
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE NÜVE MALZEMESİ DEĞİŞKENLİĞİNE GÖRE ELEKTROMANYETİK ANALİZ

Tuğçe Saadet ALTUNSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tuğçe Saadet ALTUNSOY

23/10/2025

KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE NÜVE MALZEMESİ DEĞİŞKENLİĞİNE GÖRE ELEKTROMANYETİK ANALİZ

(Yüksek Lisans Tezi)

Tuğçe Saadet ALTUNSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında 2000 kVA 30/0.4 kV Dyn11 bağlantı grubuna sahip üç fazlı kuru tip bir transformatörün farklı nüve tiplerinde elektromanyetik performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, transformatör çekirdek malzemelerinden M5 ve amorf yapıdaki MOH karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tasarımlarda ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method- FEM) ile gerçekleştirilen elektromanyetik performans değerlendirmeleri, transformatör karakteristikleri, kayıp ve manyetik akı yoğunluğu gibi elektromanyetik durumlar analiz edilmiştir. Nüve malzemelerinin çekirdek kayıpları, manyetik doygunluk ve yüksüz durumda akım hareketlerinin transformatör üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda, elektromanyetik performansı en verimli sonuçları veren tasarım önerilmiştir. Sonuç olarak bu tez çalışması, kuru tip transformatörlerde hem yapısal olarak hem de çekirdek malzeme seçiminin elektromanyetik performansa etkilerini açık bir şekilde ortaya koyup, tasarım sürecindeki optimizasyonlara rehberlik ederek teknik bir destek sağlamaktadır.

Bilim Kodu	:	93412
Anahtar Kelimeler	:	Kuru tip transformatör, elektromanyetik analiz, ANSYS Maxwell, manyetik akı yoğunluğu, termal analiz, çekirdek kayıpları
Sayfa Adedi	:	87
Danışman	:	Prof. Dr. Müslüm Cengiz TAPLAMACIOĞLU
İkinci Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Merve DEMİRCİ

ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF DRY-TYPE TRANSFORMERS BASED ON CORE MATERIAL VARIABILITY

(M. Sc. Thesis)

Tuğçe Saadet ALTUNSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2025

ABSTRACT

In this thesis study, electromagnetic performance analyses were conducted on a three-phase dry-type transformer with a 2000 kVA 30/0.4 kV Dyn11 connection group using different core types. The study comparatively evaluated M5 and amorphous MOH transformer core materials. Electromagnetic performance evaluations, performed using the finite element method (FEM) with ANSYS Maxwell software in the designs, analyzed electromagnetic conditions such as transformer characteristics, losses, and magnetic flux density. The effects of core losses, magnetic saturation, and no-load current movements of the core materials on the transformer were investigated. Based on the analysis results obtained, a design that provides the most efficient electromagnetic performance was proposed. As a result, this thesis study clearly demonstrates the effects of both the structural design and core material selection on the electromagnetic performance of dry-type transformers, providing technical support by guiding the optimization process in the design phase.

Science Code	:	93412
Key Words	:	Dry type transformer, electromagnetic analysis, ANSYS Maxwell, magnetic flux density, thermal analysis, core losses
Page Number	:	87
Supervisor	:	Prof. Dr. Müslüm Cengiz TAPLAMACIOĞLU
Co-Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Merve DEMİRCİ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince engin bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşıp destekleyen değerli danışmanım Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, her aşamada desteğini esirgemeyip bana rehberlik eden ikinci danışmanım Dr. Merve DEMİRCİ'ye değerli katkıları ve desteği için teşekkür ederim.

Beni daima destekleyen koşulsuz sevgi, destek ve güvenleriyle güç veren, bugünlere ulaşmamda en büyük paya sahip olan sevgili aileme en derin minnettarlığımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. TRANSFORMATÖR TEORİSİ 15

3.1. Transformatörlerde Kullanılan Temel Elektromanyetik Yasalar 17

3.1.1. Faraday indüksiyon yasası 17

3.1.2. Amper yasası 19

3.1.3. Gauss'un manyetizma yasası 19

3.2. Transformatörlerin Sınıflandırılması 20

3.2.1. Nüve tipine göre transformatör 21

3.2.2. Gerilim dönüşümüne göre transformatör 22

3.2.3. Amacına göre transformatör 23

3.2.4. Faz sayısına göre transformatör 28

3.2.5. Kullanılan yalıtıma göre transformatör 28

3.2.6. Soğutma yöntemlerine göre transformatör 32

3.3. Transformatörlerde Bağlantı ve Vektör Grupları 35

3.3.1. Yıldız bağlantı 35

3.3.2. Üçgen bağlantı 35

Sayfa

3.3.3. Zigzag bağlantı 36
3.4. Transformatör Kayıpları 37
3.4.1. Nüve kayıpları 38
3.4.2. Histerezis kayıpları 38
3.4.3. Eddy akımı kayıpları (fuko kayıpları, girdap akımı kayıpları) 39
3.4.4. Ek çekirdek kayıpları 39
3.4.5. Bakır kayıpları 39
3.5. Transformatörde Verim 40
3.6. Transformatörlerde Koruma Sınıfları 40
3.6.1. Çevresel koruma (mahfaza koruma sınıfları) 40
3.6.2. Termal koruma (yalıtım sınıfları) 41
4. KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE ANALİZ 43
4.1. Tasarlanan Transformatör Modeli 44
4.1.1. Transformatör modeli 44
4.1.2. B-H eğrileri ile malzeme tepkisi analizi 50
4.1.3. P-B eğrileri ve çekirdek kayıpları analizi 51
4.2. Boşta Akım Davranışı Analizi 53
4.2.1. Çekirdek kayıplarının dağılımı analizi 54
4.2.2. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı 58
4.2.3. Manyetik alan şiddeti dağılımı 60
4.2.4. Akım yoğunluğu dağılımı 62
4.2.5. Manyetik enerji yoğunluğu dağılımı 64
4.3. Tam Yükte Akım Davranışı Analizi 65
4.3.1. Sargı (bakır) kayıpları 67
4.3.2. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı 68
4.3.3. Manyetik alan şiddeti dağılımı 71

Sayfa

4.3.4. Akım yoğunluğu dağılımı 73

4.3.5. Manyetik enerji yoğunluğu dağılımı 74

5. TERMAL PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI 77

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 81

KAYNAKLAR 83

ÖZGEÇMİŞ 87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Transformatörlerde çevresel koruma sınıfları (IP kodlarına göre) 40

Çizelge 3.2. Transformatörlerde çevresel koruma sınıfları (sıcaklık artışına göre) 41

Çizelge 4.1. Tasarlanan transformatör parametreleri..... 44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. İdeal transformatör 18

Şekil 3.2. Sırasıyla çekirdek tipi transformatör, mantel tip transformatör, dağıtılmış tip transformatör 21

Şekil 3.3. Sırasıyla alçaltıcı transformatör, yükseltici transformatör 22

Şekil 3.4. Güç transformatörü 24

Şekil 3.5. Dağıtım transformatörü 25

Şekil 3.6. İzolasyon transformatörü 25

Şekil 3.7. Oto transformatörü 26

Şekil 3.8. Akım transformatörü 27

Şekil 3.9. Gerilim transformatörü 27

Şekil 3.10. Yağlı tip transformatör 29

Şekil 3.11. Kuru tip transformatör 30

Şekil 3.12. Kuru tip transformatör yapısı 31

Şekil 3.13. Onan transformatör 33

Şekil 3.14. Onaf transformatör 33

Şekil 3.15. Ofaf transformatör 34

Şekil 3.16. Ofwf transformatör 34

Şekil 3.17. Yıldız bağlantı 35

Şekil 3.18. Üçgen bağlantı 35

Şekil 3.19. Zigzag bağlantı 36

Şekil 3.20. A) Grup 1 0° (faz kayması yok), b) Grup 2 180° faz kayması, c) Grup 3 +30° faz kayması, d) Grup 4 -30° faz kayması. 37

Şekil 4.1. 3D M5 için transformatör modeli 45

Şekil 4.2. 3D MOH için transformatör modeli 45

Şekil 4.3. 3D M5 transformatörün mesh yapısı 46

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.4. 3D MOH transformatörün mesh yapısı 47

Şekil 4.5. 3D MOH VE M5 transformatörün boşta çalışma devresi 48

Şekil 4.6. 3D M5 B-H eğrisi 51

Şekil 4.7. 3D MOH B-H eğrisi 51

Şekil 4.8. M5 çekirdek malzemesi için P-B eğrisi 52

Şekil 4.9. M5 çekirdek malzemesi için ansys core loss parametreleri (K_H, K_C, K_E) 52

Şekil 4.10. MOH çekirdek malzemesi için P–B eğrisi 52

Şekil 4.11. MOH çekirdek malzemesi için ansys core loss parametreleri (K_H, K_C, K_E) 52

Şekil 4.12. M5 çekirdekli trafonun boşta akım dalga formu 54

Şekil 4.13. MOH çekirdekli trafonun boşta akım dalga formu 54

Şekil 4.14. M5 çekirdek için çekirdek kayıp bileşenleri (Histeresis, Eddy akımı, toplam kayıp) dalga formu 57

Şekil 4.15. MOH çekirdek için çekirdek kayıp bileşenleri (Histeresis, Eddy akımı, toplam kayıp) dalga formu 57

Şekil 4.16. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı M5 (üstteki değer logaritmik, alttaki lineer) 59

Şekil 4.17. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı MOH (üstteki değer logaritmik, alttaki lineer) 60

Şekil 4.18. Manyetik alan şiddeti dağılımı M5 61

Şekil 4.19. Manyetik alan şiddeti dağılımı MOH 62

Şekil 4.20. M5 için akım yoğunluğu dağılımı 63

Şekil 4.21. MOH için akım yoğunluğu dağılımı 63

Şekil 4.22. M5 için manyetik enerji yoğunluğu dağılımı 65

Şekil 4.23. MOH için manyetik enerji yoğunluğu dağılımı 65

Şekil 4.24. M5 çekirdekli transformatörün yük altında akım dalga formu 66

Şekil 4.25. MOH çekirdekli transformatörün yük altında akım dalga formu 67

Şekil 4.26. M5 transformatörün sargı (bakır) kayıpları 68

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.27. MOH çekirdekli transformatörün sargı (bakır) kayıpları..... 68

Şekil 4.28. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı M5 (sırasıyla lineer, logaritmik)..... 70

Şekil 4.29. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı MOH (sırasıyla lineer, logaritmik)..... 71

Şekil 4.30. Transformatör çekirdeğindeki manyetik alan şiddeti dağılımı M5 72

Şekil 4.31. Transformatör çekirdeğindeki manyetik alan şiddeti dağılımı MOH..... 72

Şekil 4.32. Transformatör çekirdeğindeki akım yoğunluğu dağılımı M5 73

Şekil 4.33. Transformatör çekirdeğindeki akım yoğunluğu dağılımı MOH..... 74

Şekil 4.34. Transformatör çekirdeğindeki enerji yoğunluğu dağılımı M5 74

Şekil 4.35. Transformatör çekirdeğindeki enerji yoğunluğu dağılımı MOH..... 75

Şekil 5.1. M5 çekirdeğindeki sıcaklık dağılımı (sırasıyla ikincil sargı, birincil sargı ve nüve) 78

Şekil 5.2. MOH çekirdeğindeki sıcaklık dağılımı (sırasıyla ikincil sargı, birincil sargı ve nüve)..... 79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
∇	Nabla
°C	Celsius (Santigrat)
A	Yüzeyin Diferansiyel Alanı
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
D	Delta
E	Elektrik alanı
f	Frekans (Hz)
H	Manyetik alan şiddeti
I_o	Boşta Çalışma Akımı
I_{enc}	Net Akım (Amper)
J	Akım Yoğunluğu (A/mm2)
Kc	Malzeme Cinsine Bağlı Eddy Kayıp
K_e	Malzeme Cinsine Bağlı Kaçak ve Dielektrik Kayıp
K_h	Malzeme Cinsine Bağlı Histerezis Kayıp
kVA	Kilovolt-amper
L	Endüktans (Henry)
M5	Silisli Sac Çekirdek Malzemesi
MOH	MOH Amorf Çekirdek Malzemesi
N	Sarım Sayısı
P	Güç Kaybı
P_o	Boşta Güç Kaybı
Pc	Eddy Kayıp
Pe	Kaçak ve Dielektrik Kayıp
P_h	Histerezis Kayıp
q_{enc}	Net Elektrik Yükü (Coulomb)
RMS	Root Mean Square (Etkin Değer)
SiFe	Silisyum-Demir

Simgeler	Açıklamalar
T	Tesla
V	Gerilim
W	Manyetik Enerji Yoğunluğu (Weber)
w	Açısal Frekans
Y	Yıldız
Z	Zigzag
ε	Epsilon (Dielektrik Katsayısı)
η	Verim
Φ	Manyetik Akı
Pfe	Nüve Kaybı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AC	Alternatif Akım
ANSYS	Swanson Analysis Systems
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CRGO	Soğuk Haddelenmiş Tane Yönlendirilmiş
EMK	Elektro Motor Kuvveti
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FEMM	Sonlu Elemanlar Yöntemi Manyetik Analiz
FRA	Frekans Yanıt Analizi
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IP	Koruma Sınıfı
OFAF	Zorlamalı Yağ – Zorlamalı Hava Soğutma
OFWF	Zorlamalı Yağ – Zorlamalı Su Soğutma
ONAF	Doğal Yağ – Zorlamalı Hava Soğutma
ONAN	Doğal Yağ – Doğal Hava Soğutma
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
VPE	Vakum Basınç Kapsülleme
VPI	Vakum Basınç Emprenye

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, modern toplumların gelişmişlik ve refah düzeyini gösteren en önemli göstergelerden biridir. Artan nüfus, kent yaşamının getirdiği enerji ihtiyacı ve sanayileşme her yıl enerjiye olan ihtiyacın katlanarak artmasına sebep olmaktadır. Artan enerji ihtiyacı, elektrik enerjisinin verimli, güvenli, ekonomik, sürdürülebilir olarak üretilmesini, iletilmesini ve dağıtımının yapılmasını gerekli kılmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi, üretim santrallerinden tüketime doğru bileşik bir ağ olan elektrik şebekeleri üzerinden iletilerek son kullanıcıya ulaştırılmaktadır.

Enerji verimliliği sürdürülebilir bir yaşam için kurumsal olduğu kadar aynı zamanda bireysel bir sorumluluktur. Yenilenebilir enerji kaynakları gibi enerji sağlayıcıların yaygınlaşması, çevresel kaygılar, karbon salınımının azaltılmasına yönelik politikalar, gelişen teknoloji, elektrik alt yapısını oluşturan sistemlerin ekonomik, güvenilir, çevre dostu ve verimli olarak tasarlanmasını ve işletilmesini gerekli kılmaktadır. Enerjinin iletilmesi ve dağıtılmasında en önemli görevlerden birisini yerine getiren transformatörler bu işte başrol oynamaktadır. Transformatörlerin çalışma performansları elektrik enerjisinin kalitesine ve sürdürülebilirliğine etki etmektedir.

Transformatörler vasıtasıyla, elektrik enerjisinin üretim sahalarından kullanım noktalarına güvenli bir şekilde ulaştırılması için gerilim dönüşümünün belirlenen standartlarda yapılması gerekmektedir. Dönüşüm sürecinde enerji kayıplarının en az seviyede olması, kararlılığın korunması, maliyet etkin ve güvenilir olması istenen durumdur. Elektrik enerjisinin gerilimi kullanım ihtiyacına göre transformatörler aracılığıyla azaltılıp çoğaltılarak enerji akışı yönlendirilebilmektedir. Bu kapsamda, transformatör yapımında tasarım şekli, kullanılan malzeme transformatörün çalışma verimliliğine, maliyetine ve güvenilirliğine doğrudan etki etmektedir.

Transformatörlerin günümüz modern çağ şartlarında akıllı şebeke uygulamaları, yenilenebilir enerji birleşimleri ile dinamik yük koşullarına uyum sağlaması ve çalışma kararlılığını uzun süre sürdürebilmesi beklenir. Gelişen ihtiyaçlar neticesinde transformatör tasarımı yalnızca klasik elektromanyetik prensipler ile sınırlı kalmayıp, metalürji bilimi, ısıl yönetim ve optimizasyon yaklaşımlarını da kapsayan disiplinler arası mühendislik alanına evrilmiştir. Bu kapsamda, kuru tip transformatörler yağ içermeyen yapıları,

yangına karşı güvenli olmaları, bakım ihtiyacının azlığı ve çevre dostu yapıları sayesinde özellikle hassas endüstriyel işletmeler, ticari yapılar, iç ortamlar ve enerji üretim sahalarında yaygın olarak tercih edilmektedirler.

Kuru tip transformatörlerde nüve seçimi performansları üzerinde doğrudan etkili olan en kritik parametrelerden biridir. Nüve elektromanyetik indüksiyon yoluyla iletim ve gerilim dönüşümünü gerçekleştirirken aynı zamanda, doygunluk seviyesi, histerezis, fuko akımı kayıpları ve kaçak akım gibi transformatörün genel elektromanyetik karakteristiklerini de belirler. Bu nedenle, geleneksel olarak adlandırılan fiyatı uygun olan M5 tipi nüveler, kabul edilebilir performans düzeyleriyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu tarz uygun nüve malzemeleri, elektromanyetik performans açısı bakımından özellikle yüksek frekanslı uyarımlar, harmonikler ve uzun süreli termal zorlanmalar altında sınırlı bir performans gösterebilmektedir. Bu noktada devreye MOH gibi yeni nesil amorf alaşımlar, daha iyi manyetik sonuçlar, daha düşük çekirdek kayıpları, daha dayanıklı elektriksel direnç yapılarıyla öne çıkmaktadırlar. Nüvenin transformatör üzerindeki yetkinlikleri sadece manyetik ve fiziksel özellikleriyle sınırlı değildir. Yapısal özelliklerde performansı doğrudan etkiler. Bu durum transformatörlerde hava sirkülasyonu, manyetik alan dağılımı ve enerji yoğunluğu açısından belirleyici niteliklerdir.

Bu çalışmanın temel amacı, 2000 kVA gücünde, 30/0.4 kV gerilim seviyesinde çalışan üç fazlı kuru tip transformatörde kullanılan farklı iki tip çekirdek malzemesinin elektromanyetik performanslarının karşılaştırmalı olarak analiz edilerek değerlendirilmesindir. Bu kapsamda, çekirdek malzemesi olarak yaygın bir şekilde tercih edilen geleneksel yapılı M5 ile amorf yapılı MOH malzemesi karşılaştırılmıştır. Her iki çekirdek materyali için çalışma şartları, geometrik boyutlar ve bobin yapısı aynı şekilde tutularak yalnızca malzeme özelliklerinden kaynaklanan farklılıkların analizi temel amaç edinilmiştir.

Gerçekleştirilen araştırma ve analizler kapsamında, transformatörlerin boşta ve yükte çalışma durumları ayrı ayrı ele alınarak manyetik akı yoğunluğu dağılımı, manyetik alanın şiddeti, çekirdek kayıpları, enerji dağılımı ve akım yoğunluğu gibi elektromanyetik parametreler değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak elde edilen bulgular, nüve malzemesi seçiminin transformatör verimliliği ve enerji kayıpları gibi pek çok parametrede önemli etkileri olduğunu açık bir şekilde göstermiştir.

Ayrıca nüve ve sargı bölgelerindeki sıcaklık dağılımı için ANSYS Icepak arayüzü kullanılarak termal analiz gerçekleştirilmiştir. Böylece nüve malzeme seçiminin sadece elektromanyetik sonuçlar üzerinde değil aynı zamanda termal kararlılık açısından da etkisinin olduğu gösterilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Seda Kül, Seyit Alperen Çeltek ve İres İskender üç fazlı kuru tip transformatör verimliliği için meta sezgisel algoritma tabanlı yaklaşımlar üzerine çalışmışlardır; benzetimli tavlama, parçacık sürü optimizasyonu ve ağaç tohum algoritması kullanarak verimlilik açısından 100 kVA bir kuru tip transformatör üzerinde kıyaslamaları gerçekleştirmişlerdir [1]. Transformatörde iyileştirme parametreleri olarak çekirdek kalite faktörü ve akım yoğunluğu seçilmiştir. Benzetimli tavlama, parçacık sürü optimizasyonu ve ağaç tohum algoritmaları ile en ideal çekirdek kalite faktörü ve akım yoğunluğu belirlenerek transformatör boyutları üzerinde her yöntemin en ideal hali tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen modellemeler ve analizler sonucunda verimliliğe en hızlı ulaşan yöntemin ağaç tohum algoritması olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma kuru tip transformatörlerde verimliliği arttırmak için nasıl bir yol izlenmesi gerektiği konusuna katkı sağlamaktadır.

Sarpreet Kaur ve Damanjeet Kaur çalışmalarında transformatör tasarımı için uygun bir nüve malzemesi seçmek amacıyla, akım ve gerilim kayıpları, akı, empedans, verim gibi durumların nüve malzeme seçiminde önemli olduğunu vurgulamışlardır [2]. Bu çalışmada CRGO Silikon Çelik, Amorf ve Finemet materyalleri kullanılarak 3 boyutlu tasarımlar ve analizler gerçekleştirilerek kayıp değerleri karşılaştırılmış ve transformatör performansı hakkında önemli sonuçlar elde edilmesine katkıda bulunulmuştur.

H. D. Mehta ve Rajesh M. Patel çalışmalarında transformatör tasarımında iyileştirme ve performans analizleri için yapay zeka teknikleri hakkında incelemeler gerçekleştirmişlerdir [3]. Genetik Algoritma, Yapay Sinir Ağları, Yapay Arı Kolonisi Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Ateşböceği Algoritması ve Yarasa Algoritması gibi daha pek çok geleneksel ve yapay zeka tekniklerine değinerek transformatör tasarımı iyileştirmelerinde nasıl kullanılabileceği üzerine tartışılmıştır.

M. Eslamian, B. Vahidi ve S.H. Hosseinian çalışmalarında reçineli kuru tip transformatörlerin önemini vurgulayarak yüksek frekanslı modelinin nasıl tasarlanması ile ilgili bilgiler vermektedir [4]. Özellikle frekans değerinin endüktans üzerindeki etkisi dikkate alınarak tasarım sırasında direnç ve endüktans değerleri FEM yöntemiyle hesaplanıp modeli doğrulamak için, transformatörün yüksek gerilim sargısına test düzeneği kurulmuştur. Simülasyon sonuçları FRA (Frequency Response Analysis) ve darbe

testlerinden ölçülen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçları ve simülasyon ve arasındaki karşılaştırma, test edilen parametrelerin dökme reçineli kuru tip transformatörlerin geçici davranışının modellenmesine katkıda bulunmuştur.

Seda Kül ve Süleyman Sungur Tezcan çalışmalarında farklı nüve malzemesi kullanılarak kuru tip transformatörün çekirdek kayıplarını ve termal davranış farklılıklarını incelemek için FEA (Finite Element Analysis) ile termal sıcaklık ve kayıp değerleri karşılaştırılmıştır [5]. Bu çalışma ile farklı nüve malzemelerinin manyetik akı yoğunluğu ve güç kayıplarına bağlı olarak zamana bağlı çekirdek sıcaklığı üzerindeki etkileri belirtilmektedir. Zamana bağlı elektromanyetik analizde M5, M4 ve M3 elektriksel silikon çeliklerin akı yoğunluğu, sargı kayıpları ve çekirdek kayıplarına ulaşmak ve elektromanyetik davranışları ve çekirdek kayıpları arasındaki farkları karşılaştırmak için gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre sıcaklık değerlerinin büyükten küçüğe sırasıyla M5, M4 ve M3 şeklinde verilmiştir. Ayrıca ilgili çalışmada, transformatörün termal davranışını incelemek için ısı kaynağı olarak elektromanyetik analiz sonuçlarından faydalanabilmek için ANSYS/Workbench kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Min-Fu Hsieh, Chang-Hung Hsu, Chao-Ming Fu ve Yi-Mei Huang yüksek geçirgenlikli ferromanyetik çekirdekli ve kısa devre koşulları için güçlendirilmiş sargılı transformatör tasarımı üzerine çalışmalar yapmışlardır [6]. Analizler 1000 kVA üç fazlı yağlı tip transformatör üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile parçacık sürü optimizasyonunun bir arada kullanıldığı bir metot geliştirilmiştir. HB1 amorf, SA1 amorf ve silikon çelik çekirdek malzemeleri ile kıyaslamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde amorf yapılı malzemelerin daha düşük çekirdek kaybı ve gürültü seviyesine sahip olduğu tespit edilerek yüksek performanslı transformatörlerde kullanılabilineceği öngörülmüştür.

Kamran Dawood, Güven Kömürgöz ve Fatih Işık çalışmalarında transformatör modellemesi için FEM (Finite Element Method) kullanarak farklı nüve malzemelerinin kayıplarını incelemişlerdir. Transformatör analizinde çekirdek malzemesi olarak M5 ve M4 tane yönelimli silisyum çelik malzemeler kullanılmıştır [7]. Yapılan analizler sonucunda 2 boyutlu model ile deneysel sonuçlar arasındaki yüzdelik fark yaklaşık %3 çıkmıştır. Simülasyon sonuçlarında, M5 CRGO (Cold Rolled Grain Oriented) silisyum çelik çekirdek malzemeli transformatördeki yüksüz kayıpların, M4 CRGO silisyum çelik

çekirdek malzemeli transformatöre kıyasla %30 daha fazla olarak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda transformatör nüvesinin M4 CRGO silikon çelik malzemesi ile tasarlanırsa çekirdek kayıplarının maliyetini en aza indirken aynı zamanda transformatörün ömrünü uzatmaya katkı sağlayacağı gösterilmiştir.

Mihail Digalovski, Krste Najdenkoski ve Goran Rafajlovski çalışmalarında üç fazlı dağıtım transformatörlerinin harmonik akımın çekirdek kayıplarına etkisini incelemişlerdir [8]. Bu çalışmada üç fazlı dağıtım transformatörü evsel yüklerden kaynaklanan doğrusal olmayan yükler altında incelemeye alınmıştır. Maxwell'de geliştirilen transformatörün üç boyutlu modeli kullanılarak çekirdek kayıpları, yüksek harmonik koşullar altında transformatör sargılarında farklı uyarma akımları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca dağıtım transformatörünün yüksüz kayıplar üzerindeki harmonik etkisinin yanı sıra yüksüz kayıplarda ele alınmıştır. Bu araştırmada sunulan metodoloji ile yüksüz kayıpların azaltılmasına yönelik sonuçlar elde edilmiştir. Böylece dağıtım trafolarının tasarım süreçlerinde bu sonuçlar baz alınarak tasarımlar elde edilmiştir.

Shabana Urooj, Tanya Singh, Mohammad Amir ve Mohd Tariq çalışmalarında ANSYS programını kullanılarak gelişmiş çekirdek malzemeli güç transformatörünün optimum tasarımı üzerine çalışmışlardır [9]. Bu araştırma makalesi, Mo.Me^{6} gibi yeni bir çekirdek malzemesinin demir çekirdek materyali ile karşılaştırılarak transformatörün optimum performansını değerlendirmektedir. Önerilen transformatör modeli için verimlilikte artış olasılığı gözlemlenmektedir. Tasarım aşamasında mıknatıslanma karakteristiğini yorumlayabilmek için manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti grafiği (BH), manyetik akı yoğunluğu ve güç kaybı grafiğiyleyse (PB) çekirdek malzemesinin manyetik akı yoğunluğuna karşılık olarak ürettiği kayıp hakkında fikir sahibi olunabilmesi adına bu değerlere yer verilmiştir. Analizler sonucunda enerji yoğunluğu, manyetik akı yoğunluğu, giriş gerilim değerleri, akım değerleri ve en önemlisi kayıp değerleri incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Çekirdek parametreleri, anma değerleri ve buna benzer değerler ile transformatörün farklı koşullarda çalışmasının analizlerini gerçekleştiren kayıp parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. ANSYS yazılımını kullanmanın bir avantajı, kullanıcının çalışma ortamını tüketicinin ihtiyacına göre değiştirmesine olanak sağlamasıdır. Bu çalışmada yeni nüve malzemesi ile boşta kayıplar azaltılarak genel

verimlilik artırılabileceği ve bununda güç transformatörünün ömrünü artıracağı değerlendirilmiştir.

Eslamian, Vahidi ve Eslamian dökme reçineli kuru tip transformatörlerin termal analizi üzerine çalışmışlardır [10]. Bu makalede, dökme reçine transformatörlerinin sıcaklık dağılımı için kullanılan iki farklı yöntemden ilki hava soğutmalı dikey kanallar için deneysel-analitik formül kullanan FEM tabanlı bir model ve ikincisi ANSYS CFX yazılımı ile akış ve ısı transferi gibi iç ve dış akış problemlerini çözümlemek için kullanılan yazılımında oluşturulan 3 boyutlu sonlu hacim tabanlı bir CFD (Computational Fluid Dynamics) modelidir. Simülasyon sonuçlarında, bazı faktörlerin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri her iki model yardımıyla sonuçlandırılarak çözümlendirilmiştir. Analizler sonucunda karşılaştırılan iki modelden ANSYS CFX sonuçlarının doğru olmasına rağmen önerilen kısa çözüm süresine sahip FEM tabanlı modelin süresel olarak avantajı olduğunu ve sonuçlarının gerçek tasarım uygulamaları için yeterli olduğu vurgulanmıştır.

Yongqiang Wang, Zhaoxin Wang ve Sen Fang çalışmalarında farklı uyarımlar altında kuru tip transformatörün elektromanyetik ve sıcaklık analizleri gerçekleştirmişledir [11]. Transformatör çekirdeğinin kayıplarını, manyetik alanını, sıcaklık alanını ve sıcaklık artışını analiz etmek için, sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir kuplaj analiz yöntemi önerilerek kuru tip transformatörün manyetik alanı hesaplanıp çekirdek kaybı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan sonra çekirdek kaybı yoğunluk dağılımı, ısı kaynağı olarak sıcaklık dağılımı ile ilişkilendirilmiş ve transformatördeki sıcaklık dağılımı, sıcaklık artışının olduğu bölgeyi tespit etmek için akışkan-termal kuplaj yöntemi ile hesaplamalar yapılmıştır. Özellikle termal kuplaj yöntemine dayanarak farklı uyartımlar altında transformatör çekirdeğinin sıcaklık dağılımı ve manyetik alanı hesaplanarak, harmoniklerin çekirdeğin sıcaklık artışı ve çekirdek kaybı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sıcaklık dağılımı analizinde hava akışının dikkate alınması, yüzey ile onu çevreleyen hava arasında gerçeklesen konvektif ısı transferi analizinin etkisini ortadan kaldırabildiği ve sıcaklık dağılım hesaplamasının doğruluğunu etkili bir şekilde etkilediği gösterilmiştir.

Aykut Ilgazı, Mehmet Bayırlı ve Mehmet Aygören transformatör sisteminde manyetik akı dağılımının incelenmesi yöntemiyle güç kayıplarının belirlenmesi üzerine çalışmalarda

bulunmuşlardır [12]. Tasarlanan deneysel sistemde transformatörün çekirdek yani nüve kısmını oluşturan silisyum-demir (SiFe) levhalardaki manyetik akının özellikleri dairesel sensörler aracılığıyla araştırılmıştır. Çekirdek için kullanılan malzemenin manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti (B-H) karakteristiği manyetik akı dağılımı hesaplama yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır. Malzemeden en yüksek verimin alınabileceği optimum manyetik indüksiyon değeri B-H karakteristiği kullanılarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra boşta çalışma durumunda meydana gelen demir kayıpları, eddy ve histerezis kayıpları cinsinden hesaplanmıştır. Bu çalışma sonucunda transformatörde nüve için kullanılan malzemenin demir kayıplarına etkisi araştırılmıştır. Hesaplamalar sonucunda demir kayıpları, herhangi bir sorun karşısında üretim öncesi transformatörlere müdahale edilmesine olanak sağlayarak maliyetlerin düşürülmesi çalışmalarına katkıda bulunmuştur. Analizler sonuçlarına göre boşta çalışma sırasında kaybolan enerjinin büyük bir bölümü histerezis ve eddy kayıplarından kaynaklanırken, bakır kayıplarının ise ihmal edilebilecek kadar düşük bir seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Jacek Smolka ve Andrzej J. Nowak çalışmalarında orta güçte kuru tip elektrik transformatörüne bağlı akışkan akışı, ısı transferi ve elektromanyetik numerik modelinin deneysel doğrulaması üzerine araştırma yapmışlardır [13]. Amaç, nüve ve sargılardaki özgül güç kayıplarını araştırmanın yanı sıra, çeşitli sargı türleri ve lamine çekirdek malzemeleri için anizotropik ısı iletkenliklerini elde etmeye çalışarak dijital ve analitik modeller gerçekleştirilmiştir. Nümerik modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla mevcut Avrupa Standartlarına göre transformatörlere nominal parametre değerleri ile deneysel sıcaklık testleri uygulanmıştır. Analiz sonuçları için ayrıca hesaplanan sıcaklık değerleri kızılötesi görüntüleme kullanılarak karşılaştırılmıştır. Analizler nümerik sonuçların transformatör ve çevresindeki sıcaklık dağılımının öngörüsünün doğru bir şekilde tespit ettiğini göstermiştir.

Burak Esenboğa ve Tuğçe Demirdelen 3 fazlı kuru tip transformatörlerin verimlilik ve maliyet bazlı çoklu optimizasyon ve termal/elektromanyetik analizleri adlı çalıştırmayı gerçekleştirmişlerdir. Analizler için transformatörde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak nüve ve sargılarda oluşan ısı sebebiyle sıcaklık dağılımını incelemişlerdir [14]. Ayrıca bu transformatör modeli için PSO (Particle Swarm Optimization) algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Deneyler, laboratuvar ortamında transformatörün maksimum yük

altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gerçek transformatör modelinin sıcaklık dağılımının deneysel çalışması ile doğrulanmıştır.

Yıldırım Özüpak, İbrahim Halil Teke ve Mehmet Salih Mamiş çalışmalarında transformatörlerin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizini gerçekleştirmişlerdir [15]. Üretim aşamasında bir transformatörün elektriksel, manyetik ve fiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda hedeflenen parametrelerde ve verimlilikte çalışabilmesi için tasarlanacak olan transformatörün iyi bir analiz programı ile modellenmesi, test şartlarının yerine getirilmesi ve son olarak da daha sonra oluşabilecek problemlerin önüne geçilmesi acısından büyük bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu araştırma çalışmasında, transformatör simülasyonu için FEM yöntemi ile ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmıştır. ANSYS Maxwell ile transformatörün sargılarında ve çekirdeğinde oluşan manyetik alan yoğunluğu, akım yoğunluğu, manyetik akı çizgileri ve manyetik alan gücü gibi hesaplanan sonuçları ile bu verilerin transformatör üzerindeki kayıplara etkisi araştırılmıştır. Simülasyonu gerçekleştirilen transformatör için nominal değerler dikkate alınarak laboratuvar ortamında yapılan fiziksel ve elektriksel ölçümlere dayanarak gerekli parametreler hesaplanmıştır. ANSYS Maxwell de deneysel bulgular ile elde edilen veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda ANSYS Maxwell de deneysel bulgular ile oluşturulan modelin sonuçlarının tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Soumyadeep Maity, Subhajit Maur, Sovan Dalai, Biswendu Chatterjee ve Saibal Chatterjee kuru tip bir transformatörün FEMM ve ANSYS Maxwell kullanılarak elektromanyetik ve termal modellemesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır [16]. Bu makalede kullanılan FEMM (Finite Element Method Magnetics); 2 boyutlu düzlem (2D planar) ve eksenel simetrik geometrisine sahip manyetik, elektrostatik ve ısı iletim problemlerini çözmek için kullanılan FEM tabanlı bir programdır. Bu araştırma çalışmasının amacı elektromanyetik ve termal modeller geliştirmek için seçilen metodoloji ve modelleme tekniklerinin seçilmesinin nedenleri hakkında yararlı bilgiler sağlamaktır. Modelleme için gerekli olan parametreler transformatörün fiziksel ölçüm değerlerinden elde edilmiştir. Elektromanyetik modelleme analizi sonucunda, çekirdek kayıpları hesaplanmıştır. FEMM ve ANSYS Maxwell analiz programları ile tahmin edilen çekirdek kayıpları değeri, önerilen modelleme yönteminin verimliliği ile alakalı bilgiler sağlamaktadır. Yapılan çalışmada FEM simülasyonlarının transformatörün termal davranışı, manyetik akı dağılımı ve çekirdek kayıplarını hesaplama açısından önemli bir

etken olduğu anlaşılmıştır. Bu araştırmadan elde edilen bulgular, kuru tip transformatörlerin tasarımı ve optimizasyonu ile ilgili fikir üretilmesine yardımcı olmuştur.

Berkin Özyalçın enerji sistemlerinde 400 kVA'ya kadar kuru tip trafolar, verimi etkileyen faktörler ve tipik örnek adlı yüksek lisans tez çalışmasında Matlab yazılımı aracılığıyla kuru tip transformatörün modelini oluşturarak oluşturulan bu model üzerinden verim değerinin değişim gözlemi incelenmiştir [17]. Türkiye'de kullanılan transformatör çeşitlerinden bahsedilerek tasarımı gerçekleştirilecek olan transformatör için fikir sahibi olunması amaçlanmıştır. Bu çalışmada herhangi bir yük durumunda (%0 değerinden %100 değerine kadar yüklenmesi) bakır ve demir kayıplarının oranından elde edilen değer ile verim eğrilerini karşılaştırılmıştır. Böylece transformatörün kullanım değer aralığı belirlenerek verimin en yüksek olduğu bölgede transformatörün çalışması amaçlanmıştır.

Keyur H Desai ve Sameer B Patel çalışmalarında güç transformatörünün FEM ile ısıl analizini gerçekleştirmişlerdir [18]. Bu makalenin amacı aslında ANSYS platformunda simülasyonu aracığıyla sayısal yöntemlerden faydalanarak sonlu elemanlar yöntemi ile güç trafosunda sıcaklık noktasının (hot point) elde edilmesine odaklanılmasıdır. Ayrıca transformatör tasarımı için Ansys Maxwell çözüm diyagramı verilerek olayın bütününün kolayca anlaşılması amaçlanmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar yönteminde (FEM) kullanılan tekniğin genel görünümü ve önemi tartışılmıştır.

Chao Liu, Jiangjun Ruan, Wu Wen, Ruohan Gong ve Caibo Liao çalışmalarında sıcaklık artışının kuru tip transformatör tasarımında önemli bir etken olduğunu vurgulayarak aşırı sıcaklık artışı elektriksel yalıtımı bozabileceğini bunun yanı sıra transformatörün yanabileceğini belirtmektedir [19]. Ayrıca bu makalede yarı-3 boyutlu kuplaj alan yöntemi ile birincil ve ikincil sargıların sıcaklık artış analiz gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Ilyas Soltanbayev, Radkhan Sarmukhanov, Sanzhar Kazymov, Talgat Otelgen, Mehdi Bagheri, otomatik kuru tip transformatör yaşlanma değerlendirmesi: bir simülasyon çalışması adlı makalelerinde kullanım ömrü ve yaşlanma oranını tahmin eden bir akıllı sistem üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir [20]. Transformatörün çeşitli çevre koşulları ve yük altında sıcaklık analizi yapılarak sıcaklık dağılımı ve yaşlanma oranını tahmin etmek için algoritma tasarlanmıştır.

Günümüz güç sistemlerinde, elektrik enerjisinin güvenilir bir şekilde aktarımını sağlamak için transformatörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında gerilim seviyelerini ayarlayarak tüm şebekenin verimliliğini ve kararlılığını artırmaya yardımcı olurlar. Bu bağlamda, transformatör tipleri arasında yer alan kuru tip transformatörler, yangına dayanıklılık özellikleri, yağsız olması, kompakt tasarımları ve güvenli yapıları ile günlük konutlardan endüstriyel erişime, ticari yapılara ve alternatif enerji sistemlerine kadar birçok alanda yaygın olarak tercih edilebilir [1,4]. Özellikle iç mekan uygulamalarında, reçine yapıları nedeniyle yangın riski taşımamaları, hava sirkülasyonu ile soğutulmaları ve bakım koşullarının düşük olması, kuru tip transformatörlerin popülerliğini artıran özellikler olmuştur. Artan enerji verimliliğine yönelik talepler. Kuru tip transformatörlerin yük kapasitesi, kararlı, güvenilir ve düşük enerji kayıplı çalışması sadece bir tercih değil, aynı zamanda üretilebilen bir tasarım haline gelmiştir [4,7,11].

Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda sürekli çalışma, yetersiz soğutma veya aşırı ortam koşullarına maruz kalma gibi faktörler nedeniyle termal strese daha duyarlı olan kuru tip transformatörlerde, çekirdek malzemesinin doğru seçimi sistemin performansını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Çekirdek malzemesi, özellikle manyetik akı yoğunluğu, uyartım akımı ve çekirdekteki kayıplarda belirleyici bir rol oynar ve buna transformatörün elektromanyetik performansı denir [4,10]. Geleneksel olarak, M5 gibi tane yönelimli silisyum çelikleri, düşük maliyetleri ve kabul edilebilir elektromanyetik özellikleri nedeniyle kuru tip transformatörler için sıklıkla tercih edilir. Ancak, bu malzemelerin yüksek frekanslı uyartım, harmonikler ve uzun vadeli termal stres koşulları altındaki performansı bazen sınırlı olabilir [5,7].

Bu tez çalışmasının üçüncü bölümünde transformatör hakkında genel bilgiler, çalışma prensibi, transformatörlerde kullanılan temel elektromanyetik yasalar, transformatörlerin sınıflandırılması, bağlantı ve vektör grupları, transformatörlerde meydana gelen kayıplar ve koruma sınıflarına değinilmektedir.

Dördüncü bölümde, tasarlanan kuru tip transformatörlerin elektromanyetik performansı ANSYS Maxwell kullanılarak ayrıntılı bir şekilde analizleri gerçekleştirilmiştir. Transformatörlerin model geometrileri oluşturulup karşılaştırılması gerçekleştirilecek olan MOH ve M5 nüve değerlerine göre B-H ve P-B eğrileri çizilmiştir. Ardından transformatör

boşta ve yükte çalışma koşulları altında manyetik akı yoğunluğu dağılımı, alan şiddeti dağılımı, enerji yoğunluğu dağılımı, akım yoğunluğu çekirdek ve sargı kayıpları davranışları sistematik bir şekilde açıklanmaktadır.

Beşinci bölümde, MOH ve M5 nüveleri için ANSYS Icepak arayüzü kullanılarak termal analiz gerçekleştirilerek sargı ve nüve üzerindeki sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Sonuç bölümünde ise analiz sonuçlarından elde edilen veriler ortaya konularak karşılaştırılmaları gerçekleştirilmiştir.

3. TRANSFORMATÖR TEORİSİ

Alternatif akım (AC) gerilimini yükselten veya alçaltan elektrik makinelerine transformatör denir. Transformatörler elektrik enerjisinin iletiminde ve dağıtımında sıklıkla kullanılırlar. Temel olarak kabul edilen ilk elektromanyetik indüksiyon cihazı Michael Faraday tarafından 1831 yılında icat edildi. Faraday'ın kapalı demir çekirdek ve iki bağımsız bobinden oluşan düzeneği günümüz transformatörlerinin temel çalışma prensibini açıklamaktadır. Günümüze kadar farklı tip pek çok indüksiyon cihazı geliştirilmiştir. Joseph Henry 1832 yılında öz indüksiyonu keşfederek yüksek gerilimlerin üretilebilineceğini ortaya koyarak transformatör fikrinin gelişimi için zemin hazırlamıştır. Transformatör ilk olarak 1885 yılında Karoly Zipernowsky, Miksa Deri, and Otto Blathy adlı üç Macar Mühendis tarafından tasarlanarak paralel dağıtım sisteminin temellerini atmışlardır [21].

Transformatörün oluşumunda pek çok fikir denenerek günümüzdeki halini almış durumda ve halen gelişmeye devam etmektedir. Temelinde ise elektrik enerjisinin bir devreden diğerine manyetik alan yardımıyla aktaran basit bir sistem gibi gözükebilir, ancak çekirdek için kullanılan malzeme yapısı, bulunduğu ortam koşulları ve sargıların sarım şekli gibi pek çok parametreden etkilenmektedirler.

Transformatörlerde ısınma her zaman sorun olmuştur. Bu yüzden soğutma sistemi günümüz dahil genellikle çeşitli yağlar kullanılarak sağlanmaktadır. Yağ, yüksek dielektrik dayanımı ve ısı iletkenliğine sahip olduğu için oluşan kayıplardan (çekirdek ve sargı) meydana gelen ısınmanın azaltılmasında etkili bir rol oynar. Ancak zamanla çevre üzerinde etkileri bakım maliyetleri ve yanabilme durumu sebebiyle alternatifler aranmaya başlanmıştır. Halen günümüzde pek çok alanda yağlı tip transformatör kullanılsa da güvenlik odaklı yerlerde özellikle iç mekanlarda kuru tip transformatör kullanımı tercih edilmeye başlanılmıştır. Kuru tip transformatörün epoksi reçine ile kaplanmış sargılar ve cam elyaf gibi materyaller sayesinde kısmı deşarj, nem ve toza karşı dayanıklılık arttırılmıştır. Bu sayede kuru tip transformatörler yalıtım kalitesinin artmasının yanı sıra hem yangın güvenliği açışından hem de uzun ömürlülük bakımından pek çok avantaj sunmaktadırlar. İşte bu nedenle kuru tip transformatörler, hastane, okul, çok katlı binalar, alışveriş merkezleri, kuru yük gemileri, enerji santralleri, kimya sanayisinde, maden

sektöründe ve metro sistemleri gibi pek çok sanayi sektöründe ve endüstriyel uygulamada yağlı tip transformatörlerin yerine kullanılmaktadır.

Kuru tip transformatörlerin yağlı tip transformatörlere göre kıyaslandığında pek çok avantajı vardır. Bunlar;

- Yağlı tip transformatörler yanıcı olabildikleri için ticari ve endüstriyel uygulamalarda kuru tip transformatör kullanımı yangın riski önemli ölçüde azaltılır.
- Çevresel hassasiyet kuru tip transformatörleri daha kullanılabilir hale getirmektedir. Yağlı tip transformatörlerde yağ kaçağı ihtimali çevresel bir kirlenmeye sebep olacağı için sızan kimyasalların topraktan ve sudan temizlenme maliyeti arttıracaktır.
- Kuru tip transformatörlerin nüve ve sargıların daha büyük olmasına karşı yağlı tip transformatörler, kuru tip transformatörlerin toplam boyutu soğutma radyatörleri bulunmadığı için daha küçüktürler.
- Kurulum maliyetleri daha düşüktür. Yağlı tip transformatörler bazı durumlarda ek kurulum gerektirir. Bu ek kurulumlar, yağ sızdırmazlık güvenliği, yağ dolum boşaltım sistemleri ve yangın güvenlik sistemleri gibi bileşenlerden oluşabilir. Bu durum ise genel maliyeti etkilemektedir.
- Kuru tipin bakımı kolaydır ve işletme maliyeti yağlı tipe göre çok daha düşüktür. Çekirdek ve bobinlerin onarımı için yağlı tipte tanktan çıkarılması gerekir ve bu durum maliyetleri arttırmaktadır.

Sonuç olarak, yağlı ya da kuru fark etmeksizin transformatör tasarımı yalnızca elektromanyetik performansa değil aynı zamanda yalıtım malzeme seçimi, termal kontrol, çevresel sürdürülebilirlik ve en önemlisi güvenli çalışma koşullarına dayanmaktadır. Bu noktada malzeme seçimi özellikle çekirdek malzemesinin (bu tez çalışmasında bahsedilen M5 silisyum çeliği ve MOH amorf alaşımı) transformatörün kayıplarını, verimliliğini ve ısıl davranışını doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biridir.

3.1. Transformatörlerde Kullanılan Temel Elektromanyetik Yasalar

3.1.1. Faraday indüksiyon yasası

Transformatörler, Faraday'ın manyetik indüksiyon yasası kullanımının bir uygulamasıdır. Faraday, kapalı bir devrede indüklenen elektromotor kuvvetin (emk, V_{emk}), devre tarafından çevrelenen manyetik akının zamana göre değişim hızına eşit olduğunu keşfetmiştir. Bu yasa ilk olarak integral formda,

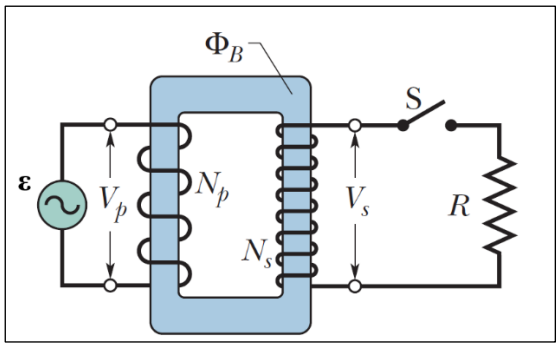
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{a} \tag{3.1}$$

biçimindedir. Burada; E elektrik alan vektörünü (*V/m*), l kapalı yol üzerindeki diferansiyel uzunluğu (*m*), B manyetik akı yoğunluğu (*Tesla*) ve a ise bu kapalı yolun çevrelediği yüzeyin diferansiyel alanını (m^2) temsil eder. Stokes teoremini uygulanarak diferansiyel forma dönüştürülmüş hali,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \tag{3.2}$$

Yukarıdaki bu denklem zamanla değişen bir manyetik alanın bulunduğu her noktada bir girdap tipi elektrik alan oluşacağını gösterir. Eğer *N* sarımlı bir bobinden geçen manyetik akıyı (ϕ_B) değiştirirsek, her sarımda bir indüklenen elektromotor kuvvet ortaya çıkar ve bobinde indüklenen toplam elektromotor kuvvet, bu öznel olarak indüklenen elektromotor kuvvetlerin toplamı olur. Yani transformatörlerde primer sargıdan geçen alternatif akım zamanla değişen bir manyetik akı oluşturur ve bu akı, sekonder sargı üzerinde gerilim indüklenmesine neden olur. İndüklenen toplam elektromotor kuvveti, ε şu şekildedir [22],

$$\varepsilon = -N\frac{d\phi_B}{dt} \tag{3.3}$$



Şekil 3.1. İdeal transformatör

İdeal transformatör (Şekil 3.1), bir demir çekirdek etrafına sarılmış, farklı sarım sayılarına sahip iki bobinden oluşur. Kullanımda, N_p sarımlı birincil sargı, herhangi bir t anındaki elektromotor kuvveti değeri aşağıdaki şekilde verilen bir alternatif akım kaynağına bağlanır,

$$\varepsilon = \varepsilon_m . sin\, wt \tag{3.4}$$

İkincil sargı, yük direnci R'ye bağlıdır, ancak S anahtarı açık olduğu sürece devresi açıktır. Dolayısıyla, ikincil bobinden akım geçmez. Bu ideal transformatör için ayrıca birincil ve ikincil sargıların dirençlerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayılır. Burada ε anlık gerilim, ε_m maksimum gerilim ve w açısal frekans değerleridir.

Varsayılan koşullar altında, birincil sargı (primer) endüktif bir davranış sergiler ve kaynağa göre yaklaşık 90° faz gerisinde kalan küçük bir mıknatıslama akımı çeker. $P_{ortalama} = \varepsilon_{rms} \cdot I_{rms} . cos\, \phi$ formülü baz alındığında birincil sargının güç faktörü (cos (90) = 0) sıfırdır; bu nedenle kaynaktan transformatöre güç iletilmez. Ancak gerçekte sargı direnci ve çekirdek kayıpları nedeniyle aktif bileşen de içerir. Bu nedenle güç faktörü sıfıra yakın bir değere sahip olur. Manyetik alanın sürekliliğini sağlamak ve çekirdek kayıplarını karşılamak amacıyla küçük miktarda aktif güç de çekilir. Aslında, sarım başına elektromanyetik kuvvet, birincil ve ikincil sargıda aynıdır [24].

$$\varepsilon_{tur} = \frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \tag{3.5}$$

Burada: ε_{tur} tur başına düşen gerilim, V_p birincil sargı gerilimi, V_s ikincil sargı gerilimi, N_p birincil sargı sayısı ve N_s ikincil sargı sayısıdır.

3.1.2. Amper yasası

Amper yasası, manyetik alan şiddetinin (*H*) kapalı bir yol etrafındaki çizgi integralinin, yol tarafından çevrelenen net akım (I_{enc}) ile aynı olduğunu belirtir. Bu yasa, özellikle akım taşıyan iletkenlerin çevresinde oluşan manyetik alan dağılımını açıklamak açısından önemlidir.

$$\oint_L \vec{H}\, d\vec{l} = I_{enc} \tag{3.6}$$

Amper yasası, manyetik alan şiddetini belirlemek için akım dağılımı simetrik olduğunda kolayca uygulanabildiği için Gauss yasasına benzemektedir. Yukarıdaki denklemin (3.6) akım dağılımının simetrik olup olmamasından bağımsız olarak her zaman geçerli olduğu, ancak denklemi yalnızca simetrik bir akım dağılımı mevcut olduğunda manyetik alan şiddetini belirlemek için kullanabilir. Stokes teoremini 3.6 denklemine uygulandığı zaman,

$$I_{enc} = \oint_L \vec{H}\, d\vec{l} = \oint_s \nabla \times \vec{H}\, d\vec{S} = \int_S \vec{J}\, d\vec{S} \tag{3.7}$$

elde edilir. Bu yasanın diferansiyel formu,

$$\nabla x \vec{H} = \vec{J} \tag{3.8}$$

Burada: *L* kapalı yol, *H* manyetik alan şiddeti vektörü, *S* yüzeyi ve *J* akım yoğunluğu vektörünü temsil eder. Transformatör analizlerinde, sargılar tarafından üretilen elektromanyetik kuvvet (emk) ile çekirdek içinde oluşan *H* arasındaki ilişki Amper Yasası ile açıklanmaktadır. Bu yasa elektromanyetik simülasyon temellerinin oluşmasına katkı sağlamıştır [23].

3.1.3. Gauss'un manyetizma yasası

Manyetik alanlar için Gauss yasası, manyetik monopollerin (doğada yalnızca tek kutup taşıyan varsayımsal bir parçacık) var olmadığını söylemenin resmi bir yoludur. Gauss yasası, herhangi bir kapalı Gauss yüzeyinden geçen net manyetik akının (ϕ_B) sıfır olduğunu ifade eder.

$$\phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \tag{3.9}$$

Elektrik alan için Gauss yasasıyla karşılaştırıldığında,

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{enc}}{\varepsilon_0} \tag{3.10}$$

ifadesi yazılır. Her iki denklemde de integral, kapalı bir Gauss yüzeyi üzerinden alınmıştır. Gauss yasası elektrik alan için, bu integralin (yüzeyden geçen net elektrik akısı), yüzey tarafından çevrelenen net elektrik yüküyle (q_{enc}) orantılı olduğunu belirtir. Manyetik alanlar için Gauss yasası, yüzey tarafından çevrelenen net bir manyetik yük (tek tek manyetik kutuplar) olamayacağı için yüzeyden geçen net bir manyetik akı olamayacağı ifade edilir. Bir Gauss yüzeyi tarafından çevrelenebilen ve dolayısıyla var olabilen en basit manyetik yapı, alan çizgileri için hem bir kaynak hem de bir alıcıdan oluşan bir dipoldür. Bu nedenle, yüzeye giren ve çıkan manyetik akı her zaman aynı olmalıdır ayrıca net manyetik akı her zaman sıfır olmalıdır. Bu yasa sayesinde transformatör çekirdeğindeki manyetik akının oluşturduğu kapalı döngü ile manyetik alan çizgilerinin kopmadığı ve devrenin sürekliliğini sağladığı anlaşılır [24].

3.2. Transformatörlerin Sınıflandırılması

Transformatörler, iletim ve dağıtım sistemlerinde bir köprü vazifesi görürler. Yüksek gerilim santrallerinde üretilen elektriğin insanların içinde bulunduğu alçak gerilim sistemi olan konutlar, ticari binalar ve endüstriyel tesislerin bulunduğu sisteme entegre edilmesinde önemli bir rol oynarlar.

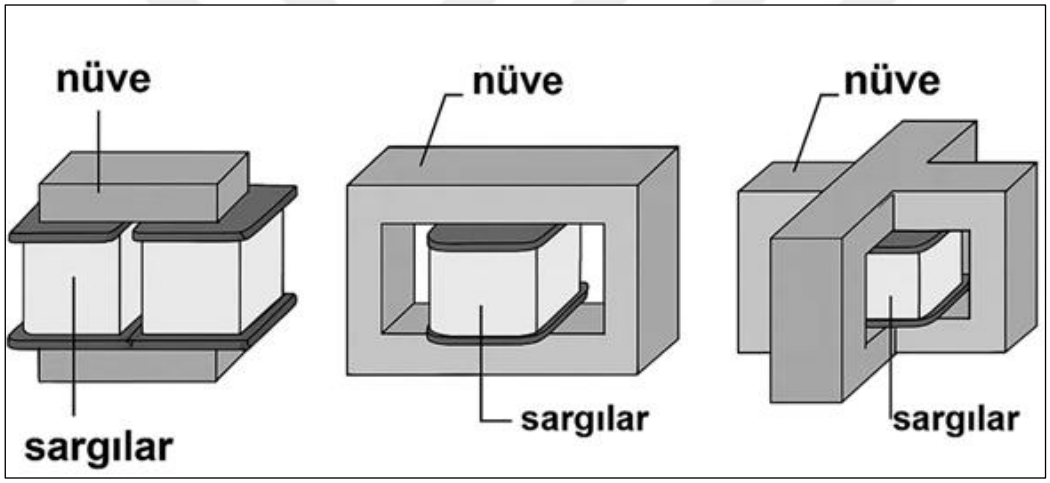
Elektrik enerjisinin verimli, kararlı ve güvenli bir şekilde tüketiciye iletilmesini sağlarlar. Transformatörler santralden başlayarak, dağıtım merkezlerine ve oradan da hastane, okul ve evlerimize ulaşana kadar ki süreçte enerji akışının her aşamasında gerilim seviyesi uygun değerlere dönüştürülerek enerji hem ekonomik iletim koşullarında taşınabilir hem de son kullanıcılar için güvenli hale getirilir.

Bu nedenle transformatörler nüve tipi, gerilim dönüşümleri, amaçlarına, faz sayısına, kullanılan yalıtıma ve soğutma yöntemlerine göre farklı sınıflara ayrılarak incelenir.

- Nüve Tipine Göre Transformatör
- Gerilim Dönüşümüne Göre Transformatör
- Amacına Göre Transformatör
- Faz Sayısına Göre Transformatör
- Kullanılan Yalıtıma Göre Transformatör
- Soğutma Yöntemlerine Göre Transformatör

3.2.1. Nüve tipine göre transformatör

Şekil 3.2. Sırasıyla Çekirdek Tipi Transformatör, Mantel Tip Transformatör, Dağıtılmış Tip Transformatör görülmektedir.



Şekil 3.2. Sırasıyla çekirdek tipi transformatör, mantel tip transformatör, dağıtılmış tip transformatör

I. Çekirdek tipi transformatör

Çekirdek tipi transformatör genellikle mekanik stabiliteleri ve bakımının basitliği nedeniyle tercih edilir. Çekirdek tipi transformatörün sargılarla çevrili çekirdeği bulunmaktadır. Bu tasarım transformatörün verimliliğini arttırmaktadır.

II. Mantel tip transformatör

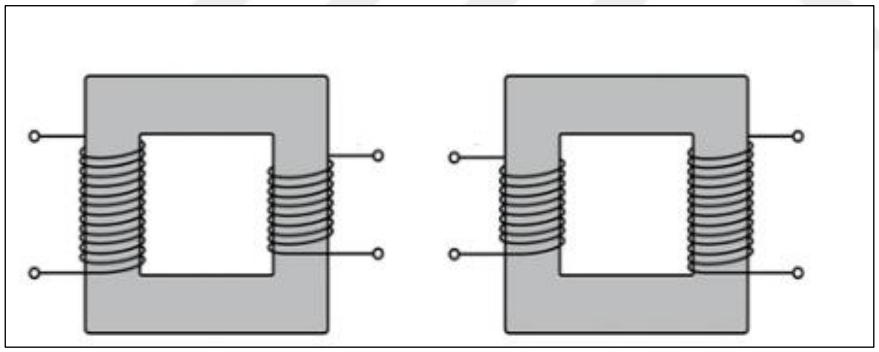
Sargı nüve ile çevrilidir. Bu tasarım daha karmaşıktır ve alçak gerilim kullanımı için daha uygundur. Montaj kolaydır ancak çekirdek tipi transformatörlere göre yüksek frekanslı akımda daha düşük verimlilik oranı vardır.

III. Dağıtılmış tip transformatör

Bu transformatörler '+' şeklinde bir nüve yapısına sahip ve sargıları orta bacağa sarılıdır. Bu tip nüvelerde kaçak akımlar en alt düzeyde çalışır. Ayrıca soğutma ve dengeli manyetik akı dağılımı sağlar. Fakat karmaşıklardır ve boyutları günümüz transformatörlerine göre çok daha büyüktür.

3.2.2. Gerilim dönüşümüne göre transformatör

Şekil 3.3. Sırasıyla Alçaltıcı Transformatör, Yükseltici Transformatör görülmektedir.



Şekil 3.3. Sırasıyla alçaltıcı transformatör, yükseltici transformatör

I. Yükseltici transformatörler

Bu transformatörlere örnek olarak iletim hatlarında kullanılan transformatör verilebilir. Birincil sargıya uygulanan alternatif akım gerilimi ikincil sargıdan alınan gerilimden küçükse bu tip transformatörler yükseltici transformatörlerdir. Amaç gerilim seviyesini arttırarak akım seviyesini düşürüp daha az kayıpla uzak mesafelere enerji iletimini sağlamaktır.

II. Alçaltıcı transformatörler

İkincil sargı gerilimi birincil sargı geriliminden küçük olan transformatör çeşididir. Bu tip transformatörlerin kullanım amacı elektrik gerilim seviyesini daha güvenilir ve kullanılabilinir seviyelere indirmektir.

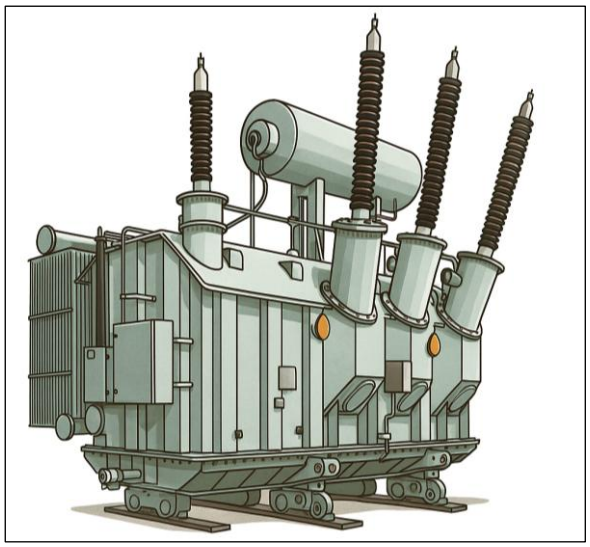
3.2.3. Amacına göre transformatör

I. Güç transformatörleri

Elektriği bir gerilim seviyesinden başka bir gerilim seviyesine dönüştürülmesini sağlayan, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde önemli bir yere sahip olan elektrik makinalarıdır. Elektrik santrallerinde üretilen elektriğin uzak mesafelere iletilmesi için transformatör aracılığıyla gerilim seviyesi yükseltilir. Böylece gerilimin yükselmesiyle akımın düşmesi sağlanarak enerji kaybı minimuma düşürülür. Elektrik son kullanıcıya gelmeden önce transformatör sayesinde tekrardan gerilim seviyesi düşürülerek kullanıma uygun bir hale getirilir.

Güç transformatörleri manyetik bir çekirdek ve sarımlardan meydana gelen bobinlerden oluşur (Şekil 3.4). Çekirdekler çoğunlukla düşük kayıp ve yüksek verimlilik sağlayan silisli sacdan imal edilir. Elektrik enerjisi, sargılar arasındaki manyetik indüksiyon yoluyla aktarılır. Transformatörün verimliliğini arttırmak için, çekirdek kayıpları (histerezis ve eddy kayıpları) ve sargı kayıplarını (bakır kayıpları) minimize edilir. Güç seviyesi arttıkça bu kayıpların optimize edilmesi ekonomik açıdan büyük avantaj sağlar. İzolasyon ve soğutma sistemi güç transformatörlerinin önemli bir noktasıdır. Doğal yağ-doğal hava (Oil Natural Air Natural- ONAN) veya doğal yağ-hava zorlamalı (Oil Natural Air Forced-ONAF) oldukça yaygın olarak kullanılan soğutma sistemidir. Soğutma sistemleri transformatörün sıcaklığını yöneterek aşırı ısınmasını önler, böylece güvenli ve uzun ömürlü olmasını sağlar.

Genellikle IEC 60076 standartlarına göre tasarlanmış ve işletilen transformatörlerinin güvenilir olduğunu söyleyebiliriz. Çünkü IEC 60076 standardı dayanıklılık ve sıcağa karşı korumanın yanı sıra çevresel koşullarda göz önüne alınarak uygulanması gereken bir prosedürdür.



Şekil 3.4. Güç transformatörü

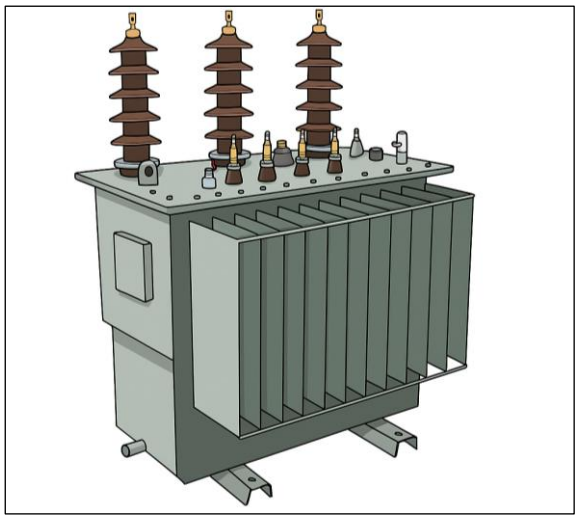
II. Dağıtım transformatörleri

Genellikle tüketiciye yakın olan ve gerilimi yüksek gerilim seviyesinden düşük gerilim seviyesine dönüştüren transformatörlerdir. Konut, ticari işletmeler ve endüstriyel tesisler gibi uygulamalar için düşük gerilim seviyelerine (örneğin 400/230 V) ihtiyaç duyan tüketicilere, gerilimi düşürmek için kullanılan dağıtım transformatörleridir.

Dağıtım transformatörleri (Şekil 3.5) sıklıkla 50 kVA'dan 5000 kVA'ya kadar değişen bir güç kapasitesine sahiptir ve 36 kV gibi yüksek gerilimin daha düşük gerilim seviyelerine düşürülmesini sağlar. Sargılar bakır veya alüminyumdan yapılır ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı izolasyon malzemeleri ile kaplanır. Bu sayede güç kayıpları en aza indirilir ve optimum verimlilik sağlanır.

Bu transformatörlerde soğutma için ONAN veya ONAF oldukça yaygın olarak kullanılan soğutma sistemleridir. Dağıtım transformatörleri genellikle IEC 60076 veya ulusal standartlara uygun olarak tasarlanır ve üretilir. Standart kapsamında sıcaklık artışı, dielektrik dayanımı, transformatör kayıpları ve mekanik dayanım gibi özellikleri düzenler.

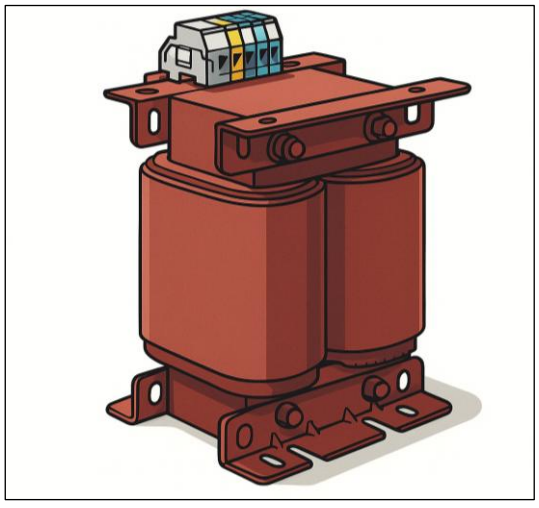
Dağıtım transformatörleri sanayiden kırsala, ticari merkezlerden kentlere kadar çok geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Dağıtım transformatörleri, elektrik enerjisini son kullanıcıya taşımadaki son adımı gerçekleştirdikleri için güvenlik, verimlilik ve enerji kalitesinin sağlanması açısından enerji sistemlerinin ayrılmaz bir bütünüdür.



Şekil 3.5. Dağıtım transformatörü

III. İzolasyon transformatörleri

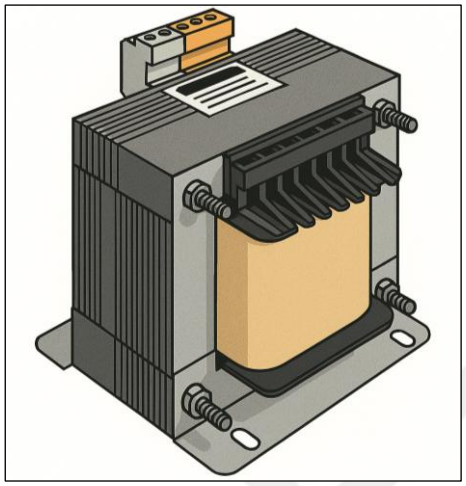
İzolasyon transformatörleri (Şekil 3.6) giriş ve çıkış gücü arasında elektromanyetik izolasyon sağlamak üzere tasarlanmış bir transformatör türüdür. Yani birincil sargıya uygulanan gerilim ile ikincil sargıdan alınan gerilimin eşit olduğu transformatörlerdir. Aralarında sadece manyetik akı ilişkisi vardır. Kauçuktan veya plastikten yapılan bir izolasyon plakasıyla iki ayrı bobinden oluşur. Bu tip transformatörler, ıslak ortamlarda çalışanlar ve insanları tehlikeye sokan cihazlara güç sağlamada sıklıkla kullanılmaktadırlar.



Şekil 3.6. İzolasyon transformatörü

IV. Oto transformatörler

Oto transformatörlerde (Şekil 3.7) normal transformatörlerden (birincil sargı ve ikincil sargı) farklı olarak tek bir sargı bulunur. Sargı sayısı tek olduğu için kaçak reaktans yok denecek kadar azdır. Ayrıca oto transformatörler, sargılarının ara noktalarından uç çıkartılarak potansiyometre olarak kullanılabilirler.



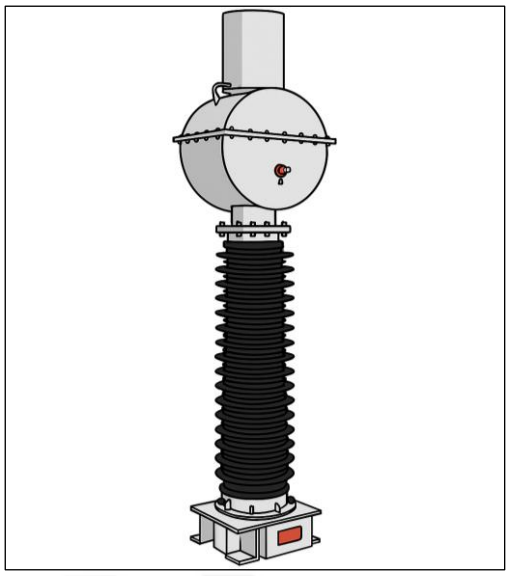
Şekil 3.7. Oto transformatörü

V. Ölçü transformatörleri

Yüksek gerilim tarafındaki akım ve gerilimlerin röle ve cihazların kullanabileceği değerlere dönüştürürler. Ölçü, kontrol ve koruma sistemini birincil sistemden izole ederler ayrıca birincil taraftaki akım ve gerilimlerin ikincil tarafta kullanım seviyelerinin belli bir standarda getirilmesinde önemli rol oynarlar. İki sınıfa ayrılırlar.

A. Akım transformatörleri

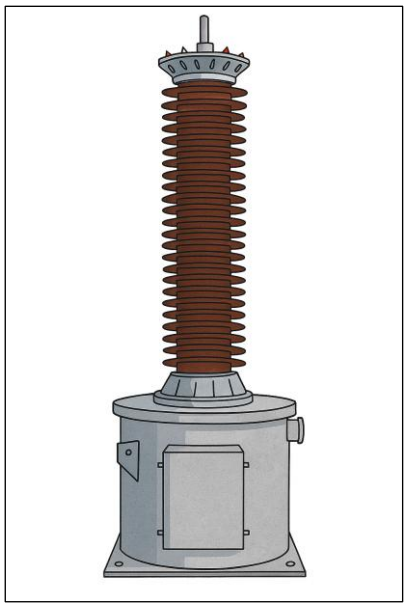
Akım transformatörleri ideal olarak ikincil terminal geriliminin sıfır, mıknatıslanma akımının minimum olduğu kısa devre edilmiş transformatörlerdir. Çünkü yüksek gerilime karşı akım transformatörlerinin ikincil sargıları ve devrelerinin zarar görmemesi için tüm ikincil sargılar ekranlanır ve toprağa bağlanır böylece yüksek gerilim oluşması engellenerek akımın güvenilir ve doğru olarak ölçülmesi sağlanır. (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Akım transformatörü

B. Gerilim transformatörleri

Gerilim transformatörleri (Şekil 3.9) ideal olarak ikincil tarafında yük bulunmadığından yük akımının sıfır, gerilim düşümünün de mıknatıslanma akımından kaynaklanması ve bu nedenle ihmal edildiği transformatörlerdir. Amaç, yüksek gerilim seviyelerini daha düşük seviyelere indirerek röle, sayaç ve koruma cihazlarının güç devrelerinin güvenli ve doğru bir şekilde ölçülmesini sağlamaktır.



Şekil 3.9. Gerilim transformatörü

3.2.4. Faz sayısına göre transformatör

I. Tek fazlı transformatörler

Tek fazlı transformatörler alternatif akım gerilimini yükseltmek veya alçaltmak için kullanılan elektriksel bir cihazdır. Genelde şalt sahalarında kullanılan bu transformatörlerine örnek olarak akım ve gerilim transformatörleri örnek olarak verilebilir.

II. Çok fazlı transformatörler

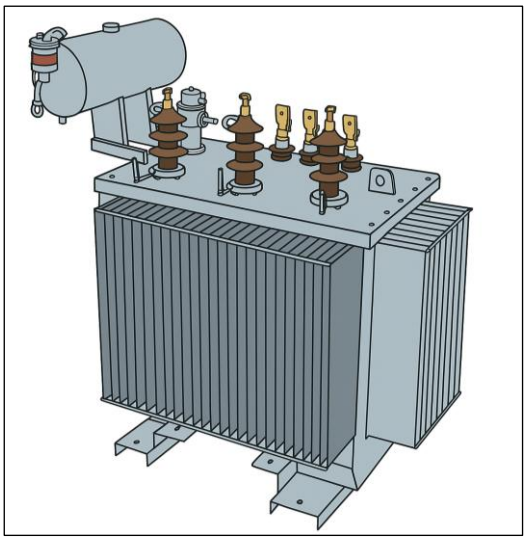
Yüksek verimlilikle dengeli güç dağılımı sağlarlar. En çok üç fazlı şekilde kullanılırlar. Yıldız (Y) ya da üçgen (Δ) bağlantı düzenleriyle çalışırlar. Büyük güçlerde kullanılırlar, sanayi tesislerinde ve elektrik sistemlerinde sıklıkla kullanılırlar.

3.2.5. Kullanılan yalıtıma göre transformatör

I. Yağlı tip transformatörler

Temel transformatör prensiplerine göre tasarlanırlar. Yalıtımını ve soğutma işlevlerini yağ sayesinde gerçekleştirirler. Elektrik enerjisi, çekirdek ve sargılarla birincil sargıdan ikincil sargıya aktarılırken, transformatörün içinde oluşan ısı, yağın dolaşımıyla radyatörler ya da dalga duvarıyla ile dışarı atılır. Yağ hem soğutma hem de sargılar arasında yalıtım sağlar. Çalışma sırasında yağ, doğal sirkülasyonla hareket ediyor ise ONAN tipi ya da fanların yardımıyla hava akışı artırılarak soğutma destekleniyorsa ONAF tipi. Daha büyük ve yüksek güçlü transformatörlerde ise soğutma sistemine su gibi ek bir akışkan dahil edilir ise OFWF (Oil Forced Water Forced) tipi olarak adlandırılır tabi bu tip transformatörler yaygın olarak kullanılmazlar.

Yağlı tip transformatörler (Şekil 3.10) yalnızca enerji dönüşümü sağlamakla kalmaz, aynı zamanda güvenlik açısından da önemli bir görevi vardır. Mesela, transformatör içinde gaz birikmesi gibi arızaları algılayan Buchholz rölesi, arıza durumunda erkenden uyarı verebilmektedir. Bu transformatörler, enerji sistemlerinin demirbaşıdır çünkü yüksek gerilimde çalışan sistemler için hem verimli hem de dayanıklıdırlar. Yağlı tip transformatörler, enerji santrallerinden, kırsal bölgelerde bulunan bir direk üstü transformatöre kadar pek yer ve alanda kullanılmaktadırlar.



Şekil 3.10. Yağlı tip transformatör

II. Kuru tip transformatörler

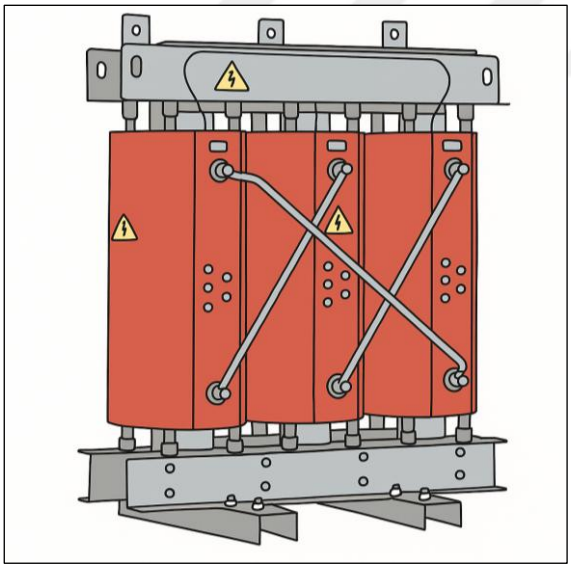
Kuru tip transformatörlerde (Şekil 3.11), manyetik çekirdek ve sargılar epoksi reçine veya diğer katı yalıtım malzemeleriyle kaplanmıştır. Epoksi kaplama, cihazı çevresel faktörlerden (nem, toz, kimyasal maddeler) korurken, aynı zamanda yüksek dielektrik dayanım sağlar. Kuru tiplerde yağ kullanılmadığı için yangın riski taşımamakta ve çevreye bir zararı olmamaktadır. Bu özellikle kuru tip transformatörleri güvenliğin ön planda olduğu projelerde rahatlıkla tercih edilme sebebi haline getirmektedir.

Manyetik indüksiyon prensibine dayanarak çalışan bu transformatörlerde birincil sargıya uygulanan gerilim, manyetik çekirdekten ikincil sargıya aktarılır. Manyetik çekirdek belirli bir manyetik direnç katsayısına sahip saclardan üretilir.

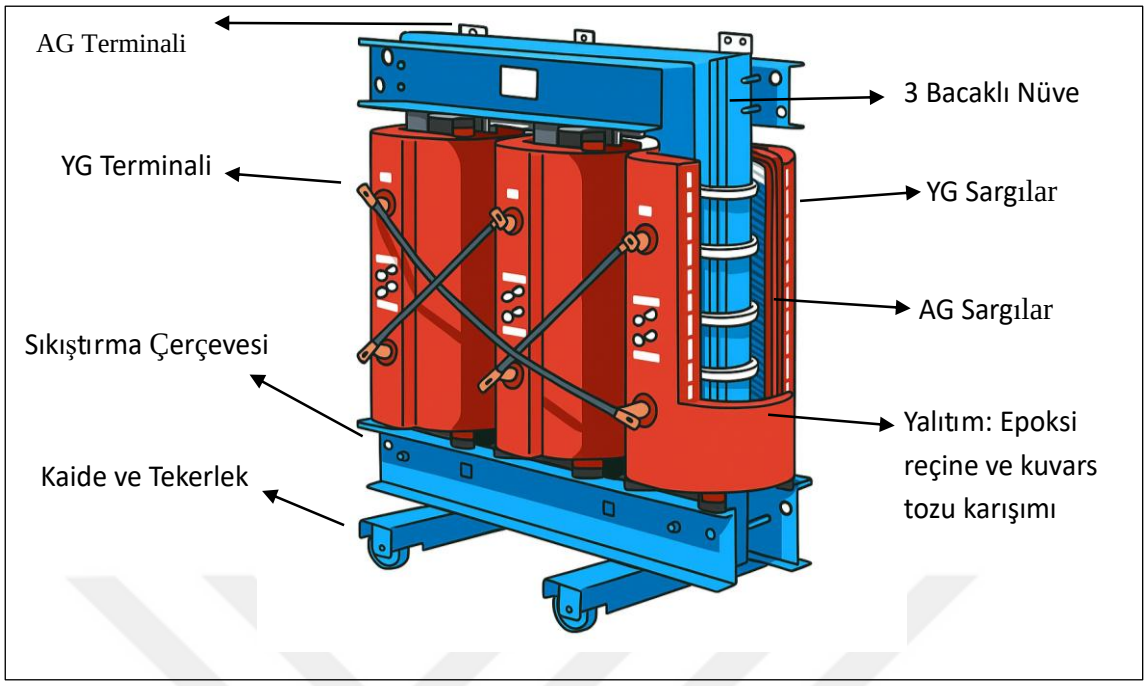
Soğutma sistemi, genellikle doğal hava dolaşımı (Air Natural - AN)) veya fan destekli hava dolaşımı (Air Forced - AF)) ile gerçekleştirilir Doğal hava soğutması düşük ve orta güçlerde yeterli olurken yüksek güçlerde ek soğutma aparatları kullanılmaktadır. Termal dayanımı yükselmek amacıyla, sargılarda genellikle F (155°C) veya H (180°C) sınıfı malzemeler kullanılır. Bu özellik, kuru tip transformatörlerin aşırı yüklenme durumlarında bile güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayarak kuru tip trafoyu ön planı çıkartır. Ancak, doğal hava soğutmasına dayanması ve yüksek soğutma kapasitelerinin çok yüksek maliyetli olması sebebiyle, soğutma kapasitesi sınırlı kalabilir ve genellikle orta gerilim sistemlerinde (36 kV'a kadar) ve 50 MVA'nın altındaki güç seviyelerinde tercih edilir.

Kuru tip transformatörler, çok çeşitli yerlerde kullanılırlar. Genellikle insan yoğunluğunun fazla olduğu ve güvenliğin ön planda olduğu yerler için kullanılır. Örneğin hastane, havalimanları, alışveriş merkezleri, metro istasyonları, rüzgâr türbinleri ve sanayi tesisleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu transformatörlerin tasarım ve performans gereklilikleri genellikle IEC 60076 ve IEEE C57 standartlarına göre belirlenir. Kuru tip transformatörler, güvenlik, çevresel uyumluluk ve düşük bakım gereksinimi gibi özellikleri sayesinde enerji sistemlerinin modern ihtiyaçlarına uygun bir çözüm sunarlar.

Tasarımsal olarak incelediğimizde yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları arasında hava kanalı bulunduğu için mekanik olarak bir bağlantı bulunmaz. Bu nedenle zorlu çevresel koşullar altında bile yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları arasında yüzeysel deşarj oluşmaz. Sargılar, kısa devre durumunda kolay tutuşmayan ve oluşabilecek ufak tutuşmalarda ise kendi kendine sönebilen özelliğe sahip materyaller ile kaplıdır. Yüksek gerilim ve alçak gerilim sargılarındaki hava kanalları ile belirlenen sıcaklık üzerine çıkmadan trafonun güç kapasitesi %140 oranında arttırılabilir.



Şekil 3.11. Kuru tip transformatör



Şekil 3.12. Kuru tip transformatör yapısı

Kuru tip transformatörler üretim ve tasarımlarına göre dört ana başlık altında toplanırlar. Bunlar; açık sargılı, vakum basınç emprenyeli (Vacuum Pressure Impregnation- VPI), vakum basınç kapsüllü (Vacuum Pressure Encapsulated- VPE) ve dökme reçineli (cast resin) transformatörlerdir. Bu her kuru tip transformatörün kullanım amaçları ve çevresel koşullara karşı dayanıklılıkları bakımından farklı özellikler göstermektedirler.

A. Açık sargılı tip

Bu tip transformatörlere standart tip kuru transformatörler de denebilir. Daldır fırınla üretim metodu ile üretilirler. Bu metotta önce alçak gerilim ve yüksek gerilim sargıları ısıtılır, ısıtıldıktan sonra yüksek sıcaklıkta verniğe daldırılır, sargılar vernikle kaplandıktan sonra, verniğin sertleşmesi ve yalıtım özelliği kazanması için fırınlanır. Basit yapıları ve düşük maliyeti sebebiyle kirliliğin az olduğu ortamlarda tercih edilirler.

B. Vakum basınç emprenyeli tip

VPI olarak da kısaltılan bu transformatörler sargılar vernikle kaplandıktan sonra vakum ve basınç altında emprenye edilir. Emprenye, transformatörü çeşitli toz, kir, yağ ve nem gibi

zararlı maddelerden korumak için sıkıştırılmış kâğıt olarak ifade ettiğimiz prespana polyester reçine emdirilerek, dayanıklılığı arttırılan bir işlemdir. Bu tarz transformatörler hastane, ticari binalar ve endüstriyel tesis gibi yerlerde tercih edilirler.

C. Vakum basınç kapsüllü tip

Bu yöntem genel olarak vakum basınç emprenye işlemine benzer ancak daha dayanıklıdır. Çünkü, polyester reçine yerine silikon reçine ile emprenye işlemi gerçekleştirilmektedir. VPE olarak da adlandırılan bu tip transformatörlere kapsüllü denilmesinin sebebi yalıtkan tabakanın her seferinde kurutup sertleştirilerek tekrar tekrar katman uygulanıp kapsül halini almasından gelir. Bu çok katmanlı yapı sayesinde deniz kenarı ve nemli ortamlarda tercih edilirler.

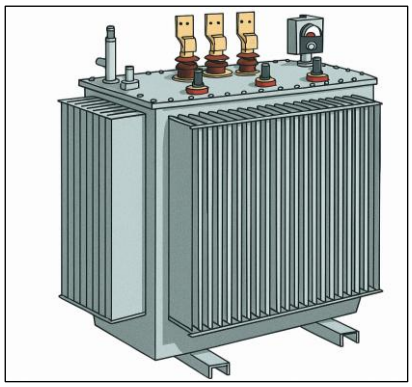
D. Dökme reçineli tip

Bu transformatörde sargılar epoksi reçineyle tamamen kalıplanarak bütün bir yapı oluşturur. Üretim aşamasında sargılar özel kalıplara yerleştirilir ve vakum altında üzerlerine sıvı epoksi reçine dökülür. Sonra bu tek parça olan yapı fırınlanarak reçinenin sertleşmesi sağlanır. Bunun sonucunda sargılarla bütünleşmiş kompakt bir yapı oluşur. Epoksi reçine, sargılardaki nem, toz ve kimyasal etkenleri önleyerek transformatörü zorlu çalışma koşullarına karşı korur. Bu tip transformatörler düşük yangın riski ve dayanıklılığı sebebiyle gemiler, havaalanları, metro istasyonları, tüneller gibi daha pek çok yerde tercih edilmektedirler.

3.2.6. Soğutma yöntemlerine göre transformatör

I. Onan transformatörler

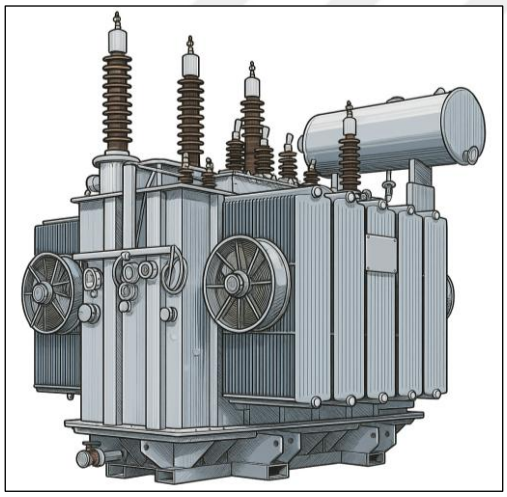
İngilizce açılımı Oil Natural Air Natural olarak adlandırılan bu transformatör (Şekil 3.13) doğal yağ ve doğal hava soğutmalıdırlar yani transformatörün içinde bulunan yağ kendi doğal sirkülasyonu ile dolaşır ve ısı transformatörde bulunan radyatör yüzeylerinden doğal hava akışıyla atılır. Genelde dağıtım transformatörlerinde kullanılırlar.



Şekil 3.13. Onan transformatör

II. Onaf transformatörler

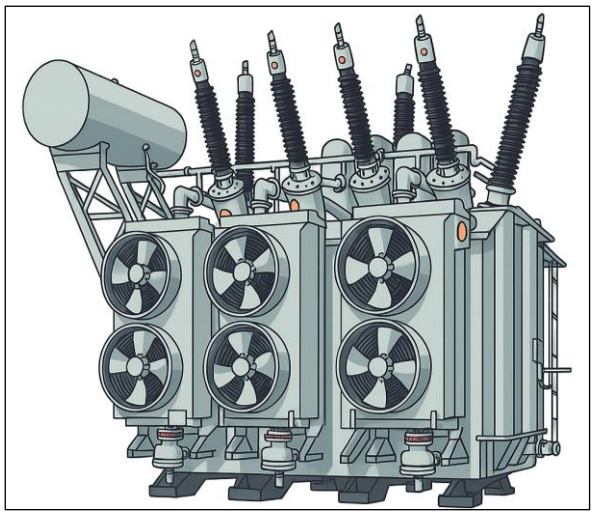
Bu transformatörler (Şekil 3.14) Oil Natural Air Forced açılımından doğal yağ ve zorlamalı hava soğutmalı olduğu anlaşılmaktadır, bu bağlamda yine yağ kendi doğal sirkülasyonuyla dolaşırken ısı fanlar aracılığıyla atılır. Güç transformatörde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.



Şekil 3.14. Onaf transformatör

III. Ofaf transformatörler

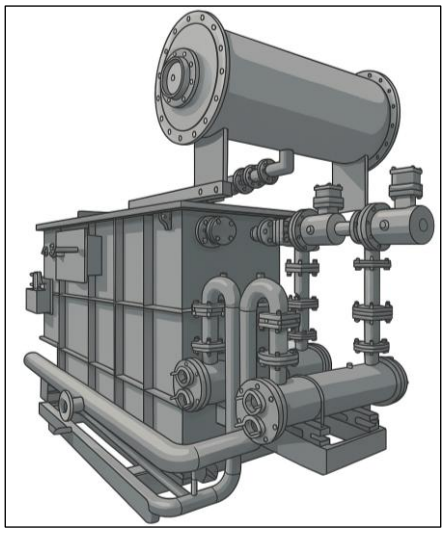
Açılımı Oil Forced – Air Forced olan bu transformatörlerin zorlamalı yağ ve hava soğutmalı olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.15). Yani transformatörde yağ pompalar aracılığıyla dolaştırılırken aynı zamanda fanlar yardımıyla hava soğutması amaçlanmıştır. Genellikle yüksek güçlü sistemlerde kullanılırlar.



Şekil 3.15. Ofaf transformatör

IV. Ofwf transformatörler

Son olarak açılımı Oil Forced Water Forced olan bu transformatörlerin (Şekil 3.16) zorlamalı yağ ve su soğutmalı tiptedirler. Yağ pompalar yardımıyla dolaştırılırken ısı değiştirici aracılığıyla su ile soğutulur. Bu sistem çok yüksek güçteki transformatörlerde kullanılır.



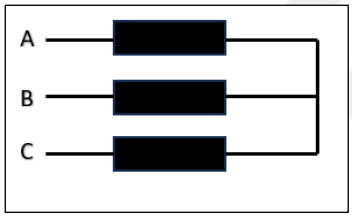
Şekil 3.16. Ofwf transformatör

3.3. Transformatörlerde Bağlantı ve Vektör Grupları

Üç fazlı transformatörlerde sargılar arasındaki bağlantı biçimi sistemin akım, gerilim, nötr hattı ve faz ilişkisinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Yıldız, üçgen ve zigzag bağlantı transformatörün şebekeye hangi şekilde entegre edileceğini, hangi gerilim seviyesinde çalışacağını ve yüklerin nasıl besleneceğini belirler. Vektör grupları, yüksek gerilim (birincil) ve alçak gerilim (ikincil) sargılarının bağlantı tipini ve bunlar arasındaki faz kaymasını tanımlamak için kullanılır. Aşağıda sırasıyla önce bağlantı grupları ardından vektör grupları ele alınmaktadır.

3.3.1. Yıldız bağlantı

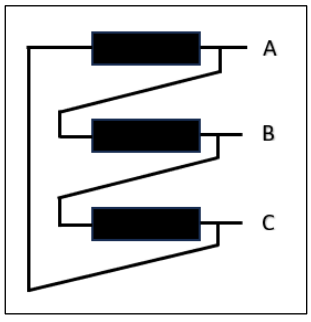
Birincil sargının yanı sıra ikincil sargı tarafına da uygulanabilmektedirler. Y ile sembolize edilir. Şekil 3.17. yıldız bağlantı tipi görülmektedir.



Şekil 3.17. Yıldız bağlantı

3.3.2. Üçgen bağlantı

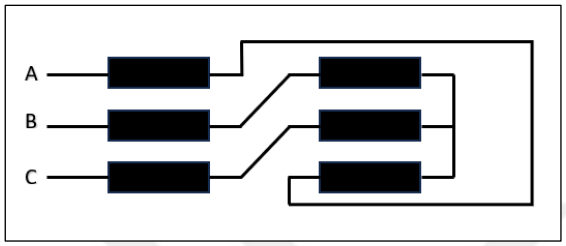
Yıldız bağlantıda olduğu gibi birincil sargının yanı sıra ikincil sargı tarafına da uygulanabilir. Üçgen bağlantıda nötr hat bulunmaz. D ile sembolize edilir. Şekil 3.18. üçgen bağlantı tipi görülmektedir.



Şekil 3.18. Üçgen bağlantı

3.3.3. Zigzag bağlantı

Zigzag bağlantı grubu diğerlerinden farklı olarak yalnızca transformatörün ikincil sargı tarafına uygulanır (Şekil 3.19). Bu bağlantı şeklinin kullanmasının sebebi transformatör fazlarının eşit yüklenmemesidir. Zigzag bağlantı yapılarak bu denge sağlanmaya çalışılır. Bağlantı Z ile sembolize edilir.

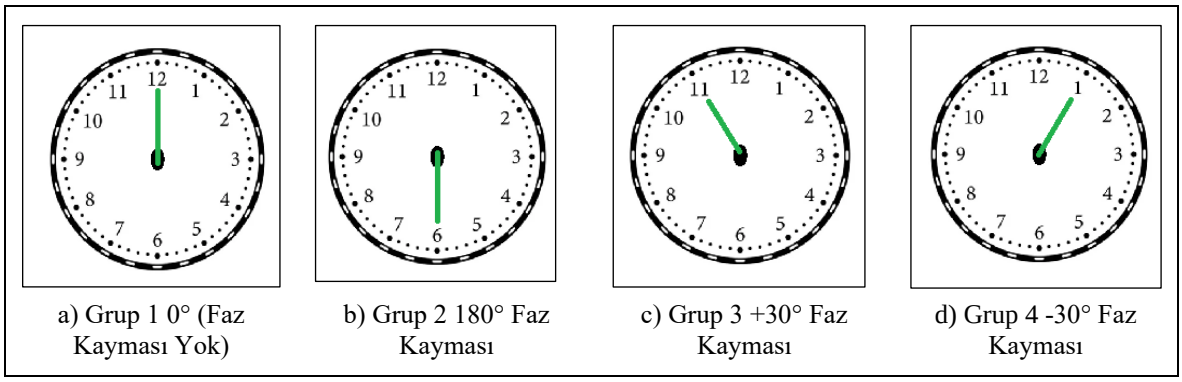


Şekil 3.19. Zigzag bağlantı

Bir transformatörün vektör grup kodu ise üç ana bileşenden oluşur;

- İlk harf, yüksek gerilim sargı bağlantı tipini gösterir ve büyük harfle yazılır (Y yıldız (star) bağlantı, D üçgen (delta) bağlantı, Z zikzak (zigzag) bağlantı).
- İkinci harf, alçak gerilim sargı bağlantı tipini gösterir ve küçük harfle yazılır (y, d ve z).
- Sonda bulunan sayı ise, yüksek gerilim ve alçak gerilimleri arasındaki faz farkını, saat gösterimine (clock notation) göre belirtir.

Saat gösterimi, alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılar arasındaki faz farkı 30°'lik aralıklarla ifade edilen bir yöntemdir. Saat düşünüldüğü zaman yüksek gerilim sargısının konumu 12 baz alınıp alçak gerilim sargısının konumu aradaki faz kayması saat üzerinde bulunduğu sayıya göre ifade edilir. Transformatörler yüksek gerilim ve alçak gerilim tarafındaki hat gerilimleri arasında bulunan faz farkına göre dört ana gruba ayrılırlar. Bu gruplar sırasıyla 0°, 180°, +30° ve −30° faz kaymalarına karşılık gelir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. A) Grup 1 0° (faz kayması yok), b) Grup 2 180° faz kayması, c) Grup 3 +30° faz kayması, d) Grup 4 -30° faz kayması.

Bu sınıflandırmaya göre Grup 1 (0°)'e göre birincil ve ikincil sargı gerilimleri aynı fazdadır (örneğin Yy0, Dd0), Grup 2 (180°) için fazlar birbirine ters yönlüdür (örneğin Yy6, Dd6). Grup 3 (+30°)'te sekonder gerilimi primer gerilimine göre 30° ileridedir (örneğin Yd1, Dy1) ve Grup 4 (−30°)'te ise ikincil gerilimi birincil gerilimine göre 30° geridedir (örneğin Yd11, Dy11).

Transformatörlerin sisteme paralel entegre edilebilmesi bu bağlantı gruplarının önemini ortaya çıkarmaktadır. Çünkü paralel bağlanacak iki transformatörün gerilim oranı, faz farkı ve vektör grubu aynı olmalıdır. Aksi takdirde, transformatörler arasında faz uyumsuzluğu meydana gelerek kayıpların artması, ısınma problemleri ve sistemin kararsız duruma girmesine neden olabilir. Bu nedenle aynı sistem üzerinde çalışacak transformatörler aynı vektör grubuna sahip olacak şekilde seçilmelidirler. Doğru vektör grubu seçimi ile sistemin güvenli, kararlı ve verimli çalışması sağlanır.

3.4. Transformatör Kayıpları

Transformatörler hareketsiz basit makinalar oldukları için sürtünme ya da rüzgar kaybı gibi mekanik kayıpları bulunmaz. Fakat transformatörlerde, manyetik alan değişiminden kaynaklanan bazı kayıplar meydana gelir. Kayıplar genelde boşta ve yükte kayıplar olarak ikiye ayrılır. Boşta kayıplar, dielektrik kayıplarını, nüve kayıplarını, paralel sargılarda meydana gelen küçük ek kayıpları ve uyarıcı akımın neden olduğu iletken kayıplarını içerir.

3.4.1. Nüve kayıpları

Transformatör nüvesine enerji uygulandığında, nüvede alternatif bir mıknatıslanma akımı meydana gelir ve bu da zamanla değişen bir mıknatıslanma kuvvetine neden olur. Bu süreçte harcanan gücün kaynağı manyetik nüvedir. Manyetik devre elemanlarının nüve kayıplarını belirlemek için kullanılan denklem 1892 yılında Steinmetz tarafından ortaya konuldu.

$$P_{fe} = Kf^{a}B_{maksimum}^{\beta} \tag{3.11}$$

Eşitlik, aslında sinüzoidal olarak uyarılan elektrik makinaları baz alınarak oluşturulmuş olup, birim hacim başına düşen nüve kaybını P_{fe}'yi ifade eder. Sinüzoidal bir uyarma durumunda, nüve kayıplarını etkileyen başlıca iki parametre çalışma frekansı f ve akı yoğunluğunun tepe değeri B_{maksimum} olarak ön plana gelir. Ayrıca, nüvede kullanılan manyetik malzeme ile ilgili belli parametreler; K kullanılan malzeme katsayısı, a frekans hassasiyeti ve β manyetik alan hassasiyeti de kayıpların büyüklüğünde önemlidir. Üreticiler tarafından ağırlık W/kg veya $W/m3$ başına enerji kaybı olarak nüve kayıpları belirlenir.

3.4.2. Histerezis kayıpları

Transformatör çekirdeğinde bulunan ferromanyetik malzemeler manyetik alan altında geçici veya kalıcı manyetiklik durumu gösterebilirler. Bu durum transformatörde bulunan manyetik alana zıt yönde olduğundan ısıya dönüşen bir enerji kaybına yani histerezis kaybına neden olur. Transformatörün toplam yüksüz kayıplarının %50 ila %80'i gibi çok yüksek kısmını oluşturur. Mesela, silikon çelik, normal çeliğe göre daha düşük histerezis kayıplarına sahiptir. Fakat amorf metal, silikon çeliğe nazaran çok daha düşük kayıp değerleriyle daha iyi performans gösterir. Nüvede değişen manyetik alandan kaynaklı oluşan kayıplar aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$P_h = K_h f B_{maksimum}^{x} \tag{3.12}$$

P_h, K_h ve x değişkenleri sırasıyla birim ağırlık başına histerezis kaybı, malzeme cinsine bağlı olarak değişen histerezis kayıp katsayısı ve Steinmetz katsayısıdır.

3.4.3. Eddy akımı kayıpları (fuko kayıpları, girdap akımı kayıpları)

Fuko kayıpları ya da girdap akım kayıpları da denilen eddy akımı kayıpları degişken bir manyetik alanda gerilim indüklenmesi sonucu meydana gelen ve ısıya dönüşen kayıplardır. Transformatörlerde eddy kayıplarından dolayı ısınmayı önlemek için çekirdek tek döküm yerine, ince bir vernik tabakası ile birbirinden izole edilmiş ince lamine levhalardan nüve oluşturularak eddy akımı kayıpları düşürülebilmektedir. Bu kayıp, P_c aşağıdaki eşitlikle hesaplanır,

$$P_c = K_c f^2 B^2_{maksimum} \tag{3.13}$$

Burada K_c malzemeye bağlı olarak değişen Eddy akımı kayıp sabitidir.

3.4.4. Ek çekirdek kayıpları

Transformatör çekirdeğinde ek kayıplar ortaya çıkar. Bu kayıplar mekanik stresler, bağlantıların varlığı, hava boşlukları, akı yoğunluğu harmonikleri ve mekanik streslerden kaynaklanır. Bu gerilimler, kenetleme kuvvetleri, laminasyonların ağırlığından kaynaklanan bükülme ve akı yoğunluğunun düzensiz dağılımından kaynaklanan sıcaklık gradyanları sebebiyle ortaya çıkar. Bu kayıplar Steinmetz formülü içerisinde aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$P_e = K_e f^{1.5} B^{1.5}_{maksimum} \tag{3.14}$$

Formüle göre K_e malzeme cinsine bağlı olarak değişen ek kayıp sabitidir.

3.4.5. Bakır kayıpları

Transformatör sargıları saf endüktif olarak ideal durumda kabul edilselerde, uygulamada sargılardan kaynaklanan omik direnç vardır. Oluşan bu omik direnç sebebiyle transformatörde bakır kayıpları açığa çıkar. Akımın değişkenliğine göre kayıp miktarı da değişir. Birincil ve ikincil sargıda meydana gelen toplam bakır kaybı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$P_{CU} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \tag{3.15}$$

Burada I_1 birincil sargı akımının etkin değeri R_1 birincil sargının direnç değeriyken I_2 ikincil sargı akımının etkin değeri ve R_2 ikincil sargı direnç değeridir.

3.5. Transformatörde Verim

Üretilecek olan elektrik makinesinin verimini nüve laminasyonlarında kullanılan manyetik malzemenin kalitesi direkt olarak etkiler. En temel tanımıyla transformatörden gelen çıkış gücünün ($P_{\text{çıkış}}$), transformatörün giriş gücüne ($P_{\text{giriş}}$) oranı verimlilik (η) olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{çıkış}} + P_{toplam\ \text{kayıp}}} x100 \quad (3.16)$$

3.6. Transformatörlerde Koruma Sınıfları

Transformatörlerin verimli, uzun ömürlü ve elbette güvenli olabilmesi için belli koruma seviyelerine uygun bir şekilde tasarımı gerçekleştirilmelidir. Bu koruma seviyelerinin dış çevreye karşı dayanıklılığının yanı sıra transformatörün iç kısmında kullanılan yalıtım malzemelerinin sıcaklık dayanıklılıkları hakkında da bilgi verir. Bu anlamda, transformatörlerde koruma iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar çevresel koruma (gövde koruma sınıfları) ve termal koruma (yalıtım sınıfları).

3.6.1. Çevresel koruma (mahfaza koruma sınıfları)

Transformatörlerde çevresel koruma sınıfları; dış etkenlere özellikle toz, su ve diğer çevresel faktörlere karşı dayanıklılığını ifade eder. Bu sınıflar genelde IP (Ingress Protection) kodlarıyla belirtilir (Çizelge 3.1). Koruma derecelendirmesi iki rakamdan oluşmaktadır ve IPXY şeklinde yazılır (X için birinci rakam katıya karşı dayanıklılık ve Y için sıvaya karşı dayanıklılık rakamı) [26].

Çizelge 3.1. Transformatörlerde çevresel koruma sınıfları (IP kodlarına göre)

IP	1.Rakam Katı	IP	2.Rakam Sıvı
0	Koruma yok	0	Koruma yok
1	Çapı 50 mm'den büyük katı cisimlere karşı koruma	1	Damlayan suya karşı koruma
2	Çapı 12 mm'den büyük olmayan nesnelere karşı koruma	2	Dikey damlayan suya karşı koruma (15°'ye kadar eğik)

Çizelge 3.1. (devam) Transformatörlerde çevresel koruma sınıfları (IP kodlarına göre)

3	Çapı 2,5 mm'den büyük olmayan nesnelere karşı koruma	3	Püskürtülen suya karşı koruma (60°'ye kadar eğik)
4	Çapı 1 mm'den büyük olmayan nesnelere karşı koruma	4	Sıçrayan suya karşı koruma
5	Temasa karşı tam koruma, Toz birikmesine karşı koruma	5	Bir nozuldan püskürtülen suya karşı koruma
6	Temasa karşı tam koruma, Toz sızmasına karşı koruma	6	Şiddetli deniz dalgalarına veya güçlü su jetlerine karşı koruma.
7	-	7	Suya daldırmaya karşı koruma.
8	-	8	Tamamen ve sürekli olarak suya daldırılmaya karşı koruma.

3.6.2. Termal koruma (yalıtım sınıfları)

Transformatörlerde termal koruma aktif kısmın yalıtımında kullanılan malzemelerin sıcaklık dayanıklılığına bağlı olarak belirlenmektedir. Transformatör çalıştığı esnada sargı ve nüvede oluşan kayıplardan dolayı sıcaklık artışı meydana gelir. Transformatörün ömrü ve sistem güvenliği bakımından oluşan bu sıcaklık artışının güvenli sınırlar içinde kalması oldukça önemlidir [25, 27].

Yalıtım sınıfları, kullanılan malzemelerin en yüksek çalışma sıcaklığına göre belirlenir. IEC 60085 ve IEC 60076-11 standartlarına uygun olmalıdır.

Kuru tip transformatörler genellikle F (155 °C) veya H (180 °C) yalıtım sınıfı içine dahil olurken, yağlı tip transformatörler A (105 °C) veya B (130 °C) yalıtım sınıfı içerine dahil olmaktadır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Transformatörlerde çevresel koruma sınıfları (sıcaklık artışına göre)

Yalıtım Sınıfı	Maksimum Sistem Sıcaklığı (°C)	Anma Akımında Ortalama Sargı Sıcaklığı Artışı (K)	Kullanılan Yalıtım Malzemeleri	Uygulama Alanı
A	105	60	Selüloz, kâğıt, mineral yağ	Yağlı tip transformatörler, düşük sıcaklık sistemleri
E	120	75	Emaye tel, vernik	Küçük güç transformatörleri
B	130	80	Emaye tel ve ısıya dayanıklı vernik	Orta güçlü dağıtım transformatörler
F	155	100	Epoksi reçine, cam elyaf	Kuru tip transformatörler

Çizelge 3.2. (devam) Transformatörlerde çevresel koruma sınıfları (sıcaklık artışına göre)

H	180	125	Silikon reçine, poliimid	Yüksek sıcaklığa dayanıklı kuru tip transformatörler
200	200	135	Özel sentetik malzemeler	Yüksek sıcaklık uygulamaları
220	220	150	Poliimid, floroelastomer	Endüstriyel yüksek sıcaklık sistemleri

4. KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE ANALİZ

Güç sistemlerinde kullanılmakta olan transformatörlerin elektromanyetik özelliklerinin araştırılıp incelenmesi, nüve için malzeme seçimi, geometrik tasarım ve sarım yapısı gibi faktörlerin performansa olan etkisini anlamak açısından hayati öneme sahiptir. FEM üç boyutlu altyapısını kullanan ANSYS Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilen analizler, tasarım ve optimizasyon süreçlerinde önemli bir rol oynamıştır.

Ansys, 1970 yılında Dr. John Swanson tarafından kurulmuştur [28]. O zamandan bu yana mühendislik simülasyonu alanında devamlı yenilikler gerçekleştirerek gelişim göstermiştir. Maxwell, ANSYS'in elektromanyetik alan için geliştirilen bir simülasyon modülüdür. Elektrik motorları, bobin, reaktör ve transformatör gibi manyetik cihazların analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Varlığından bu yana, endüstriyel uygulamalar ve akademik çalışmalar ve ölçümlerde hassas sonuçlar sunarak doğruluğu ve güvenilirliği kanıtlanmış bir yazılımdır.

Bu tez çalışmasında MOH amorf yapılı nüve ve M5 geleneksel yapılı nüve malzemeleri manyetik özellik bakımından karşılaştırılarak malzeme seçiminin transformatörün verimi, kayıpları ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modelleme sürecinde nüve, birincil ve ikincil sargılar tasarım gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Modelde çekirdek malzemesi olarak M5(tane yönelimli silisyum çeliği) ve MOH (amorf alaşım) malzemeleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Her iki nüve malzemesi için kayıplar, katsayı değerleri, manyetik geçirgenlik ve akı yoğunluğu gibi değerler entegre edilerek tasarım gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, yüksüz akım, çekirdek kayıpları, manyetik akı yoğunluğu dağılımı, manyetik enerji yoğunluğu dağılımı ve termal dengeyi etkileyen faktörler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölümde ANSYS Maxwell ortamından incelenen her bir tasarım ayrı başlıklar altında yer almakta olup elde edilen teknik veriler karşılaştırılmıştır.

Boşta çalışma ve yükte çalışma koşulları ayrı ayrı ele alınıp, grafikler üzerinden karşılaştırılmıştır. Ayrıca çekirdek malzemesine bağlı olarak transformatörün termal performansı, ısıl davranışı ANSYS Icepak arayüzünde analizi gerçekleştirilerek incelenmiştir. Analizler sonucunda, MOH çekirdek malzemesinin daha düşük kayıp ve

sıcaklık artışıyla çalıştığı, buna karşılık M5 çekirdeğin daha yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular sonucunda yapısal, manyetik ve termal incelemelerin bir arada ele alınmasıyla kuru tip transformatörlerin tasarımında malzeme seçiminin ne kadar önemli olduğu ortaya konulmaktadır.

4.1. Tasarlanan Transformatör Modeli

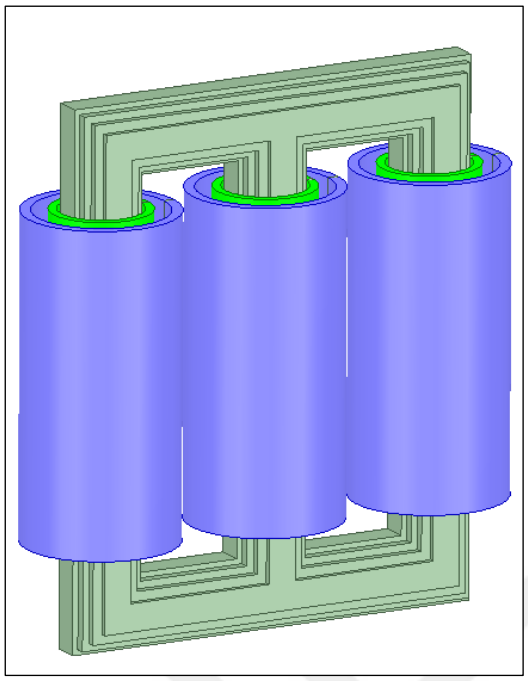
Analiz için tasarlanan transformatör modeli, 2 MVA güç kapasitesine, 30/0.4 kV gerilime sahip üç fazlı kuru tip bir transformatördür. Soğutma yöntemi Hava Doğal (AN Air Natural) olup, F sınıfı yalıtıma sahiptir. Hem birincil hem de ikincil tarafta alüminyum sargılar tercih edilmiştir. Model yapısı üç boyutlu ANSYS Maxwell ortamında tasarlanmıştır. Nüve, sargı ve hava aralıkları için uygun malzeme özellikleri tanımlanarak analize hazır hale getirilmiştir.

4.1.1. Transformatör modeli

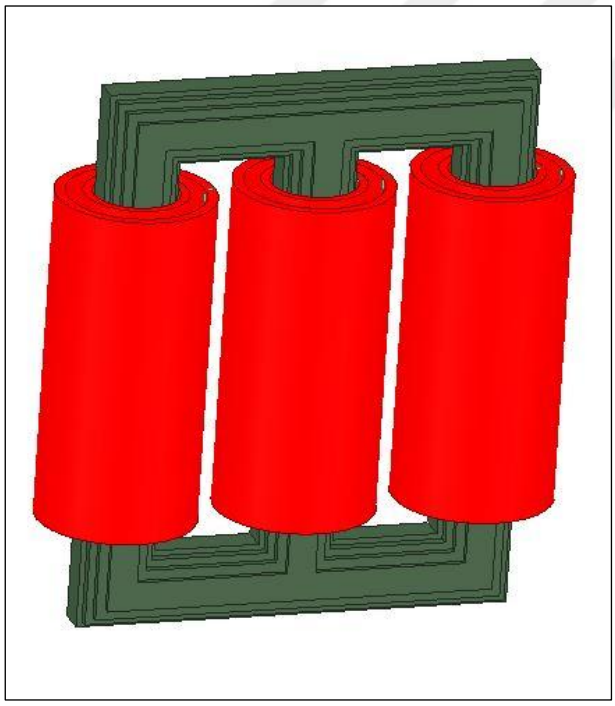
Tasarımın amacı, farklı tipteki çekirdek malzemelerinin (M5 ve MOH) transformatör performansına etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Her iki tasarımda da çekirdek tipi üç bacaklı yapıda olup, birincil ve ikincil sargılar bu bacaklar etrafına simetrik biçimde yerleştirilmiştir. Transformatörün teknik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tasarlanan transformatör parametreleri

Parametre	Değer
Anma Gücü	2000 kVA
Primer Gerilim	30 kV
Sekonder Gerilim	0.4 kV
Frekans	50 Hz
Çekirdek Malzemesi	M5 ve MOH (karşılaştırmalı)
Soğutma Tipi	AN (Air Natural)
Yalıtım Sınıfı	Sınıf F
Sargı Malzemesi	Alüminyum (birincil ve ikincil)
Boşta Kayıp	2990 W
Yükte Kayıp	17600 W



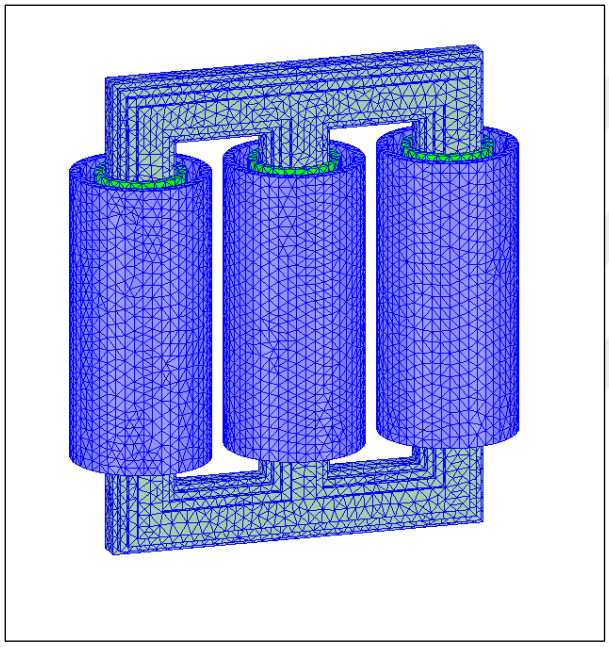
Şekil 4.1. 3D M5 için transformatör modeli



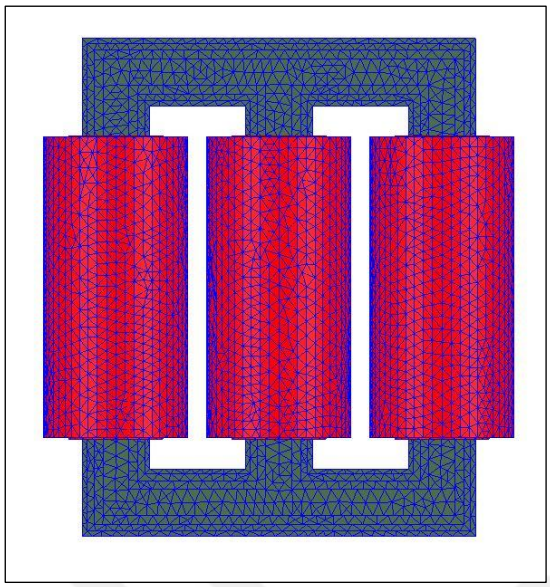
Şekil 4.2. 3D MOH için transformatör modeli

Şekil 4.1'de ve Şekil 4.2'de, kuru tip transformatörün üç boyutlu geometrileri gösterilmektedir. Kırmızı, mor ve yeşil silindirik bileşenler sargıları, gri yapılar ise manyetik çekirdeği oluşturmaktadır. Bu model, simülasyon ortamında kullanılan fiziksel düzeni yansıtmaktadır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te transformatörlerin mesh (ağ yapısı)

yapısını göstermektedir. Transformatör modelinde çekirdek ve sargı bölgelerine sonlu elemanlar ağı uygulanarak geometri çok sayıda küçük hücreye bölünüp çözümlemeye uygun hale getirilir. Bu yapılan işleme mesh (ağ yapısı) olarak adlandırılır ve ANSYS Maxwell'de ayrıntılı elektromanyetik analiz yapılmasına olanak sağlar. Bu ağ yapısı oluşturulurken manyetik alan yoğunluğunun en çok değiştiği nüve köşeleri ile sargı kenarlarının daha küçük hücreye bölünmesine dikkat edilmiştir çünkü bu bölgelerde akı yoğunluğu hızla değişebilir ve analizin doğruluğunu doğrudan etkiler. Bu işlemi, transformatör yapısı boyunca manyetik akı, kayıplar ve alan dağılımlarındaki değişiklikleri gibi pek çok alanda aktif bir şekilde rol oynar.

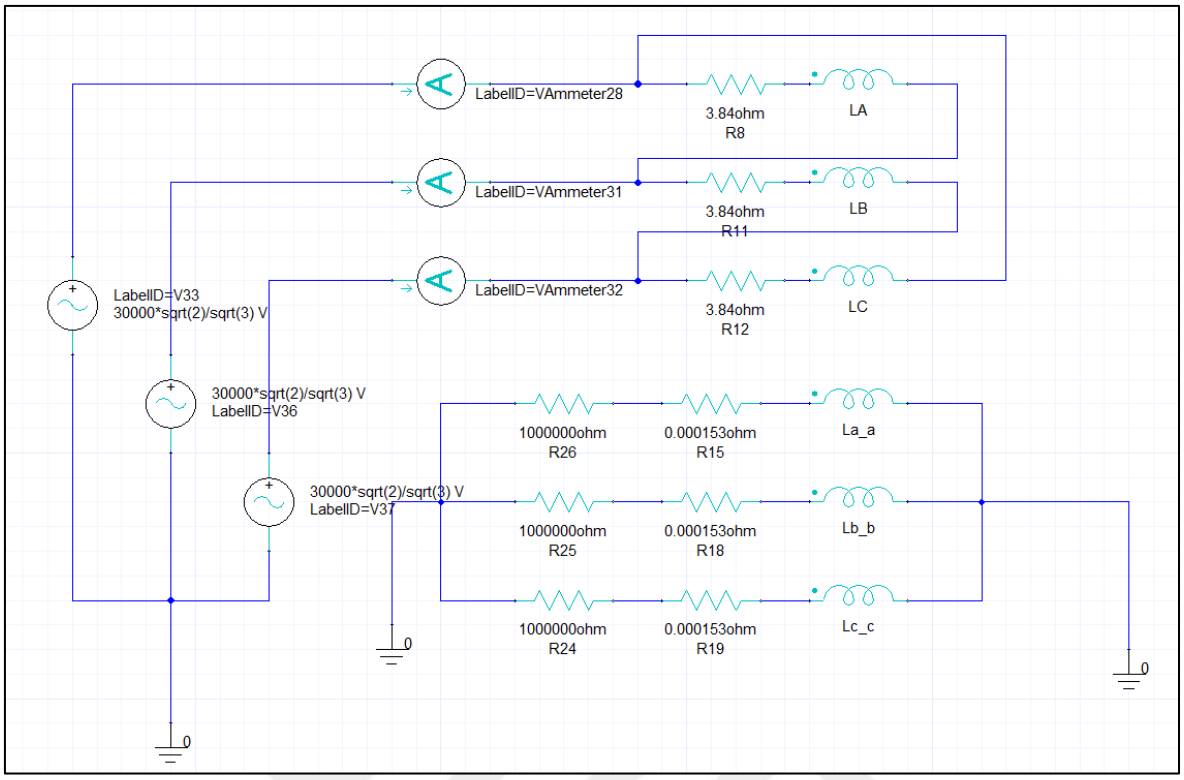


Şekil 4.3. 3D M5 transformatörün mesh yapısı



Şekil 4.4. 3D MOH transformatörün mesh yapısı

Şekil 4.5'de MOH ve M5 nüveli kuru tip transformatörlerin boşta çalışma durumunda kullanılmak için oluşturulan üç fazlı devre görülmektedir. Transformatörün birincil gerilimi 30 kV, ikincil gerilimi ise 0.4 kV'tur. Birincil sargıdaki 30 kV gerilimin etkin yani RMS (Root Mean Square) değeridir. Bu değer zamana bağlı (transient) simülasyonlar için kullanmak pek doğru olmaz bu yüzden sinüzoidal gerilim çözümlemesi yapılırken sinyalin tepe (peak) değeri esas alınır.



Şekil 4.5. 3D MOH VE M5 transformatörün boşta çalışma devresi

Oluşturulan simülasyonda her faz için ayrı ayrı gerilim kaynakları tanımlanmış ve kaynaklara 3 faz sistemine uygun olarak 120° faz farkı atanmıştır. Gerilim kaynaklarının büyüklüğü, tepe (peak) değeri olarak verilmiştir. Üç fazlı sistemlerde hat (line) gerilimi ile faz gerilimi arasındaki ilişki;

$$V_{faz,RMS} = \frac{V_{hat,RMS}}{\sqrt{3}} = \frac{30000}{\sqrt{3}} \approx 17320\ V \tag{4.1}$$

bulunur. Faz başına etkin (RMS) gerilim değeri 17320.50808 V'tur. Biz buna yaklaşık olarak 17320 V diyebiliriz. Simülasyon için gerekli olan faz tepe gerilimi ise;

$$V_{faz,tepe} = V_{faz,RMS} \cdot \sqrt{2} = \frac{30000.\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \approx 24495\ V \tag{4.2}$$

bulunur. Her bir fazın birincil sargısını temsil etmek üzere devrede 3.84 Ω direnç ve birer endüktans tanımlanmıştır. Bu direnç değeri, hedeflenen yüksüz (no-load) akım değerine göre seçilmiştir.

$$R = \frac{V_{faz,RMS}}{I_{\text{yüksüz}}} = \frac{17320}{4.5} \approx 3.84\Omega \quad (4.3)$$

İkincil taraf ise akım geçişini önlemek amacıyla 1 MΩ direnç ile toprağa bağlanmıştır. Temel sebep, ikincil sargının açık devreye çok benzer şekilde davranmasını sağlamaktır. Böylece yalnızca nüvenin mıknatıslanma davranışı gözlemlenebilecektir. Ayrıca simülasyon sırasında üç faz için fazlar arasındaki 120°faz farkının tanımlanması amacıyla ayrı ayrı gerilim kaynakları kullanılmıştır. Bu sayede ideal üç fazlı sistem modeli oluşturulmuş, simülasyonun her fazı için senkron ve kararlı çalışması sağlanmıştır.

Yükte çalışma durumunda ise transformatörün birincil ve ikincil sargıları arasında enerji transferinin sağlandığı, yani transformatörün yük altında çalıştığı durumdur. MOH ve M5 nüveli kuru tip transformatörlerin yük altında termal ve manyetik davranışlarının incelenmesi amacıyla yükte çalışma simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonda üç fazlı bir sistem için gerilim kaynakları ayrı ayrı tanımlanmıştır. Her bir kaynak, zamanla değişen (transient), 50 Hz frekansında ve V_{tepe} değerinde bir gerilimle tanımlanmıştır.

$$V(t) = V_{tepe}.(1 - e^{-50t}) \cdot cos(2\pi \cdot 50t + \phi) \quad (4.4)$$

Burada;

- V_{tepe}= 24495V olarak tanımlanmıştır.
- $1-e^{-50t}$ çarpanı, gerilimin zamana bağlı olarak kademeli yükselmesini sağlar.
- ϕ faz açısıdır; üç faz için sırasıyla:

Faz A ϕ: = 0
Faz B ϕ: = $\frac{2\pi}{3}$
Faz C ϕ: = $\frac{4\pi}{3}$

Bu ifadelerle birlikte gerilim kaynakları aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır;

$$V_A(t) = V_{tepe}.(1 - e^{-50t}) \cdot cos(2\pi \cdot 50t) \quad (4.5)$$

$$V_B(t) = V_{tepe}(1 - e^{-50t}) \cdot cos\left(2\pi \cdot 50t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.6)$$

$$V_C(t) = V_{tepe}(1 - e^{-50t}) \cdot cos\left(2\pi \cdot 50t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (4.7)$$

Bu eşitlikler ile fazlar arası 120° faz farkı ortaya konmuştur. Yükte çalışma simülasyonunda, birincil sargı için 1 mΩ direnç değeri tanımlanarak primer sargının iletkenlik kayıplarını (bakır kayıpları) temsil etmektedir. İkincil tarafta ise 100 Ω direnç kullanılarak yük direncini ifade etmesi amaçlanmıştır.

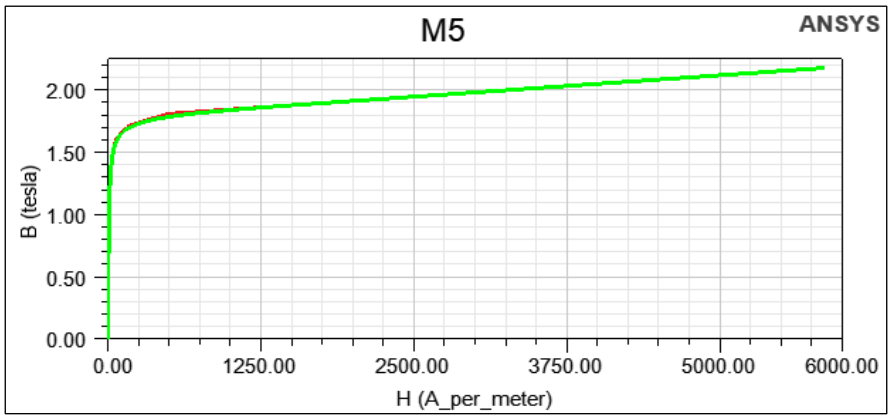
Yükte ve boşta çalışma durumunda kullanılan değerler hem çözüm kararlılığı açısından hem de gerçekçilik bakımında uygundur.

4.1.2. B-H eğrileri ile malzeme tepkisi analizi

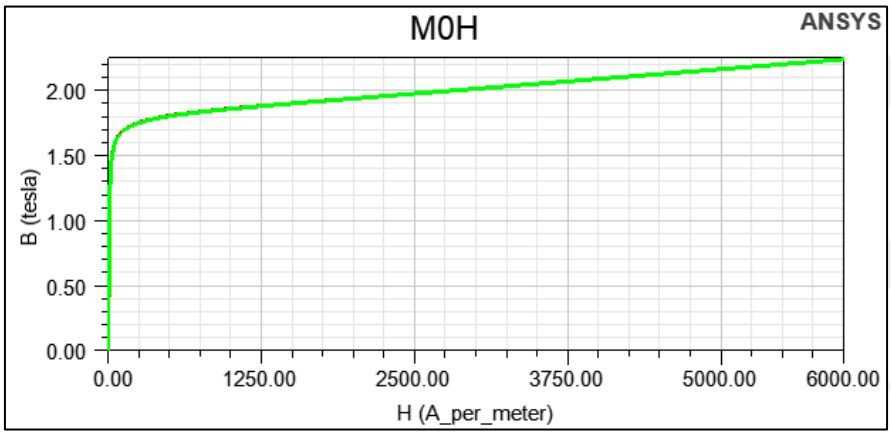
Bu çalışmada, MOH ve M5 çekirdek malzemelerine ait B-H karakteristikleri ANSYS Maxwell ortamında modellenerek karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. B-H eğrisi, manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti arasındaki ilişkiyi gösteren ve manyetizasyonun başladığı bölgeden doygunluk noktasına ulaşılana kadar manyetik tepkiyi değerlendiren bir grafiktir. Bu çalışmada, Şekil 4.6'da verilen M5 ve Şekil 4.7'te verilen MOH çekirdek malzemeleri kullanılmıştır.

Şekil 4.7'de verilen MOH grafiği incelendiğinde, sağ bölgeden doygunluk noktasına daha hızlı geçiş olduğu için daha yüksek bir başlangıç geçirgenliği gösterir. Şekil 4.6'da verilen B-H grafiğine sahip M5 çekirdeği, MOH çekirdeğinden farklı olarak aynı manyetik akıya sahip olmak için doygunluk noktasına geçmek üzere daha fazla manyetizasyona maruz kalır.

MOH ve M5 çekirdek malzemelerinin B-H özellikleri önce modellenmiş ve simülasyon kurulumuna dahil edilmiştir. Simülasyon sonuçları, MOH çekirdeğinin manyetik alan zayıf olsa ve uyarma gerektiren yerlerin sayısı azalsa bile manyetizmaya daha iyi tepki verdiğini göstermektedir. Bu davranış, geleneksel tane yönelimli silikon çeliklere kıyasla amorf malzemelerin üstün manyetik performansını vurgulayan önceki çalışmaları desteklemektedir. Bu da daha düşük çekirdek kayıpları ve daha yüksek verimlilikle sonuçlanmaktadır [2,6,7].



Şekil 4.6. 3D M5 B-H eğrisi

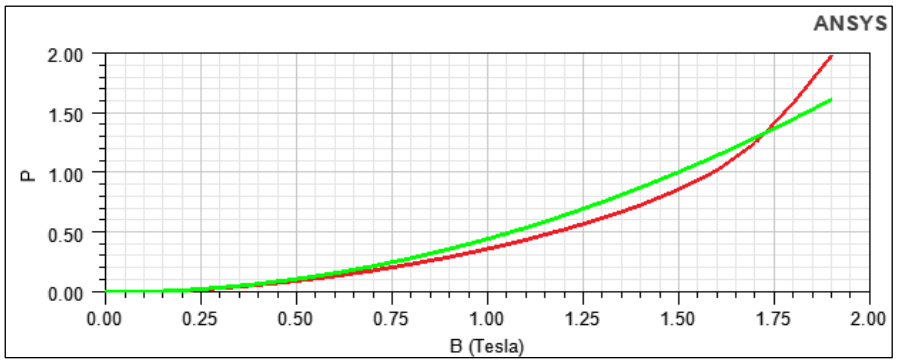


Şekil 4.7. 3D MOH B-H eğrisi

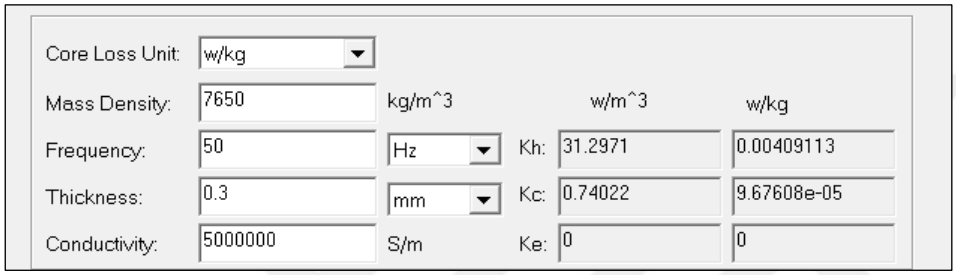
4.1.3. P-B eğrileri ve çekirdek kayıpları analizi

P–B eğrileri kullanılarak, MOH ve M5 malzemeleri için çekirdek kaybı ve manyetik akı yoğunluğu aralıkları incelenmiştir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.10). Burada B manyetik akı yoğunluğu (Tesla), P ise birim kütle başına güç kaybını (W/kg) göstermektedir.

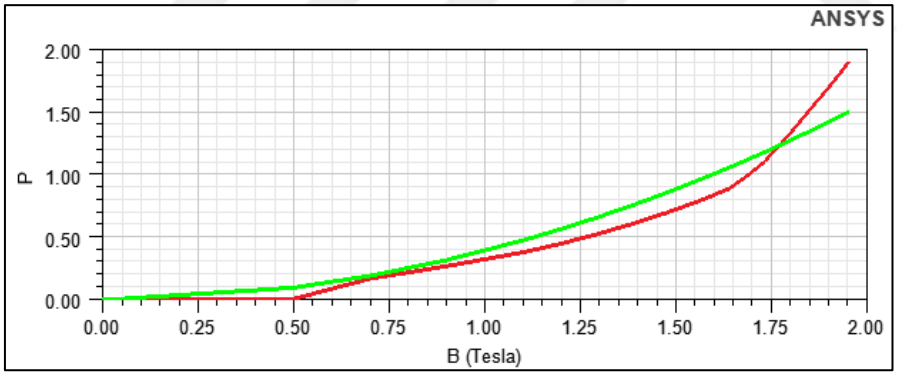
Analiz için manyetik kayıp hesaplamalarında malzeme yoğunluğu 7650 kg/m³ frekans 50 Hz, nüve sac kalınlığı M5 için 0.3 mm, MOH için 0.27 mm ve iletkenlik 5×10^6 S/m, olarak alınmıştır. Hesaplamalarda histerezis kaybı katsayısı (K_h), girdap akımı kaybı katsayısı (K_c) ve toplam kayıp yoğunluğu (W/m³) ANSYS sisteminde hesaplanmıştır. Ayrıca ek çekirdek kayıpları temsil eden K_e değeri düşük frekanslı bir sistemde çalışıldığı için ihmal edilmiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.11).



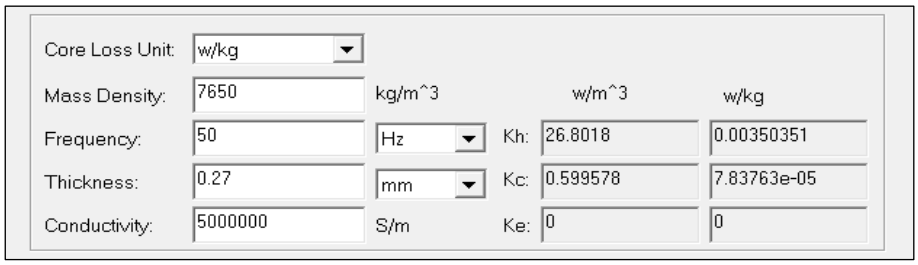
Şekil 4.8. M5 çekirdek malzemesi için P-B eğrisi



Şekil 4.9. M5 çekirdek malzemesi için ansys core loss parametreleri (K_h, K_c, K_e)



Şekil 4.10. MOH çekirdek malzemesi için P–B eğrisi



Şekil 4.11. MOH çekirdek malzemesi için ansys core loss parametreleri (K_h, K_c, K_e)

Simülasyon sonuçları, manyetik alan arttığında MOH malzemelerinin daha az histerezis eddy (fuko, girdap akımı) kaybı olduğunu ortaya koymaktadır. Amorfun düzensiz yapısı nedeniyle MOH çalışma sırasında daha az kayıp yaşarken, düzenli kristal yapıda olan M5 çekirdeği daha yüksek kayıp değerlerine sahip olur.

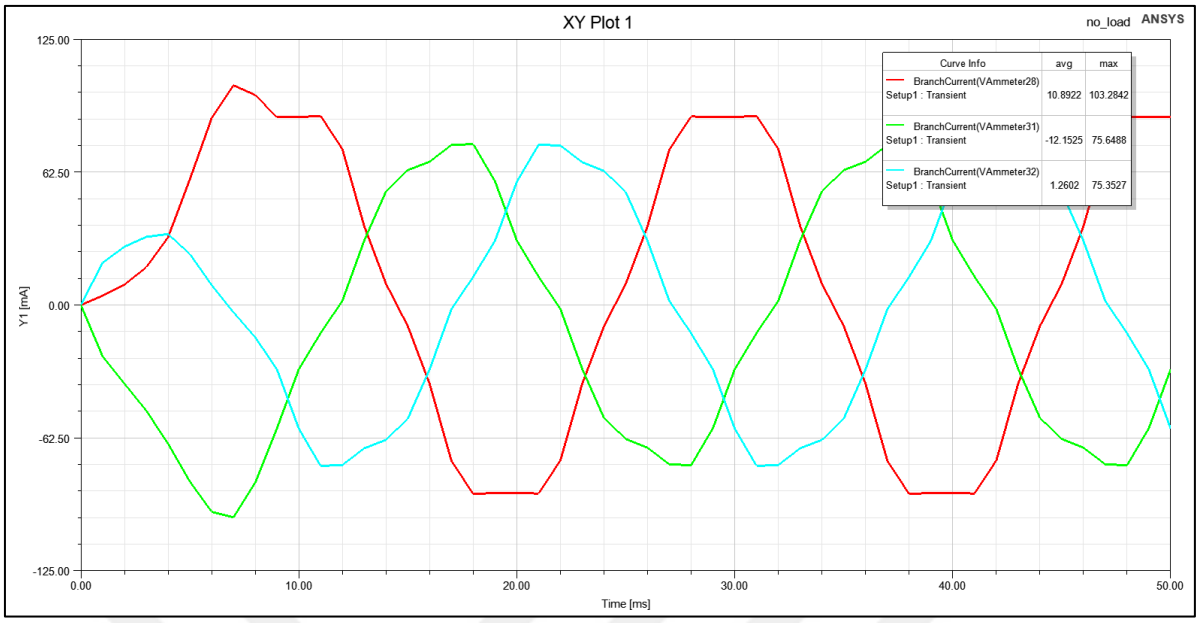
Sonuç olarak Şekil 4.8 ve Şekil 4.10'da gösterilen MOH ve M5 malzemelerinden elde edilen P-B eğrisi sonuçları, düşük kayıp katsayıları, kalınlık ve amorf yapısı ile MOH malzemesinin M5 malzemesine kıyasla daha düşük sıcaklık artışı, daha uzun ömürlü ve enerji tasarrufu bakımından daha avantajlı olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

4.2. Boşta Akım Davranışı Analizi

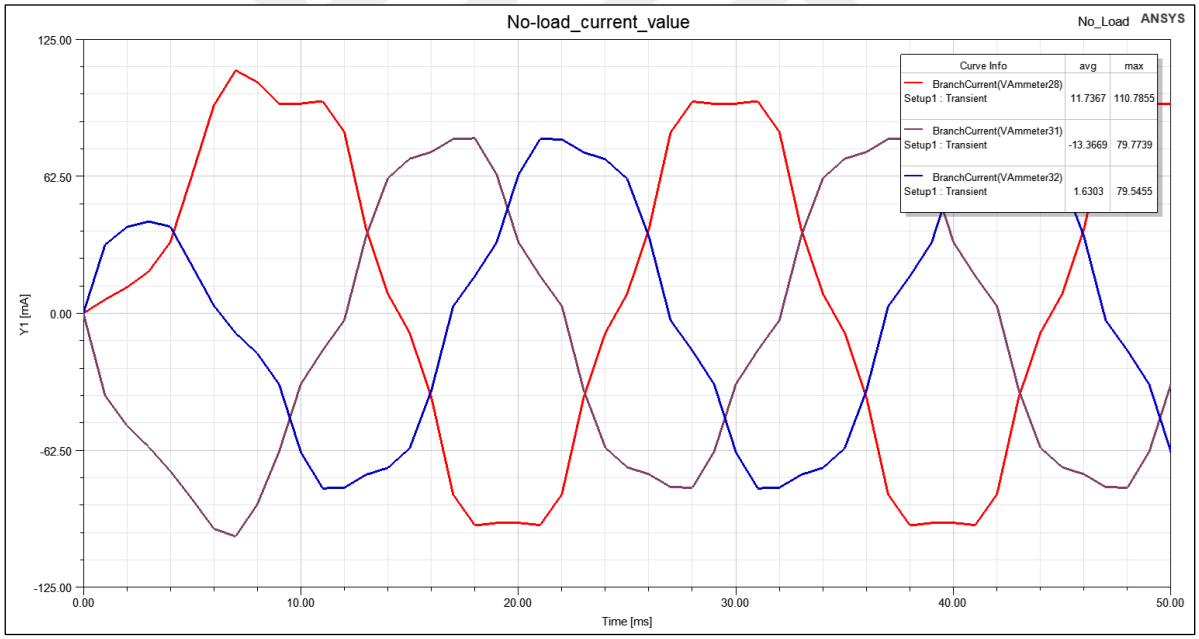
Transformatör boşta çalışma durumunda, yani ikincil sargıya herhangi bir yük verilmediğinde, birincil sargıdan geçen akıma yüksüz akım denir. Bu akım, esasen çekirdeğin manyetik olarak işlenmesi için gereklidir ve çekirdek malzemesinin manyetik özelliklerine bağlıdır.

Yüksüz koşullar altında analiz edilmiştir. Her iki çekirdek malzemesi konfigürasyonu için giriş dalga formu izlenmiştir. Şekil 4.13, MOH çekirdeği için yüksüz akım dalga formunu göstermektedir. Akım büyüklüğü, uyarma döngüsü boyunca düşük ve sabit kalmaktadır. Şekil 4.12'de, M5 çekirdeği için dalga formu, daha büyük bir manyetize edici akım talebini gösteren biraz daha yüksek bir genlik göstermektedir.

Sargıların nominal koşullara ayarlanması gerekir, genellikle sargı penceresinde veya harici bir devrede doğrudan nominal gerilim üzerinden beslenirler. İki yöntemi de görmek için boşta çalışma koşullarında harici bir kaynaktan yükte çalışma koşullarında ise doğrudan sargılar üzerinden besleme gerilimi verilmiştir.



Şekil 4.12. M5 çekirdekli trafonun boşta akım dalga formu



Şekil 4.13. MOH çekirdekli trafonun boşta akım dalga formu

4.2.1. Çekirdek kayıplarının dağılımı analizi

Çekirdek kayıpları üç ana bileşenden (histerezis kayıpları, fuko akımı (eddy akımları) kayıpları ve ek kayıplar (malzeme düzensizlikleri, alan duvarı hareketleri vb.)) oluşan transformatörün toplam verimliliğini doğrudan etkileyen temel bir parametredir. Bu üç bileşen birlikte, toplam çekirdek kayıplarını modellemek için sinüzoidal uyarma koşulları

altında sıklıkla kullanılan genelleştirilmiş Steinmetz denklemini oluşturur. Bu denkleme Bölüm 3'te detaylıca yer verilmiştir.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 incelendiğinde, MOH ve M5 çekirdeklerinin manyetik özellikleri açısından pek çok farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. MOH nüvesiyle tasarlanmış transformatörde, toplam çekirdek kaybı ortalama 2.3495 kW seviyesindedir. Bu toplam kaybın büyük bir kısmı, 1.4297 kW ile eddy akımlarından kaynaklanmaktadır. Histerezis kaybı ise 0.9199 kW olarak ölçülmüştür. Bu dağılım, MOH malzemesinin yapısal özelliği gereği düşük histerezis kayıplarına sahip olduğunu ancak özellikle yüksek frekans bileşenlerine karşı daha az dirençli olduğunu ve bu nedenle eddy akımı kayıplarının neden daha fazla olduğunu açıklamaktadır. Eğrilerin simetrik ve periyodik oluşu, çekirdek kaybının zamanla sabit rejime girmesi sistemin kararlı çalıştığını da işaret eder. Diğer yandan, M5 malzemesi kullanılan transformatörde toplam çekirdek kaybı ortalama 2.7357 kW olarak belirlenmiştir. Bu değer, MOH'a kıyasla yaklaşık %14,117 oranında daha yüksektir. M5 nüvesinde eddy akımı kayıpları ortalama 1.6820 kW düzeyindeyken, histerezis kaybı 1.0537 kW gibi daha yüksek bir değere sahiptir.

Bu sonuç, M5'in laminasyon yapısının (nüve için kullanılan malzemenin ince sac levhalar halinde üst üste yerleştirilmesi) eddy akımlarını sınırladığını, ancak daha geniş bir histerezis döngüsüne sahip olması nedeniyle mıknatıslanma sürecinde daha fazla enerji kaybına neden olduğu grafik değerlerinden çıkarılmaktadır.

Bu çıkan sonuçlara göre bölüm 3.5'te bahsedilen verim hesabı gerçekleştirilecek olursa;

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{P_{çıkış}}{P_{çıkış}+P_{\text{toplam kayıp}}} x100 \qquad (4.8)$$

Yukarıda ki formül ile verim hesabı yapıldığında Transformatörün görünür gücü S=2000 kVA, transformatör testleri ve verim hesaplarında genelde nominal çalışma koşulu için cosφ= 0.8–0.9 arası olarak alınırken nominal (rated) bakır kaybı 17.6 kW ve kıyaslayabilmek için yük oranına x (tam yük: 1.0; %75: 0.75; %50: 0.5) diyerek bu koşullar altında verim hesabı gerçekleştirilecektir.

- M5 : P_{fe} = 2.7357 kW (eddy 1.6820 + histerezis 1.0537)
- MOH : P_{fe} = 2.3495 kW (eddy 1.4297 + histerezis 0.9199)

Tam yükte (x=1);

$$P_{\text{çıkış}} = 2000 \times 0{,}9 = 1800\ kW \quad (4.9)$$

M5 için,

$$\eta_{M5} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{1800000}{1800000+(2735+17600)} x100 = \%98.8829 \quad (4.10)$$

MOH için,

$$\eta_{MOH} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{1800000}{1800000+(2349+17600)} x100 = \%98.9038 \quad (4.11)$$

%75 yükte (x = 0.75);

$$P_{\text{çıkış}} = 2000 \times 0{,}9 \times\ 0{,}75 = 1350\ kW \quad (4.12)$$

$$x^2 P_{cu} = 0{,}5625 \times 17600 = 9900\ W \quad (4.13)$$

M5 için,

$$\eta_{M5} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{1350000}{1350000+(2735+9900)} x100 = \%99.0727 \quad (4.14)$$

MOH için,

$$\eta_{MOH} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{1350000}{1350000+(2349+9900)} x100 = \%99.100 \quad (4.15)$$

%50 yükte (x = 0.5);

$$P_{\text{çıkış}} = 2000 \times 0{,}9 \times\ 0{,}5 = 900\ kW \quad (4.16)$$

$$x^2 P_{cu} = 0{,}25 \times 17600 = 4400\ W \quad (4.17)$$

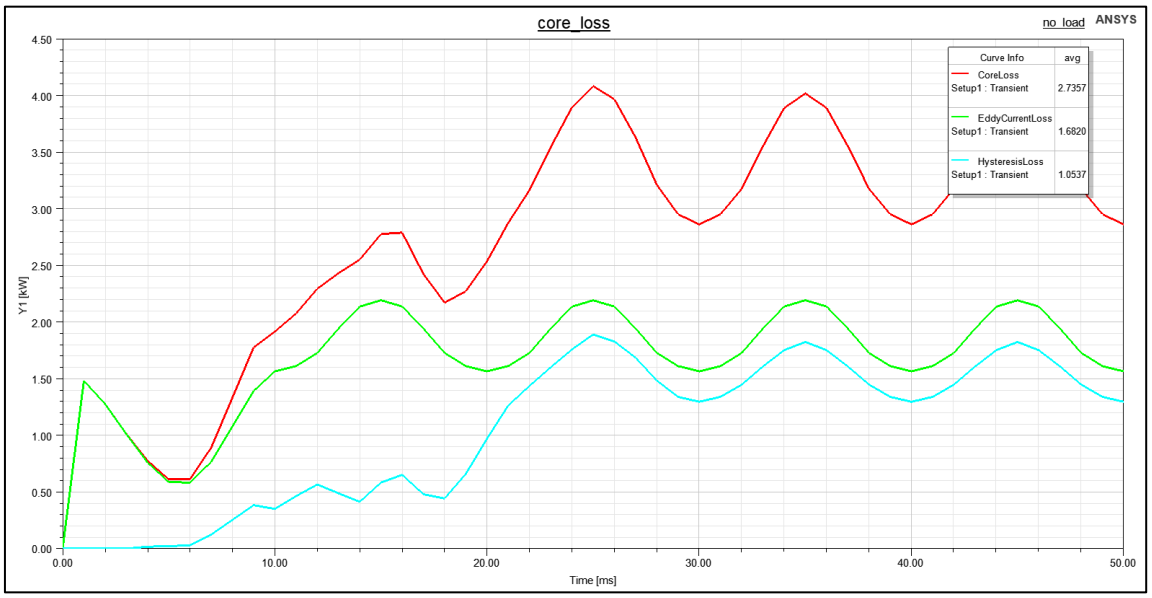
M5 için,

$$\eta_{M5} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{900000}{900000+(2735+4400)} x100 = \%99.213 \quad (4.18)$$

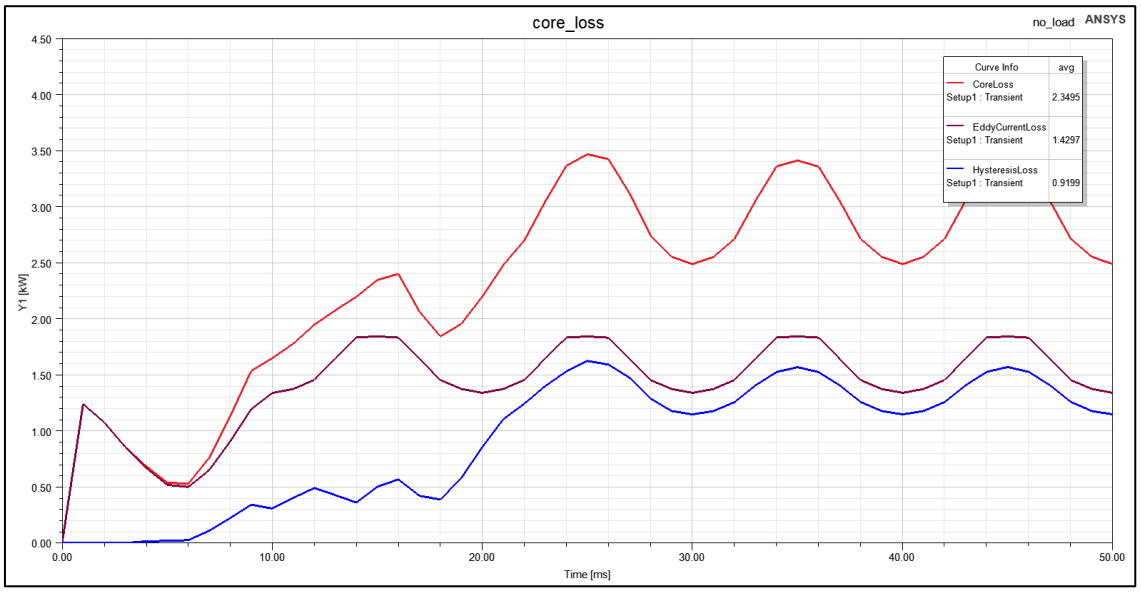
MOH için,

$$\eta_{MOH} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} x100 = \frac{900000}{900000+(2349+4400)} x100 = \%99.255 \quad (4.19)$$

Yapılan hesaplamalara göre MOH çekirdekli transformatör, M5'e çekirdekli transformatöre göre her yük oranında daha yüksek verim göstermektedir.



Şekil 4.14. M5 çekirdek için çekirdek kayıp bileşenleri (Histeresis, Eddy akımı, toplam kayıp) dalga formu



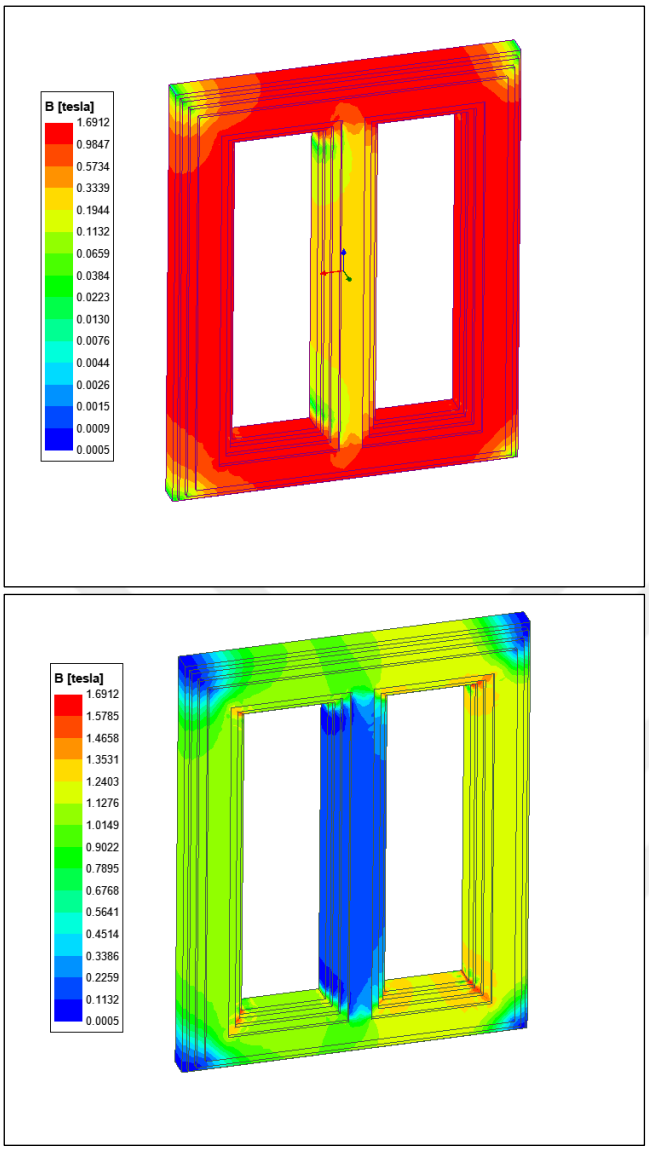
Şekil 4.15. MOH çekirdek için çekirdek kayıp bileşenleri (Histeresis, Eddy akımı, toplam kayıp) dalga formu

4.2.2. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı

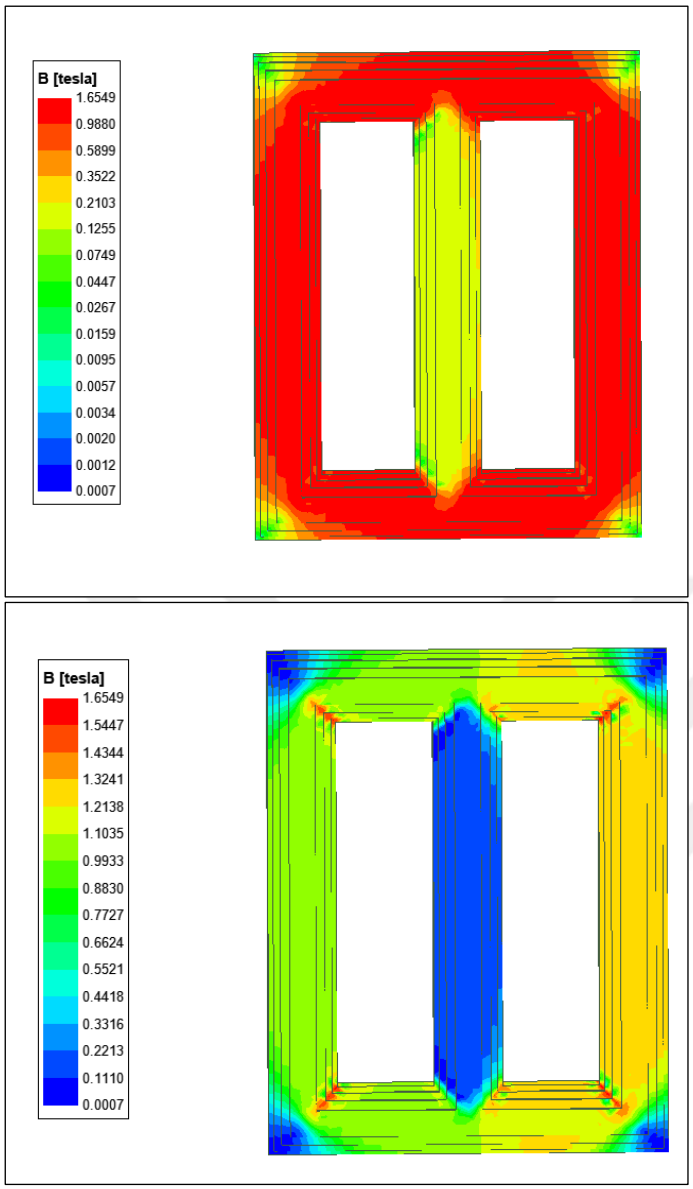
Manyetik akı yoğunluğu (B) ya da manyetik alan yoğunluğu olarak adlandırılan bu değer, birim alandan geçen manyetik akının miktarını belirten ve birimi Tesla (T ($1T = 1Wb/m^2$)) olan ölçüdür. Bu değer, nüve için kullanılan materyalin manyetik iletkenliği ve doygunluk eğilimlerini hakkında bilgi vermektedir. Nüve içindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımının analizi, malzeme seçimindeki ve çekirdek geometrisindeki elektromanyetik performansı değerlendirmek açısından son derece önemlidir.

MOH için en yüksek manyetik akı yoğunluğu değeri 1. 6549 T ve M5 nüvesi için ise 1. 6912 T'dır (Şekil 4.16). Bölüm 4.1.2'de belirtilen grafiklerdeki doyum noktası baz alındığında bu değerler doygunluğa yakın bir çalışma ortamını işaret etse de MOH malzemesinde akı dağılımı daha dengeli gözlemlenmektedir. M5 nüvesinde ise çekirdeğin köşe kısımlarında ve boyunduruk kısımlarında yerel doygunluk eğilimleri daha belirgin hale gelmiştir.

Analiz için kullanılan lineer ve logaritmik renk ölçekleri, elektromanyetik davranışı çeşitli açılarda değerlendirmek için kullanılır. Lineer ölçek kullanıldığında renk geçişleri eşit aralıklarla oluşturulduğu için yüksek manyetik akı yoğunluğu değerleri belirgin bir şekilde öne çıkmakta ve doyum bölgeleri anlaşılabilmektedir. Ancak düşük manyetik akı yoğunluğu değerleri benzer renk tonlarında gösterildiği için kolayca ayrım yapılamamaktadır. Logaritmik ölçek incelendiğinde ise düşük akı yoğunlukları daha belirgin bir şekilde görülmekte olup çekirdeğin çevresindeki akı dağılımının zayıf olduğu alanların net bir biçimde gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır. MOH malzemesi daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğundan dolayı relüktans değeri düşüktür, bundan dolayı M5 malzemesi ile aynı manyetik uyartım altında karşılaştırıldığı zaman akıyı daha dengeli bir şekilde dağıttığı ve yoğunluğun bir bölgede sıkışmadığı gözlemlenmiştir. Böylece, analiz bulguları MOH çekirdeğinin elektromanyetik açıdan daha kararlı bir performans sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.17).



Şekil 4.16. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı M5 (üstteki değer logaritmik, alttaki lineer)



Şekil 4.17. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı MOH (üstteki değer logaritmik, alttaki lineer)

4.2.3. Manyetik alan şiddeti dağılımı

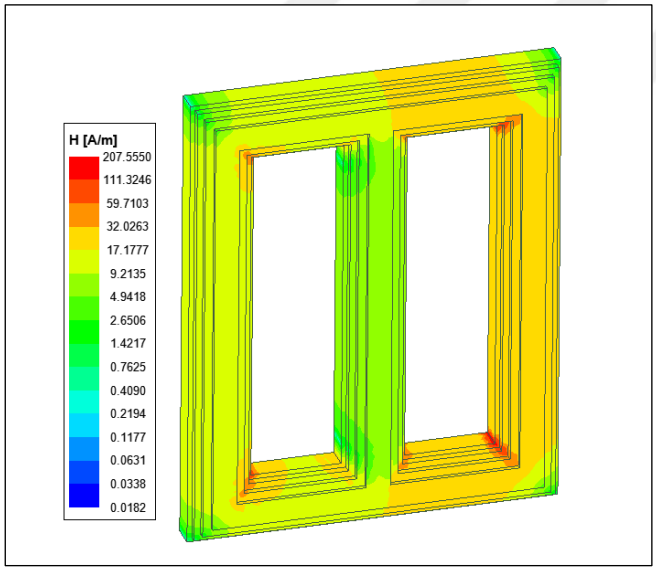
Manyetik alan şiddeti (H), bir elektrik akımının oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünü gösteren vektörel bir niceliktir ve birimi A/m'dir. Transformatör tasarımında manyetik alan şiddeti dağılımı, uyarılma seviyeleri, malzemenin doygunluğu ve elektromanyetik stres bölgeleri hakkında bilgiler vermektedir.

MOH ve M5 nüvelerine yapılan analizler sonucunda elde edilen manyetik alan şiddeti dağılımında, MOH malzemesi için maksimum manyetik alan şiddeti 255.0154 A/m olarak

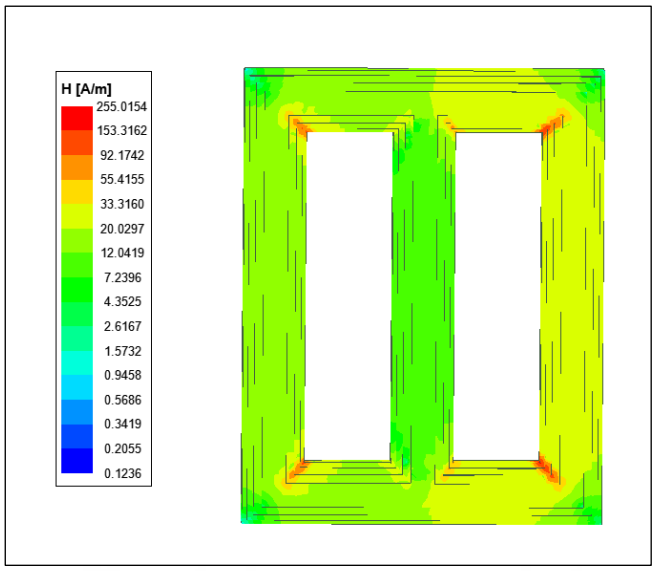
tespit edilmiştir. Manyetik alan şiddeti, nüvenin bütününe baktığımızda daha homojen bir şekilde yayılmış olup, yüksek alan şiddeti pencere kenarları, baca ve boyunduruk birleşim noktalarında görülmektedir. Bu da MOH malzemesinin manyetik uyartımı nüve içerisinde daha dengeli dağıttığını ve yerel doygunluk oluşumunu sınırladığını göstermektedir.

M5 nüve malzemesi için yapılan analizde ise maksimum manyetik alan şiddeti 207.5550 A/m 'dir. M5 nüvesinde yüksek manyetik alan şiddeti gösteren bölgelerin daha fazla olduğu özellikle nüvenin geçiş bölgelerinde artış gösterdiği Şekil 4.18'deki renk dağılımından açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da MOH malzemesinin daha yüksek değerlerine rağmen daha dengeli bir manyetik alan şiddeti dağılımı gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, aynı geometrik yapıda M5 malzemesinin daha düşük manyetik alan şiddeti oluşmasına rağmen daha zorlanmış bir elektromanyetik davranış sergilemektedir.



Şekil 4.18. Manyetik alan şiddeti dağılımı M5



Şekil 4.19. Manyetik alan şiddeti dağılımı MOH

4.2.4. Akım yoğunluğu dağılımı

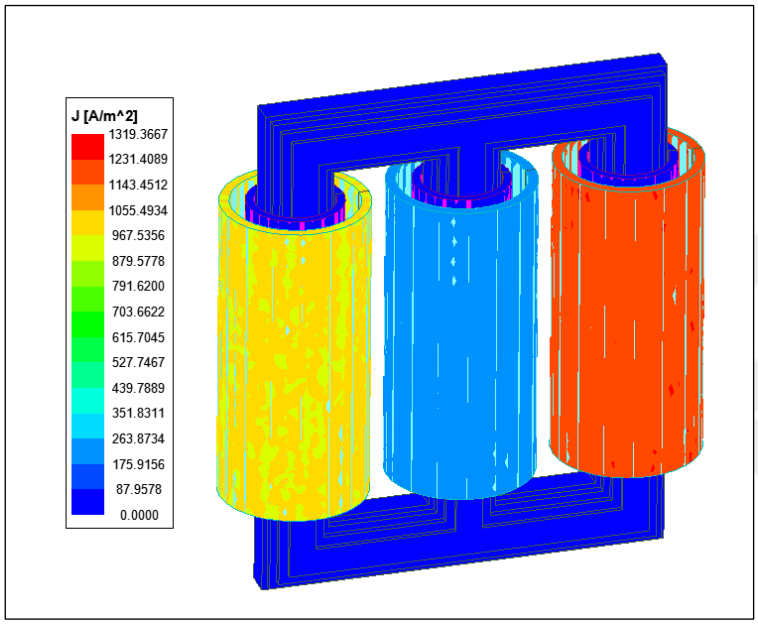
Akım yoğunluğu (J), belirli bir kesit alanından geçen, birim alan başına düşen elektrik akımını ifade eder ve birimi A/m²'dir. Transformatörlerde bu değer genelde sargıların üzerinde hesaplanır, çünkü nüve, laminalı bir yapıya sahip olduğundan içinden doğrudan akım geçmez. Ancak, alternatif manyetik alanlar etkisiyle nüve içinde oluşabilecek eddy akımları (girdap akımı), akım yoğunluğunun dağılımıyla belirlenebilir. Bu dağılımın incelenmesi, özellikle nüve kayıplarını ve malzemenin ısıl performansını analiz etmek açısından önem taşımaktadır.

$$i = \int J\, dA = J \int dA \Rightarrow J = \frac{i}{A} \tag{4.20}$$

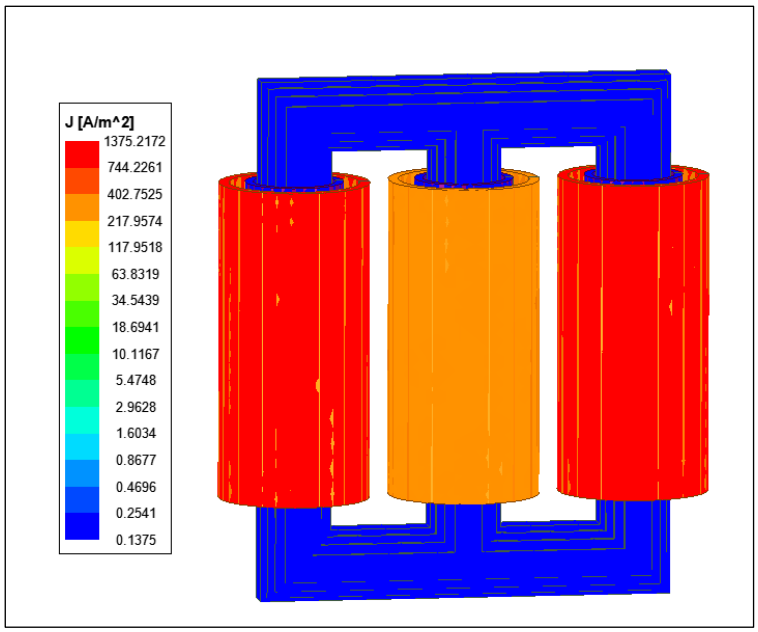
Sabit bir kesit alanı (A) varsayıldığında, akım yoğunluğu (J) değerinin büyüklüğü doğrudan geçen akıma bağlı olarak değişmektedir. Boşta çalışma durumunda birincil sargılarda uyarma akımı oluştuğundan dolayı direkt olarak akım yoğunluğu değerlerini belirlemektedir.

MOH ve M5 çekirdek malzemeleri üzerinde yapılan incelemelerde, en yüksek akım yoğunluğu değerinin MOH için 1375.2172 A/m² ve M5 için ise 1319.3667 A/m² olarak ölçülmüştür. Her iki alternatifte, akım yoğunluğu esasen sargılarda yoğunlaşmakta ve nüve içinde ihmal edilebilecek seviyede yer alır. Bu durum, her iki malzemenin laminalı

yapısından kaynaklanmakta ve çekirdek içinde oluşan eddy akımını engellendiğini göstermektedir. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de akım yoğunluğu dağılımı özellikle MOH nüvesi incelendiğinde daha yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması transformatörün daha etkin çalışmasını sağlayarak sargı ve çekirdek etkileşimini arttırmaktadır. Bu farklılıklar, malzeme özelliklerinin elektromanyetik davranış üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.20. M5 için akım yoğunluğu dağılımı



Şekil 4.21. MOH için akım yoğunluğu dağılımı

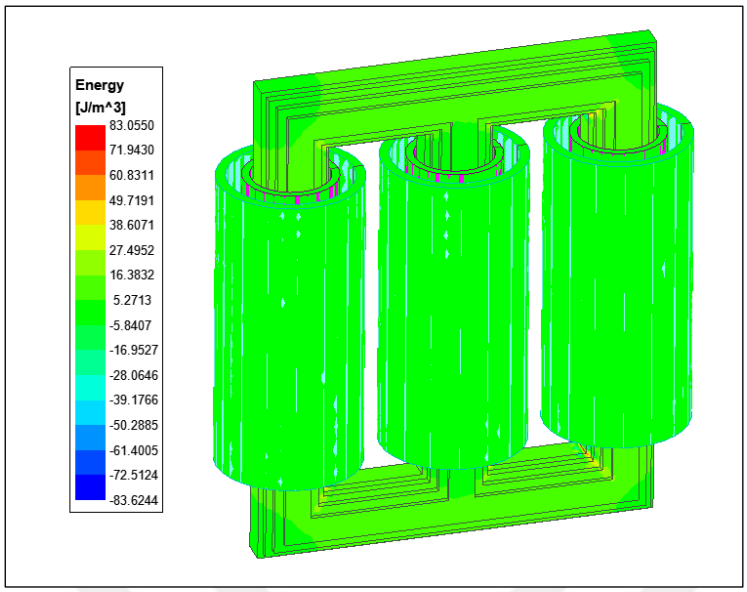
4.2.5. Manyetik enerji yoğunluğu dağılımı

Transformatör analizi gerçekleştirildiği için manyetik enerji yoğunluğuna (*W*) transformatörün çekirdeğinde oluşan manyetik alandan dolayı birim hacim başına depolanan enerji miktarı olarak ifade edilir ve birimi Joule/metreküp (J/m³)'tur. Enerji yoğunluğu aynı zamanda çekirdeğin doygunluk durumu hakkında bilgi verirken yoğun manyetik alanların nerelerde oluştuğunu da göstermektedir. Birim hacim başına depolanan enerji;

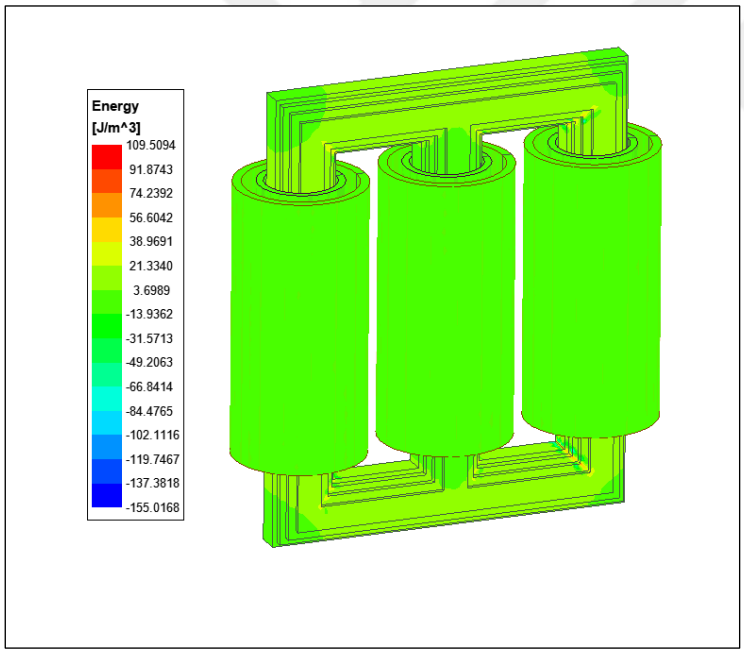
$$W = \frac{1}{2}\mu H^2 = \frac{B^2}{2\mu} \tag{4.21}$$

Burada *W* enerji yoğunluğu *(J/m³)*, μ *(μ_0 μ_r)* geçirgenlik *(H/m)* ve *H (A/m)* manyetik alan şiddetini ifade etmektedir.

Analiz sonuçlarına göre, MOH malzemesi için elde edilen maksimum manyetik enerji yoğunluğu değeri 109.5094 J/m³ ve M5 nüvesi için ise 83.0550 J/m³ olarak hesaplanmıştır. MOH malzemesinin daha yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması nedeniyle aynı alan şiddeti altında daha fazla manyetik enerji depolayabildiğini göstermektedir. M5 nüvesi incelendiğinde ise manyetik enerji yoğunluğu daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu sonuç boşta çalışma koşullarında M5 malzemesinin daha düşük geçirgenliğe ve daha yüksek relüktansa sahip olduğu için enerjiyi daha az depolayabildiğini göstermektedir. Enerji yoğunluğu haritasındaki renk farkı, MOH malzemesinin daha etkin ve verimli bir manyetik ortam sunduğunu kanıtlamaktadır (Şekil 4.22 ve Şekil 4.23).



Şekil 4.22. M5 için manyetik enerji yoğunluğu dağılımı



Şekil 4.23. MOH için manyetik enerji yoğunluğu dağılımı

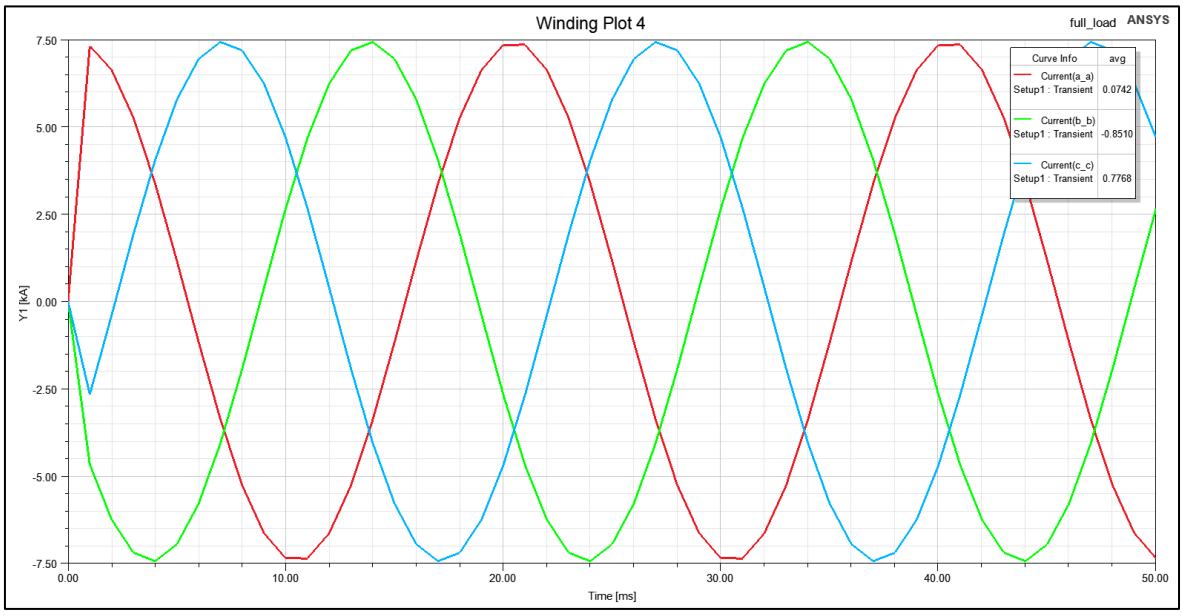
4.3. Tam Yükte Akım Davranışı Analizi

Yükte çalışma durumu, bir transformatörün maksimum nominal gücünü sağlarken çalışması halidir. Yani birincil sargıda tam yük akımı uygulanır ve ikincil taraftan nominal çıkış gücü alınır. Bu durum gerçekleştiğinde transformatör hem manyetik hem de elektriksel açıdan en yüksek gerilim, akım ve güç ile karşılaşmaktadır. Yükte çalışma

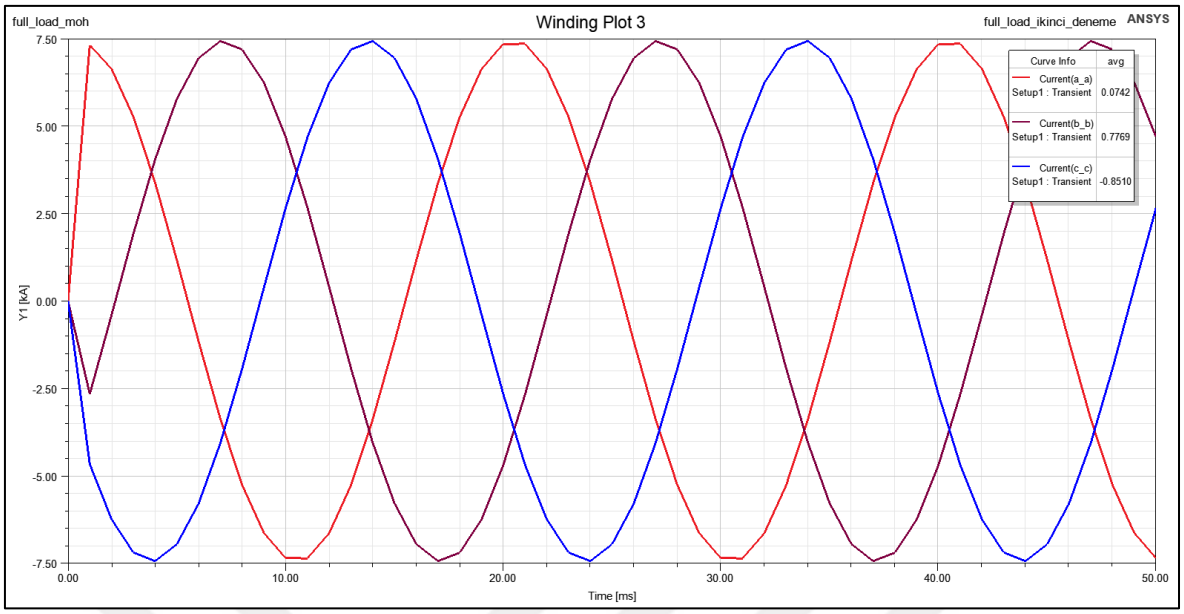
durumu incelendiğinde hem nüve davranışı hem de sargılardaki ısıl kayıplar, ısı dağılımı, elektromanyetik dağılımlar ve gerilim düşümleri de dikkate alınmalıdır.

Boşta çalışmada sadece elektromanyetik analizler göz önünde bulundurulurken, yükte çalışma durumunda hem elektromanyetik hem de elektriksel unsurlar birlikte dikkate alınır. Transformatörün işletim koşulları altında gerçek performansını ölçmek açısından yükte çalışma analizi oldukça önemlidir. ANSYS Maxwell ortamında yapılan yükte çalışma analizleri, transformatörün yük altındaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alanın şiddeti, akım yoğunluğu ve manyetik enerji yoğunluğu ve sargı kayıpları gibi değerleri incelemek için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yapılan yükte çalışma analizlerinde, birincil sargıya nominal akım verilerek ve ikincil sargıdan yük akımı çekilerek sistem tam kapasitede modellenmiştir. Bu koşullar altında MOH ve M5 nüve malzemelerinin Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te de görüldüğü üzere akım dalga şekillerinin korunarak 120 derecelik faz kaymasının sağlandığı ve her iki tasarımın yük koşullarının ve elektriksel parametrelerinin eşdeğer olduğunu göstererek manyetik alan dağılımı, sargı kayıpları gibi diğer kriterlerin performanslarının değerlendirilmesinin sağlıklı ve tutarlı bir şekilde yapılmasına zemin hazırlamaktadır.



Şekil 4.24. M5 çekirdekli transformatörün yük altında akım dalga formu



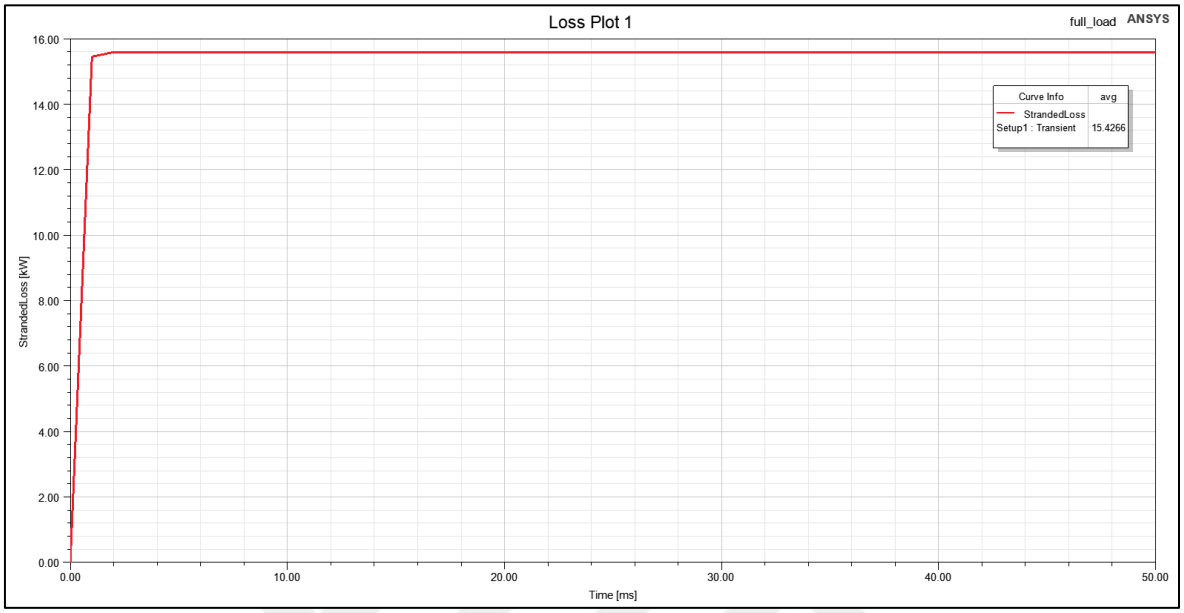
Şekil 4.25. MOH çekirdekli transformatörün yük altında akım dalga formu

4.3.1. Sargı (bakır) kayıpları

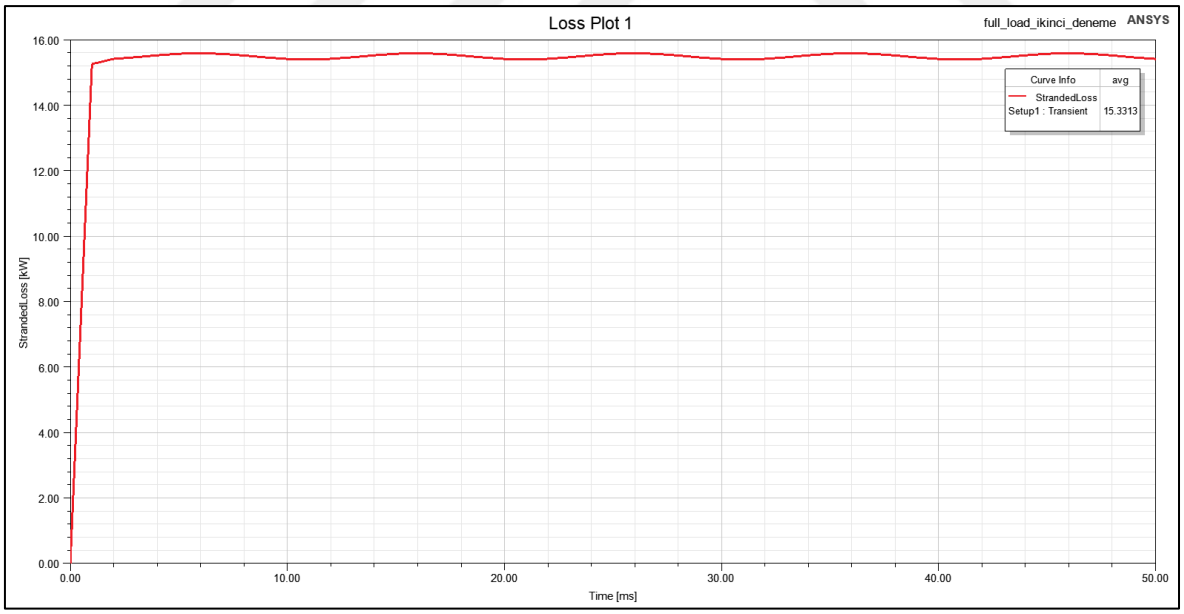
Yük altında çalışan transformatörde, sargılardan geçen akımın iletkenin elektriksel direnciyle olan etkileşimi nedeniyle ısıl enerji ortaya çıkar. Bu tür kayıplar, sargı kayıpları (bakır kayıpları, joule kayıpları) olarak adlandırılır. Analiz sonuçları incelendiği zaman MOH ve M5 çekirdek malzemeleri ile tasarlanmış transformatörlerin sargı kayıpları zamana bağlı davranışları (transient analiz) incelenerek her iki malzeme için karakteristik davranışları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Şekil 4.27'de MOH çekirdekli tasarımda sargı kaybı 15.3313 kW'tır. Şekil 4.26'da belirtilen aynı koşullar altında M5 çekirdekli tasarımında ise bu değer 15.4266 kW olarak tespit edilmiştir.

Transformatörlerin zamana bağlı olarak yük altında sargı kayıplarına ilişkin yapılan analizler sonucunda, Dalga tepelerinin MOH nüvesinde periyodik olarak ±0,2 kW mertebesinde salınması, yüksek başlangıç geçirgenliğin kaçak akı dağılımını faza bağlı olarak hafifçe modüle etmesinden kaynaklanmakta ve bu durum sargılar içinde indüklenen eddy akımlarını azaltarak ortalama bakır kaybını M5'e göre yaklaşık olarak %0,62 düşürmektedir. M5 nüvenin manyetik doyuma daha geç ulaşması ikincil sargılarda daha yüksek bir bakır kaybı ($P_{cu}=I^2.R$) bileşenine yol açmıştır. Böylece, nüve malzemesinin yalnızca çekirdek kayıplarını değil, yük akımı altında oluşan dağılım akısı üzerinden bakır

kayıplarını da etkilediği doğrulanmıştır. MOH nüve seçenekli tasarımda ise kayıpları düşürerek toplam verimliliği arttırmıştır.



Şekil 4.26. M5 transformatörün sargı (bakır) kayıpları



Şekil 4.27. MOH çekirdekli transformatörün sargı (bakır) kayıpları

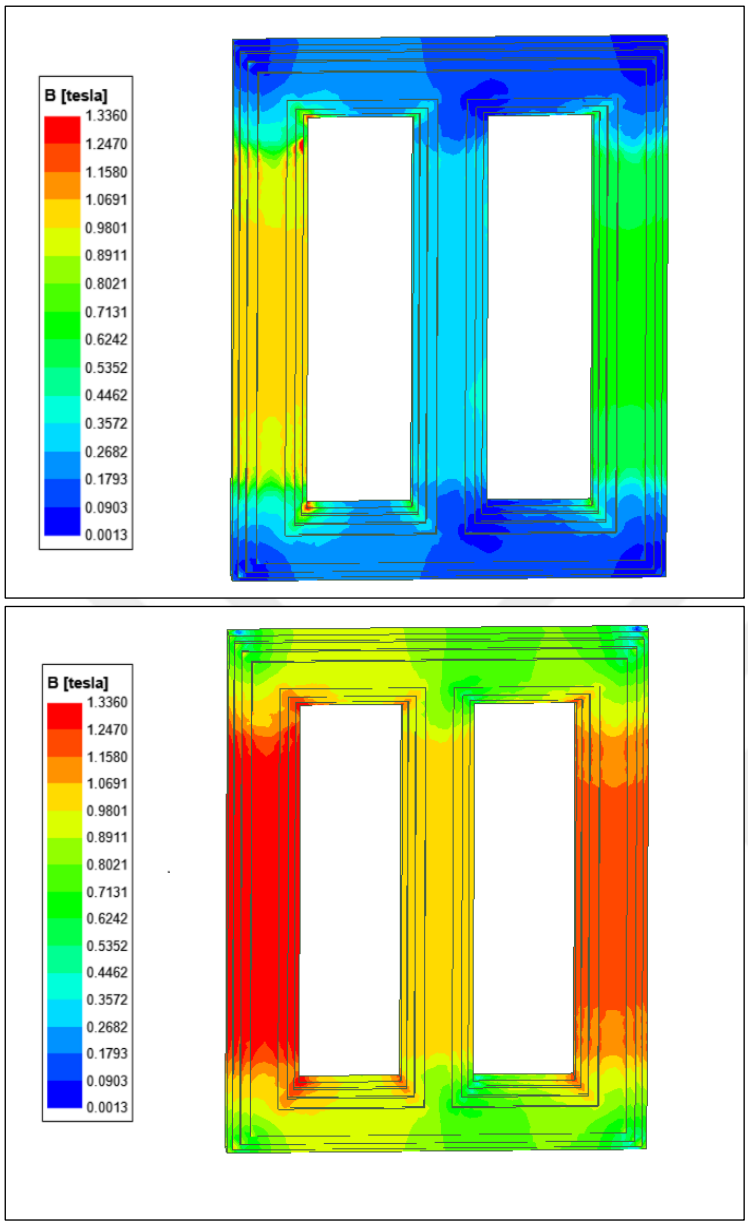
4.3.2. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Tam yük altında çalışırken, MOH ve M5 çekirdek malzemeleri ile tasarlanmış kuru tip transformatörlerin manyetik akı yoğunluğu dağılımları detaylıca incelenmiş olup farklar

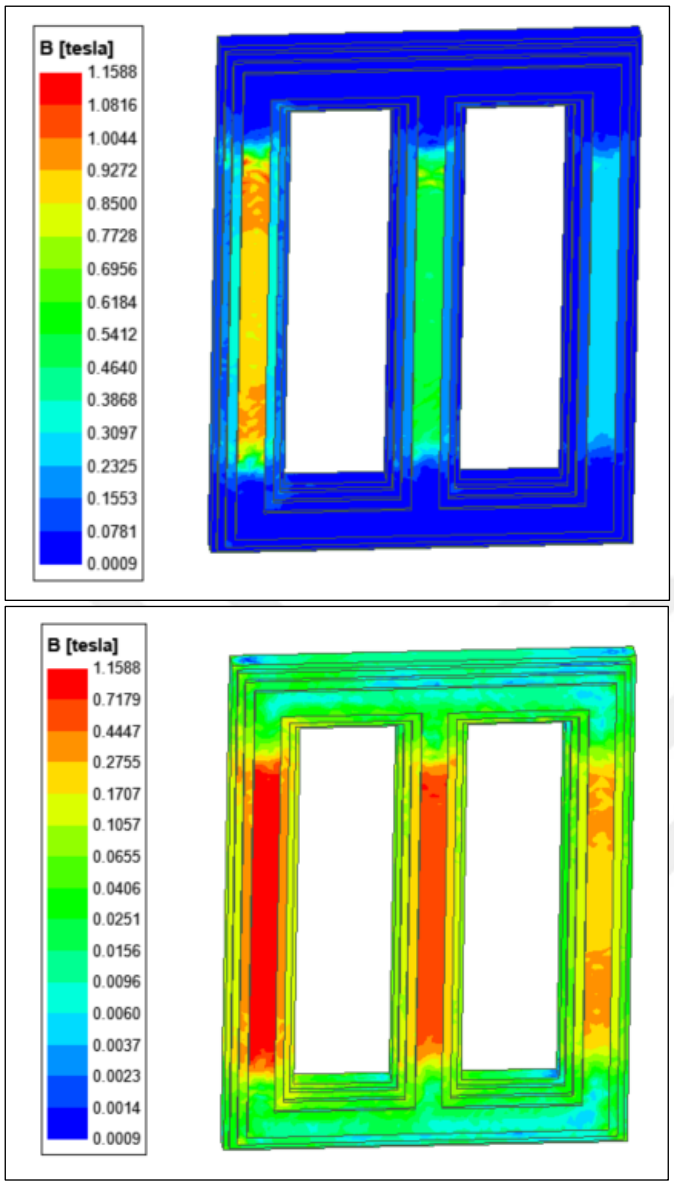
ortaya konmuştur. Öncelikle manyetik alan yoğunluklarının daha iyi yorumlanabilmesi için boşta çalışma durumundaki gibi hem lineer hem de logaritmik renk dağılımları kullanılmıştır.

Lineer renk dağılımına göre elde edilen MOH görsellerinde maksimum manyetik akı yoğunluğu değeri 1.1588 T olarak görünmekle olup geçiş değerleri keskince görsel üzerinden ayırt edilebilmektedir. Ancak logaritmik dağılıma bakıldığında daha yumuşak geçişler bulunduğundan dolayı daha homojen bir dağılım gözlemlendiği söylenebilir. MOH çekirdeğinde sargıların bulunduğu nüve bölgelerinde ve özellikle baca ile boyunduruk birleşim noktalarında belirgin yoğunlaşmalar olduğu, fakat genel olarak nüve içerisinde akının dengeli dağıldığı görülmektedir. M5 nüvesi için ise elde edilen lineer ve logaritmik renk dağılımı görsellerinde manyetik akı yoğunluğu maksimum değer 1.3360 T olarak ölçülmüştür. Renk dağılımı MOH çekirdeğine kıyasla daha dengesizdir ve özellikle baca ve boyunduruk birleşimlerinde ve sargıların bulunduğu nüve bölgelerinde daha yüksek manyetik akı yoğunluğu değerleri gözlemlenmektedir.

Sonuç olarak, MOH çekirdekli transformatörün daha düşük manyetik akı yoğunluğu değeri ile daha homojen bir manyetik akı dağılımı sağlarken (Şekil 4.29), M5 nüvesinin daha yüksek manyetik akı değerlerine sahip olduğu yayılımın dengesiz olduğu görülmektedir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı M5 (sırasıyla lineer, logaritmik)



Şekil 4.29. Transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı MOH (sırasıyla lineer, logaritmik)

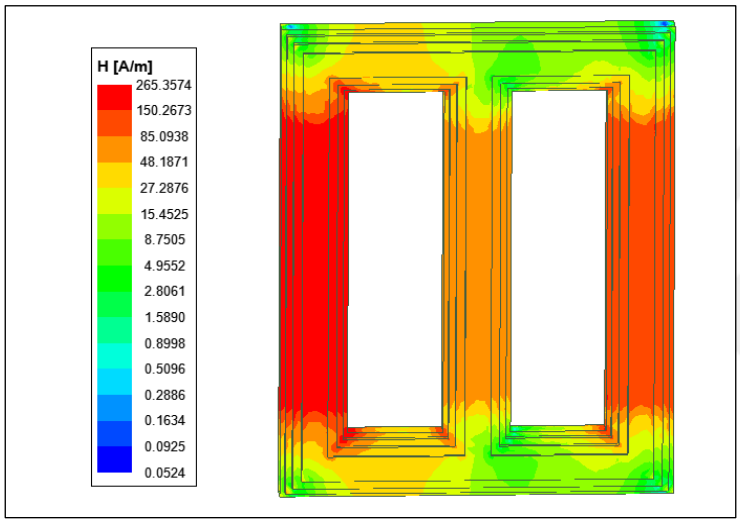
4.3.3. Manyetik alan şiddeti dağılımı

Transformatörlerin yük altında çalışırken çekirdek boyunca oluşan manyetik alan şiddeti, nüve malzemesinin elektromanyetik verimliliği ve doyum davranışı hakkında bilgiler vermektedir. Analizler hem lineer hem de logaritmik renk skalaları ile sunulmuştur.

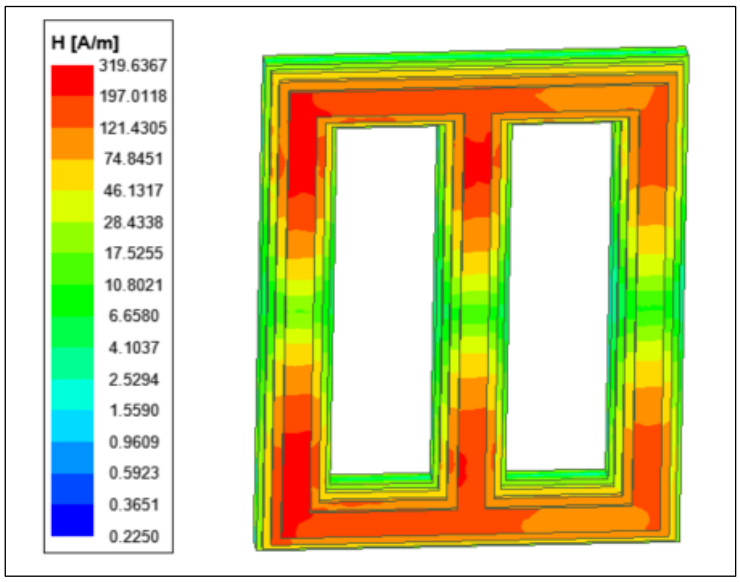
MOH ve M5 çekirdeklerine yapılan analizler sonucunda elde edilen manyetik alan şiddeti dağılımında, MOH malzemesi için maksimum manyetik alan şiddeti yaklaşık 319.6367 A/m ve M5 nüve malzemesi için ise maksimum manyetik alan şiddeti yaklaşık olarak

265.3574 A/m ’dir. MOH çekirdeği için manyetik alan şiddeti, nüvenin bütününe baktığımız zaman daha dengeli bir şekilde yayılıyorken M5 nüvesinde renk dağılımları oldukça dengesizdir. Bu da MOH malzemesinin manyetik uyartımı M5 malzemesine göre nüve içerisine daha dengeli dağıttığını göstermektedir.

Sonuç olarak boşta çalışma analizinde olduğu gibi Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de, MOH malzemesinin daha yüksek değerlerine rağmen daha dengeli bir manyetik alan şiddeti dağılımı sergilerken M5 nüvesinde dengesiz dağılım açıkça anlaşılmaktadır.



Şekil 4.30. Transformatör çekirdeğindeki manyetik alan şiddeti dağılımı M5

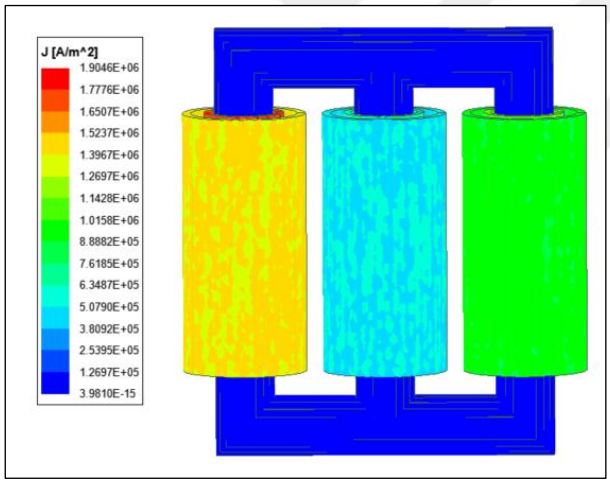


Şekil 4.31. Transformatör çekirdeğindeki manyetik alan şiddeti dağılımı MOH

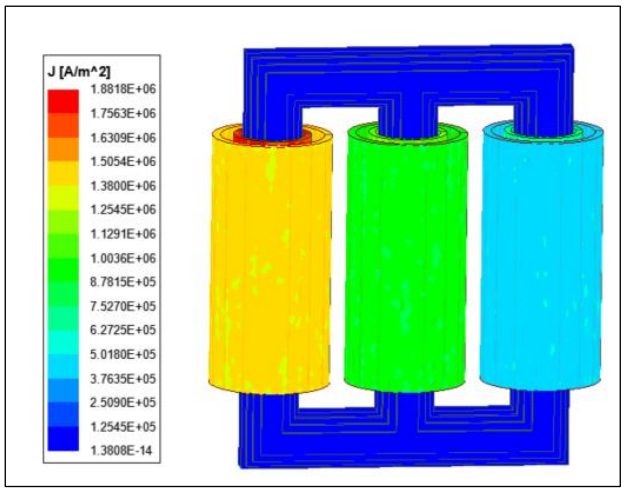
4.3.4. Akım yoğunluğu dağılımı

Yükte analiz durumu altında, MOH ve M5 nüveli transformatörlerin sargılarındaki akım yoğunluğu, kayıpların değerlendirilmesi ve iletkenlerin ısıl performansı hakkında bilgiler verir. Analiz sonuçlarına göre MOH nüveli tasarımda manyetik akım yoğunluğu maksimum $1.8818 \times 10^6 A/m^2$'dir. M5 nüve tasarımını incelediğimizde ise akım yoğunluğu maksimum 1.9046×10^6 A/m²'dir.

Nüve malzemesi (MOH ve M5) sargı yapısını değiştirmese de manyetik geçirgenlik ve akı dağılımı üzerindeki etkileri dolaylı olarak sargılardaki akım yoğunluğunu etkilemektedir (Şekil 4.32, Şekil 4.33). Sonuç olarak MOH'un manyetik akım yoğunluğu bakımında M5 çekirdeğine kıyasla fark küçük gibi gözükse de MOH'un sargı sistemine olumlu bir şekilde katkı sağlamasına ve bakır kayıplarının M5'e göre daha avantajlı bir performans göstermesine zemin hazırlar.



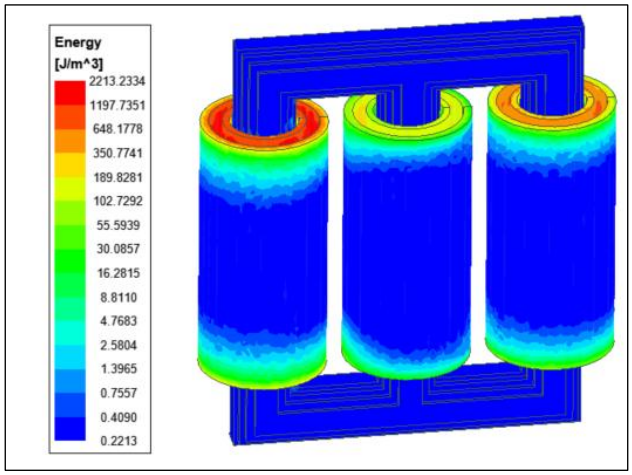
Şekil 4.32. Transformatör çekirdeğindeki akım yoğunluğu dağılımı M5



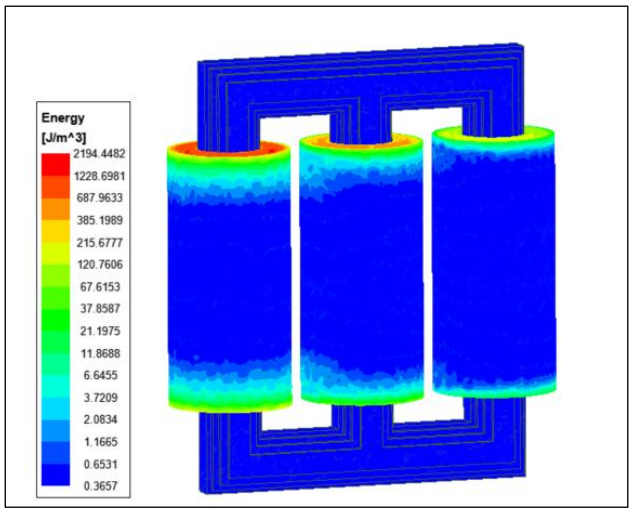
Şekil 4.33. Transformatör çekirdeğindeki akım yoğunluğu dağılımı MOH

4.3.5. Manyetik enerji yoğunluğu dağılımı

Yük altında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, MOH ve M5 nüve malzemeli modellerin enerji yoğunluğu dağılımına ilişkin sonuçları Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de gösterilmektedir. Bu görsellerde hem sargılar hem de nüve dikkate alınmıştır. MOH için maksimum enerji yoğunluğu yaklaşık olarak 2194.4482 J/m^3'ken M5 nüvesinde yaklaşık olarak 2213.2334 J/m^3'tur. Analizler sonucunda, MOH çekirdekli transformatörlerin yük altında hem nüve hem de sargı bölgelerinde daha düzenli ve homojen bir dağılım sergilediği için bölgesel enerji birikimleri M5 çekirdeğine göre az olduğunda termal açıdan daha avantajlı olmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 4.34. Transformatör çekirdeğindeki enerji yoğunluğu dağılımı M5



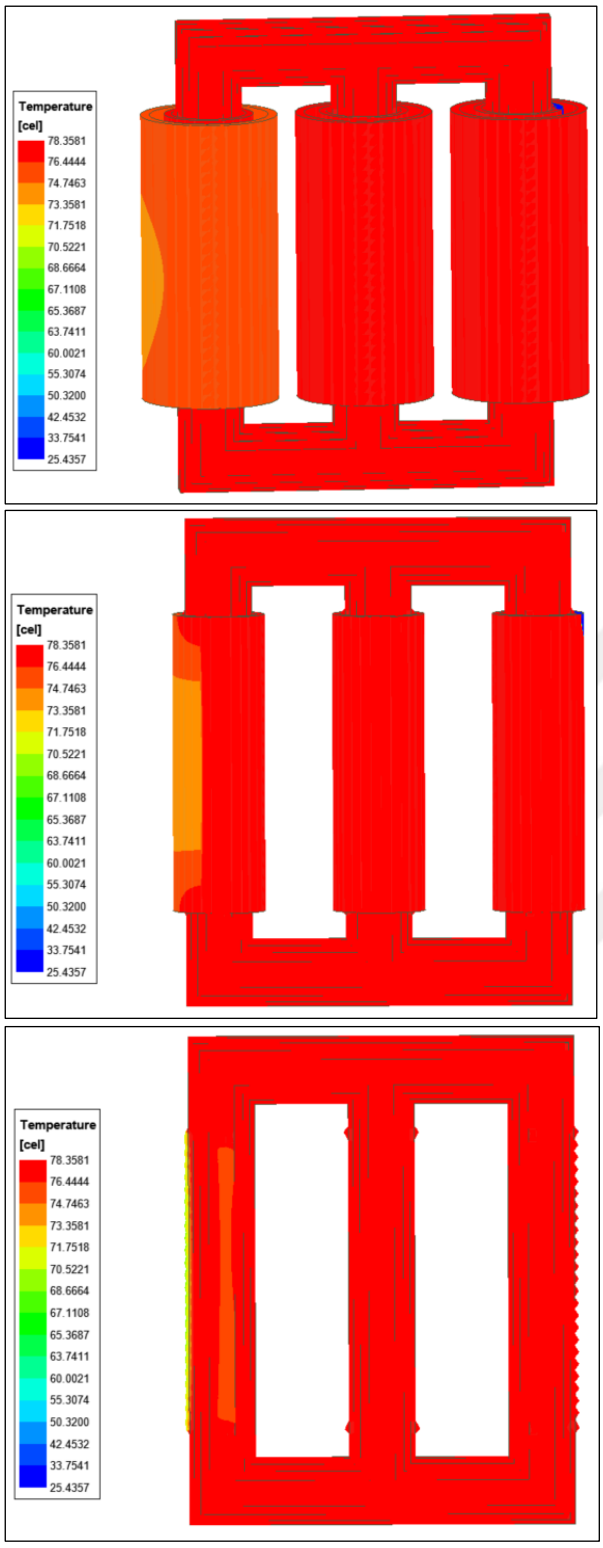
Şekil 4.35. Transformatör çekirdeğindeki enerji yoğunluğu dağılımı MOH

5. TERMAL PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

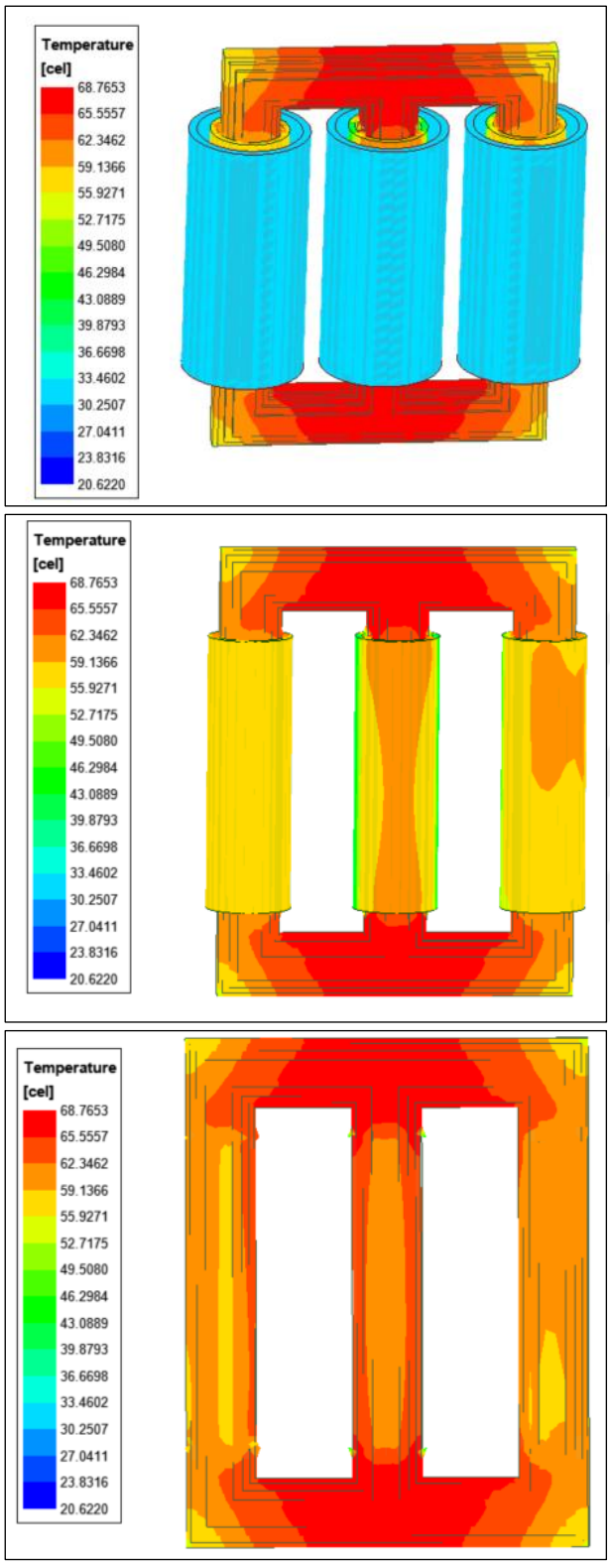
Bu bölümde ANSYS Icepak yazılımı kullanılarak, MOH ve M5 nüve malzemeleri için boşta çalışma koşulları altındaki termal davranışlar analiz edilerek incelenmiştir. Maxwell ortamında elde edilen mesh ağı yapısı ve elektromanyetik veriler Icepak arayüzüne aktarılmıştır. Analiz sonucundan elde edilen sıcaklık dağılımları hem sargılar hem de nüve üzerinde değerlendirilerek, malzeme kaynaklı farklılıklar ortaya konmuştur.

Analiz sonucunda Şekil 5.1'da ise M5 sıcaklık değerinin değişkenliği gösterilmiştir. M5 nüve analizi incelendiği zaman maksimum termal sıcaklığın 78.3581°C olduğu gözlemlenmektedir. Transformatörün ikincil sargılar, birincil sargılar ve nüve bakımından yoğunluğun kırmızı ve turuncu renkler ağırlığında olduğundan dolayı renk ölçeğine göre maksimum termal sıcaklık değerinde çalıştığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5.2 incelendiğinde ise maksimum termal sıcaklığın 68.7653°C olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca şekil dikkatlice incelendiğinde transformatörün 3 katmanı hakkında fikir sahibi olunmaktadır. İlkinde sekonder sargılar mavi birincil sargılar ve nüvenin sarı, turuncu ve kırmızı renklerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin boşta çalışma durumunda sekonderden çok küçük akım değerleri geçtiği için sıcaklık değeri çok fazla artmamaktadır. İkinci ve üçüncü görselde ise birincil sargılar ve nüve gözlenmektedir bu bölgelerde sıcaklık dağılımı dengeli ve düzenli bir şekilde yayılmıştır.



Şekil 5.1. M5 çekirdeğindeki sıcaklık dağılımı (sırasıyla ikincil sargı, birincil sargı ve nüve)



Şekil 5.2. MOH çekirdeğindeki sıcaklık dağılımı (sırasıyla ikincil sargı, birincil sargı ve nüve)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 2000 kVA 30/0.4 standart bir M5 nüve malzemeli kuru tip transformatörün elektromanyetik anlamda iyileştirmesini gerçekleştirmek için alternatif olarak çekirdek malzemesini MOH kullanarak bu iki malzemenin performansı sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile ANSYS Maxwell'de karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu transformatörlerin ANSYS Icepak üzerinden analizi gerçekleştirilerek nasıl bir sıcaklık değişimi gösterdiği de incelenmiştir. Geleneksel M5 malzemesi bilindiği üzere daha düşük maliyette olurken kabul edilebilir manyetik davranış sergiler; ancak daha az düzenli manyetik alan oluşumuna ve daha yüksek çekirdek kayıplarına neden olur. Öte yandan, amorf yapılı MOH çekirdek malzemesi incelendiğinde daha kolay mıknatıslanma seviyeleri, düzenli manyetik alan oluşumu, daha düşük boşta akım ve daha dengeli enerji yoğunluğu profili ile öne çıkmaktadır.

Çekirdek malzeme seçiminin transformatörün verimliliği ve genel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu oldukça açıktır. Analiz sonuçları, amorf malzemelerin sadece kayıpları azaltmakla kalmayıp aynı zamanda termal kararlılık ve düşük yük koşullarında önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, malzeme seçimi amaçlanan kullanım, verimlilik hedefleri ve maliyet-performans dengesi dikkate alınarak yapılmalıdır.

Bu çalışmada, MOH ve M5 çekirdek malzemeleriyle tasarlanan kuru tip transformatörlerin elektromanyetik performansı hem yüksüz hem de tam yük koşulları altında kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Karşılaştırma, sonlu elemanlar simülasyonları kullanılarak manyetik alan davranışı, güç kayıpları, akım yoğunluğu ve enerji dağılım parametreleri temelinde yapılmıştır.

B-H karakteristik analizine göre, MOH çekirdek malzemesi benzer akı yoğunluğu (B) seviyelerinde daha düşük manyetik alan şiddeti (H) değerleri göstermiştir. Yüksüz koşullar altında, MOH için maksimum H değeri 255.0154 A/m olarak ölçülürken, M5 için 207.5550 A/m olarak ölçülmüştür. İlgili B değerleri MOH için 1.6549 T ve M5 için 1.6912 T olmuştur. Bu sonuçlar, MOH'un daha yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olduğunu ve bunun da daha düşük uyarma gereksinimleri ve daha düşük çekirdek kayıpları ile sonuçlandığını doğrulamaktadır. P-B eğrisi karşılaştırması da bu bulguyu

desteklemektedir. Benzer akı yoğunluğu altında, MOH, M5'e kıyasla çekirdek kayıplarında daha yavaş bir artış göstermiştir. Bu durum, daha düşük histerezis ve eddy akımı etkilerine bağlanmaktadır. Tam yük koşullarında, farklar daha belirgin hale gelmiştir. MOH çekirdeği yaklaşık 1.1588 T'lik maksimum akı yoğunluğuna ulaşırken, M5 çekirdeği 1.3360 T'dır ve bu da M5 çekirdeğinde lokalize doygunluğa işaret etmektedir. Benzer şekilde, MOH'daki manyetik alan şiddeti, M5'in 265.3574 A/m'lik değerine göre bakıldığında 319.6367 A/m'de olarak MOH'un daha geniş akı dağılımına sahip daha güçlü manyetik alanlarla başa çıkma kabiliyetini göstermektedir. MOH, manyetik özellikler, akı dağılımı ve enerji verimliliği açısından önemli ölçüde daha iyi performans gösterir ve burdan kayıp değerleri MOH çekirdeği için 2.349 kW, M5 çekirdeği için ise 2.735 kW. Bileşenlere bakıldığında MOH'ta 1.4297 kW'lık eddy kaybına karşılık 0.668 kW histerezis kaybı görülürken M5'te eddy kaybı 1.682 kW; histerezis kaybı ise 0.919 kW'tur. Böylece MOH'un toplam boşta kaybı M5'e göre yaklaşık %14.117 kW daha düşüktür. Analizlerde elde edilen sonuçların standartta belirtilen değerlere yakın oluşu analizin doğruluğunu göstermektedir.

ANSYS Maxwell'de gerçekleştirilen yük analizi ise MOH çekirdekli trafoda 15.331 kW, M5 çekirdekli trafoda 15.426 kW bakır kaybı hesaplanmıştır. MOH ile M5 arasında yük kayıpları bakımından yalnızca 0.095 kW (yaklaşık %0.6) gibi neredeyse ihmal edilebilir bir fark vardır ancak bu küçük avantaj dahi MOH lehinedir; M5 sargılarında oluşan daha yüksek çalışma sıcaklığı, bakır direncini artırarak kaybı az da olsa büyütmektedir. Dolayısıyla MOH, boşta çalışmadaki belirgin enerji tasarrufunun yanı sıra yük altında da verimli davranarak toplam işletme kayıplarını düşürmeye devam eder.

Bu çalışma kuru tip transformatör tasarımlarında geleneksel M5 nüvesine alternatif olarak MOH çekirdek malzemelerinin değerlendirilmesi konusunda literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, farklı güç seviyeleri, harmonik içerikler ve termal yük profilleri altında benzer analizler gerçekleştirerek daha geniş uygulama alanları için rehberlik sağlayabilir. Genel olarak, bulgular MOH çekirdek malzemesinin manyetik doygunluk direnci, enerji yoğunluğu ve akı dağılımı açısından üstün elektromanyetik performans sunduğunu göstermektedir. Çekirdek verimliliği ve güç kullanımındaki avantajları, onu yüksek performanslı kuru tip transformatör uygulamaları için güçlü bir aday haline getirmektedir. MOH tabanlı transformatörler, M5 gibi geleneksel silikon çelik çekirdeklere güvenilir ve verimli bir alternatif olarak sunulduğu analizlerle gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Kul, S., Celtek, S. A. ve Iskender, I. (2021). Metaheuristic algorithms based approaches for efficiency analysis of three-phase dry-type transformers. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(4), 889–903.

2. Kaur, S. ve Kaur, D. (2020). 3-D comparative analysis of 3-phase transformer core using CRGO silicon steel, amorphous and FINEMET for low losses using ANSYS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872(1), 012021.

3. Mehta, H. D. ve Patel, R. M. (2014). A review on transformer design optimization and performance analysis using artificial intelligence techniques. *International Journal of Science and Research*, 3(9), 726–733.

4. Eslamian, M., Vahidi, B. ve Hosseinian, S. H. (2010). Combined analytical and FEM methods for parameters calculation of detailed model for dry-type transformer. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(3), 390–403.

5. Kul, S. ve Tezcan, S. S. (2023). Comparison of FEA-based thermal and loss analyses of the dry-type transformer using different grades of core material. *Electrica*, 23(1), 121–128.

6. Hsieh, M. F., Hsu, C. H., Fu, C. M. ve Huang, Y. M. (2015). Design of transformer with high-permeability ferromagnetic core and strengthened windings for short-circuit condition. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1–4.

7. Dawood, K., Komurgoz, G. ve Isik, F. (2019, 15-17 April). *Modeling of distribution transformer for analysis of core losses of different core materials using FEM.* In 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Bahrain, 1–5.

8. Digalovski, M., Najdenkoski, K. ve Rafajlovski, G. (2013). *Impact of current high order harmonic to core losses of three-phase distribution transformer*. In EUROCON 2013, Zagreb, 1531–1535

9. Urooj, S., Singh, T., Amir, M. ve Tariq, M. (2020). Optimal design of power transformer with advance core material using ANSYS technique. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 4(5), 1–11.

10. Eslamian, M., Vahidi, B. ve Eslamian, A. (2011). Thermal analysis of cast-resin dry-type transformers. *Energy Conversion and Management*, 52(7), 2479–2488.

11. Wang, Y., Wang, Z. ve Fang, S. (2019). Three-dimensional magnetic and temperature field coupling analysis of dry-type transformer core under different excitations. *Progress in Electromagnetics Research C*, 95, 75–89.

12. Jeszenszky, S. (1996). History of transformers. *IEEE Power Engineering Review*, 16(12), 9.

13. Smolka, J. ve Nowak, A. J. (2008). Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(10), 1393–1410.

14. Esenboga, B. ve Demirdelen, T. (2022). Efficiency and cost based multi-optimization and thermal/electromagnetic analyses of 3-phase dry-type transformer. *IETE Journal of Research*, 68(4), 2885–2897.

15. Özüpak, Y., Teke, İ. H. ve Mamiş, M. S. (2021). Analysis of electronic circuit transformer with experimental and finite elements. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 8(1), 21–26.

16. Maity, S., Maur, S., Dalai, S., Chatterjee, B. ve Chatterjee, S. (2023, 29-30 September). *Electromagnetic and thermal modelling of a dry-type transformer using FEMM and ANSYS Maxwell*. In 2023 IEEE 2nd International Conference on Industrial Electronics: Developments and Applications (ICIDeA), Imphal, 121–125.

17. Özyalçın, B. (2007). *Enerji sistemlerinde 400 kVA'ya kadar kuru tip trafolar, verimi etkileyen faktörler ve tipik örnek*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12-22.

18. Desai, K. H. ve Patel, S. B. (2018). Thermal analysis of power transformer using FEM: A technological review. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 5(4), 2288–2295.

19. Liu, C., Ruan, J., Wen, W., Gong, R. ve Liao, C. (2016). Temperature rise of a dry-type transformer with quasi-3D coupled-field method. *IET Electric Power Applications*, 10(7), 598–603.

20. Soltanbayev, I., Sarmukhanov, R., Kazymov, S., Otelgen, T. ve Bagheri, M. (2017, 2-30 June). *Automated dry-type transformer aging evaluation: A simulation study*. In 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 1-6.

21. Jeszenszky, S. (1996). History of transformers. *IEEE Power Engineering Review*, 16(12), 9.

22. Griffiths, D. J. (2023). *Introduction to electrodynamics* (5th ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 301-316.

23. Sadiku, M. N. O. ve Nelatury, S. (2001). *Elements of electromagnetics* (2nd ed.). New York: Oxford University Press, 309-316.

24. Halliday, D., Resnick, R. ve Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics* (10th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 930-945.

25. İnternet: International Electrotechnical Commission. (2018). *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers (IEC 60076-11:2018)*. Web: https://digital-library.theiet.org/doi/full/10.1049/iet-epa.2015.0491, Son Erişim Tarihi: 22.06.2025.

26. İnternet: International Electrotechnical Commission. (2013). *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code) (IEC 60529:2013).* Web: https://www.researchgate.net/publication/319031589_Automated_dry-type_transformer_aging_evaluation_A_simulation_study, Son Erişim Tarihi: 17.05.2025.

27. İnternet: International Electrotechnical Commission. (2019). *Electrical insulation – Thermal evaluation and designation (IEC 60085:2019).* Web: https://www.researchgate.net/publication/223577946_Experimental_validation_of_the_coupled_fluid_flow_heat_transfer_and_electromagnetic_numerical_model_of_the_medium-power_dry-type_electrical_transformer, Son Erişim Tarihi: 18.05.2025.

28. İnternet: Wikipedia. (2025, Şubat 17). Ansys. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys, Son Erişim Tarihi: 17.02.2025.



Gazili olmak ayrıcalıktır…