum iletkenler ise daha düşük bir maliyet ve daha hafif bir yapı sunarken, daha düşük iletkenlik nedeniyle enerji verimliliğini azaltabilir. Elektrolitik bakır için özgül direnç 75°C de 0.02171  $\Omega$ .mm<sup>2</sup>/m ve elektrolitik alüminyum için özgül direnç 75°C de 0.03585  $\Omega$ .mm<sup>2</sup>/m'dir [7].

Bakır sargılı transformatörlerin, düşük enerji kayıpları nedeniyle uzun vadede ekonomik avantaja sahip olduğu görülmüştür. Ancak, alüminyum sargılı transformatörler, ilk yatırım maliyetinin daha düşük olması nedeniyle belirli uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tercih, transformatörün kullanım ömrü ve yük profili gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçülerde değişkenlik gösterebilir [42].

Transformatörlerin verimliliği, enerji kayıplarını azaltma eğilimi ile değerlendirilmekte olup, özellikle yük kayıpları ve demir kayıpları gibi iki temel kategoriye ayrılmaktadır [19] [31]. Yüksek verimli transformatör tasarımları, daha düşük enerji kaybına sahip olduklarından dolayı uzun dönemli çalışmalarda şirketlerin toplam enerji maliyetlerini de düşürmelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Maliyet analizleri ise genellikle transformatörün yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan toplam maliyetlerin incelenmesini içerir. Bu analizler, enerji kayıpları, bakım maliyetleri ve geri dönüşüm potansiyeli gibi faktörleri kapsamaktadır. Bakır ve alüminyum sargılar arasındaki maliyet farkları, bu kapsamda önemli bir çalışma alanı olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, farklı enerji talebi senaryolarında bu iki malzemenin performansına dair çok sayıda modelleme çalışması bulunmaktadır [43].

Sözü edilen bu çalışmalarda yapılan transformatör tasarımlarının özellikle kurulum maliyetleri, çalışma ömür süreleri, genel kayıpları gibi özellikler göz önüne alınarak transformatör tercihleri yapılmaktadır. Bu tercihler de bize farklı yapılarıdaki tasarımların ne kadar gerekli olduğunu göstermektedir.

# 2

## TRANSFORMATÖRLERİN SINIFLANDIRILMASI

---

### 2.1 Kullanım Amacına Göre Transformatörler

#### 2.1.1 Güç Transformatörleri

Güç transformatörleri, elektrik enerjisinin üretim noktalarından iletim hatlarına aktarılmasında kullanılan ve enerji sistemlerinde kritik bir rol oynayan makinelerdir. Genellikle 25 MVA ve üzeri güç kapasitesine sahip bu transformatörler, 154 kV ve üzeri yüksek gerilim seviyelerinde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Enerji kayıplarını minimuma indirmek için düşük kaçak reaktans ve yüksek verimlilik sunar. Bu transformatörler, enerji santrallerinden çıkan elektriğin uzun mesafelerde taşınmasını mümkün kılar ve iletim hatlarında kararlılığı artırır. Güç transformatörleri (Şekil 2.1), yüksek izolasyon gereksinimlerini karşılayan dayanıklı malzemelerle üretilir ve kısa devre dayanımı sayesinde güvenli bir çalışma ortamı sağlar. Enerji santralleri, iletim hatları ve dağıtım merkezleri gibi uygulamalarda güvenilirliği ve uzun ömürlü yapısıyla öne çıkar [33].



Şekil 2.1 Güç transformatörü [20]

### 2.1.2 Dağıtım Transformatörleri

Dağıtım transformatörleri (Şekil 2.2), iletim hatlarından gelen yüksek gerilimli elektrik enerjisinin son kullanıcıların ihtiyaçlarına uygun düşük gerilim seviyelerine dönüştürülmesi amacıyla kullanılan makinelerdir. Bölgesel olarak güç seviyeleri ve gerilim seviyeleri farklılık gösterebilir. Örnek verecek olursak Türkiye’de İzmir vilayeti için seçilen gerilim seviyesi 10 kV mertebesindeyken Kırşehir’de 31,5 kV mertebesinde bir gerilim seviyesi tercih edilmiştir [44]. Ayrıca TEDAŞ şartnamelerinde 33 kV ve 36 kV gerilim mertebesinde de talepler mevcuttur [46]. Şehir şebekeleri, kırsal bölgeler ve endüstriyel tesislerde elektrik enerjisinin güvenli ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlar. Ayrıca, dayanıklı izolasyon malzemeleri sayesinde uzun ömürlü ve güvenilir bir yapı sunar. Dağıtım transformatörleri, enerji sistemlerinde yük dengeleme ve gerilim düzenleme gibi işlevler üstlenerek, enerji dağıtım ağlarının temel bir bileşeni olarak önemli bir rol oynar.



Şekil 2.2 Dağıtım transformatörü [22]

### 2.1.3 Ölçü Transformatörleri

Ölçü transformatörlerinin kullanım amacı yüksek mertebedeki gerilim ve akım değerlerini daha düşük mertebelere indirgeyerek ana değerlerin büyüklüğünü sınırlamış olur. Böylece indirgenmiş büyüklükler gerekli ölçü aletlerinin ana değere maruz kalmadan ölçüm yapmasını sağlamış olur. Yüksek gerilim içeren bir sistemde yüksek gerilimi indirgeyen transformatörlere gerilim ölçme transformatörü (gerilim transformatörü), yüksek akım içeren sistemlerde ise

yüksek akımı daha düşük bir akıma indirgeyen transformatörlere ise akım ölçme transformatörü (akım transformatörü) adı verilir. Bu ölçü transformatörleri kayıp ve verimlilik dizaynları hata kat sayılarını belirleyen bir standart üzerine üretilir bu da doğruluk sınıfı (c1) değeri denir. En yaygın c1 değerleri 0.1- 0.2- 0.5- 1 ve 3 olarak kabul edilir [47] [48].

### 2.1.3.1 Akım Transformatörü

Elektrik devrelerinde akım birimleri ölçü aletlerine seri bağlanarak ölçülür. Bu ölçüleri gerçekleştirirken yüksek mertebedeki değerleri seri olarak bir ölçü aletinden geçirmek mantıklı olmaz ve kullanılan bir yöntem de değildir. Bu sebeple akım transformatörlerinin primerleri devreye seri bağlanarak transformatörlerin primer ve sekonder sargılarının tur sayıları ile akım ve gerilim değerleri arasındaki orantı özelliği kullanılır. Örneğin 1000 Amper değerindeki bir büyüklük 1000/5 oranında dizayn edilmiş bir akım trafosu kullanılarak sekonder tarafta 5 amper büyüklüğüne indirgenir [48]. Böylece akım ölçü aleti (ampermetre) 1000 amper mertebesinde büyüklüğü üzerine almadan, 0 ile 5 amper arasında bir akım değerine maruz kalarak, 0 ile 1000 amper arasındaki büyüklükleri ölçebilir hale gelir. Akım Transformatörleri genelde iki tip dizayna sahiptir. Birinci tip akım transformatörü Şekil 2.3 de gösterildiği gibi halka şeklindedir ve içerisinde sadece sekonder sargıyı barındırır, primer sargı halka akım transformatörünün içinden geçen ana akımı taşıyan kablodur. Akım transformatörünün içinden geçen kablo bir spir (tur) sayılır örnekte bahsedilen 1000/5 oranı için ise sekonder kısma 200 spir- 5 amper kaldıracak bir transformatör dizaynı yapılır.



Şekil 2.3 Akım transformatörü [21]

İkinci tip akım transformatörü ise Şekil 2.4’de gösterildiği üzere baralı tip akım transformatörüdür. Bu tip akım transformatöründe ana akımı taşıyan kablo bir halkadan geçirilmez primer sargısı bir bara şeklinde transformatörün içerisine yerleştirilmiştir. Böylece ana akımı taşıyan kablo baraya fiziksel olarak bağlanır ve devrenin devamı baranın diğer ucundan başka bir kablo ile bağlanarak seri bağlantı durumu devam ettirilir.



**Şekil 2.4** Baralı akım transformatörü

### **2.1.3.2 Gerilim Transformatörü**

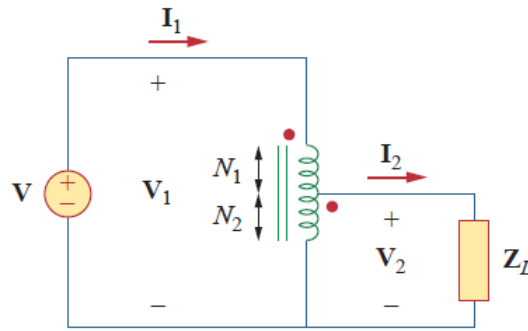
Gerilim ölçü transformatörleri (Şekil 2.5) de akım transformatörleri gibi ölçümleri kolaylaştırmak için tasarlanmış transformatör tiplerindedir. Gerilim ölçü transformatörleri primerde olan yüksek gerilim değerlerini ölçü aletlerinin kolaylıkla ölçebileceği fazladan izolasyon uygulaması yapmak zorunda bırakmayan düşük mertebede gerilim seviyelerine indirme işlemi yapmak için tasarlanmıştır. Primer tarafta 12 kV ya da 36 kV gibi yüksek gerilim taraflarını 100 V ile 120 V arasında bir gerilim değerine indirgeyerek ölçümlerin yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Gerilim ölçü transformatörleri de akım ölçü transformatörleri gibi kayıp ve verimlilik değerlerine bağlı olarak doğruluk sınıfına (cl) göre isimlendirilir. Genel itibariyle gerilim transformatörleri için kabul edilen cl değerleri; 0.2- 0.5- 1 ve 3' tür [49] [50].



Şekil 2.5 Gerilim transformatörü [23]

#### 2.1.4 Oto Transformatörler

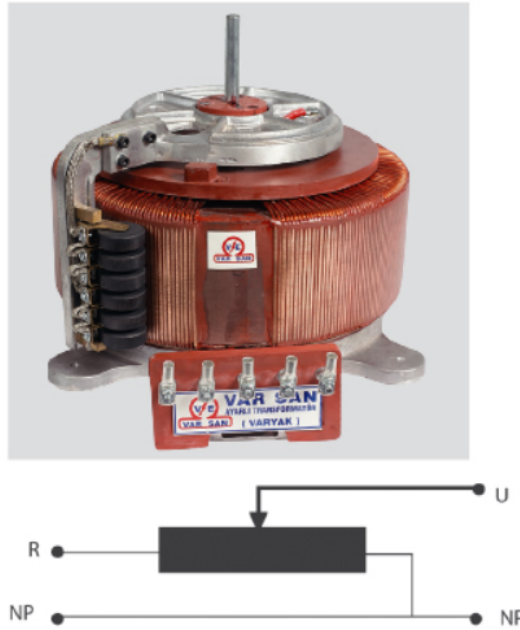
Oto transformatörleri yaklaşık 100 yıl önce güç sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Aynı sargı üzerinde primer ve sekonder gerilimleri birlikte ihtiva eder (Şekil 2.6). İzolasyonlu transformatörlerde primer gerilim ile sekonder gerilim arasındaki güç akışı magnetik olarak tamamlanırken oto transformatörlerde primer ve sekonder gerilim arasında elektriksel bir bağlantı söz konusudur. Bu bağlantı noktasına “tap” adı verilir. Genel olarak oto transformatörler güç sistemlerinde yükseltici (step-up) veya indirici (step-down) görevleri için tercih edilir. Özellikle varyak olarak adlandırılan oto transformatör tipi hareketli karbon parçaları sayesinde tek bir tip transformatörde karbon kolları hareket ettirerek hem indirici hem de yükseltici tipte çalışabilmektedir.



Şekil 2.6 Oto transformatör devre şeması

[23]

Oto transformatör kullanım tercihleri yapısal olarak izolasyonlu transformatörlere göre bazı avantajları ve dezavantajları beraberinde getirmektedir. Başlıca avantajları; küçük çekirdek boyutuna ihtiyaç duyar, daha düşük kayıplara sahiptir böylece daha verimli transformatörlerdir. Dezavantajlarından bahsedecek olursak, en tehlikeli dezavantajı tek bir sargı içerdiğinden ortak nokta sisteme direk bağlıdır bu sebeple de kısa devre anlarında yüksek kısa devre güçlerine ve streslerine maruz kalan bir yapıya sahiptir [45] [51]. Şekil 2.7’de varyak görseli mevcuttur.



Şekil 2.7 Varyak elektrik diagramı ve görseli

[8]

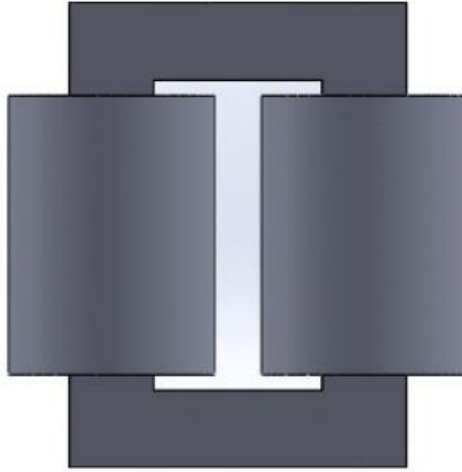
## 2.2 Yapılarına Göre Transformatörler

Transformatörler 19. yy’ dan beri hayatımızda olan makinelerdir. Bu sebeple yıllar içerisinde talebe göre yapısal farklılıklar içeren çok sayıda tip tasarımlara sahiptir. En çok tercih edilen tipleri ise çekirdek tip transformatörler ve mantel tip transformatörlerdir.

### 2.2.1 Çekirdek Tipi Transformatörler

Çekirdek tip (core-type) nüveler iki sargı grubunun sac nüve bacaklarına yerleştirilip boyunduruk (yorke) ile birbirine bağlanarak magnetik akı

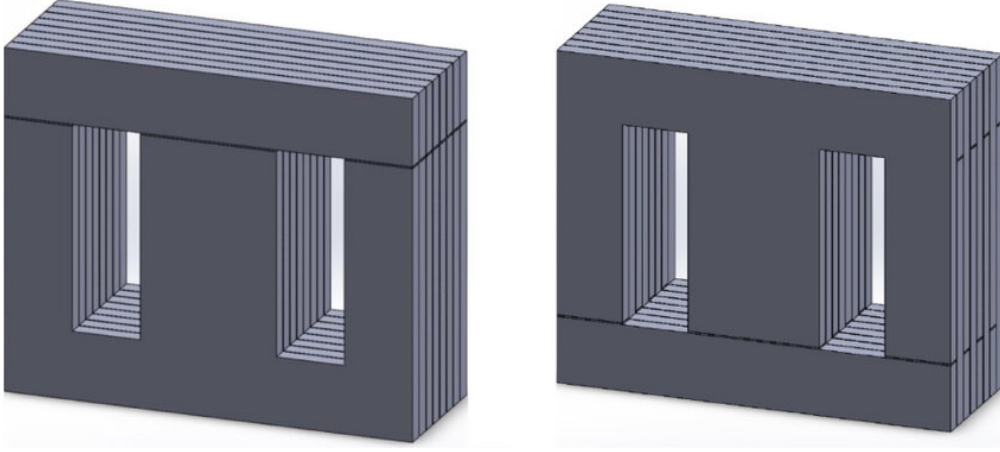
dolaşımının tamamlanmasıyla oluşur (Şekil 2.8). Kullanım şekli olarak primer sargı bir bacağa sekonder sargı diğer bacağa yerleştirilebilir ya da tel kesitleri paylaştırılarak aynı sargıya hem primer hem de sekonder sargı sarılıp iki tane özdeş sargı grubu oluşturulup bacaklara paralel dağıtılabılır. Aynı sac nüve kesiti ele alınırsa mantel tip nüve ile karşılaştırıldığında sargı boyu mantel tipe göre daha uzun olacaktır bu da sargının soğuması için daha fazla yüzey alanı oluşmasını sağlayacaktır. Çekirdek tip nüveler sargı yalıtımı için daha fazla yere sahip olmasından dolayı özellikle büyük güçlü transformatör tasarımı daha çok tercih edilir [52]. Büyük güçlü transformatörlerde mantel tipte bir sargı olduğundan dolayı tel kesiti yüksektir ancak çekirdek tip nüvelerde iki bacağa sargı kesiti paralel dağıtıldığında daha ince tel ile sargı mümkün olur ve sarım kolaylaşır. Ancak daha önemlisi alternatif akımlı sistemlerde deri etkisine (skin effect) bağlı kayıplar iletken kalınlığı ile doğru orantılıdır bunun sonucunda ince tel ile sarılmış sargılarda deri etkisi azaltılmış olur [53].



**Şekil 2.8** Çekirdek tipi transformatör

### 2.2.2 Mantel Tipi Transformatörler

Mantel tipi (shell-type) transformatörlerde magnetik nüve transformatör sargılarını çevreleyecek şekilde tasarlanır. (Şekil 2.9) Mantel tip nüvede bir sargı nüvenin merkezine yerleştirilir. Primer ve sekonder sargılar tek bir gövdeye sarılır. Çekirdek merkezinin kesiti sargı bulunmayan bacakların iki katı büyüklüğündedir. Oluşturulan magnetik akı iki bacağa dağılarak boyunduruk üzerinden magnetik devresini tamamlar [54].



Şekil 2.9 Mantel tipi transformatör [30]

## 2.3 Faz Sayısına Göre Transformatörler

### 2.3.1 Bir Fazlı Transformatörler

Bir fazlı transformatörler sargı uçlarına bir faz gerilimin uygulandığı transformatörlerdir. Primer ve sekonder sargılar nötr noktasına göre değer alırlar. Bir fazlı transformatörlerin kullanım alanları çok geniştir ancak en yoğun kullanım alanları düşük güçlü sistemlerde kullanılır. Kısaca kullanım alanlarına elektronik devreler, evler, aydınlatma sistemleri, basit elektriksel uygulamalar diyebiliriz. Şekil 2.10’da bir fazlı transformatör görseli mevcuttur.



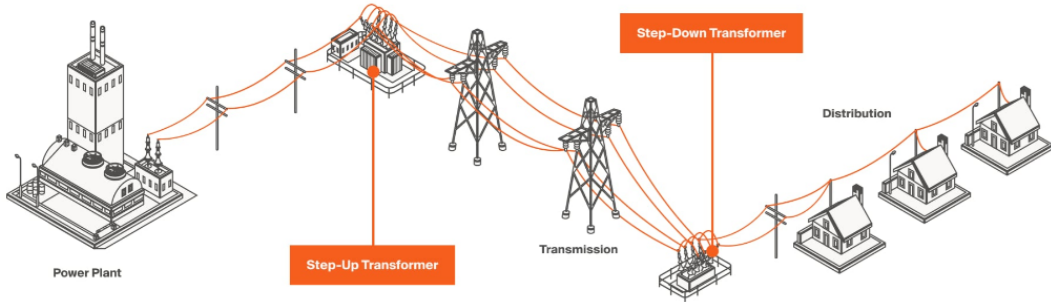
Şekil 2.10 Bir fazlı transformatör [24]

### 2.3.2 Üç Fazlı Transformatörler

Üç fazlı transformatörler (Şekil 2.11) faz sayısına göre en çok kullanılan transformatör tiplerinin başında gelir. Elektrik üretim tesislerinde üretilen elektrik enerjisi öncelikle üç fazlı transformatörler yardımıyla yüksek gerilimlere evrilir. Özellikle güç sistemleri, dağıtım sistemleri ve iletim sistemlerinde üç faz transformatörler kullanılır (Şekil 2.12). Üç adet primer ve üç adet sekonder sargı grubu ihtiva eder. Bu sargıların bağlantı şekilleri kullanım alanlarına göre farklılık gösterir. En sık kullanılan sargı bağlantı şekillerinin başında yıldız, üçgen ve zigzag tipi bağlantılar gelmektedir [55].



Şekil 2.11 Üç fazlı transformatör [25]



Şekil 2.12 Yükseltici transformatör- alçaltıcı transformatör [27]

## BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLERİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

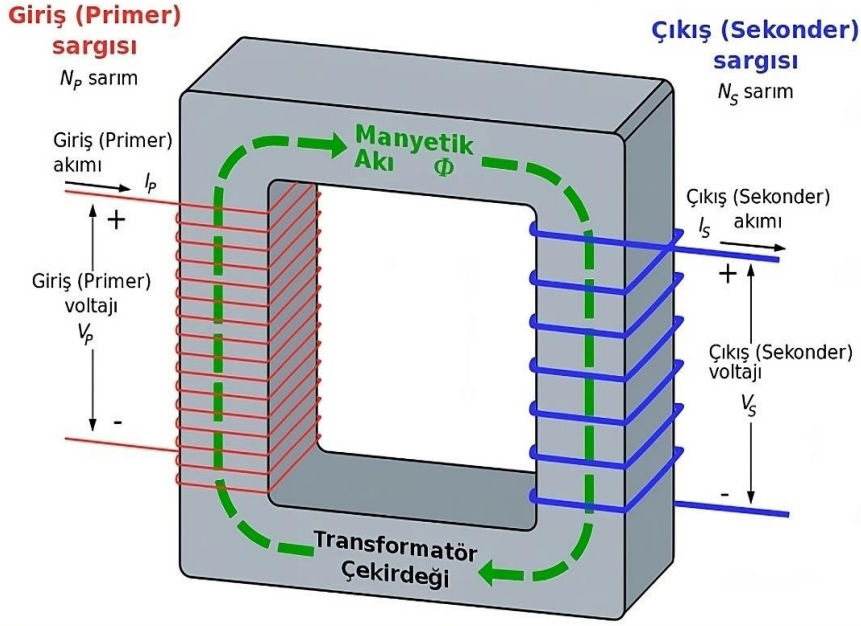
---

### 3.1 Çalışma Prensibi

Transformatörlerin primer sargılarına alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargı üzerinden geçen akım değişken bir magnetik alan oluşturur. Bu magnetik alan, üzerinde sekonder sargıların da bulunduğu magnetik demir nüve üzerinden devresini tamamlar. Primer sargıya uygulanan alternatif gerilimin zamanla yön ve şiddetinin değişmesi, magnetik alanın da sürekli olarak yön ve şiddet değiştirmesine neden olur. Oluşan bu değişken magnetik alan, sekonder sargılarla etkileşime geçerek bu sargılarda alternatif bir gerilimin indüklenmesine yol açar [10] [11].

Transformatörlerin temel çalışma prensibi, düşük magnetik dirence (relüktans) sahip bir magnetik devre üzerinde oluşan ortak magnetik akı aracılığıyla, iki devre arasında karşılıklı magnetik bağ kurulmasına dayanır [9] [10].

Bu prensip, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, transformatörün magnetik çekirdek üzerinden enerji aktarımını mümkün kılar. Primer sargıya, doğru gerilim uygulandığında ise bir magnetik alan oluşur, ancak bu magnetik alan sabittir. Sabit magnetik alan, zamana bağlı olarak yön veya şiddet değiştirmez. Bu nedenle, sekonder sargılarda bir elektromotor kuvvet (EMK) indüklenmesi gerçekleşmez [57]. Alternatif gerilim ile doğru gerilim arasındaki bu fark, transformatörlerin yalnızca alternatif akımla çalışabilmelerinin temel nedenidir.



**Şekil 3.1** Bir fazlı transformatörün magnetik devre diyagramı [11]

### 3.2 Elektriksel Modellenmesi

İdeal bir transformatör, primer ve sekonder sargılar arasında enerji aktarımını tamamen kayıpsız bir şekilde gerçekleştiren teorik bir modeldir. Yukarıdaki devre, ideal bir transformatörün temel çalışma prensibini ve elektriksel ilişkilerini göstermektedir. İdeal transformatör modelinde sargılarda direnç kaybı, çekirdek malzemesinde magnetik kayıplar (histerezis veya girdap akımları) ve magnetik sızıntılar bulunmaz. Tüm enerji, magnetik akı yoluyla primerden sekondere aktarılır [45].

**Primer Tarafı:** Primer sargıya uygulanan alternatif gerilim ( $V_{Pr}$ ), primer sargısında primer akım ( $I_{Pr}$ ) ve bununla birlikte de bir magnetik akı oluşmasına sebebiyet verir. Bu akı, magnetik çekirdek üzerinden sekonder sargıya aktarılır. Primer sargıda indüklenen elektromotor kuvvet (EMK),  $E_{Pr}$  ile gösterilmiştir. Sargıların sarım oranı  $N_{Pr} : N_{Sec}$  şeklindedir.

**Sekonder Tarafı:** Sekonder sargıda oluşan magnetik akı, sekonderde bir gerilim ( $V_{Sec}$ ) indükler. Bu gerilim, sekonder sargıdan geçecek bir akım ( $I_{Sec}$ ) oluşturur. Enerji böylelikle primer kısımdan sekonder kısma aktarılmış olur.

Sekonderde indüklenen elektromotor kuvvet (EMK),  $E_{Sec}$  ile ifade edilir.

Matematiksel İlişkiler:

Gerilim ile sargı sarım sayısı ve akım arasındaki ilişki:

$V_{Pr}$  ile  $N_{Pr}$  doğru orantılı  $I_{Pr}$  ile ters orantılıdır.

$V_{Sec}$  ile  $N_{Sec}$  doğru orantılı  $I_{Sec}$  ile ters orantılıdır.

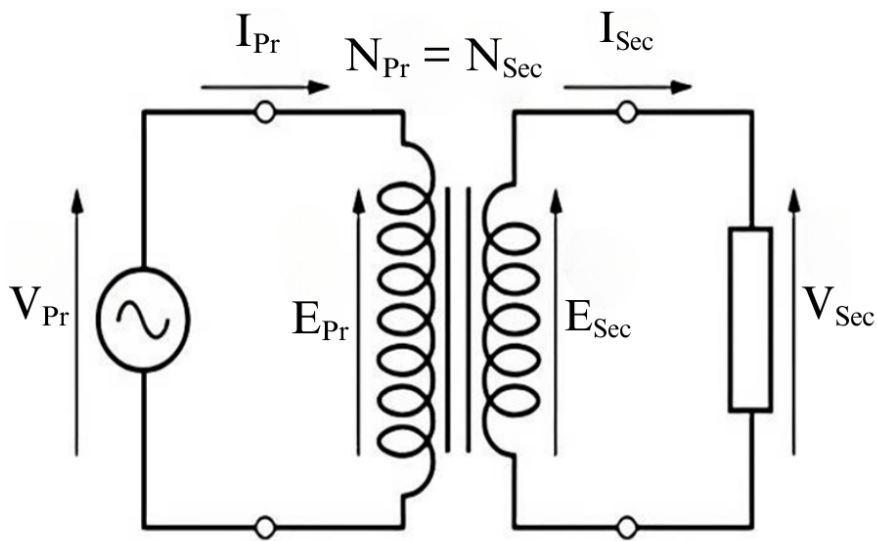
Güç korunumunun sağlanması:

$S_{Pr} = S_{Sec}$  (Primer gücü = Sekonder gücü) (kayıplar göz ardı edildiğinde)

Gerilim, Akım ve Sarım Sayısı arasındaki genel bağıntı şöyle ifade edilir;

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.1)$$

Bu ideal modelde (Şekil 3.2), primerdeki enerji tamamen sekondere aktarılır [29]. Gerilim ve akımlar arasındaki bu ilişkiler, transformatörün yük ve güç dağılımındaki davranışını anlamak için kritik bir temel oluşturur. İdeal transformatör modeli, gerçek transformatörlerin analizinde bir referans noktası sağlar ve enerji kayıplarını minimize etmek için kullanılan tasarımların teorik temelini oluşturur.



Şekil 3.2 İdeal transformatör

### 3.3 Transformatör Kayıpları

Transformatör kayıpları, enerji dağıtım sistemlerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu kayıplar, elektrik enerjisinin dönüşüm sürecinde meydana gelir ve transformatörün verimliliğini doğrudan etkiler. Transformatörlerdeki kayıplar iki ana kategoriye ayrılır: demir kayıpları (çekirdek kayıpları) ve iletken kayıpları (sargı kayıpları) [32]. Ayrıca, kaçak akı ve harmoniklerden kaynaklanan ek kayıplar da dikkate alınabilir. Toplam kayıpların doğru bir şekilde hesaplanması ve yönetilmesi, enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir öneme sahiptir.

Transformatör kayıplarını genel anlamda dört temel başlıkta inceleyebiliriz. Bunlar; demir kayıpları, iletken kayıpları, kaçak akı kayıpları ve izolasyon kayıpları [13].

#### 3.3.1 Demir Kayıpları

Demir kayıpları genel olarak iki başlık altında incelenir. Bunlar Histerezis Kayıpları ve Eddy kayıplarıdır [26] [40].

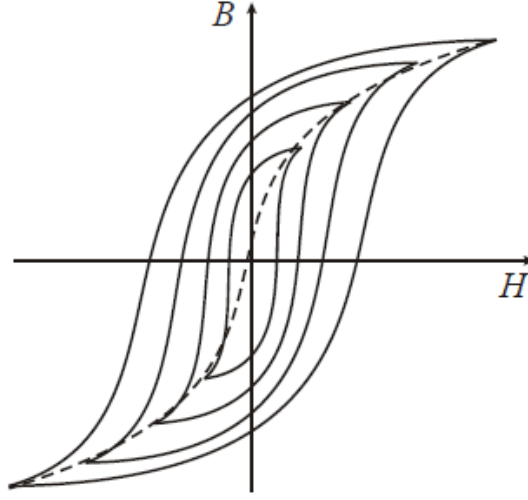
$$P_{Fe} = P_h + P_e \quad (3.2)$$

##### 3.3.1.1 Histerezis Kayıpları

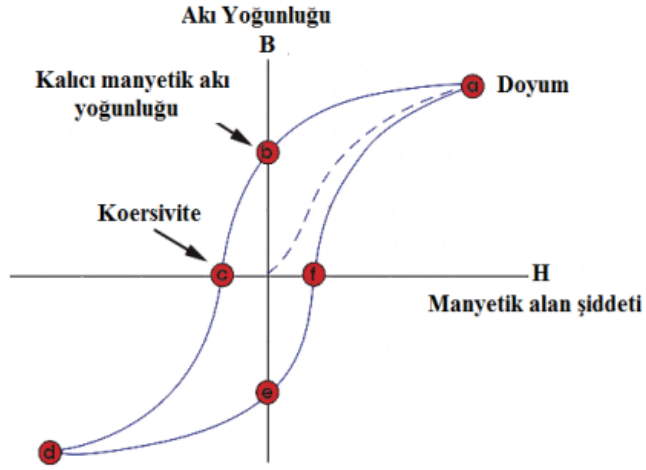
Histerezis kayıpları, magnetik alanın yön değiştirmesi sırasında çekirdek malzemesinin magnetik özelliklerinin değişmesi sonucu oluşur. Çekirdek malzemenin içerisinde molekül parçacıkların kendi arasındaki sürtünmeleri sonucunda meydana gelen kayıplardır [12] [35] [36].

Bu kayıplar aşağıdaki formül ile ifade edilir. Bu formülde B: Magnetik Akı Yoğunluğu,  $\eta$ : Malzeme Sabiti, n: (1,6 <n<2), f: Frekans,  $p_h$ : Histerezis Kaybını ifade etmektedir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de Histerezis döngüleri çizimi mevcuttur.

$$p_h = \eta B^n f \quad (3.3)$$



Şekil 3.3 Histerezis döngüleri çizimi



Şekil 3.4 Histerezis döngüleri çizimi [26]

### 3.3.1.2 Eddy (Fuko) Girdap Akımı Kayıpları

Eddy akım kayıpları, magnetik akının çekirdek içinde döngüsel akımlar indüklemesi sonucu oluşur. Bu akımlar, çekirdek içinde çekirdeğin direncinden geçerken oluşacak ısı sebebiyle ortaya çıkan enerji kaybına neden olur. Eddy akım kayıpları, çekirdek malzemesinin elektriksel öz direnci ( $\rho$ ), laminasyon kalınlığı ( $d$ ), frekans ( $f$ ) ve magnetik akı yoğunluğu maksimum değerine ( $B_m$ ) bağlıdır. Bu kayıplar şu formülle ifade edilir [9]:

$$p_e = \frac{\pi^2 d^2}{6\rho} f^2 B_m^2 10^{-16} \text{ Watt} \quad (3.4)$$

### 3.3.2 İletken Kayıpları

İletken kayıpları, transformatör sargılarında elektrik akımının iletkenin direnci üzerinde oluşturduğu enerji kaybıdır. Bu kayıpları basitçe ifade edersek kısa devre yapılmış sekonder sargı durumunda primer sargıdan nominal akım geçirdiğimizde her iki devrede geçecek nominal akımın karesi ile bu sargıların iç dirençlerinin çarpımlarının toplanması miktarınca oluşan kayba toplam iletken kaybı denilir. Formül şekil aşağıda olduğu gibidir [13].

$$P_{il} = I_{Pr}^2 R_{Pr} + I_{Sec}^2 R_{Sec} \quad (3.5)$$

### 3.3.3 Kaçak Akı Kayıpları

Kaçak akı kayıplarını sargıların sebep olduğu kaçak akı kayıpları ve transformatörün yapısal parçaların sebep olduğu kayıplar diye iki gruba ayırabiliriz. Bu tip kayıplar transformatörün tasarımından veya çalışma ortamındaki mevcut koşullardan meydana gelmektedir [14].

### 3.3.4 İzolasyon Kayıpları

Transformatörlerde izolasyon kayıpları yalıtım malzemelerinin elektriksel direncinin başlangıç tasarımında hatalı seçimi, çalışma koşullarında oluşan aşırı ısınma, kazan içindeki yağın farklılaşması yahut başka kimyasal sebeplerin sonucunda meydana gelen hasarlar gibi sıralayabiliriz. Hülasa, genel olarak izolasyonun bozulması ile ortaya çıkan kayıplardır. Dikkat edilmesi gereken kayıplardır, bazen göz ardı edilse de uzun süreli çalışmalarda büyük hasarlara sebep olur [15].

## 3.4 Ana Materyaller

### 3.4.1 Silisli Sac

Silisli sac, transformatör çekirdeklerinde düşük magnetik kayıplar ve yüksek enerji verimliliği sağlamak amacıyla kullanılan bir malzemedir. Demir ve belirli bir oranda (%3) silisyum atomu içeren bu alaşım, özellikle magnetik ve elektriksel özellikleri optimize edilmiş bir yapı sunar. Silisyumun magnetik malzemeye eklenmesi, demirin elektriksel iletkenliğini düşürerek girdap akımı kayıplarını sınırlandırır ve histerezis kayıplarını önemli ölçüde azaltır;

magnetik alan değişimi sırasında çekirdek malzemesinin enerji kaybetme eğilimini düşürmesi transformatörlerin enerji verimliliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir [31] [35] [37] [38] [41].

Bununla birlikte, silisin yüksek oranlarda kullanılması çeliğin kırılmasını artırarak, levha üretimini zorlaştırır. Silis içeriği, magnetik çeliklerin magnetik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle %6 silis içeriğine sahip çeliklerde, magnetostriksiyon kaybolur. Magnetostriksiyon, magnetik alan uygulandığında malzemenin boyutlarında meydana gelen değişiklikleri ifade eder. Magnetostriksiyon, alternatif akım frekanslarında transformatörlerde gürültüye yol açabilen bir olgudur, bu yüzden bu özellik kaybı üretimde istenmeyen bir durum yaratabilir. Alternatif akım frekanslarında bu özellik, transformatörlerde gürültüye yol açabilir, çünkü magnetostriksiyon malzemenin şekil değiştirmesine neden olarak titreşim ve ses üretir. Ancak %6 silis içeriğinde magnetostriksiyonun kaybolması, bu tür gürültülerin önüne geçerken, aynı zamanda malzemenin magnetik performansını da etkileyebilir. Bu durum, silisin oranı arttıkça çeliğin işlenebilirliğini ve magnetik özelliklerini dengelemek için dikkatli bir seçim yapılmasını gerektirir. Yüksek silis içeriği, magnetik kayıpları azaltabilirken, kırılma ve işlenebilirlik gibi diğer faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerektiği ortaya çıkmaktadır [40].

Silisli sacdan yapılan çekirdek malzemesi laminasyon levhalardan kesilir. Genellikle güç trafoları için popüler kalınlık aralığı 0,23 mm ila 0,35 mm'dir. Küçük trafolarda kullanılan laminasyon kalınlığı 0,50 mm kadar yüksek olabilir. İnce laminasyonlar, girdap akımı kayıplarını azaltırken enerji kaybını daha da düşürür. Laminasyon levhaları arasındaki elektriksel izolasyon, organik reçineler veya fosfat bazlı malzemelerle sağlanarak magnetik alanın düzgün bir şekilde yayılmasını destekler ve kayıpları minimize eder [57].

Silisli sac, enerji sistemlerinde kullanılan transformatörlerin güvenilirliğini ve performansını artırmak için gerekli bir malzemedir. Özellikle güç ve dağıtım transformatörlerinde, enerji kayıplarını en aza indirir. Çekirdek kayıplarını sınırlandıran özellikleriyle, silisli sac modern enerji sistemlerinde verimli, dayanıklı ve ekonomik bir çözüm sunar.

Bu nedenle, transformatör tasarımında silisli sac kullanımı hem teknik hem de ekonomik açıdan stratejik bir öneme sahiptir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da silisli sac görselleri mevcuttur.



**Şekil 3.5** E-I Tipi kesilmiş silisli sac



**Şekil 3.6** Rulo yapıdaki silisli sac

### **3.4.2 İletken Yapılar**

Transformatör tasarımında iletken seçimi, enerji verimliliği, maliyet, mekanik dayanım ve uzun ömür açısından önemlidir. İletken malzeme, sargılarda meydana gelen iletken kayıplarını ve transformatörün genel performansını doğrudan etkiler. Bakır ve alüminyum, transformatörlerde yaygın olarak kullanılan iletken malzemelerdir ve her ikisi de kendine özgü avantajlara sahiptir.

### 3.4.2.1 Bakır İletken

Bakır (Şekil 3.7), yüksek iletkenlik ve mekanik dayanıklılık özellikleri sayesinde transformatörlerde en çok tercih edilen sargı malzemesidir. Bakırın özgül ağırlığı  $8,94 \text{ g/cm}^3$ , erime sıcaklığı  $1085^\circ\text{C}$  [38], bakır iletkenin ısıyı dağıtma yeteneğine gelince  $401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 'dır [56]. Bakırın elektrik direnci  $20^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $16,78 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$  olup, alüminyuma göre daha düşük direnç gösterir.

Mekanik olarak, çekme dayanımı  $240\text{-}450 \text{ kg/mm}^2$  aralığında değişir ve yüksek elastisite modülü ( $120 \text{ kN/mm}^2$ ) ile dikkat çeker. Bu özellikler, bakır kısa devre dayanımı ve uzun süreli güvenilirlik açısından üstün kılar. Aynı zamanda, bakır oksitlenmeye karşı daha dirençlidir ve termal genleşme katsayısının ( $16,5 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) düşük olması sayesinde bağlantı noktalarında gevşeme olasılığını azaltır.

### 3.4.2.2 Alüminyum İletken

Alüminyum, hafifliği ve uygun maliyeti nedeniyle ekonomik projelerde yaygın olarak kullanılır. Alüminyumun özgül ağırlığı  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olup, bu değer bakırın yaklaşık üçte biri kadardır. Ergime sıcaklığı  $660^\circ\text{C}$  [38] [39], ısı iletkenliği yaklaşık  $237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  [56] ve iletkenlik oranı %61-62 olarak ölçülmüştür. Elektrik direnci ise  $20^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $26,50 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$  seviyesindedir ve bu durum, aynı akımı taşımak için bakırdan yaklaşık 1,6 kat daha büyük kesit gerektirir. Mekanik olarak, alüminyumun çekme dayanımı  $80\text{-}180 \text{ kg/mm}^2$  aralığındadır ve elastisite modülü ( $70 \text{ kN/mm}^2$ ) daha düşüktür. Bu durum, alüminyumun termal genleşme katsayısının ( $23,1 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) yüksek olmasıyla birleştiğinde, bağlantılarda gevşeme ve oksitlenme riskini artırır. Yine de düşük yoğunluğu sayesinde büyük boyutlu ve taşınabilir transformatörlerde ağırlık avantajı sağlar.

Bu özellikler, bakırın yüksek verimlilik, dayanıklılık ve uzun ömür açısından; alüminyumun ise hafiflik ve maliyet tasarrufu yönünden avantaj sağladığını göstermektedir.

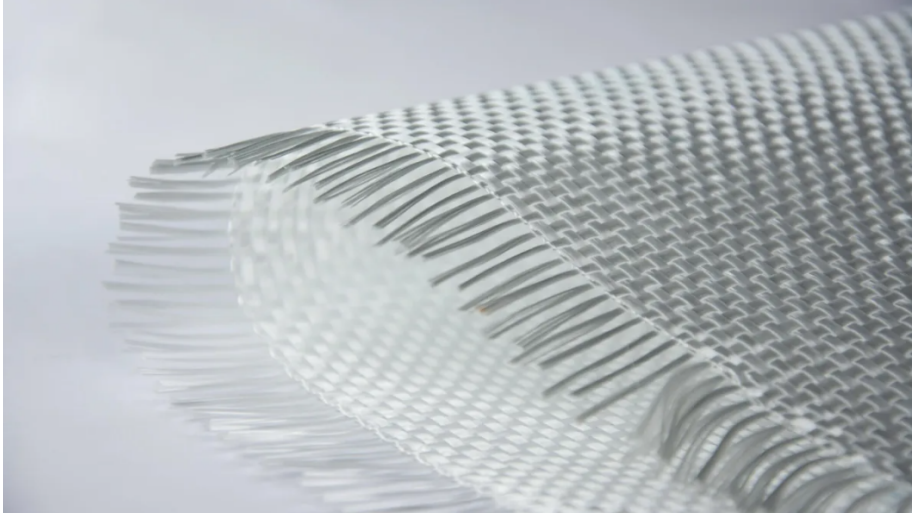


**Şekil 3.7** Bobin iletken tel

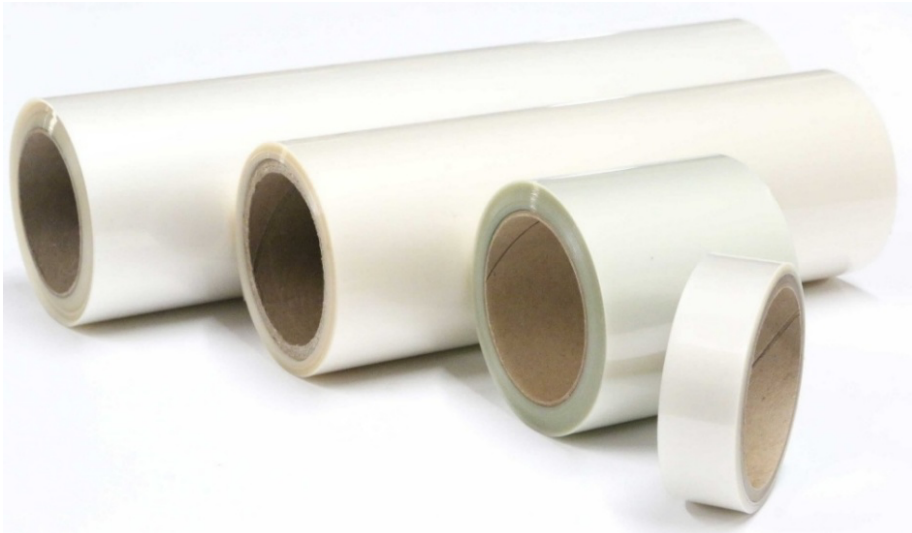
### **3.4.3 İzolasyon Malzemeleri**

Transformatörlerde kullanılan izolasyon malzemeleri, transformatörlerin güvenliğini, dayanıklılığını ve performansını doğrudan etkiler. Bu malzemeler, elektriksel, termal ve mekanik özelliklerin korunmasında kritik bir rol oynar. Aynı zamanda, sargılar arasında ve sargılar ile magnetik çekirdek arasında sağlam bir yalıtım sağlayarak kısa devre ve arıza risklerini minimuma indirir. Transformatörlerde yaygın olarak kullanılan izolasyon malzemeleri arasında epoksi reçineler (Şekil 3.11), pres bant, poliamid folyolar, polyester filmler (Şekil 3.9) ve fiberglass gibi malzemeler bulunur. Bu malzemeler, yüksek elektriksel dayanıklılık, termal direnç ve çevresel koşullara karşı koruma sunmak üzere geliştirilmiştir. Örneğin, epoksi reçine genellikle transformatör sargılarının kaplanmasında kullanılır ve sargıların mekanik olarak sabitlenmesine ve dış etkenlerden korunmasına olanak tanır. Aynı zamanda, yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapısı sayesinde transformatörlerin güvenilirliğini artırır ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Pres bant ve poliamid folyolar (Şekil 3.10) ise sargılar arasında elektriksel yalıtım sağlamak amacıyla tercih edilir. Bu malzemeler, yüksek dielektrik dayanımına ve ısıya karşı dirence sahiptir. Bunun yanında, polyester film hem esnek hem de dayanıklı

yapısıyla transformatör sargıları arasında ince bir yalıtım tabakası olarak kullanılır. Fiberglass (Şekil 3.8) ise mekanik dayanıklılığı ve yüksek sıcaklığa karşı direnci ile özellikle transformatörlerin sabitlenmesi gereken bölgelerde veya yüksek sıcaklık ortamlarında öncelikli olarak tercih edilir. Bu izolasyon malzemeleri, yalnızca elektriksel özellikler bakımından değil, aynı zamanda çevresel faktörlere karşı dayanıklılık açısından da önem taşır. Nem, toz ve kimyasallara karşı yüksek direnç göstermeleri, bu malzemeleri özellikle endüstriyel ve dış mekan uygulamaları için uygun hale getirir.



**Şekil 3.8** Fiberglass



**Şekil 3.9** Polyester film



**Şekil 3.10** Poliamid folyo



**Şekil 3.11** Vernik kaplı transformatör

## ÇALIŞMADAKİ BİR FAZLI TRANSFORMATÖRLERİN MATEMATİKSEL İFADELERİ VE HESAPLAMALARI

---

### 4.1 Ölçülerin Belirlenmesi İçin Kullanılacak Matematiksel İfadeler

Bu çalışmada, dört farklı bir fazlı transformatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Her bir transformatör 1200 VA gücünde olup, primer gerilimi 230 V, sekonder gerilimi ise 230 V olarak belirlenmiştir. Tasarlanan transformatörlerden ilki mantel tip ve bakır sargılı, ikincisi mantel tip ve alüminyum sargılıdır. Üçüncü transformatör çekirdek tip ve bakır sargılı, dördüncüsü ise çekirdek tip ve alüminyum sargılı olarak tasarlanmıştır.

Bu bölümde, transformatör tasarımında kullanılan hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Akım, sarım sayısı ve nüve kesiti gibi temel parametrelerin hesaplanma süreçleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Hesaplamalar sırasında her bir transformatörün özelliklerine uygun formüller ve yöntemler kullanılarak, optimal tasarım kriterlerine ulaşılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda transformatörlerin primer gerilimleri, sekonder gerilimleri, tüm transformatörlerin görünen güçleri, primer akımları, sekonder akımları, magnetik akı yoğunluğu değeri, tipler arası sac kesit miktarları, tipler arası sarım sayıları ve iletkenlerin tipler arası akım yoğunlukları eşit kabul edilerek tasarım yapılmıştır.

Tasarım sürecinde yapılan bu hesaplamalar ve kullanılan yöntemler, transformatörlerin güvenilir, verimli ve belirlenen tasarım kriterlerine uygun şekilde çalışmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

$$I_{Pr} = \frac{S}{V_{Pr}} \quad (4.1)$$

Primer akımı, transformatörün primer tarafındaki gücün primer gerilimine bölünmesiyle elde edilir. Burada S, transformatörün nominal gücünü (VA cinsinden) ifade ederken,  $V_{Pr}$ , primer tarafındaki uygulanan gerilimdir. Bu formül, primer tarafında akacak elektrik akımını bulmak için kullanılır.

$$I_{Sec} = \frac{S}{V_{Sec}} \quad (4.2)$$

Sekonder akımı, transformatörün sekonder tarafındaki gücün sekonder gerilimine bölünmesiyle bulunur. Burada S, transformatörün nominal gücünü temsil ederken,  $V_{Sec}$ , sekonder taraftaki gerilimdir. Bu hesaplama, sekonder sargılarındaki akımın büyüklüğünü belirlemek için kullanılır.

$$S_{il} = \frac{I}{j} \quad (4.3)$$

Tel kesiti ( $S_{il}$ ), iletken üzerinden geçen akımın (I) kullanılan malzemenin izin verilen akım yoğunluğuna (j) olan oranı ile hesaplanır. j, tasarımın güvenliğini ve verimliliğini sağlayan bir tasarım parametresidir ve genellikle sabit bir değerdir. Bu formül, sargılarda kullanılacak telin kesit alanını belirler.

$$D_{il} = \sqrt{\frac{S_{il}}{\pi}} \times 2 \quad (4.4)$$

Telin çapı ( $D_{il}$ ), kesit alanından ( $S_{il}$ ) türetilir. Bu formül, telin dairesel kesitli olduğu varsayılarak hesaplanır. Kesit alanının dairenin alan formülüyle ( $\pi r^2$ ) ilişkilendirilmesiyle elde edilir. Telin fiziksel çapını belirlemek için kullanılır.

$$S'_{Fe} = \sqrt{S} \quad (4.5)$$

Transformatör nüvesinin paket alanı belirlenirken tasarımda başlangıç fikri vermesi adına gücün büyüklüğünün karekökü alınarak başlanır. Tasarıma böyle başlanmasındaki temel amaç tasarım kolaylığı açısından nüvenin kare olabileceği kabulüne dayanır. Buradaki verilerin ışığı altında nüve kesitinin yaklaşık ölçüleri belirlenir. Asıl ölçü belirlenmesi ise 4.7 denklemindeki demir kesit sarım ( $N \times S_{Fe}$ ) büyüklüğü ile ortaya çıkar. Pakete sarılabilecek sarım

sayısı ve sacın magnetik akı taşıma kapasitesine bağlı tasarıma izin veren magnetik akı yoğunluğu değerini aşmayacak şekilde nüve kesiti denklemden çıkarılarak transformatörün kullanılacak iletken ve sac miktarı net olarak ortaya konmuş olacaktır.

$$S_{Fe} = k \times S_{Fe}'' \quad (4.6)$$

4.7 denklemindeki net sac kesit alanı ( $S_{Fe}$ ) ise hesaplamalara başlamadan önce 4.6 denkleminde belirtilen formül göz önüne alınarak sıkıştırma katsayısı ile çarpılarak bulunur. Bu değer literatürde 0,96 olarak kabul görmüştür [58]. Transformatörün ince silisli sacları her ne kadar aralarında boşluk kalmayacak şekilde paketleme esnasında sıkıştırılsa da gerek sacın izolasyon kaplamalarının kalınlıkları gerek ise göz ile algılanamayan hava boşlukları neticesinde net kesit için bu sabit hesaplamalara katılmıştır.

$$N = \frac{V}{4,44 \times S_{Fe} \times f \times B \times 10^{-8}} \quad (4.7)$$

Sarım sayısı, primer tarafta sacın magnetik akı yoğunluğu taşıma kabiliyetine göre seçilen değer ile indüklenecek gerilim, bu kabiliyeti sınır dışı etmeyecek bir demir kesit ve uygulanacak alternatif gerilimin frekansı ile belirlenir. Burada B, magnetik akı yoğunluğudur ve  $S_{Fe}$ , nüve kesit alanıdır. Bu formül, transformatörün magnetik tasarımını optimize eder.

$$N_k = \left( \frac{C}{D_{iz}} \right) - 1 \quad (4.8)$$

Bir kattaki sarım sayısı ( $N_k$ ), karkasın iç genişliği (C) ile telin izolasyonlu çapına ( $D_{iz}$ ) bağlıdır.  $D_{il}$  ile  $D_{iz}$  arasındaki bağıntı kullanılan telin üretici kataloğundaki değeri esas alınarak kurulur [59]. Üreticilerin talebe göre kullandığı grade değerleri izolasyonun kalınlık miktarını belirler. Yukarıdaki 4.7 formülünde ise bir kat boyunca düzenli şekilde sarılabilecek tel sayısı hesaplanır.

$$\frac{N}{N_k} = k_s \quad (4.9)$$

Bu katsayısı ( $k_s$ ), karkasa sarılacak telin kaç kat sarılacağını gösterir. Primer

sargının toplam sahip olduğu kat sayısı  $k_{s-P}$  ve sekonder sargının sahip olduğu toplam kat sayısı ise  $k_{s-S}$  olarak tanımlanır.

$$C_{ilk-P} = [(a_1) + (b_1)] \times 2 \quad (4.10)$$

Primer sargının ilk çevresi ( $C_{ilk-P}$ ), nüvenin ilk sargı uzunluğunun kat edeceği en  $(a_1)$  ile paket boyu uzunluğuna bağlı olan mesafe  $(b_1)$  dikkate alarak hesaplanır

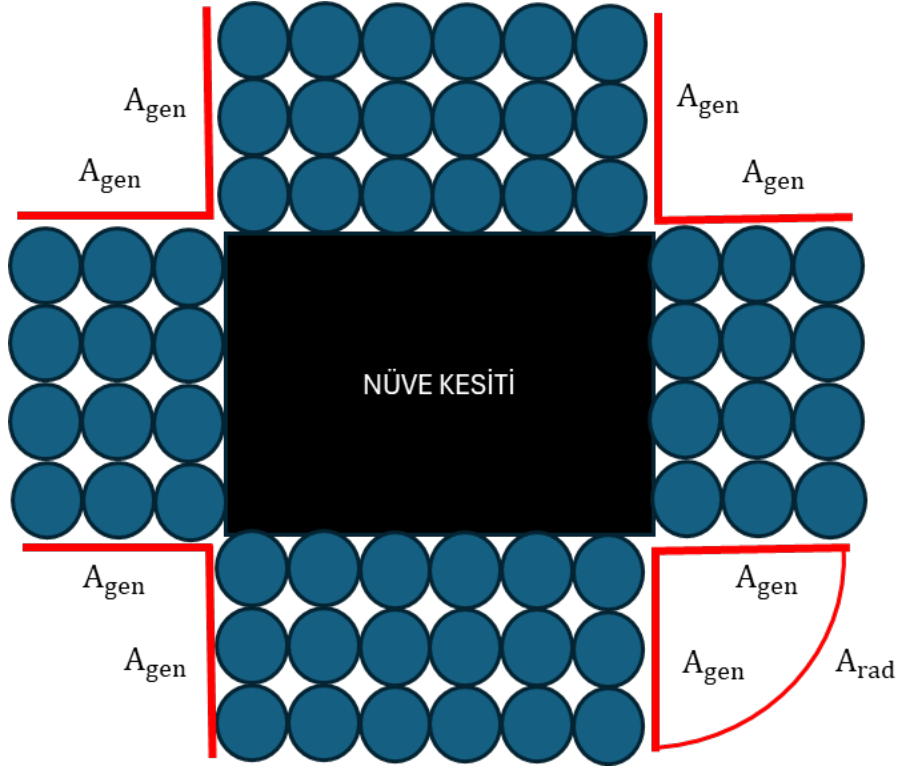
$$A_{gen} = D_{iz} \times (k_s - 1) \quad (4.11)$$

$$A_{rad} = \frac{2\pi A_{gen}}{4} \quad (4.12)$$

Sargının çıkılacak kat sayısı, iletkenin izolasyonlu çapı ile çarpımı kadar son çevrenin genişleyeceği matematiksel bir gerçekliktir. Her sargı katının iletken uzunluğu bir önceki sargı katının uzunluğunun 8 kat izolasyonlu tel çapının toplamı kadar uzar. Bu sebeple de son katın çevre uzunluğu toplam kat sayısının bir eksiği kadar uzun olacaktır. Ancak iletkenin sac nüveye sarılması tam bir dikdörtgen şekilde olmayacağından Şekil 4.2’de gösterildiği gibi telin dönüş durumlarında köşeler düz değil yay şeklinde olacağından mütevellit çevre uzunluğunun 4 adet  $A_{rad}$  kadar uzayacağı kabulünde bulunmak tel uzunluğunun gerçek uzunluğunu hesaplama konusunda daha gerçekçi bir işleme ulaşım sağlayacağı ortadadır.

$$C_{son-P} = C_{ilk-P} + (2\pi \times A_{rad}) \quad (4.13)$$

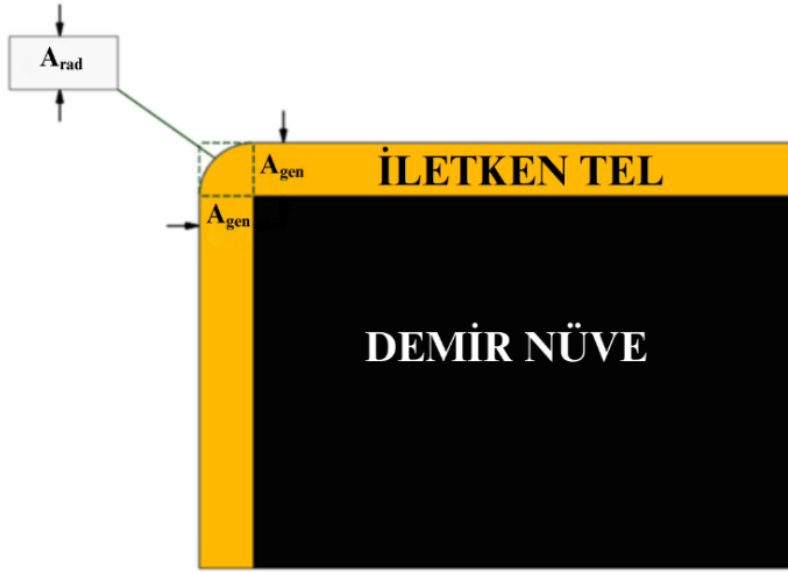
Primer sargısının son çevre uzunluğu ( $C_{son-P}$ ), tel genişliğinin etkisi  $(2\pi \times A_{rad})$  hesaba katılarak elde edilir. Bu çevre, sarımın tamamlandığı noktadaki fiziksel boyutu ifade eder.



Şekil 4.1 Nüve ve iletken tel kesiti

$$C_{ort-p} = \frac{C_{ilk-p} + C_{son-p}}{2} \quad (4.14)$$

İlk ve son çevrenin ortalaması alınarak primer ortalama çevre ( $C_{ort-p}$ ) hesaplanır. Bu çevre, telin ortalama uzunluğunu belirlemek için kullanılır. Ancak köşeler  $A_{gen}$ 'de belirtildiği gibi net dönüşler yerine  $A_{rad}$  diye adlandırılan yay şeklinde olmaktadır (Şekil 4.1). Bu dönüş hareketi de telin boyunu kısaltmakta aynı zamanda tel direncini de etkilemektedir.



**Şekil 4.2** Tel sarımı sırasında oluşan radüs

$$l_{il-P} = C_{ort-P} \times N \quad (4.15)$$

$$l_{il-P} = (C_{ort-P} \times (N + N_{ek})) - (N_{ek} \times C_{son-P}) \quad (4.16)$$

Primer telin toplam uzunluğu son kat sargısının sac nüvenin sonuna kadar sarılacak şekilde bitmesi durumunda, ortalama çevre ( $C_{ort-P}$ ) ile sarım sayısının ( $N$ ) çarpımı kadardır. Ancak bu çalışmada son kat sargısı nüvenin bitiş noktasından önce bittiği için uzunluk hesaplamasında ortalama çevre ( $C_{ort-P}$ ) ile nüvenin katının bitmesi için eklenecek sarım sayısı ( $N_{ek}$ ) toplam sarım sayısına ( $N$ ) eklenerek çarpılır ve daha sonra eklenen sargı sayısı ( $N_{ek}$ ) son kat çevre uzunluğu ( $C_{son-P}$ ) ile çarpılır ve bu ifadeden çıkarılır.

$$R_{il-P} = \frac{l_{il-P} \times 10^{-3}}{\kappa \times S_{il}} \quad (4.17)$$

Primer sargı direnci, uzunluk ( $L_{il-P}$ ), iletkenin kesiti ( $S_{il}$ ) ve malzemenin özgül iletkenlik katsayısı ( $\kappa$ ) kullanılarak hesaplanır.

$$C_{ilk-S} = C_{son-S} + (8 \times D_{iz}) \quad (4.18)$$

Sekonderin ilk çevresi, primerin son çevre uzunluğu ile primerin son katındaki sargı iletkeninin izolasyonlu çapının sekiz katının eklenmesi ile oluşur. Çünkü bu transformatör tasarımında sekonder sargı primer sargının üzerine sarılmıştır.

Sekonder son çevre, sekonder ilk çevreye ek olarak telin fiziksel genişliği ( $8 \times A_{gen}$ ) dikkate alınarak hesaplanır. Bu, sekonder sargının son sarımındaki çevrenin boyutlarını temsil eder.

$$C_{ort-s} = \frac{C_{son-s} + C_{ilk-s}}{2} \quad (4.19)$$

İlk ve son çevrenin ortalaması alınarak sekonder ortalama çevre ( $C_{ort-s}$ ) hesaplanır. Bu çevre, telin ortalama uzunluğunu belirlemek için kullanılır.

$$l_{il-s} = (C_{ort-s} \times (N + N_{ek})) - (N_{ek} \times C_{son-s}) \quad (4.20)$$

$$l_{il-s} = C_{ort-s} \times N \quad (4.21)$$

Sekonder telin toplam uzunluğu, ortalama çevre ( $C_{ort-s}$ ) ile sarım sayısının ( $N$ ) çarpımıdır. Ancak bu çalışmada son kat sargısı nüvenin bitiş noktasından önce bittiği için uzunluk hesaplamasında ortalama çevre ( $C_{ort-s}$ ) ile nüvenin katının bitmesi için eklenecek sarım sayısı ( $N_{ek}$ ) toplam sarım sayısına ( $N$ ) eklenerek çarpılır ve daha sonra eklenen sargı sayısı ( $N_{ek}$ ) son kat çevre uzunluğu ( $C_{son-s}$ ) ile çarpılır ve bu ifadeden çıkarılır.

$$R_{il-s} = \frac{l_{il-s} \times 10^{-3}}{\kappa \times S_{il}} \quad (4.22)$$

Sekonder iletken direnci ise sekonder tel uzunluğu ( $l_{il-s}$ ) ve kesit alanı ( $S_{il}$ ) dikkate alınarak hesaplanır. “ $\kappa$ ” ise iletkenin öz iletkenlik katsayıdır. Bu hesaplama, sekonder iletkenin elektriksel direncini belirlemek için önemli bir değerdir.

$$G_{Cu-P} = S_{il} \times (l_{il-P} \times 8,94) \quad (4.23)$$

$$G_{Cu-S} = S_{il} \times (l_{il-S} \times 8,94) \quad (4.24)$$

$$G_{Al-P} = S_{il} \times (l_{il-P} \times 2,70) \quad (4.25)$$

$$G_{Al-S} = S_{il} \times (l_{il-S} \times 2,70) \quad (4.26)$$

Bakır ağırlığı ( $G_{Cu}$ ), tel kesiti ( $S_{il}$ ) ve tel uzunluğuna ( $l_{il-P}$  veya  $l_{il-S}$ ) bağlıdır. Bakırın özgül ağırlığı ( $8.94 \text{ gr/cm}^3$ ) ile çarpılarak telin ağırlığı belirlenir [38]. Alüminyum ağırlığı ( $G_{Al}$ ), tel kesiti ( $S_{il}$ ) ve tel uzunluğuna ( $l_{il-P}$  veya  $l_{il-S}$ )

bağlıdır. Alüminyum özgül ağırlığı (2.70 gr/cm<sup>3</sup>) ile çarpılarak telin ağırlığı belirlenir [38].

$$N_{sac} = \frac{l_{paket}}{d} \quad (4.27)$$

Bu çalışmadaki tasarlanan transformatörün paketine sığabilecek sac miktarı ise yukarıda belirtilen formüle istinaden ortaya çıkar. Pakete sığabilecek sac adeti ( $N_{sac}$ ), paket boyunun ( $l_{paket}$ ) kullanılan sac kalınlığına ( $d$ ) olan oranı ile belirlenir.

## 4.2 Ölçülerin Belirlenmesi ve Matematiksel Hesaplamaları

Bu aşamada, başlangıç kabullerinin belirlenmesi ile tasarım başlamaktadır. Bu çalışmadaki dört farklı transformatörün hesaplamalardan bağımsız seçilen değerler tablo 4.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.1** Çalışma için hazırlanan transformatörlerin seçimlerle belirlenen değerleri

ÇALIŞMADAKİ TRANSFORMATÖRLERİN SEÇİMLE BELİRLENEN DEĞERLER TABLOSU						
			MANTEL TİP		ÇEKİRDEK TİP	
TANIM	SEMBOL	BİRİM	BAKIR	ALÜMİNYUM	BAKIR	ALÜMİNYUM
GÖRÜNEN GÜÇ	S	VA	1200	1200	1200	1200
PRİMER GERİLİM	$V_{Pr}$	V	230	230	230	230
SEKONDER GERİLİM	$V_{Sec}$	V	230	230	230	230
AKIM YOĞUNLUĞU	J	A /mm <sup>2</sup>	2,30	1,67	2,30	1,68
İNDÜKSİYON	B	Gauss	10500	10500	10500	10500
FREKANS	f	hz	50	50	50	50
SAC KALINLIĞI	d	mm	0,50	0,50	0,50	0,50
TEL TİPİ	-	-	Yuvarlak	Yuvarlak	Yuvarlak	Yuvarlak
İZOLASYON TİPİ	-	-	Emaye	Emaye	Emaye	Emaye

Hesaplara bağlı değerler ise yukardaki formüller ışığında tek tek hesaplanıp tablo 4.2 de belirtilmiştir.

**Tablo 4.2** Çalışma için hazırlanan transformatörlerin hesaplamaları

ÇALIŞMADAKİ TRANSFORMATÖRLERİN HESAPLAR TABLOSU						
TANIM	SEMBOL	BİRİM	MANTEL TİP		ÇEKİRDEK TİP	
			BAKIR	ALÜMİNYUM	BAKIR	ALÜMİNYUM
PRİMER AKIM	$I_{Pr}$	A	5,22	5,22	5,22	5,22
SEKONDER AKIM	$I_{Sec}$	A	5,22	5,22	5,22	5,22
PRİMER TEL KESİTİ	$S_{il-P}$	mm <sup>2</sup>	2,27	3,13	<sup>1</sup> 2,27/2	<sup>1</sup> 3,09/2
SEKONDER TEL KESİTİ	$S_{il-S}$	mm <sup>2</sup>	2,27	3,13	<sup>1</sup> 2,27/2	<sup>1</sup> 3,09/2
PRİMER TEL ÇAPI	$D_{il-P}$	mm	1,7	2	1,2	1,4
SEKONDER TEL ÇAPI	$D_{il-S}$	mm	1,7	2	1,2	1,4
SAC KESİTİ	$S_{Fe}$	cm <sup>2</sup>	<sup>2</sup> 43,01	<sup>2</sup> 43,01	<sup>3</sup> 23,04	<sup>3</sup> 23,04
PRİMER SARIM SAYISI	$N_{Pr}$	Spir	229	229	428	428
SEKONDER SARIM SAYISI	$N_{Sec}$	Spir	229	229	428	428
PRİMER İLK ÇEVRE	$C_{ilk-P}$	mm	290	290	218	218
SON ÇEVRE UZAMA MİKTARI	$A_{gen}$	mm	7,2	10,48	5,21	7,51
PRİMER SON ÇEVRE	$C_{son-P}$	mm	348	374	260	278
PRİMER ORTALAMA ÇEVRE	$C_{ort-P}$	mm	319	332	239	248
PRİMER SARGI UZUNLUĞU	$l_{il-P}$	mm	70.673	73.033	<sup>4</sup> 2X100.265	<sup>4</sup> 2 X102.870
PRİMER SARGI DİRENCİ	$R_{il-P}$	Ω	0,56	0,67	0,79	0,95
SEKONDER İLK ÇEVRE	$C_{ilk-S}$	mm	348	374	270	290
SEKONDER SON ÇEVRE	$C_{son-S}$	mm	405	457,6	312	350
SEKONDER ORTALAMA ÇEVRE	$C_{ort-S}$	mm	376	416	291	320
SEKONDER SARGI UZUNLUĞU	$l_{il-P}$	mm	81.033	86.747	<sup>4</sup> 2X114.304	<sup>4</sup> 2 X127.072
SEKONDER SARGI DİRENCİ	$R_{il-P}$	Ω	0,64	0,79	0,9	1,17
İLETKEN SARGI AĞIRLIĞI	$G_{il}$	kg	3,08	1,35	4,35	1,92
SAC AĞIRLIKLARI	$G_{Fe}$	kg	<sup>5</sup> 12,79	<sup>5</sup> 12,79	<sup>5</sup> 8,42	<sup>5</sup> 8,42
İLETKEN WATT KAYIPLARI	$p_{il}$	W	33	40	46	58
SAC KAYIPLARI	$p_{Fe}$	W	19	19	13	13
TOPLAM KAYIP	$p_{tot}$	W	52	59	59	71
<sup>1</sup> Çekirdek tip transformatörlerde toplam iletken kesit mantel tip transformatörler ile eşittir.						
<sup>2</sup> Sac kesiti EI tipinde 6,4 x 7 cm ölçülü paket gövdeden çıkmıştır.						
<sup>3</sup> Sac kesiti UI tipinde 4 x 6 cm ölçülü paket gövdeden çıkmıştır.						
<sup>4</sup> U tip transformatörlerdeki tek bacak üzerindeki sargı miktarı iki ile çarpılırsa toplam uzunluk ortaya çıkar.						
<sup>5</sup> Birim sac ağırlık değerleri " Tema Metal " ünvanlı üreticinin web sitesinden alınmıştır [60].						

# 5

## TASARLANAN TRANSFORMATÖRLERİN DENEYİ

---

### 5.1 Deney Setinin Tanıtımı

#### 5.1.1 Kutulu Kuru Tip Ayarlanabilir Oto-Transformatör (Varyak)

Varyak (Şekil 5.1), gerilimi kontrollü şekilde yükseltmek ve düşürmek için kullanılan bir makinedir. Bu makinenin kullanım amacı test düzeneğinde gerilimi kontrol altına alıp çalışma için tasarlanan gerilim, akım, vb... değerlerin test süresi boyunca sabit bir şekilde tutulup hata oranlarını minimize etmektir. Aynı zamanda, kısa devre testlerinde düşük gerilim seviyeleri için daha hassas ölçümler yapılmasına da olanak sağlar. Bu şekilde kısa devre empedansı, kayıplar ve gerilim regülasyonu gibi parametrelerde doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanır.



Şekil 5.1 Kutulu varyak [8]

#### 5.1.2 Miliohmmetre

Miliohmmetre (Şekil 5.2), düşük direnç değerlerini hassas bir şekilde ölçmek için tasarlanmış bir ölçüm cihazıdır. Özellikle motor sargıları, kablo bağlantıları, röle kontaktları ve şönt dirençleri gibi düşük dirençli bileşenlerin değerlerini hassas şekilde ölçmede kullanılır.

Bu çalışmada hassas direnç ölçümleri almak adına GW Instek GOM-804 miliohmmetresi kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Miliohmmetre

### 5.1.3 Güç Analizörü

Güç analizörü (Şekil 5.3), gerilim, akım, aktif güç, reaktif güç ve güç faktörü gibi temel elektriksel parametreleri hassas aynı zamanda detaylı bir şekilde ölçmek ve analiz etmek için kullanılır. Bu çalışmada transformatörün kayıplarının belirlenmesi ve güç karakteristiklerini daha doğru şekilde sonuçlanmasını sağlamıştır.



Şekil 5.3 Analizör

#### 5.1.4 Data Logger

Kısa devre deneyinde, sıcaklık verilerini düzenli aralıklarla veri kaydını yapmak için kullanılan bu ölçü kaydedici alete data logger adı verilir (Şekil 5.4). Data logger, çevresel veya elektriksel parametreleri (örneğin, sıcaklık, nem, gerilim) belirli bir süre boyunca otomatik olarak ölçen ve kaydeden bir cihazdır. Bu çalışmada sıcaklık değerlerini her 30 dakikada bir kaydetmek amacıyla UT181A model data logger tercih edilmiştir. Hassas ölçüm ve veri kaydı özellikleri sayesinde sıcaklık değişimlerini düzenli olarak izlenmesini ve deney sonuçlarının daha verimli bir şekilde analiz edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, deneyde sıcaklık ölçümlerini doğru bir şekilde gerçekleştirmek için geniş ölçüm aralığına ve yüksek dayanıklılığa sahip K tipi termokupl sensör kullanılmıştır. Bu sensör, deney sırasında oluşan sıcaklık değişimlerini hızlı ve güvenilir bir şekilde aktarılmasına olanak tanımıştır.



Şekil 5.4 Data logger

#### 5.1.5 Pensampermetre

Devreden geçen akımı ölçmek için kullanılır. Bu cihaz (Şekil 5.5), devreyi fiziksel olarak kesmeden ve bağlantıları değiştirmeden akım ölçümü yapılmasına olanak sağlar. Deney sırasında büyük akımlar olmasa da pensampermetre ile akımı hızlı ve doğru bir şekilde ölçerek güvenli ve pratik bir ölçüm gerçekleştirildi. Bu sayede deney sonuçları kolayca doğrulandı.



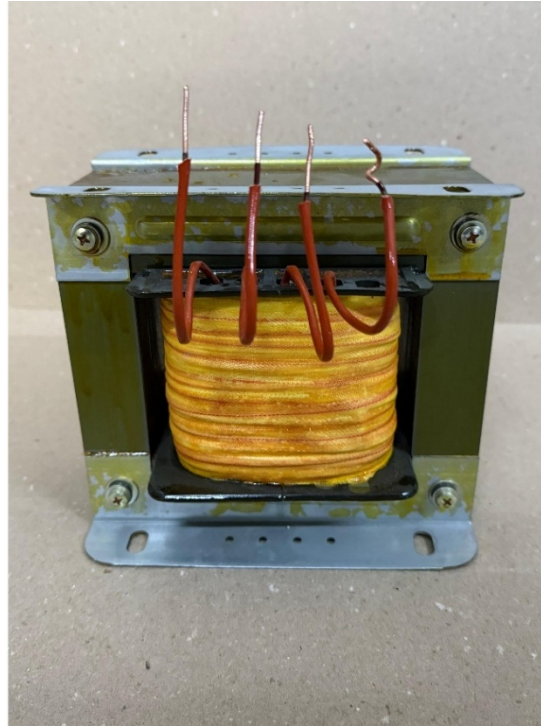
Şekil 5.5 Pensampermetre

### 5.1.6 Düşürücü (Buck) İzolasyon Transformatorü

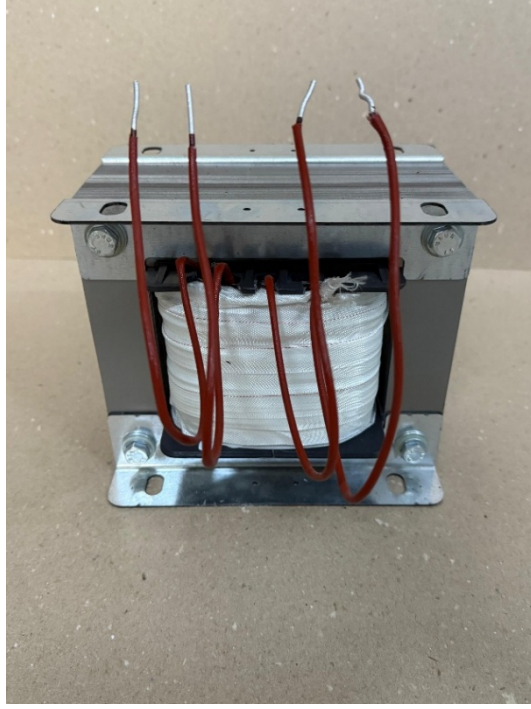
Kısa devre testinde sekonder sargılar kısa devre edilip primer sargılardan nominal akım geçene kadar varyak ile gerilim artırılmaktadır. Ancak sekonder sargının kısa devre olmasından mütevellit primerden geçecek olan nominal akım çok düşük gerilimlerde peyda olacağından dolayı varyak makinesi direk olarak transformatöre bağlanamaz. Bu sebeple varyak ile test edilecek transformatörler arasına düşürücü (buck) transformatör eklenmesi testin güvenilirliği ve güvenliği adına zaruridir (Şekil 5.6). Bu test için tasarlanan düşürücü transformatör 230V/19V olarak seçilmiştir. Böylece aradaki oran 12,11 olmuştur. Bu oranın anlamı primerde değişecek her 1 volt için sekonderde 1/12,11 oranında yani 0,083 volt hassasiyetinde bir değişim gerçekleşecektir. Bu oran da kısa devre testinde hassas bir ölçüm yapma olanağı sağlayacaktır.



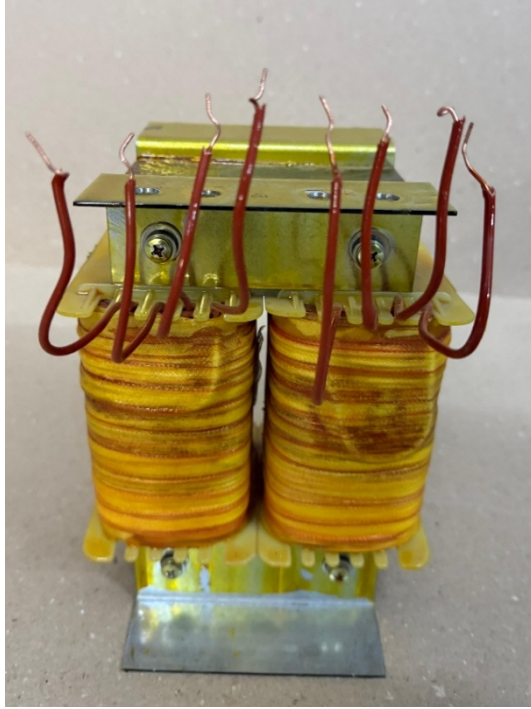
Şekil 5.6 Düşürücü izolasyon transformatörü



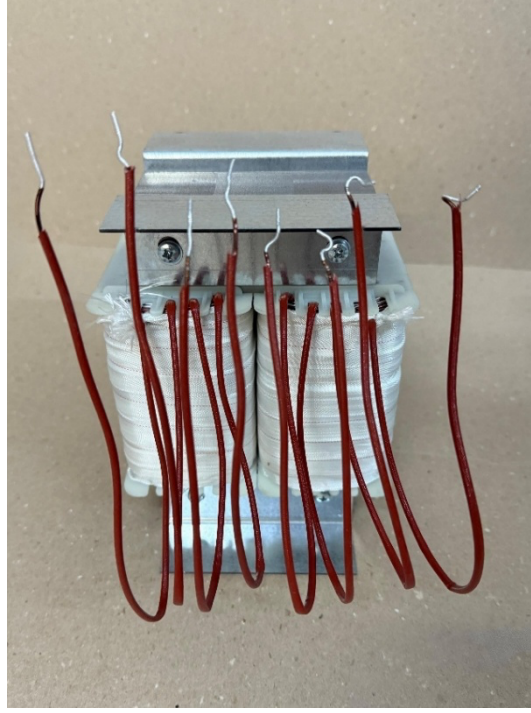
Şekil 5.7 Deney için hazırlanan mantel tip bakır sargılı transformatör



**Şekil 5.8** Deney için hazırlanan mantel tip alüminyum sargılı transformatör



**Şekil 5.9** Deney için hazırlanan çekirdek tip bakır sargılı transformatör



**Şekil 5.10** Deney için hazırlanan çekirdek tip alüminyum sargılı transformatör

## **5.2 Transformatörlerin Yüksüz (Boşta) Test Edilmesi**

### **5.2.1 Teorik Kısım**

Boşta test, transformatörlerin magnetik devre ve çekirdek kayıplarını analiz etmek için yapılan bir deneydir (Şekil 5.11). Bu test sırasında, sekonder sargı açık bırakılır (yük bağlanmaz) ve primer sargıya nominal gerilim uygulanır. Bu test, transformatörün magnetik devre karakteristiği ve çekirdek kayıplarını belirlemek için temel bir yöntemdir.

Yüksüz test sırasında primer sargıdan geçen toplam akıma yüksüz (boşta) akım denir. Bu akım, sekonder sargı açık devre olduğunda yalnızca çekirdek kayıplarını karşılamak ve magnetik alanı oluşturmak için gereklidir. Boşta akım iki bileşene ayrılır: magnetizasyon akımı ( $I_m$ ) ve demir kayıp akımı ( $I_{Fe}$ ). Bu bileşenlerin büyüklüğü ve oranı, transformatörün çekirdek tasarımına ve malzeme özelliklerine bağlıdır.

Demir kayıp akımı, transformatör çekirdeğinde histerezis ve eddy akımı (foucault) kayıplarını karşılayan akımdır. Bu akım, çekirdek kayıplarının bir

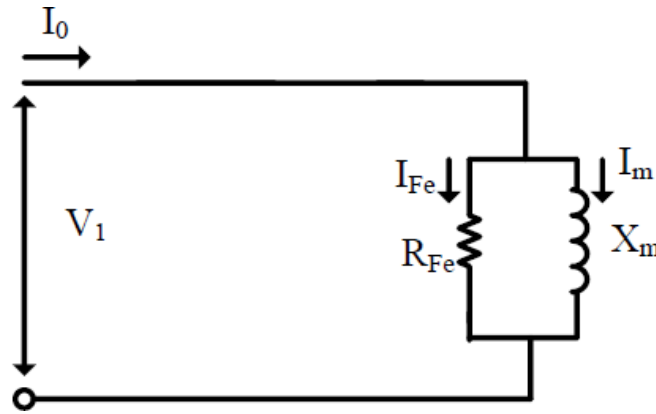
ölçüsü olarak kabul edilir ve çekirdek malzemesinin elektriksel iletkenlik ve magnetik özellikleri ile ilişkilidir [34]. Demir kayıp akımı, eşdeğer devrede  $I_{Fe}$  ile temsil edilir.

Magnetizasyon akımı, transformatör çekirdeğinde magnetik akıyı oluşturmak ve sürdürmek için gerekli olan akımdır. Bu akım, esas olarak çekirdeğin magnetik reaktansı ( $X_m$ ) ile ilişkilidir. Magnetizasyon akımı, çekirdeğin doygunluk seviyesi ve magnetik malzemenin özelliklerine bağlıdır.

Çekirdek kaybı direnci ( $R_{Fe}$ ), wattmetre ile ölçülen güç ( $p_{Fe}$ ) ve primer gerilim ( $V_{Pr}$ ) değerleri kullanılarak hesaplanır. Çekirdek kaybı direnci 5.1 formülü ile ifade edilir.

Boşta kayıplarda iletken kayıpları hesaba katılmaz. Çünkü yüksüz testlerde çekilen mili amper mertebesindeki akımın karesinin iletken direnci ile çarpılması kümülatif toplamda çok küçük bir değeri ihtiva eder. Bu sebeple boşta kayıplara demir kaybı olarak bakılır ve iletken kayıpları ihmal edilebilir seviyededir denir.

$$R_{Fe} = \frac{V^2}{P_{Fe}} \quad (5.1)$$



Şekil 5.11 Boşta deney görseli

### 5.2.2 Uygulama Kısmı

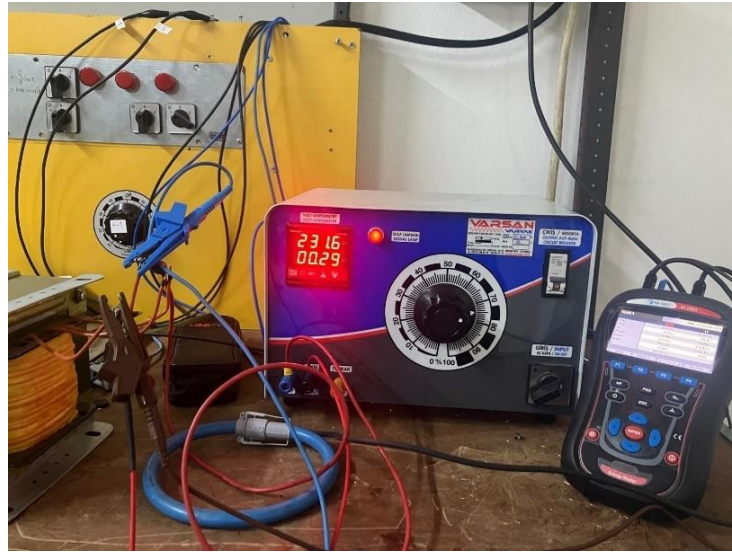
Boşta test, transformatörlerin magnetik devre ve çekirdek kayıplarını analiz etmek için yapılan bir deneydir. Bu test sırasında, sekonder sargı açık bırakılır (yük bağlanmaz) ve primer sargıya nominal gerilim uygulanır. Bu test,

transformatörün magnetik devre karakteristiği ve çekirdek kayıplarını belirlemek için temel bir yöntemdir.

Bölüm 5.2.1’de anlatılan boşa deney formatına göre deney düzeneği hazırlanmış ve deney yapılmıştır (Şekil 5.2). Tablo 5.1’deki veriler elde edilmiştir.

**Tablo 5.1** Boşa devre deney ölçümleri

Transformatörler	$P_0$ (W)	$I_0$ (A)	$V_n$ (V)
Mantel Tip Bakır Sargılı	18,5	0,25	230
Mantel Tip Alüminyum Sargılı	18,5	0,25	230
Çekirdek Tip Bakır Sargılı	12	0,13	230
Çekirdek Tip Alüminyum Sargılı	12	0,13	230



**Şekil 5.12** Boşa deney görseli

## 5.3 Transformatörlerin Kısa Devre Testi

### 5.3.1 Teorik Kısım

Kısa devre testi, transformatörlerin bakır kayıplarını ve eşdeğer empedanslarını belirlemek için yapılan bir deneydir. Bu test sırasında, transformatörün sekonder sargısı kısa devre edilir ve primer sargıya nominal akımı sağlayacak kadar düşük bir gerilim uygulanır [34].

Test, transformatörün sargı empedansları ve yükteki sıcaklık değişimi ile iletken kayıplarındaki davranışını analiz etmek için kullanılır.

Kısa devre testi sırasında primer sargıya uygulanan gerilime kısa devre gerilimi ( $u_k$ ) denir. Kısa devre gerilimi, transformatörün eşdeğer empedansını analiz etmek için önemlidir. Uygulama alanlarının özelliklerine göre %  $u_k$  düşük bir değerde ya da yüksek bir değerde tasarlanır.

Primer sargıdan geçen akıma kısa devre akımı ( $I_k$ ) denir. Bu akım, transformatörün nominal akımına eşittir. Primer sargı nominal akımda sabit tutulduğu için transformatörün çevirme oranına bağlı kalarak sekonder akımı da nominal değerde sabit kalır.

İletken kayıpları, bu dirençlere bağlı enerji kayıplarını ifade eder. Sekonder direnç, primer tarafına yansıtılmış ( $R_2'$ ) olarak gösterilir.

Sızma reaktansları, sargılar arasındaki magnetik kuplajın eksikliğinden kaynaklanan magnetik kaçak akıma karşılık gelir. Sekonder reaktans, primer tarafına yansıtılmış ( $X_2'$ ) olarak gösterilir.

Kısa devre kayıp gücü, primer ve sekonder sargılardaki akım ve dirençler üzerinden hesaplanabilir. Kısa devre kayıp gücü şu şekilde ifade edilir:

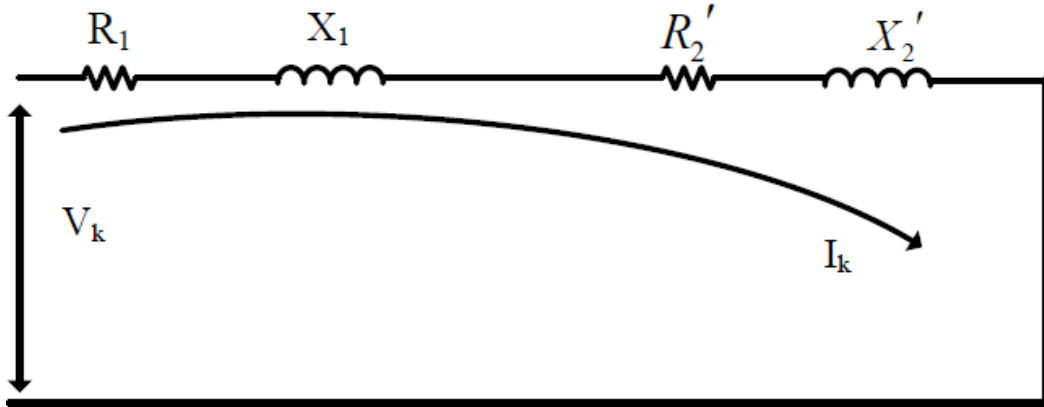
$$P_k = (I_k)^2 (R_1 + R_2') \quad (5.2)$$

Yüksüz deneyde akım değeri çok düşük olduğu için iletken kayıpları yüksüz testlerdeki kayıplarda göz ardı edilmişti, kısa devre kayıplarında ise gerilim değeri çok düşük olduğundan mütevellit mıknatıslanma kayıpları ve magnetik kayıplar düşük mertebede olacağından dolayı demir kayıpları da kısa devre kayıplarında ihmal edilir.

Transformatörün eşdeğer empedansı, sargıların toplam direnç ve reaktans bileşenlerini içerir. Kısa devre gerilimi ve akımı kullanılarak hesaplanabilir:

$$Z_{eş} = \frac{V_k}{I_k} \quad (5.3)$$

Empedansın reel kısmı ( $R_{e\check{s}}$ ), toplam dirençleri; sanal kısmı ( $X_{e\check{s}}$ ), toplam reaktansları temsil eder (Şekil 5.13).



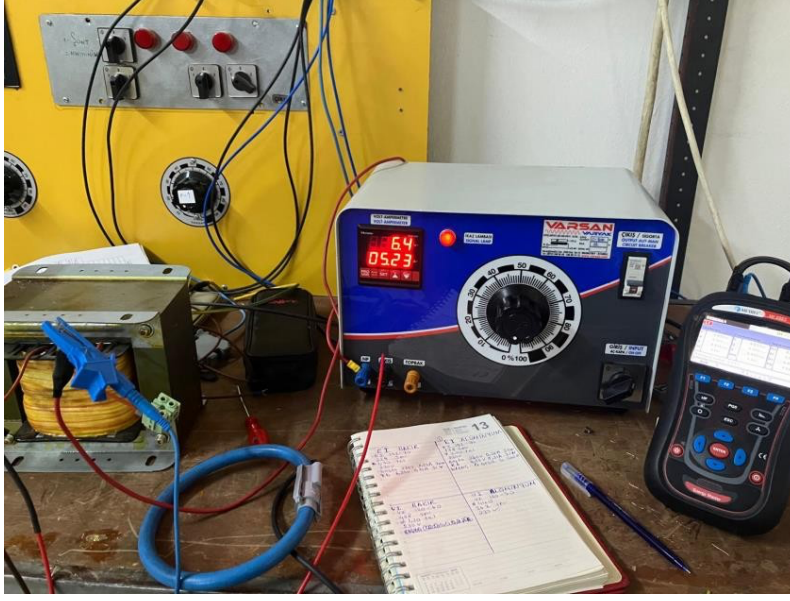
Şekil 5.13 Kısa devre deney görseli

### 5.3.2 Uygulama Kısmı

Bölüm 5.3.1’de anlatılan kısa devre deney formatına göre deney düzeneği hazırlanmış ve deney yapılmıştır (Şekil 5.14). Tablo 5.2’deki veriler elde edilmiştir.

Tablo 5.2 Kısa devre deneyi sonuçları ve karşılaştırması

Transformatör	Hesaplanan $P_{il}$ 20 °C	Ölçülen $P_{il}$ Kompanzasyonu 20 °C	Ölçülen $P_{il}$ 15 °C	$I_n$
Mantel Tip Bakır Sargılı	33 W	33 W	31 W	5,22 A
Mantel Tip Alüminyum Sargılı	40 W	39 W	38 W	5,22 A
Çekirdek Tip Bakır Sargılı	46 W	46 W	44 W	5,22 A
Çekirdek Tip Alüminyum Sargılı	58 W	57 W	55 W	5,22 A



Şekil 5.14 Kısa devre deney görseli

### 5.3.3 Sıcaklık Değişim Testi ve Miliohmetre ile Sınır Sıcaklıkta Direnç Ölçümü

Tasarlanan transformatörler, kısa devre testi sırasında sıcaklık artışı ölçülerek incelenmiştir. Bu süreçte, transformatör sargıları kısa devre testine tabi tutulmuş ve sıcaklık, sabit bir değere ulaşana kadar takip edilmiştir. Sıcaklığın sabitlenmesi, sargılar ve çevresel koşullar arasında termal denge sağlandığında gerçekleşmiştir. Bu noktada, sargılardaki direnç değerleri başlangıç ve son sıcaklıklarda ölçülmüştür.

Al için

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{(T_1 + 225)}{(T_2 + 225)} \quad (5.4)$$

Cu için

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{(T_1 + 235)}{(T_2 + 235)} \quad (5.5)$$

Kısa devre testi sırasında ölçülen direnç değerleri ile formülden elde edilen teorik direnç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, testin doğruluğunu ve ölçüm sisteminin güvenilirliğini değerlendirmek için kritik bir aşama kullanılmıştır.

Sıcaklık probu ile muhtemel yüksek sıcaklık noktası esas alınmaya çalışılmış ancak gerçek ortalama sıcaklık test sonucunda miliohm metre yardımıyla ölçülerek belirlenmiştir. Ölçüme bağlı çıkan direnç değerleri iletkenin alüminyum ve bakır olmasına göre formül 5.4 ve formül 5.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’de değerler belirtilmiştir.

Deneysel ve teorik sonuçların birbirine yakın olması, formülün ve test yönteminin geçerliliğini ortaya koymaktadır. Bu test, transformatör sargılarında sıcaklık artışının elektriksel davranış üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılmıştır. Sıcaklık artışına bağlı olarak dirençteki değişim, transformatörlerin ısı performansını ve enerji kayıplarını analiz etmek için önemli bir parametredir.

Sonuçlar, tasarlanan transformatörlerin yük altındaki performansını doğrulamak ve termal dayanıklılıklarını değerlendirmek açısından büyük bir öneme sahiptir.

**Tablo 5.3** Direnç Ölçümü ve 20°C değere kompanzasyonu

	Ölçülen Direnç ( $\Omega$ ) 15°C		Ölçülen Direnç ( $\Omega$ ) 20°C Kompanzasyonu	
	Primer	Sekonder	Primer	Sekonder
Mantel Tip Bakır Sargılı	0,54	0,63	0,55	0,64
Mantel Tip Alüminyum Sargılı	0,64	0,77	0,65	0,79
Çekirdek Tip Bakır Sargılı	0,76	0,89	0,78	0,91
Çekirdek Tip Alüminyum Sargılı	0,93	1,12	0,95	1,14

**Tablo 5.4** Hesaplanan direnç değerlerinin 20°C kompanze edilmiş direnç değerleri ile karşılaştırılması

	Hesaplanan Direnç ( $\Omega$ ) 20 °C		Ölçülen Direnç ( $\Omega$ ) 20°C Kompanzasyonu	
	Primer	Sekonder	Primer	Sekonder
Mantel Tip Bakır Sargılı	0,56	0,65	0,55	0,64
Mantel Tip Alüminyum Sargılı	0,66	0,79	0,65	0,79
Çekirdek Tip Bakır Sargılı	0,79	0,9	0,78	0,91
Çekirdek Tip Alüminyum Sargılı	0,95	1,17	0,95	1,14

## 5.4 Verimlilik Analizi

Bu bölümde, transformatörlerin boşa çalışma ve kısa devre deneylerinden elde edilen verilere dayanarak enerji verimliliği analiz edilmiştir. Çalışmada, farklı transformatör tipleri (mantel ve çekirdek) ve sargı malzemelerinin (bakır ve alüminyum) enerji kayıpları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Verimlilik analizinde, Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de sunulan deney sonuçları temel alınmıştır.

Boşa çalışma deneyine ilişkin analizler, Tablo 5.1’de verilen değerler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde, transformatörlerin magnetik devresinde meydana gelen kayıplar ve çekilen akım değerlendirilmiştir. Mantel tip bakır sargılı transformatör 18,5 W, mantel tip alüminyum sargılı transformatör ise 18,5 W boşa kayıp sergilemiştir. Çekirdek tip transformatörlerde ise bakır sargılı olan 12 W, alüminyum sargılı olan ise 12 W boşa kayıpla çalışmıştır. Bu veriler ışığında, daha önce de belirtildiği üzere boşa kayıplar transformatörün çekirdek kayıplarından meydana gelmesinden ötürü, çekirdek tip transformatörlerde kullanılan sac gövde ağırlığı mantel tip transformatörlerden daha az olmasından dolayı, çekirdek tip transformatörlerin çekirdek nüve kayıplarının daha az olduğu ve mantel tiplere göre daha verimli olduğu gözlemlenmiştir.

Kısa devre deneyine ilişkin analizlerde ise Tablo 5.2’deki verilere dayanmaktadır. Bu deneyde, transformatörlerin sargılarında meydana gelen direnç kayıpları ölçülmüştür. Bu kayıplar IEC 60076-1 standardında belirtildiği üzere 75°C değerlerine kompanze edilmiştir. Mantel tip bakır ve alüminyum sargılı transformatörlerde kısa devre kayıpları 75 °C sıcaklıkta sırasıyla 40 W ve 48 W olarak ölçülmüştür (kompanze edilmiştir). Ancak çekirdek tip transformatörlerde, bakır sargılı olan 56 W, alüminyum sargılı olan ise 70 W iletken kaybı sergilemiştir. Çekirdek tip transformatörlerin sargılarındaki direnç kayıplarının mantel tip transformatörlere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum sargılı transformatörlerin, bakır sargılılara kıyasla daha yüksek kayıplar sergilemesi, alüminyumun daha düşük iletkenlik kabiliyetinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, kısa devre kayıplarının transformatörün yapısal özelliklerine ve kullanılan sargı malzemesine büyük ölçüde bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Verimlilik hesaplamaları, boşa kayıplar ve kısa devre kayıplarının toplamını esas almıştır. Toplam kayıplar, Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’deki  $P_0$  ve  $P_k$  değerlerinin

toplanmasıyla hesaplanmıştır. Mantel tip bakır sargılı transformatörün toplam kaybı 58 W olarak hesaplanırken, mantel tip alüminyum sargılı transformatörde bu değer 67 W olarak bulunmuştur. Çekirdek tip transformatörlerde ise toplam kayıplar, bakır sargılı için 68 W, alüminyum sargılı için 82 W olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, mantel tip transformatörlerin çekirdek tip transformatörlere göre daha düşük kayıplarla çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, bakır sargılı transformatörlerin alüminyum sargılı transformatörlere kıyasla enerji performansı açısından daha üstün olduğu ortaya konmuştur.

Yapılan verimlilik hesaplamaları, transformatörlerin enerji kayıplarını ve bu kayıpların genel performans üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur. Çekirdek tip transformatörlerde, alüminyum sargılar kullanıldığında toplam kayıpların daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek iletkenlik gerektiren uygulamalarda bakır sargıların tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, analizler transformatörlerin sargı malzemesinin ve yapısal özelliklerinin enerji verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bakır sargılar, düşük kayıplar ve yüksek verimlilik ile öne çıkarken, çekirdek tip transformatörlerde kayıpların mantel tip transformatörlere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, transformatör seçimi sırasında uygulama ihtiyaçlarının ve enerji performans gereksinimlerinin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

## **5.5 Maliyet Analizi**

Tasarlanan transformatörlerin maliyet analizi, iletken maliyetleri ve demir nüve maliyetleri üzerinden bir yıllık ortalama maliyetler göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Bakırın kilogram başına maliyet fiyatı 11,05 USD olurken alüminyumun kilogram başına maliyet fiyatı 5,52 USD ve demirin kilogram başına maliyet fiyatı 1,06 USD olarak gözlemlenmiştir. Analiz kapsamında, dört farklı transformatör tipi hem kullanılan malzemelerin ağırlıklarına (Tablo 5.5) hem de bu malzemelerin birim maliyetlerine göre incelenmiştir (Tablo 5.6).

Bakır iletkenli mantel tipli nüve kullanılan transformatör demir nüve ağırlığı çekirdek tiplere göre daha ağır olmuştur. Toplam maliyeti alüminyum iletkenli

transformatörlerden yüksektir. Çekirdek tipli bakır iletkenli transformatör maliyetinden ise ucuz olmuştur.

Alüminyum iletkenli mantel tipli nüve kullanılan transformatör demir nüve ağırlığı çekirdek tiplere göre daha ağır olmuştur. Toplam maliyeti bakır iletkenli transformatörlerden daha düşüktür. Sadece çekirdek tipli alüminyum iletkenli transformatörden bir miktar yüksek maliyete sahiptir.

Bakır iletkenli çekirdek tipli nüve kullanılan transformatör maliyet açısından diğer transformatör tasarımlarından en yüksek maliyete sahip olan transformatör tipidir. En belirgin avantajı mantel tipli nüvelere sahip transformatörlerden demir ağırlığının hafif olmasıdır. Ayrıca en yüksek iletken maliyetine sahip olan transformatör tipidir

Alüminyum iletkenli çekirdek tipli nüve kullanılan transformatör diğer transformatörlere nazaran maliyet açısından en ucuz olanıdır. Ağırlık açısından en hafif ağırlığa sahip olan transformatör tipidir.

Sonuç olarak, maliyet odaklı bir yaklaşım benimsenmesi durumunda, alüminyum sargılı çekirdek tipli nüve kullanılan transformatörler ciddi bir avantaj sunmaktadır. Mantel tipli alüminyum iletkenli transformatörler de bakır tiplere göre ciddi maliyet avantajı içermektedir. Maliyet avantajı sağlanırken, iletkenlik ve enerji kayıpları gibi teknik parametrelerin de detaylı şekilde değerlendirilmesi önemlidir.

**Tablo 5.5** Çalışma için hazırlanan transformatörlerin toplam iletken ve nüve ağırlıkları

	Kullanılan İletken Ağırlığı (kg)	Nüve (Demir) Ağırlığı (kg)	Toplam Ağırlık (kg)
Mantel Tip Bakır Sargılı	3,11	13,3	16,41
Mantel Tip Alüminyum Sargılı	1,45	13,3	14,75
Çekirdek Tip Bakır Sargılı	4,45	8,77	13,22
Çekirdek Tip Alüminyum Sargılı	2,05	8,77	10,82

**Tablo 5.6** Çalışma için hazırlanan transformatörlerin toplam iletken ve nüve maliyetleri

01/05/2024 - 30/04/2025 Tarihleri Arasındaki Veri Esas Alınmıştır	Kullanılan İletken Maliyeti USD	Kullanılan Nüve (Demir) Maliyeti USD	Toplam Maliyet USD
Mantel Tip Bakır Sargılı	34,36	14,03	48,39
Mantel Tip Alüminyum Sargılı	8,00	14,03	22,03
Çekirdek Tip Bakır Sargılı	49,16	9,25	58,41
Çekirdek Tip Alüminyum Sargılı	11,31	9,25	20,56
<ul style="list-style-type: none"><li>• 0,50 mm kalınlıkta transformatör lamine sac maliyet fiyatlarının belirlenmesinde Varsan Elektrik firmasının satın alma maliyet verileri esas alınmıştır [8].</li><li>• Bakır ve alüminyum fiyatlarının belirlenmesinde LME (London Metal Exchange) verileri esas alınmıştır [61].</li><li>• Bakır ve alüminyum işçilik maliyetlerinin belirlenmesinde Varsan Elektrik firmasının satın alma maliyet verileri esas alınmıştır [8].</li></ul>			

Çalışmada öncelikle transformatörlerin çalışma prensipleri ve matematiksel modelleri incelenmiştir. İdeal bir transformatörün matematiksel modeli kullanılarak, gerilim, akım ve sarım sayıları arasındaki ilişkiler tanımlanmış, kayıplar teorik olarak hesaplanmıştır. Demir kayıplarının histerezis ve eddy akımlarından kaynaklandığı, bakır kayıplarının ise sargı dirençlerinden dolayı oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu teorik temeller, deneysel çalışmaların analizinde temel alınmıştır. Sonuçlarda ise teorik hesaplamaların ölçülen deneysel sonuçlara çok yakın olduğu ortaya çıkmıştır

Deneysel çalışmalar kapsamında, transformatörlerin boşa çalışma ve kısa devre testleri gerçekleştirilmiştir. Boşa çalışma testi ile çekirdek kayıpları belirlenmiş, kısa devre testi ise iletken kayıplarını ölçmek için kullanılmıştır. Bu deneylerden elde edilen veriler, Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de sunulmuş, her bir transformatör tipi için toplam kayıplar ve verimlilik değerleri hesaplanmıştır.

Maliyet analizi, farklı iletken malzemelerin ekonomik etkilerini değerlendirmiştir. Bakır sargılar, yüksek verimlilik avantajı sunmasına rağmen, malzeme maliyetinin yüksek olması nedeniyle ekonomik olarak dezavantajlıdır. Buna karşılık, alüminyum sargılar daha düşük maliyetle üretilmekte ve hafifliği sayesinde taşınabilirlik avantajı sağlamaktadır.

Bu çalışmada gözlemlenen;

- En yüksek verimli transformatör: Bakır iletkenli mantel tip nüveye sahip transformatördür
- En düşük verimli transformatör: Alüminyum iletkenli çekirdek tip nüveye sahip transformatördür.
- En düşük maliyetli transformatör: Alüminyum iletkenli çekirdek tip nüveye sahip transformatördür.

- En yüksek maliyetli transformatör: Bakır iletkenli çekirdek tipli nüveye sahip transformatördür.
- En ağır gövdeye sahip transformatör: Bakır iletkenli mantel tip nüveye sahip transformatördür.
- En hafif gövdeye sahip transformatör: Alüminyum iletkenli çekirdek tip nüveye sahip transformatördür

Genel olarak, analiz sonuçları, transformatör seçimi yapılırken uygulama ihtiyaçlarının dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Yüksek enerji verimliliği gerektiren uygulamalar için bakır sargılı mantel tip nüveye sahip transformatörler tercih edilirken, maliyet odaklı projelerde ise genel olarak alüminyum sargılı transformatörler ve özellikle çekirdek tip nüveye sahip olanlar kullanılabilir. Bununla birlikte, her iki tasarımın avantaj ve dezavantajlarının detaylı bir şekilde analiz edilmesi hem ekonomik hem de teknik açıdan daha sürdürülebilir çözümler sunacaktır.

## KAYNAKÇA

---

- [1] K. Cao, N. Jiang, J. Su, "Evaluation of Systems and Technologies of Underground Pipeline Gallery, Haikou", Highlights in Science, Engineering and Technology, vol. 10, pp. 180-187, August 2022.
- [2] M. Wen, J. Song, Y. Song, Y. Liu, C. Li, P. Wang, "Reliability assessment of insulation system for dry type transformers", in IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 6, pp. 1998-2008, December 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6678847.
- [3] Z. Arifin, N. Adi, M. H. Ardiansah, H. Aziz, "Life Assessment of Aluminium and Copper Winding Distribution Transformers Using Loss of Life Analysis", 2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE), Lombok, Indonesia, October 2020, pp.1-5, doi: 10.1109/ICIEE49813.2020.9277052
- [4] Y. Özüpak, "Transformatörlerin Elektromanyetik Alan ve Isıl Analizlerinin Sonlu Elemanlar Kullanılarak Gerçekleştirilmesi", Doktora tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Ekim 2020.
- [5] Prof. Dr. İ. Şenol, Prof. Dr. N. Bekiroğlu, Prof. O. Aybar, "Elektrik Makineleri 1", Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [6] Dr. Ing. W. S. Berlin, "Transformatörler", İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 1951.
- [7] Prof. Dr. İ. Çetin, "Transformatör Çözümlü Problemlerle 1.Kısım", Arpaz Matbaacılık, İstanbul, 1981.
- [8] Varsan Elektrik, www.varsan.com, Erişim Tarihi: 02.2025.
- [9] B. Aydoğan, "Kuru Tip Transformatörlerde Yalıtım Malzemeleri Mesafelerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle ve Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Temmuz 2023.
- [10] Prof. A. N. Berkol, "Alternatif Akım Makinaların Teorisi", İnkılap ve Aka Basımevi, İstanbul, 1976.
- [11] Vikipedi, "Transformator", <https://tr.wikipedia.org/wiki/Transformat%C3%B6r>, Erişim tarihi: Mart 2025.
- [12] O. Gürdal, "Elektrik Makinalarının Tasarımı", Atlas Yayın Dağıt. Ltd. Şti., İstanbul, 2001.
- [13] B. Esenboğa, "Modeling And Realization of Dry Type Transformer With Optimum Weight and Efficiency Characteristics", Adana Alparslan Türkeş Science And Technology University, Adana, 2019.

- [14] B. Thango, P. Bokoro, “Stray Load Lost Valuation in Electrical Transformers”, University of Johannesburg, Johannesburg, March 2022.
- [15] X. Wan, et al., “Transformer insulation aging assessment and life prediction based on variety characteristics”, ICMIA 2016, Jan. 2016.
- [16] K. Dawood, M. A. Çakır, S. Tursun, “Evaluation of the Economic Feasibility of Different Materials for Transformer Windings”, ELECO 2024, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10847238>, Jan. 2025.
- [17] S. H. Salomons, “The use of aluminium conductors in transformers”, Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers ,Volume: 73, Issue: 1, pp. 11-15, January 1982, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9485993>
- [18] J. W. Coltman, “The Transformer” IEEE Industry Applications Magazine, 2022, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=974352>
- [19] M. Tören, M. Çelebi, “Impact on Efficiency of Core Materials in Dry Type Transformers”, ELECO 2016, February 2017, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7851854>
- [20] Eltaş, <https://www.eltas.com.tr/En/Products/1007/Product-Groups/1001/Power-Transformers.Aspx>, Erişim Tarihi: 03.2025.
- [21] Metro Elektrik, <https://shop.metroelektrik.com.tr/urun/Ent-A30-1005-C11-5va-Akim-Trafosu-Enm4148>, Erişim Tarihi: 03.2025.
- [22] MBT Electrical, <https://vietnamtransformer.com/our-news/Distribution-Transformer-Mbt-Transformer>, Erişim Tarihi: 03.2025.
- [23] Power-Serv, <https://www.powerservllc.com/pfiffner-instrument-transformers>, Erişim Tarihi: 03.2025.
- [24] Modern, <https://turkish.acpowerstabilizer.com/quality-2530062-600v-690v-Single-Phase-Buck-And-Boost-Transformer-50hz-60hz-400hz>, Erişim Tarihi 03.2025.
- [25] ABB Enerji, <https://www.abbenerji.com.tr/tr/Transformator-Kazan-Imalati/3-Fazli-Transformator>, Erişim Tarihi 03.2025.
- [26] M. Aygören, “Elektrik Trafolarında Oluşan Güç Kayıplarının Uzaktan Manyetik Algılama Yöntemiyle Belirlenmesi”, BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, Cilt: 19, Sayı: 1, syf. 29 – 38, 2017, doi:<https://doi.org/10.25092/baunfbed.320029>
- [27] Maddox, <https://www.maddox.com/resources/articles/step-up-step-down-transformers-and-reverse-feeding>, Erişim Tarihi: 03.2025.
- [28] J. J. Winders, Jr. “Power Transformers Principles and Applications”, Ppl Electric Utilities Allentown, Pennsylvania, 2002.
- [29] W. Chen, “The Electrical Engineering Handbook”, Sayı: 1, 1995.
- [30] A. Poveda-Lerma, G. Serrano-Callergues, M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Perez-Cruz, “Lamination Effects on a 3d Model of the Magnetic Core of Power Transformers”, Open Physics, pp. 997-1003, December 2017.

- [31] A. Ilgaz, M. Bayirli, M. Aygören, “Transformatör Sisteminde Manyetik Akı Dağılımının İncelenmesi Yöntemiyle Güç Kayıplarının Belirlenmesi”, Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Enstitüsü Dergisi, pp. 29-38, June 2017, doi:10.25092/baunfbed.320029
- [32] T. Phophongviwat, C. Chat-Uthai, “Minimum Cost Design of Small Low-Loss Transformers” Tencon 2005 Ieee Region 10 Conference, February 2007, doi:10.1109/Tencon.2005.301085
- [33] M. Yıldız, “Güç Transformatorlerinde Meydana Gelen Arızaların Gelişmiş Test Yöntemleri İle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2018.
- [34] Prod. Dr. N. Gülbeyazoğlu, “Elektrik Makinaları I-II”, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1991.
- [35] F. Küçük, “Magnetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi Ve Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2002.
- [36] A. Demir, Z. Saraç, “Tek Saç Testi (Sst) Yöntemi İle Nüve Malzemelerin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi”, Cilt 3, Sayı 6, Syf 99-105, Eleco Makalesi, Aralık 2013.
- [37] A. Mamizadeh, “Yağlı Tip Transformatorlerin Doğrusal Olmayan Dinamik Termal Modellemesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.
- [38] W. D. Callister, Jr., D. G. Rethwisch, “Materials Science and Engineering”, 10th Ed., USA, February 2018.
- [39] A. R. Güven, “Alüminyumun Özellikleri Ve Mekanik Tasarımda Alüminyum”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi, İstanbul, Kasım 2023.
- [40] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, R. Ahuja, “Transformer Design Principles”, Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
- [41] Ş. Bayraktar, Y. Turgut, “Silisli Sacların Mekanik Kesme Prosesinde Gerilim Giderme Tavlamaşının Manyetik Özellikler Üzerindeki Etkileri: Bir Araştırma”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt: 3 Sayı: 2, 2015.
- [42] K. Dawood, M. A. Çakir, S. Tursun, “Copper Vs. Aluminum Windings In Dry-Type Transformers: A Comprehensive Study of Losses, Size, and Technical Attributes”, ISFEE, August 2024.
- [43] J.C. Olivares-Galvan, F. De Leon, P.S. Georgilakis, R. Escarela-Perez, “Selection of Copper Against Aluminium Windings for Distribution Transformers”, IET Electric Power Applications, pp. 474 – 485, August 2010, doi:10.1049/iet-epa.2009.0297
- [44] L. Akbulut, S. S.Tezcan, A. Çoşgun, “Dağıtım Şebekesi Gerilim Konfigürasyonunun Karışık Tamsayı Lineer Programlama Algoritması İle Enerji Maliyeti Yönünden Araştırılması”, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 7(2), 238 – 243, 2019.
- [45] C. K. Alexander, M. M.O. Sadiku, “Fundamentals of Electric Circuits”, 4th ed., 2009.

- [46] Tedaş-Mlz/99-032.E, Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş., “Hermetik Tip Og/Ag Dağıtım Güç Transformatörleri Teknik Şartnamesi”, Güncelleme: Nisan 2017.
- [47] Frer Katalog, [https://novsen.com/images/documents/form/Novsen\\_Form.pdf](https://novsen.com/images/documents/form/Novsen_Form.pdf), Erişim Tarihi: Nisan 2025.
- [48] H. Çınar, N. İmal, E. Şener, “Akım Ölçü Transformatörleri Çalışma Bölgesi Analizi”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt:4, syf. 782-790, 2016.
- [49] H. Çınar, “Ölçme Esaslı Akım Transformatörlerinde Çalışma Bölgesi ve Kararlılık Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 2016.
- [50] Esit Katalog, Ölçü Transformatörleri, <https://esitelectric.com/assets/documents/Esit-Katalog.pdf>, Erişim Tarihi Nisan 2025.
- [51] W. Ziomek, “Autotransformers for Power Systems”, Pti Manitoba Inc., Winnipeg, Mb, Canada, pp. 10 – 14, October 2018, Doi:10.15199/48.2018.10.02
- [52] Yrd. Doç. Dr. A. İ. Çanakoğlu, Yrd. Doç. Dr. A. Ünsal, Yrd. Doç. Dr. N. S. Tunaboşlu, “Elektrik Makinaları”, Tc. Anadolu Üniversitesi Yayını, Eskişehir, 2012.
- [53] A. P. Associates, “Skin Effect, Proximity Effect and The Resistance of Circular and Rectangular Conductors”, May 2021, Citations 22, May 2021.
- [54] H.A. Ariani, “İki Farklı Dağıtım Transformatörün Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Manyetik Alan ve Termal Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Şubat 2021.
- [55] B.L. Theraja, A.K. Theraj, “A Textbook of Electrical Technology Volume I”, London, 2005.
- [56] Emk, “A Comparative Study: Aluminum vs. Copper in Electrical Applications”, <https://elkamehr.com/en/a-comparative-study-aluminum-vs-copper-in-electrical-applications>, Erişim Tarihi 05.2025.
- [57] P. A. Tipler, G. Mosca, “Physics”, W. H. Freeman and Company, pp. 967, New York, 2008.
- [58] N. Hasan, N. R. Nadi, M. A. Haroon, M. A. Akik, “Supervising the Stacking Factor and Magnetic Flux Density: An Effort to Reduce the Loss of Distribution Transformer”, World Science and Technology 2, pp.36 – 40, January 2013.
- [59] Elsan, <https://elsan-tr.com>, Erişim Tarihi 05.2025.
- [60] Tema Metal, <https://temametal.com>, Erişim Tarihi 05.2025.
- [61] Metal Market, [www.metalsmarket.net](http://www.metalsmarket.net), Erişim Tarihi 05.2025.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### **Konferans Bildirileri**

1. Arslan, Ş. & Ayçiçek, E. (2025). Bir Fazlı Transformatörlerin Farklı İletken ve Nüve Tipine Göre Maliyet ve Verimlilik Analizi. 22. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (s. 355-). Ankara