

**T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ TRANSFORMATÖRÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
KULLANILARAK 2 VE 3 BOYUTLU TASARIMI VE KAYIP
ANALİZİ**

Mehmet ÇEÇEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DIYARBAKIR

Mayıs 2018

T.C DİCLE UNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Mehmet ÇEÇEN tarafından yapılan “GÜÇ TRANSFORMATÖRÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİ KULLANILARAK 2 VE 3 BOYUTLU TASARIMI VE KAYIP ANALİZİ” konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ADAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bilal GÜMÜŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi M. Ali ARSERİM

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 31/05/2018

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../20

Doç. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince gösterdiği ilgi ve anlayışla bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bilal GÜMÜŞ' e teşekkür ederim.

Tez çalışmamın araştırılmasında ve hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Öğretmeni Turgay ÇEKEN' e ve Öğretim Görevlileri Bünyamin AĞALDAY ile Mehmet Rıda TÜR' e teşekkür ederim.

Ayrıca tezin hazırlanması süresince göstermiş oldukları sabır ve fedakarlıklarından dolayı sevgili aileme teşekkür ederim.

Mehmet ÇEÇEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÇİZELGE LİSTESİ.....	VIII
ŞEKİL LİSTESİ.....	IX
KISALTMA VE SİMGELER	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Transformatörün Tarihçesi	3
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Tezin İçeriği	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL VE METOT.....	15
3.1. Transformatörün Çalışma Prensibi	15
3.2. Transformatörün Yapısı	16
3.2.1. Transformatörün Konstrüksiyonu	16
3.2.1.1. Manyetik Devre	16
- Çekirdek Tipi Transformatör	16
- Bir Fazlı Çekirdek Tipi Transformatör	16
- Üç Fazlı Çekirdek Tipi Transformatör	18
- Mantel Tipi Transformatör	18
- Bir Fazlı Mantel Tipi Transformatör	19
- Üç Fazlı Mantel Tipi Transformatör	19
- Spiral Tip Transformatör	20
3.2.1.2. Transformatör Sargıları	21

- Silindirik Sargılar	21
- Alçak Gerilim Sargıları	22
- Yüksek Gerilim Sargıları	22
- Disk Sargı	22
3.3. Sargıların Yalıtılması	23
3.4. Transformatörün Soğutulması	23
3.5. Transformatörlerde Meydana Gelen Kuvvetler	24
3.5.1. Radyal Kuvvetler	24
3.5.2. Aksiyal Kuvvetler	24
3.6. Bir Fazlı Gerçek Transformatör Modeli	25
3.7. Transformatör Sargı Kademeleri	28
3.8. Aşırı Başlangıç Akımı	29
3.9. Manyetik Malzemeler ve Özellikleri	30
3.10. Manyetik Gövde (demir) Kayıpları	33
3.11. Ferro-manyetik Malzemenin Fiziksel Özellikleri	34
3.11.1. Levha Malzeme	34
3.11.2. Masif Ferro-Manyetik Malzeme	36
3.12. Ferro-Manyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları	36
3.12.1. Histerezis Çevrimi	38
3.13. Sonlu Elemanlar Yöntemi	39
3.13.1. Sayısal Yöntemler	40
3.13.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihçesi	41
3.13.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Alanları	41
3.13.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Teorisi	43
3.13.4.1. Rayleigh-Ritz Yöntemi	43
3.13.4.2. Elemanların Birleştirilmesi	45
3.13.4.3. Sınır Koşulları	46

3.13.5.	Poisson Denklemlerinin Elde Edilmesi	46
3.14.	Ansys Maxwell Paket Programı	47
3.14.1.	Ansys Maxwell Paket Programında Tasarım ve Analiz	48
3.15.	Analiz Edilen Kademeli Güç Transformatörünün Parametreleri	52
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI	55
4.1.	Kademeli Güç Transformatörünün 2B Boşta Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı	55
4.2.	Kademeli Güç Transformatörünün 2B Tam Yükte Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı	61
4.3.	Kademeli Güç Transformatörünün 3B Boşta Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı	68
4.4.	Kademeli Güç Transformatörünün 3B Tam Yükte Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı	75
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	83
6.	KAYNAKLAR	89
	ÖZGEÇMİŞ	93

ÖZET

GÜÇ TRANSFORMATÖRÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİ KULLANILARAK 2 VE 3 BOYUTLU TASARIMI VE KAYIP ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ÇEÇEN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2018

Dünyada artan nüfus ve sanayileşmeden dolayı ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin iletimi konusu önemini giderek artırmaktadır. İhtiyaç duyulan bu enerjinin en büyük avantajı üretildiği yerden çok uzak bölgelere kolayca taşınabilmesidir. Bu taşınmanın verimli bir şekilde yapılabilmesi için gerilimin yeteri kadar yüksek olması gerekir. Gerilim yükseltilmesi ise transformatör yardımı ile gerçekleştirilir. Güç transformatörlerinde yapılacak küçük bir iyileştirme büyük öneme sahiptir. Güç transformatörlerinden daha yüksek verim elde etmek için süregelen çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar transformatörün nüve ve sargılarının tipi, nüvenin geometrik yapısı, sargıların sarım yöntemleri olarak sıralanabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlayan sayısal bir yöntemdir. Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilir ve gerektiğinde bazı alt bölgelere daha hassas çözümler yapılabilir. Bu çalışmada sonlu elemanlar metoduyla analiz yapan Ansys Maxwell paket programı kullanarak etiket bilgileri verilen kademeli güç transformatörünün 2 boyutlu (2B) ve 3 boyutlu (3B) tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. Analiz sonucunda birincil ve ikincil sargılarında indüklenen gerilim, kademe sargılarında indüklenen gerilim, birincil ve ikincil sargıların faz akımları, boşta demir kaybı, tam yükte bakır kaybı, sargıları etkileyen kuvvetler ve nüvede akı dağılımı elde edilmiştir. Analiz edilen transformatörün 2B ve 3B demir ve bakır ortalama kayıp değeri, etiket bilgileri verilen güç transformatörünün demir ve bakır kaybı değerleriyle karşılaştırılmıştır. 3B'li analiz sonucunda elde edilen kayıplar gerçek transformatörün kayıp değerlerine daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Güç transformatörünün nüvesi üzerinde akı dağılımı incelenerek hangi bölgelerde anlık kayıpların yoğun olduğu görsel olarak belirlenmiştir. 2B ve 3B benzetiminde elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmış ve 3B analizinde elde edilen sonuçların daha doğru olduğu tespit edilmiştir. 3B benzetiminin analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri arasındaki farkın sebepleri incelenmiştir. Bu farklılığın sebepleri arasında imal edilen transformatörlerde malzemelerin ideal özelliklerinden farklı olması, simülasyon süresi ve imalat hataları sayılabilir. Transformatörün tam yükte boşta çalışmaya göre, birincil ve ikincil sargıları etkileyen kuvvetin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, kademeli güç transformatörü, sonlu elemanlar yöntemi, kayıp analizi, Ansys Maxwell 2B, Ansys Maxwell 3B.

ABSTRACT

2 AND 3 DIMENSIONAL DESIGN AND LOST ANALYSIS USING THE FINITE ELEMENT MEDHODS FOR POWER TRANSFORMERS

MsC THESIS

Mehmet ÇEÇEN

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES UNIVERSITY OF DICLE**

2018

Increasing population and industrialization in the world are increasing the importance of electric energy transmission. The greatest advantage of this energy source is that it can be easily transported to areas far from where it is produced. In order for this to be carried out efficiently, the voltage must be as high as possible. The voltage increase can be done with the aid of a transformer. A small improvement to the power transformers has a big precaution. Various studies are continuously carried out to obtain higher efficiency than power transformers. These studies can be classified as type of core and coil of transformer, geometrical structure of resonance, winding methods of windings.

The finite element method geometry is a numerical method that allows the study of complex shapes. The solution region can be divided into sub-regions and more precise solutions can be made to some sub-regions as needed. In this study, design and simulation of 2-dimensional (2D) and 3-dimensional (3D) step-by-step power transformer with label information is performed using Ansys Maxwell package program which analyzes by finite element method. In the analysis, the induced voltage in the primary and secondary windings, the induced voltage in the step windings, the phase currents in the primary and secondary windings, the loss of idle iron, the loss of copper at full load, the forces acting on the windings and the nodule flux distribution were obtained. The average loss value of the analyzed transformer 2B and 3B iron and copper was compared with the iron and copper loss values of the real transformer given the test results. It has been found that the losses obtained as a result of 3D analysis are closer to the lost values of the real transformer. By examining the distribution of fluxes on the power transformer's core, it is visually determined in which regions the momentary losses are intense. The analysis results obtained in 2D and 3D simulations were compared and it was determined that the results obtained in the 3D analysis were more accurate. The reasons for the difference between the analysis values of the 3D simulation and the label information of the real transformer were examined. This difference may be due to differences in the ideal properties of the materials in the transformers manufactured, the duration of the simulation and manufacturing faults. It has been determined

that the transformer has a higher force acting on the primary and secondary windings than on idle operation at full load.

Keywords: Transformer, stepped power transformer, finite element method, loss analysis, Ansys Maxwell 2B, Ansys Maxwell 3B.



ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1.	AISI normuna göre yönlendirilmiş laminasyon malzemeleri	35
Çizelge 3.2.	Analiz edilen transformatörün tasarım parametreleri	53
Çizelge 4.1.	2B boшта analiz sonuçları	59
Çizelge 4.2.	2B tam yükte analiz sonuçları	65
Çizelge 4.3.	3B boшта analiz sonuçları	72
Çizelge 4.4.	3B tam yükte analiz sonuçları	78
Çizelge 5.1.	2B boшта demir kaybı karşılaştırma	83
Çizelge 5.2.	2B tam yükte bakır kaybı karşılaştırma	83
Çizelge 5.3.	3B boшта demir kaybı karşılaştırma	83
Çizelge 5.4.	3B tam yükte bakır kaybı karşılaştırma	83

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.	Tek fazlı çekirdek tipi transformatörün manyetik devresi ve sargılar	15
Şekil 3.2.	Çekirdek tipi bir fazlı transformatörün demir gövde ve sargıları	17
Şekil 3.3.	Sargıların transformatör bacağına yerleştirilmiş hali	17
Şekil 3.4.	Üç fazlı çekirdek tipi transformatörün demir gövde ve sargıların konumu	18
Şekil 3.5.	Mantel tipi bir fazlı transformatörün demir gövde ve sargıların konumu	19
Şekil 3.6.	Mantel tipi bir fazlı transformatörlerin üst üste ve yan yana yerleştirilmesi	20
Şekil 3.7.	Spiral tip bir fazlı transformatör	20
Şekil 3.8.	Alçak gerilim sargısının konumu	22
Şekil 3.9.	Disk sargının bacağına yerleştirilmesi	23
Şekil 3.10.	Gerçek bir transformatör modeli	25
Şekil 3.11.	Transformatörün manyetik eşdeğer devresi	26
Şekil 3.12.	Uyartım akımının fazör diyagramı	27
Şekil 3.13.	Transformatörün elektrik eşdeğer devresi	28
Şekil 3.14.	Transformatörün T-eşdeğer devresi	28
Şekil 3.15.	Bir fazlı sabit sargı kademeli transformatör	29
Şekil 3.16.	Y-Y bağlı sabit sargı kademeli üç fazlı transformatör	29
Şekil 3.17.	Aşırı başlangıç akımı	30
Şekil 3.18.	Kalınlığı 0.3 mm. olan ve üst yarı kısmı gösterilmiş ferro-manyetik çelik saça ait B-H eğrileri	31
Şekil 3.19.	0.3 mm. kalınlığında olan ferro manyetik malzemeye ait d.a. mıknatıslanma eğrisi	32
Şekil 3.20.	Değişik alaşımlı ferro-manyetik malzemeye ait d.a. mıknatıslanma eğrileri	32

Şekil 3.21.	Ferro-manyetik transformatör ve dinamo sacının birim ağırlık başına demir kayıpları	34
Şekil 3.22.	Mıknatıslanma akımının ve demir kayıplarının haddelenme yönüne bağlı olarak değişimi	35
Şekil 3.23.	Ferro-manyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi	37
Şekil 3.24.	Mıknatıslanma eğrisinin akı yoğunluğu ve manyetik akı şiddeti ile ifadesi	38
Şekil 3.25.	0.03 cm kalınlığındaki M5 elektrik çeliğinin DA mıknatıslanma eğrisi	38
Şekil 3.26.	Histerezis çevrimi	39
Şekil 3.27.	Mıknatıslanmada moleküllerin durumu	39
Şekil 3.28.	Üçgen eleman	43
Şekil 3.29.	İki üçgenin birleşimi	45
Şekil 3.30.	Analiz akış diyagramı	48
Şekil 3.31.	Üç boyutlu tasarım için ekran görüntüsü	48
Şekil 3.32.	Üç boyutlu tasarım için analiz basamakları	49
Şekil 3.33.	Çözücü tipinin seçildiği menü	49
Şekil 3.34.	Makine ve makine parçalarının hazır bulunduğu menü	49
Şekil 3.35.	Malzemesi tipinin seçildiği menü	50
Şekil 3.36.	Ağ (mesh) değerinin girildiği menü	50
Şekil 3.37.	Analiz sınırlarının girildiği menü	50
Şekil 3.38.	Analiz zaman ayarının yapıldığı menü	51
Şekil 3.39.	Analiz sonuçlarının alındığı menü	51
Şekil 3.40.	Nüve ölçüleri	52
Şekil 3.41.	Nüve malzemesinin manyetik davranışı	53
Şekil 4.1.	Transformatörün iki boyutlu görünümü	55
Şekil 4.2.	2B transformatörün boşa çalışmada elektrik devresi	56
Şekil 4.3.	İkincil sargıda indüklenen gerilim	56
Şekil 4.4.	Birincil ana sargıda indüklenen gerilim	56

Şekil 4.5.	Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim	57
Şekil 4.6.	Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim	57
Şekil 4.7.	İkincil faz akımı	57
Şekil 4.8.	Birincil faz akımı	58
Şekil 4.9.	Demir kaybı	58
Şekil 4.10.	Birincil sargıyı etkileyen kuvvet	58
Şekil 4.11.	İkincil sargıyı etkileyen kuvvet	59
Şekil 4.12.	Nüvede 0.080 saniyedeki akı dağılımı	60
Şekil 4.13.	Nüvede 0.087 saniyedeki akı dağılımı	60
Şekil 4.14.	Nüvede 0.093 saniyedeki akı dağılımı	60
Şekil 4.15.	Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı	61
Şekil 4.16.	Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı	61
Şekil 4.17.	2B transformatörün tam yükte çalışmada elektrik devresi	62
Şekil 4.18.	İkincil sargıda indüklenen gerilim	62
Şekil 4.19.	Birincil ana sargıda indüklenen gerilim	62
Şekil 4.20.	Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim	63
Şekil 4.21.	Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim	63
Şekil 4.22.	İkincil faz akımı	63
Şekil 4.23.	Birincil faz akımı	64
Şekil 4.24.	Bakır kaybı	64
Şekil 4.25.	Birincil sargıyı etkileyen kuvvet	64
Şekil 4.26.	İkincil sargıyı etkileyen kuvvet	65
Şekil 4.27.	Nüvede 0.080 saniyedeki akı dağılımı	66
Şekil 4.28.	Nüvede 0.087 saniyedeki akı dağılımı	66
Şekil 4.29.	Nüvede 0.093 saniyedeki akı dağılımı	67

Şekil 4.30.	Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı	67
Şekil 4.31.	Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı	67
Şekil 4.32.	Transformatörün üç boyutlu görünümü	68
Şekil 4.33.	3B transformatörün boşa çalışmada elektrik devresi	68
Şekil 4.34.	İkincil sargıda indüklenen gerilim	69
Şekil 4.35.	Birincil ana sargıda indüklenen gerilim	69
Şekil 4.36.	Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim	69
Şekil 4.37.	Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim	70
Şekil 4.38.	İkincil faz akımı	70
Şekil 4.39.	Birincil faz akımı	70
Şekil 4.40.	Demir kaybı	71
Şekil 4.41.	Birincil sargıyı etkileyen kuvvet	71
Şekil 4.42.	İkincil sargıyı etkileyen kuvvet	71
Şekil 4.43.	Nüvede 0.0805 saniyedeki akı dağılımı	73
Şekil 4.44.	Nüvede 0.087 saniyedeki akı dağılımı	73
Şekil 4.45.	Nüvede 0.093 saniyedeki akı dağılımı	73
Şekil 4.46.	Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı	74
Şekil 4.47.	Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı	74
Şekil 4.48.	3B Transformatörün tam yükte çalışmada elektrik devresi	75
Şekil 4.49.	İkincil sargıda indüklenen gerilim	75
Şekil 4.50.	Birincil ana sargıda indüklenen gerilim	76
Şekil 4.51.	Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim	76
Şekil 4.52.	Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim	76
Şekil 4.53.	İkincil faz akımı	77
Şekil 4.54.	Birincil faz akımı	77

Şekil 4.55.	Bakır kaybı	77
Şekil 4.56.	Birincil sargıyı etkileyen kuvvet	78
Şekil 4.57.	İkincil sargıyı etkileyen kuvvet	78
Şekil 4.58.	Nüvede 0.0805 saniyedeki akı dağılımı	79
Şekil 4.59.	Nüvede 0.087 saniyedeki akı dağılımı	80
Şekil 4.60.	Nüvede 0.093 saniyedeki akı dağılımı	80
Şekil 4.61.	Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı	80
Şekil 4.62.	Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı	81



KISALTMA VE SİMGELER

AA	: Alternatif Akım
NÜVE	: İnce, Özel Silisli Saçlardan Oluşan Kapalı Bir Manyetik Gövde
EDDY	: Girdap Akımı ya da Foucault Akımı
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
3B	: Üç Boyutlu
2B	: İki Boyutlu
MESH	: Sonlu Eleman Ağı
SiFe	: Silisyum-Demir
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
H	: Manyetik Akı
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
N _p	: Giriş (Primer) Sargısı
N _s	: Çıkış (Sekonder) Sargısı
I _p	: Giriş (Primer) Akımı
I _s	: S Fazı Akı Yolu
I _R	: R Fazı Akı Yolu
I _T	: T Fazı Akı Yolu
A/2	: Akı Miktarının Yarısı
Ø _x	: X Yönündeki Akı
F _y	: Aksiyal Kuvvet
V ₁	: Primer Gerilimi
V ₂	: Sekonder Gerilimi
Ø	: Manyetik Akı
e ₁	: Primere Uygulanan Zıt Emk
e ₂	: Sekondere Uygulanan Zıt Emk
emk	: Elektromotor Kuvvet
B	: Manyetik Endüksiyon
FUKO	: Michel Foucault
N ₁	: Primer Sargı Sayısı
N ₂	: Sekonder Sargı Sayısı

λ_1	: Primer Sargı Akısı
λ_2	: Sekonder Sargı Akısı
I_1	: Primer Akımı
I_2	: Sekonder Akımı
f	: Frekans
Z_z	: Yük Empedansı
R_1	: Primer Sargı Direnci
R_2	: Sekonder Sargı Direnci
L_1	: Kaçak Endüktans
X_1	: Kaçak Reaktans
$\emptyset_m$	: Primer ve Sekonderi Kesen Ortak Akı
$\emptyset_{11}$	: Kaçak Akı
I_m	: Miknatıslama Akımı
$I_\emptyset$	: Uyarım Akımı
I_c	: Nüve Kaybı
G_c	: Direnç Konduktası
B_m	: Süseptansı
L_2	: Sekonder Sargısının Kaçak Endüktansı
X_2	: Sekonder Sargısının Kaçak Reaktansı
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
μ	: Manyetik Permabilite
v	: Manyetik Rezistive
H	: Nüve Malzemesine Ait Manyetik Alan
J	: Manyetik Akı Yoğunluğu
Δ	: Üçgen Bağlı
Y	: Yıldız Bağlı
T	: Tesla
P_h	: Histerezis Kaybı
K_h	: Histerezis Katsayısı
P_f	: Fuko Kaybı
d	: Manyetik Akı Çizgilerine Dik Yöndeki Malzeme Kalınlığı

1. GİRİŞ

Transformatörler alternatif gerilimin frekansında değişiklik yapmadan gerilimin genliğini değiştirebilen, elektromanyetik indüksiyon yolu ile çalışan, sabit elektrik makinalarıdır. Transformatörler genellikle kısaltılmış " trafo " adıyla adlandırılırlar.

Elektrik sistemlerinin önemli makinalarından biri olan transformatörlerin hareketli veya döner kısımları olmadığından dolayı yapıları basittir. Transformatörler güç sistemleri çıkışlarında istenen değişik gerilim değerlerini ekonomik olarak sağlarlar. Bir enerji dönüştürme makinası olmamasına rağmen çoğu enerji dönüşüm sistemlerinde vazgeçilmez bir eleman olan transformatörler yaygın olarak kullanılan makinalardır. Elektrik gücünün senkron makinalarda (santrallerde) üretimi normal ve istenen gerilim seviyesinde olabilir. Ancak, elektrik enerjisini en az kayıplarla istenen uzaklıklara iletmek ve hat kapasitesini yükseltmek için üretilen gerilimin seviyesinin transformatörler aracılığıyla yükseltilmesine gerek vardır. Yükseltile bu gerilim daha sonra dağıtım ve kullanım aşamalarında yeniden düşük gerilim seviyesine transformatörler ile düşürülür. Transformatörler elektrik güç sisteminin bütün kademelerinde kullanılırlar (Bal, 2008).

Transformatörlerin bulunması ve alternatif akım (AA) güç kaynaklarının oldukça hızlı gelişmesiyle güç sistemlerinin güç seviyesi ve güç aralığındaki bu sınırlamalar tamamen ortadan kalkmıştır. Bir transformatör ideal olarak, birincil taraftan çekilen gerçek gücü değiştirmeksizin gerilimi bir AA seviyesinden bir diğer AA gerilim seviyesine değiştirir. Bir transformatör bir devrenin gerilim seviyesini artırıyorsa, giriş gücünü çıkış gücüne eşitlemek için akımı azaltmalıdır. Bundan dolayı, AA elektrik gücü merkezi bir yerde üretilebilir, çok düşük kayıplarla çok uzak mesafelere iletimi için gerilimi artırılır ve son kullanım için gerilim tekrar düşürülür. Bir güç sisteminin hatlarındaki iletim kayıpları, hatlardaki akımın karesiyle orantılıdır. İletim gerilimini 10 kat artırılıp, iletim akımını 10 kat azaltarak güç iletim kayıplarını 100 kat azaltılmış oluruz. Transformatör olmasaydı elektrik gücünün günümüzdeki kullanımı bu kadar kolay ve mümkün olmayacaktı. Modern bir güç sisteminde elektrik gücü 12 ile 25 kV gerilimler arasında üretilmektedir. Transformatörler çok küçük kayıplarda çok uzak mesafelere güç iletimi için gerilimi, 110 kV ile 1000 kV arasındaki gerilim değerlerine yükseltmektedir. Daha sonra yerel dağıtım için transformatörler gerilimi 12 ile 34,5 kV

arasındaki değerlere düşürürler ve sonuçta 120 V' a kadar düşük gerilimlerde evlerde, ofislerde ve fabrikalarda kullanılacak değerlere getirilir (Chapman, 2007).

Transformatörler hareketsiz makinalar olduğundan diğer elektrik makinalarında olduğu gibi sürtünme ve rüzgar kaybı gibi mekanik kayıpları yoktur. Bu yüzden verimleri diğer elektrik makinalarına göre çok daha yüksektir. Demir kayıpları transformatörün boşa çalışmasında meydana gelen kayıplardır. Bakır kaybı ise transformatörün kısa devre deneyi ile bulunabilir (Ateş ve Peşint, 1990).

Demir çekirdek (nüve) kayıplarının hesaplanması trafo tasarımı konusunda önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Güç transformatörlerinin nüvelerinin genellikle düşük demir kaybı olan malzemeden üretilmesi tercih edilir. Tasarım ve imalat aşamasında nüve malzemesinin hatalı bir biçimde işlenmesi önemli miktarda kayıp meydana getirebilir. Genel olarak bir nüvedeki distorsiyon ve değişken manyetik akıların eşit olmayan dağılımı demir kayıplarına neden olur. Demir kaybını azaltmak için birçok yaklaşım mevcuttur. Bunun için yaygın olarak kullanılan tekniklerden biri nüveyi demir saçlardan paket şeklinde yapmaktır. Başka bir yaklaşım ise ince levhalar kullanarak önemli ölçüde girdap (eddy) akım kaybını azaltmak, yine başka bir yaklaşım nüvenin yapısında stranded demir kullanmaktır (Okabe ve ark., 1983).

Elektrik makinelerinin analizinde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin (SEY) uygulanması, güç transformatörün kayıplarının analizinde büyük bir ilerleme getirmiştir. Son otuz yılda problemleri hesaplamak için, üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar analizi; manyetik alan, manyeto statik alan ve manyetik vektör kavramları geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodu hem optimizasyon hem de optimizasyon verimliliği için geliştirilmiştir. Daha doğru bir sonuç elde etmek için üç boyutlu manyeto statik çözücü, esas problemi çok sayıda alt problemlere parçalayarak sonlu eleman ağı (mesh) oluşturmaktadır. Ağın kalitesi ve sayısı sonlu elemanlar analizinin doğruluğunu etkilemektedir (Arkan, 2005).

Sonlu elemanlar yöntemini uygulayan yazılımlar, tasarlanacak elektrik motoru ve transformatör gibi elektrik makinalarının davranışlarının modellenebilmesini sağlamaktadır. Böylece çok sayıda prototip model oluşturulmasına gerek kalmadan değişik geometrilere ve özelliklere sahip makinelerin hızlı bir şekilde analiz edilmesine olanak vermektedir. Bu yazılımlarda genellikle gerçek hayatta üretilebilen bütün elektrik

makineleri modellenabilir ve analiz edilebilir. Ayrıca bu tür yazılımlar, kullanıcılarına manyetik laminasyon malzemeleri ile bakır sargılardan modeller tasarlayabileceği sanal bir laboratuvar ortamı sunmakta, manyetik alan çizimleri ve grafiksel analiz olanağı vermektedir. Ayrıca indüktans, nüve ve sargı kayıpları, geçici durum akım-gerilim ilişkileri gibi sayısal değerler hesaplamaktadır (Gürdal ve Balcı, 2001, 2010).

1.1. Transformatörün Tarihçesi

Tüm elektrik makinelerinde olduğu gibi güç transformatörleri de elektromanyetik prensip kuralı ile çalışmaktadır. 1831 yılında Michael Faraday elektrik enerjisinin manyetizmaya ve manyetizmanın da elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini buldu. 1882 yılında Gaulard ve Gibbs güç dağıtım sisteminde alternatif akım ve transformatörleri kullanarak Faraday' ın çalışmasını geliştirdiler. 1885 yılında George Westinghouse alternatif akım ve transformatörleri geliştirmek için Gaulard ve Gibbs' in patentlerinin Amerikan haklarını satın aldı. 1886 yılında William Stanley alternatif akım sistemlerini başarıyla geliştirdi. Bu geliştirilen sistemler elektrik generatörünün çıkışında elde edilen yüksek akımı ve alçak gerilimi uzak mesafelere az kayıpla iletilmesini mümkün hale getirdi (Najafi, 2016).

Günümüzde modern iletim ve dağıtım sistemleri geliştirilmiş olup, yüzyıl başındaki atalarına göre güç bakımından 500, gerilim bakımından 15 kat fazla kapasiteye sahiptir. Güç birimi başına ağırlık 10 kat azalmış ve verimlilik genellikle % 99' u aşmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin amacı karmaşık geometriye sahip kademeli üç fazlı dağıtım transformatörünün Ansys Maxwell yazılım programını kullanarak 2B ve 3B olarak benzetiminin yapılmasıdır. Enerji dağıtım hatlarında çeşitli nedenlerden dolayı gerilim düşümleri veya gerilim yükselmeleri meydana gelmektedir. Dağıtım hatlarında meydana gelen gerilim değişimlerini düzenleyebilmek amacıyla transformatörlerde gerilim kademeleri kullanılmaktadır. Kademeli üç fazlı dağıtım transformatörlerinin çıkış gerilimleri, devreye eklenen veya devreden çıkarılan sargıya göre ayarlanabilir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ansys Maxwell yazılım programında, 2 kademe sargısı bulunan üç fazlı bir dağıtım transformatörünün 2 boyutlu (2B) ve 3 boyutlu (3B) analizi yapılarak analiz sonucunda 2B ve 3B için elde edilen demir ve bakır kayıplarının gerçek

transformatörün etiket parametreleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca 2B ve 3B olarak benzetim modeli tasarlanan kademeli güç transformatörlerine ait birincil gerilim, ikincil gerilim, kademe gerilimi, birincil faz akımı, ikincil faz akımı, demir kaybı, bakır kaybı, birincil ve ikincil sargıları etkileyen kuvvetlerin değişimlerinin grafiksel olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için, 250 kVA gücünde 11/0.416 kV gerilim değiştirme oranına sahip gerçek bir transformatörün parametreleri kullanılarak 2B ve 3B benzetim modelleri oluşturulmuştur. Analiz sonuçları incelenerek 2B ve 3B benzetimin birbirilerine göre üstünlükleri incelenmiştir. 3B tasarımının analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgilerinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

1.3. Tezin İçeriği

Tezin giriş bölümünde; transformatörün tanımı, transformatörün önemi ve gerekliliği, nüve kayıpları, sonlu elemanlar metodu, transformatörün tarihçesi ve tezin amacı hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde; transformatörler, sonlu elemanlar yöntemi, transformatörlerin tasarımı, nüve kayıpları, transformatörde meydana gelen harmonikler, transformatörde kullanılan çekirdek malzemesi, transformatörde akı dağılımı, transformatör sargıları etkileyen kuvvetler ve transformatörde meydana gelen sıcaklıklar hakkında literatür çalışması yapılmıştır.

Tezin üçüncü bölümü olan materyal ve metot bölümünde; transformatörün çalışma prensibi, transformatörün genel yapısı, transformatörün manyetik devresi, transformatörün sargıları, sargıları etkileyen kuvvetler, bir fazlı gerçek transformatörlerin eşdeğer devresi, transformatörde sargı kademeleri, aşırı başlangıç akımı, manyetik malzemeler, sonlu elemanlar yöntemi, Ansys Maxwell yazılım programı, kademeli güç transformatörünün elektriksel parametreleri ve nüvenin geometrik ölçüsü hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümü olan araştırma bulguları bölümünde; 2B ve 3B olarak tasarlanan transformatörün analiz sonuçları grafiksel olarak ifade edilmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlar değerlendirilerek 2B ve 3B'nin birbirlerine göre üstün tarafları incelenmiştir. Ayrıca kademeli güç transformatörünün 2B ve 3B analizi sonucunda nüvede meydana gelen akı dağılımları boşa ve tam yükte anlık değerler için görsel olarak

elde edilmiştir. Anlık olarak elde edilen akı dağılımlarının davranışı hakkında tespitler yapılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde ise; elde edilen analiz sonuçları gerçek transformatörün etiket bilgileri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen demir ve bakır kaybı değerleri ile gerçek transformatörün demir ve bakır kaybı değerleri karşılaştırılmış ve hata oranları yüzde olarak hesaplanmıştır. Kademeli güç transformatörünün 2B ve 3B olarak boşta ve tam yükte çalıştırmada elde edilen analiz sonuçları hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Transformatör tasarımında ve benzetiminde dikkat edilmesi gereken hususlar ve alınması gereken tedbirler hakkında önerilere yer verilmiştir.





2. KAYNAK ÖZETLERİ

Enerji iletim ve dağıtımın her safhasında kullanılan güç transformatörü üzerine literatürde en çok rastlanan çalışmaların transformatörün kayıp analizi olduğu tespit edilmiştir. Özellikle Sayısal tabanlı bilgisayar programları kullanılarak transformatörde meydana gelen akı dağılımının, transformatörün nüve ve sargı kayıplarına olan etkisi incelenmiştir.

Najafi ve ark. (2015), zaman basamaklı sonlu elemanlar metodu kullanarak dağıtım transformatörünün 3B kayıp hesabını yapmışlardır. Transformatör nüvesi içindeki manyetik alan dağılımı gözlemlenmiştir. Sargılar ve transformatör çekirdeği içindeki manyetik akı yoğunluğu ve kayıpların hesaplanmasında SEY' in güçlü bir yöntem olduğu açıklanmıştır.

Mahmoud (2008), yağlı tip transformatörde kayıpların hesaplanması üzerine yüksek lisans tez çalışması yapmıştır. 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA anma güçlerindeki farklı güce sahip, 3 adet güç transformatörün kayıplarını teorik ve pratik olarak incelemiştir. Teorik ve pratik kayıpların farklı çıkmasının nedenleri araştırılmıştır. Farklılığın, kaçak kayıpların, transformatörün nüve ve sargılarında meydana gelen harmoniklerin etkili olmasından kaynaklandığı açıklanmıştır. Histerezis kayıpları oranının eddy akım kayıp oranından büyük olduğu tespit edilmiştir. Bakır kaybına göre demir kaybı büyüdükçe maksimum verim elde etmek için transformatörün yüksek güçlere sahip olması gerektiği vurgulanmıştır. Transformatörün nominal değerlerin dışında çalıştırılması çekirdeğin daha çok doymaya sebep olduğu açıklanmıştır. Doyuma ulaşan çekirdekte harmonik akımların hızla yükseldiği belirtilmiştir.

Kazemighotlou (2011), yüksek lisans tez çalışmasında, transformatörün sonlu elemanlar yöntemiyle kayıp analiz çalışması yapmıştır. Transformatörün 3B modeli tasarlanarak analiz sonuçları pratik değerlerle karşılaştırılmıştır.

Ghaffarlou (2014), yüksek lisans tez çalışmasında, transformatörün manyetik alan ve kayıp analizi sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapmıştır. Çalışmada üç farklı dağıtım transformatörünün manyetik alan ve kayıp analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı olan Ansoft Maxwell 3B programı kullanılmıştır. Transformatörün boşa ve tam yükteki kayıpları incelenmiştir. Demir ve bakır kayıpları pratik değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çanakoğlu (2008), SEY ile tek fazlı transformatörün çalışma noktasının belirlenmesi için bir deney transformatörü kullanmıştır. Nüve malzemesi için SEY kütüphanesinde bulunan en yakın materyali seçmiştir. İki boyutlu transformatör modeli tasarlandığı için sargı sonu empedansı, sargı uzunlukları hesaplama yoluna gidilerek dikkate alınmamıştır. Bu yüzden deney ve SEY sonuçları farklı bulunmuştur. Modellemede mümkün olan en fazla üçgen seçilerek hata minimuma indirgenmeye çalışılmıştır. Seçilen eleman sayısının fazlalığı çözüm süresini artırmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle benzetimi yapılan transformatörün belli bir yükteki sargı akımları belirlenmiştir. Böylelikle SEY ile transformatörün eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır.

Nicole ve ark., (2013), 2 boyutlu güç transformatörünün elektromanyetik ve termal analizini yapmışlardır. 2 boyutlu tasarımda transformatörün nüve derinliğine bağlı olarak transformatörün yüksek gerilim sargılarına uygulanan gerilim arttıkça kayıpların arttığı tespit edilmiştir.

Constantin ve ark., (2013), 3 boyutlu güç transformatörünün elektromanyetik ve termal analizini yapmışlardır. Transformatörün yüksek gerilim sargılarına uygulanan gerilim arttıkça kayıpların arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca manyetik akının yüksek olduğu bölgelerde kayıpların daha çok olduğu belirlenmiştir.

Sapreet ve Damanjeet (2015), sonlu elemanlar yöntemi sınır değer problemlerine tahmini çözümler getirmede başarılı bir yöntem olduğunu açıklamışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi, geometrik açıdan karmaşık problemleri çözmedeki başarısı nedeniyle elektromanyetik problemleri çözmek için iyi bir yöntem olduğu açıklanmıştır. Transformatörlerin kayıplarını bu yöntemle hesaplanabileceği belirlenmiştir.

Kulkarni ve Khaparde (2004), "Transformer Engineering" çalışmasında, trafo merkezlerindeki kayıpların azaltılma çabaları enerji maliyetindeki artış ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Nüve kayıplarını azaltmak için daha ince çelik saçların seçilmesi gerektiği açıklanmıştır. Fakat bununda maliyetli olduğu tespit edilmiştir. Yeni malzemenin yüksek dirençli ve düşük kalınlığı nedeniyle soğuk haddelenmiş tane yönlendirmeli amorf manyetik alaşımlar olduğu açıklanmıştır.

Yoon ve ark., (2010), genelleştirilmiş chua-type vektör histerezis model kullanılarak 3 MVA üç fazlı güç transformatörünün tahmini demir kayıplarını sonlu

elemanlar yöntemi ile hesaplamışlardır. Hesaplanan demir kaybı yüksüz durumdaki deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Ashbahani ve ark., (2011), 100 kVA üç fazlı transformatörün nüve malzemesi üzerinde yapılan ölçüm çalışmasında transformatör çekirdeğinde kullanılan M4 çelik laminasyon çekirdek malzemenin M5 çelik laminasyon malzemedan daha iyi olduğunu açıklamışlardır. Transformatör tasarlanmasında bunun dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Alboyacı ve ark., (2011), elektrik tesislerinde sürekli devrede kalan transformatörün kayıplarını azaltmak için transformatörün boştta çalışma akımlarını azaltma üzerine çalışma yapmışlardır. Boştta çalışma akımını azaltmak için düşük kayıplı nüve saçlarının kullanılması gerektiğini açıklanmıştır. Nüve yapısının kayıp üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Shilyashki ve ark., (2014), 3 boyutlu transformatörün 2 boyutlu transformatöre göre çok daha karmaşık olduğunu belirlemişlerdir. 3 boyutlu transformatörün analizinde z ekseninde meydana gelen akılar hem transformatörün nüve kayıpları hem de manyetostriksiyon için önemli bir etken olduğu açıklanmıştır.

Güneri ve ark., (2014), transformatörün kısa devre kuvvetinin etkisini incelemişlerdir. Transformatöre radyal elektromanyetik kuvvetler ve aksiyal elektromanyetik kuvvetlerin etkisi Ansys Maxwell benzetim programı kullanılarak SEY ile incelenmiştir. Kısa devre kuvvetlerinin sargıların hangi noktalarını daha çok zorladığı tespit edilerek, analitik ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tören ve Çelebi (2016), yağlı tip transformatörün ve kuru tip transformatörün ağırlık karşılaştırmasını yapmışlardır. Yağlı ve kuru tip transformatörlerin ağırlık etkisi incelenmiştir. Yağlı tip transformatörlerin kuru tip transformatörlere göre dezavantajlı olduğu belirlenmiştir. Yağlı tip transformatörler yağ atığından dolayı çevre kirliliğine sebep olduğu, düzenli bakım yapılması gerektiği açıklanmıştır. Ayrıca yangın tehlikesinin olduğu tespit edilmiştir. Fakat kuru tip transformatörlerin yüksek maliyetinden dolayı pek tercih edilmediği belirlenmiştir. Ağırlık aynı zamanda maliyet üzerinde etkili olan belirleyici bir faktör olduğundan ağırlığı azaltmaya yönelik gelecekte araştırma yapılması gerektiği açıklanmıştır.

Wang ve ark., (2015), sıcak noktaya dayalı olarak kuru tip transformatörün izolasyonunu kaybetmesi üzerine hesaplama yapmışlardır. Sargının ortalama yüzey sıcaklığındaki artış hesaplanarak, kuru tip transformatör modelinin bir sıcak-nokta sıcaklığı tahmin edilmiştir. Hesaplanmış sıcak-nokta sıcaklığına dayalı olarak yük altında kuru tip transformatör modelinin ömrü tahmini olarak hesaplanmış ve transformatörün yalıtım ömrü değerlendirilmiştir. Sonuçta düşük gerilimli sargının sıcak-nokta sıcaklığı, yüksek gerilimli sargının sıcak-nokta sıcaklığından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. İç kısımdaki yüzeyin ortalama sıcaklık artışının dış kısımdan daha yüksek olduğu açıklanmıştır.

Lu ve ark., (2015), güç transformatörünün sargılarında eksenel titreşim üzerine sonlu elemanlar analizi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Sonlu elemanlar analizi ve test sonuçlarına göre sıcaklık ve eskime artarken sarım titreşiminin artabileceği açıklanmıştır. Sonlu elemanlar analizine göre transformatör sargısının titreşim karakteristiği M harfi gibi görüldüğü açıklanmıştır.

Li ve ark., (2013), güç transformatörünün yapısal parçalarında kaçak akımların 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Çalışmada transformatörün yapısal kısımlarında geniş olarak kaçak kayıpların ve kayıp yoğunluğunun olduğu ve bunun da transformatörün performansını etkilediğini ve aşırı ısınmasına sebep olduğu açıklanmıştır. Boyunduruk kelepçesi ve tank içine eklenen manyetik koruyucular, transformatörde kayıp yoğunluğu ve kaçak akım kayıplarının azaltılmasında kullanıldığı belirtilmiştir.

Çınar ve ark., (2014) sekizgen kıvrımlı transformatörün çekirdek topolojisinin çeşitli konfigürasyon içindeki manyetik akı dağılımı ve güç kaybı karşılaştırması yapmışlardır. Çekirdek üzerinde farklı bağlantı tiplerine ve bağlantı bölgelerinin farklı bağlantı yerlerine sahip olarak, manyetik akı dağılımı ve güç kaybı her konfigürasyon için analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. 2B ve 3B için sonlu eleman yöntemi analizi ve deney çalışmaları karşılaştırılmıştır. Çekirdek (nüve) üzerindeki yerleri ve bağlantı tipleri yerel akı birikimine ve çekirdeğin güç kaybına çarpıcı şekilde sebep olduğu açıklanmıştır.

Milagre ve ark., (2012), büyük bir güç transformatörü içindeki eddy akım kayıplarının 3B modeli ve hesabı üzerine çalışma yapmışlardır. Yapısal kısımlar içindeki eddy akım kayıplarının azaltılmasının ve sıcak noktaların yok edilmesinin transformatör

dizaynı için önemli olduğu belirtilmiştir. Sıkıştırma plakasında, transformatör tankında ve elektromanyetik koruyucularda eddy akım kayıpları 3B sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sıkıştırma plakası, trafo tankı ve elektromanyetik koruma yüzey empedansı yöntemi ile modellenmiştir. Transformatör tankı içindeki eddy akım kayıplarının azaltılması üzerine manyetik şönt ve elektromanyetik koruyucuların etkisi analiz edilmiştir. Eddy akım kayıpları manyetik şöntlü tanklar içinde daha küçük olmasına rağmen, yerel olarak daha yoğun olduğu, dolayısıyla en iyi çözümün tank duvarını korumak olduğu açıklanmıştır.

Mechkov ve ark., (2016), yağlı transformatörün 3B modelinin SEY ile sıcaklık analizi yapmışlardır. Trafo içindeki sıcaklık dağılımı trafonun performansını ve ömrünü etkileyen en önemli faktör olduğu açıklanmıştır. Çalışmada 160 kVA'lık yağlı transformatörün sıcaklık dağılımı modellenmesi sonlu elemanlar yöntemiyle 3B analizi yapılmıştır. Sıcaklık değerleri ve termal alan dağılımı elde edilmiştir.

Li ve Cheng (2010), üç fazlı güç transformatörünün kısa devrede manyetik alan ve kuvvet analizi çalışması yapmışlardır. Kısa devreden dolayı transformatörün sargıları üzerindeki manyetik alan ve kuvvet incelenmiştir. Üç fazlı transformatörün sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analiz değerleri deney sonuçları ile doğrulanmıştır.

Klades ve ark., (1994), kısa devre altında bir güç transformatörünün sargıları üzerindeki sızıntı akımı ve kuvvet hesaplamasını, görüntü teorisine ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak 2B ve 3B modellerinin ölçüm karşılaştırılması üzerine çalışma yapmışlardır. Geliştirilen modeller üç fazlı transformatörün bir fazına uygulanmış ve sonuçlar deneysel olarak doğrulanmıştır. 3B ve 2B olarak analiz edilmiştir. Yalnızca skalar potansiyel içeren belirli bir üç boyutlu sonlu elemanlar formülasyonunun, bu problem sınıfı için uygun olduğu bulunmuştur.

Dexin ve ark., (1987), güç transformatöründe 3B eddy akım alanının sonlu elemanlar metoduyla analizi üzerine makale çalışması yapmışlardır. Tüm transformatör içindeki manyetik akı yoğunluğu, çelik kısımlar ve yağ tankı içindeki eddy akım yoğunluğunu hesaplamışlardır. Miktarın azaltılması için birkaç yöntem sunulmuştur. Çelik malzeme içindeki eddy akım kaybı analitik ve sayısal metotla birleştirilerek hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlarının deney sonuçları ile uyumlu olduğu açıklanmıştır.

Karademir ve Eker (2015), transformatörün T-bağlantı yapısının çekirdek kayıplarına olan etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Transformatörün orta bacağı üzerinde çekirdek kayıpları en fazla olmasından dolayı T- bağlantı kısım farklı kesim açılarında üretildiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada Ansoft Maxwell kullanılarak T-bağlantı 7 farklı açı için çekirdek kayıpları ve akı yoğunluğu dağılımları analiz edilmiştir. Çalışma neticesinde orta bacak boyunun mümkün olduğu kadar kısa seçilmesi kayıpların azaltılmasında ve atıl malzemenin iyileştirilmesinde etkili olduğu açıklanmıştır.

Zhou ve ark., (2015), dış kısa devre arızası boyunca transformatörün sargı mekaniğinin karakteristiği üzerine çalışma yapmışlardır. Gerimin seviyesinin ve kapasitesinin son yıllarda artması nedeniyle dış kısa devre arızası transformatörün sargılarını olumsuz etkilediği açıklanmıştır. Anti kısa devre kapasitesinin zayıflığından dolayı her yıl transformatör arızalarının yaklaşık % 40' ına büyük kısa devrelerin sebep olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada 500 kV tek fazlı iki sargılı transformatör modelinin geçici rejim SEY analizi yapılmıştır.

Kawase ve ark., (2016), 3B paralel sonlu elemanlar yöntemini kullanarak üç fazlı transformatörün eddy akım kayıpları analizi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Ayrıca çelik saç tabaka sayısının elektriksel kayıplar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak eddy akımı, analiz edilen modelin merkez bağlantısında dağıtılmış ve eddy akım kaybı transformatörün merkez kısmının diğer kısımlara göre daha büyük olduğu ve eddy akım kaybının diğer iki yan kısımda eşit olduğu açıklanmıştır.

İlgaz ve ark., (2017), transformatörde akı dağılımı metoduyla güç kaybı belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Transformatör çekirdeğini oluşturan silisyum-demir (SiFe) levhalarındaki manyetik akı dağılımı dairesel sensörler aracılığıyla incelenmiştir. Malzemenin B-H karakteristiği çıkartılarak malzemeden en yüksek verimin alınabileceği manyetik indüksiyon değeri tespit edilmiştir. Boşta çalışmada histerezis ve fuko kayıpları hesaplanmıştır. Boşta çalışmada nüve malzemesinin demir kaybı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Boşta çalışmada kayıpların çoğu histerezis ve fuko kayıpları oluştururken bakır kayıplarının ihmal edilebilecek seviyede olduğu açıklanmıştır.

Noğay (2002), yüksek lisans tez çalışmasında, transformatörün kaçak akı dağılımını 2B ve 3B olarak Gemini isimli paket programı kullanılarak sonlu elemanlar

yöntemiyle analiz etmiştir. Transformator çevresinde konturlar tanımlanmış ve tanımlanan konturların uzunluğuna göre her kontur için akı yoğunluğu grafiksel olarak elde edilmiştir. Kaçak akı 1 mm derinlik için araştırılmıştır. Maksimum ve minimum akı değerleri tespit edilmiştir. İki boyut için bölgesel akı yoğunluğu incelenmiştir. Üç boyutlu analizin 2 boyutlu analize göre daha doğru sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.

Çapanoğlu Savaş (2006), yüksek lisans tez çalışmasında, ferrit çekirdeğe sahip trafo tasarımı ve uygulama çalışması yapmıştır. Yüksek frekanslarda tercih edilen ferrit nüveli transformator üzerine çalışma yapılmıştır. Flyback bağlantılı anahtarlama devresi yapılarak ferrit nüveli çekirdeğin özellikleri incelenmiştir. Çekirdek kayıplarına sebep olan histerezis ve girdap akımlar incelenmiştir. Girdap akım kayıplarının ferrit çekirdeğin yüksek direncinden dolayı ihmal edilecek kadar küçük olduğu tespit edilmiştir.

Erdem (2006), doktora tez çalışmasında, transformator çekirdeklerinde kullanılan elektrik çelikleri ve amorf şeritlerin uç uca birleşim yerlerinde manyetik akı dağılımını deneysel ve kuramsal olarak incelemiştir. Transformator çekirdekleri oluştururken kullanılan malzemenin yanında çekirdek geometrisinin de önemli olduğu belirtilmiştir. Çekirdek geometrisi manyetik akının farklı dağılımına sebep olduğu açıklanmıştır. Çekirdek malzeme olarak M4 ve amorf şeritler kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

Yoldaş (2011), yüksek lisans tez çalışmasında, güç transformatoründe harmoniklerin incelenmesi üzerine çalışma yapmıştır. Transformatorde çeşitli bağlantı şekillerinde oluşan harmonik gerilimler, harmonik akımlar ve bunların etkileri incelenmiştir. Düşük akı yoğunluğuna sahip çekirdek malzeme kullanılarak harmoniklerin azaltılabileceği ancak bu durumda maliyetin yüksek olacağı belirtilmiştir. Transformator yıldız (topraksız) veya üçgen bağlanarak hatlardaki üçüncü harmonik akım veya gerilimlerin bastırılabilceği belirtilmiştir.

Haliloğlu (2012), yüksek lisans tez çalışmasında, güç transformatorünün standartlara göre termal analizi yapmıştır. Çalışmada IEEE standartlarına göre transformatorün üst yağ ve sıcak nokta sıcaklığını tahmin etme metodu açıklanmıştır. İki adet güç transformatoründe üst yağ sıcaklıkları ölçerek teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. Harmoniklerin üst yağ sıcaklık değişimi, kayıplar, sıcak nokta sıcaklığı ve transformatorün ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

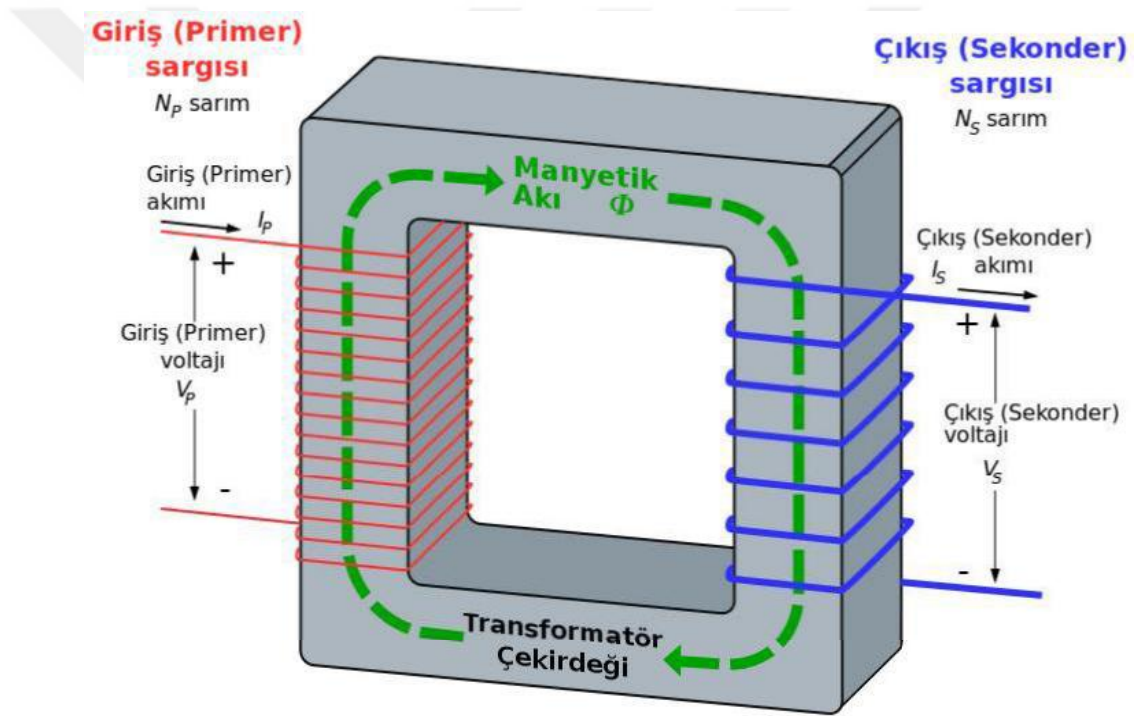
Saruhan (2010), yüksek lisans tezinde alçak gerilim transformatör yazılımı çalışması yapmıştır. Tek fazlı ve üç fazlı transformatör tasarımında kullanılabilecek bir yazılım gerçekleştirilmiştir. Delphi programlama dili ve Microsoft Office Access veritabanı programı kullanılmıştır. Oluşturulan yazılımda örnek tasarımlar hazırlanmıştır. Tasarım sonuçları ve deney sonuçları %10 farklı olduğu gözlenmiştir.

Bozkurt (2005), doktora tez çalışmasında, pencere tipi transformatörde kaçak akı dağılımının deneysel ve sayısal yöntemlerle analizini yapmıştır. Kaçak akı dağılımı sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemiyle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal yöntemle bulunan sonuçların deneysel sonuçlara yakın olduğu tespit edilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Transformatörün Çalışma Prensibi

Birincil yani primer sargılarına alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargı zamanla yönü ve şiddeti değişen bir manyetik alan oluşturur. Oluşan bu alan, üstünde sekonder sargısının da bulunduğu manyetik demir nüve üzerinden devresini tamamlar. Bu alanın sekonder sargısını kesmesi ile bu sargıda alternatif bir gerilim indüklenir. Primer ve sekonder sargılarının birbiri ile elektriksel hiçbir bağlantı olmadığı halde ikincil yani sekonderde manyetik indüksiyon yolu ile bir gerilim oluşabilmektedir.



Şekil 3.1. Tek fazlı çekirdek tipi transformatörün manyetik devresi ve sargılar

Transformatörün primer sargılarına doğru gerilim uygulandığında, demir çekirdek üzerinde yine bir manyetik alan oluşur. Ancak bu manyetik alanın zamanla yönü ve şiddeti değişmez yani sabit bir alandır. Sekonder sargılarında bir elektromotor kuvvet (emk.) indüklenmez. Endüksiyon kuralına göre, zamanla yönü ve şiddeti değişen manyetik alanlar tarafından sargılarda endüksiyon gerilimleri oluşabilir. Ancak manyetik alanın değişimi sürekli olmadığından, transformatörler doğru akımla çalışmaz (Peşint ve Ürkmez, 2000).

3.2. Transformatörün Yapısı

İnce, özel silisli saçlardan oluşan kapalı bir manyetik gövde (nüve) ve bunun üzerine, yalıtılmış iletkenlerle sarılan sargılardan oluşur. Basit olarak transformatörlerde iki sargı bulunur. Bu sargılar primer veya birincil, ötekine ise sekonder veya ikincil sargı adı verilir. Bu iki sargının birbirleri ile elektriksel bir bağlantısı yoktur. Ancak özel olarak yapılan oto transformatörlerde iki sargı elektriksel olarak birbirleri ile bağlantılıdır (Peşint ve Ürkmez, 2000).

3.2.1. Transformatörün Konstrüksiyonu

Transformatörün yapısında manyetik devre (demir gövde) ve sargılar olmak üzere iki ana kısım vardır.

3.2.1.1. Manyetik Devre

Manyetik demir nüveleri birer yüzleri yalıtılmış ince özel saçların üst üste konulması ve iyice sıkıştırılması ile oluşturulur. Kullanılan saçlar soğuk çekilmiş olup 0.30 ile 0.50 mm kalınlığındadır. Bu saçların birer yüzleri kağıt, vernik, lak veya başka yalıtkanlarla kaplanır. Bunun amacı nüve içinde oluşan fuko kayıplarını azaltmaktır. Kullanılan özel saçlarda %3 ile %4 kadar silisyum bulundurulur. Amaç saçların manyetik endüksiyonlarını (B) artırmak, histerezis kayıplarını azaltmaktır (Peşint ve Ürkmez, 2000).

Manyetik devrelerin çekirdek tipi, mantel tipi ve spiral tipi çeşitleri vardır.

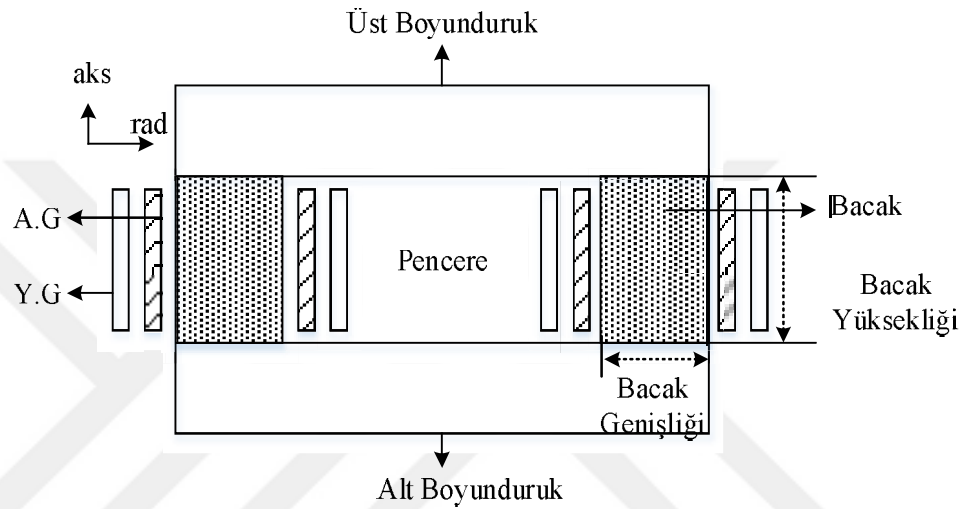
-Çekirdek Tipi Transformatör

Çekirdek tipi transformatörler genellikle bir ve üç fazlı olarak imal edilirler.

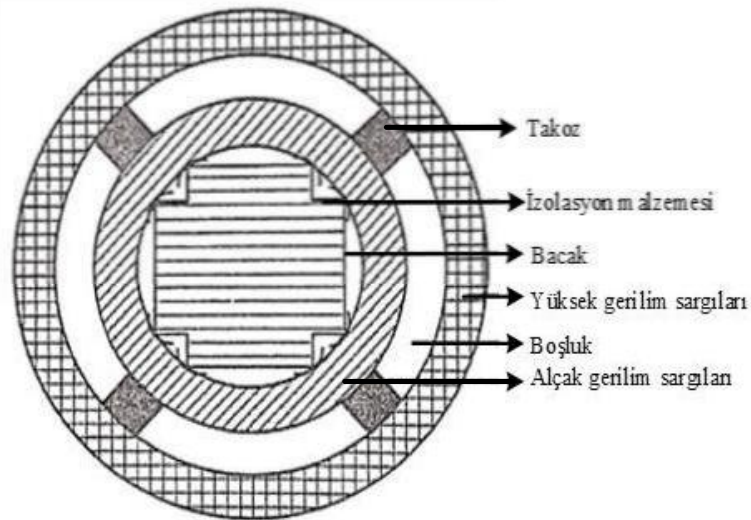
-Bir Fazlı Çekirdek Tipi Transformatör

İki boyunduruk arasına yerleştirilmiş iki bacağın üzerine sarılır. Boyundurukların vazifesi bir bacaktan diğer bacağa akının akmasını sağlamak ve bacaklara yerleştirilen sargıların aksiyal yönde hareketini önlemektir. Transformatörün alt boyunduruktan montaja başlanır. Saçlar boyunduruk şeklinde sıralanıp, yerleştirildikten sonra, bacak saçları alt boyunduruk saçlarının aralarına girecek şekilde yerleştirilir. Bobinlerin oluşturacağı radyal kuvvetlerden etkilenerek gürültü ve titreşim yapmamaları için sağlam

cam elyaf bantlarla bacağın yüksekliğine bağlı olarak gerekli yerlerinden sıkıca bağlanır. Alçak gerilim bobini iç tarafa, yüksek gerilim bobini dış tarafa gelecek şekilde yerleştirilir. İki bobin arasındaki ara geçit hava aralığıdır. Hava aralığının genişliği bobin çaplarının farkının yarısına eşittir. Hava aralığı soğutma kanalı olarak kullanılır. Üst boyunduruk saçları bacak saçlarının arasına yerleştirilerek montaj tamamlanır. Ayrıca bobinlerin iç içe yerleştirilmesi kaçak akı miktarını da azaltır. Boyunduruk ve iki bacak arasına kalan boşluğa pencere adı verilir (Mergen ve Zorlu, 2005).



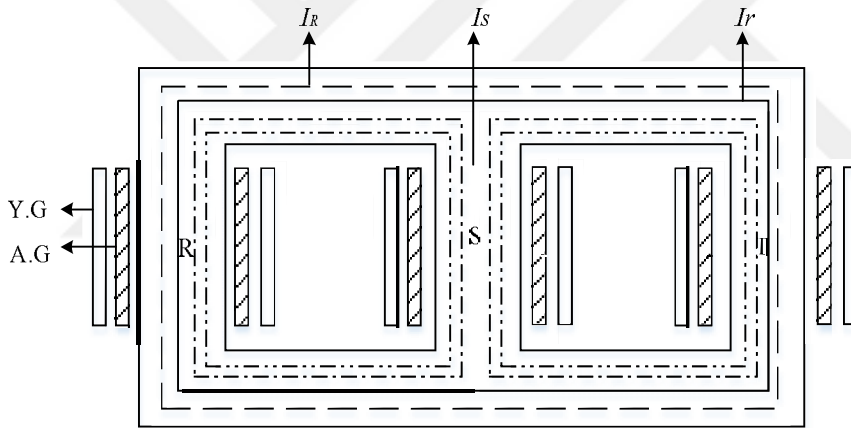
Şekil 3.2. Çekirdek tipi bir fazlı transformatörün demir gövde ve sargıları (Mergen ve Zorlu, 2005)



Şekil 3.3. Sargıların transformatör bacağına yerleştirilmiş hali (Mergen ve Zorlu, 2005)

- Üç Fazlı Çekirdek Tipi Transformatör

İki adet pencere ve iki adet boyunduruk vardır. Orta bacağa ait fazın demir boyu, diğer iki yan bacaklara yerleştirilmiş fazlarda bulunan bacakların boylarına göre daha kısadır. Orta bacaktan çıkan akının geçtiği yol, yan bacaktan çıkan akının geçtiği yola göre daha kısadır. Bu sebeple bacaklarda oluşan manyetik dirençler farklıdır. Fazlara uygulanan gerilimlerin ve indüklenen emk'ların eşit olması gerektiğine göre, bu gerilimleri üretecek manyetik akılar da eşit demektir. Fakat relüktansların farklı olması ile bacaklardaki amper-sarım eşitliği bozulur. Orta bacağın relüktansı küçük olduğundan amper-sarımı da küçük olacak ve neticede bu değeri veren bacak akımı da diğerlerine göre küçük olacaktır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi akı yolları arasındaki ilişki $I_s < I_R = I_T$ şeklindedir. Bu transformatörlerde kullanılan demir miktarı mantel tipine göre daha azdır (Mergen ve Zorlu, 2005).



Şekil 3.4. Üç fazlı çekirdek tipi transformatörün demir gövde ve sargıların konumu (Mergen ve Zorlu, 2005)

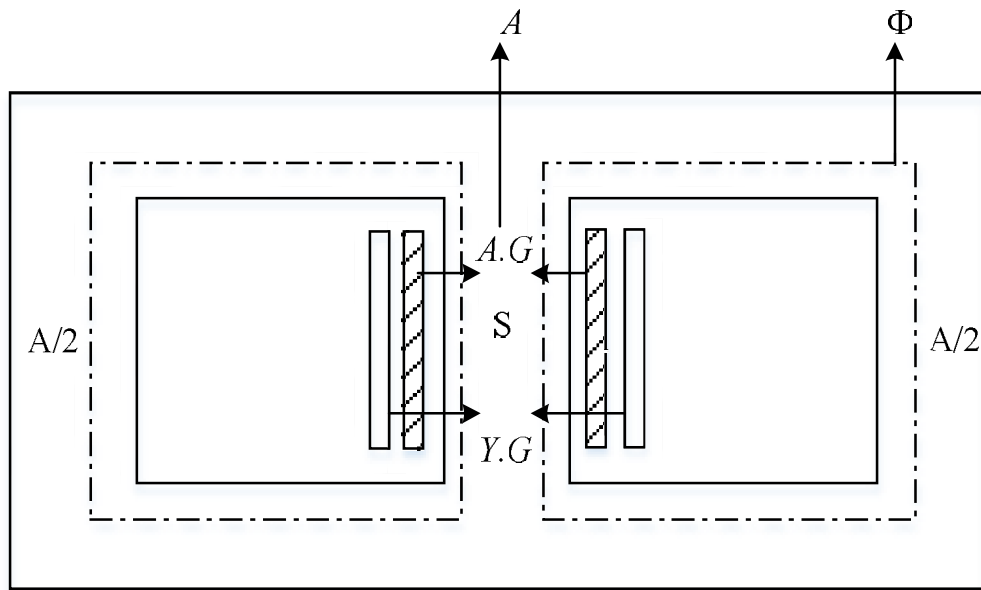
- Mantel Tipi Transformatör

Bu tip transformatörlerde iki boyunduruk, üç adet bacak ve faz başına iki adet pencere bulunur. Yüksek gerilim sargılarını ve alçak gerilim sargılarını orta bacak taşıdığından üretilen tüm akı bu bacaktan diğer yan bacaklara eşit olarak paylaştırılır. Bu sebeple orta bacağın demir kesiti yan bacakların demir kesitine göre %50 daha büyüktür. Bu durum alt ve üst boyunduruklar içinde geçerlidir. Yan bacaklardan geçen akı miktarının aynısı bunlarda da dolaşır. Mantel tipi transformatörler çekirdek tipi transformatörlerden daha ağırdır. Çünkü bu tip transformatörlerde daha fazla demir kullanılmaktadır. Orta bacakta bulunan sargılara yan bacaklar koruma görevi yapar.

Mantel tipi transformatörlerin manyetik devreleri aynı olduğundan her fazın çektiği akımda aynı olmaktadır. Mantel tipi ve çekirdek tipi transformatörler orta ve büyük güçte imal edildiğinden demir çekirdek kesiti, bacak boyu, boyunduruk kesiti ve boyları büyüktür (Mergen ve Zorlu, 2005).

- Bir Fazlı Mantel Tipi Transformatör

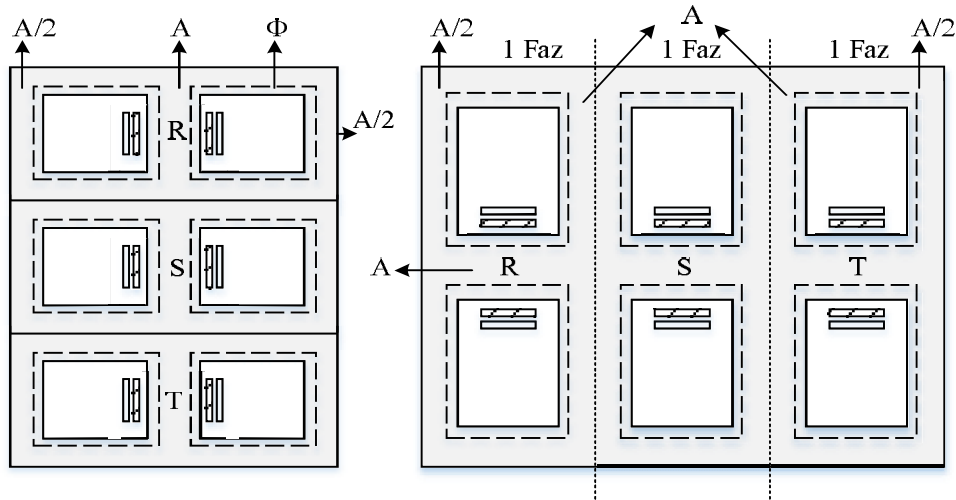
Manyetik alan yoğunluğunu demir gövdenin her noktasında aynı yapmak için yan bacakların akı miktarı orta bacağın yarısı kadar olur (Mergen ve Zorlu, 2005).



Şekil 3.5. Mantel tipi bir fazlı transformatörün demir gövde ve sargıların konumu (Mergen ve Zorlu, 2005)

- Üç Fazlı Mantel Tipi Transformatör

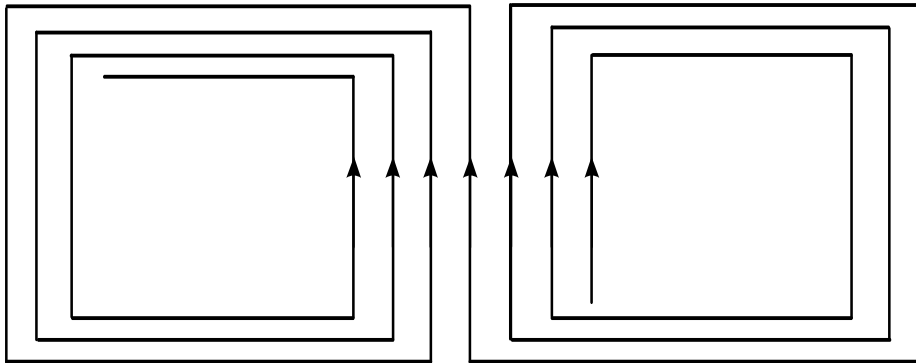
Bir fazlı mantel tipi transformatörlerden 3 adet yan yana veya alt alta koyarak üç fazlı mantel tipi transformatör yapılır. Üç fazlı mantel tipi transformatörlerde demir gövdede kullanılan malzeme daha fazladır. Sargılar iyi korunduğu için sağlam yapıya sahiptir.



Şekil 3.6. Mantel tipi bir fazlı transformatörlerin üst üste ve yan yana yerleştirilmesi

-Spiral Tip Transformatör

Spiral tip transformatörler yapı itibariyle diğer iki tip transformatörden bütünüyle farklıdır. Aralarındaki en büyük fark imalat şeklindedir. Bu tip transformatörler çok uzun saç şeritlerin kesintisiz kıvrılması yoluyla yapılırken diğer tip transformatörler preste kesilmiş saçların dizilmesi yöntemi ile imal edilirler. Demir gövde mantel tipi transformatör biçimindedir. Uzun saç şeritlerin kesintisiz kıvrılmasıyla imal edildiği için diğerlerinde ortaya çıkan hava aralığı sorunları oluşmaz. Bu nedenle daha sessiz ve mıknatıslanmak için daha az akım çekerler. Ancak sargıların sarılması daha zordur. Boşta çalışma akımları diğer tip transformatörlere göre daha büyüktür. Çektikleri reaktif güç diğerlerine göre daha küçük olduğundan boşta çalışmada güç faktörleri daha büyüktür (Mergen ve Zorlu, 2005).



Şekil 3.7. Spiral tip bir fazlı transformatör (Mergen ve Zorlu, 2005)

3.2.1.2. Transformatör Sargıları

Transformatör sargılarında işlenmesinin kolay olması ve iletkenlik özelliğinden dolayı genellikle bakır iletken tercih edilir. Fakat alüminyum ve gümüş sargı tipli iletkenlerde mevcuttur. Sargılar transformatörün gücüne ve soğutma şekline göre yuvarlak veya dikdörtgen kesitli olabilir. Küçük akımlı transformatörlerde yuvarlak, büyük akımlı transformatörlerde ise dikdörtgen kesitli iletkenler kullanılır.

Transformatörlerde birinci ve ikinci devre sargılarının birbirine göre konumları önemlidir. Primer ve sekonder sargıları üst üste sarıldığında, primerdeki manyetik akının etkisi sekonderde büyük olur. Buna karşılık sargılar ayrı ayaklara sarıldığında bu etki azalmaktadır. Çünkü kaçak akılar fazlalaşmaktadır. Transformatörlerde yalıtmayı kolaylaştırmak için alçak gerilim sargısı nüveye yakın sarılır. Yüksek gerilim sargısı bunun üzerine sarılır. Bunun bir başka faydası da daha çok arıza yapan yüksek gerilim sargısının üstte olması nedeniyle sökülmesinin kolay olmasıdır. Transformatör sargıları sarıldıktan sonra, sargı uçları ince ve çoklu iletkenlerle bağlantı yerlerine çıkartılır. Bu iletkenler sargı başlarına kaynaklanır. Burada amaç alçak ve yüksek gerilim uçlarının birbirinden yeteri derecede yalıtılması veya birbirinden uzak tutulmasıdır. Çıkartılan bu uçlar dış kap üzerindeki izolatörlere bağlanır (Peşint ve Ürkmez, 2000).

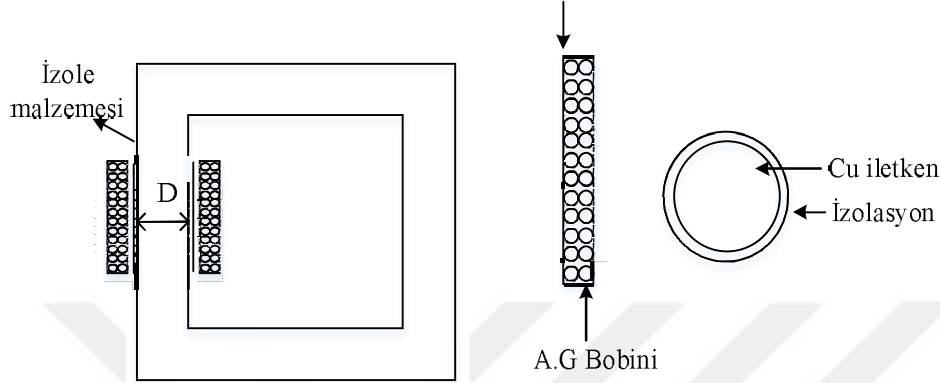
Transformatörlerin primer ve sekonder sargıları, düzenlenmiş şekillerine göre silindirik ve disk sargılar olmak üzere ikiye ayrılır. Transformatörlerde çoğunlukla silindirik tip sargılar kullanılır.

- Silindirik Sargılar

Nüve üzerine makara şeklinde sarılan sargılardır. Disk sargıya göre daha ucuzdur. Dışarıda sarılır daha sonra bacağa yerleştirilir. Silindirik sargıların imalatı yapılırken bobin tek parça olarak yapılmaz. Bobinler küçük alt bobinler halinde imal edilirler ve daha sonra birleştirilirler. Böylece bobinlerde bir arıza durumunda bütün sarımlarını yeniden yapmanın önüne geçilmiş olur. Arıza durumunda arızalı alt bobin tespit edilerek çıkartılır ve yenisi ile değiştirilir (Mergen ve Zorlu, 2005).

- Alçak Gerilim Sargıları

Alçak gerilim bobini demir bacağıın etrafına izole malzeme ile beraber yerleştirilir. Sarım sayısının az olması ve yüksek akım taşınması sebebiyle bobin imalatı tek parça olarak imal edilir. Alçak gerilim sargısında alt bobinler kullanılmaz.



Şekil 3.8. Alçak gerilim sargısının konumu (Mergen ve Zorlu, 2005)

- Yüksek Gerilim Sargıları

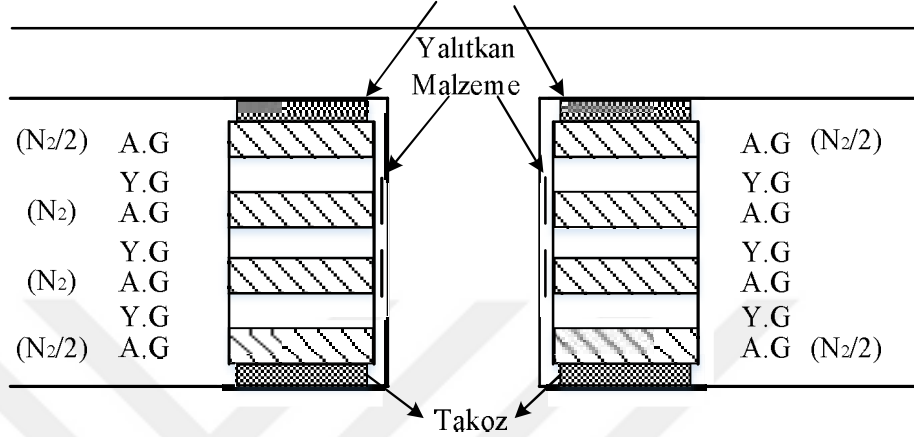
Transformatörün indirici veya yükseltici olmasına göre birincilde veya ikincilde kullanılır. Sarım başına düşen gerilim dikkate alındığında yüksek gerilim sargısının sarım sayısının alçak geriliminkine oranla daha yüksek olduğu açıktır. Sarım sayısı ve ölçüleri büyük olan bu sargının imalatı zordur. Bu sargı dışarıdan enerjilendirildiği için transformatörün dışında meydana gelebilecek yüksek gerilimli deşarj olaylarından etkilenir. Bu nedenlerden dolayı yüksek gerilim sargısı farklı yapılara sahip alt bobinlerden oluşturulur. Bunlar giriş bobini, basit bobin, çift bobin ve ayar bobini kısımlarına ayrılır. Giriş bobinine, yüksek gerilime dayanıklı izolasyon malzemesi sarılır. Mevcut sargıdan yeterince sarım sayısı çıkartmak veya hazırda bulunan sarımları devreye sokmak ayar (kademe) bobinleri ile yapılır. Çıkış gerilim ayarı bu ayar bobinleri ile yapılır (Mergen ve Zorlu, 2005).

- Disk Sargı

İçinden büyük akım geçen transformatörlerde kullanılır. Boyunduruklarda demire yakın tarafa alçak gerilim sargıları konulur. Sırasıyla A.G sargı elemanı, sonra Y.G elemanı ve tekrar A.G elemanı yerleştirilir. Boyunduruklara yakın olan en alttaki ve en üstteki sargılar, bir disk sargı grubunda bulunan sarım sayısının yarısı ($N_2/2$) ile biter.

Bunun sebebi gövdeye karşı yalıtkanlığı sağlamak ve iletkenlerde meydana gelen kaçak manyetik akının oluşturduğu kaçak reaktansı küçültmektir (Mergen ve Zorlu, 2005).

Bazı transformatörlerde her iki sargı tipi de kullanılabilir. Alçak gerilim sargısı silindirik, yüksek gerilim sargısı disk sargı tipinde yapılır.



Şekil 3.9. Disk sargının bacağa yerleştirilmesi (Mergen ve Zorlu, 2005)

3.3. Sargıların Yalıtılması

Transformatörün primer ve sekonder sargıları farklı gerilimlerde olduğundan bu sargılar birbirinden yalıtıldığı gibi nüveye karşı da yalıtılması gerekir. Sargılar yalıtılmış iletkenlerden sarılmış olsa da sarım katları arasına ayrıca yalıtkanlar konarak katlar birbirinden yalıtılırlar. Yalıtkan malzeme olarak presbant, mika, kağıt, bazı plastik maddeler, çeşitli yağlar, reçine, pamuk, ağaç takozlar ve pertinaks gibi maddeler kullanılmaktadır. Yalıtma işi yapılırken soğutma durumu da göz önüne alınmalıdır. Transformatörlerde kullanılan yalıtkanların cinsi veya kalınlığı transformatör gerilimlerine bağlı olarak seçilir. Sargı uçları gövdeden çoğu zaman porselen izolatörler yardımı ile yalıtılır. Yalıtmanın daha iyi olması için alçak gerilim ve yüksek gerilim uçları arasında belirli bir mesafenin bulunması gerekir (Peşint ve Ürkmez, 2000).

3.4. Transformatörün Soğutulması

Bütün elektrik makinelerinde olduğu gibi, transformatörlerde de sargı ve demir kayıpları meydana gelir. Bu kayıplar ısı şeklinde ortaya çıkar. Sargı ve demir sıcaklıklarının fazla yükselmesini önlemek için buralar açığa çıkan ısıнын en uygun şekilde çevreye iletilmesi gerekir. Soğutucu ortam olarak hava veya yağ kullanılır.

Soğutma şekline göre kuru transformatörler (hava ile soğutulan) ve yağlı transformatörler (yağ ile soğutulan) olarak ikiye ayrılır.

Kuru transformatörler genellikle küçük güçler için kullanılır. Genellikle kendi kendilerine soğurlar. Çevreye radyasyon ve konveksiyon ile ısı verirler. Az da olsa büyük güçler için kuru transformatörler kullanmak istenirse transformatörün cebri olarak soğutulması gerekir. Bu durumda vantilatörler kullanılarak çevreye verilen ısı miktarı yükseltilir.

Yağlı transformatörler genel olarak orta ve büyük güçler için kullanılır. Soğutma şekli ya kendi kendine veya cebri olarak çevreye ısı verilir. Kendi kendine soğuyan küçük güçlü transformatörlerde çevreye daha fazla ısı vermek ve sıcaklığı belirli sınırlar içinde tutmak için yağ kabının yüzeyi düz saçtan yapılırken orta güçlerde dalgalı, büyük güçlerde kazan yüzeylerine borular yerleştirilir (Boduroğlu, 1988).

3.5. Transformatörlerde Meydana Gelen Kuvvetler

Transformatörde primer ve sekonder sargılarından geçen akımların meydana getirdiği kuvvetler sargıların zorlanmasına sebep olur. Yan yana olan iletkenlerden geçen aynı yönlü akım iletkenler arasında çekme kuvveti yaratırken, zıt yönde akan akımlar ise itme kuvveti meydana getirirler.

Transformatörlerde iki değişik kuvvet meydana gelir. Bunlar x eksenine doğrultusunda olan radyal kuvvetler ve y eksenine doğrultusunda olan aksiyal kuvvetlerdir.

3.5.1. Radyal Kuvvetler

Primer ve sekonder akımlar arasında bulunan 180° faz farkından dolayı sargılara uygulanan kuvvet akımın yönüne bağlıdır. Akımlar aynı yönde ise sargılar birbirine doğru çekilir, aksi yönde ise sargılar birbirini iter ve çapı genişletmeye yönelik zorlarlar. Kuvvetler x eksenine yönünde oluşur. Kuvvet iki sargı arasındaki akı kavramasından oluşur.

3.5.2. Aksiyal Kuvvetler

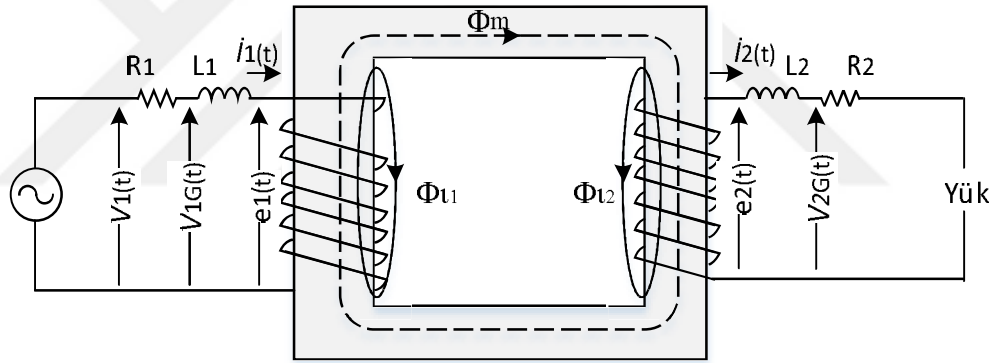
Kuvvetler ve kuvveti meydana getirecek akılar arasında 90° fark bulunmaktadır. "y eksenine yönünde" olması gereken F_y aksiyal kuvvetlerinin "x eksenine" boyunca hareket eden Φ_x akıları tarafından oluşmaktadır. Bu akılar nüve etrafına sarılmış iletkenlerin eksenlerine dik doğrultuda meydana gelir. Ayrıca bu akılar, primer ve sekonder

sargılarını kavrarlar. Bunlar daha kısa yoldan gitmek için kendi yollarını nüveye girmeden, yan sargı üzerinden kaparlar.

3.6. Bir Fazlı Gerçek Transformatör Modeli

Bir fazlı İdeal transformatör modeli sadece gerilim, akım ve empedans transformasyonlarını dikkate aldığı için basittir. Bir fazlı gerçek transformatör modelinde primer ve sekonder sargılarının küçük de olsa dirençleri vardır. R_1 primer sargı direncini, R_2 sekonder sargı direncini temsil eder. Bu sargı dirençlerinden dolayı indüklenen gerilim ile terminal gerilimi farklı olacaktır. Transformatörün giriş ve çıkış güçleri eşit olmayıp, giriş gücü daha büyük olacaktır. Böylece verim %100' den küçük olacaktır.

Primer sargısına sinüzoidal bir gerilim kaynağı olan $v_{1(t)}$ bağlı ve primer sargı akımı $i_{1(t)}$ olduğu kabul edilirse gerçek transformatör modeli şekil 3.10' da gösterildiği gibi olur.



Şekil 3.10. Gerçek bir transformatör modeli (Bal, 2008)

$$V_{1(t)} = V_{1(at)} + R_1 \dot{i}_{1(t)} \quad (3.1)$$

Faraday kanununa göre

$$v_1(t) = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (3.2)$$

ideal durumdan farklı olarak ϕ_1 ' in çok küçük bir oranı hava aralığında devresini tamamlar. Kaçak akı olan ϕ_{11} sekonder sargısını kesmez. Burada L_1 kaçak endüktansı veya X_1 kaçak reaktansı temsil etmektedir. ϕ_m primer ve sekonderi kesen ortak akıdır.

$$\Phi_1 = \phi_{11} + \phi_m \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)' ün sonucu olarak denklem (3.1) ve (3.2) birleştirilirse

$$v_1(t) = R_1 i_1(t) + N_1 \frac{d\phi_{l1}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (3.4)$$

elde edilir. Primer sargısının kaçak akısı,

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{l1}}{dt} \quad (3.5)$$

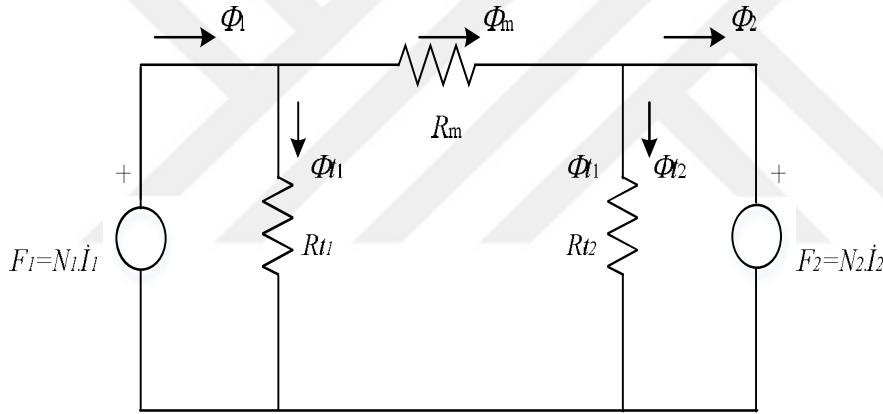
Primer sargıda endüklenen emk,

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (3.6)$$

olarak tanımlanır. Denklem (3.4)' te verilen primer devresine Kirchhoff' un gerilim kanunu uygulanırsa,

$$v_1(t) = R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_1(t) \quad (3.7)$$

yazılabilir.



Şekil 3.11. Transformatörün manyetik eşdeğer devresi (Bal 2008)

F_1 ve F_2 arasındaki fark sonucu manyetik devrede ϕ_m akısı üretilmektedir.

$$\phi_m R_m = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (3.8)$$

elde edilir. Yukarıdaki tanımlamalar doğrusal B-H karakteristiği kabulü üzerinedir. Burada yeni bir akım tanımlanabilir. i_ϕ uyarım akımı. Primerdeki bu akım, ϕ_m akısının üretilmesi için gereklidir.

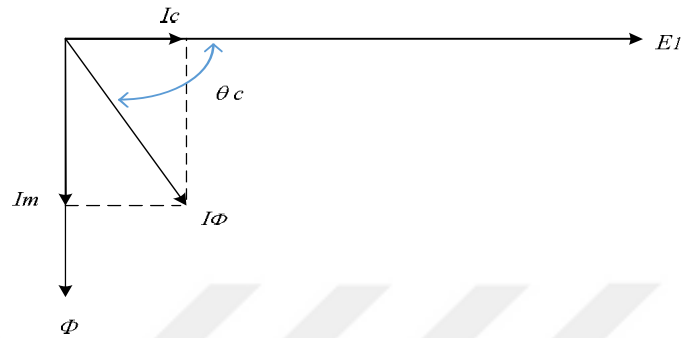
$$\begin{aligned} \phi_m R_m &= i_\phi N_1 \\ N_1 i_\phi &= N_1 i_1 - N_2 i_2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Bu durumda doğrusal kabul sınırlaması kaldırılmış olur.

$$i_1 = i_\phi \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (3.10)$$

$$\mathbf{i}_1 = \mathbf{i}_\phi + \mathbf{i}_\phi^\perp \quad (3.11)$$

görüldüğü gibi primer akımı, uyarım akımı ile primere aktarılmış sekonder akımının toplamına eşittir. Uyarım akımı nüvede kullanılan manyetik malzemenin histerezis eğrisinden dolayı sinüzoidal değildir. Fakat uyarım akımının sadece temel dalga bileşeni dikkate alınır.



Şekil 3.12. Uyartım akımının fazör diyagramı (Bal 2008)

Şekilde 3.12’ de görüldüğü gibi i_ϕ akımı $i_{m(t)}$ ve $i_{c(t)}$ bileşenlerine ayrılabilir. $i_{m(t)}$ bileşeni mıknatıslanma akımı olarak adlandırılır. Manyetik akı ϕ ile aynı fazdadır. $i_{c(t)}$ bileşeni ise nüve kayıplarını temsil eder. E_1 ile aynı fazdadır. Uyarım akımının varlığı bir direnç kondüktansı (G_c) ile bir sargı süseptansının (B_m) paralel kombinasyonu olarak gösterilir.

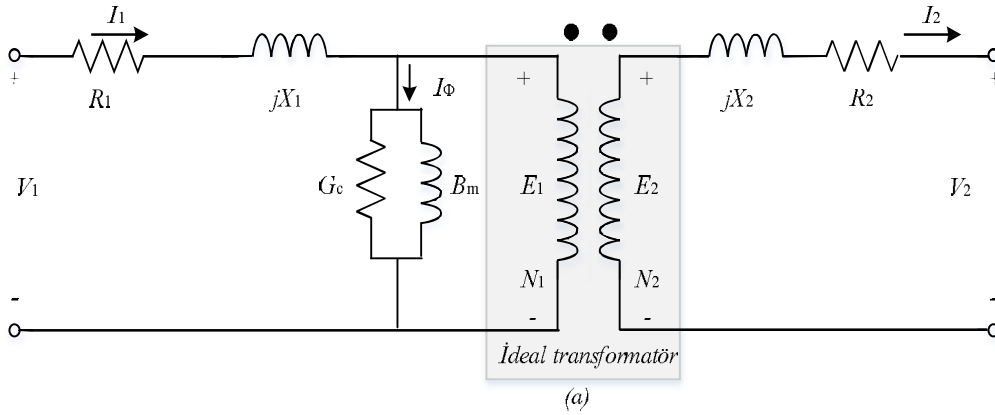
Sekonder sargısından geçen i_2 akımının ürettiği manyetik akının düşük bir oranı devresini havadan tamamlarken büyük kısmı ise devresini çekirdekte tamamlar. Sekonder sargısının kaçak endüktansı L_2 veya kaçak reaktansı X_2 ve sargı direnci R_2 ile gösterilir. Şekil 3.13’te transformatörün eşdeğer devresi gerçek büyüklükleri ile gösterilmiştir. Bu eşdeğer devrenin sekonder tarafı primer tarafına aktarılarak Şekil 3.14’teki T-eşdeğer devre elde edilir. Bunun için aşağıdaki dönüştürme işlemleri yapılır.

$$V_2^1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (3.12)$$

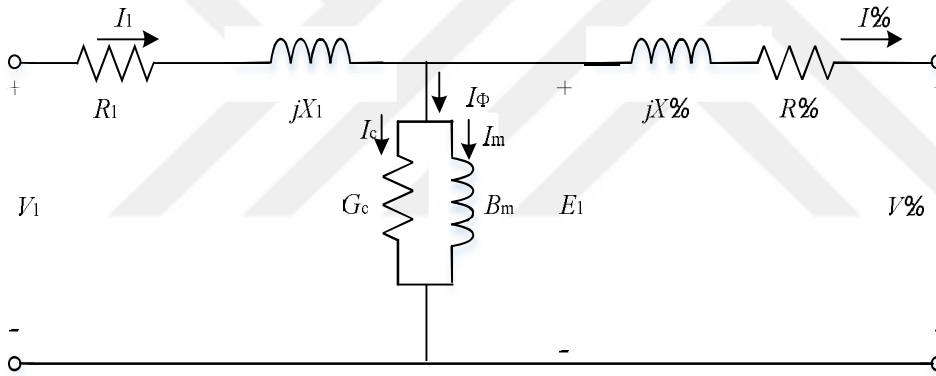
$$I_2^1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (3.13)$$

$$R_2^1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \quad (3.14)$$

$$X_2^{-1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2 \quad (3.15)$$



Şekil 3.13. Transformatorün elektrik eşdeğer devresi (Bal, 2008)

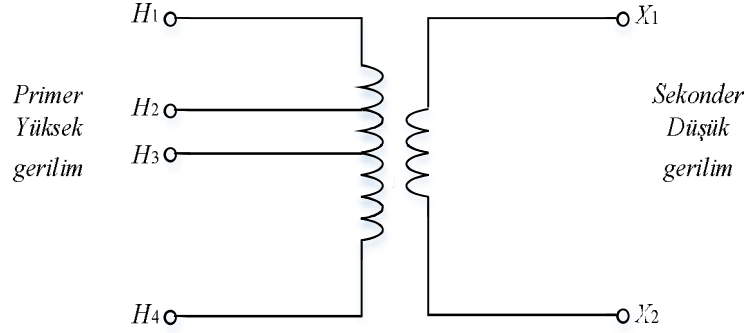


Şekil 3.14. Transformatorün T-eşdeğer devresi (Bal, 2008)

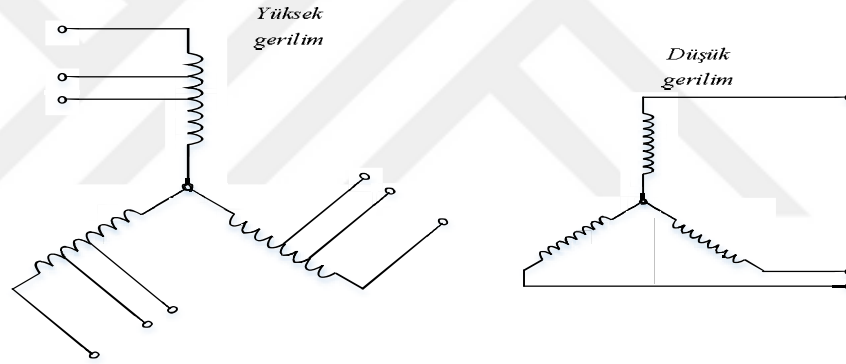
3.7. Transformator Sargı Kademeleri

Pratikte iki durumda dönüştürme oranı değiştirmek gerekebilir. Birincisi sabit kademeli ayarlamadır. Transformatorlerin giriş gerilimindeki düşme sonucu çıkış gerilimi de düşmektedir. Çıkış gerilimini istenen seviyeye yükseltmek için sabit kademeli sargı ucu değiştirme işlemi yapılmalıdır. Genellikle sabit sargı ayarlama aralığı $\pm 5\%$ tir. Daha dar aralıklarda gerilim ayarı için kademe sayısı artırılabilir. Kademe değiştirme öncesi transformator hattın ayrılır ve deşarj edilir. Bu durumda elektrik kesintisi olmak zorundadır. İkincisi yük altında sargı kademesi değiştirmedir. Yük geriliminde kesinti yapmadan veya önemli bir dalgalanmaya neden olmadan sargı kademesini değiştirme

şeklidir. Bir generatör transformatörü anma geriliminde ± 10 ayarlaması yapabilecek şekilde tasarlanabilir (Bal, 2008).



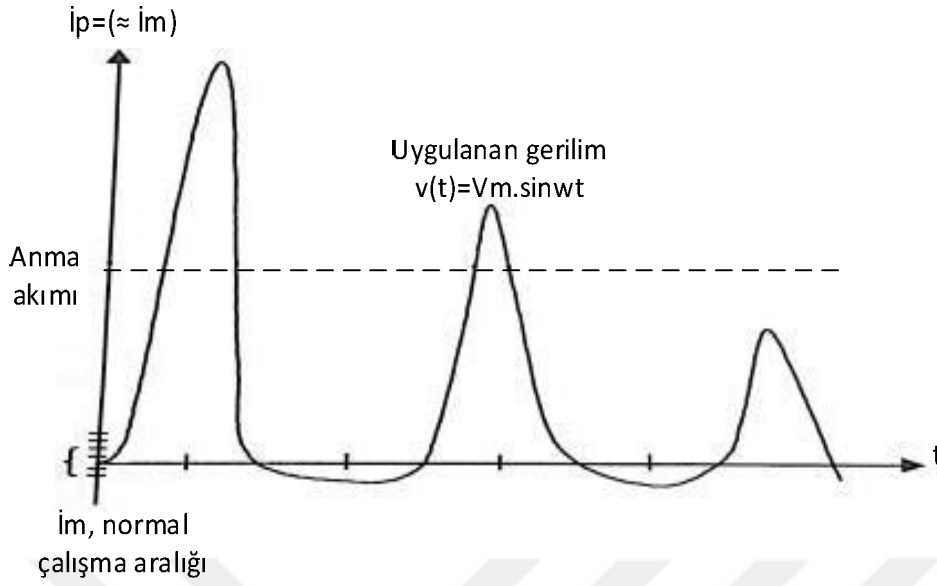
Şekil 3.15. Bir fazlı sabit sargı kademeli transformatör (Bal, 2008)



Şekil 3.16. Y-Y bağlı sabit sargı kademeli üç fazlı transformatör (Bal, 2008)

3.8. Aşırı Başlangıç Akımı

Bir transformatör elektrik güç kaynağına bağlandığı anda giriş veya başlangıç akımı transformatörün anma akımının 8-12 katı olabilir. Transformatöre uygulanan gerilimin zamana göre sıfır ekseninden geçtiği anda anahtar kapatılırsa bu olay daha etkin olur. Bu durumda üretilen maksimum akı B-H eğrisinin doyum bölgesinde yer alır. Bu bölgede manyetik malzemenin geçirgenliği azalırken, buna bağlı olarak endüktansı ile mıknatıslanma (uyartım devresi) empedansı en düşük değerlerini alırlar. Transformatörün kaçak empedansı, mıknatıslanma eğrisi, artık mıknatısiyet seviyesi ve anahtarlama anında uygulanan gerilimin anlık değeri aşırı başlangıç akımının genliği ve dalga şekli tarafından etkilenir. 50 Hz kaynaktan beslenen bir transformatörün aşırı başlangıç akımı yaklaşık olarak iki saykıl (40 ms) süresinde normal değerine düşer.



Şekil 3.17. Aşırı başlangıç akımı (Bal, 2008)

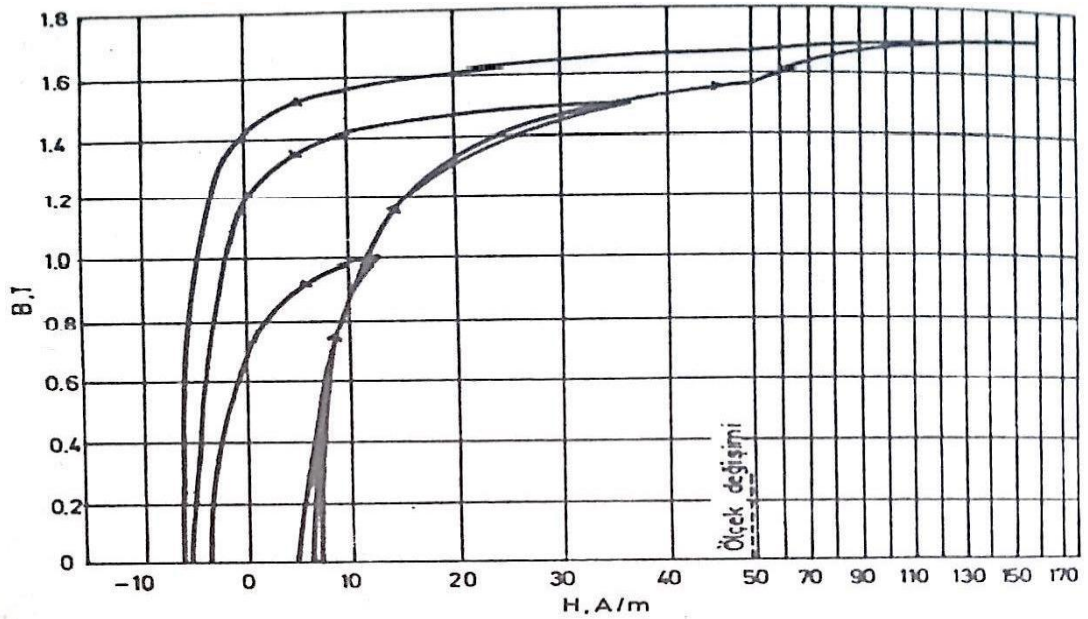
3.9. Manyetik Malzemeler ve Özellikleri

Manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak manyetik kuvvetlerin ve enerji yoğunluğunun artması nedeniyle, elektrik makinalarının imalatında kullanılan manyetik malzemelerin uygun özelliklere sahip olması gerekir. Sargılar arasında manyetik kublajın minimum mıknatıslanma akımı ile sağlanması, kullanılan malzemenin özellikleri ve manyetik devrenin geometrik yapısıyla yakından ilgilidir.

Demir, kobalt, nikel, tungsten ve alüminyum katkılı demir alaşımlarından yapılan ferro-manyetik malzeme, yapısı ve karakteristikleri açısından önemli farklılıklar gösterir. Malzemeye dışarıdan belirli yönde mıknatıslanma kuvveti uygulandığında, yapısını oluşturan atomların manyetik momentleri uygulanan mıknatıslanma ile aynı yöne gelmeye çalışırlar. Böylece manyetik geçirgenliği artan malzemede, dış manyetik alan etkisiyle büyük bir manyetik akı yoğunluğu meydana gelir. Manyetik malzemenin geçirgenliği, boşluğun manyetik geçirgenliğinin katları olarak belirlenir. Malzemenin yapısını oluşturan bütün atomların manyetik momentleri, dış manyetik alan etkisi ile aynı yöne geldiklerinde, malzeme manyetik yönden doymuş olur.

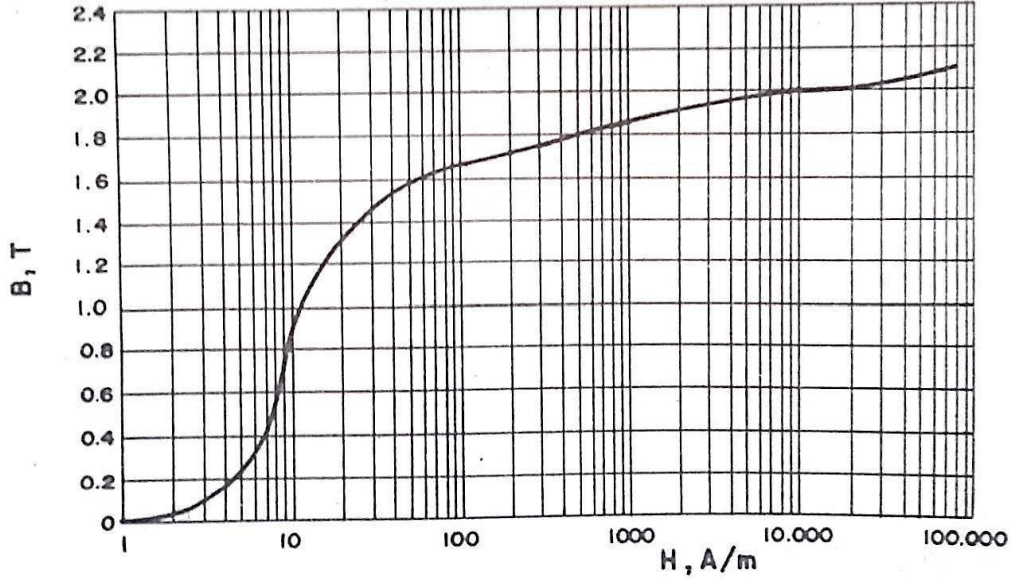
Şekil 3.18’de kalınlığı 0.3 mm. olan ve elektrik makinalarının yapımında kullanılan ferro-manyetik çelik malzemede, $B_m=1.0$ T, $B_m=1.5$ T, $B_m=1.7$ T. Akı yoğunlukları için, deneysel olarak elde edilmiş B-H eğrileri görülmektedir. Histerezis eğrisi olarak tanımlanan B-H eğrilerinde, H alan şiddeti ile, B akı yoğunluğu arasındaki

bağıntı doğrusal olmadığı gibi, belirli bir alan şiddeti değeri için, birden çok akı yoğunluğu değeri bulunur. Bu nedenle B-H eğrilerinin analitik olarak ifade edilmesi mümkün olmamaktadır. En büyük B ve H değerleri için deneysel olarak çıkarılan histerezis eğrisinin, H alan şiddetinin artan değerlerine karşılık olan B akı yoğunluğu eğrisi, malzemenin mıknatıslanma eğrisi olarak kabul edilir. Bu eğriye malzemenin d.a veya normal mıknatıslanma eğrisi denilir. Şekil 3.19’da elektrik makinalarının yapımında kullanılan manyetik malzemeye ait d.a mıknatıslanma eğrisi görülmektedir (Ateş ve Peşint, 1990).



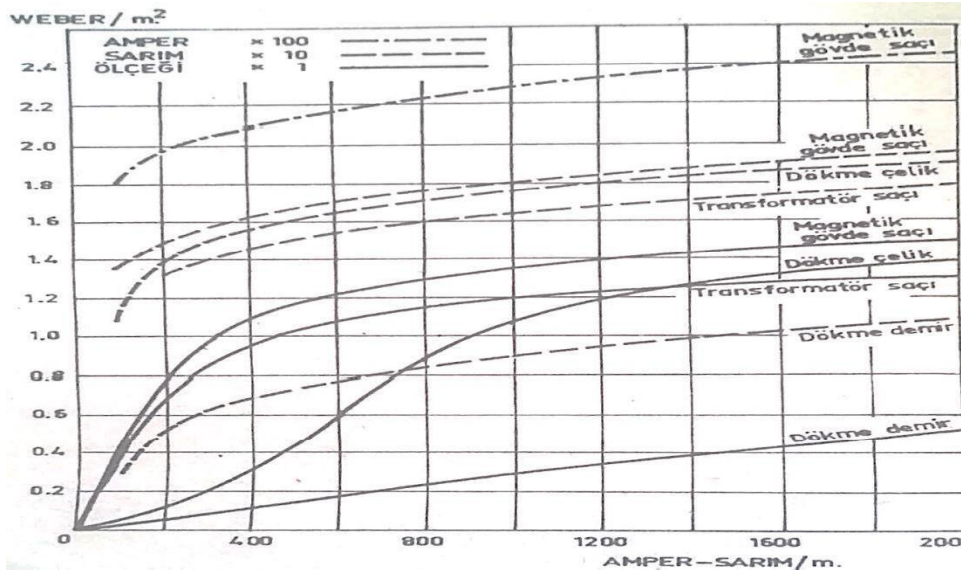
Şekil 3.18. Kalınlığı 0.3 mm. olan ve üst yarı kısmı gösterilmiş ferro-manyetik çelik saça ait B-H eğrileri (Ateş ve Peşint, 1990)

3. MATERYAL VE METOT



Şekil 3.19. 0.3 mm. kalınlığında olan ferro manyetik malzemeye ait d.a. mıknatıslanma eğrisi (Ateş ve Peşint, 1990)

Elektrik makinalarının yapımında çok çeşitli ferro-manyetik malzemeler kullanılmaktadır. Makinaların gövde muhafazası olarak pik döküm, çelik sac veya çelik döküm, transformatör sacı, yine manyetik gövdelerinin yapımında demir kayıpları minimum olan manyetik gövde sacı kullanılır. Şekil 3.20’de değişik alaşımlı manyetik malzemeye ait d.a. mıknatıslanma eğrileri görülmektedir. Bu eğriler manyetik malzemenin mıknatıslanma özellikleri hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 3.20. Değişik alaşımlı ferro-manyetik malzemeye ait d.a. mıknatıslanma eğrileri (Ateş ve Peşint, 1990)

3.10. Manyetik Gövde (demir) Kayıpları

Ferro-manyetik malzemeler değişken manyetik alan etkisinde kaldıklarında demir kayıpları olarak bilinen histerezis ve fuko kayıpları meydana gelir. Malzemenin yapısını meydana getiren moleküllerin manyetik alan yönüne yönlendirilmesi için harcanan enerji histerezis kayıpları olarak bilinir.

Malzemenin yapısında kapalı devreler şeklinde oluşan girdap akımları tarafından meydana getirilen I^2R niteliğindeki kayıplar fuko kayıpları olarak bilinir. Fuko kayıpları manyetik akı yoğunluğunu azaltıcı yönde etki gösterirler.

Histerezis kayıpları, ilgili malzemeye ait histerezis eğrisi yardımıyla hesaplanabileceği gibi uygulamada daha çok Steinmetz tarafından verilen ampirik formül yardımıyla hesaplanır.

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^x \quad (3.16)$$

dır. Formülde k_h malzemenin cinsine bağlı olarak değişen bir katsayıdır. Döküm çeliği için 0.025, silisli sac için 0.001, manyetik geçirgenliği yüksek olan permalloy için 0,0001 alınır. B_m en büyük akı yoğunluğu olup, x değeri malzeme cinsine bağlı olarak 1.5 ile 2.5 arasında değişir. Uygulamada genellikle $x=2$ alınır. f , Hz olarak frekansı göstermektedir. B_m tesla alınmak şartıyla P_h , watt/kg. olarak birim ağırlık başına histerezis kaybını verir.

Fuko kayıplarının hesabı için aşağıdaki formül kullanılır.

$$P_f = k_f \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot B_m^2 / \rho \quad (3.17)$$

dır. Formülde k_f malzeme cinsine göre değişen bir katsayı d , manyetik akı çizgilerine dik yöndeki malzeme kalınlığını, ρ malzemenin elektriksel direncini gösterir. Manyetik gövdenin yapımında kullanılan ferro-manyetik malzemenin elektriksel direnci yüksek ince sac levha şeklinde olması durumunda fuko kayıplar önemli derecede azalır.

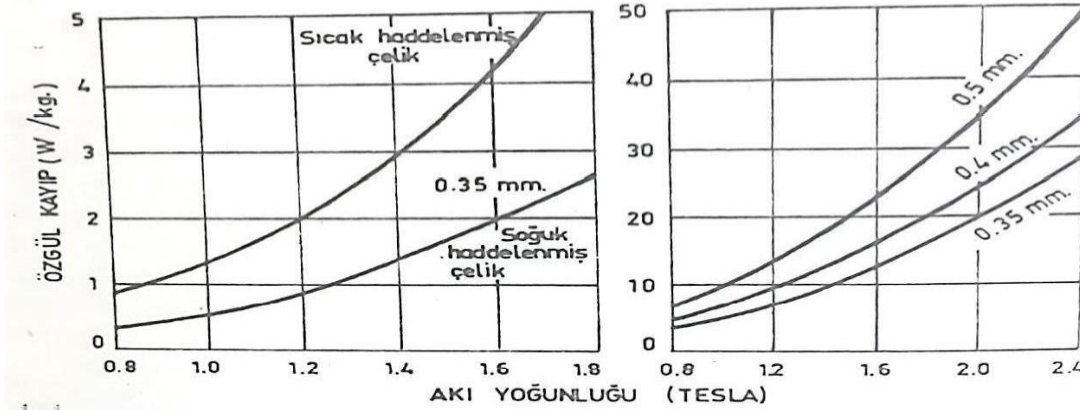
Toplam demir kayıpları,

$$P_d = P_h + P_f \quad (3.18)$$

olur. Uygulamada malzeme cinsine, kalınlığına ve akı yoğunluğuna bağlı olarak, malzemenin birim ağırlığı başına toplam demir kayıplarını gösteren eğriler kullanılır. Şekil 3.21’de soğuk veya sıcak haddelenmiş 0.35 mm. kalınlığında transformatör sacına ve değişik kalınlıkta dinamo sacına ait, birim ağırlık başına demir kayıplarını gösteren

3. MATERYAL VE METOT

eğriler verilmiştir. Saç levhalar arasında kullanılan izolasyon tabakasının kalitesi, saçların kesilmesi ve delinmesi esnasında malzemede meydana gelen sertleşme ve izolasyon zedelenmesi demir kayıpların artırıcı yönde etki yapar. Yukarıda belirtilen durumların demir kayıplara olan etkisinin dikkate alınması gerekir. Ayrıca akı yoğunluğu tüm gövde kesiti boyunca homojen olmadığından magnetik gövdenin gerçek demir kayıplarının sonradan ölçülmesi gerekir (Ateş ve Peşint, 1990).



Şekil 3.21. Ferro-manyetik transformatör ve dinamo sacının birim ağırlık başına demir kayıpları (Ateş ve Peşint, 1990)

3.11. Ferro-manyetik Malzemenin Fiziksel Özellikleri

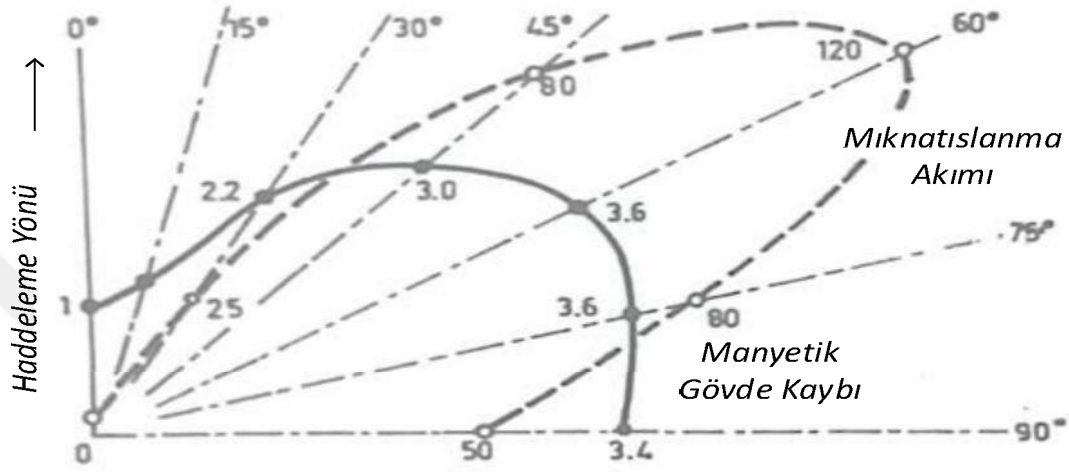
Manyetik malzeme, manyetik akının zamana göre değişken veya sabit olmasına bağlı olarak iki türde imal edilir. Değişken akı etkisinde bulunan malzeme, aralarında uygun nitelikte yalıtım tabakası bulunan ince saç levha şeklinde imal edilir. Sabit akı etkisinde bulunan malzeme kullanma şartlarına uygun özellik ve boyutlarda masif parçalar şeklinde imal edilir (Ateş ve Peşint, 1990).

3.11.1. Levha Malzeme

Saç levha şeklinde imal edilen ferro-manyetik malzeme alaşımlı çelik olup, bileşiminde manyetik geçirgenliği artırarak histerezis kayıplarını azaltmak amacıyla belirli oranda silikon bulunur. Silikon, malzemenin mekanik çekme gerilmesini arttırmakla birlikte kırılgan bir özellik kazanmasına sebep olur. Ayrıca alaşıma bir miktar nikel katılarak malzemeye soğuk haddelenebilme özelliği kazandırılır.

Haddeme yönü ile işletmede etkisinde kalacağı manyetik alan çizgilerinin yönlerinin uygunluğu büyük önem taşır. Silikon alaşımlı manyetik malzemenin molekül yapısı küp şeklinde olduğundan uygulamada iyi bir manyetik özellik sağlanabilmesi için,

soğuk haddeleme yolu ile küpün dış kenarlarının haddeleme yönü ile aynı yöne yönelmesi sağlanır. Bu özelliği ile manyetik bakımdan yönlendirilmiş malzeme denir. Şekil 3.22’ de soğuk haddeleme yolu ile manyetik bakımdan yönlendirilmiş transformatör sacında, mıknatıslanma akımının ve demir kayıplarının haddeleme yönüne göre bağlı olarak değişimleri görülmektedir (Ateş ve Peşint, 1990).



Şekil 3.22. Mıknatıslanma akımının ve demir kayıplarının haddeleme yönüne bağlı olarak değişimi (Ateş ve Peşint 1990)

Amerika Demir ve Çelik Enstitüsüne (AISI) göre yönlendirilmiş laminasyon malzemesi Çizelge 3.1’de sınıflandırılmıştır (Erdem, 2006).

Elektrik çelikleri ya da başka bir adıyla silikon çelikleri elektrik makine tasarımcılarınca laminasyon malzemeleri olarak tanınmaktadır (Gürdal, 2001).

Çizelge 3.1. AISI normuna göre yönlendirilmiş laminasyon malzemeleri (Balcı, 2010)

Laminasyon malzemeleri	Kalınlık (mm)	Nüve kaybı (1.5 T ve 50 Hz)	Nüve kaybı (1.7 T 50 Hz.)
		(W/kg)	(W/kg)
M2	0.18	0.68	0.639
M3	0.23	0.75	0.672
M4	0.27	0.85	0.794
M5	0.30	0.97	0.900
M6	0.35	1.11	0.981
M19	0.470	1.76	-
M22	0.635	1.984	-

3.11.2. Masif Ferro-Manyetik Malzeme

Etkin manyetik akı değerinin sabit olması durumunda manyetik gövde masif manyetik malzemeden yapılır. Malzeme seçiminde yine B-H eğrilerinden yararlanılır. Masif manyetik malzemede, yeterli derecede mekanik dayanım ve yüksek manyetik geçirgenlik dikkat edilmesi gereken faktördür. Büyük mekanik zorlamalara maruz kalmayan hareketsiz manyetik gövdelerde, az karbonlu çelik döküm alaşımları kullanılır. Döner kısımlarda, manyetik geçirgenliğin azalmasına rağmen, yüksek karbonlu çelik döküm alaşımları kullanılır.

Transformatörlerin soğuk haddelenmiş çelik saç levhaları için uygulanabilir en büyük akı yoğunlukları Tesla (Wb/m^2) olarak 1.3-1.6 T' dir. % 20 gerilim artışlarına kadar 2.0 T dir. Diğer elektrik makinalarının değişik kısımlarında bu akı değeri değişmektedir (Ateş ve Peşint, 1990).

3.12. Ferro-Manyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları

Manyetik alan şiddeti H, akımın manyetik alanı meydana getirmek için gösterdiği çabanın ölçüsüdür. Manyetik alan şiddeti H ve bir malzemede üretilen manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki,

$$B = \mu H \quad (3.19)$$

denklemi ile verilir. Burada; μ malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m), B manyetik akı yoğunluğunu (Wb/m^2) göstermektedir.

Manyetik geçirgenlik malzeme içerisinden manyetik alanın geçişini kolaylaştırır ve birimi Henry/metre (H/m), malzemedeki akı yoğunluğunun birimi ise weber/metrekaaredir (wb/m^2).

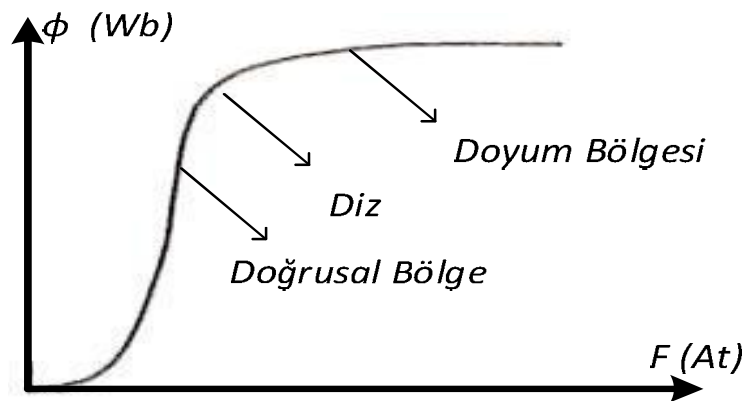
Boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir ve değeri sabittir. $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m dir.

Herhangi bir malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliğinin oranlaması bağıl geçirgenlik μ_r verir.

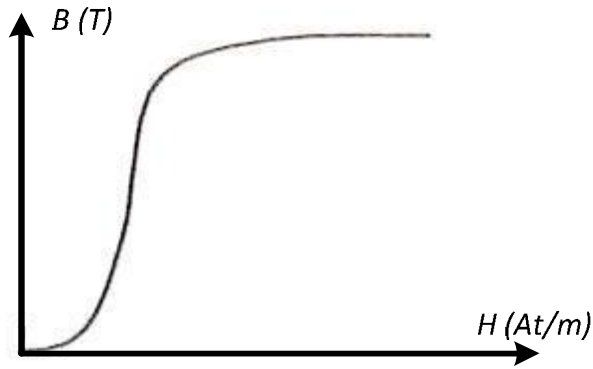
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.20)$$

Bağıl geçirgenlik malzemenin mıknatıslanabilme özelliğini karşılaştırmak için uygun bir göstergedir. Modern makinalarda kullanılan çelikler 200-6000 kat daha fazla bağıl geçirgenliğe sahiptir. Yani bir çelik parçası üzerinde meydana gelen manyetik akı aynı boyuttaki hava aralığında meydana gelecek manyetik akıdan 2000-6000 kat daha fazladır. Havanın geçirgenliği ile boşluğun geçirgenliği aynıdır. Transformatör nüvelerinde yer alan metaller, manyetik akının makina nüvesinde yoğunlaştırılması ve artırılması yönünde önemli rol oynarlar.

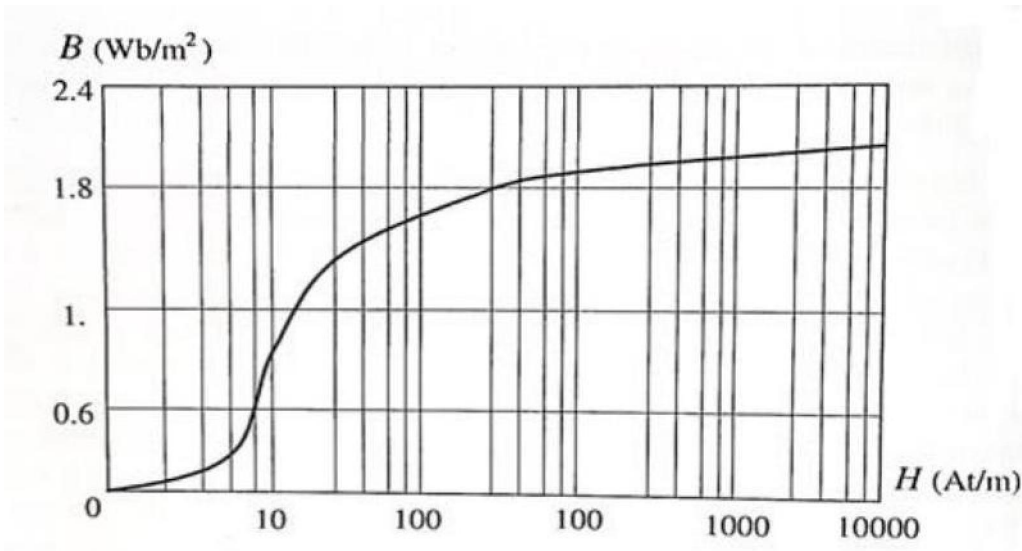
Bir ferro-manyetik malzemenin manyetik geçirgenlik davranışını öğrenmek için çekirdeğine bir DA uygulanır. Akım sıfır amperden başlayarak yavaş yavaş sargının maksimum akım değerine kadar yükseltilir. Nüvede üretilen akının değişimi kendisini üreten mmk değerine karşı çizilirse şekil 3.23 eğrisi elde edilir. Bu tip eğriye doyum eğrisi veya mıknatıslanma eğrisi denir. Başlangıçta akımdaki dolayısıyla mmk' daki az bir değişim akıda büyük bir değişikliğe neden olur. Belirli bir noktaya ulaştıktan sonra mmk' daki artışa karşılık akı aynı oranda artmaz. Eğrinin bu düzgün (sabit kalan) bölgesine doyum bölgesi adı verilir. Akının mmk ile orantılı olarak değiştiği bölgeye doğrusal (doymamış) bölge adı verilir. İki bölge arasındaki geçiş bölgesine ise diz denir (Bal, 2008).



Şekil 3.23. Ferro-manyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi (Bal, 2008)



Şekil 3.24. Mıknatıslanma eğrisinin akı yoğunluğu ve manyetik akı şiddeti ile ifadesi (Bal, 2008)

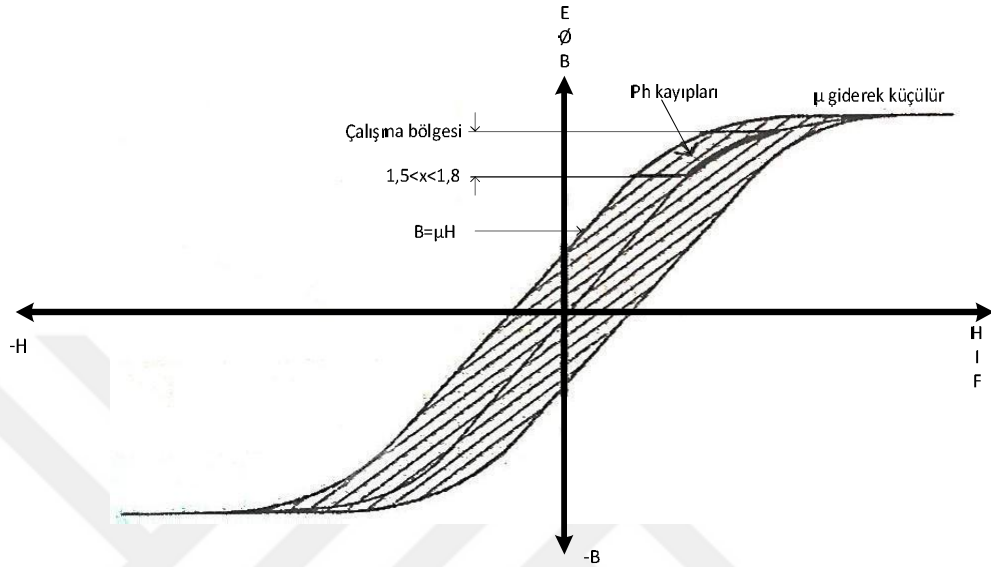


Şekil 3.25. 0.03 cm kalınlığındaki M5 elektrik çeliğinin DA mıknatıslanma eğrisi (Bal, 2008)

3.12.1. Histerezis Çevrimi

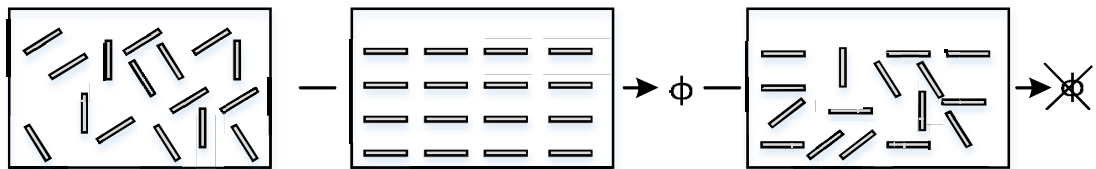
Histerezis eğrisinin elde edilmesinde bobin akımının pozitif yönde, doymaya kadar sürekli artırılıp, negatif yönden sürekli azaltılarak eğrinin tamamlanmasını sağlamaktır. Bu işlemde akım sanki alternatif akım gibi yön değiştirmiştir. Bu nedenle kayıp gücün meydana gelmesi için alternatif akımın varlığı mecburidir. Histerezis eğrisindeki bu iki eğrinin farklı yollardan x ve y eksenlerini kesmesi ile ortaya çıkan fark alan, demire verilen ve demirden alınan enerji farkını, yani kayıp enerjiyi ortaya koyar. Alternatif akımda frekans (bir saniyedeki periyot sayısı), içi taralı alanı bu süre içinde sürekli taradığı için histerezis kaybı frekansla doğru orantılı olarak artar. Histerezis kayıplarının küçük olması için, histerezis eğrisinin kapladığı alanın ve uygulanan frekansın küçük olması gerekir. Şekil 3.26' da görüldüğü gibi histerezis eğrisinde çalışma bölgesi olarak

gösterilen kısım yani dirsek bölgesi malzemenin doymaya başladığını gösterir. Bobine verilen doğru akımın tek yönde artırılarak malzemenin akı olarak doyması esastır. Doymadan sonra akım azaltılırsa B indüksiyonunun aynı eğri üzerinde geri dönmediği gözlemlenir. Bu da demire verilen gücün geri kazanılmadığını gösterir.



Şekil 3.26. Histerezis çevrimi (Mergen ve Zorlu, 2005)

Mıknatıslanmadan önce düzensiz olarak bulunan malzeme molekülleri akımının artması ile enerji kazanarak manyetik alan doğrultusunda dizilirler. Bu durum şekil 3.27’ de gösterilmiştir. Bu alanın zayıflamasıyla moleküllerin çoğunluğu eski yapıya dönerler. Küçük bir kısmında ise mıknatıslanma enerjisi kaldırıldığı halde bu enerjinin yok olmadığı görülür. Dolayısıyla B manyetik endüksiyonu, akım sıfır olduğu halde sıfıra gitmeyerek belli bir değerde kalır. Çünkü düzenli dizilmiş moleküllerin bazıları eski haline dönmezler. Buna “kalıcı mıknatıslık” adı verilir ve malzemede kalıcı mıknatıslığın var olduğunu gösterir (Mergen ve Zorlu, 2005).



Şekil 3.27. Mıknatıslanmada moleküllerin durumu (Mergen ve Zorlu, 2005)

3.13. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, gerilme analizi, ısı transferi, elektromanyetik ve akışkanların akışını kapsayan çoğu mühendislik problemlerin çözümünde kullanılabilen

sayısal bir yöntemdir. Mühendislik problemleri genel olarak fiziksel durumların matematiksel modelidir. Bu matematiksel modeller bir takım ilgili sınır ve başlangıç şartlarını içeren diferansiyel denklemlerdir. Bu diferansiyel denklemler, tabiatın temel kanun ve prensiplerinin bir sistem veya kontrol hacmine uygulanması ile elde edilmektedir. Bu temel denklemler kütle, kuvvet ve enerji dengesini temsil etmektedir. Bu denklemlerin tam çözümünün elde edilmesi mümkünse, bu çözüm verilen bir takım şartlar altında bir sistemin ayrıntılı davranışını tanımlamaktadır (Moaveni, 2015).

3.13.1. Sayısal Yöntemler

Tam çözümlerin elde edilemediği birçok mühendislik problemi bulunmaktadır. Çözümün tam elde edilememesi, temel denklemin karmaşık yapısından veya sınır ve başlangıç şartlarındaki zorluklardan kaynaklanabilmektedir. Bu tür problemlere çözüm üretmek için sayısal yaklaşımlara yöneliriz. Bir sistem içerisindeki herhangi bir noktanın gerçek davranışını temsil eden analitik çözümlere karşılık, sayısal çözümler sadece düğüm noktaları (node) adı verilen belirli noktalarda tam çözümleri yaklaşık olarak temsil etmektedir. Herhangi bir sayısal yöntemin ilk adımı bölüntülemedir (ağ veya mesh yapma). Analiz edilecek olan ortam bu işlem ile belirli bir sayıdaki küçük alt bölgelere (elemanlar) ve düğüm noktalarına bölünmektedir. Yaygın olarak kullanılan sayısal yöntemler sonlu farklar yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemidir.

Sonlu farklar yönteminde, her bir düğüm noktası için değerlendirilen diferansiyel denklemlerdeki türev terimleri fark denklemleri ile temsil edilmektedir. Böylece eş zamanlı olarak çözülmesi gereken bir doğrusal denklem takımı elde edilmektedir. Sonlu farklar yöntemi, basit problemlere uygulanması kolay olmasına rağmen, karmaşık geometriye veya sınır şartlarına sahip problemlere uygulanması zordur.

Diğer taraftan, cebirsel denklemleri oluşturmak için sonlu elemanlar yönteminde fark denklemleri yerine, integral formülasyonları kullanılmaktadır. Ayrıca her bir eleman için yaklaşık çözümü sürekli bir fonksiyonun temsil ettiği kabul edilmektedir. Daha sonra, elemanlar arasındaki sınırlarda süreklilik sağlanarak elemanlardaki bireysel çözümler birleştirilerek genel çözüm elde edilmektedir (Moaveni, 2015).

Sonlu elemanlar yöntemi, bütün uygulamalarında bir büyüklüğün alanının hesaplanması istenmektedir. Sonlu elemanlar metodu başlangıçta gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme

alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akışı; akışkan problemlerinde akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Sonlu elemanlar yönteminde sistem davranışı daha önce belirlenmiş birçok elemana bölünür. Elemanlar nod adı verilen noktalarla tekrar birleştirilerek cebri bir denklem takımı elde edilir. Bu denklemler gerilme analizinde nodlardaki denge denklemleridir. Probleme bağlı olarak yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımlarının çözümü ancak bilgisayarla mümkün olmaktadır.

3.13.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihçesi

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak yapı analizinde Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metotları olmuştur. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel is prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğerleri (1956) bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telâffuz edilmiştir. 1960' lı yıllarda yapı alanı dışındaki problemler SEY ile çözümü başlamıştır. Örneğin Poisson denklemini Zienkiewicz ve Cheung (1965) SEY ile çözmüştür. Metodun potansiyel akışa uygulanması 1970' te Doctors tarafından yapılmıştır. Isı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan, elektrik makinalarının performans analizi gibi diğer birçok alana SEY geliştirilerek uygulanmaktadır (Kürüm ve Cebeci, 1995).

1970'li yıllardan itibaren sonlu elemanlar paket programları ortaya çıkmıştır. Paket programların mikrobilgisayarlarda kullanılması 1980' li yılların sonlarında başlamıştır. 1990 lı yılların ortaları itibariyle SEY ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40.000 makale ve kitap yayınlanmıştır. Günümüzde de halen sonlu elemanların değişik noktalarında teknolojiye paralel olarak çalışmalar yapılmaktadır (Omaç, 1994).

Bilgisayar teknolojisindeki gelişim ile beraber SEY' in hem uygulama alanında hem de kullanım oranında büyük artış meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin gelişmesiyle seri imalat öncesi prototip yapmak için yapılan harcamalar azalmıştır (Polat ve Kürüm, 2011).

3.13.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Alanları

Sonlu elemanlar metodunun uygulama alanları çok geniştir. Elektronik çipler, elektrikli cihazlar, valfler, borular, basınçlı kaplar, otomotiv motorları ve uçaklar gibi

3. MATERYAL VE METOT

endüstriyel parçaların gerilme ve termal analizleri; barajların, jeneratörlerin, şehirlerin ve yüksek binaların sismik analizi; arabaların, trenlerin ve uçakların termal analizleri; soğutucu havuzların, kirlenici maddelerin ve atıkların ve havalandırma sistemlerindeki havanın akış analizi; antenlerin, transistörlerin ve uçak haberleşme işaretlerinin elektromanyetik analizi; plastik cerrahi, çene rekonstrüksiyonu, skolyoz düzeltimi ve daha birçoğu gibi cerrahi girişimlere dair analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır (Deliktaş ve ark., 2017).

Birçok uygulama alanının yanında SEY elektrik makinaları alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Elektrik makinelerinin tasarımında SEY yazılım programlarının avantajları kısaca şu şekilde özetlenebilir.

- Uygulamada görülmeyen ancak teorik olarak bilinen ayrıntıların görülebilir duruma getirilebilmesi.
- Prototipi tasarlamadan önce pratikte modelleme, pazarlama süresinin ve maliyetlerinin azaltılabilmesi.
- Tasarlanan cihazların veriminin ve performansının geliştirilebilmesine yardımcı olması.
- Manyetik alan gibi anlaşılması güç olan konuları görsel hale getirerek eğitimi kolaylaştırması (Najafi, 2016).
- Herhangi bir sonlu elemanlar analizinde bulunan temel adımlar aşağıda verilmektedir.
- Çözümü yapılacak bölgenin oluşturulması ve sonlu elemanlar ile bölüntülenmesi; problemin düğüm noktaları ve elemanlar olarak alt bölümlere ayrılması.
- Bir elemanın fiziksel davranışını temsil edecek olan şekil fonksiyonunun seçilmesi; bir elemanın yaklaşık davranışını (çözümü) temsil edecek olan sürekli bir fonksiyonun ön kabul yapılması.
- Bir eleman için denklemlerin geliştirilmesi.
- Tüm problemi temsil etmek için elemanların birleştirilmesi. Global rijitlik matrisinin oluşturulması.
- Sınır şartları, başlangıç şartları ve yüklerin uygulanması.

- Düğüm noktalarındaki yer değişimleri veya bir ısı transferi probleminde sıcaklık cinsinden çözüm değerlerini elde etmek için lineer veya lineer olmayan bir denklem takımının eş zamanlı olarak çözülmesi.
- Çözümünden sonra diğer önemli bilgilerin elde edilmesi (Ayhan, 2015).

3.13.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Teorisi

Laplace ve Poission denklem tiplerindeki kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir. Çözüm bölgesinde eleman sayısı gelişmiş algoritmalar kullanarak artırılabilir (Kürüm ve Cebeci, 1995).

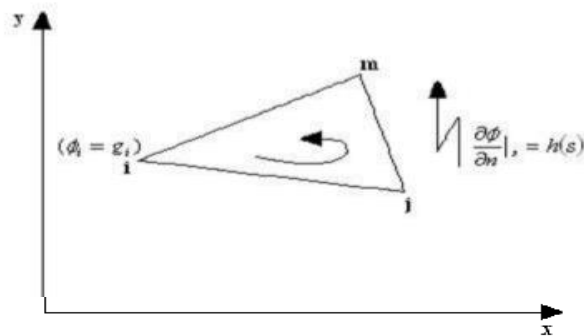
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (3.22)$$

Deneme fonksiyonu aramada en yaygın olarak Rayleigh-ritz yöntemi kullanılır.

3.13.4.1. Rayleigh-Ritz Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminin temeli sınır koşullarının karmaşıklığı nedeniyle potansiyel fonksiyonu bulmanın mümkün olmadığı durumlarda, küçük elemanlar içinde çözümün aranmasına dayanır. Elemanların geometrik yapısı aynı kalmak şartıyla bütün çözüm bölgesi aynı geometrik elemanlara bölünür. Örneğin üçgen elemanlar kullanılabilir.



Şekil 3.28. Üçgen eleman

Çözüm için başlangıçta bir deneme fonksiyonu seçilir. Seçilen bu fonksiyon alan değişimini temsil eder (Silvester ve ark., 1973).

Tek bir üçgen eleman için deneme fonksiyonu birinci dereceden bir polinom ile ifade edilir.

$$\phi(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (3.23)$$

Bu deneme fonksiyonunda ϕ , x ve y ' ye göre doğrusal olarak değişmektedir. Şayet üçgenin köşelerindeki potansiyeller ϕ_i , ϕ_j , ϕ_m ise, deneme fonksiyonu köşe noktalarında bu değerleri sağlamalıdır. Bu sebeple aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\begin{aligned} \phi_i &= a_0 + a_1x_i + a_2y_i \\ \phi_j &= a_0 + a_1x_j + a_2y_j \\ \phi_m &= a_0 + a_1x_m + a_2y_m \end{aligned} \quad (3.24)$$

Ele alınan deneme fonksiyonunu üçgenlerin köşe (ϕ_i, ϕ_j, ϕ_m) değerleri ile denklem (3.24)' te verildiği biçimde ifade etmek için N_i , N_j , N_m şekil veya enterpolasyon fonksiyonları kullanılır (Chari ve ark., 1973).

$$\phi(x,y) = N_i(x,y).\phi_i + N_j(x,y).\phi_j + N_m(x,y).\phi_m \quad (3.25)$$

Her bir üçgen eleman içinde, potansiyel fonksiyonun Laplace diferansiyel denklemini sağladığı varsayıldığında, homojen sınır koşullarında Laplace denklemine karşılık gelen fonksiyon

$$F = \iint \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Potansiyel fonksiyonları yerine denklem 3.24' te elde edilen deneme fonksiyonu kullanılırsa ve kısaltmalarıyla,

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 2 (S_{ii} \phi_i + S_{ij} \phi_j + S_{im} \phi_m)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_j} = 2 (S_{ji} \phi_i + S_{jj} \phi_j + S_{jm} \phi_m)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 2 (S_{mi} \phi_i + S_{mj} \phi_j + S_{mm} \phi_m)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} + \frac{\partial F}{\partial \phi_i} + \frac{\partial F}{\partial \phi_j} + \frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 0$$

$$2 \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{im} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

elde edilir. Şekilde verildiği haliyle $\phi_i = g_i$ sınır koşulu matrisin ilk satırına yerleştirilirse,

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

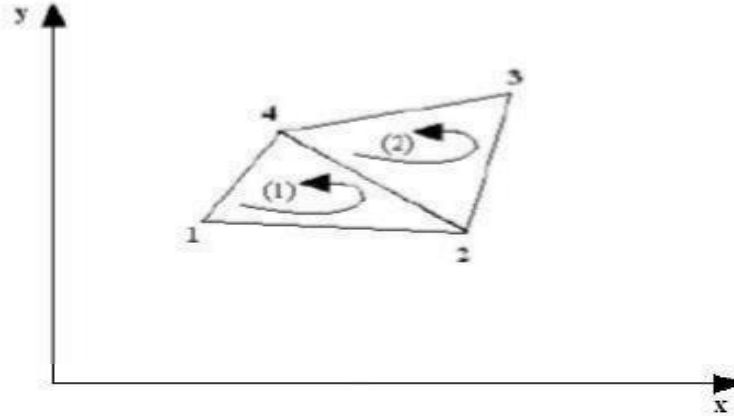
ve bu matris yeniden düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_i S_{ji} \\ -g_i S_{mi} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

elde edilir (Demirchian ve ark., 1976).

3.13.4.2. Elemanların Birleştirilmesi

Elemanlar arasındaki sınırlarda potansiyel işlevin bütün bölge içinde çözümü sürekli olması gerekir. Üçgen elemanın kenarlarında ve içinde potansiyel doğrusal olarak değişir.



Şekil 3.29. İki üçgenin birleşimi

Bazı düğümlerde problemin tabiatı gereği akım olabilir. Bu durumda denklem sistemi şu şekilde düzenlenir.

$$\begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{11}^{(2)} & S_{12}^{(2)} & S_{13}^{(1)} + S_{13}^{(2)} & S_{14}^{(2)} \\ S_{21}^{(1)} & S_{22}^{(1)} & S_{23}^{(1)} & 0 \\ S_{31}^{(1)} + S_{31}^{(2)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} + S_{33}^{(2)} & S_{34}^{(2)} \\ S_{41}^{(2)} & 0 & S_{43}^{(2)} & S_{44}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \emptyset_1 \\ \emptyset_2 \\ \emptyset_3 \\ \emptyset_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ J_2/3 \\ 0 \\ J_4/3 \end{bmatrix} \Delta \quad (3.30)$$

Denklemin sağ tarafına düğümlerdeki akım yoğunlukları yazılır. Denklem sistemi çözüldüğünde, her düğüm için potansiyel değerler hesaplanmış olur.

3.13.4.3. Sınır Koşulları

Sınır koşulları üç gruba ayrılır.

- Dirichlet Sınır Koşulu

Bütün sınır boyunca veya belirli bir kısmında potansiyel fonksiyonu $\emptyset_s$ belirli bir değerdedir. Şayet sınır koşulu sıfır ise buna homojen Dirichlet sınır koşulu denir.

- Neumann Sınır Koşulu

Akı yoğunluğunun sınıra dik gelmesi durumunda meydana gelen sınır koşuludur.

- Karışık Sınır Koşulu

Sınırdaki bulunan iletken malzeme sınıra normal doğrultuda gelen akıyı etkiler. Bu sınır koşulu daha önce yazılan sınır koşullarını da içerir.

3.13.5. Poisson Denklemlerinin Elde Edilmesi

Maxwell denklemleri manyetik alan problemlerinde kullanılır.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3.31)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3.32)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.33)$$

$$v = \frac{1}{\mu} \quad (3.34)$$

B : Manyetik indüksiyon (T),

H : Manyetik Alan Şiddeti (At/m),

μ : Manyetik permabilite,

v : Manyetik rezistivite

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3.35)$$

A vektör potansiyeli olup, birimi wb/m' dir. Denklem (3.31)' de H yerine denklem (3.32) eşitliği konulduğunda denklem (3.33) elde edilir. Bu denklemde B yerine eşitlik (3.35) konulduğunda denklem (3.37) elde edilir. Bu eşitlik denklem (3.38) düzenlendiğinde Poisson ifadesi elde edilir (Slade, 2006; Dlala ve Arkkio, 2010).

$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J} \quad (3.36)$$

$$\nabla \times \frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu} = \vec{J} \quad (3.37)$$

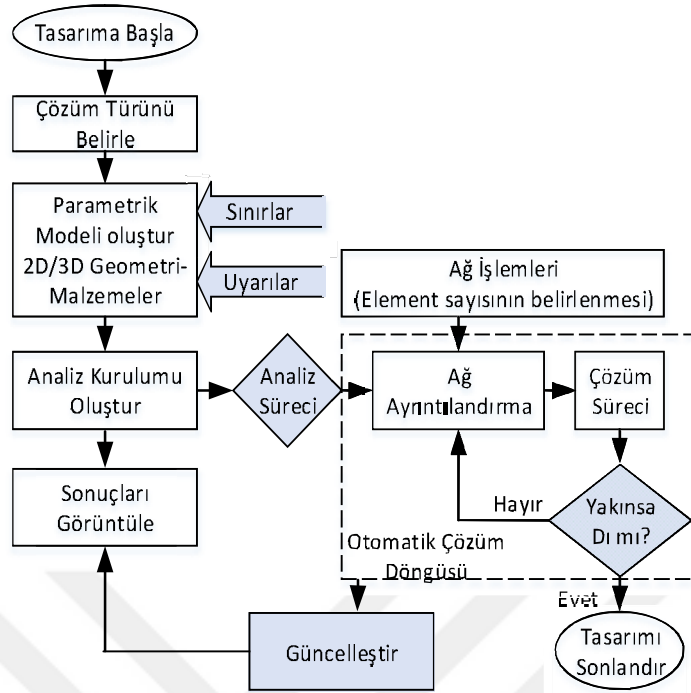
$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} \right) = \vec{J} \quad (3.38)$$

Sonlu elemanlar yönteminde 2 boyutlu analiz yapılırken J akım yoğunluğu z ekseninde olduğundan manyetik potansiyel vektörü $A(x, y) = A_z(x, y)$ olur.

3.14. Ansys Maxwell Paket Programı

Ansys Maxwell fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan genel amaçlı sonlu elemanlar paket programıdır. Ansys Maxwell paket programı mühendislikte lineer veya lineer olmayan statik/dinamik yapısal analizler, akışkanlar mekaniği, mukavemet, titreşim, ısı transferi, elektromanyetik alan gibi fiziksel problemlerin çözümünde kullanılır. Problemlerin çözümünde sonlu elemanlar metoduyla işlem yapar. Fabrika ortamında gerçek sistemi tasarlamadan önce bilgisayar ortamında sistemin 3B veya 2B modeli oluşturularak analiz sonucunda sistemin davranışları hakkında veriler elde edilebilir. Programda tasarlanan 3B veya 2B sistemlerde kolayca değişiklikler yaparak sistemin davranışları izlenebilir. Ürünlerin prototipleri üretilmeden önce bilgisayar ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ürünlerin zayıf noktalarının tespitini yaparak önlem alınmasına imkan sağlar.

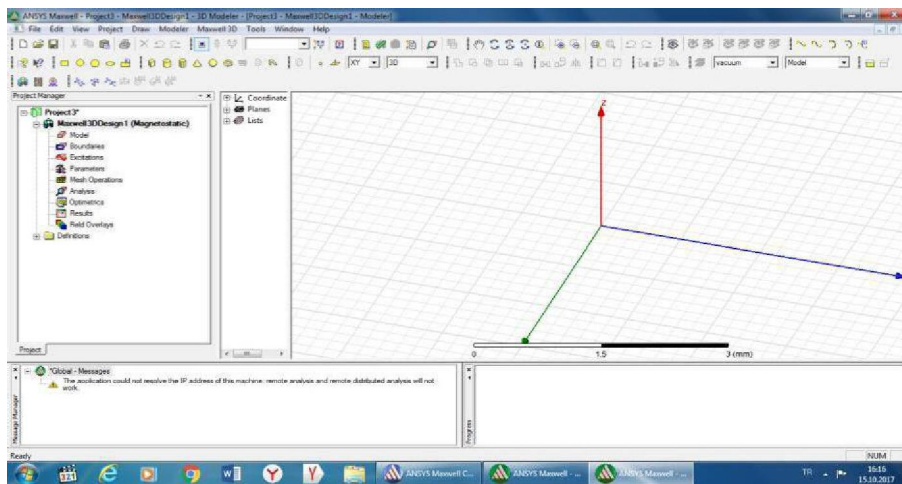
Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılacak analizin akış diyagramı şekil 3.30' da verilmiştir.



Şekil 3.30. Analiz akış diyagramı (Najafi, 2016)

3.14.1. Ansys Maxwell Paket Programında Tasarım ve Analiz

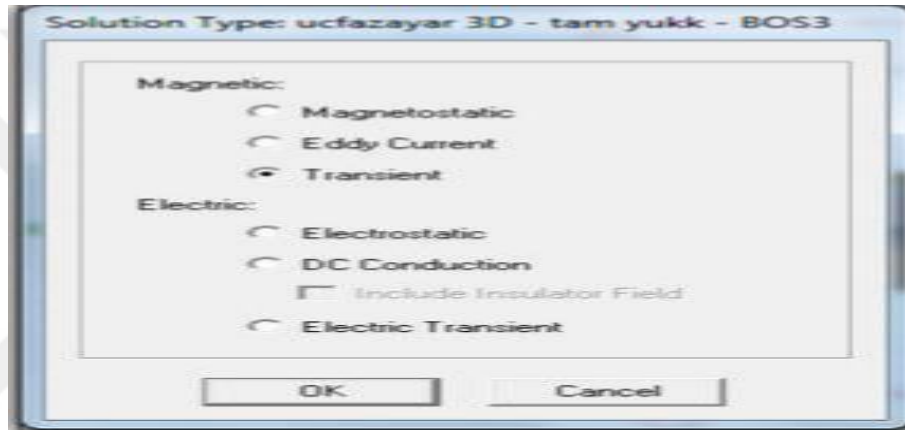
Ansys Maxwell paket programında üç boyutlu tasarım için ekran görüntüsü Şekil 3.31’de, analiz basamakları Şekil 3.32’de ve çözücü tipinin seçilmesi Şekil 3.33’ te gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Üç boyutlu tasarım için ekran görüntüsü

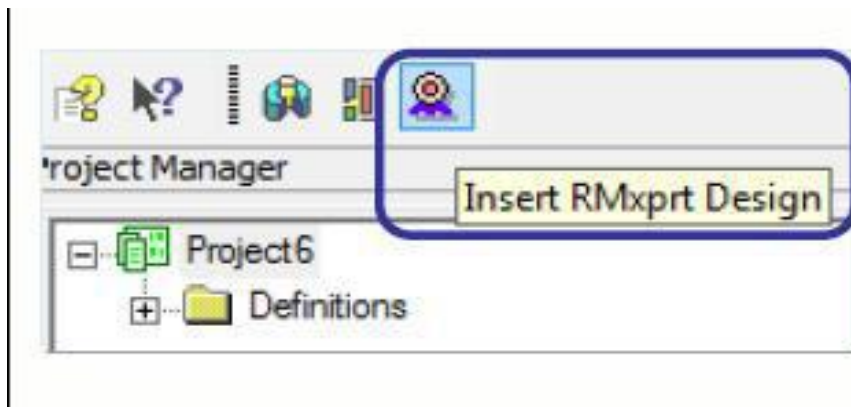


Şekil 3.32. Üç boyutlu tasarım için analiz basamakları



Şekil 3.33. Çözücü tipinin seçildiği menü

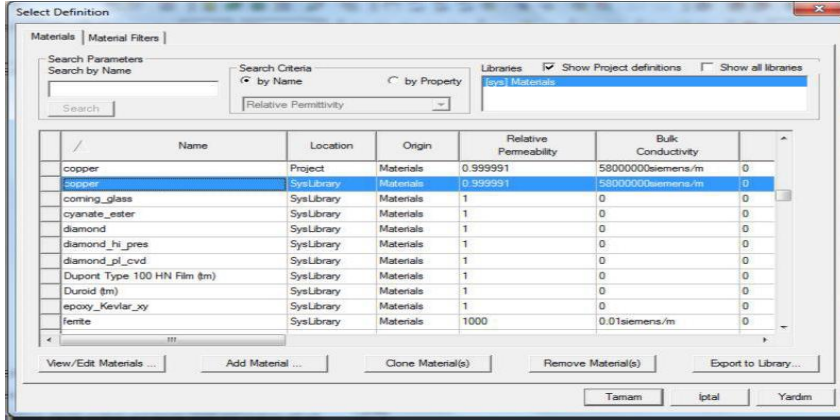
RMxpert menüsünde hazır makine ve makine parçaları bulunmaktadır. Geometrik büyüklükler girilerek istenilen ölçülerde makine tasarımı yapılır.



Şekil 3.34. Makine ve makine parçalarının hazır bulunduğu menü

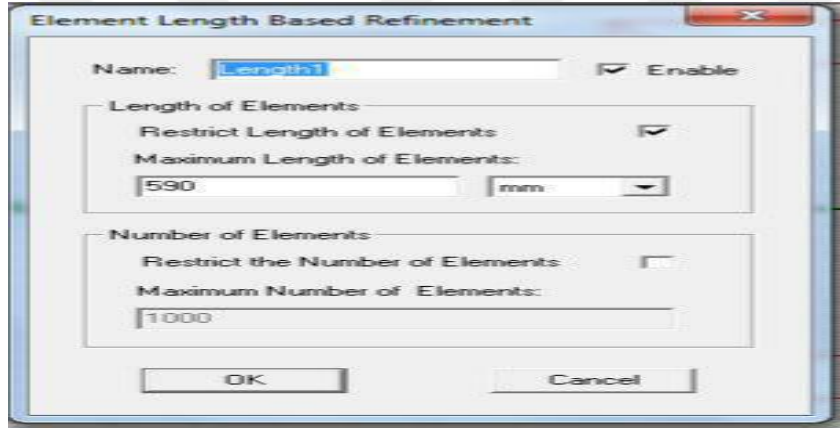
3. MATERYAL VE METOT

Malzeme tipinin seçildiği menü Şekil 3.35'te gösterilmiştir.



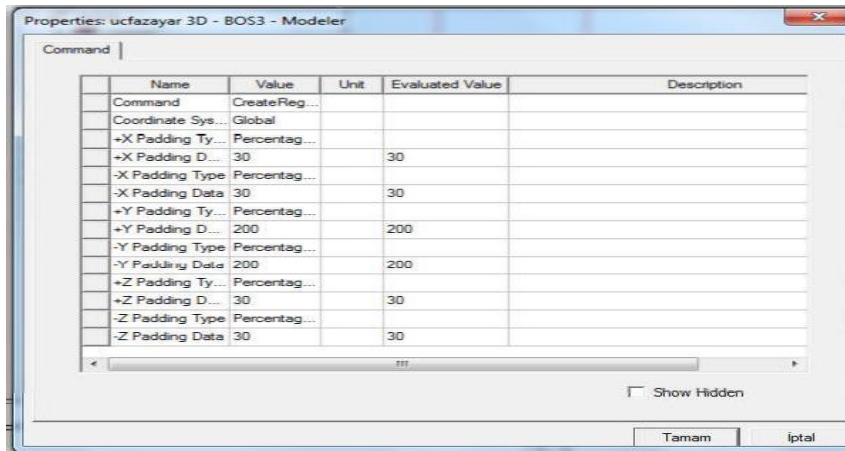
Şekil 3.35. Malzemesi tipinin seçildiği menü

Sonlu elemanlar ağının oluşturulduğu menü Şekil 3.36'da gösterilmiştir.



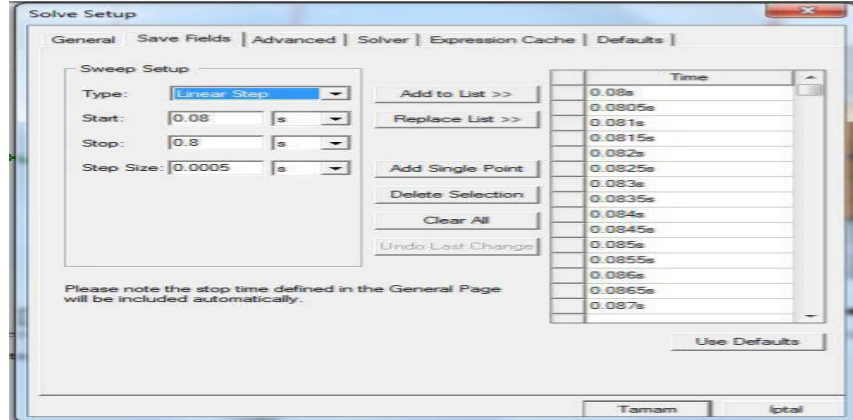
Şekil 3.36. Ağ (mesh) değerinin girildiği menü

Analiz bölgesinin oluşturulduğu menü Şekil 3.37'de gösterilmiştir.



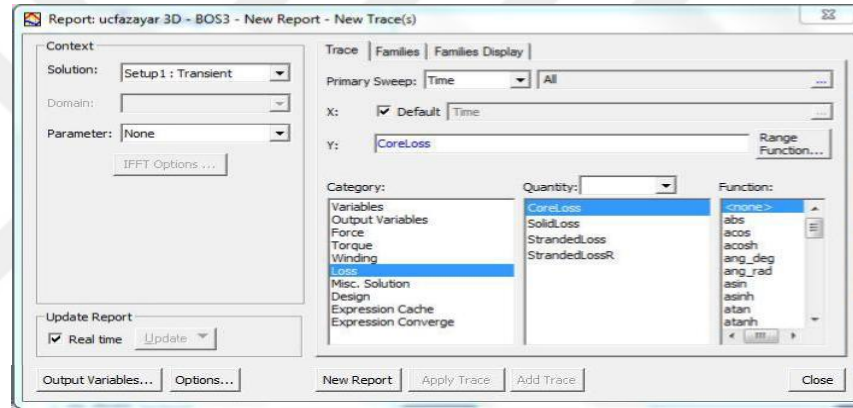
Şekil 3.37. Analiz sınırlarının girildiği menü

Analiz zaman ayarının yapıldığı menü şekil 3.38’de gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Analiz zaman ayarının yapıldığı menü

Analiz sonuçlarının alındığı menü şekil 3.39’da gösterilmiştir.



Şekil 3.39. Analiz sonuçlarının alındığı menü

Ansys Mazwell paket programında model tasarım adımları aşağıda verildiği gibidir.

- Üç boyutlu tasarım yapılacak ise üç boyutlu ekran menüsü açılır.
- Çözücü tipi menüsünden çözüm türüne göre çözücü tipi seçilir.
- Ansys Maxwell’de analiz edilecek model tasarlanabildiği gibi programda RMXprt menüsünde hazır model prototipi de seçilebilir. Ayrıca başka çizim programlarında elde edilen modeller Ansys maxwell’e aktarılabilir.
- Malzeme tipi menüsünden modelin kısımlarına malzeme tipi atanır.
- Boundaries ve Excitations alt menülerinde sırasıyla sınır ve uyartım bilgileri girilir.
- Model kısımlarını bölüntülemek için istenilen ağ (mesh) sayısı atanır.

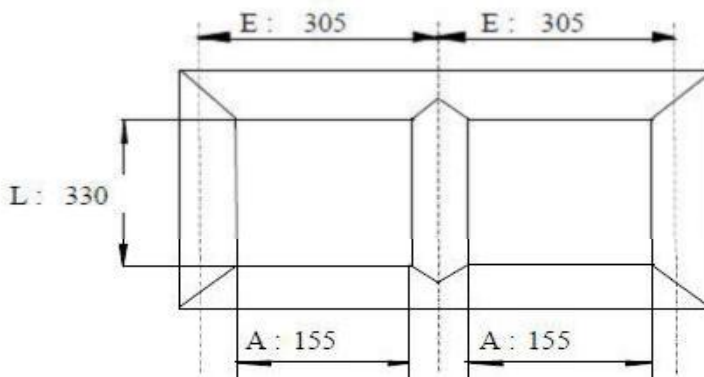
- Analiz bölgesi menüsünden analizin yapılacağı sınırlar belirlenir.
- Analiz zaman ayarı menüsünden analiz süresi belirlenir.
- Analiz başlatılır ve analiz sonuçları menüsünden analiz raporları alınır.

3.15. Analiz Edilen Kademeli Güç Transformatorünün Parametreleri

Analiz edilen güç transformatorü 250 kVA gücünde 11/0.416 kV gerilim değiştirme oranına sahiptir. Transformatorün birincil sargının sarım sayısı 1466, ikincil sargının sarım sayısı 32'dir. Transformatorün birincil sargısında iki adet kademe sargısı bulunur ve her bir kademe sargısının sarım sayısı 37'dir. Nüvenin toplam ağırlığı 371.31 kg, saç kalınlığı 0.3 mm, kütle yoğunluğu 7650 kg/m^3 , conductivity 1960000 S/m M5 malzemesi ve toplam paket kalınlığı 158.4 mm'dir. Nüve ölçüleri Şekil 3.40' ta verilmiştir. Nüve malzemesine ait manyetik alan (H), manyetik akı yoğunluğu (J), toplam kayıp güç (P_s) ve görünür güç (S_s) arasındaki ilişki şekil 3.41' de gösterilmiştir.

Transformator modeli Ansys Maxwell yazılım programında RMxprrt menüsünde bulunan hazır nüve ve sargılar seçilerek oluşturulmuştur. Alçak gerilim sargısı altta, yüksek gerilim sargısı üstte olacak şekilde programda nüve ve sargıların ölçüleri girilerek model oluşturulmuştur.

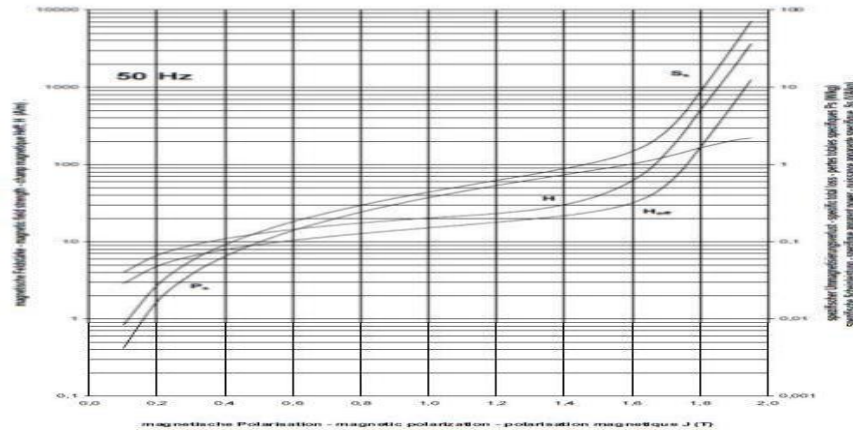
Analiz edilen transformatorün tasarım parametrelerine ait detaylı bilgiler çizelge 3.2.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Nüve ölçüleri

Çizelge 3.2. Analiz edilen transformatörün tasarım parametreleri

Parametreler	Değer
Güç (kVA)	250
Frekans (Hz)	50
Bağlantı türü	Dyn
Birincil gerilimi (V)	11000
İkincil gerilimi (V)	416
Birincil sargının faz akımı (A)	7.57
İkincil sargının faz akımı (A)	346.96
Birincil sargının akım yoğunluğu (A/mm ²)	2.78
İkincil sargının akım yoğunluğu (A/mm ²)	2.97
Akı (Wb)	1.76
Demir kaybı (W)	653 (Tolerans + %10)
Bakır kaybı ((W)	3277 (Tolerans + % 10)
Soğutma türü	ONAN
İkincil sarım sayısı	32
Birincil sarım sayısı	1466
Birincil sargısının bobin boyu (mm)	320
İkincil sargısının bobin boyu (mm)	320
Birincil iletkeninin başlangıç çapı (mm)	170
Birincil dış çapı (mm)	237
İkincil başlangıç çapı (mm)	237
İkincil dış çapı (mm)	297
Kademe gerilimi (V) (1392 sarım için)	10450
Kademe gerilimi (V) (1429 sarım için)	10725
Kademe gerilimi (V) (1466 sarım için)	11000



Şekil 3.41. Nüve malzemesinin manyetik davranışı

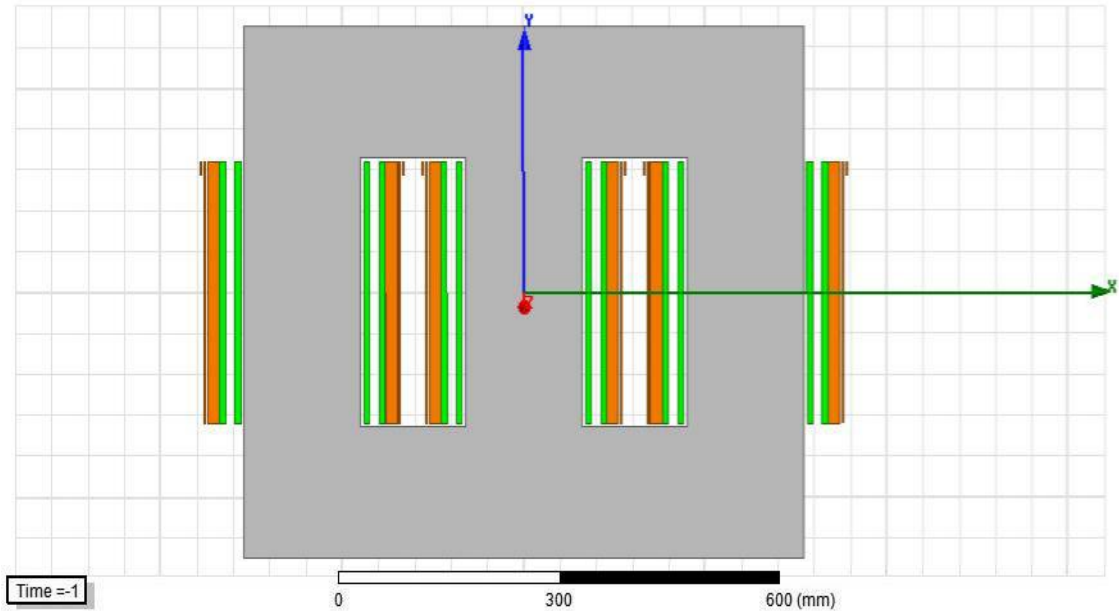


4. ARAŞTIRMA BULGULARI

250 kVA 11 / 0.416 kV kademeli güç transformatörünün 2B ve 3B olarak Ansys Maxwell paket programında benzetim modeli tasarlanarak 200 ms süresince analizler yapılmıştır. Transformatör analizi için simülasyon devresi oluşturulmuş ve devre dışarıdan transformatöre gönderilmiştir. Analiz sonucunda ikincil sargıda indüklenen gerilim, birincil ana sargıda indüklenen gerilim, kademe sargılarında indüklenen gerilim, birincil ve ikincil sargıların faz akımları, demir kaybı, bakır kaybı ve sargıları etkileyen kuvvetler grafiksel olarak elde edilmiştir. Nüvede anlık akı dağılımı incelenmiştir.

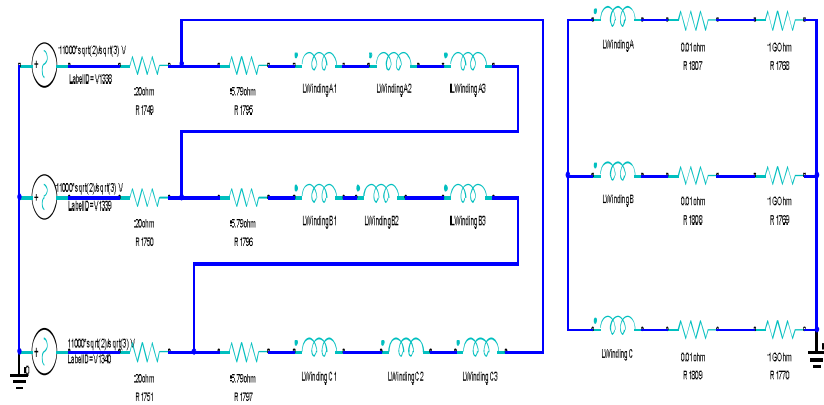
4.1. Kademeli Güç Transformatörünün 2B Boşta Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı

Benzetimi yapılan transformatörün 2 boyutlu görünümü Şekil 4.1’ de gösterilmiştir. Kademeli güç transformatörünün birincil tarafı üçgen bağlı ve ikincil tarafı yıldız bağlı olup boşa çalışmada elektrik devresi Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. 2 boyutlu boşa çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına ait birincil ve ikincil sargı gerilimleri, birinci kademe gerilimi, ikinci kademe gerilimi, birincil sargının faz akımı, ikincil sargının faz akımı, demir kaybı, birincil sargıyı etkileyen kuvvet ve ikincil sargıyı etkileyen kuvvet grafiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

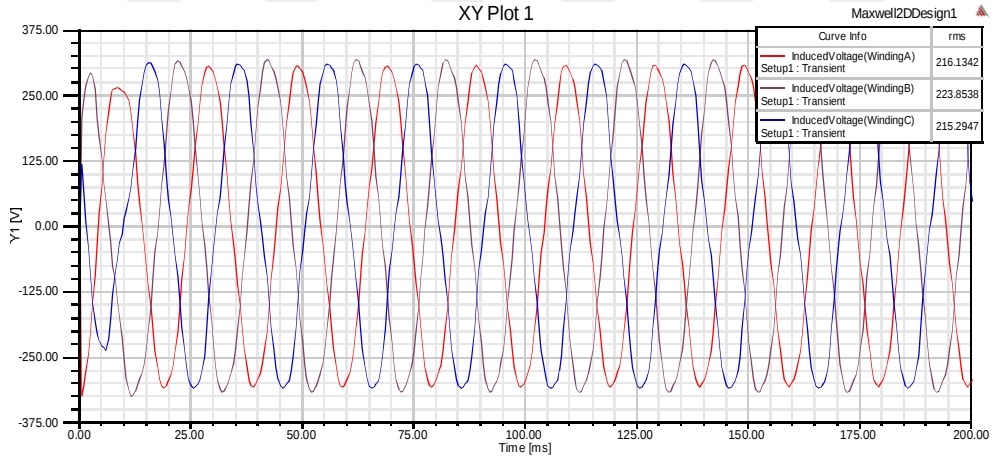


Şekil 4.1. Transformatörün iki boyutlu görünümü

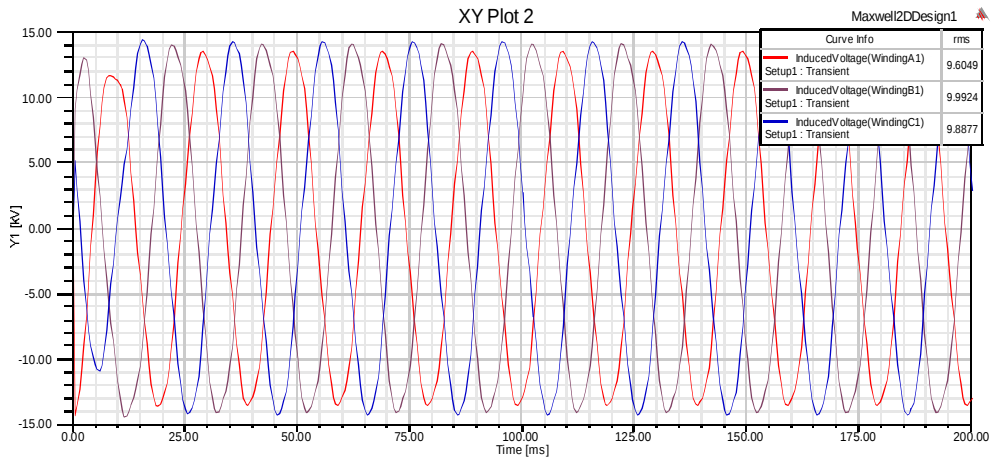
4. ARAŞTIRMA BULGULARI



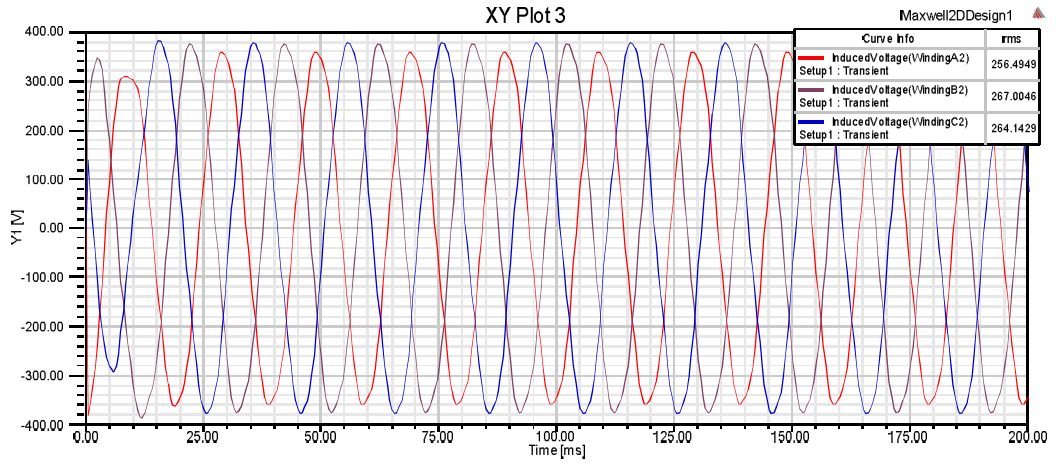
Şekil 4.2. 2B transformatörün boşa çalışmada elektrik devresi



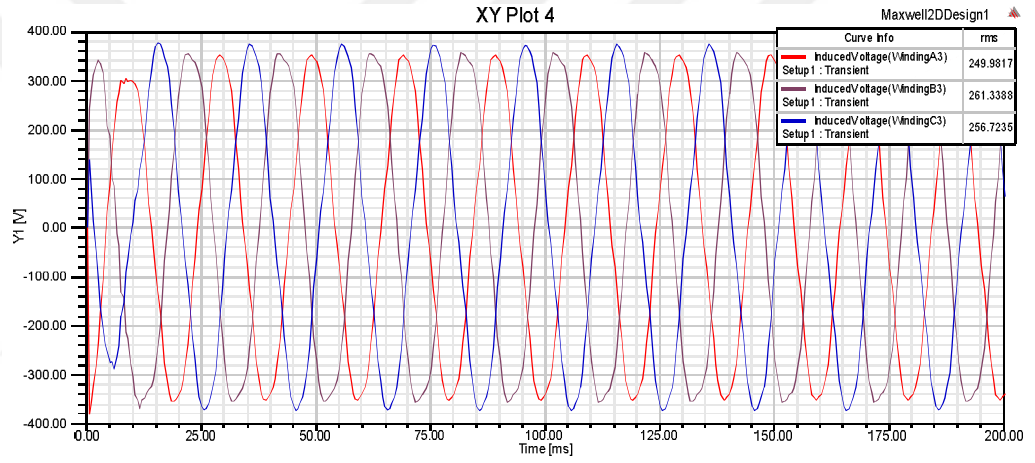
Şekil 4.3. İkincil sargıda indüklenen gerilim



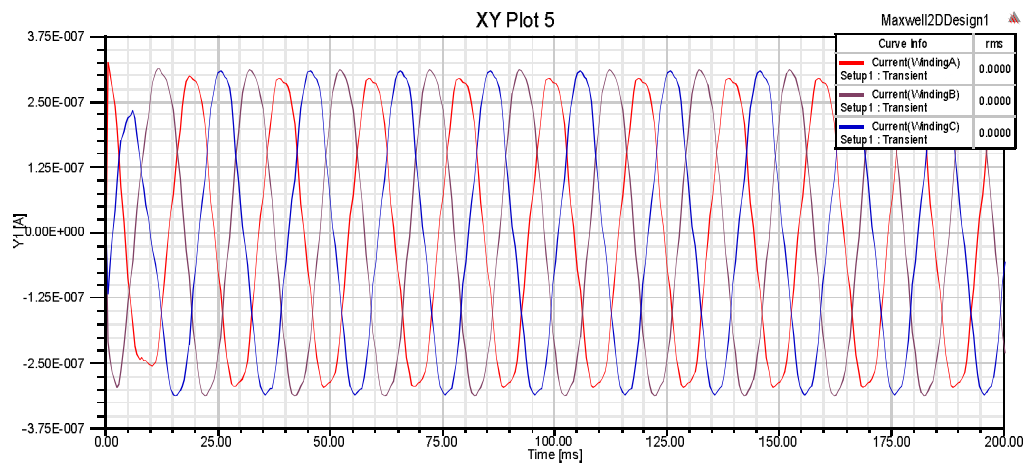
Şekil 4.4. Birincil ana sargıda indüklenen gerilim



Şekil 4.5. Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim

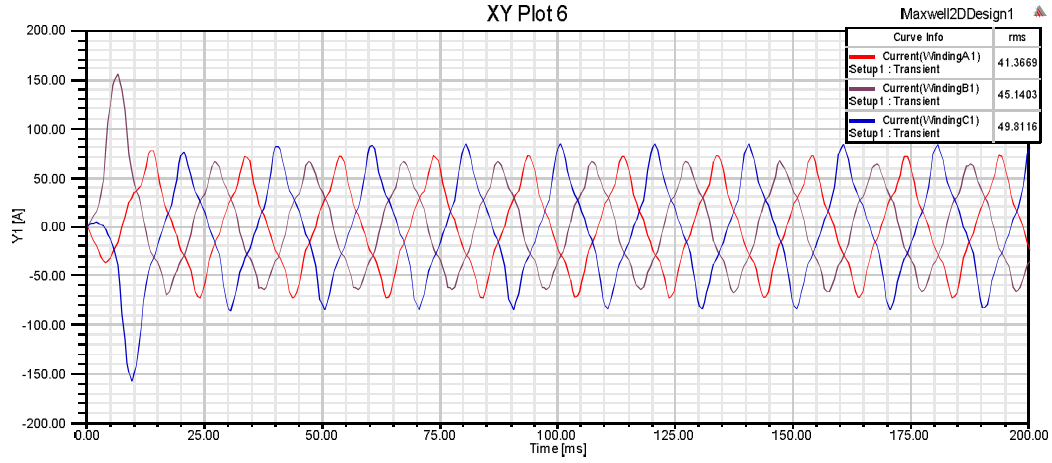


Şekil 4.6. Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim

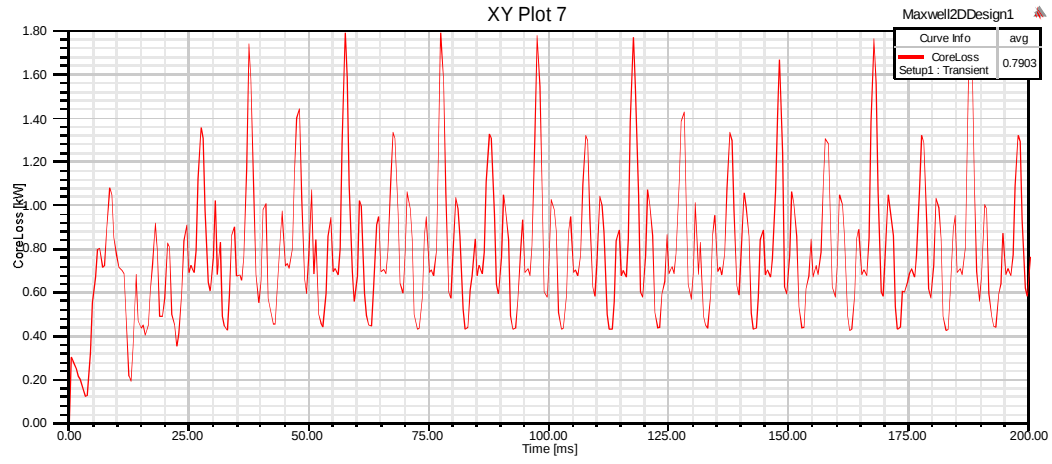


Şekil 4.7. İkinci faz akımı

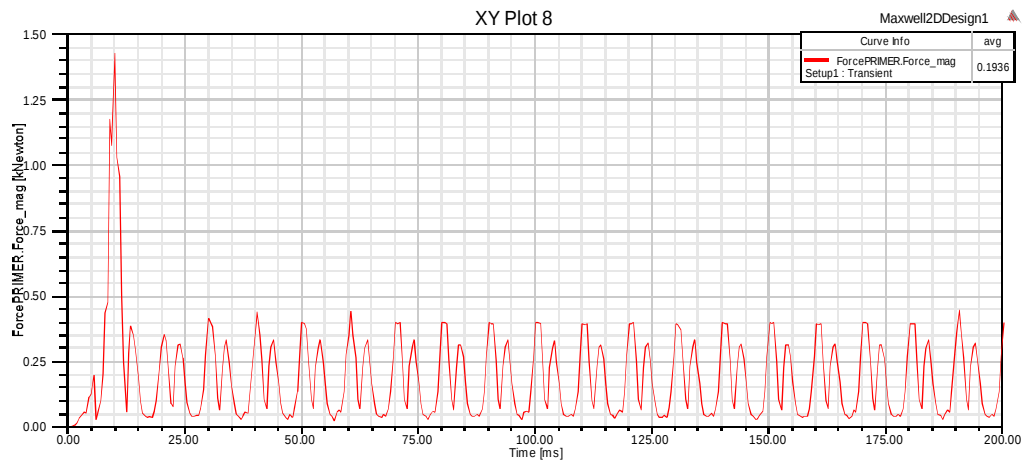
4. ARAŞTIRMA BULGULARI



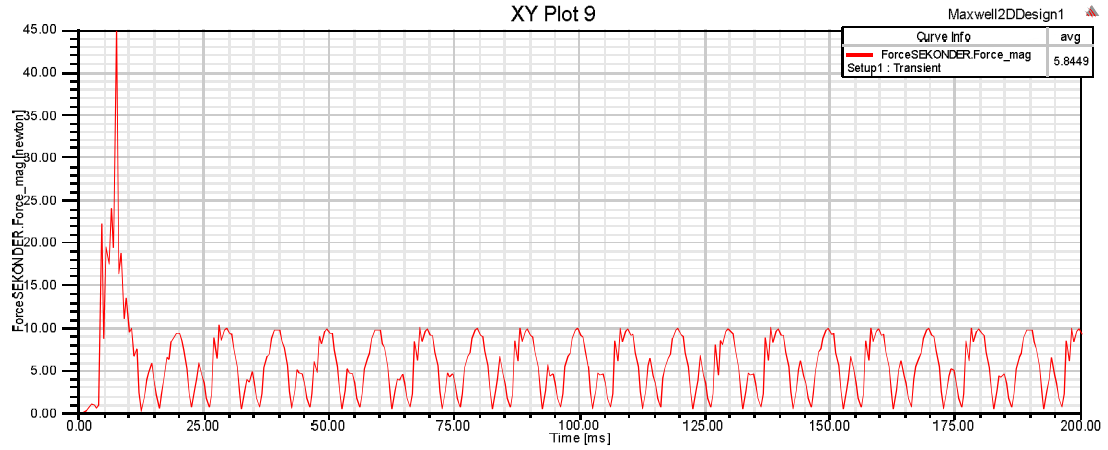
Şekil 4.8. Birinçil faz akımı



Şekil 4.9. Demir kaybı



Şekil 4.10. Birincil sargıyı etkileyen kuvvet



Şekil 4.11. İkincil sargıyı etkileyen kuvvet

2B boşa analiz sonuçları ve transformatörün etiket değerleri Çizelge 4.1' de gösterilmiştir.

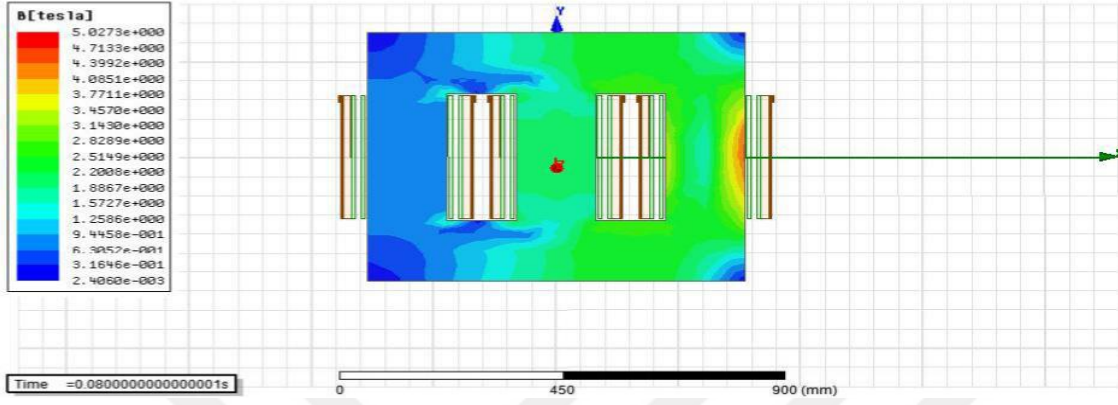
Çizelge 4.1. 2B boşa analiz sonuçları

Analiz Parametreleri	Analiz Değerleri	Etiket Değerleri
İkincil sargı gerilimi (V)	216.13	416.00
Birincil sargı gerilimi (V)	9604.90	10450.00
Birinci kademe gerilimi (V)	256.49	275.00
İkinci kademe gerilimi (V)	249.98	275.00
İkincil sargının faz akımı (A)	0	346.96
Birincil sargının faz akımı (A)	41.36	7.57
Demir kaybı (W)	790.30	653.00
Birincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	193.60	-
İkincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	5.84	-

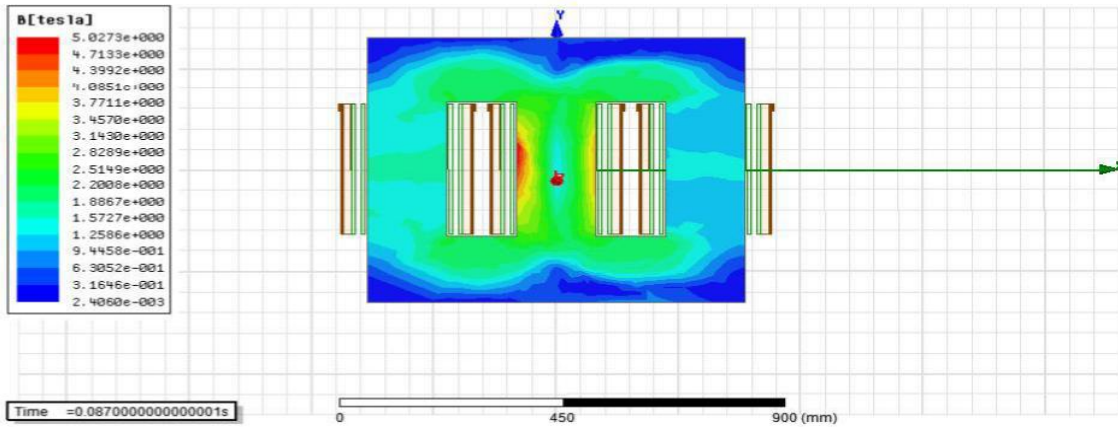
2B boşa analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında; analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim ve kademe gerilimlerinin düşük olduğu, birincil sargının faz akımı ve demir kaybının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Demir kaybı açısından hata oranı %21.12 ve maksimum tolerans kaybına göre hata oranı %10.02 olarak hesaplanmıştır. Birincil sargıyı etkileyen kuvvetin ikincil sargıyı etkileyen kuvvetten çok daha yüksek olduğu görülmektedir. 2B analizde tüm parametrelerin programda girilen model derinliğine bağlı olarak değişebildiği tespit edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

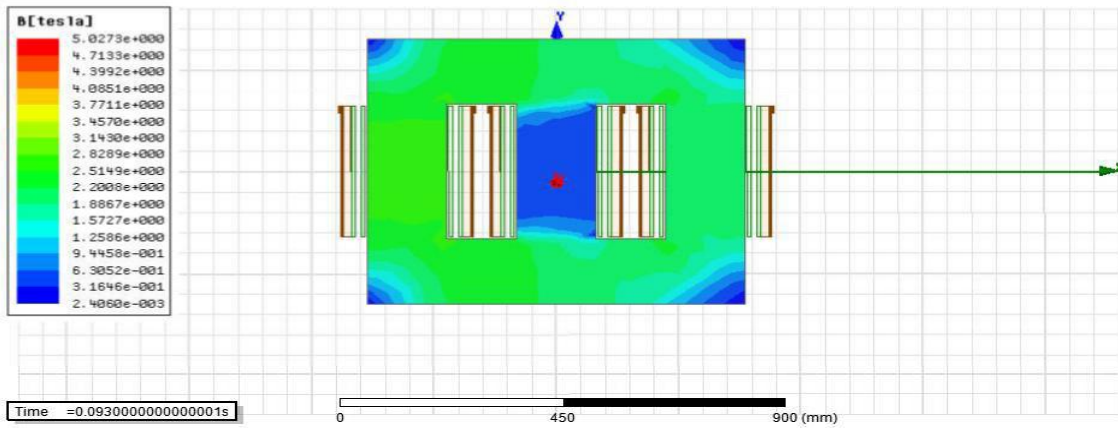
Nüve üzerinde 0.080, 0.087, 0.093, 0.096 ve 0.1 saniyede elde edilen akı dağılımları sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16' da gösterilmiştir.



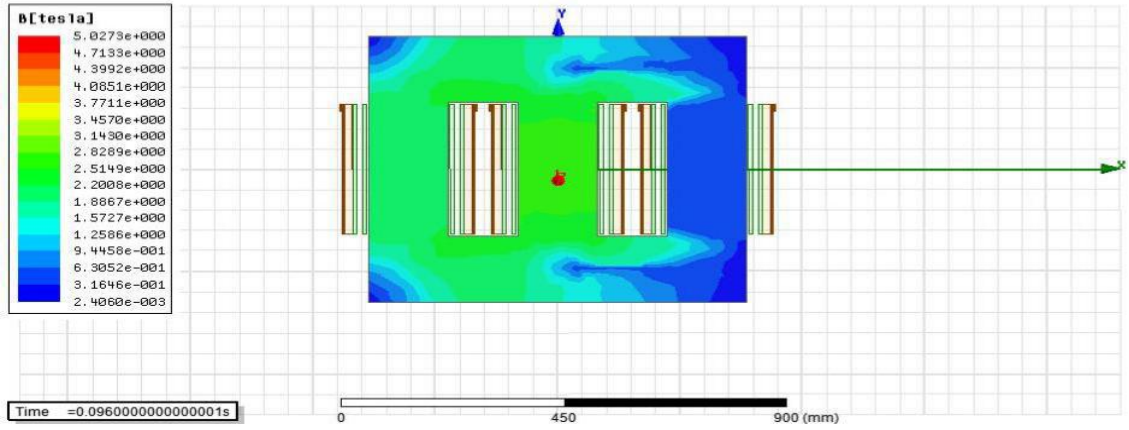
Şekil 4.12. Nüve de 0.080 saniyedeki akı dağılımı



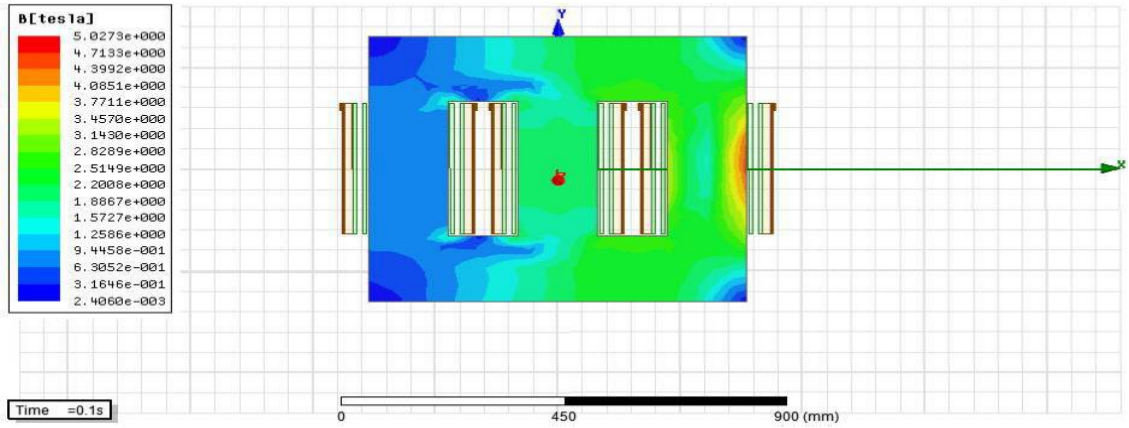
Şekil 4.13. Nüve de 0.087 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.14. Nüve de 0.093 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.15. Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı



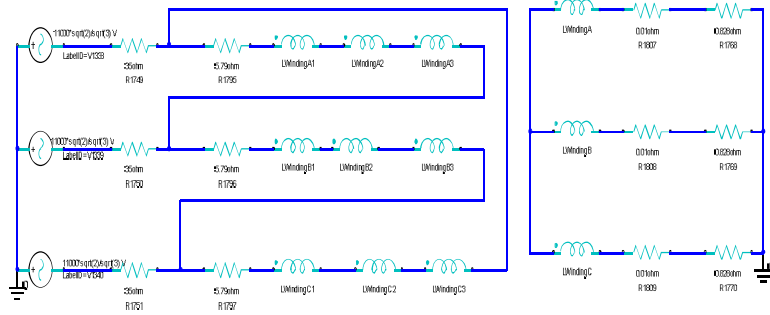
Şekil 4.16. Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı

Nüve üzerinde oluşan akı dağılımları incelendiğinde, nüvenin köşe bölgelerinde akı yoğunluğu az, sargılar etrafında ve civarında akı yoğunluğunun yüksek olduğu görülmektedir. Genel olarak 2B boшта analizde akı yoğunluğunun yüksek olduğu tespit edilmiştir.

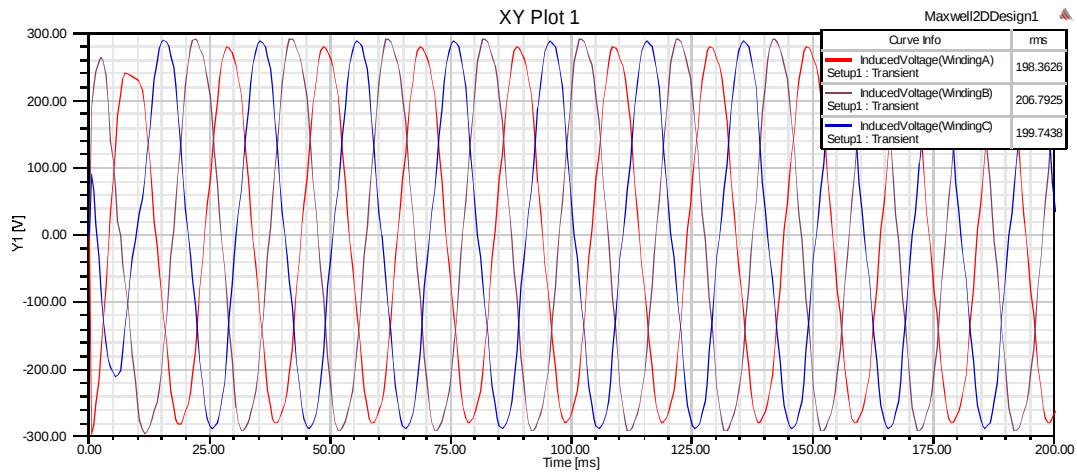
4.2. Kademeli Güç Transformatörünün 2B Tam Yükte Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı

Kademeli güç transformatörünün ikincil tarafına sıcaklıkla direnç değerinde artış olduğu dikkate alınarak hesaplanan tam yükte 0.828 ohm' luk omik yük Şekil 4.17' deki gibi bağlanmıştır. 2 boyutlu tam yükte çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına ait birincil ve ikincil sargı gerilimleri, birinci kademe gerilimi, ikinci kademe gerilimi, birincil sargının faz akımı, ikincil sargının faz akımı, bakır kaybı, birincil sargıyı etkileyen kuvvet ve ikincil sargıyı etkileyen kuvvet grafiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

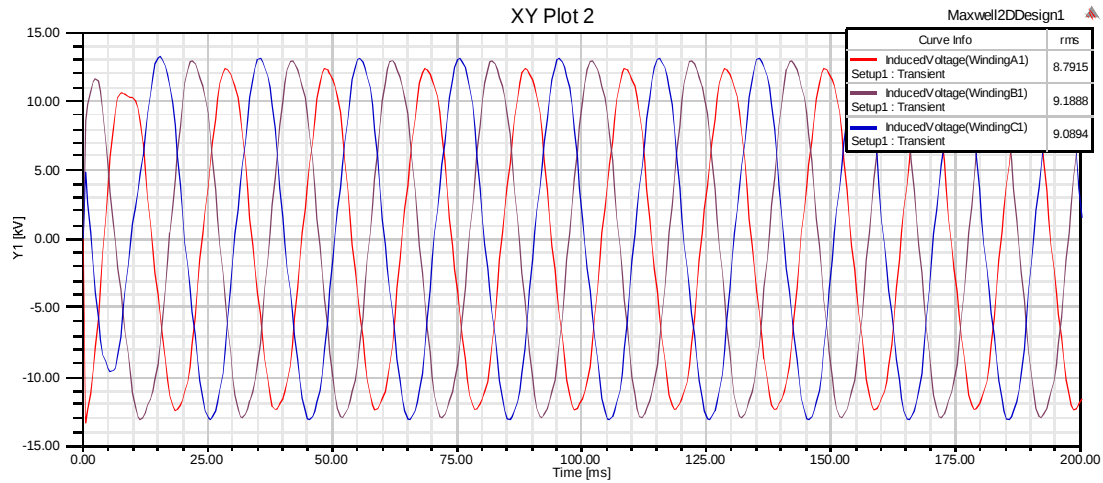
4. ARAŞTIRMA BULGULARI



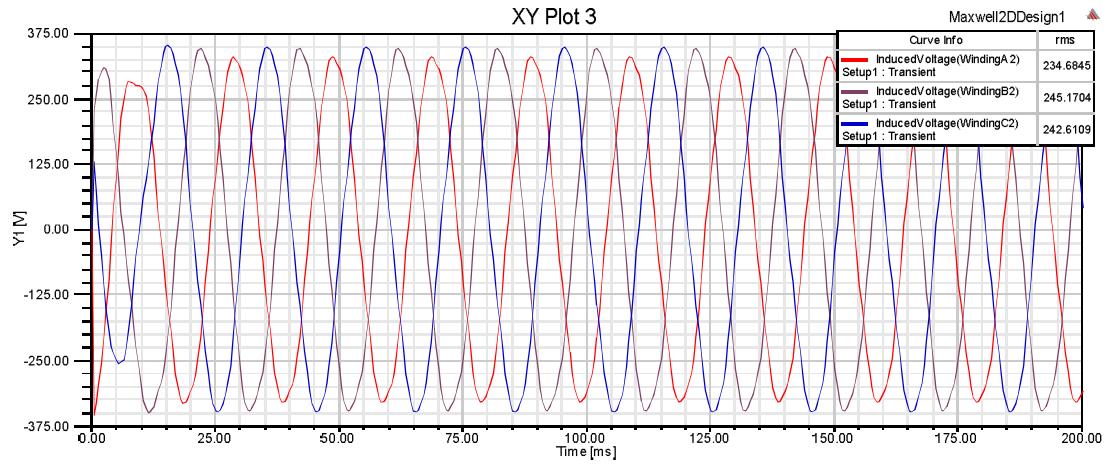
Şekil 4.17. 2B transformatörün tam yükte çalışmada elektrik devresi



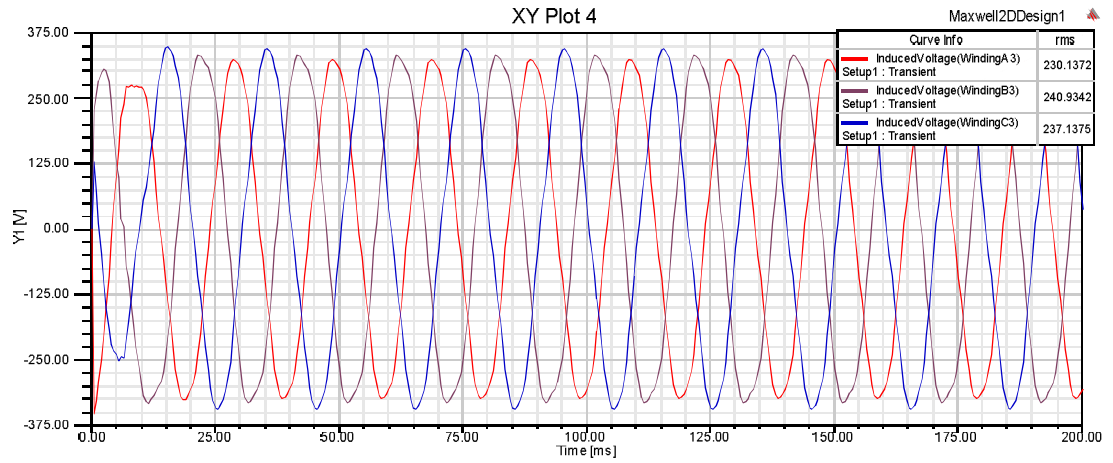
Şekil 4.18. İkincil sargıda indüklenen gerilim



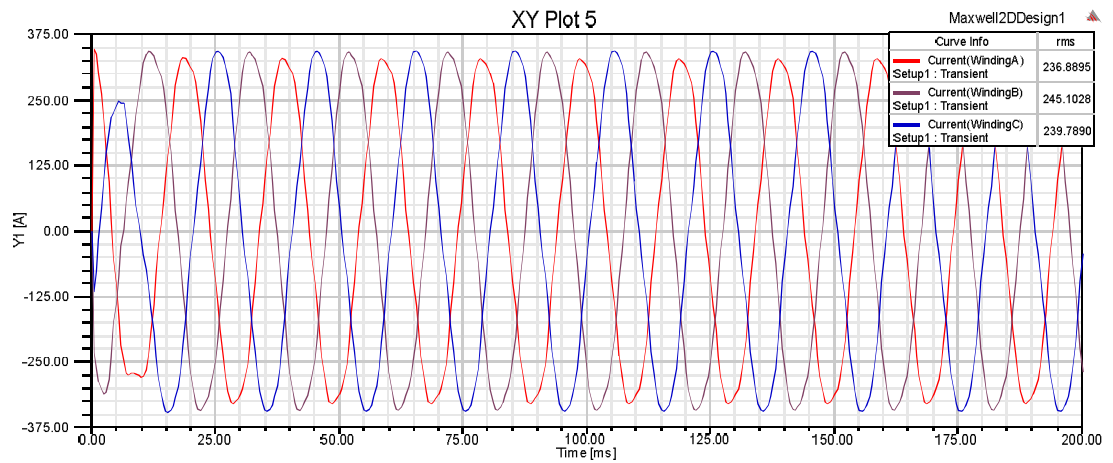
Şekil 4.19. Birincil ana sargıda indüklenen gerilim



Şekil 4.20. Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim

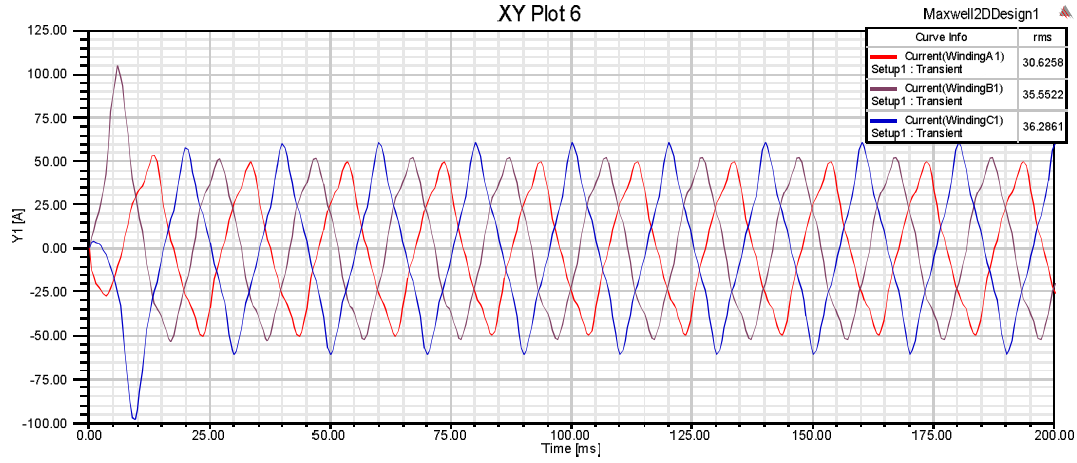


Şekil 4.21. Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim

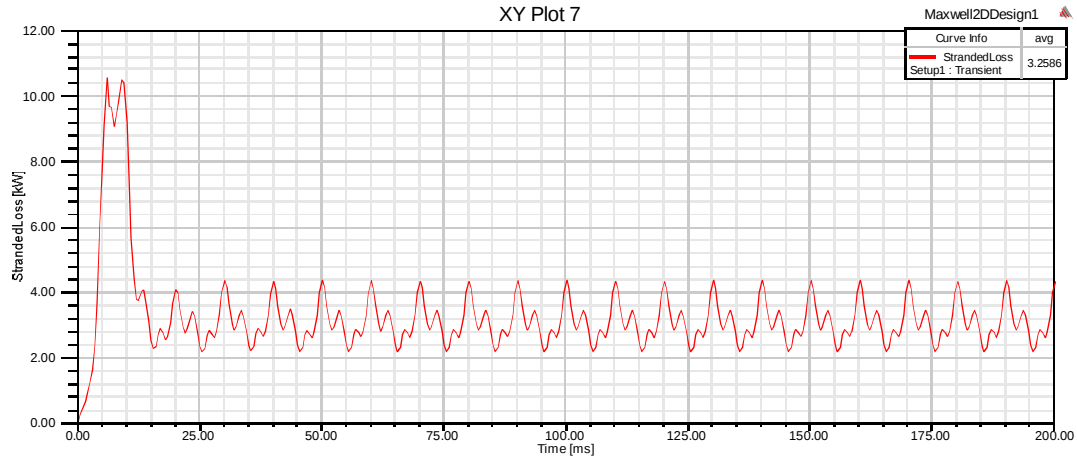


Şekil 4.22. İkinci faz akımı

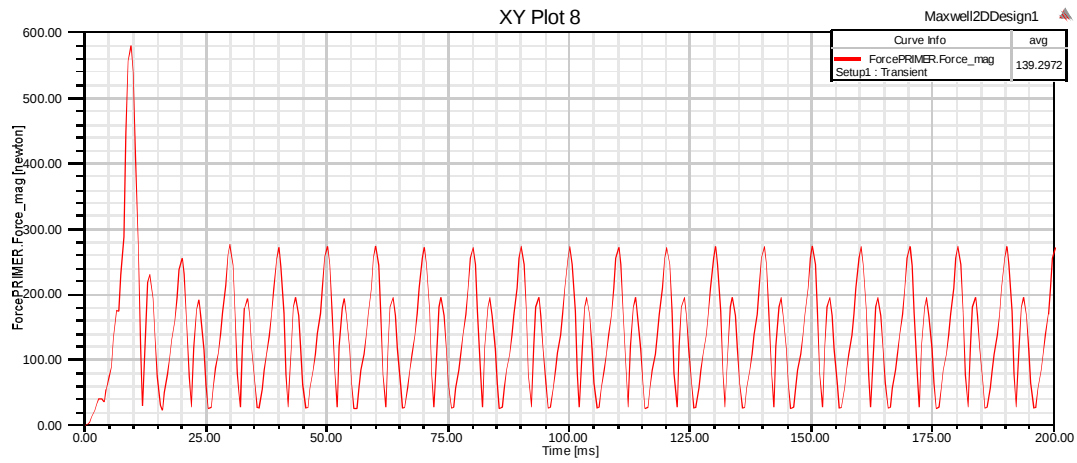
4. ARAŞTIRMA BULGULARI



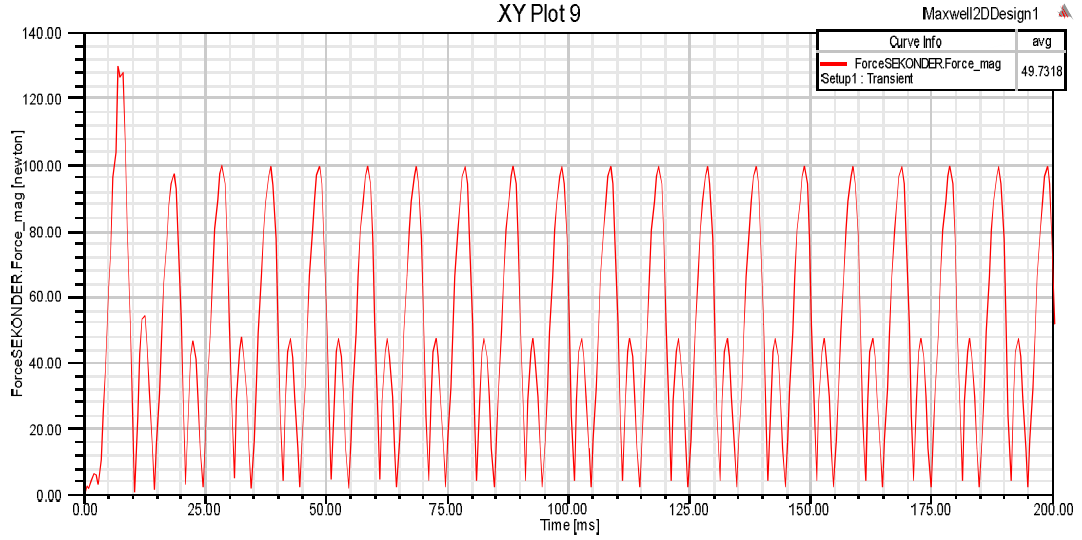
Şekil 4.23. Birincil faz akımı



Şekil 4.24. Bakır kaybı



Şekil 4.25. Birincil sargıyı etkileyen kuvvet



Şekil 4.26. İkincil sargıyı etkileyen kuvvet

2B tam yükte analiz sonuçları ve transformatörün etiket değerleri Çizelge 4.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. 2B tam yükte analiz sonuçları

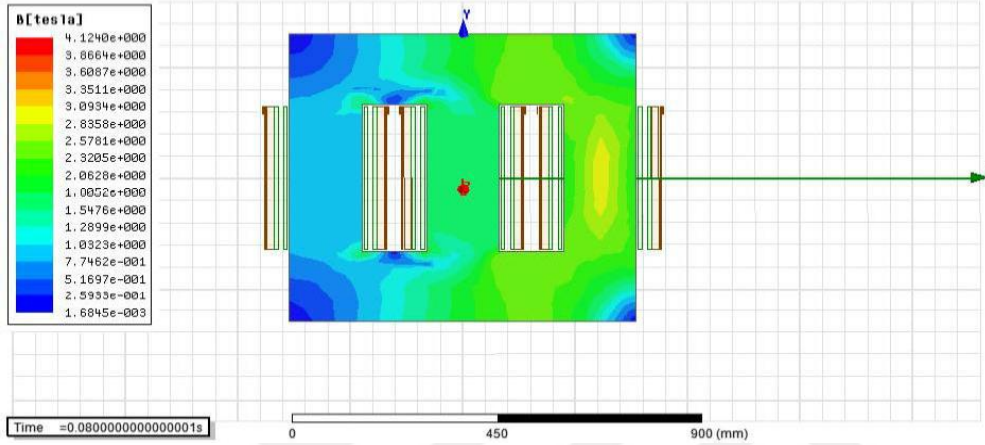
Analiz Parametreleri	Analiz Değerleri	Etiket Değerleri
İkincil sargı gerilimi (V)	198.36	416.00
Birincil sargı gerilimi (V)	8791.50	10450.00
Birinci kademe gerilimi (V)	234.68	275.00
İkinci kademe gerilimi (V)	230.13	275.00
İkincil sargının faz akımı (A)	236.88	346.96
Birincil sargının faz akımı (A)	30.62	7.57
Bakır kaybı (W)	3258.60	3277.00
Birincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	139.29	-
İkincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	49.73	-

2B tam yükte analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında, analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim, kademe gerilimlerinin ve ikincil sargının faz akımının düşük olduğu, birincil sargının faz akımının ise yüksek olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen bakır kaybı değerinin, gerçek transformatörün etiketinde verilen bakır kaybı değerine yakın olduğu belirlenmiştir. Bakır kaybı açısından hata oranı %0.56 ve maksimum tolerans kaybına göre hata oranı %9.61 olarak hesaplanmıştır. Birincil sargıyı etkileyen kuvvetin ikincil

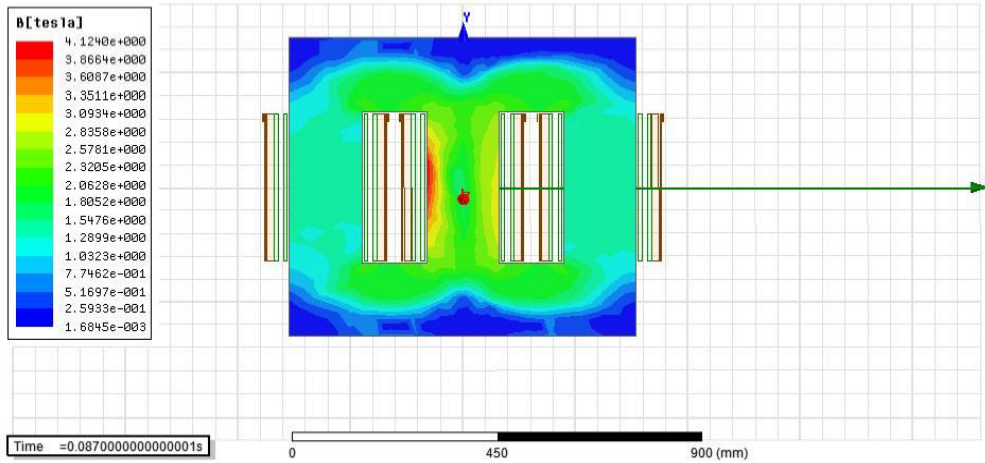
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

sargıyı etkileyen kuvvetten çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre transformatörün tam yükte çalışmada birincil sargıda, ikincil sargıda ve kademe sargılarında gerilim düşümü yüksek olduğu belirlenmiştir.

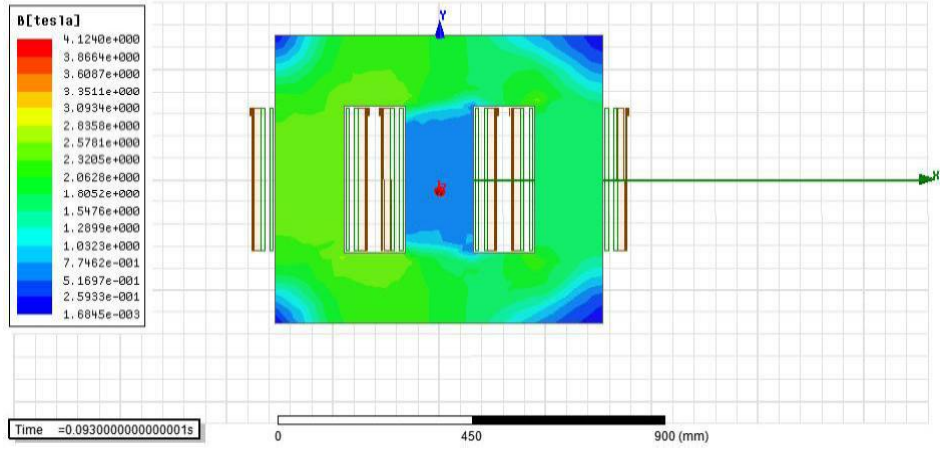
Nüve üzerinde 0.080, 0.087, 0.093, 0.096 ve 0.1 saniyede elde edilen akı dağılımları sırasıyla Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31' de gösterilmiştir.



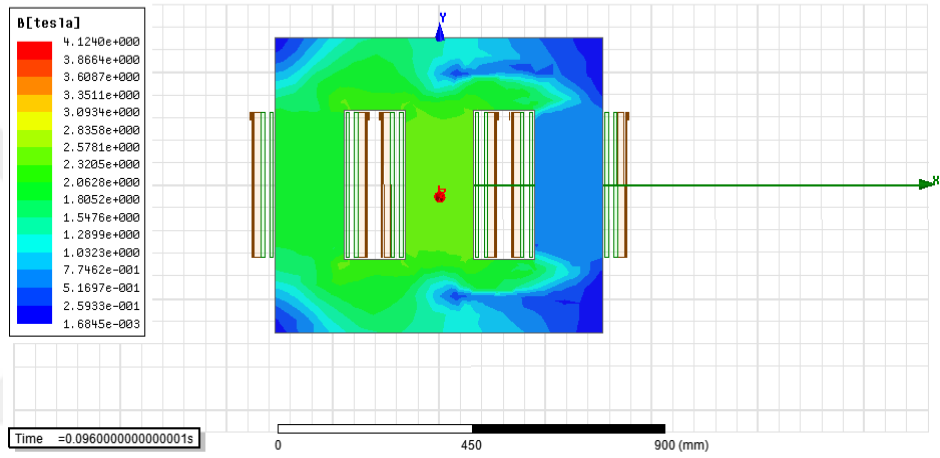
Şekil 4.27. Nüvede 0.080 saniyedeki akı dağılımı



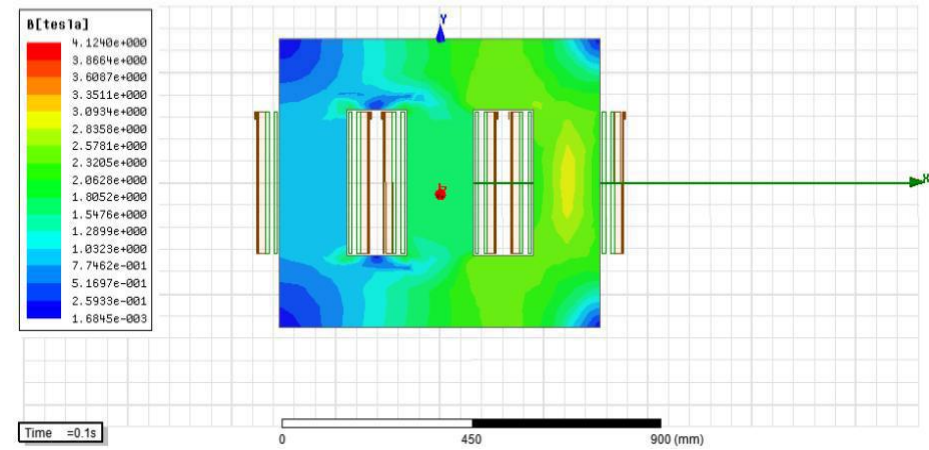
Şekil 4.28. Nüvede 0.087 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.29. Nüvede 0.093 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.30. Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı

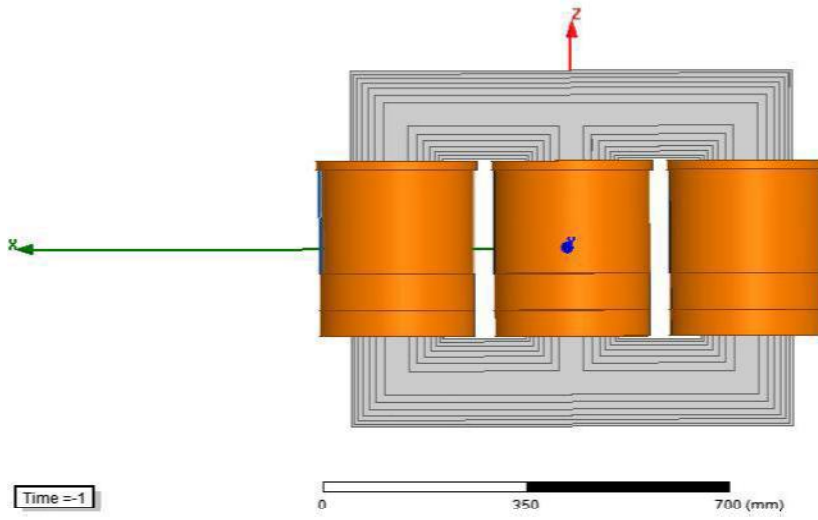


Şekil 4.31. Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı

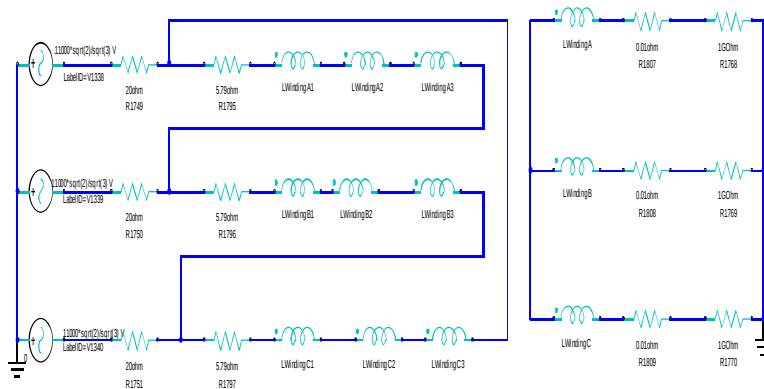
Nüve üzerinde oluşan akı dağılımları incelendiğinde, 2B boşa analizde olduğu gibi nüvenin köşe bölgelerinde akı yoğunluğunu az, sargılar etrafında ve civarında akı yoğunluğunun yüksek olduğu görülmektedir.

4.3. Kademeli Güç Transformatörünün 3B Boşta Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı

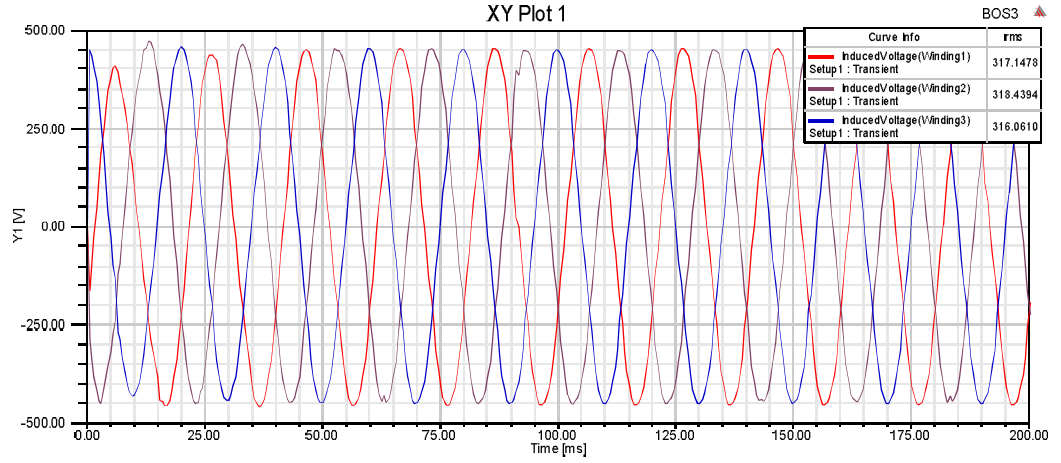
Benzetimi yapılan transformatörün 3 boyutlu görünümü Şekil 4.32’ de gösterilmiştir. Kademeli güç transformatörünün birincil tarafı üçgen bağlı ve ikincil tarafı yıldız bağlı olup boşta çalışmada elektrik devresi Şekil 4.33’ te gösterilmiştir. 3 boyutlu boşta çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına ait birincil ve ikincil sargı gerilimleri, birinci kademe gerilimi, ikinci kademe gerilimi, birincil sargının faz akımı, ikincil sargının faz akımı, demir kaybı, birincil sargıyı etkileyen kuvvet ve ikincil sargıyı etkileyen kuvvet grafiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.32. Transformatörün üç boyutlu görünümü



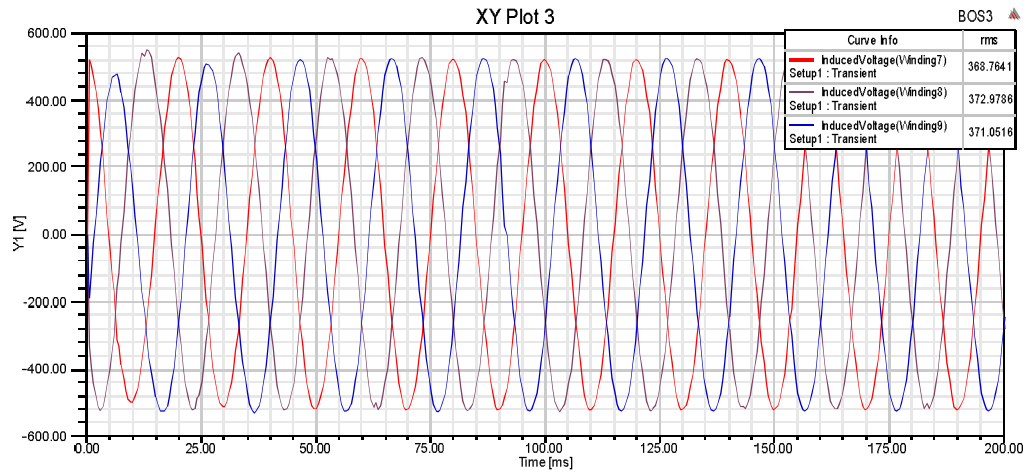
Şekil 4.33. 3B transformatörün boşta çalışmada elektrik devresi



Şekil 4.34. İkincil sargıda indüklenen gerilim

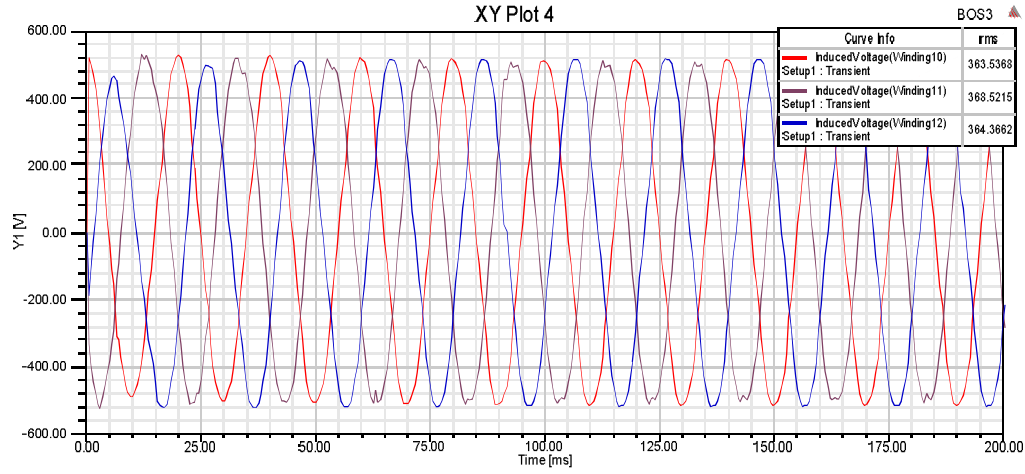


Şekil 4.35. Birincil ana sargıda indüklenen gerilim

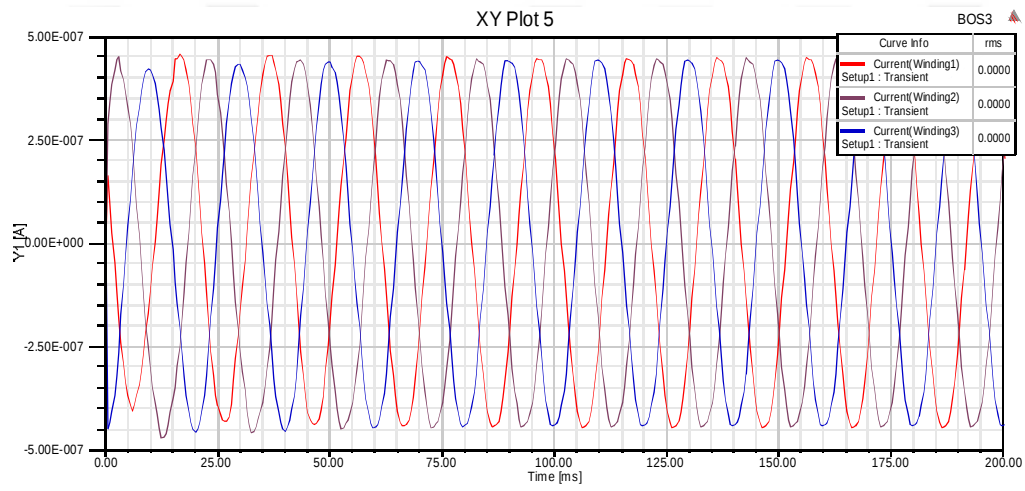


Şekil 4.36. Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim

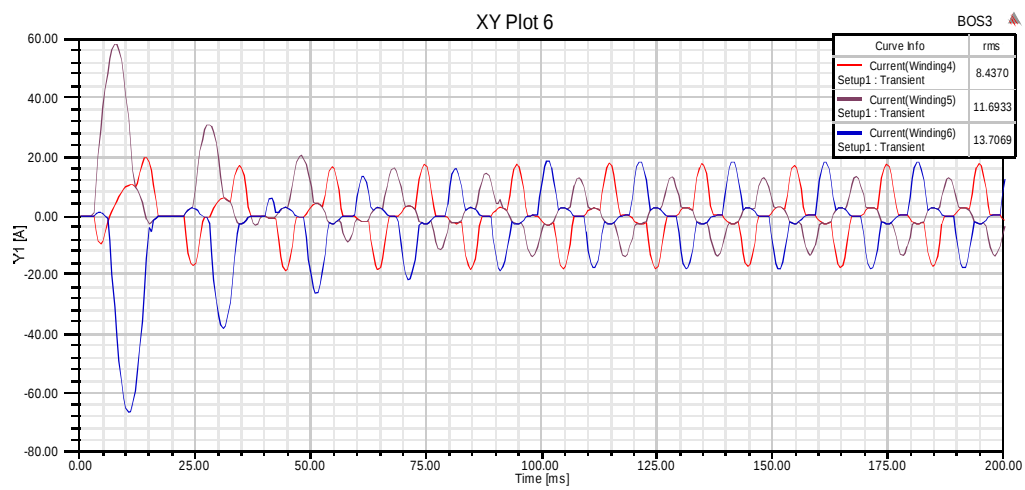
4. ARAŞTIRMA BULGULARI



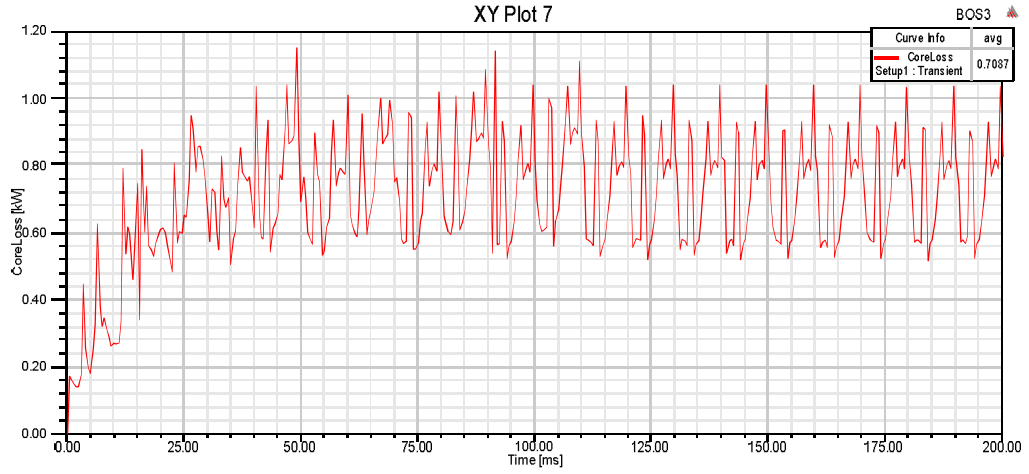
Şekil 4.37. Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim



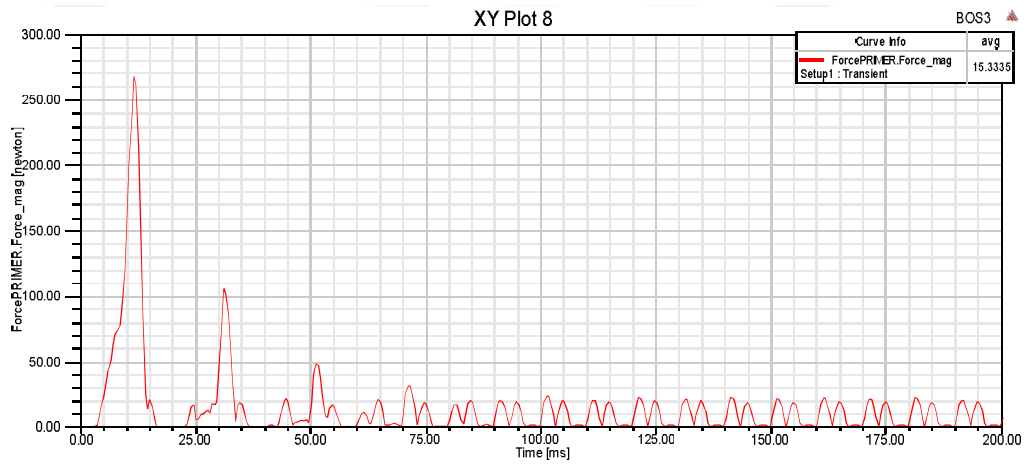
Şekil 4.38. İkincil faz akımı



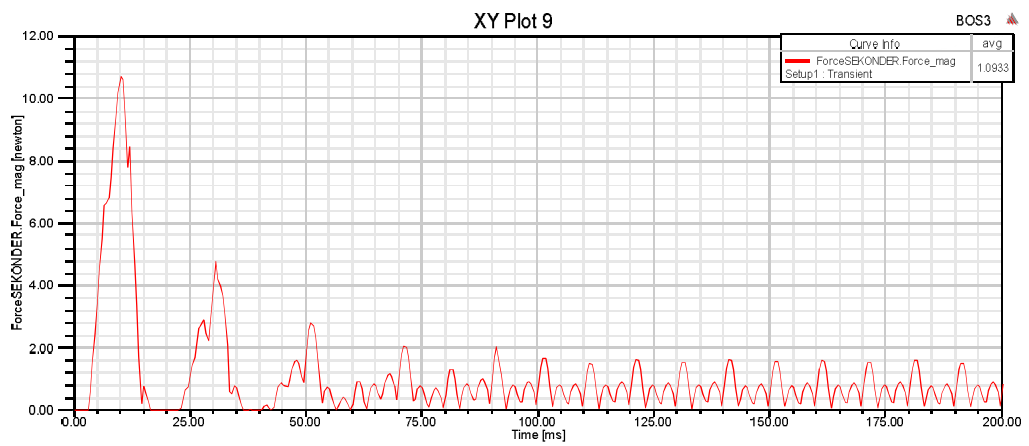
Şekil 4.39. Birincil faz akımı



Şekil 4.40. Demir kaybı



Şekil 4.41. Birincil sargıyı etkileyen kuvvet



Şekil 4.42. İkincil sargıyı etkileyen kuvvet.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

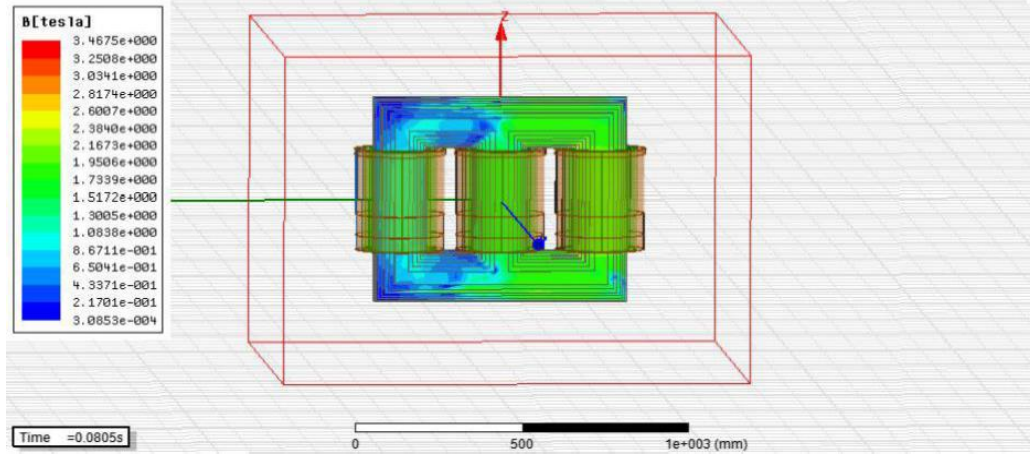
3B boşa analiz sonuçları ve transformatörün etiket değerleri Çizelge 4.3' te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. 3B boşa analiz sonuçları

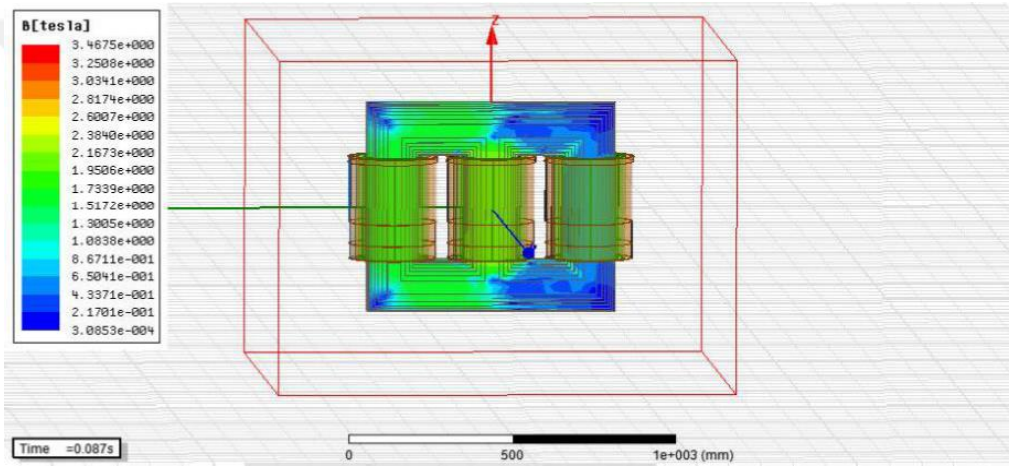
Analiz Parametreleri	Analiz Değerleri	Etiket Değerleri
İkincil sargı gerilimi (V)	317.14	416.00
Birincil sargı gerilimi (V)	11585.40	10450.00
Birinci kademe gerilimi (V)	368.76	275.00
İkinci kademe gerilimi (V)	363.53	275.00
İkincil sargının faz akımı (A)	0.00	346.96
Birincil sargının faz akımı (A)	8.43	7.57
Demir kaybı (W)	708.70	653.00
Birincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	15.33	-
İkincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	1.09	-

3B boşa analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında, analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim, kademe gerilimleri ve birincil sargının faz akımı değerlerinin transformatörün etiket değerlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. 3B boşa analiz sonucunda elde edilen gerilimlerin, 2B boşa analizde elde edilen gerilimlere göre düşük olmadığı belirlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen demir kaybının, transformatörün etiket değerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Demir kaybı açısından hata oranı %8.52 ve maksimum tolerans kaybına göre hata oranı %1.33 olarak hesaplanmıştır. Birincil sargıyı etkileyen kuvvetin ikincil sargıyı etkileyen kuvvetten çok daha yüksek olduğu görülmektedir. 3B boşa analizde sargılara etkileyen kuvvetin, 2B boşa analizde sargılara etkileyen kuvvetten daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

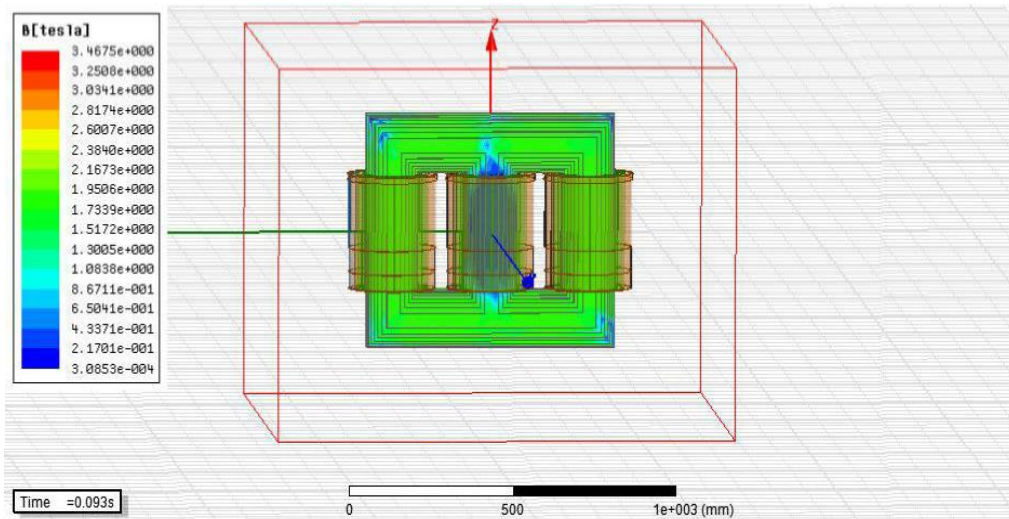
Nüve üzerinde 0.0805, 0.087, 0.093, 0.096 ve 0.1 saniyede elde edilen akı dağılımları sırasıyla Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47' de gösterilmiştir.



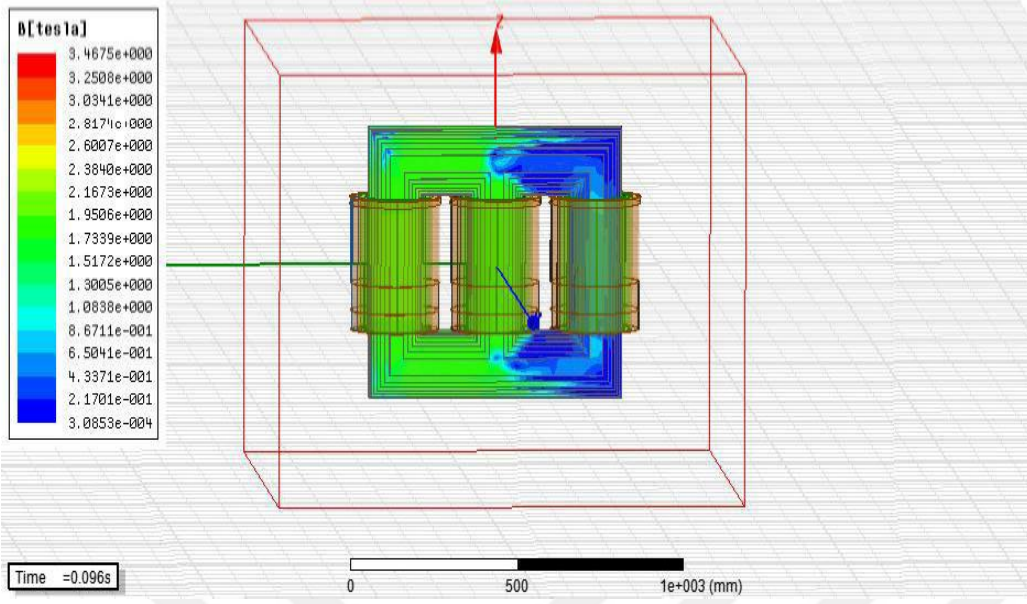
Şekil 4.43. Nüvede 0.0805 saniyedeki akı dağılımı



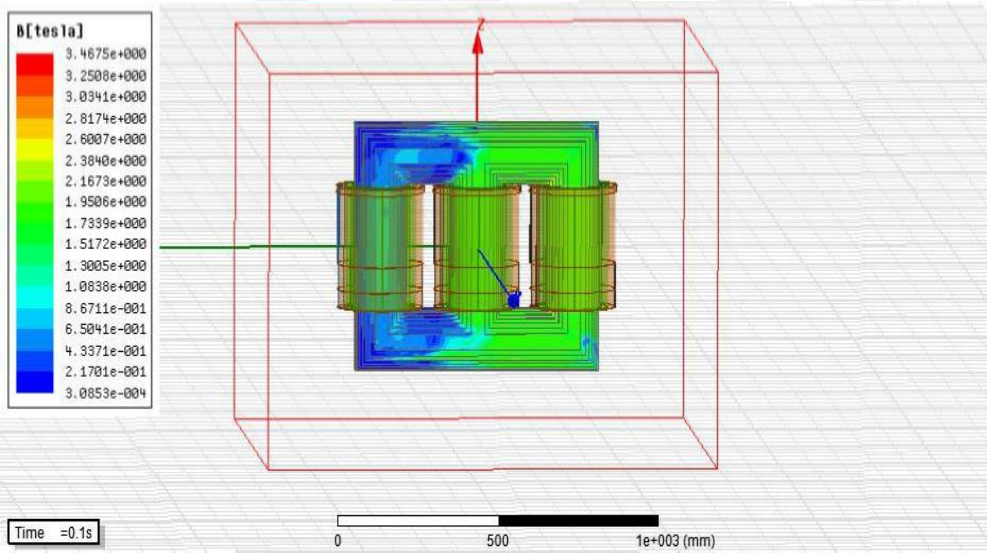
Şekil 4.44. Nüvede 0.087 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.45. Nüvede 0.093 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.46. Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı

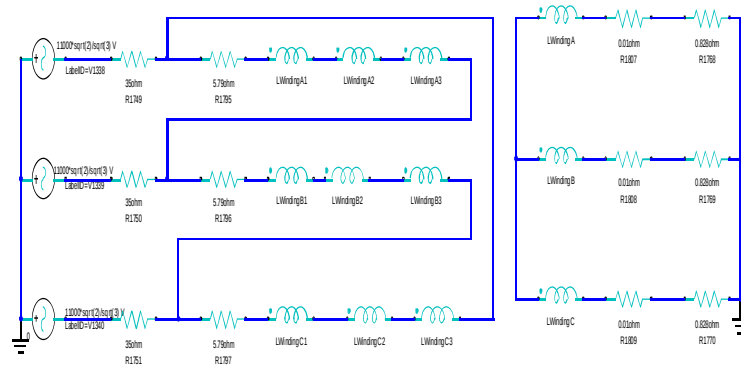


Şekil 4.47. Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı

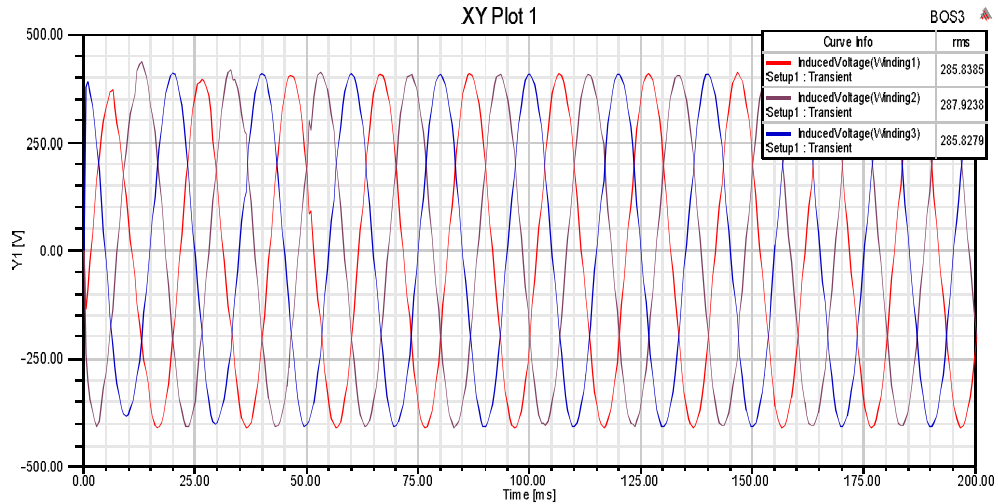
Nüve üzerinde oluşan akı dağılımları incelendiğinde, akı yoğunluğunun 2B boşa analizde elde edilen akı yoğunluğuna göre yüzeye daha homojen dağıldığı ve akı yoğunluk değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Nüvenin köşe bölgelerinde akı yoğunluğunun daha az olduğu belirlenmiştir. Boyunduruk ve bacakların birleşme noktalarında akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

4.4. Kademeli Güç Transformatörünün 3B Tam Yükte Analiz Grafikleri ve Nüvede Akı Dağılımı

Kademeli güç transformatörünün ikincil tarafına sıcaklıkla direnç değerinde artış olduğu dikkate alınarak hesaplanan tam yükte 0.828 ohm' luk omik yük Şekil 4.48' teki gibi bağlanmıştır. 3 boyutlu tam yükte çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına ait birincil ve ikincil sargı gerilimleri, birinci kademe gerilimi, ikinci kademe gerilimi, birincil sargının faz akımı, ikincil sargının faz akımı, bakır kaybı, birincil sargıyı etkileyen kuvvet ve ikincil sargıyı etkileyen kuvvet grafiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

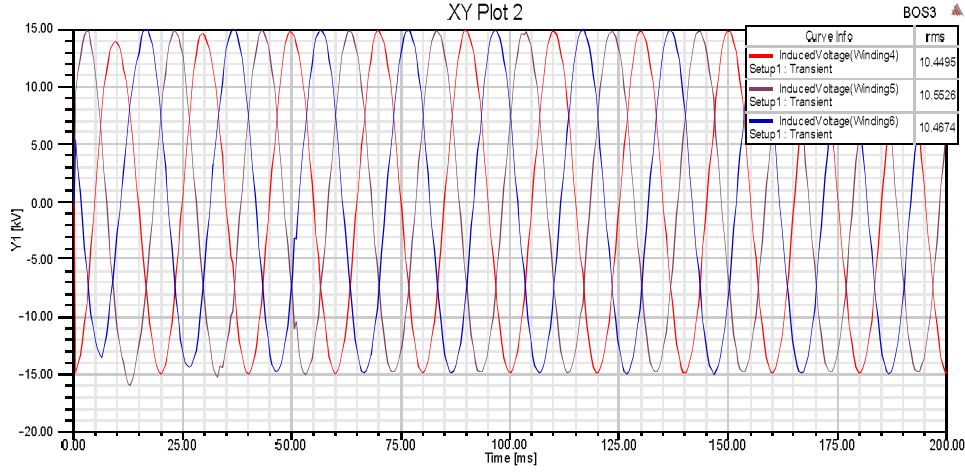


Şekil 4.48. 3B Transformatörün tam yükte çalışmada elektrik devresi

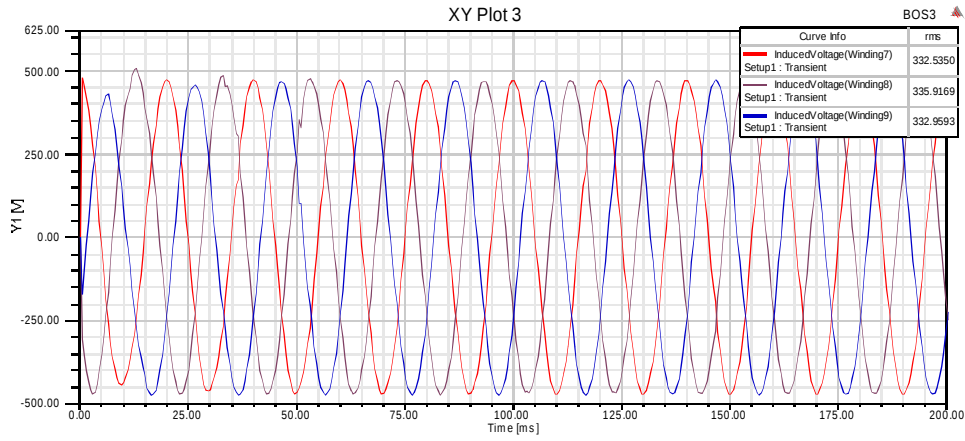


Şekil 4.49. İkincil sargıda indüklenen gerilim

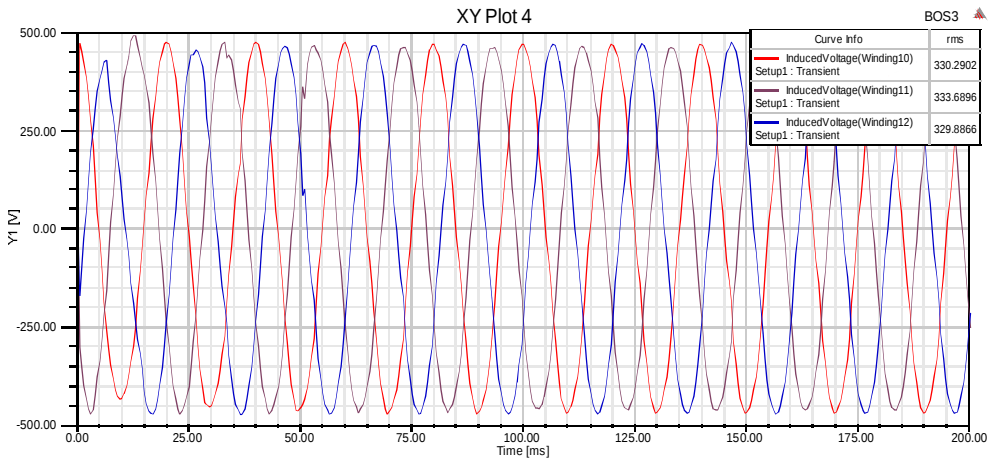
4. ARAŞTIRMA BULGULARI



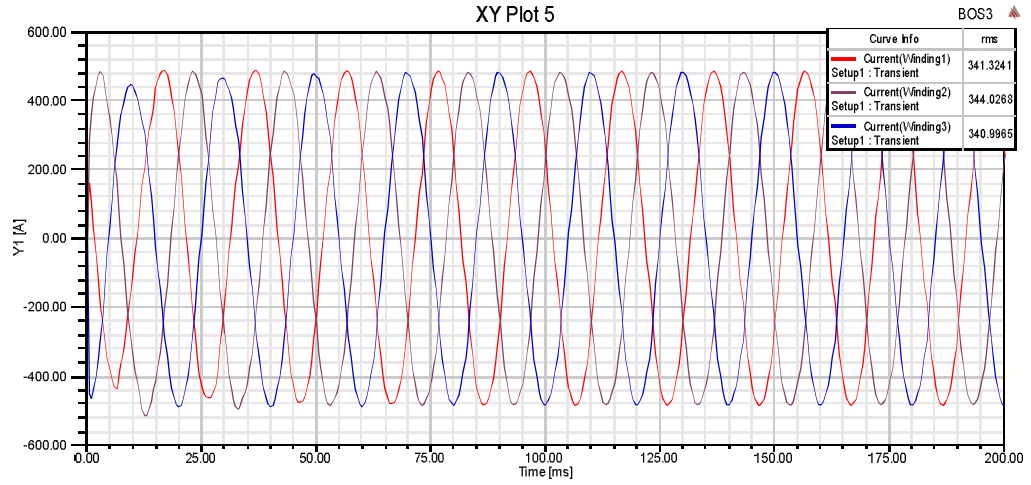
Şekil 4.50. Birincil ana sargıda indüklenen gerilim



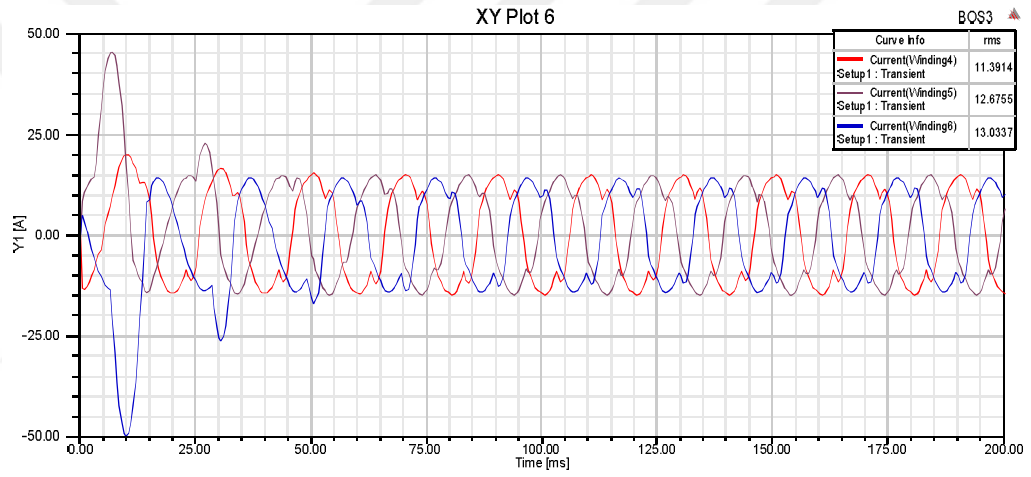
Şekil 4.51. Birincil sargının birinci kademe sargısında indüklenen gerilim



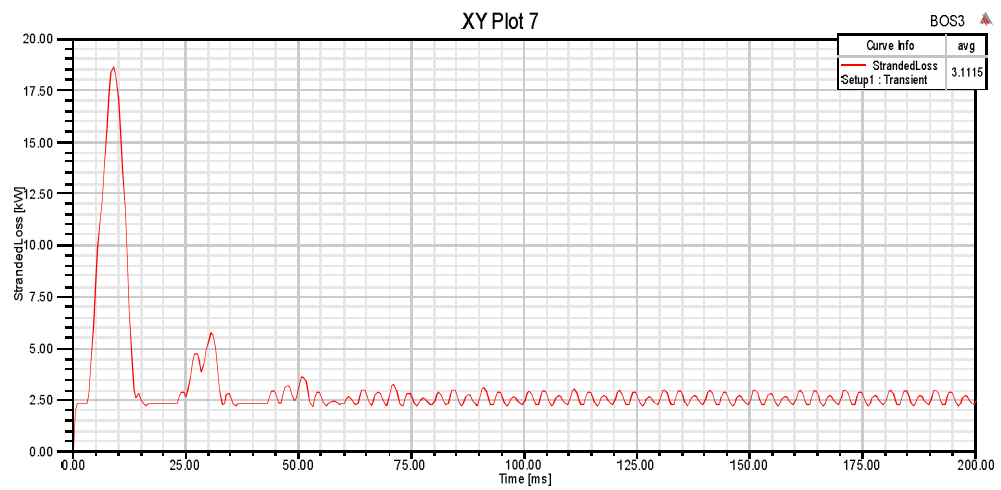
Şekil 4.52. Birincil sargının ikinci kademe sargısında indüklenen gerilim



Şekil 4.53. İkinci faz akımı

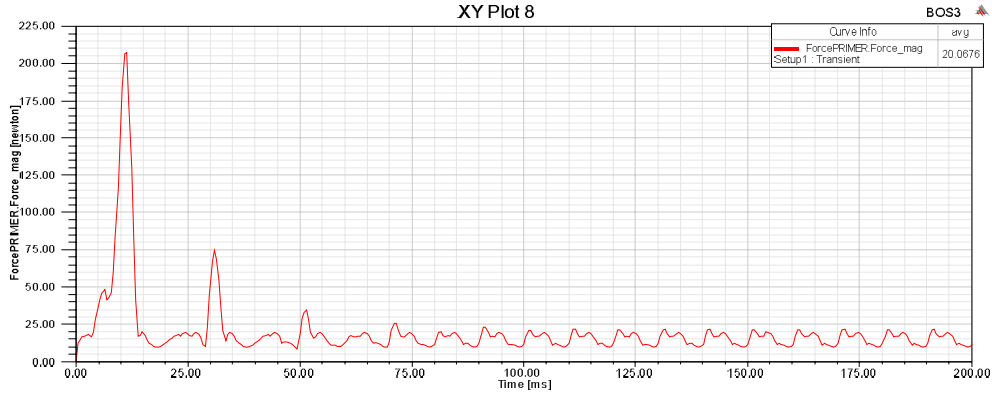


Şekil 4.54. Birinci faz akımı

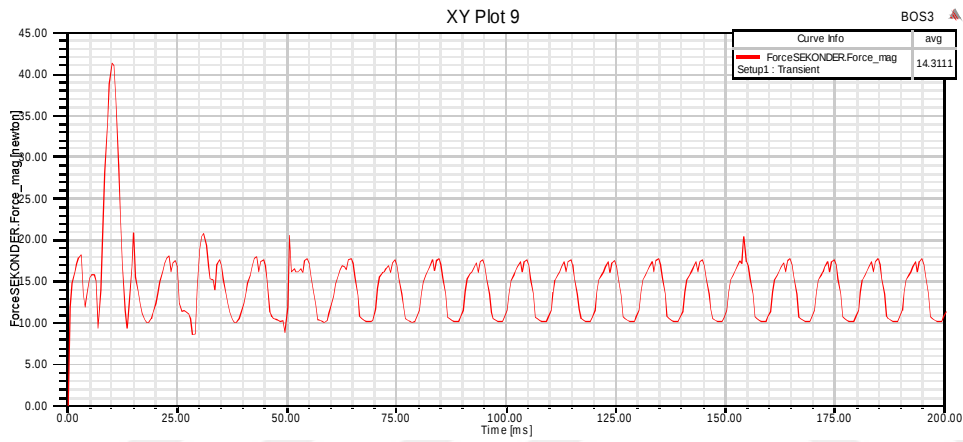


Şekil 4.55. Bakır kaybı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI



Şekil 4.56. Birincil sargıyı etkileyen kuvvet



Şekil 4.57. İkincil sargıyı etkileyen kuvvet

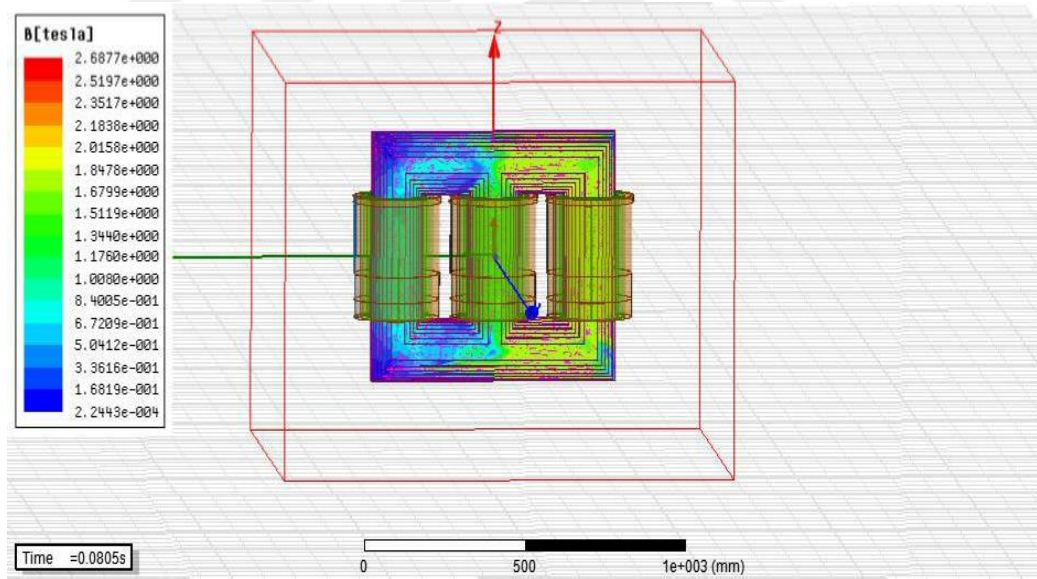
3B tam yükte analiz sonuçları ve transformatörün etiket değerleri Çizelge 4.4' te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. 3B tam yükte analiz sonuçları

Analiz Parametreleri	Analiz Değerleri	Etiket Değerleri
İkincil sargı gerilimi (V)	285.83	416.00
Birincil sargı gerilimi (V)	10044.95	10450.00
Birinci kademe gerilimi (V)	332.53	275.00
İkinci kademe gerilimi (V)	330.29	275.00
İkincil sargının faz akımı (A)	341.32	346.96
Birincil sargının faz akımı (A)	11.39	7.57
Bakır kaybı (W)	3111.50	3277.00
Birincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	20.06	-
İkincil sargıyı etkileyen kuvvet (N)	14.31	-

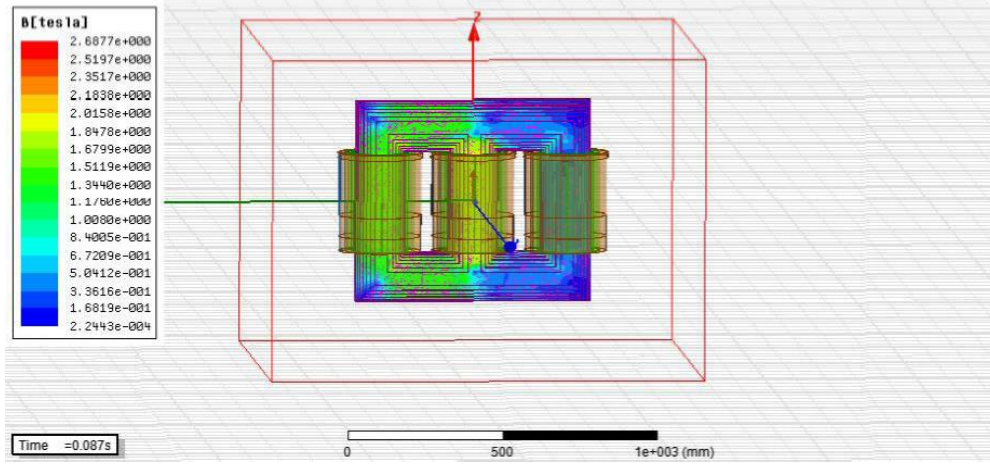
3B tam yükte analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında, analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim, kademe gerilimleri, birincil sargının faz akımı ve ikincil sargının faz akımı değerlerinin transformatörün etiket değerlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. 3B tam yükte analiz sonucunda elde edilen gerilimlerin, 2B tam yükte analiz sonucunda elde edilen gerilimlere göre düşük olmadığı belirlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen bakır kaybının, transformatörün etiket değerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bakır kaybı açısından hata oranı %5.05 ve maksimum tolerans kaybına göre hata oranı %13.68 olarak hesaplanmıştır. Birincil sargıyı etkileyen kuvvetin, ikincil sargıyı etkileyen kuvvetten yüksek görülmektedir. 3B tam yükte analizde sargılara etkileyen kuvvetin, 2B tam yükte analizde sargılara etkileyen kuvvetten daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Nüve üzerinde 0.0805, 0.087, 0.093, 0.096 ve 0.1 saniyede elde edilen akı dağılımları sırasıyla Şekil 4.58, Şekil 4.59, Şekil 4.60, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’ de gösterilmiştir.

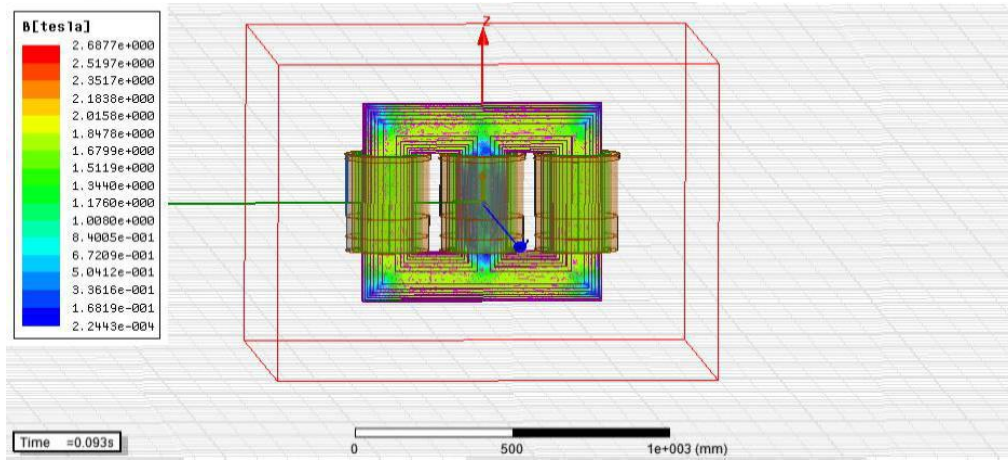


Şekil 4.58. Nüvede 0.0805 saniyedeki akı dağılımı

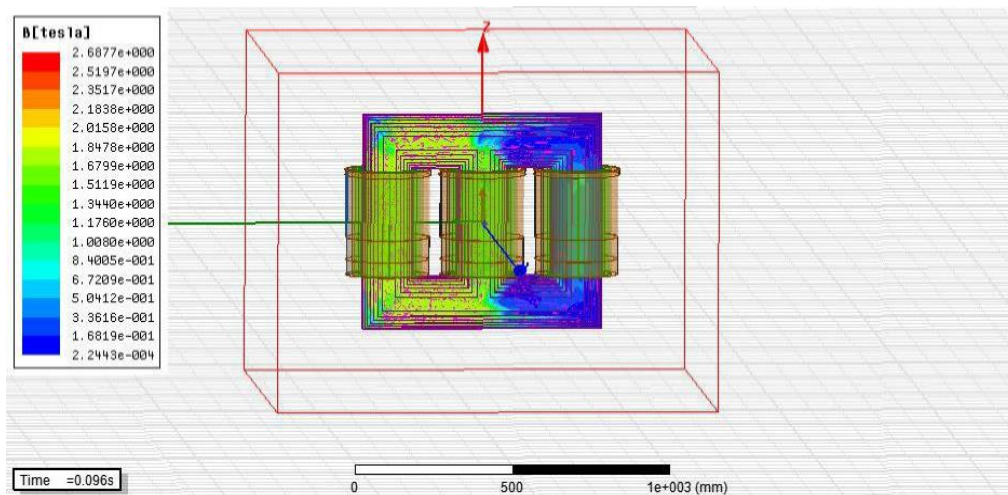
4. ARAŞTIRMA BULGULARI



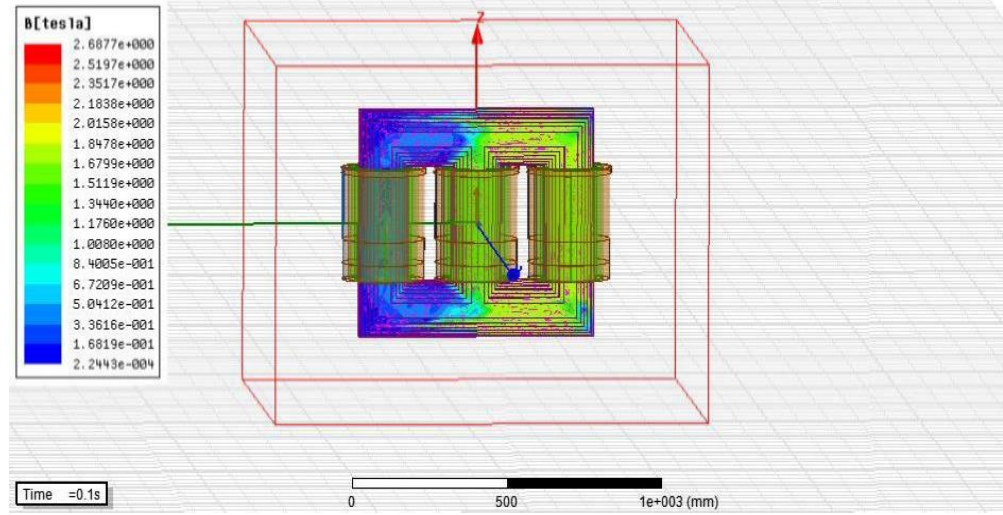
Şekil 4.59. Nüvede 0.087 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.60. Nüvede 0.093 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.61. Nüvede 0.096 saniyedeki akı dağılımı



Şekil 4.62. Nüvede 0.1 saniyedeki akı dağılımı

Nüve üzerinde oluşan akı dağılımları incelendiğinde, akı yoğunluğunun 2B tam yük analizinde elde edilen akı yoğunluğuna göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Nüvenin köşe bölgelerinde akı yoğunluğunun daha az olduğu belirlenmiştir. Boyunduruk ve bacakların birleşme noktalarında akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

250 kVA 11 / 0.416 kV kademeli güç transformatörünün 2B ve 3B olarak Ansys Maxwell paket programında benzetim modeli tasarlanarak 200 ms süresince boşa ve tam yükte kayıp analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda ikincil sargıda indüklenen gerilim, birincil ana sargıda indüklenen gerilim, kademe sargılarında indüklenen gerilim, birincil ve ikincil sargıların faz akımları, demir kaybı, bakır kaybı ve sargıları etkileyen kuvvetler grafiksel olarak elde edildi. Grafiksel sonuçlara ait değerler Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 detaylı olarak gösterilmiştir. Benzetimi yapılan kademeli güç transformatörünün boşa ve tam yükte 2B ve 3B kayıp analiz sonuçları ve güç transformatörünün etiketinde verilen kayıpların değerlerinin karşılaştırması Çizelge 5.1, Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’ te verilmiştir.

Çizelge 5.1. 2B boşa demir kaybı karşılaştırma

	Etiket Değeri (W)	Analiz değeri (W)	Hata Yüzdesi (%)
Demir Kaybı (W)	653	790.30	21.02

Çizelge 5.2. 2B tam yükte bakır kaybı karşılaştırma

	Etiket Değeri (W)	Analiz değeri (W)	Hata Yüzdesi (%)
Bakır Kaybı (W)	3277	3258.60	0.56

Çizelge 5.3. 3B boşa demir kaybı karşılaştırma

	Etiket Değeri (W)	Analiz değeri (W)	Hata Yüzdesi (%)
Demir Kaybı (W)	653	708.70	8.52

Çizelge 5.4. 3B tam yükte bakır kaybı karşılaştırma

	Etiket Değeri (W)	Analiz değeri (W)	Hata Yüzdesi (%)
Bakır Kaybı (W)	3277	3111.50	5.05

2B boşta demir kaybı Çizelge 5.1.' de hata oranı % 21.02, 2B tam yükte bakır kaybı Çizelge 5.2. 'de hata oranı % 0.56, 3B boşta demir kaybı Çizelge 5.3.' te hata oranı % 8.52 ve 3B tam yükte bakır kaybı Çizelge 5.4' te hata oranı % 5.05 olarak hesaplanmıştır. Gerçek transformatörün etiketinde belirtilen demir ve bakır kaybının + % 10 tolerans değeri olduğu dikkate alınırđa analiz sonuçlarının, gerçek transformatörün kayıp değeriğine yakın olduğu sonucuna varılır.

Araştırma Bulguları bölümünde, transformatörün boşta ve tam yükte 2B ve 3B analizlerinin grafiksel sonuçlarından elde edilen Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 incelendiğinde aşağıdaki sonuçları varılabilir.

2B boşta analiz değeriği ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında; analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim ve kademe gerilimlerinin düşük olduğu, birincil faz akımının yüksek olduğu Çizelge 4.1' den anlaşılmaktadır. 2B boşta analiz sonucunda animasyon olarak elde edilen nüve üzerindeki akı dağılımından nüvenin en üst köşe bölgelerinde akı yoğunluğuğunun az, sargılara yakın bölgelerde akı yoğunluğuğunun yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tasarım yapılırken bunun dikkate alınması gerekmektedir. Akı yoğunluğuğunun yüksek olduğu bölgelerde yalıtım ve dizayn için ek önlemler alınması gerekmektedir. 2B boşta analizdeki akı yoğunluğuğunun, 3B boşta analize göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 2B boşta analizde tüm parametreler programda girilen model derinliğeine bağlı olarak değıştiğinden 3B boşta analizde 2B boşta analize göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

2B tam yükte analiz değeriği ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında; analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim, kademe gerilimlerinin ve ikincil faz akımının düşük olduğu, birincil faz akımının ise yüksek olduğu Çizelge 4.2 den anlaşılmaktadır. Birincil sargıyı etkiyen kuvvetin ikincil sargıyı etkiyen kuvvetten çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre transformatörün 2B tam yükte çalışmada birincil sargıda, ikincil sargıda ve kademe sargılarında gerilim düşümünün yüksek olduğu belirlenmiştir. 2B tam yükte birincil sargıya etkiyen kuvvet yüksek olduğuğundan birincil sargının bu kuvvete dayanacak şekilde tasarlanması gerekir. 2B tam yükte yapılan analiz sonucunda gerilim düşümü yüksek olduğuğundan, 3B tam yükte yapılan analiz sonucuna göre 2B benzetiminin dezavantajlı olduğu tespit edilmiştir. 2B tam yükte çalıştırmada 2B boşta analizde olduğu gibi nüvenin

en üst köşe bölgelerinde akı yoğunluğunun az, sargılara yakın bölgelerde akı yoğunluğunun yüksek olduğu tespit edilmiştir. Akı yoğunluğu sargılara yakın bölgede yüksek olduğundan imalatı bunun dikkate alınması gerekmektedir. 2B tam yükte çalıştırma analiz sonuçlarına göre genel olarak nüve üzerinde akı yoğunluğunun 3B tam yükte çalıştırmaya göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 2B tam yükte tüm parametreler programda girilen model derinliğine bağlı olarak değiştiğinden 3B tam yük analizinin 2B tam yük analize göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

3B boşta analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında; analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim, kademe gerilimleri ve birincil faz akımı değerlerinin transformatörün etiket değerlerine yakın olduğu Çizelge 4.3' ten anlaşılmaktadır. 3B boşta analiz sonucunda elde edilen gerilim düşümünün, 2B boşta analiz sonucunda elde edilen gerilim düşümüne göre yüksek olmadığı belirlenmiştir. Birincil sargıyı etkileyen kuvvetin, ikincil sargıyı etkileyen kuvvetten çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 3B boşta analizde sargılara etkileyen kuvvetin, 2B boşta analizde sargılara etkileyen kuvvetten daha düşük olduğu belirlenmiştir. 3B boşta analiz sonucunda animasyon olarak elde edilen nüve üzerindeki akı dağılımı, 2B boşta analize göre nüve yüzeyine daha homojen dağıldığı ve akı yoğunluk değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Nüvenin üst köşe bölgelerinde akı yoğunluğunun daha az, boyunduruk ve bacakların birleşme noktalarında akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Transformatör tasarımında bunun dikkate alınması gerekmektedir.

3B tam yükte analiz değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında; analiz sonucunda elde edilen birincil gerilim, ikincil gerilim, kademe gerilimleri, birincil faz akımı ve ikincil faz akımı değerlerinin transformatörün etiket değerlerine yakın olduğu Çizelge 4.4' ten anlaşılmaktadır. 3B tam yükte analiz sonucunda elde edilen gerilimlerin, 2B tam yükte analiz sonucunda elde edilen gerilimlere göre yüksek olduğu, gerilim düşümünün düşük olduğu tespit edilmiştir. Birincil sargıyı etkileyen kuvvetin, ikincil sargıyı etkileyen kuvvetten yüksek olduğu ve 3B tam yükte analizde sargılara etkileyen kuvvetin, 2B tam yükte analizde sargılara etkileyen kuvvetten daha düşük olduğu belirlenmiştir.

3B tam yükte birincil sargıya yani yüksek gerilim sargısına etkileyen kuvvet daha yüksek olduğundan transformatör tasarımında bunun dikkate alınması gerekmektedir. Analiz sonucunda 3B tam yükte sargılara etkileyen kuvvet, 2B tam yükte sargılara etkileyen

kuvvetten daha düşük olduğundan 3B tasarımın daha avantajlı olduğu sonucuna varılır. Nüvenin üst köşe bölgelerinde akı yoğunluğunun daha az olduğu, boyunduruk ve bacaların birleşme noktalarında akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 3B analiz sonucunda nüve üzerinde oluşan akı yoğunluğunun, 2B analizin sonucuna göre nüve üzerinde oluşan akı yoğunluğundan daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

3B benzetiminde analiz sonuçlarının gerçek transformatörün etiket değerine daha yakın olduğu tespit edilmiştir. 2B analizinde genel olarak gerilim düşümlerinin daha yüksek olduğu ve nüve üzerinde meydana gelen akı yoğunluğunun yüksek olduğu tespit edilmiştir. 2B analiz sonuçları programda girilen derinlik değerine bağlı olarak değiştiğinden doğru sonuçların elde edilmesi güçtür. Transformatörün 3B olarak analiz edilmesi doğru sonuçların elde edilmesinde önem taşımaktadır.

Analiz sonuçlarından transformatörün birincil geriliminin, ikincil geriliminin, birinci kademe geriliminin ve ikinci kademe geriliminin tam yükte çalışmada, boşta çalışmaya göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yani transformatör yüklendikçe gerilim düşümünün arttığı belirlenmiştir. 3B tam yükte, 3B boşta çalışmaya göre birincil ve ikincil sargılara etkiyen kuvvetin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Benzetimi yapılan transformatörün etiket bilgileri ile 3B analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, aralarında küçük farklar olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedenleri arasında imal edilen transformatörlerde malzemelerin ideal özelliklerinden farklı olma durumu, simülasyon süresi, imalat hataları ve ihmaller sayılabilir. Ayrıca yapılan benzetim çalışmasında 3B benzetiminde kazan içi yağ kullanılmaması sonuçların farklı çıkmasında etkili olmuştur.

Ansys Maxwell paket programı bilgisayar özelliklerine ve ağ (mesh) sayısına bağlı olarak 1 saniyelik 3B analizini yaklaşık 7-10 gün arasında tamamlamaktadır. Mesh sayısının artırılması daha doğru sonuçların elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Ancak bu işlem analiz süresini uzatmaktadır. Daha kısa sürede analiz sonuçlarını almak için 2B benzetim analizi tercih edilebilir.

Transformatörün nüvesi üzerinde anlık akı dağılımı incelenerek, akı yoğunluğunun nüvenin hangi bölgelerinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Akı yoğunluğu ısınmaya sebep olacağından transformatör tasarımında buna dikkat edilmesi gerekmektedir.

Transformatörün birincil ve ikincil sargılarını etkileyen kuvvetler analiz sonucunda hesaplanarak sargıların bu kuvvetlere dayanımı test edilerek belirlenebilir.

Enerji iletim ve dağıtım hatlarında çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelen arızalar veya aşırı yüklenmeler nedeniyle transformatör gerilimi düşebilmekte veya yükselebilmektedir. Bu değişimi kontrol edebilmek için kademe sargıları (ayar sargıları) kullanılmaktadır. Çalışmada benzetimi yapılan transformatörün iki adet kademe sargısı bulunmaktadır. Her iki kademe sargısında da 37 adet sarım olmasına rağmen analiz sonucunda bu kademe sargılarında indüklenen gerilim değeri farklı çıkmaktadır. Bu farklılığın sebebi kademe sargılarının farklı yerlerde bulunması nedeniyle sargılarda meydana gelen akı miktarının ve akı dağılımının eşit olmamasından kaynaklanmaktadır.

Transformatör benzetimi ile ilgili yapılacak çalışmalarda daha doğru sonuçların elde edilmesi için, gerçeğe yakın transformatör modelinin oluşturulması, yapılan ihmallerin asgariye indirilmesi, modelin hassas kısımlarında mesh sayısının artırılması ve işlem hızı yüksek bilgisayarda analizin yapılması gerçeğe yakın sonuçların alınmasında önem arz etmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Arıkan, S. 2005. Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları. Erişim: <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10944.pdf>. Erişim Tarihi: 2005.
- Ateş, M. H., Peşint, M. A. 1990. Elektrik Makinalarının Esasları. Gazi Üniversitesi Basın-Yayın Yüksekokulu Matbaası, Yayın No: 144, Sayfa: 535-548. Ankara.
- Ashbahani, N., Daut, I., Halim, N. H. 2011. Measurement of Overall Power Loss for Different Three Phase 100kVA Transformer Core Material. The 5th International Power Engineering Conference, 6-7 June 2011, Malaysia. 978-1-4577-0354-6/11, S, 208-210.
- Alboyacı, B., Çınar, M. Ç., Şengül, M. 2011. Transformatör Manyetik Devre Yapısının Boşta Çalışma Akımına Etkisi. 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 12-13 Mayıs 2011, Kocaeli, S, 88-91.
- Bal, G. 2008. Transformatörler. Seçkin Yayın, Sayfa: 22-75. Ankara.
- Boduroğlu, T. 1988. Elektrik Makinaları Dersleri (Teori, hesap ve konstrüksiyon). Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., Yayın No: 155, Sayfa: 38-42. İstanbul.
- Bozkur, İ. 2005. Pencere Tipi Bir Transformatörde Kaçak Akı Dağılımının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Analizi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 149-152.
- Balcı, S. 2010. Evirici Çıkış Transformatörlerinin Modellenmesi ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 12-15.
- Constantin, D., Nicole, P. M., Nitu, C. M. 2013. 3D Finite Element Analysis of a Three Phase Power Transformer. Electric, Energetic and Aero-Spatiale Engineering Department, University of Craiova Romania, (978-1-4673-2232-4/13): 1548-1552.-Chapman, S. J. 2007. Elektrik Makinalarının Temelleri. BAE SYSTEMS, 978-975-436-069-1, Sayfa: 1-123, Avustralya.
- Chari, M.V.K. 1973. Finite Element Solution Of The Eddy Current Problem In Magnetic Structures. **IEEE PES Summer Meeting And EHV/UHV Conference**, Vancouver, B.C. Canada.
- Çınar, M. A., Alboyacı, B., Şengül, M. 2014. Comparison of Power Loss and Magnetic Flux Distribution in Octagonal Wound Transformer Core Configurations. **J Electr Eng Technol Vol. 9 (4):742-747**.
- Çanakoğlu, A. 2008. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tek Fazlı Transformatörün Çalışma Noktasının Belirlenmesi. **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, (17. Sayı): 65-71.
- Çapanoğlu Savaş, N. E. 2006. Ferrit Çekirdekli Trafo Tasarımı ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 54-55.
- Dlala, E., Arkkio, A. 2010. General Formulation for the Newton-Raphson Method and The Fixed-Point Method in Finite-Element Programs Electrical Machines (ICEM). 2010 XIX International Conference on, 6-8 September 2010, Rome, Italy, 1-5.
- Dexin, X., Yungiu, T., Zihong, X. 1987. Fem Analysis of 3D EDDY Current Field in Power Transformer. **Ieee Transactions On Magnetics, Vol. Mag-23, NO. 5**.
- Erdem, S. 2006. Transformatör Çekirdeklerinde Kullanılan Elektrik Çelikleri ve Amorf Şeritlerin Uç Uca Gelen Birleşim Yerlerindeki Manyetik Akı Dağılımının Deneysel ve Kuramsal İncelenmesi. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 117-123.
- Fish, J., Belytschko, T. 2007. Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş, John Wiley & Sons Ltd, Sayfa: 7, USA.

- Ghaffarlou, A. 2014. Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Transformatörün Manyetik Alan ve Kayıp Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 83-85.
- Güneri, S., Kömürgöz, G., Gündoğdu, T. 2014. Transformatörde Kısa Devre Kuvvetleri. Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 27-29 Kasım 2014, Bursa, S, 199-203.
- Gürdal, O. 2001. Elektrik Makinalarının Tasarımı. Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Sayfa: 2-19, İstanbul.
- Haliloğlu, A. B. 2012. Güç Transformatörlerinin Standartlara Göre Termal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 150-156.
- İlgaz, A., Bayırlı, M., Aygören, M. 2017. Transformatör Sisteminde Manyetik Akı Dağılımının İncelenmesi Yöntemiyle Güç Kayıplarının Belirlenmesi. **BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi**, 19(1):29-38.
- Karademir, A., Eker, M. K. 2015. Transformatör T-Bağlantı Yapısının Çekirdek Kayıplarına Etkisi. **Politeknik Dergisi**, (19(4):389-397): 389-397.
- Kaur, S. Kaur, D. 2015. 3D Finite Element Analysis for Core Losses in Transformer. International Conference on Advancements in Engineering and Technology, 27-30.
- Kazemighotlou, M. 2011. Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Transformatörün Manyetik Alan ve Kayıp Analizi. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 82-83.
- Kawase, Y., Yamaguchi, T. Onogi, Y. 2016. Eddy Current Analysis of Three-phase Transformer Using 3-D Parallel Finite Element Method. Electrical Machines (İCEM). 2016 XXII International Conference, 4-7 September 2016, **Lausanne, Switzerland**, 978-1-5090-2538-1/16.
- Kladas, A. G., Papadopoulos, M. P., Tegopoulos, J. A. 1994. Leakage Flux and Force Calculation on Power Transformer Windings under Short-circuit. 2D and 3D Models Based on the Theory of Images and the Finite Element Method Compared to Measurements. **IEEE Transactions On Magnetcs**. VOL. 30, NO. 5.
- Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. 2005. Transformer Engineering. Bombay Mumbai, Sayfa:36-37, India.
- Kürüm, H., Cebeci, M. 1995. Sonlu Elemanlar Yönteminde En Az Bellek ve Çalışma Zamanı İçin Yeni Bir Yöntem, F.Ü. Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi, Elazığ, 7(2):219-230.
- Li, H., Cheng, G. 2010. Analysis of Three-Phase Power Transformer Short Circuit Magnetic Field and Forces. **Intenational Conference on Electrical and Control Engineering**, 25-27 June 2010, Wuhan, China, S, 3351-3354.
- Li, Y., Li, L., Jing, Y., Zhang, B. 2013. 3D Finite Element Analysis of the Stray Loss in Power Transformer Structure Parts. Research Institute of Special Electrical Machines, Shenyang University of Technology, 1089-1092.
- Lu, W. H., Fang, C., Zhou, Q. W., Zhang, F., Cui, Y. J., Wang, M. M., Zhu, Y. Y. 2015. Fea Study on the Axial Vibration of Power Transformer Windings. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, 20-23 November 2015, Shanghai, China, S, 555-556.
- Mahmoud, S. A. 2008. Yağlı Dağıtım Transformatörlerde Kayıpların Hesaplanması. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 98-99.
- Mechkov, E., Tzeneva, R., Mateev, V., Yatchev I. 2016. Thermal Analysis Using 3D FEM Model of Oil-Immersed Distribution Transformer. **Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)**, (978-4673-9522-9/16), 1-3.

- Mergen, A. F., Zorlu, S. 2005. Elektrik Makineleri I Transformatörler. Birsen Yayınevi, Sayfa: 45-67, İstanbul.
- Moaveni, S. 2015. Sonlu Elemanlar Analizi Teori ve ANSYS ile Uygulamalar. Prentice Hall, Sayfa: 5-8.USA
- Milagre, A. M., Luz, F., Cangane, G. M., Komar, A., Avelino, P. A. 2012. 3D Calculation and Modeling of Eddy Current Losses in a Large Power Transformer. Research and Development (R&D) department of Siemens Ltda/TUSA Transformers, Brazil, 1-4.
- Omaç, Z. 1994. Relüktans Motorlarda Manyetik Alan Dağılımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Najafi, A. 2016. Dağıtım Transformatörlerindeki Dengesiz Gerilim Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Değerlendirilmesi ve Termal Modellemesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 11-13.
- Najafi, A., Iskender, I., Dökmetaş, B., Hashjin, S. A. 2015. Distribution Transformer Losses Calculation Based on TSFEM. Int'l Journal of Computing, **Communications & Instrumentation Engg. (IJCCIE)**, Vol. 2, Issue 2.
- Nicole, P. M., Constantin, D., Nitu, C. M. 2013. 2D Electromagnetic Transient and Thermal Modeling of a Three Phase Power Transformer. 4th International Youth Conference on IEEE, (978-1-4673-5556-8/13): 1-5.
- Noğay, H. S. 2002. Transformatör Kaçak Akı Dağılımının Bilgisayar Destekli Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 96-98.
- Okabe, M., Okada, M., Tsuchiya, H. 1983. Effects of Magnetic Characteristics of Materials on the Iron Loss in the Three Phase Transformer Core. **IEEE Trans. Magn**, Vol:19, No:5.
- Peşint, M. A., Ürkmez, A. 2000. Elektrik Makinaları II. Ilıcak Matbaası, Sayfa: 5-23. Ankara.
- Polat, M., Kürüm, H. 2011. Sonlu Elemanlar Yönteminin Nesnel Tabanlı Bir Programlama Dili ile Çözümlemesi ve Transformatörün Manyetik Büyüklüklerinin Hesaplanması. **e-Journal of New World Sciences Academy**, Vol:6, No:2.
- Saruhan, H. R. 2010. Alçak Gerilim Transformatör Yazılımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 101.
- Shilyashki, G., Pfützner, H., Hamberger, P., Aigner, M., Hofbauer, F., Matkovic, I., Kenov, A. 2014. The Impact of Off-Plane Flux on Losses and Magnetostriction of Transformer Core Steel. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. VOL. 50. NO. 11.
- Slade, G., W. 2006. Fast Finite-Element Solver For a Reluctance Mass Accelerator, Magnetics, IEEE Transactions on. Vol:42, No:9, Sayfa:2184-2192.
- Silvester, P., Cabayan, H. S., Browne, B. T. 1973. Efficient Techniques For Finite Element Analysis Of Electric Machines. IEEE PES Winter Meeting, New York.
- Toren, M., Çelebi, M. 2016. Weight Comparison of Oil and Dry Type Distribution Transformers. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, **Electronic and Communication Engineering**, Vol:10, No:7.
- Yoldaş, Y. B. 2011. Güç Transformatörleri ve Harmoniklerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 104-105.
- Yoon, H., Park, C. S., Koh, C. S. 2010. Finite Element Analysis of Iron Loss Estimation of 3MVA Three-Phase Transformer Utilizing Generalized Chua-type Vector Hysterisis Model. College of ECE, **Chungbuk National University, Cheongju**, (978-1-4244-7062-4/10):1.

Zhou, D., Li, Z., Ke, C., Yang, X., Hao, Z. 2015. Simulation of Transformer Windings Mechanical Characteristics During the External Short-Circuit Fault. Preprints of the 5th international conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 26-29 November 2015, Changsa, China, S, 26-29.

Wang, S., Wang, Y. Zhao, X. 2015. Calculating Model of Insulation Life Loss of Dry-Type Transformer Based on the Hot-Spot Temperature. IEEE 11 th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 19-22 July 2015, Sydney, NSW, Australia, S, 720-723.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Mehmet ÇEÇEN

Doğum Yeri: Kızıltepe

Doğum Tarihi:01.01.1981

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim Durumu

Lise: Namık Kemal Lisesi/Diyarbakır, 1998

Lisans: Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği/Diyarbakır, 2005.

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

2006-2011 Özel Sektör

2011-2018 Mardin Artuklu Üniversitesi Meslek Yüksekokulu

Öğretim Görevlisi (2018-Halen), Mardin.

Akademik Yayınlar :



T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI İNTİHAL RAPORU FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ

ADI VE SOYADI	Mehmet ÇEÇEN
ÖĞRENCİ NO	12805009
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2017-2018
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	GÜÇ TRANSFORMATÖRÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK 2 VE 3 BOYUTLU TASARIMI VE KAYIP ANALİZİ

İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ

RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	111
BENZERLİK ORANI	% 16
RAPORLAMA TARİHİ	16/06/2018

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam **111** sayfalık kısmına ilişkin, 17/06/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından **Turnitin** adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 16'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
- ☐ Kaynakça hariç
- ☐ Alıntılar hariç/dâhil
- ☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

1974

(İmza)

Mehmet ÇEÇEN

(İmza)

19/06/2018

Dr. Öğr. Üyesi Bilal GÜMÜŞ
Tez Danışmanı

(İmza)

19/06/2018

Prof. Dr. İbrahim KAYA
Anabilim Dalı Başkanı