T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTORUN ÇOKLU FİZİK TASARIMI

Serhat DOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Danışman

Prof. Dr. Yasemin ÖNER

Temmuz, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTORUN ÇOKLU FİZİK TASARIMI

Serhat DOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 05.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yasemin ÖNER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yasemin ÖNER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Necibe Füsun OYMAN SERTELLER, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Yasemin ÖNER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Asenkron Motorun Çoklu Fizik Tasarımı" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Serhat DOĞAN

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında desteklerini ve tecrübelerini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Yasemin ÖNER'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mekanik tasarımlarda desteğini ve yardımını esirgemeyen değerli arkadaşım İmam AĞIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez hazırlama süreci boyunca göstermiş oldukları sabır ve desteklerinden dolayı değerli annem A. DOĞAN, babam T. DOĞAN ve kardeşlerime şükranlarımı sunarım.

Serhat DOĞAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 13
1.3 Hipotez 13
2 ASENKRON MOTOR 15
2.1 Asenkron Motorun Çalışma Prensibi 17
2.2 Asenkron Motorun Eş değer Devresi 18
2.3 Kayıplar ve Güç 19
2.4 Moment 20
3 ANALİZ YÖNTEMLERİ 22
3.1 Elektromanyetik Analiz Yöntemleri 22
3.1.1 Manyetik Eş Değer Yöntemi 22
3.1.2 Toplu Parametre Modeli Yöntemi 30
3.1.3 Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi 32
3.2 Termal Analiz Yöntemleri 35
3.2.1 Toplu Parametre Termal Ağ Yöntemi 35
3.2.2 Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi 39
3.2.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi 39
4 ASENKRON MOTORUN SONLU ELEMANLAR İLE TASARIMI 40
4.1 Asenkron Motorun Analitik Analizi 40
4.2 Asenkron Motorun Nümerik Analizi 41
5 ASENKRON MOTORUN TERMAL ANALİZİ 48
5.1 Asenkron Motorun Mekaniksel Tasarımı 48
5.2 Asenkron Motorun Termal Analizi 50
6 ASENKRON MOTORUN YAPISAL ANALİZİ 56
6.1 Asenkron Motorun Modal Analizi 56

6.2 Asenkron Motorun Stres Analizi 59
7 SONUÇ **62**
KAYNAKÇA **64**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **69**

SİMGE LİSTESİ

$T_{çıkış}$	Çıkış Torku
e_{ind}	İndüklenen Gerilim
F	İndüklenen Kuvvet
T_{ind}	İndüklenen Tork
φ	Manyetik Akı
H	Manyetik Alan Şiddeti
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
n_{sync}	Senkron Devir Sayısı
$R_{eş}$	Toplam Eş Değer Direnç

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HTC	Heat Transfer Coefficient
LPTN	Lumped Parameter Thermal Network
MED	Manyetik Eş Değer Devresi
SE	Sonlu Elemanlar
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
TPM	Toplu Parametre Modeli
TPTA	Toplu Parametre Termal Ağ

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Hava kuvvetli soğutma sistemi **3**
Şekil 1.2 Motor yüzeyi kanat süzgeçleri **4**
Şekil 1.3 Havalandırma fanları **6**
Şekil 1.4 Halka biçimli soğutma sistemi **7**
Şekil 1.5 Farklı soğutma sistemleri **11**
Şekil 1.6 Elektromanyetik, mekanik, termal, harmonik ve stres analizleri **13**
Şekil 2.1 Asenkron motor **15**
Şekil 2.2 Sincap kafesli rotor **16**
Şekil 2.3 Yuvarlak rotor **16**
Şekil 2.4 Manyetik alan içerisinde bir iletken **17**
Şekil 2.5 Asenkron motor eş değer devre **18**
Şekil 2.6 Mıknatıslanma eğrileri **19**
Şekil 2.7 Güç akış diyagramı **19**
Şekil 2.8 Basitleştirilmiş asenkron motor thevenin eş değer devresi **20**
Şekil 2.9 Bir asenkron motorun tork-hız eğrisi **21**
Şekil 3.1 Manyetik devre **23**
Şekil 3.2 Manyetik eş değer devrenin elektriksel devre benzetimi **24**
Şekil 3.3 B-H eğrisi **25**
Şekil 3.4 Sırasıyla düzenli ve düzensiz manyetik alanlar **26**
Şekil 3.5 UI çekirdeğinin manyetik eş değer devresi **27**
Şekil 3.6 Basitleştirilmiş çevre devresi **27**
Şekil 3.7 Stator oluğu ve manyetik eş değer devresi **28**
Şekil 3.8 Basitleştirilmiş stator oluk manyetik eş değer devresi **29**
Şekil 3.9 Stator ve rotor oluğunun manyetik eş değer devresi **30**
Şekil 3.10 Analiz için gerçekleştirilen aşamalar **32**
Şekil 3.11 Bir, iki ve üç boyutlu sistemlerin ağlara bölünmesi **34**
Şekil 3.12 Bir elektrik motorunun ısı transfer ağı **37**
Şekil 3.13 Isı transfer türleri **39**
Şekil 4.1 Asenkron motorun iki boyutlu geometrisi **41**
Şekil 4.2 Makinanın maxwell iki boyutlu gösterimi **42**
Şekil 4.3 Asenkron motorun ağ yapısı **42**
Şekil 4.4 M19_24G malzemesinin manyetik doyum eğrisi **43**

Şekil 4.5 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı **43**
Şekil 4.6 Manyetik akı dağılımı **44**
Şekil 4.7 Zamana bağlı moment değerleri **45**
Şekil 4.8 Zamana bağlı efektif akım değerleri **45**
Şekil 4.9 Ortalama çekirdek kayıpları **46**
Şekil 4.10 Ortalama girdap (eddy) kayıpları **46**
Şekil 5.1 Asenkron motor geometrisi **49**
Şekil 5.2 Motor geometrisinin yan kesitten görünümü **49**
Şekil 5.3 Maxwell ve steady-state thermal eşleştirme **51**
Şekil 5.4 Mekanik modelin ağ yapısı **51**
Şekil 5.5 Stator çekidek yapısının ısı üretim değerleri **52**
Şekil 5.6 Rotor çekirdek yapısının ısı üretim değerleri **52**
Şekil 5.7 Isı yayılımı **54**
Şekil 5.8 Termal analiz sonuçları **55**
Şekil 5.9 Termal analiz sonuçlarının yan kesiti **55**
Şekil 6.1 Modal analizi için stator yapısı **57**
Şekil 6.2 Modal analizi için ağ yapısı **57**
Şekil 6.3 Doğal frekans altında toplam deformasyon değişimleri **58**
Şekil 6.4 Şaft dişleri ve rulmanlar **59**
Şekil 6.5 Şaft dişleri ve rulmanların ağ yapısı **59**
Şekil 6.6 Stres analizi için belirlenen sınır koşulları **60**
Şekil 6.7 Stres analizi sonuçları **61**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Güç eşlenik değişkenleri **31**
Tablo 3.2 Alan türlerinin farklılıkları **33**
Tablo 4.1 Asenkron motorun etiket değerleri **40**
Tablo 5.1 Temel izolasyon sınıfları **48**
Tablo 5.2 Malzeme özellikleri **50**
Tablo 5.3 Hacim kaybı yoğunlukları **53**
Tablo 5.4 Sınır koşulları **54**
Tablo 6.1 M19_24G malzemesinin yapısal özellikleri **57**
Tablo 6.2 Stres analizi için sınır koşulları **60**

ÖZET

Asenkron Motorun Çoklu Fizik Tasarımı

Serhat DOĞAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yasemin ÖNER

Asenkron motorlar günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanları genellikle sanayi tesisleri ile birlikte ev uygulamalarını da kapsamaktadır. Geniş dağılım ağına sahip olduğundan geliştirilmesi, tasarımcılar tarafından her zaman ilgi odağı olmuştur. Tasarlanması planlanan makinenin performans parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Dolayısıyla kullanılan yazılımlar önem arz etmektedir. Bu tezde genel olarak bir makinanın hangi geliştirme aşamalarından geçtiği vurgulanmıştır. Temel anlamda sırasıyla elektromanyetik, mekanik, termal, harmonik ve stres analizleri ele alınmıştır. Literatür araştırmasında, özellikle elektromanyetik ve termal analiz çeşitlerinin neler olduğu açıklanmıştır. Motor tasarımında uygun olan analiz çeşitleri vurgulanmıştır. Bu tezde, asenkron motorun elektromanyetik ve termal analizleri Sonlu Elemanlar (SE) yöntemi ile yapılmıştır. Bu analizler için sırasıyla Elecronics Desktop ve Ansys Workbench Steady-State Thermal yazılımları kullanılmıştır. Ayrıca harmonik ve stres analizleri için ise sırasıyla Modal ve Static Structural yazılımları kullanılmıştır. Çalışmanın odak noktası termal analiz olarak belirlenmiştir. Çünkü motorda oluşan sıcaklık dağılımı, motor verimini etkilediğinden belirlenen izolasyon sınıfında olması gerekmektedir. Asenkron motorlarda sıcaklık kaynağının sebebi stator ve rotor çekirdeği, stator sargısı ve rotor çubuklarında meydana gelen elektriksel kayıpladır. Bu nedenle elektriksel

kayıpların hesaplanması için Electronics Desktop ile elektromanyetik analiz gerçekleştirilmiştir. Ansys Workbench programında, elde edilen kayıplar Steady-State Thermal yazılımına aktarılmış ve motor yapısındaki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Daha sonra yapısal analiz başlığı altında harmonik ve stres analizleri gerçekleştirilmiştir. Harmonik analiz ile stator yapısında meydana gelen doğal frekanslar saptanmış ve harmoniklerin neden olduğu toplam deformasyonlar elde edilmiştir. Stres analizinde, elektromanyetik analizden elde edilen ortalama moment değeri kullanılarak rotor ve şaft yapısında meydan gelen deformasyon belirlenmiştir. Sonuç olarak bir asenkron motor tasarımının çoklu fizik tasarımı için gerekli olan tüm analizler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu fizik tasarımı, elektromanyetik analiz, termal analiz, harmonik analizi, stres analizi.

ABSTRACT

Multiple Physics Design of Induction Motor

Serhat DOĞAN

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yasemin ÖNER

Induction motors are widely used today. Usage areas generally include industrial facilities as well as home applications. Since it has a wide distribution network, its development has always been the focus of attention by designers. Various software are used to determine the performance parameters of the planned machine. Therefore, the software used is important. In this thesis, it is emphasized which development stages a machine goes through in general. In the basic sense, electromagnetic, mechanical, thermal, harmonic and stress analyzes are discussed, respectively. In the literature research, especially the types of electromagnetic and thermal analysis are explained. The types of analysis suitable for motor design are highlighted. In this thesis, electromagnetic and thermal analyzes of induction motor are made by Finite Element (FE) method. For these analyzes, Elecronics Desktop and Ansys Workbench Steady-State Thermal software were used, respectively. In addition, Modal and Static Structural software were used for harmonic and stress analysis, respectively. The focus of the study was determined as thermal analysis. Because the temperature distribution in the motor affects the motor efficiency, it must be in the specified insulation class. The reason for the heat source in induction motors is the electrical losses in the stator and rotor core, stator winding and rotor bars. Therefore, electromagnetic analysis was performed with Electronics Desktop to calculate electrical losses. In the Ansys Workbench program, the losses obtained

were transferred to the Steady-State Thermal software and the temperature distribution in the motor structure was obtained. Then, harmonic and stress analyzes were carried out under the title of structural analysis. With the harmonic analysis, the natural frequencies occurring in the stator structure were determined and the total deformations caused by the harmonics were obtained. In the stress analysis, the deformation occurring in the rotor and shaft structure was determined by using the average torque value obtained from the electromagnetic analysis. As a result, all the necessary analyzes for the multi-physics design of an induction motor design have been carried out.

Keywords: Multiphysics design, electromagnetic analysis, thermal analysis, harmonic analysis, stress analysis.

1
GİRİŞ

Asenkron motorlar günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer motorlar ile karşılaştırıldıklarında yüksek tork, düşük maliyet, sağlamlık ve kolay bakım gibi özelliklere sahip olduğundan tarih boyunca ilgi çeken bir motor olmuştur. Asenkron motorlar sanayi ve ev tipi uygulamalarında büyük bir alana sahip olmakla birlikte enerji sarfiyatı açısından yüksek değerlere sahiptir. Dolayısıyla bu motorlarla ilgili çalışmalar daha çok verimlilik üzerine yapılmaktadır [1-3]. Asenkron motorların verimliliğini etkileyen başlıca parametrelerden bir tanesi de sıcaklıktır. Sıcaklık, daha çok motor mekaniğini oluşturan yapıların elektriksel kayıplarından meydana gelmektedir. Dolayısıyla tasarımcılar elektriksel kayıpların azaltılması için yoğun bir çaba göstermektedirler.

Asenkron motorlarda stator çekirdeği, stator sargısı, rotor çekirdeği ve rotor çubukları sıcaklığın ana kaynağı olarak gösterilmektedir. Bu yapılar birbirleriyle etkileşim içinde olduklarından sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi önem arz etmektedir.

Motor sıcaklığının azaltılmasına yönelik çalışmalar günden güne önem kazanmaktadır. Motorun mekanik tasarımlarında yapılan değişikliklerin sıcaklığa olan etkisi incelenerek uygun tasarım kombinasyonları hazırlanmaktadır. Bununla birlikte harmonik ve stres gibi yapısal analizler de önem arz etmektedir.

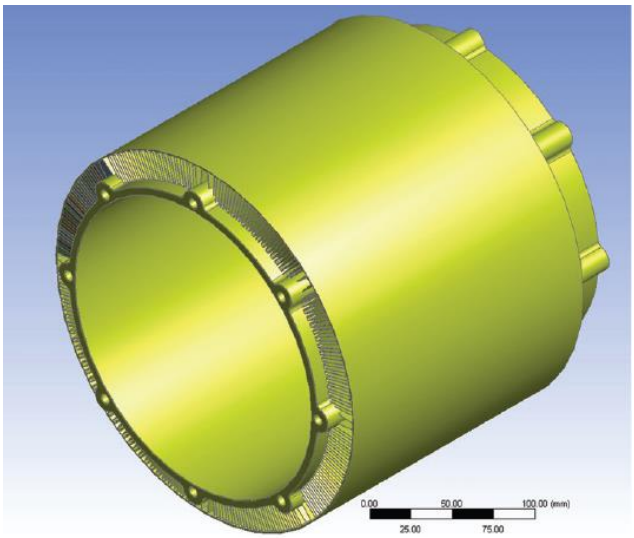
1.1 Literatür Özeti

Ying Xie ve arkadaşları “Coupled Fluid-Thermal Analysis for Induction Motors with Broken Bars Operating under the Rated Load” adlı çalışmada sincap kafesli asenkron motorda rotorun termal stresi üzerinde durmuşlardır. Sıcaklık artışı ve aşırı yük nedeni ile rotor bar çubuklarında meydana gelen değişimleri gözlemlemişlerdir. Bunun için çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD/CFD-Computational Fluid Dynamic) ile sağlıklı ve kırık rotor çubuklarını karşılaştırmışlardır. Kırık rotor çubukları akım akıtmadığı için alüminyum kayıpları da oluşmamıştır. HAD analizlerine göre kırık rotorlu çubuklar rotorun sıcaklığını

artırmıştır. Çalışmada kırık rotor çubuklarının fazla olması, motor sıcaklık artışları üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir [4].

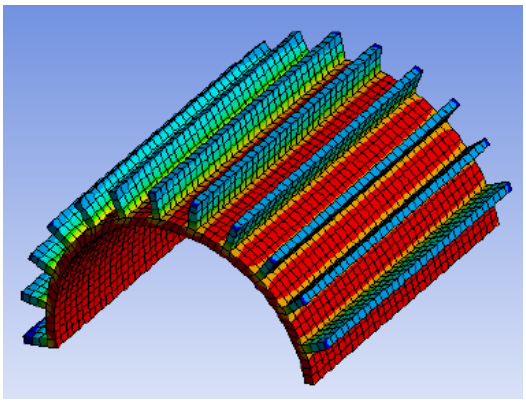
Nasim Arbab ve arkadaşları "Temperature Effects on Steady State Performance of an Induction Machine and a Switched Reluctance Machine" isimli çalışmada asenkron makina ve anahtarlamalı relüktans makinasının termal karşılaştırmalarını yapmışlardır. Sonlu elemanlar analizi (SEA) ile ilk olarak elektromanyetik analiz daha sonra termal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada rotor sıcaklığının asenkron motorun performansı üzerine olan etkisi gösterilmiştir. Yüksek yoğunluklu güç gerektiren uygulamalarda asenkron motorların rotorları daha çok ısındığı için sıcaklığın performans üzerine olan etkisi incelenmiştir. Asenkron motor NEMA standartlarına göre H sınıfı olarak seçilmiştir. H sınıfına göre tüm çalışma koşullarında izolasyon sıcaklık değeri maksimum 180 derecedir. Güvenlik marjı dikkate alınarak 160 derece olarak belirlenmiştir. İki boyutlu SEA'ya göre kayıplar hesaplanmıştır. Termal analiz için ise üç boyutlu SEA kullanılmıştır. Analizlere göre makinanın en sıcak alanı rotor ve sincap kafes yapıları olmuştur. Sıcaklık değeri arttıkça verim azalmış ve stator iletken sıcaklığı 180 dereceye kadar çıkmıştır. Sonuç olarak bir asenkron motorun rotor sıcaklık değerinin artması daha yüksek kayıplara ve düşük verimlere neden olduğu saptanmıştır [5].

Xiaoyuan Wang ve arkadaşları "Thermal comparison of a CFD analysis and a lumped parameter model of an air-cooled induction machine for EVs" adlı çalışmada CFD ve Lumped Parameter Method (LPM) yöntemlerini deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Analizde motor yapısı üzerinde hava kuvvetli soğutma sistemi kullanılmıştır (Şekil 1.1). Hava akışının stator ekseni boyunca hareket etmesinden dolayı stator yüzey alanı sıcaklığı azalmıştır. CFD ve LPM yöntemleri karşılaştırıldıklarında deneysel sonuçlara göre CFD analizi daha doğru sonuçlar vermiştir. Ancak CFD analizi, LPM analizine göre daha uzun zaman almıştır. Ayrıca hava soğutmalı asenkron motorda sargı uçlarında termal olarak iletken emprenye malzemesinin kullanılması sargı sıcaklığını azaltmıştır [7].



Şekil 1.1 Hava kuvvetli soğutma sistemi [7]

M. B. Bhambere ve S. S. Chaudhari "Numerical analysis of heat transfer from perforated fins of an induction motor housing" adlı çalışmada asenkron motorun yüzey kısmına yerleştirilen kanatların soğutma etkisini incelemişlerdir. Kararlı hal ısı transferini ve sıcaklık değişimlerini gözlemlemişlerdir. Çalışmada motor yüzeyine yerleştirilen kanat geometrisinin, sıcaklık performansını geliştirilebileceği belirtilmiştir. Motor yüzeyi ile çevre arasındaki konveksiyon ısı transferi 20 W/m^2 iken dökme demirden yapılan motor yüzeyinin termal konveksiyon ısı transferi 53 W/m^2 olarak belirtilmiştir. Ancak mekanik modele uygulanan sınır koşulları çerçevesinde konveksiyon ısı transferi 20 W/m^2 olarak girilmiştir. 5 farklı kanat yapısı tasarlanmıştır. Kanatlarda; 4, 6, 8 ve 10 mm çaplarında ayrı ayrı oluklar yerleştirilmiştir. Termal analiz sonuçlarına göre motor yüzeyi ve kanatlar arasındaki sıcaklık farkı, en çok 10 mm çapında olan geometride meydana gelmiştir. Sonuçlarda, kanatlarda bulunan olukların yüzey alanının artırılmasıyla asenkron motorun yüzeyinden ısı transferinin yükseldiği belirtilmiştir [7].



Şekil 1.2 Motor yüzeyi kanat süzgeçleri [7]

Poznan Teknoloji Üniversitesinden Mariusz Baranski, "FE analysis of coupled electromagnetic-thermal phenomena in the squirrel cage motor working at high ambient temperature" isimli çalışmasında sıcaklık değeri yüksek olan bir ortamda, sincap kafesli asenkron motorun termal analizini incelemiştir. Stator oluk rotor bar geometrilerinin termal analizleri yapılmıştır. Analizlere göre en yüksek sıcaklık farkları stator oluğunda oluşmuştur. Bunun başlıca ana nedeni stator çekirdeği ve sargı arasındaki izolasyondan kaynaklandığı belirtilmiştir. Ancak rotordaki bar çubuklarında izolasyon olmadığından sıcaklık, rotor çekirdeğine daha hızlı nüfus ettiği vurgulanmıştır. Ortam sıcaklığı motor yapımında kullanılan metalin iletkenliğini değiştirdiği için sargı direncinin de değişmesine neden olduğu gösterilmiştir. Ortam sıcaklığı arttıktan sonra motorun çevreden emdiği sıcaklık değeri de artmıştır [8].

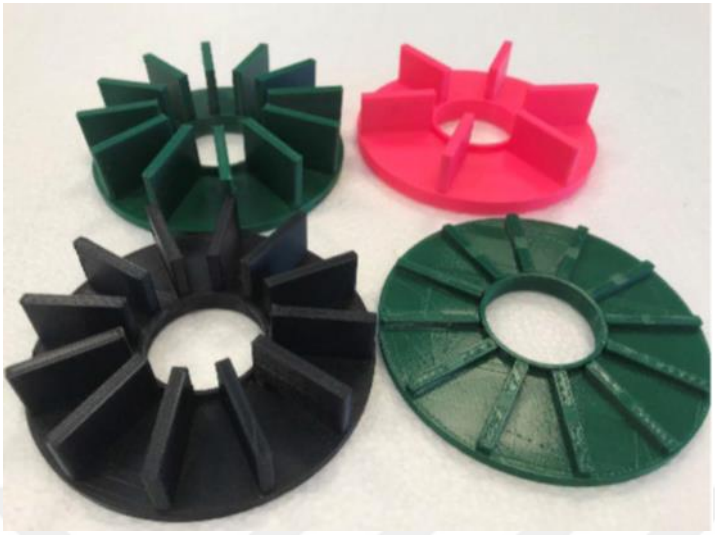
Selma Corovic ve arkadaşları "Modeling of Thermal Effects in Induction Machines due to the Stator End-Windings" isimli çalışmada asenkron makinanın stator sargı ucunun neden olduğu termal etkileri incelemişlerdir. CFD analizi ile soğutma havası ve sargı ucu arasındaki ısı transfer katsayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada CFD analizi, Lumped-Parameter Thermal Network (LPTN) analizine göre daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Kullanılan geometri kompleks bir yapıya sahip olduğundan doğru analiz sonuçları için CFD analizinin önemi vurgulanmıştır. Uzun sargı uçlarına sahip makinalarda, sargı ucundaki bakır miktarı stator oluklarında bulunan bakır miktarından önemli derece büyük olabileceğinden dolayı çalışmada özellikle sargı uçlarındaki termal sıcak alanlarına önem verilmiştir. CFD analizinde eksenel ve radyal ortalama hava hızları 7,1 ve 14,3 m/s olarak belirlenmiştir. Eksenel ve radyal hızlara göre makinanın sargı ucu ve ilgili

hava bölgesinin ısı transfer katsayısı belirlenmiştir. Ayrıca hesaplanan ısı transfer katsayısının LPTN analizi için modellemede büyük öneme sahip olduğu vurgulanmıştır [9].

Shafigh Nategh ve arkadaşları "Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors" isimli çalışmada demir yollarında kullanılan elektrik motorunun termal analizi ve deneyi üzerine çalışmışlardır. Demir yollarında kullanılan motorlar kirli hava şartlarında çalıştığından kirlenen stator ve rotor kanalları motorun termal performansını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Tasarlanan termal model için Sonlu Eleman (SE) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizinde ısı transfer sınır koşulları kirli hava koşullarına göre belirlenmiştir. Çalışmada çekiş motorlarında kir birikmesi ile stator ve rotor kanallarının tıkandığı ve bunun ise stator sargıları ile rulmanların yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığı bildirilmiştir. CFD hesaplaması ile elde edilen ısı transfer katsayısı (HTC-Heat Transfer Coefficient) analitik olarak fan hızı ve motor tabanlı olarak ölçeklendirilmiştir. 3D CFD hesaplamaları; stator kanalları, hava boşluğu ve rotor kanalları arasında havanın kompleks dağılımı için yapılmıştır. Ayrıca, motor ucu parçalarındaki hava hızı tahmini sağlanmıştır. Yani önerilen termal modelde CFD hesaplaması, tam olarak doğru bir fan çalışma noktası belirlemiştir. Deneysel çalışmada, 250 kW hava soğutmalı MITRAC DR 1500 model demir yolları uygulamaları için asenkron motor kullanılmıştır. Rotor dökümü alüminyum olup hem stator hem de rotor yapısı M600 çelik laminasyonlardan yapılmıştır. Deney motorunda sargı uçlarının sıcak noktalarında ve her iki rulmanda PT100 sensörleri kullanılmıştır. Bununla birlikte stator laminasyonlarında ve stator kanallarında iki adet sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. CFD analiz sonuçlarında kirli olmayan stator kanallarında sıcaklık değeri 198 derece iken stator kanallarının kirli olduğu analizde sıcaklık değeri 221 derece olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldıklarında yakın sonuçlar elde edilmiştir [10].

Mario Vukotic ve arkadaşları "Thermal Effects in the End-Winding Region of Electrical Machines" adlı çalışmada, elektrik makinalarının sargı sonu bölgesinin ısı transfer analizini farklı bir teknik donatı ile incelemişlerdir. Çalışma, düşük motor hızlarında soğutma için yeterli olmayan soğutma sistemini geliştirmek üzere yapılmıştır. Bu incelemede, bir dizi bıçak yapısıyla donatılmış rotorun soğutma faktörü üzerine çalışılmıştır. Rotor ağzına yerleştirilen farklı bıçak geometrilerinin

ısı transfer analizleri yapılmıştır. Aşağıda görüldüğü gibi farklı bıçak kombinasyonları ile havalandırma fanları üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir.



Şekil 1.3 Havalandırma fanları [11]

Havalandırma fanları çeşitli sayılar ve yüksekliklerle tasarlanmıştır. Bu fanlar, CFD analizi için gerçek geometrilerde tasarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde farklı geometrilere sahip olan havalandırma fanları ile ısı transfer katsayıları (HTC) her bir geometri için türetilmiştir. Gerçek deneysel sonuç değerleri ile de yakınlık gösterdiği görülmüştür. Bu çalışmanın ileride LPTN ile tasarlanmış termal modellere öncülük edeceği vurgulanmıştır [11].

Sameer Madhavan ve arkadaşları "Thermal Analysis and Heat Management Strategies for an Induction Motor, a Review" isimli çalışmasında Sonlu Elemanlar, Toplu Parametre Termal Ağ (TPTA) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz araçlarını kapsamlı bir şekilde karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Termal analiz yaklaşımlarını görsel ve deneysel olarak gruplandırarak bütün yaklaşımlar hakkındaki olumlu ve olumsuz özellikleri belirtmişlerdir. Karmaşık geometrilerde SEA yöntemi LPTN yöntemine göre yüksek doğruluklu sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Bir diğer karşılaştırma ise çeşitli soğutma stratejileri üzerine olmuştur. Bu stratejiler temel olarak üç sınıfa ayrılarak aşağıda belirtildiği gibi güçlü ve zayıf yanları ortaya çıkarılmıştır. Bu stratejiler temel olarak üç sınıfa ayrılarak dışarıdan verilen sıcaklık kaynağı değerlerine göre aşağıda belirtildiği gibi güçlü ve zayıf yanları ortaya çıkarılmıştır.

Hava Soğutmalı

Güçlü yanları: Kanat konfigürasyonu ile hava kanallarını geliştirme; stator, rotor çekirdekleri ve rulmanlar için verimli ve ucuz tasarım sağlama.

Zayıf yanları: Kompleks tasarım geometrisi.

Sıvı Soğutmalı

Güçlü yanları: Stator ve rotor boyunca uygun sıcaklık dağılımı sağlama, sıvı ile ısı transfer katsayısını artırma.

Zayıf yanları: Malzeme seçimi ve maliyet, kompleks geometri tasarımı, sıvının düşme basıncı ve pompalama gücünü artırma.

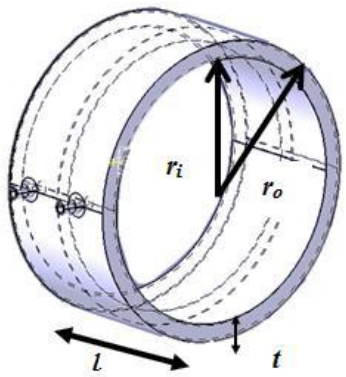
Isı Boruları Soğutmalı

Güçlü yanları: Daha büyük ölçüde motor muhafazası soğutma.

Zayıf yanları: Isı borularının motor muhafazasına yerleştirilmesinin zor olması, yüksek maliyet.

Sonuç olarak yüksek verimlilik gereken uygulamalarda kullanılan asenkron motorlar için bu çalışmanın uygun soğutma sisteminin nasıl seçileceği vurgulanmıştır [12].

Zainal Ambri ve Abdul Hadi, "Cooling System for Electric Motor of an Electric Vehicle Propulsion" adlı çalışmada, asenkron motor için tasarlanmış halka biçimindeki soğutma sisteminin yapısal özelliklerinin değiştirilmesiyle analiz sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Aşağıdaki geometriye sahip bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 1.4 Halka biçimli soğutma sistemi [13]

Bu tasarım geometrisinde etilen glikol ve su karışımları kullanılmıştır. Soğutma sisteminin 5500 W'lık bir ısıyı dağıttığı varsayılmıştır. Analizde halka boşluğunun 1 cm'den 4 cm'ye, duvar kalınlığının ise 0,5 cm'den 1,5 cm'ye değiştirilmesiyle sonuçlar elde edilmiştir. Duvar kalınlığının etkisi ve halka boşluğu kalınlığı oransal olarak soğutma gereksinimi için ters orantılı olduğundan halka boşluğu ve duvar kalınlığı ne kadar kalın olursa su haznesinin soğutma gereksinimi o kadar düşük olduğu belirtilmiştir. Yani, soğutma kapasitesinin en yüksek düzeyde olması için optimum su haznesi kalınlığının 0,5 cm olarak seçilmesi belirtilmiştir. Ayrıca su haznesinin yapımında kullanılmak üzere alüminyum ve bakır metallerinin de analizi yapılmıştır. Her iki metal yakın sonuç verdiği için maliyet ve kolay üretim açısından alüminyum malzemenin kullanılması belirtilmiştir [13].

Anuprita Bhosale ve arkadaşları "Air flow analysis of 20 hp three phase induction motor" isimli çalışmada, CFD analizi ile bir asenkron motorun hava akışının termal etkisini incelemişlerdir. Makinanın komple motor modelini CATIA programı ile oluşturmuşlardır. Makinadaki kayıpların %95'ini bakır ve demir kayıpları oluşturduğu için diğer kayıplar ihmal edilmiştir. Kayıpların elde edilmesinde elektromanyetik analiz olarak Motorsolve programı kullanılmıştır. Hava akışı analizinde harici kanatların davranışları da ele alınmıştır. Stator ve rotor çekirdeğinde transformatör çeliği kullanılmıştır. Ayrıca stator sargıları bakırdan ve rotor çubukları ile uç halkalar alüminyumdan yapılmıştır. Bu çalışmada motor muhafazasında ele alınan toplam kanat sayısı 41 olmuştur. Ağ analizi için ise ICEMCFD programı kullanılmıştır. Motor muhafazasında kullanılan kanatların artırılması ile motor muhafazasındaki sıcaklık değerinin azalacağı belirtilmiştir. Çalışmada, motor üzerindeki hava akışı ve muhafaza ile kanatlar üzerindeki sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Yapılan analizlerde hava akışı FLUENT yazılımı ile incelmiştir. Hava akışının motor girişinde yüksek olduğu ancak yüzey alanında düşük olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte havanın motor içinden geçmediği anlaşılmıştır. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ise motor muhafazası üzerindeki sıcaklık değeri 350 Kelvin'e kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Ancak yüzey kanatlarında sıcaklık değerlerinin 295 Kelvin'e kadar düştüğü gözlenmiştir. Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde anma durumunda, sıcaklık artışlarının bakır ve çekirdek kayıplarına bağlı olduğu vurgulanmıştır [14].

Marek Gebauer ve arkadaşları, "Determination of Aerodynamic Losses of Electric Motors" adlı çalışmada, asenkron makinanın detaylı geometrisi ile CFD analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı asenkron motorun iç ve dış aerodinamiğinin incelenmesidir. Isı transfer katsayısının (HTC) doğru belirlenmesi ileriki sonlu elemanlar analizleri için kritik öneme sahip olduğundan CFD analizinin önemli olduğu belirtilmiştir. Motorun hem iç hem de yüzeysel hava akış analizleri yapılarak uygun ısı transfer katsayılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın bir bölümünde stator ve rotor arasındaki hava boşluğunun termal iletkenliğinin etkisi incelenmiştir. Buna göre ısı transfer katsayısının 0,0029 W/m^2K'den 0,24 W/m^2K'ye çıkarılmıştır. HTC'nin değişmesiyle rotor sıcaklığı önemli ölçüde azalırken stator sıcaklığı artmıştır [15].

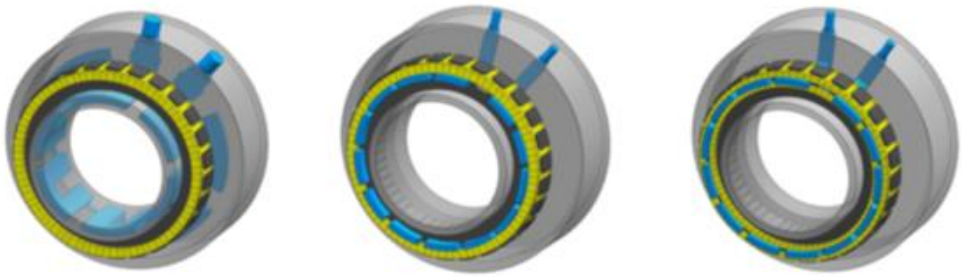
Jian Zhang ve arkadaşları "Insulation Degradation Analysis Due to Thermo-Mechanical Stress in Deep-Sea Oil-Filled Motors" adlı çalışmada, derin deniz yağ dolu (DDYD) motorlarda izolasyon ömrünü geliştirebilecek teknikten söz etmişlerdir. Teknik için stator izolasyonuna önem verilmiştir. Çalışma üstün performans sergileyebilen fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. Derin deniz ve suyun tuzluluğundan dolayı oluşan yüksek basınç motor izolasyonuna zarar verdiğinden ısı ve mekanik stres azaltılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. CFD analizi ile artan viskoz sürtünme kayıplarının sıcaklık üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışma, kullanıcı tanımlı viskozite kullanarak motorun sıcaklık alan hesabını tam olarak doğru geliştirmeyi amaçlamıştır. Viskozite sıvı sıcaklığı ile yakın ilişki içerisinde olduğundan dolayı viskoz kayıplarını hesaplamak için sıcaklık değerlerinin dikkate alınması belirtilmiştir. Motorun 3D modeli CFD analizinde kullanılarak farklı sıcaklıklarda yağ viskozitesi elde edilmiş ve bu viskozitelere karşılık gelen kayıplar belirlenmiştir. DDYD motorunun sıcaklık dağılımı incelendiğinde maksimum sıcaklık 327 K iken minimum sıcaklık ise 321 K olarak hesaplanmıştır. Motorun optimum çalışma basıncı 20 MPa olarak seçilmiştir. Bu değer, üç farklı stator oluk derinliğinde analiz edilerek belirlenmiştir. Ortalama ısı ve mekanik stres değeri hem sıcaklık hem de basınçtan etkilenmiştir. Analitik sonuçlar nümerik sonuçlar ile yakın benzerlik göstermiştir. Sonuç olarak deniz suyu basıncı, stator izolasyon bozulmasını kolaylaştırabileceği ve motor hizmet ömrünü uzatabileceği belirtilmiştir [17].

Peng Chen ve arkadaşları “Thermal Field and Stress Analysis of Induction Motor with Stator Inter-Turn Fault” isimli çalışmada, çoğunluk stator sarım dönüşleri arasında meydana gelen hataların neden olduğu problemlere değinmişlerdir. Alternatif akım makinalarında, dönüşler arası hatalar en yaygın stator hatası olduğu belirtilmiştir. 24 stator oluğuna sahip motorda 2 tane hatalı oluk yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca stator oluklarında tahtadan yapılmış kamalar da kullanılmıştır. Bakır ve boşta çalışma kayıpları deneysel değerler ile hesaplanırken çekirdek, rotor alüminyum kayıpları elektromanyetik simülasyon ile hesaplanmıştır. Hatalı sargılardan sonran her bir fazın bakır kayıpları ve motorun bakır kayıpları önemli ölçüde artmıştır. Elektromanyetik analiz sonucu hatalı stator oluklarının bulunduğu noktalara bakıldığında sıcaklık değerlerinin artığı gözlenmiştir. Üç boyutlu ısı analizi yapıldığında normal motora göre hatalı sargıya sahip motorda, rotor ve stator çekirdeklerinde sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Sıcaklık artışının en çok olduğu yer rotor çubukları üzerinde gerçekleşmiştir. Termal stres analizi yapıldığında en çok deformasyon rotor fan pozisyonunda meydana gelirken en az deformasyon ise eksenel bar çubuklarında meydana gelmiştir. Normal ve hatalı rotorlar karşılaştırıldıklarında %19,7 oranında deformasyon meydana gelmiştir. Genel değerlendirme yapıldığında, sincap kafesli rotorda maksimum termal stres rotor halka sonu noktasına yakın çubukların altında meydana gelmiştir. Hatadan sonra ise önemli ölçüde rotor sıcaklığı artmıştır [17].

Atazaz Hassan ve arkadaşları “Comparative Thermal Analysis of Carbon Nanotubes and Their Metal Composites with Copper and Aluminum as Winding Material in Induction Motor” adlı çalışmada, sargılama malzemesi olarak bakır ve alüminyum ile karbon nano tüp malzemelerin termal analizlerini incelemişlerdir. Karbon nano tüplerin hafif ağrılık, küçük yüzey / deri etkisi, yüksek mekaniksel verim, düşük maliyet ve bakıra göre üç kat daha fazla akım yoğunluğu taşıma özellikleri vurgulanmıştır. Makinanın sonlu elemanlar analizi COMSOL Multiphysics yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Makinanın stator sargısı için bakır, alüminyum, bakır, karbon nano tüp, karbon nano tüplü alüminyum ve karbon nano tüplü bakır malzemeleri kullanılmıştır. Analizde 0,33 ve 5 saatlik sonuçlar elde edilmiştir. Makinanın 5 saatlik çalışma sonuçlarına göre en yüksek sıcaklık değerine ulaşan sargı, sadece karbon nano tüpünden yapılan motor olmuştur. Karbon nano tüp malzemesi yüksek rezistife sahip olduğundan sıcaklık

performansını olumsuz etkilemiştir. Ancak iletkenliğin artırılmasıyla bu olumsuz etkinin azaltılacağı belirtilmiştir. Çalışmada yapılan analizlere göre karbon nano tüplü bakır sargı malzemesi en uygun sonuçları vermiştir. 5 saatlik çalışma analizinde maksimum sıcaklık 63,47 °C olarak ölçülmüştür. Oysa sadece karbon nano tüpün kullanıldığı sargıda maksimum sıcaklık 108,2 °C idi. Makinada kullanılan karbon nano tüplü bakır bileşiği diğer malzemelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunlarla birlikte, tasarlanan asenkron makinanı daha hafif olacağı belirtilmiştir [18].

Changbo Guo ve arkadaşları, "Electromagnetic-thermal coupling analysis of a permanent-magnetin-wheel motor with cooling channels in the deepened stator slots" adlı çalışmada, tekerlek içerisine yerleştirilen kalıcı mıknatıslı motorlarda meydana gelen ısı problemini gidermek farklı bir yaklaşım sergilemişlerdir. Bu tarz motorlar tekerlek içerisinde dar bir alanda bulunduğundan ısı yayılımının yeterli olmadığı belirtilmiştir. Kalıcı mıknatıslı motorun soğutma performansını geliştirmek için derinleştirilmiş stator oluğuna hareket eden soğutma kanalları yerleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda bu tarz motorlarda soğutma sistemi geometri olarak kompleks yapılara sahip olmadığından üreticiler tarafından pahalı ve zor sistemler olduğu belirtilmişse de yazarlar, basit geometriye sahip bir hareketli soğutma sistemi tasarlamışlardır. Üç farklı biçimde soğutma sistemini motora yerleştirmişlerdir.



Şekil 1.5 Farklı soğutma sistemleri [19]

Soğutma sistemleri sırasıyla muhafaza kısmına, stator oluklarının alt kısmına ve stator oluğunun ortasına yerleştirilmiştir. Termal analiz gerçekleştirildiğinde en yüksek sıcaklık 153,7 °C'de muhafaza kısmında meydana gelirken en düşük sıcaklık ise 129,5 °C olup soğutma sisteminin stator oluğunun ortasında olan kısmında meydana gelmiştir. En yüksek sıcaklık sargılarda meydana gelmiştir.

Isının büyük bir kısmının sargılarda üretilmesi ve soğutma ile sargılar arası ısı akış yolu boyunca izolasyon yüzeyi ile hava tabakası arasındaki termal iletkenliğin düşük olması bu durumun nedeni olarak belirtilmiştir. Geliştirilen teknik ile ayrıca sargı direnci de düşmüştür. Sonuçlar incelendiğinde hareketli soğutma kanalları derin stator oluğunun altından çıkartılıp orta kısmına yerleştirildiğinde sargılar ile soğutma kanalları arasındaki temas artmıştır. Böylece daha iyi soğutma performansı elde edilmiştir. Ancak az da olsa motor veriminde %0,02'lik bir düşüş gözlenmiştir [19].

M. Appadurai ve arkadaşları "Finite element design and thermal analysis of an induction motor used for a hydraulic pumping system" adlı çalışmada hidrolik pompa uygulamalarında kullanılan asenkron motorların soğutma sisteminin geliştirilmesi için termal analiz gerçekleştirmişlerdir. Termal analiz için Flux 2D ve Motor-CAD yazılımları kullanılmıştır. Basit bir stator oluğunun sıcaklık analizi incelendiğinde en yüksek sıcaklık 142 °C ve çekirdeğe yakın yerde görülmüştür. Muhafazaya yakın çekirdeğin üst taraflarında ise sıcaklık değeri 127 °C olarak saptanmıştır. Aşırı sıcaklığın doğal bir konveksiyon ile çevre etrafına yayılmasına ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Bundan dolayı çalışmada eksenel yüzgeç kullanılmasına karar verilmiştir. Kullanılan yüzgeçler 5 ile 20 mm arasındaki uzunluklara sahiptir. Ayrıca yüzgeç sayıları 20 ile 44 arasında belirlenmiştir. Motor kasa yüzeyi ve atmosfer arasındaki konveksiyon ısı transfer katsayısı 15 Wm^2/K olarak alınmış ve çevre sıcaklığı 28 °C olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde yüzgeç uçlarındaki sıcaklığın en düşük olarak belirlendiği yüzgeç tasarımı 44 yüzgeçli ve 15 mm yüksekliğindeki kombinasyon olmuştur [20].

Dongguk Üniversitesinden Zabdur Rehman ve Kwanjae Seong "Three-D Numerical Thermal Analysis of Electric Motor with Cooling Jacket" isimli çalışmada, soğutma ceketli motor analizini gerçekleştirmişlerdir. 90 kW'luk güce sahip olan bir asenkron motor için çevresel yüzeye sahip su soğutmalı kasa kullanılmıştır. Soğutma ceketi çeşitli giriş ve çıkış kombinasyonları ile tasarlanmıştır. Su ceketinin su soğutmalı akış hızı dakikada 5 ve 30 litre arasında ayarlanmış ve giriş sıcaklığı 40 °C olarak belirlenmiştir. Soğutucu devresinin pompalama gücü giriş ve çıkış arasındaki basınç düşüşünden oluşturulmuştur. Analizde soğutucu yüzeyindeki geçişler farklı sayılarda tasarlanmıştır. En düşük yüzeye sahip soğutucuda sıcaklık 388 °K iken en yüksek yüzeye sahip soğutucuda

ise sıcaklık 357 °K olarak ölçülmüştür. Soğutma kasasında akış geçişlerinin sayısı artırıldığında motor maksimum sıcaklığı azalmıştır. Ancak pompalama için gereken güç miktarı artmıştır. Bütün değerlendirilmelere bakıldığında 6 su geçişli soğutma geçişli ve birer giriş ile çıkışa sahip olan soğutma kasası tercih edilmiştir [21].

1.2 Tezin Amacı

Asenkron motorlarda çeşitli yöntemlerle verimliliğin artırılması her zaman çalışma konusu olmuştur. Verimliliği etkileyen faktörlerin bir bütün olarak incelenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda başlangıçta belirlenen tasarım parametrelerine göre asenkron motorun elektromanyetik, mekanik, termal, harmonik ve stres analizleri gerçekleştirilmiştir. Asenkron motorlarda sıcaklık değerleri, daha çok çekirdek ve bobin gibi yapılarda yüksek değerlere sahiptir. Bundan dolayı çalışmanın odak noktası temel anlamda termal yayılımının belirlenmesi olmuştur. Başlangıçta motorun mekanik tasarım parametreleri belirlenmiştir. Sonrasında, motorun elektriksel ve mekaniksel kayıplarının hesaplanması için elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni oluşan elektriksel kayıpların sıcaklığa neden olmasıdır. Ayrıca motorun sıcaklık değerini artması daha çok bu kayıplardan kaynaklanmaktadır. Elektromanyetik analizlerden sonra elde edilen kayıplara göre motorun termal analizleri yapılmıştır. Bu analizlere göre sıcaklık yayılımının nasıl gerçekleştiği saptanmıştır. Daha sonrasında ise makinanın yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Yapısal analizlerde harmonik ve stres etkileri gözlenmiştir. Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında Şekil 1.6'da belirtilen analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.6 Elektromanyetik, mekanik, termal, harmonik ve stres analizleri [22]

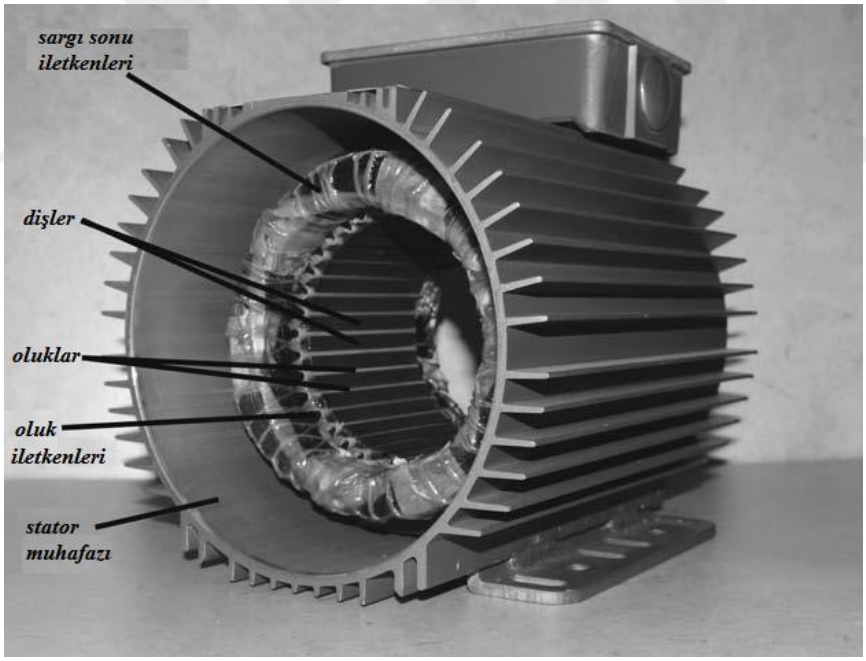
1.3 Hipotez

Asenkron motorlarda verimlilik üreticiler için önemli bir konudur. Elektromanyetik ve mekaniksel tasarım verimliliği etkilemektedir. Üreticiler bir makinanın üretime

geçmesinden önce tasarladıkları ürünlerin belirlenen standartlar içerisinde olup olmadığını kontrol etmek isterler. Ancak bunun gerçekleştirilmesi, maliyet açısından olumsuz etkilere sahiptir. Bu olumsuz etkiler, gerçekte çeşitli analiz yöntemleri ile giderilebilmektedir. Aslında gerçekleme analizlerinde makinanın bütün donanımsal çıktıların alınması mümkün olmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada tasarlanmak istenen makinada her türlü yapısal analizin detaylı bir şekilde elde edilmesi ile makinanın üretim aşamasına geçmeden önce verimliliği incelenmiştir. Bununla birlikte, tasarlanması planlanan makinanın hangi yöntem ile analiz edilmesi gerektiği açıklanmıştır. Asenkron makinaların zorlu ve kötü şartlarda çalışma durumu göz önüne alındığında yapılacak olan manyetik, termal ve stres analizleri tıpkı gerçek hayatta olduğu gibi gerçek performans çıktılarının alınmasına yardımcı olmuştur. Genel değerlendirme yapıldığında makina tasarımının hangi analiz aşamalarından geçmesi gerektiği kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışma asenkron motor tasarımcıları için genel bağlamda yol gösterici bir kaynak olarak değerlendirilebilir.

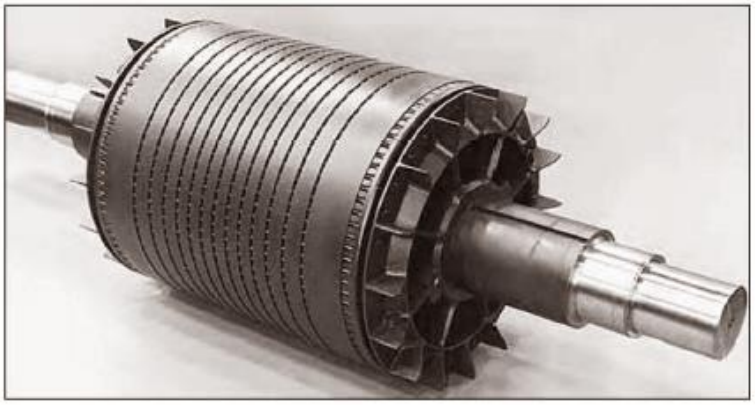
2
ASENKRON MOTOR

Asenkron makinalar motor ve generatör çalışma için tasarlanabilirler. Ancak generatör tasarımlarında çeşitli dezavantajlara sahip olduğundan genellikle motor olarak tasarlanmaktadır. Genellikle pompalar, kompresörler, asansörler, karıştırıcılar, elektrik araçları ve sondaj makinaları gibi alanlarda kullanılırlar. Bir asenkron motorun stator yapısı tıpkı senkron makinenin stator yapısına benzemektedir. Senkron makinadan farklı olarak asenkron motorun hareket etmesi için doğru akım kaynağına gerek yoktur. Asenkron motorlar genellikle iki tip rotor yapısına sahiptir: sincap kafesli rotor ve bilezik rotorlu. Bu iki tür rotor yapısının birbirlerine karşı üstünlükleri vardır. Bilezik rotorlu asenkron motorlar diğer türe göre pek yaygın değildir. Ancak sadece özel uygulamalarda kullanılırlar [23, 24].



Şekil 2.1 Asenkron motor [25]

Sincap kafesli rotorlar (Şekil 2.2) düşük başlama torklarına sahiptirler. Rotor yüzeyinde veya çekirdek altında bulunan çubuklar halka sonları kısa devre edilmiştir. Bilezik rotorlulara göre kayma halkaları olmadığı için daha az bakım gerektirirler. Ayrıca bakır kayıpları düşük, verimleri yüksektir.



Şekil 2.2 Sincap kafesli rotor [23]

Şekil 2.3'te bilezikli rotor yapısı gösterilmiştir. Bu rotor yapısı sincap kafesli rotorlara göre yüksek bakır kayıplarını içerir. Rotor yapısına eklenen kayma halkalarından dolayı rotor direnci yüksektir. Böylece başlama akımları düşük, yüksek başlama torku ve verim düşüklüğüne neden olmaktadır. Sincap kafesli rotorlara göre maliyetleri yüksektir. Ayrıca bilezikli rotora eklenen dirençlerden dolayı başlama anındaki kalkış momentini belirli bir seviyede tutmak mümkündür.



Şekil 2.3 Yuvarlak rotor [23]

Asenkron motorların genel avantajları [26, 27]:

- düşük maliyet
- uygun bakım maliyeti
- çalışma kolaylığı
- hız değişkenliği
- dayanıklılık

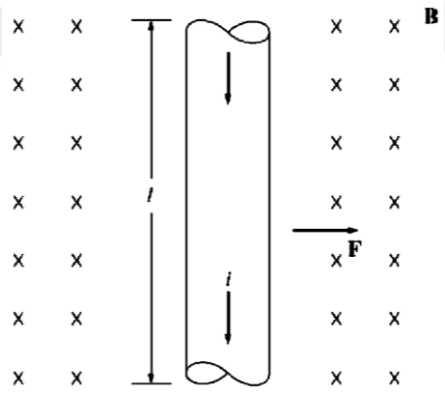
Asenkron motorların genel dezavantajları [26, 27]:

- düşük yüklerde güç faktörünün az olması
- sincap kafesli rotorun yuvarlak rotora göre daha düşük başlama torkuna sahip olması
- motor hız kontrolünün zor olması
- yüksek başlama torkundan dolayı gerilim düşümlerinin olması

2.1 Asenkron Motorun Çalışma Prensibi

Asenkron motorlar senkron motorların aksine manyetik alan oluşumu için dışardan harici bir doğru akım kaynağına gerek duymamaktadır. Stator sargısına uygulanan gerilim ile transformatörlerdeki gibi rotor sargısında bir gerilim indüklenmektedir. En temel denklem (2.1) ile ifade edilirse Şekil 2.4'deki manyetik alan içerisinde hareket ettirilen bir iletkende kuvvet indüklenecektir [23, 24].

$$F = ilB \tag{2.1}$$



Şekil 2.4 Manyetik alan içerisinde bir iletken [23]

Üç fazlı bir asenkron motorun stator sargılarına gerilim uygulandığında stator sargılarında akım akmaya başlar. Akımın akmasıyla sargılarda manyetik alan oluşur. Manyetik alan çizgilerinin dönme hızı sargılara uygulanan gerilimin frekansına ve motor kutup sayısına bağlıdır.

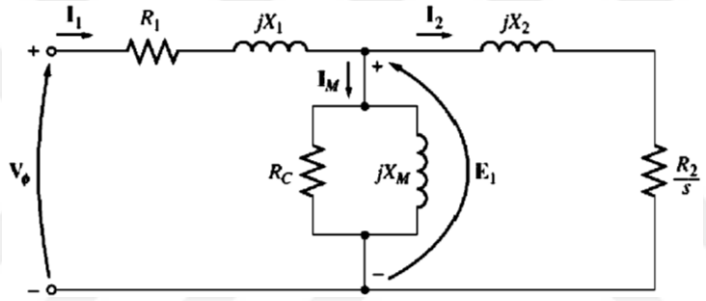
$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} \tag{2.2}$$

Stator sargılarında oluşan manyetik alan çizgileri rotor sargılarını kesmeye başlar. Denklem (2.3)'de görüldüğü gibi rotor akımları, stator akımlarının zamanla değişmesiyle rotor sargılarında bir gerilim indükler [23, 24].

$$e_{ind} = (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})l \tag{2.3}$$

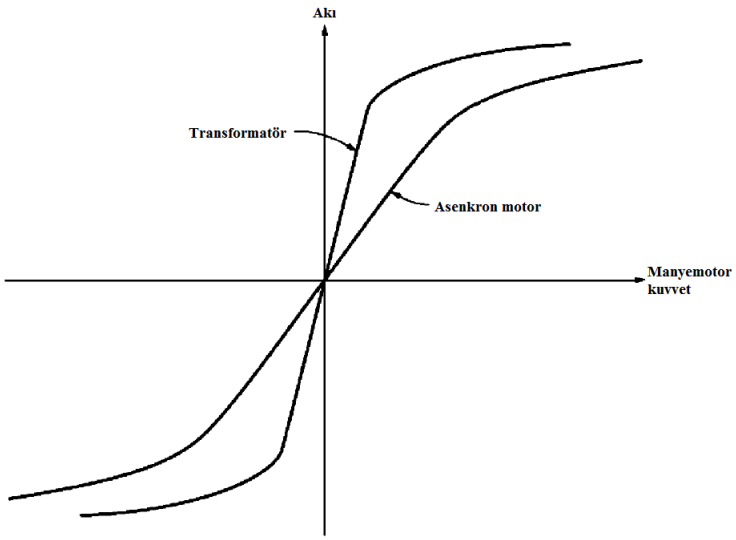
2.2 Asenkron Motorun Eş değer Devresi

Asenkron motorun eş değer devresi bir transformatörün eş değer devresine benzemektedir. Asekron motorda stator ve rotor sargıları transformatörün primer ve sekonder sargılarına benzer. Ancak tek fark asenkron motorda rotor sargısı hareketli iken transformatörde sekonder sargı durağandır. Bu nedenle eş değer devre modeli çıkarılmak istendiğine transformatör eş değer devresine benzetim yapılabilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Asenkron motor eş değer devre [23]

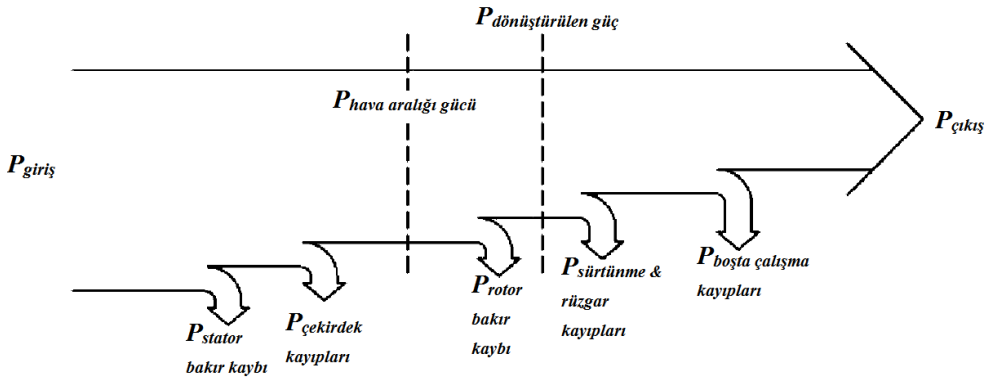
Her iki makine için mıknatıslanma eğrileri değerlendirildiğinde asenkron makinanın mıknatıslanma eğrisinin daha sığ olduğu görülebilir (Şekil 2.6). Bunun nedeni stator ve rotor yapıları arasındaki hava boşluğundan kaynaklanmaktadır. Transformatör ve asenkron motor için aynı manyetomotor kuvvet uygulandığında asenkron motorda daha küçük bir mıknatıslanma oluşacaktır. Hava boşluğu makine yapısında bir relüktans meydana getirdiğinden aynı mıknatıslanma eğrisinin oluşması için daha çok akım çekecektir.



Şekil 2.6 Mıknatıslanma eğrileri [23]

2.3 Kayıplar ve Güç

Asenkron motorlarda stator bakır kayıpları, rotor bakır kayıpları, stator ve rotor çekirdek kayıpları, sürtünme ve rüzgâr kayıpları ile boşta çalışma kayıpları bulunmaktadır [23, 28]. Bu kayıplar makinanın normal çalışma durumlarında sıcaklık değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra güç akışında çıkış gücünü etkilediğinden verimi de olumsuz etkilemektedir.



Şekil 2.7 Güç akış diyagramı [23]

Şekil 2.7 detaylı incelendiğinde hava aralığı gücünün stator bakır ve çekirdek kayıplarından sonra oluştuğu görülebilir. Bu güç aslında direkt olarak rotor yapısına aktarılan güçtür.

2.4 Moment

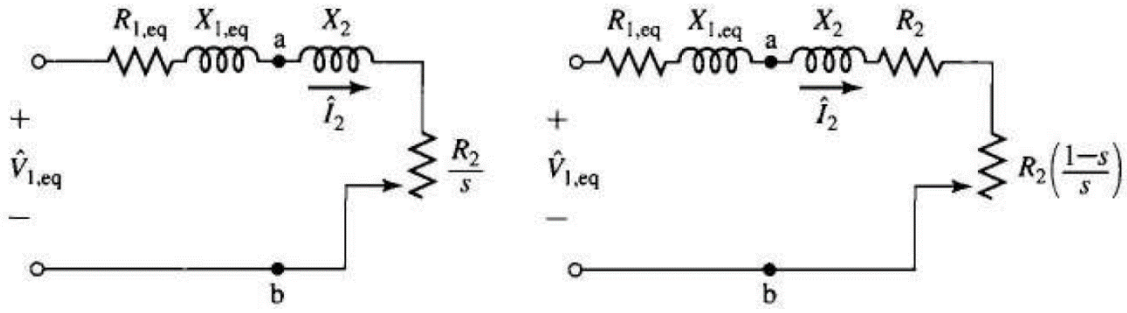
Güç akış diyagramına bakıldığında makinede indüklenen tork ve çıkış torku aşağıdaki ifadeler ile hesaplanmaktadır.

$$T_{ind} = \frac{P_{DG}}{w_m} \tag{2.4}$$

$$T_{ind} = \frac{P_{HAG}}{w_{sync}} \tag{2.5}$$

$$T_{çıkış} = \frac{P_{\text{çıkış gücü}}}{w_m} \tag{2.6}$$

Burada P_{DG}, P_{HAG}, w_{sync}, w_m sırasıyla; dönüştürülen güç, hava aralığı gücü, senkron açısal hız ve mekanik açısal olarak ifade edilmektedir. Asenkron motorun eş değer devresi Thevenin teoreminin kullanılmasıyla motorda oluşan tork ifadesi elde edilebilir [24].



Şekil 2.8 Basitleştirilmiş asenkron motor thevenin eş değer devresi [24]

Asenkron motorlarda stator sargılarına uygulanan gerilim bir manyetik alan oluşturur ve bu manyetik alan hızı, senkron hız n_{sync} ile ifade edilir. Senkron hız ile rotorun mekanik hızı birbirine eşit değildir. Bu eşitsizlik denklem 2.7'de kayma hızı n_s olarak ifade edilir. Hava aralığı gücü denklem (2.7)'deki gibi ifade edilmektedir [23]:

$$n_s = n_{sync} - n_m \tag{2.7}$$

$$P_{HAG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{2.8}$$

$$V_{1,eq} = V_1 \left(\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right) \tag{2.9}$$

$$Z_{1,eq} = R_{1,eq} + jX_{1,eq} \tag{2.10}$$

Denklem (2.8) ile jX_m ifadesi paralel olduğu için toplam eş değer aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Z_{1,eq} = \left(\frac{jX_m(R_1+jX_1)}{R_1+j(X_1+X_m)}\right) \tag{2.11}$$

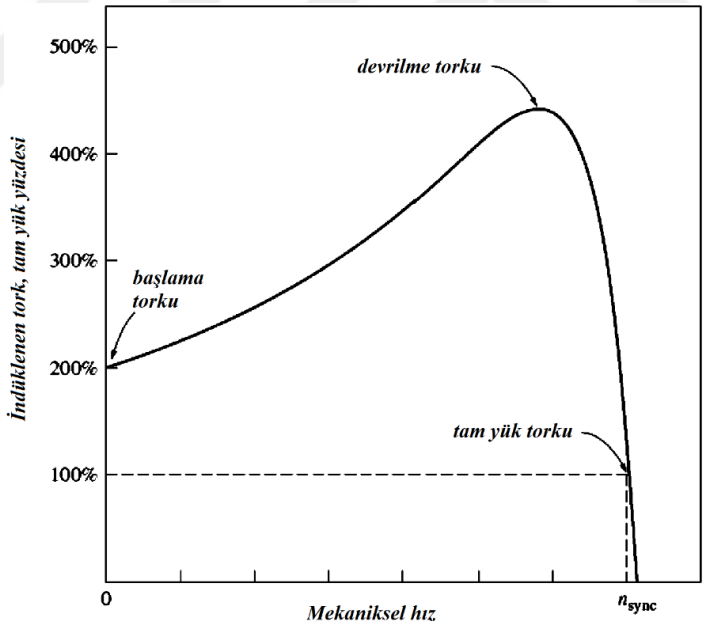
Bu denklemde çekirdek direnci R_c, mıknatıslanma reaktansından X_m küçük olduğu için ihmal edilmiştir (X_m>>R_c). Rotor tarafında oluşan akım aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I_2 = \frac{V_{1,eq}}{Z_{1,eq}+jX_2+R_2/s} \tag{2.12}$$

Denklem (2.5), (2.7) ve (2.11) ifadeleri yeniden düzenlenirse indüklenen tork değeri elde edilir:

$$T_{ind} = \frac{1}{w_{sync}}\left[\frac{3.V_{1,eq}^2(R_2/s)}{(R_{1,eq}+(R_2/s))^2+(X_{1,eq}+X_2)^2}\right] \tag{2.13}$$

Denklem 2.13 incelendiğinde indüklenen tork; senkron hız, stator giriş gerilimi, motor direnci ile reaktansları ve kayma değerlerine bağlıdır.



Şekil 2.9 Bir asenkron motorun tork-hız eğrisi [29]

Diğer bir önemli konu ise tork-hız karakteristiğidir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi makina senkron hıza yaklaştıkça devrilme torkuna yaklaşmaktadır. Bu durumda motor tam yükün yaklaşık % 450'sine kadar ulaşmaktadır [29]. Makina senkron hıza ulaştığında ise tork üretememektedir. Bu nedenle motor tasarlanırken çalışma koşulları dikkate alınarak devrilme tork değerinden kaçınılmalıdır.

3
ANALİZ YÖNTEMLERİ

Asenkron motorların tasarım sürecinde üretim aşamasına geçmeden önce belli matematiksel yöntemler kullanılarak çeşitli analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu analizlerin birbirlerine karşı üstünlük veya dezavantajları bulunmaktadır. Tasarıma göre uygun analiz yöntemi seçilebilmektedir. Bazı analizler kompleks işlemler gerektirirken bazıları ise zaman gerektirmektedir. Bu tür olumsuz durumları ortadan kaldırmak için tasarlanan motorun hangi analiz türene daha uygun olduğu saptanmalıdır.

3.1 Elektromanyetik Analiz Yöntemleri

Bu başlık altında elektromanyetik analizler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Literatür araştırmasına göre Manyetik Eş Değer Devresi (MED), Toplu Parametre Modeli (TPM) ve Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yöntemleri yaygın olarak kullanıldığı saptanmıştır. Bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları hakkında detaylı bilgiler verilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

3.1.1 Manyetik Eş Değer Yöntemi

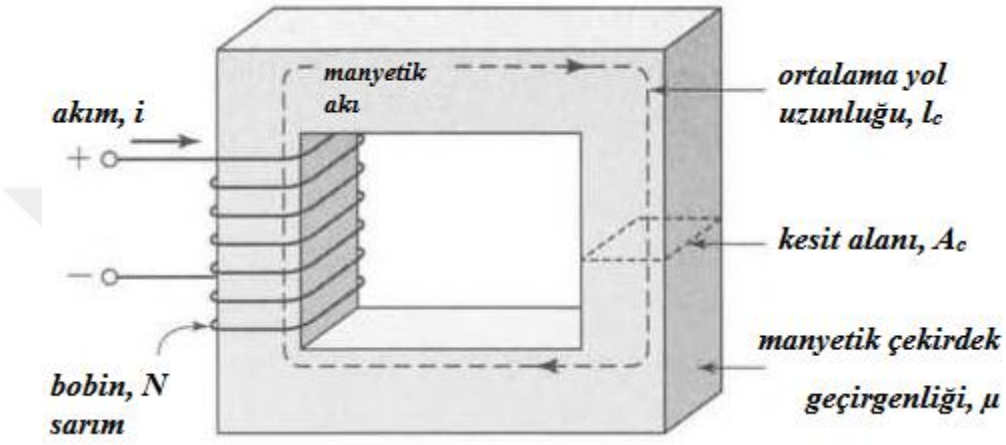
Manyetik eş değer yöntemi her türlü makina tasarımında kullanılabilmektedir. Elektromanyetik sistemlerinin analizlerini gerçekleştirmek için temel manyetik eş değer devrelerini anlamak gerekmektedir. Manyetik devrelerin oluşturduğu manyetik alanlar, bir makinada elektriksel bir enerjinin mekaniksel bir enerjiye dönüştürmesine ortam hazırlamaktadır. Aynı durum bir mekaniksel enerjinin elektriksel enerjiye dönüştürülmesi olayı için de geçerlidir [23, 30]. Genel değerlendirme yapıldığında bir manyetik alan içerisinde bir iletkenden akım akıtılırsa kuvvet indüklenirken manyetik alan içerisinde bir iletken hareket ettirilirse iletkende bir gerilim indüklenecektir.

Ampere Kanunu, manyetik devreleri formüle etmek için kullanılmaktadır. Bu yasaya göre kapalı bir ortam içerisinde alan şiddetinin çizgi integrali, bu kapalı ortam tarafından kapatılan akıma denktir [24, 25].

$$\int_C HdI = \int_S Jda = i_{kapalı} \tag{3.1}$$

Denklem (3.1)'de ***H***, manyetik alan şiddeti; ***C***, kapalı kontur alan ***dI*** ise yol içerisinde uzunluğun diferansiyel bir parçasıdır. Denklem (3.1)'in sağındaki ifade de ise ***J***, akım yoğunluğu; ***S***, herhangi bir kapalı yüzey ***da*** ise diferansiyel alandır.

Şekil 3.1'de basit bir manyetik devre gösterilmiştir. Manyetik devrede, bir bacağa uygulanan akım ile birlikte devrede manyetik akı oluşmaktadır. Manyetik akı, devresini en kısa olacak biçimde tamamlamaktadır. Bu ortalama yol uzunluğu olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.1 Manyetik devre [24]

Manyetik devrede, akıtılan ***i*** akımı integral yolunu ***N*** defa kesmektedir. Bundan dolayı toplam akım değeri ifade edilirse;

$$Hl_c = Ni \tag{3.2}$$

olur. Burada manyetik alan şiddeti ***H***'nin birimi ***amper-sarım/metre***'dir. Manyetik alan şiddeti ile manyetik alan yoğunluğu arasındaki ilişki denklem (3.3)'de gösterilmiştir.

$$B = \mu H \tag{3.3}$$

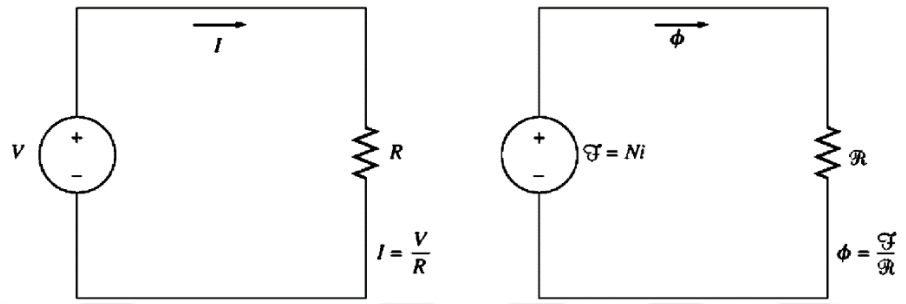
Burada ***B*** ve ***μ*** sırasıyla manyetik alan yoğunluğu ve malzemenin manyetik geçirgenlik değeridir. B'nin birimi ise ***wb/m²*** yani Tesla'dır. Geçirgenlik değeri ise denklem (3.4)'deki gibi ifade edilir:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{3.4}$$

Geçirgenlik değeri, bağıl geçirgenlik değeri μ_r ile boşluğun geçirgenlik değerinin μ_0 çarpımıdır. Geçirgenlik değeri ve boşluğun geçirgenlik değerinin birimi aynı

olup manyetik alan şiddetinin metreye bölümüdür (***H/m***). Bununla birlikte bağıl geçirgenlik değeri birimsizdir.

Manyetik devrelerin çözümünü kolaylaştırmak için eş değer devrenin elektriksel devreye benzetimi yapılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Manyetik eş değer devrenin elektriksel devre benzetimi [23]

Şekil 3.2'ye göre manyetomotor kuvvet ***F***'nin değeri denklem (3.5)'de gösterilmiştir. Birimi amper-sarım'dır.

$$\mathcal{F} = Ni = \varphi \mathcal{R}_{eş} = Hl_c \tag{3.5}$$

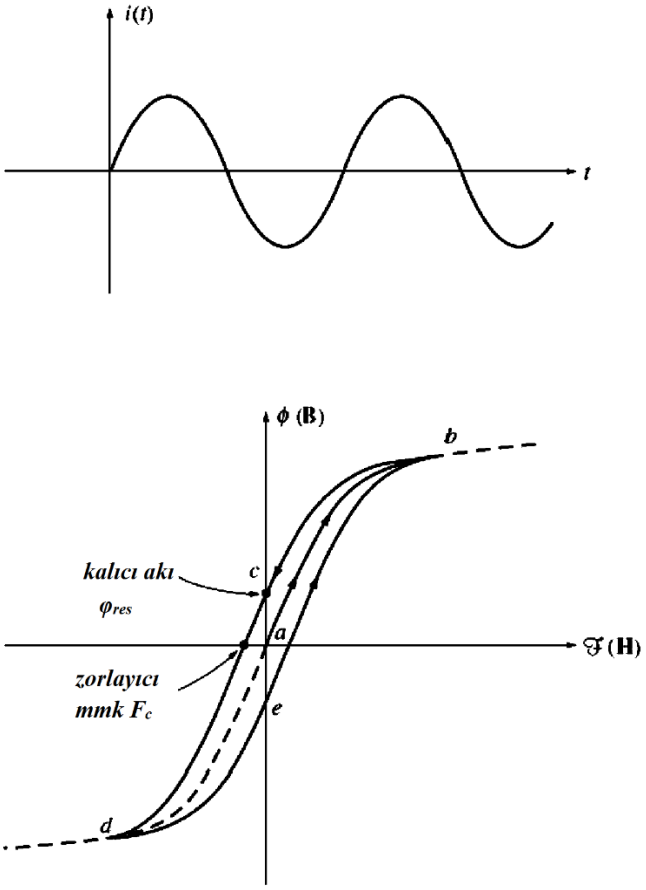
$$\varphi = BA_c \tag{3.6}$$

Burada $\boldsymbol{\varphi}$, $\boldsymbol{R_{eş}}$ ve $\boldsymbol{A_c}$ sırasıyla devrenin akısı, relüktansı ve kesit alanıdır. Devrenin relüktans değeri ise aşağıdaki gibi ifade edilir. Devre relüktansının birimi ***amper-sarım/wb*** iken devre akısının birimi ***weber*** olarak ifade edilir.

$$\mathcal{R}_{eş} = \frac{l_c}{\mu A_c} \tag{3.7}$$

Manyetik devrelerde bir diğer önemli konu ise B-H yani histerisiz eğrisidir. Şekil 3.3'de manyetik devrede bir çekirdeğe uygulanan alternatif akım sonucu oluşan histerisiz döngüsü gösterilmiştir. İlk durumda çekirdeğe uygulanan akım ile a-b eğrisi çizilir. Burada b noktasında çekirdek manyetik doyuma ulaştığı için manyetomotor kuvvet ***F*** veya manyetik alan şiddeti ***H*** ne kadar artarsa artsın akı değeri $\boldsymbol{\phi}$ artmayacaktır. Akım değeri negatif alternansa ulaştığında çekirdekteki akı değeri c noktasına ulaşacaktır. Bu döngü tam bir periyod olana kadar devam edecektir ve en sonunda akı eğrisi e noktası üzerinden b noktasına ulaşacaktır. Dikkat edilirse oluşan akı her zaman bir önceki akı değerini baz alarak yeni rotasını oluşturmaktadır yani sadece çekirdek sargılarına uygulanan akımın miktarı ile

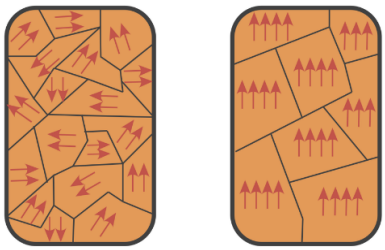
ilişkili değildir. Dolayısıyla oluşan bu döngü histerisiz eğrisi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.3 B-H eğrisi [23]

Çekirdeğe uygulanan manyetomotor kuvvet kaldırıldığında çekirdekteki akı değeri sıfıra ulaşmaz. Çekirdekte bir manyetik alan bırakır. Buna kalıcı akı yani ϕ_{res} denir. Diğer bir ifade ile kalıcı mıknatıs oluşur. Bununla birlikte negatif x ekseni üzerinde bulunan zorlayıcı kuvvet, manyetomotor kuvvetin bir miktarıdır ki bu da akıyı sıfıra çekmek için oluşur [23].

Peki histerisiz eğrisi nasıl oluşur, bunu açıklamak gerekirse manyetik devreye bir gerilim uygulandığında çekirdek (kobalt, nikel ve demir gibi) yapısında bulunan alanlar düzenli bir şekilde sıralamaya girerler. Ancak gerilim uygulanmadan önce bu alanlar düzensiz olarak sıralanırlar.

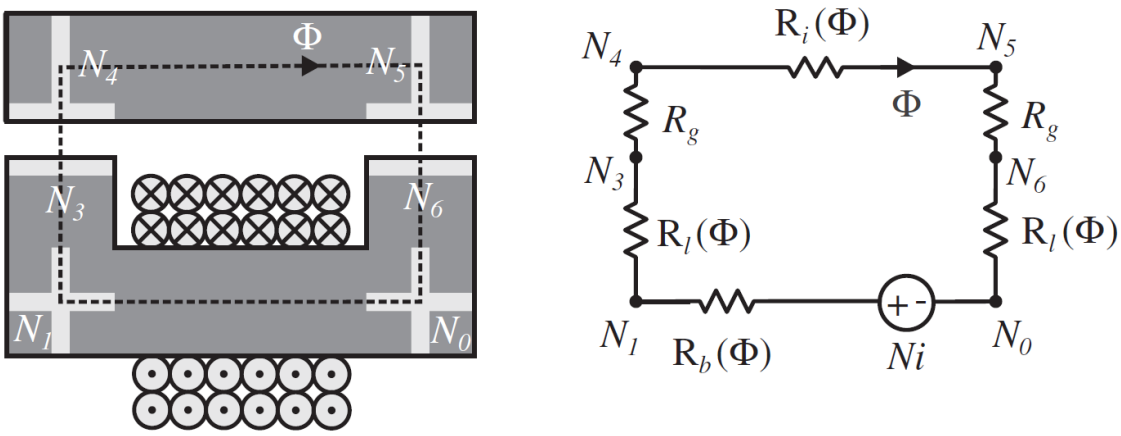


Şekil 3.4 Sırasıyla düzenli ve düzensiz manyetik alanlar

Düzensiz manyetik alanların düzenli hale gelmesi için dışardan bir enerji uygulanır. Bu enerji etkisi ile birlikte makinelerde enerji kayıpları meydana gelmektedir. B-H karakteristiğine bakılırsa çekirdeğe uygulanan her bir alternatif akım, çekirdek içindeki düzensiz alanları düzenli alanlara çevirmektedir. Her döngüde yeniden yönlendirme gerçekleşmektedir. Bunun için harcanan enerji, histerisiz kayıpları olarak adlandırılır. Bununla birlikte Faraday Kanunu'na göre zamanla değişen manyetik alanın etkisiyle oluşan dairesel akım oluşur. Bu akıma Eddy yani Girdap akımı denir. Histerisiz kayıplarına ilave olarak Eddy kayıpları da mevcuttur. Her iki kaybın nedeni ile çekirdekte ısınma meydana gelmektedir.

Bu başlık altında bu noktaya kadar manyetik eş değer devre modelinin çıkarılması için gerekli olan temel ifadeler anlatıldı. Bir makinanın gerekli elektromanyetik analizinin MED yöntemi ile yapılabilmesi için makinanın eş değer manyetik devresinin doğru çıkarılması gerekmektedir. Asenkron motor gibi kompleks bir geometriye sahip bir makinanın manyetik eş değer devrenin çıkarılması kolay değildir. Bunun sebebi asenkron motorun manyetik eş değer devresinin lineer olmamasıdır. Dolayısıyla karmaşık geometriye sahip makinalarda relüktans değerinin doğru çıkarılması önem arz etmektedir.

Sudhoff, çalışmasında manyetik güç devrelerinin manyetik eş değer devrelerini çıkarmayı amaçlamıştır. Şekil 3.5'de temel olarak UI tipli bir çekirdeğin manyetik eş değer devresi gösterilmiştir.

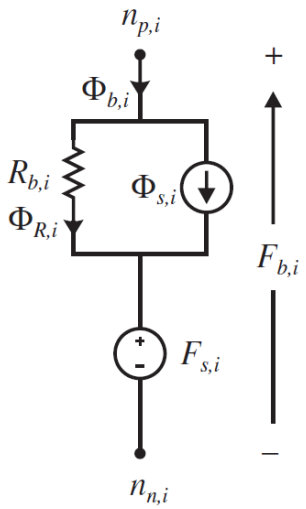


Şekil 3.5 UI çekirdeğinin manyetik eş değer devresi [25]

Çekirdek düğümlere (***N***) ayrılarak relüktans hesaplanması basitleştirilmesi amaçlanmıştır. Burada R_i, R_g, R_b ve R_l sırasıyla I çekirdeği, hava aralığı, U çekirdeğinin tabanı ve U çekirdeğinin kenarlarının relüktans değerlerini ifade etmektedir. Bununla birlikte Φ devreden geçen akı ve Ni toplam manyetomotor kuvvettir. Eğer eş değer devre basitleştirilmek istenirse toplam relüktans değerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu durumda toplam relüktans değeri denklem (3.8)'deki gibi olur [25].

$$R_{eş} = R_i + R_b + 2R_g + 2R_l \tag{3.8}$$

Lineer olmayan sistemlerde nümeriksel analizlerinin yapılması için düğüm veya çevre denklemleri kullanılabilir. Ancak çevre denklemleri lineer olmayan sistemler için daha uygundur [25]. Şekil 3.6'da basitleştirilmiş çevre devresi gösterilmektedir.

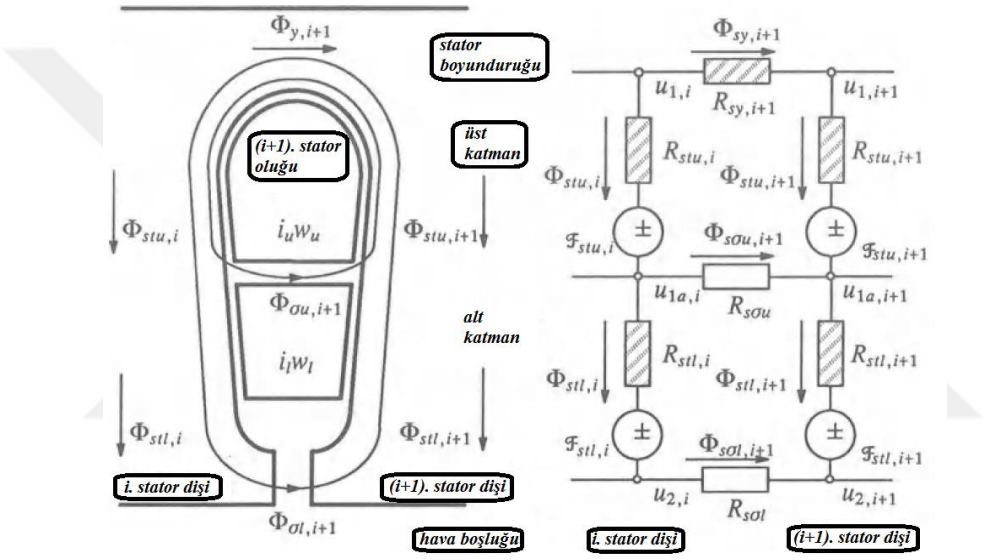


Şekil 3.6 Basitleştirilmiş çevre devresi [25]

Burada $\Phi_{b,i}$, koldan geçen akı; $\Phi_{s,i}$, kol ile ilişkili akı kaynağı; $F_{s,i}$, kol ile ilişkili manyetomotor kuvvet kaynağı; $F_{b,i}$, kol üzerine düşen manyetomotor kuvvet kaynağı; $R_{b,i}$, kol ile ilişkili relüktans değeridir. Ayrıca $n_{p,i}$ ve $n_{n,i}$ elamanın pozitif ve negatif uçlarını belirtmektedir. Denklem (3.9)'da çevre denklemi belirtilmiştir.

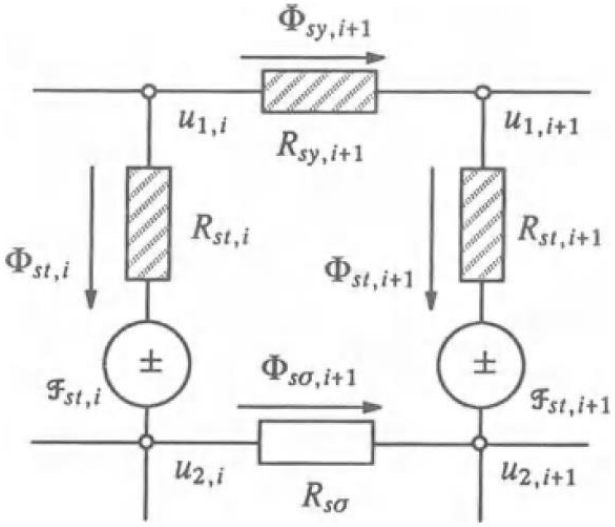
$$F_{b,i} = R_{b,i}(\Phi_{b,i} - \Phi_{s,i}) + F_{s,i} \tag{3.9}$$

Şekil 3.7'de bir asenkron motorun oluk yapısı ve manyetik eş değer devre modeli gösterilmiştir. Görüldüğü gibi oluk geometrisinden dolayı karmaşık bir relüktans değerine sahiptir.



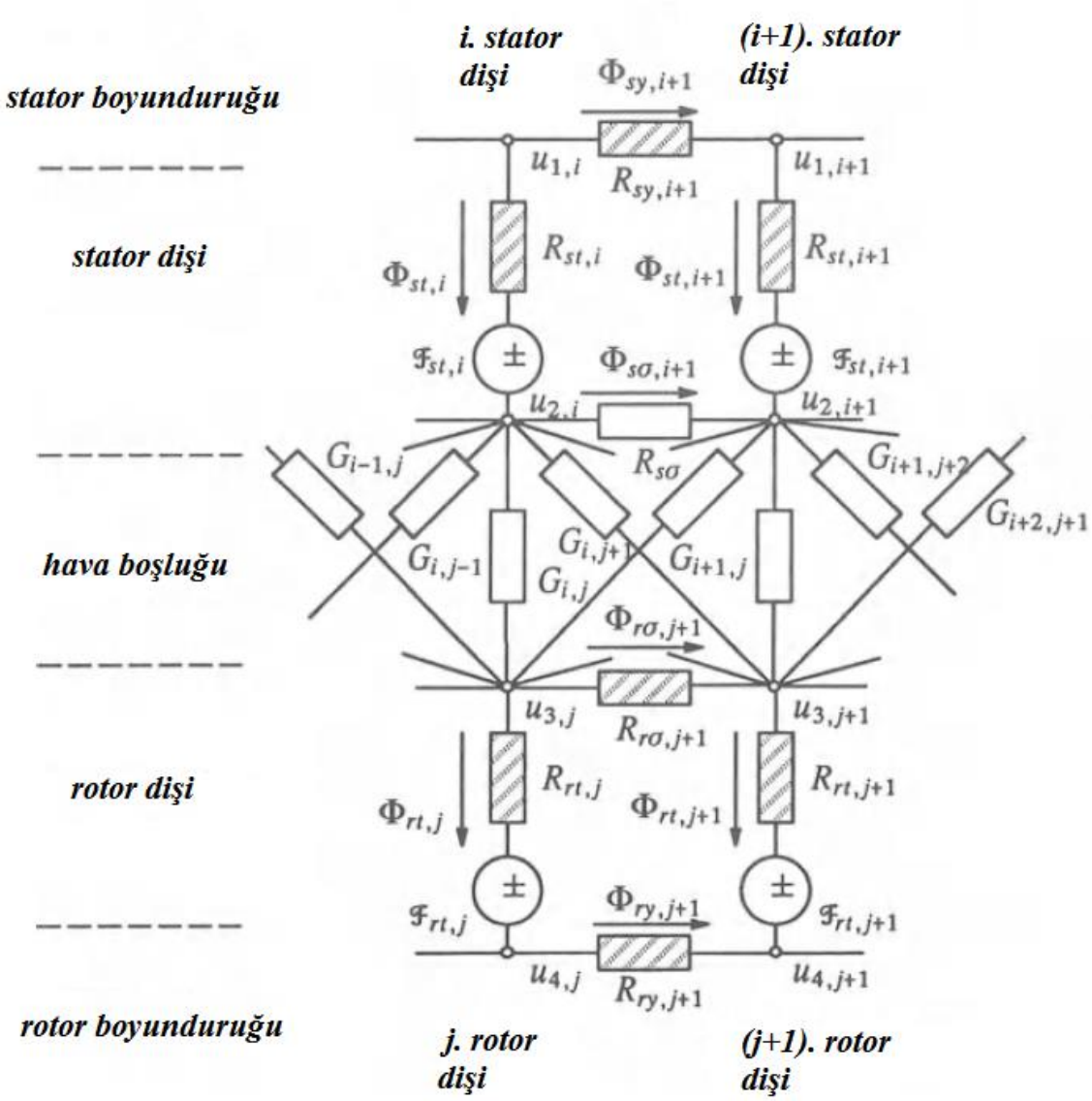
Şekil 3.7 Stator oluğu ve manyetik eş değer devresi [30]

Manyetik devrenin basitleştirilmiş hali Şekil 3.8'deki gibidir. Burada üst üste olan oluk relüktansları toplanarak R_{so} elde edilmiştir. Aynı zamanda $\Phi_{st,i}$ ve $\Phi_{stu,i}$ ve $\Phi_{sti,i}$ akı değerleri birbirine eşittir. Olukta oluşan toplam manyetomotor kuvvet ise $F_{st,i}$ olarak ifade edilmiştir. Ayrıca u_1 değeri statorun boyunduruk noktasına uygulanan gerilimi ifade ederken u_2 değeri ise stator oluğunun alt kısmını ifade eden gerilim değeridir.



Şekil 3.8 Basitleştirilmiş stator oluk manyetik eş değer devresi [30]

Şekil 3.8'de sadece stator oluğu ve iki sargılı katman arasında meydana gelen relüktans değerleri görülmektedir. Stator ve rotor yapıları birbirleri ile etkileşim içinde olduğundan hava boşluğunda diğer relüktans değerlerinin de belirtilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde elektromanyetik analiz sonuçları doğru sonuçlar vermeyecektir. Şekil 3.9'da bir asenkron motorun stator ve rotor yapılarının oluşturduğu manyetik eş değer devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Stator ve rotor oluğunun manyetik eş değer devresi [30]

Stator dişi ile rotor dişi arasında bir relüktans ilişkisi bulunmaktadır. Her bir diş karşılıklı veya çaprazlama birbiri ile bağlantılı durumdadır. Bu nedenle doğru manyetik eş değer devresinin çıkarılması için relüktans değerleri önem arz etmektedir [31].

3.1.2 Toplu Parametre Modeli Yöntemi

Toplu Parametre Modeli (TPM) yöntemi, fiziksel olarak dağılmış sistemlerin davranış tanımlamalarını kolaylaştırır. Bu yöntem elektriksel, mekaniksel veya ısı transferi gibi sistemlerde kullanılmaktadır. Elektriksel sistemler dikkate alındığında elektronik veya elektrik devrelerinde kullanılan komponentlerin basitleştirilmiş varsayımlarını yapar. TPM yöntemi ile farklı fiziksel büyüklüklerin birbirleri ile

benzetimi yapılabilir. Bu şekilde analizi yapılması planlanan sistemin çözümü basitleşmektedir. Tablo 3.1'de farklı alanlara sahip sistemlerin benzetimi gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Güç eşlenik değişkenleri [32, 33]

Enerji Alanı	**Efor**	**Akış**	**Moment**	**Yer Değiştirme**
Mekaniksel dönüşüm	Kuvvet, F	Hız, v	Moment, p	Pozisyon, x
Sabit eksenli dönme	Moment, τ	Açısal hız, w	Açısal moment, J	Açı, θ
Elektriksel devreler	Gerilim, V	Akım, i	…	Yük, Q
Manyetik devreler	Manyetomotor kuvvet, MMK	Akı hızı, ϕ	…	Akı, Φ
Sıvı akışı	Basınç, P	Hacimse akış, Q	Basınç momenti, Γ	Hacim, V
Termal	Sıcaklık, T	Entropi akış, $S^{'}$	…	Entropi, S

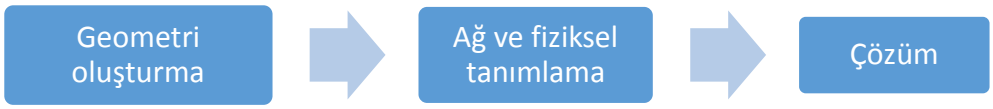
Tablodan da görüleceği üzere elektriksel eş değer devre parametreleri ile gerçek makine davranışına yakınlaşma gerçekleştirilebilmektedir [34]. Birçok çalışmada SEA ile TPM yöntemleri karşılaştırılmıştır. E. Ravaioli ve arkadaşları TPM yönteminin lineer olmayan sistemlerde, SEA analizlerine göre daha hızlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [35]. Bir diğer çalışmada R. Ibtiouen ve arkadaşları SEA

ve TPM yöntemlerini kullanarak elde edilen verileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Burada bazı motor bileşenlerinde TPM ile elde edilen sıcaklıkların deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirtilmiştir [36]. Yine bir başka çalışmada J. P. Wang ve arkadaşları fırçasız doğru akım motorunu TPM ve SEA yöntemleri ile analiz ederek akı ve kuvvet değerlerinde yakın sonuçlar bulmuşlardır [37].

TPM yöntemi elektriksel ve termal sistemler arasında bir benzerlik oluşturur [38]. Aslında bu yöntem ile motordaki mekanik parçalar elektriksel devre elemanlarına benzetilir. Elektromanyetik analizlerde kayıpların bulunmasına yardımcı olur. Çünkü kayıpların büyük bir çoğunluğu ısı enerjisine dönüşmektedir. Dolayısıyla TPM yöntemi daha çok termal analizlerde kullanılmaktadır. Daha sonraki başlıklarda termal analiz ile ilgili bilgiler detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.1.3 Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), mühendislik alanlarında popüler olarak kullanılan diferansiyel denklemlerle nümeriksel olarak çözümler üreten bir yöntemdir. SEA; mekanik, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromanyetik gibi alanlarda kullanılır. SEA ile iki ve üç boyutlu sistemlerin analizlerinin yapılması mümkündür. SEA, fiziksel büyüklüklerin bir bölge içindeki dağılımını inceleyerek matematiksel olarak modeller ve diferansiyel veya integral denklemlerini kullanır. Bu tezde analizlerin gerçekleştirilmesi için ANSYS programı kullanılmıştır. ANSYS Electronics Desktop yazılımı, elektromanyetik analizler için Maxwell denklemlerini kullanmaktadır.



Şekil 3.10 Analiz için gerçekleştirilen aşamalar

1864 yılında James Clerk Maxwell, dört temel denklemleri ifade eden Gauss'un elektrik ve manyetik alan kanunlarını, Faraday'ın manyetik indüksiyon kanununu ve Ampere kanununu yeniden düzenledi. Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{3.10}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \tag{3.11}$$

$$\nabla . \mathbf{D} = \rho \tag{3.12}$$

$$\nabla . \boldsymbol{B} = 0 \tag{3.13}$$

Denklemler açıklanacak olursa ilk denklem Faraday'ın indüksiyon kanunudur. İkinci denklem Ampere kanunudur. Maxwell bu denkleme yer değiştirme (∂D/∂t) ifadesini de eklemiştir. Yer değiştirme ifadesi yayılan elektromanyetik dalgaların tahmini için kullanılmıştır. Üçüncü ve son denklemler sırasıyla Gauss'un elektrik ve manyetik alan kanunlarıdır. Yukarıdaki denklemler SI birimindedir. ***E*** ve ***H***, elektrik ve manyetik alan şiddetini (volt/m) ve (amper/m) biriminde ifade eder. ***D*** ve ***B***, elektrik ve manyetik yoğunluğunu (coulomb/m^2) ve (weber/m^2) biriminde ifade eder. Ayrıca ***D*** elektriksel yer değiştirme ve ***B*** manyetik indüksiyon olarak da adlandırılır. Diğer ifadeler $\boldsymbol{\rho}$ ve ***J*** sırasıyla hacim yük yoğunluğu ve elektrik akım yoğunluğudur. Birimleri ise sırasıyla (coulomb/m^3) ve (amper/m^2)'dir. Maxwell denklemlerinin anlaşılması için manyetik, elektrostatik ve elektrik alanları aşağıdaki tabloda düzenlenmiştir.

Tablo 3.2 Alan türlerinin farklılıkları [30]

	Alan Türleri		
	Manyetik	**Elektrostatik**	**Elektrik**
Malzeme sabiti	μ	ε	σ
Akı veya akım yoğunluğu	B	D	J
Alan şiddeti	H	E	E

Tablodaki değerler toparlanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir. Bu şekilde karmaşık Maxwell denklemlerinin anlaşılması kolaylaştırılır.

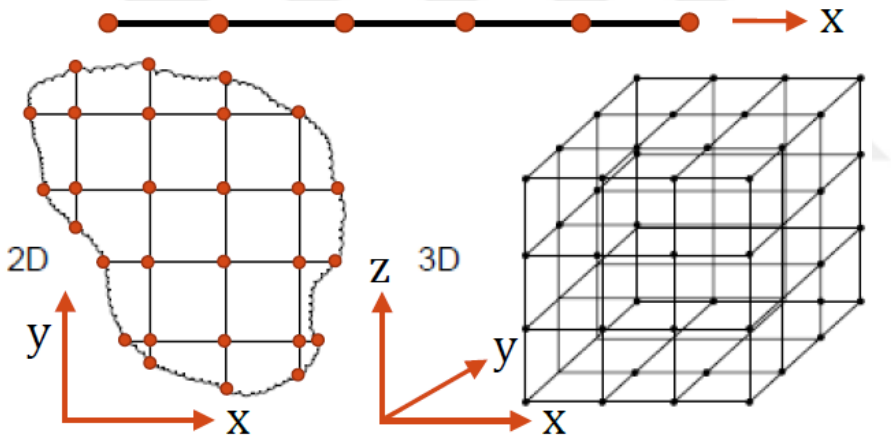
$$\boldsymbol{B} = \mu H \tag{3.14}$$

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon E \tag{3.15}$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma E \tag{3.16}$$

Manyetik ve elektrostatik alanında belirli bir enerji seviyesinin sürdürülmesi için dışarıdan herhangi bir desteğin olması gerekmemektedir. Ancak bu durum elektrik alan için mümkün değildir. Elektrik alan enerji depolayamazken manyetik ve elektrostatik alanlar enerji depolayabilir. Bu nedenden dolayı elektrik makinalarında gerçekleşen elektromekaniksel enerji dönüşümlerinde (elektrikten mekaniğe veya mekanikten elektriğe) manyetik alan dönüşüm alanı olarak kullanılır. Çünkü manyetik alan, aynı hacimsel boşluk ortamında elektrostatik alana göre μ_0/ε_0 oranında daha fazla enerji depolar [30].

Elektromanyetik analiz için öncelikle analizi yapılacak olan sistemin bir, iki veya üç boyutlu geometrik tasarımının gerçekleştirilmesi gerekir. Çözümlemenin gerçekleştirilmesi için geometri, küçük parçalara ayrılmalıdır. Geometri eğer bir doğru parçası ise eşit uzunlulara, iki boyutlu ise kare veya dikdörtgen ağa, üç boyutlu ise küp veya dikdörtgen prizmalara bölünür [39, 40].



Şekil 3.11 Bir, iki ve üç boyutlu sistemlerin ağlara bölünmesi

Mesh (ağ oluşturma) işlemini yapmadan önce bir CAD programı (AutoCAD veya Solidworks) yardımı ile uygun geometri analiz programına aktarılır. Ağ oluşturma ile düzensiz geometriler daha tanımlanabilir geometrilere dönüştürülür.

Sınır Koşulları

Elektromanyetik sistemlerde sınır koşulları problemlerin çözümlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Özel problemlerde çözümün eşsizliğini ve varlığını sağlamak için gereklidir. Sınır koşulları analizin belirli şartlar altında gerçekleşmesini sağlar. Dolayısıyla doğru sonuçların alınması için sınır koşullarının hatalı olmaması

gerekmektedir. Örneğin bir makinanın sıcaklık dağılımının belirlenmesi için merkez sıcaklık noktasının ve ısı transfer katsayısının doğru belirlenmesi gerekir. Ancak bu şekilde uygun sonuçlar alınabilmektedir [41].

Beş farklı sınır koşulları bulunmaktadır: Dirichlet, Neumann, Robin, Karma ve Cauchy. Bu sınır koşulları arasında daha çok baskın olan Dircihlet ve Neumann'dır. Dirichlet sınır koşulu diferansiyel denklemin ağırlıklı integral biçimiyle belirtilir [42, 43]. Örneğin [a,b] aralığında bir sınır koşulu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y(a) = \alpha,\ y(b) = \beta \tag{3.17}$$

Burada α ve β sayıları elde edilmiştir. Eğer Dirichlet sınır koşulları biliniyorsa ve elde edilen denklemlerin türevi alınırsa Neumann sınır koşulları da elde edilir.

$$y'(a) = \alpha,\ y'(b) = \beta \tag{3.18}$$

Genel olarak üç farklı analiz yönteminin, avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yapılan literatür araştırmasına göre SEA yöntemiyle sistem, küçük bölgelere veya parçalara bölünür. Üç boyutlu geometriler iki boyutlu geometrilere göre daha doğru sonuçlar vermektedir. SEA, MED'e göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Ancak doğru çıkarılmış Manyetik Eş Değer devresi ile iki boyutlu SEA'ya göre daha iyi sonuçlar alınabilir. SEA'nın MED'e göre olumsuz tarafı ise zaman almasıdır. Özellikle karmaşık geometrilerde sistemin parçacıklara ayrılması, çözümleme hızını olumsuz etkilemektedir [25]. TPM ise genellikle kullanılan sistemlerde daha çok termal analizlerin yapılmasında kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında elektromanyetik analiz için SEA yöntemi kullanılmıştır.

3.2 Termal Analiz Yöntemleri

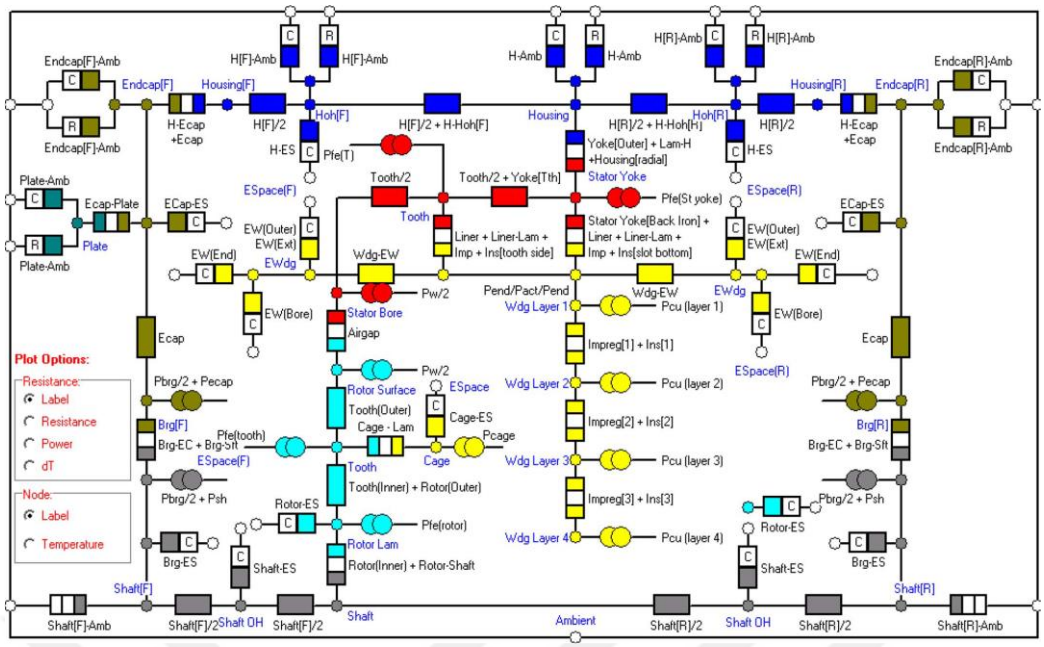
Termal analizler genellikle SEA, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Toplu Parametre Termal Ağ (TPTA) yöntemleri ile yapılmaktadır. SEA ve HAD yönteminde analizler geometrinin parçacıklara ayrılmasıyla yapılırken TPTA yönteminde ise tasarlanan geometrinin mekanik bileşenleri, elektriksel bileşenlere benzetilir [44].

3.2.1 Toplu Parametre Termal Ağ Yöntemi

Elektrik makinalarında termal analiz önem arz etmektedir. Çünkü zorlu şartlar altında çalışan makinalar zamanla aşırı ısınmalardan dolayı verimlilikleri azalmaktadır. Genellikle iki türde yapılmaktadır: nümerik ve analitik. Nümerik

analizler SEA veya HAD yöntemleri yapılmaktadır. Analitik analizler ise TPTA yöntemi ile yapılmaktadır. Her iki analiz türü ile makinanın istenilen noktalarının sıcaklıkları saptanabilmektedir. TPTA yöntemi ısı transfer teorisi üzerine dayalıdır. Bu yöntem termal ve elektrik devleri arasındaki benzerlikten yararlanır. Termal analizde benzetim direnç ve kapasitör elemanlarına benzetilir. Direnç elemanı, sistem üzerinde ısı transferini ifade eder. İşlevi ise iletim, ısı yayılımı (konveksiyon) ve radyasyon olayları olup sabit durum sıcaklıklarının çözümlenmesine yardım eder. Kapasitör elemanı ise enerji depolama görevi görürken geçici durum davranışlarının çözümlenmesine yardımcı olur [45].

TPTA için makine geometrisinin ve malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Mekaniksel, termal ve elektriksel bileşenler arasında benzerlik gösterilerek TPTA yöntemi uygulanabilir hale gelmektedir. Tablo 3.1'de bu benzetim gösterilmişti. A. Boglietti çalışmasında TPTA yöntemini kullanmıştır. Burada ısı transferi için sıcaklığı gerilime, gücü akıma ve termal direnci elektriksel dirence benzetmiştir. Ayrıca akış ağı için ise basıncı gerilime, hacim akış oranını akıma ve akış direncini elektriksel dirence benzetmiştir. Bununla birlikte TPTA yönteminin gerçekleştirilmesi için ANSYS Motor-CAD programı kullanılmıştır. Bu yöntem ile elde edilen ısı transfer ağı Şekil 3.12'de gösterilmiştir [46]. Yine P. H. Mellor ve arkadaşları bir asenkron motorun termal dağılımını elde etmek için TPTA yöntemini kullanmışlardır. Motor çerçevesi, stator çekirdeği, stator sargısı, stator çekirdeği ve sargı uçları gibi yapıların sıcaklık değerlerini elde etmişlerdir. Tam yüklü ve kararlı hal durumundaki bir motorda elde ettikleri TPTA yöntemindeki değerler, motor çerçevesi ve sargı uçlarındaki deneysel değerlere yakın çıkmıştır. Ayrıca termal ağ yönteminin asenkron motordaki değişken yük durumlarında stator sargı sıcaklıklarını doğru bir şekilde hesaplandığı belirtilmiştir [47]. Başka bir çalışmada, A. Kacenka ve arkadaşları kalıcı mıknatıslı senkron motorun termal değerlerini elde etmek için TPTA yöntemini kullanmışlardır. Makinanın farklı bölgelerindeki direnç, kapasitans ve güç kayıplarını hesaplayarak sıcaklık değerlerini belirlemişlerdir. Daha sonra ise aynı motorun Simulink modelini oluşturarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Stator oluğunda bulunan sargıların sıcaklık değerlerinin TPTA yönteminde ve Simulink programında yakın olduğu belirtilmiştir [48].



Şekil 3.12 Bir elektrik motorunun ısı transfer ağı [46]

TPTA yöntemiyle makinanın her noktasında ısı akışının sabit ve geçici durum ısı akışları tahmin edilebilir. Bunun yanı sıra makina malzemelerinin sıcaklığı da tahmin edilebilmektedir [49, 50]. Ağ ne kadar detaylandırılırsa o kadar doğru sonuçlar alınabilmektedir [51]. Bu konunun anlaşılmasına yardımcı olacak diğer bir başlık ise ısı transfer olayının hangi temel denklemler üzerine çalıştığını kavramaktır.

Isı Transfer Türleri

Isı transferi, sıcaklık farkından meydana gelen bir enerji işlemidir. Termodinamik kanununa göre bir sistem eğer enerji kaybetmişse bu çevre tarafından alınmıştır. Aynı durum tersi için de geçerlidir. Yani farklı sistemler enerjilerini kaybetmeden başka bir enerji biçimine dönüştürebilir [52, 53]. Bu enerjinin korunumunu ifade eder. Isı transferi üç şekilde gerçekleşmektedir: iletim, ısı yayılımı (konveksiyon) ve radyasyon.

- İletim

Katı, sıvı veya gaz ortamında termal enerjinin yüksek noktadan düşük noktaya transferi iletim olarak tanımlanır. İletimde nesnenin ısıyı iletme kabiliyeti termal iletkenlik olarak tanımlanır. Fourier yasasına göre aşağıdaki denklem ile termal iletim eşitliği ifade edilir.

$$q = -k\nabla T \tag{3.19}$$

$$q = -k\frac{dT}{dx} \tag{3.20}$$

Burada q, ısı akı yoğunluğu (W/m^2); k, malzeme iletkenliği [W/(m.°K)] veya [W/(m.°C)] ve dT/dx ise sıcaklık gradyanı (°K/m)'dir. İki malzeme arasındaki ısı transfer katsayısı h olarak tanımlanır.

$$h = \frac{W}{m^2K} \tag{3.21}$$

Denklem (3.21)'de ısı transfer katsayısı SI biriminde birim alan-Kelvin'e düşen gücü ifade eder.

- Isı Yayılımı (Konveksiyon)

Isı yayılımı**,** iletimden farklı olarak sıvıların hareketi ile ısı transferinin bir noktadan başka bir noktaya yayılmasını ifade eder. Genellikle sıvı ve gaz ortamlarında bu yayılımdan söz etmek mümkündür. Newton'nun soğutma kanununa göre ısı yayılım denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q = hA(T - T_f) \tag{3.22}$$

Burada Q, birim zamanda transfer edilen ısı; A, nesnenin alanı (m^2); h, ısı transfer katsayısı (W/m^{2}K); T, nesnenin yüzey sıcaklığı (°K veya °C) ve son olarak T_f, sıvı sıcaklığını (°K veya °C) belirtir.

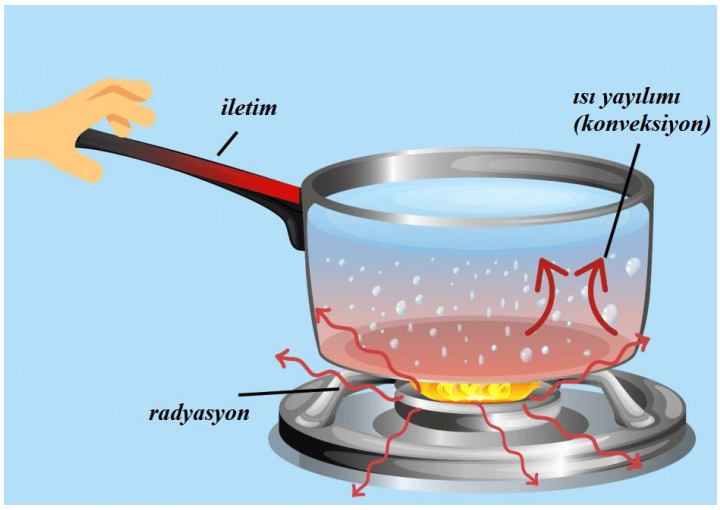
- Radyasyon

Radyasyon olayı, ısı transferini elektromanyetik dalgalar aracığıyla gerçekleştirir. Termal enerji transferi, iletim ve ısı yayılımının aksine katı, sıvı ve gaz ortamlarında gerçekleşir. Radyasyon yayılımı Stefan Boltzman kanununa göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E_b = \sigma_b A T^4 \tag{3.23}$$

Burada E_b, birim zamanda yayılan enerji; T, yüzeyin mutlak sıcaklığı ve σ_b ise Stefan-Boltzman sabiti olup değeri 5.67x10^{-8} (W/m^{2}K^4)'dir.

Üç farklı ısı transfer türü görsel olarak Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Isı transfer türleri [54]

3.2.2 Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) termal ısı yayılımının belirlenmesine yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Tasarlanan geometrinin küçük ağlara veya parçalara bölünmesiyle analiz gerçekleştirilir. SEA'nın diğer bir üstünlüğü ise karmaşık geometrileri çözümleyebilmesidir. Ancak çözümlemenin zaman alması olumsuz tarafıdır. Termal analiz yapılmadan önce elektromanyetik analiz ile kayıplar belirlenmektedir. Kayıpların belirlenmesi termal analiz için gerekli bir işlemdir. Analizler iki veya üç modelli geometrilerde yapılabilmektedir. Stator sargısı ve çekirdeği, rotor sargısı ve çekirdeği, rulmanlar, sargı uçları ve soğutma kanalları gibi yapıların sıcaklık dağılımları saptanabilmektedir [51]. Kararlı hal ve geçici hal durumlarında meydana gelen ısı değişimleri elde edilebilmektedir.

3.2.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi

HAD, SEA ve TPTA yöntemlerine göre daha doğru sonuçlar vermektedir. SEA ve TPTA için kullanılabilen ısı transfer sınırları elde edilebilir. HAD genellikle sıvı ve gaz akışları için çözüm üretirken nadir olarak katı alanlar için de çözüm üretebilir. Bu nedenle bir elektrik motor tasarımında mekaniksel analizin yapılması için kayıp parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Elektromanyetik analiz ile elektrik motorunun kayıpları bulunur. HAD yöntemi ile yapılan analizler karmaşık geometrilerde zaman almaktadır [51].

Bölüm 3'de elektromanyetik ve termal analiz yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir.

4
ASENKRON MOTORUN SONLU ELEMANLAR İLE TASARIMI

Literatür araştırmasına göre bir makinanın termal analizinin yapılabilmesi için kullanılan makinanın toplam kayıplarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle sıcaklık dağılımının ortaya çıkartılması için çekirdek, sargı ve rotor çubuklarında meydana gelen kayıplar hesaplanmaktadır. Bu çalışmada 1,1 kW'lık 3 fazlı bir asenkron motor kullanılmıştır. Asenkron motorun analitik, nümerik analizleri yapılmıştır. Kullanılan makinanın etiket değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

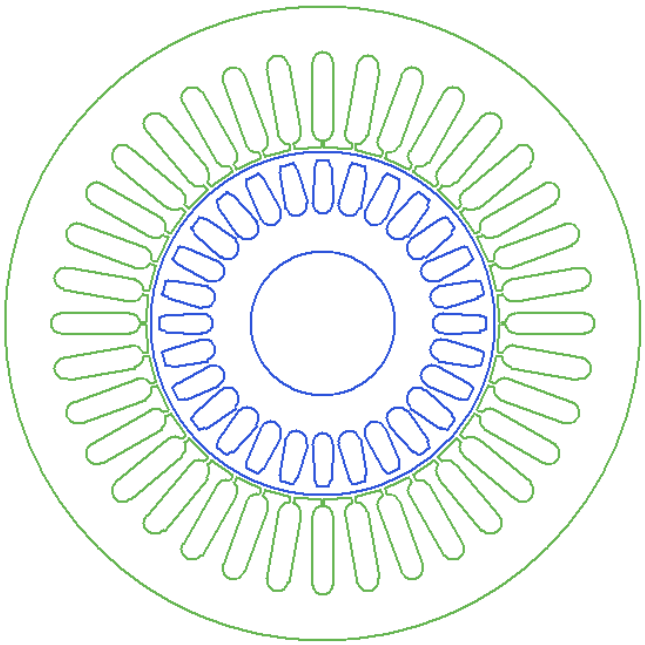
Tablo 4.1 Asenkron motorun etiket değerleri

Parametreler	**Değerler**
Çıkış gücü	1100 W
Kutup sayısı	2
Anma gerilimi	380 V (Yıldız)
Devir sayısı	1450 dev/dk

Bununla birlikte, stator oluk sayısı 36 ve çekirdek yapısında kullanılan çelik tipi M19_24G malzemesi seçilmiştir. Rotor oluk sayısı ise 28 ve çekirdek yapısı stator ile benzerdir. Stator çekirdek olukları bakır iletkenler ile doldurulmuş olup rotor çubuğu ise alüminyum malzemeden oluşturulmuştur.

4.1 Asenkron Motorun Analitik Analizi

Asenkron motorun modellenmesi için ilk aşamada Ansys Electronics Desktop yazılımının RMxprt uygulaması kullanılmıştır. Bu uygulama ile tasarımı yapılan makinanın geometrik yapısı oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de makinanın stator ve rotor yapılarının iki boyutlu gösterimi mevcuttur.

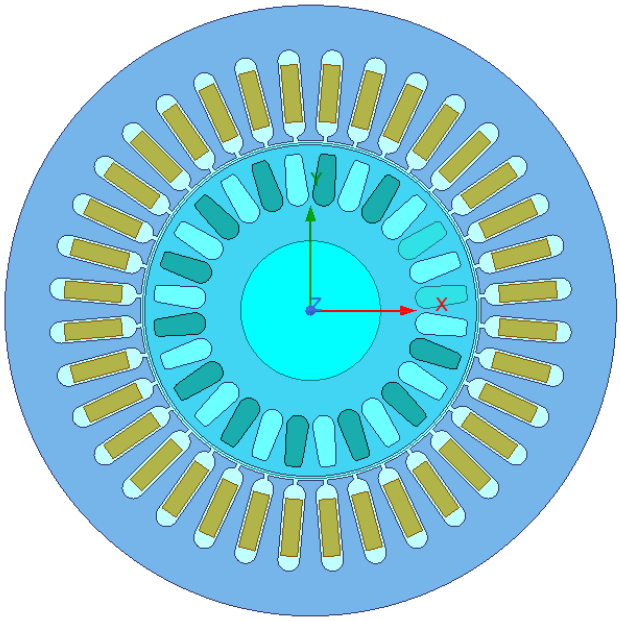


Şekil 4.1 Asenkron motorun iki boyutlu geometrisi

Yapılan analitik analiz sonuçlarına göre motor verimi % 74,14 olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan geometri ile Ansys Electronics Desktop yazılımı ile iki boyutlu ve üç boyutlu nümerik analiz gerçekleştirilmiştir.

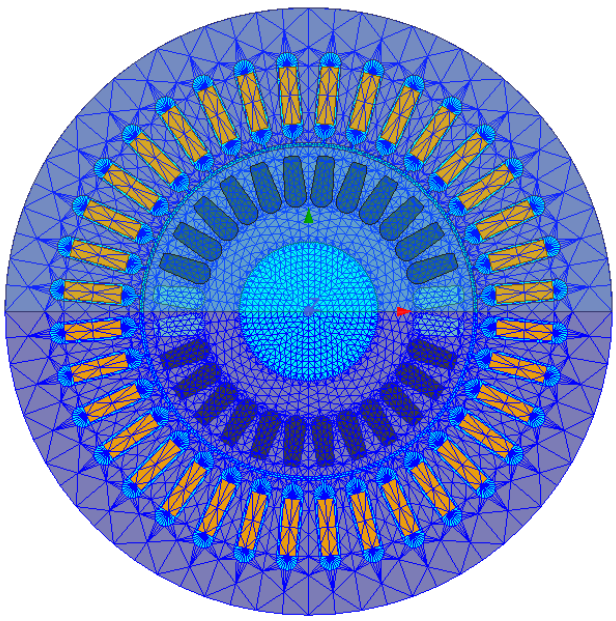
4.2 Asenkron Motorun Nümerik Analizi

Nümerik analiz için Ansys Electronics Desktop yazılımı kullanılmıştır. Electronics Desktop Sonlu Elemanlar yöntemini kullanarak makinanın manyetik analizini gerçekleştirmektedir. Manyetik analiz kullanılarak tasarlanan makinanın elektromanyetik performans değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 4.2'de makinanın iki boyutlu geometrisi gösterilmiştir.



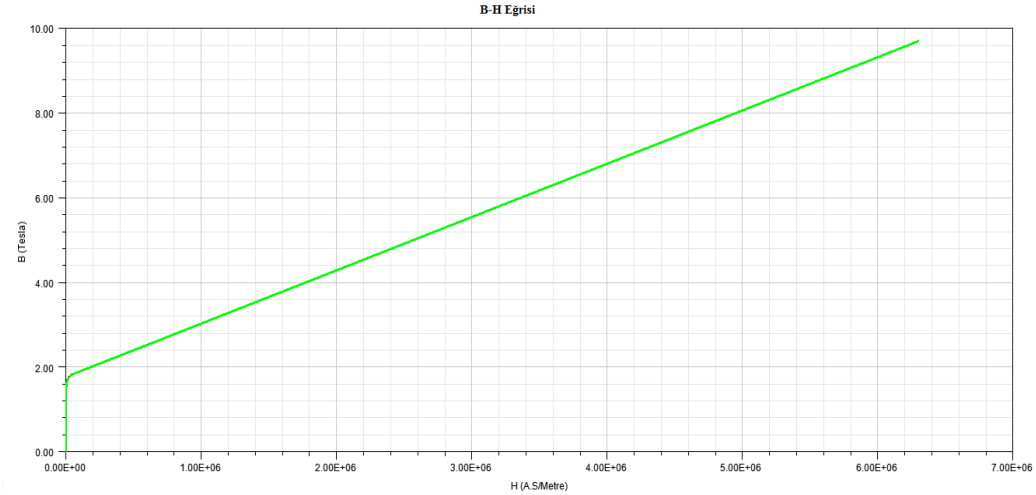
Şekil 4.2 Makinanın maxwell iki boyutlu gösterimi

Nümerik analizin gerçekleştirilmesi için makinanın iki boyutlu modelinin ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Ağ oluşturularak makina yapısı küçük yapılara ayrılarak analiz işlemi gerçekleştirilmektedir. Ağ sayısı ne kadar fazla ise o kadar doğru sonuçlar elde edilmektedir. Ancak literatür araştırmasında da belirtildiği gibi ağ sayısının yoğun olması analiz süresini artırmaktadır. Şekil 4.3'de makina modelinin ağ yapısı gösterilmiştir.



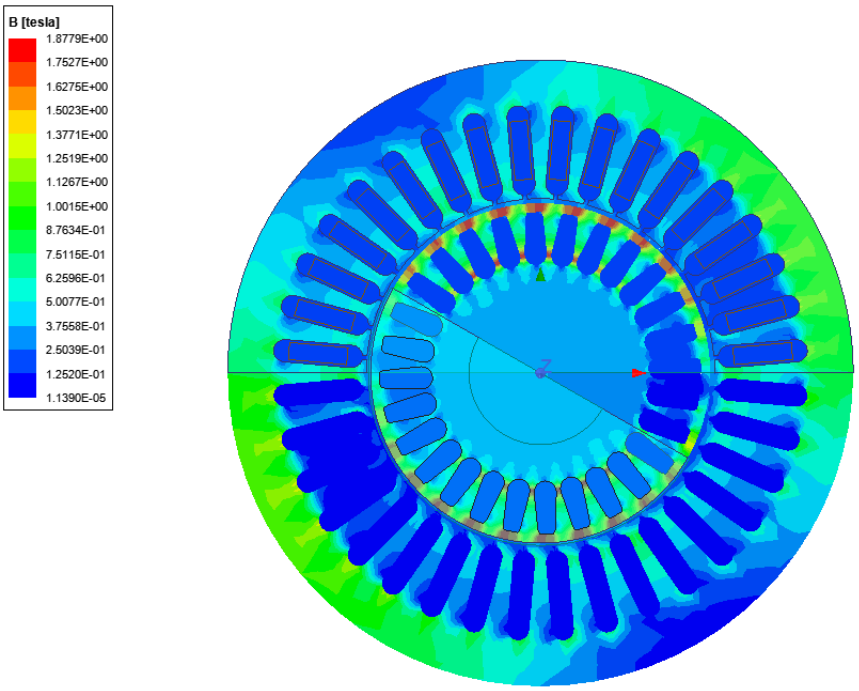
Şekil 4.3 Asenkron motorun ağ yapısı

Stator ve rotor çekirdeğinde kullanılan M19_24G malzemesinin manyetik doyum eğrisi aşağıda gösterilmiştir.



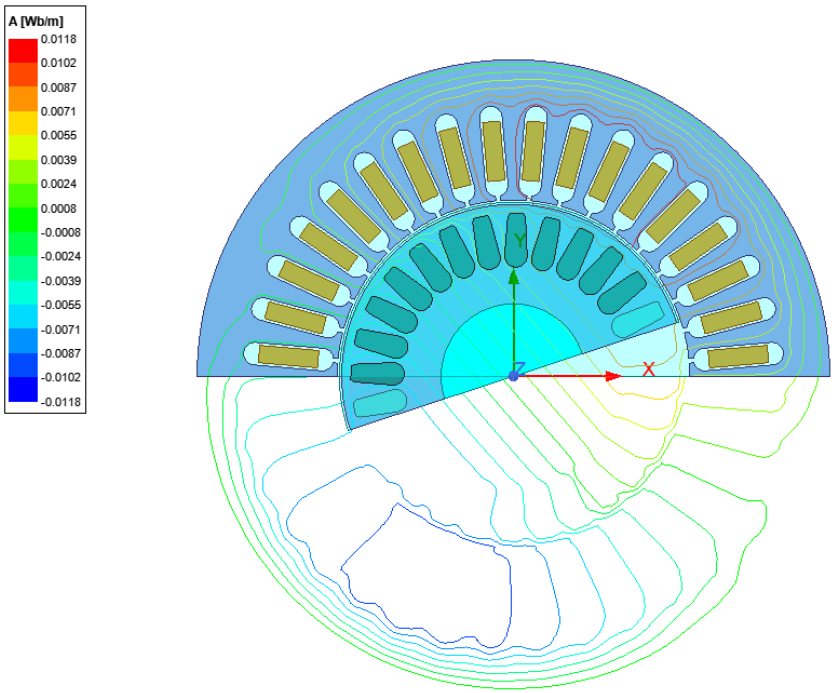
Şekil 4.4 M19_24G malzemesinin manyetik doyum eğrisi

Bu parametrelere göre analizi gerçekleştirilen makinanın çeşitli performans sonuçları elde edilmiştir. En önemlisi akı yoğunluğunun elde edilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde makinanın doyuma ulaşmadığı görülmektedir. Bu tasarım planlanan makinanın üretimi için problem teşkil etmediği anlaşılmaktadır.



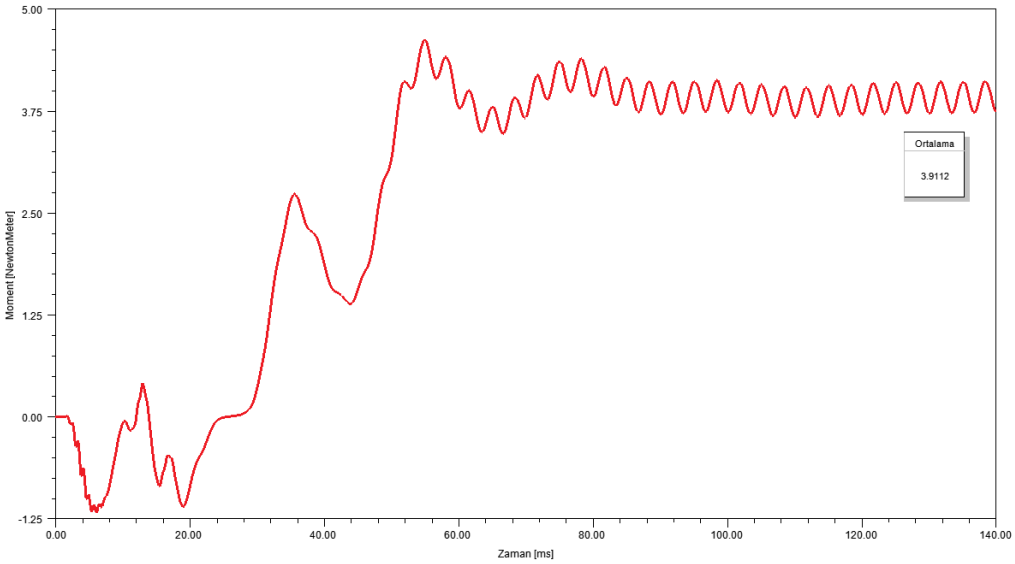
Şekil 4.5 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Dikkat edilirse manyetik akı yoğunluğunun en fazla olduğu yerler rotor alüminyum çubuklarına yakın yerlerde meydana gelmektedir. Bunun nedeni stator ve rotor yapısı arasındaki manyetik kenetlenmenin gerçekleştirilmesidir. Maksimum akı yoğunluğu 1,87 Tesla olarak ölçülmüştür. Şekil 4.6'da ise makinanın manyetik akı çizgilerinin nasıl oluştuğu gösterilmiştir. Burada manyetik akı değerinin en yüksek olduğu yer stator oluk çevresidir ve değeri 0,0118 weber/metre olarak ölçülmüştür.

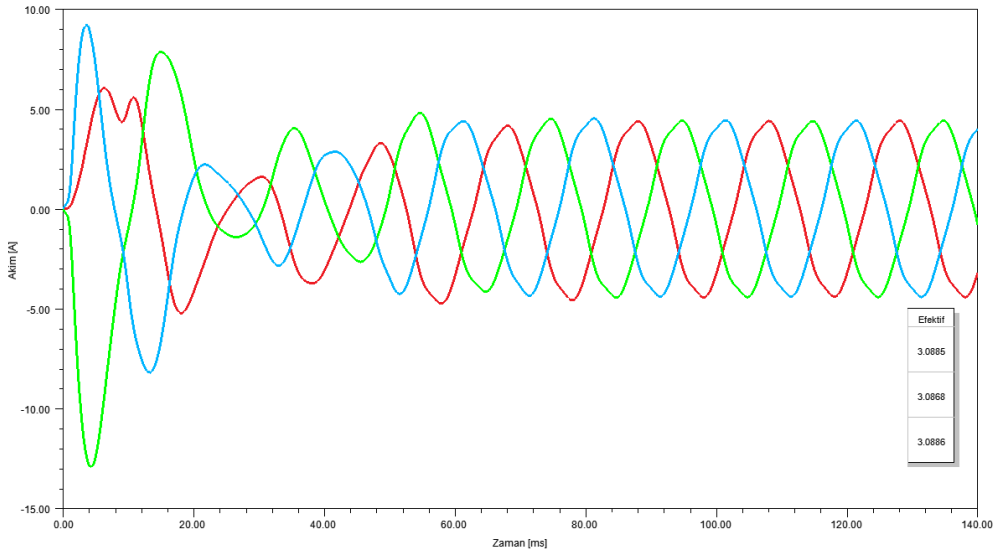


Şekil 4.6 Manyetik akı dağılımı

Akı dağılımları dikkatli incelendiğinde makinanın gerçekten de iki kutuplu olduğu anlaşılmaktadır. Motor analizinde, Şekil 4.7'de ortalama moment değeri 3,91 Nm olarak ölçülmüştür. Motorun kararlı hal durumunda şebekeden çekmiş olduğu efektif akım değeri 3,08 amperdir.



Şekil 4.7 Zamana bağlı moment değerleri

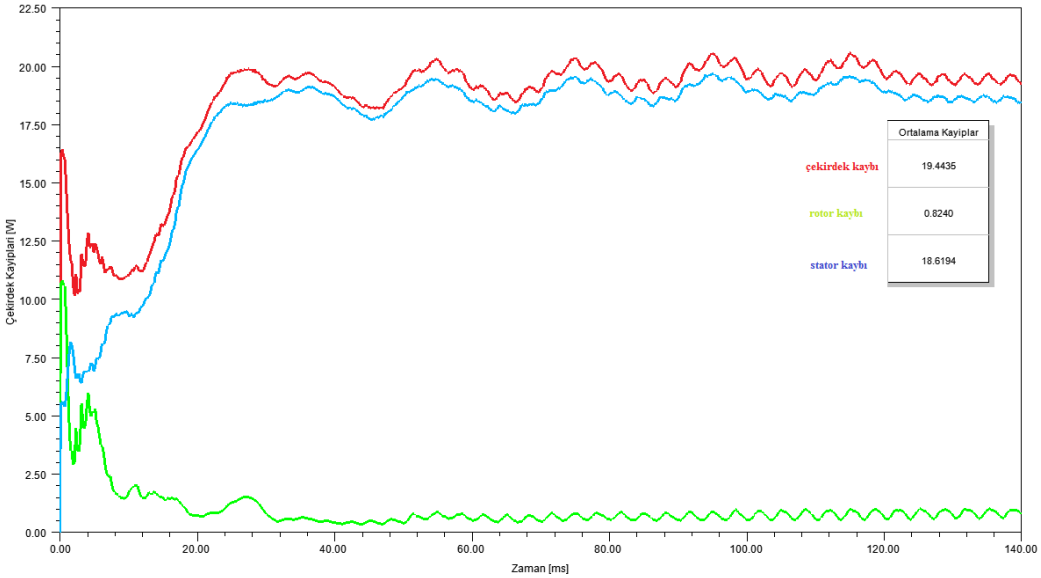


Şekil 4.8 Zamana bağlı efektif akım değerleri

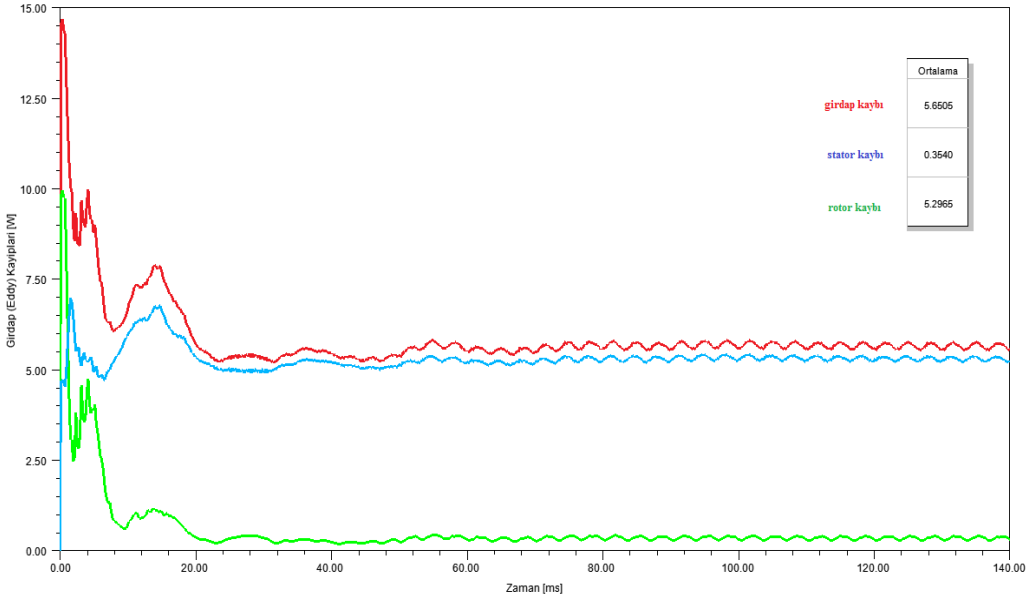
Çalışmanın sonraki aşamasında kritik öneme sahip olan çekirdek, sargı ve rotor çubukları kayıpları hesaplanmıştır. Çünkü daha önceden de belirtildiği gibi makinanın sıcaklık dağılımının belirlenmesi için bu kayıpların doğru hesaplanması gerekmektir.

Sıcaklığa neden olan ana etken genellikle kayıplardır. Ancak sürtünme ve rüzgâr kayıpları da sıcaklık dağılımı etkilemektedir. Electronics Desktop yazılımı ile stator ve rotor çekirdeğindeki kayıplar dikkate alınmıştır. Ayrıca rotor alüminyum çubukları kalın kesitli olduğundan çubukların girdap kayıp değerleri de

hesaplanmıştır. Doğru bir sıcaklık analizinin gerçekleştirilmesi için bu parametrelerin hesaplanması çok önemlidir. Aşağıdaki grafikte zamana bağlı stator ve rotor yapılarının çekirdek kayıpları görülmektedir. Toplam çekirdek kayıplarını stator ve rotor kayıpları oluşturmaktadır. Kararlı hal durumu incelendiğinde ortalama kayıp değeri 19,44 watt olmuştur.



Şekil 4.9 Ortalama çekirdek kayıpları



Şekil 4.10 Ortalama girdap (eddy) kayıpları

Şekil 4.10 incelendiğinde toplam girdap kayıpları 5,65 watt olarak belirlenmiştir. Ayrıca rotor çubuklarında meydana gelen kayıplar girdap akımlarının büyük bir kısmını oluşturduğu görülmüştür.

Yukarıdaki grafiklerde elde edilen ortalama ve efektif değerler 120 ile 140 ms arasındaki değerlerin dikkate alınmasıyla elde edilmiştir. Bu başlık altında elde edilen kayıp değerleri bir sonraki termal analizinde kullanılmıştır.

5
ASENKRON MOTORUN TERMAL ANALİZİ

Asenkron motorun termal analizi için birkaç konunun ele alınması gerekmektedir. İzolasyon sınıfları ve malzeme özellikleri bu konular arasında bulunmaktadır. Bir önceki başlıkta elde edilen elektriksel kayıplar termal analiz için kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda temel izolasyon sınıfları belirtilmiştir.

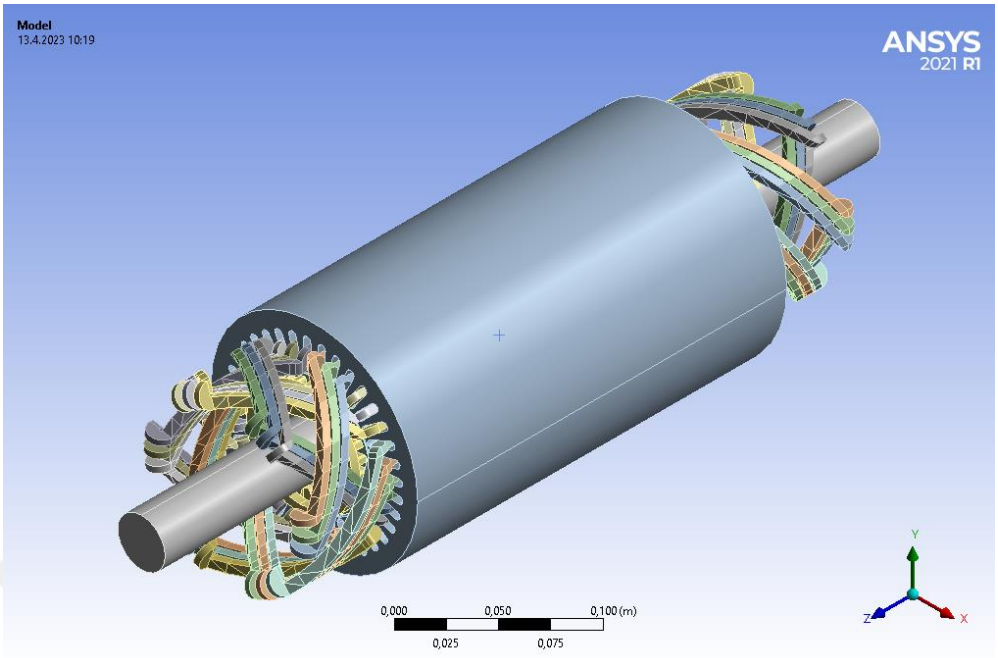
Tablo 5.1 Temel izolasyon sınıfları

Sınıf	Ortam sıcaklığı	İzin verilebilir sıcaklık artışı	Termal marjin
H (180 °C)	40 °C	125 °C	15 °C
F (155 °C)	40 °C	105 °C	10 °C
B (130 °C)	40 °C	80 °C	10 °C
E (120 °C)	40 °C	75 °C	5 °C

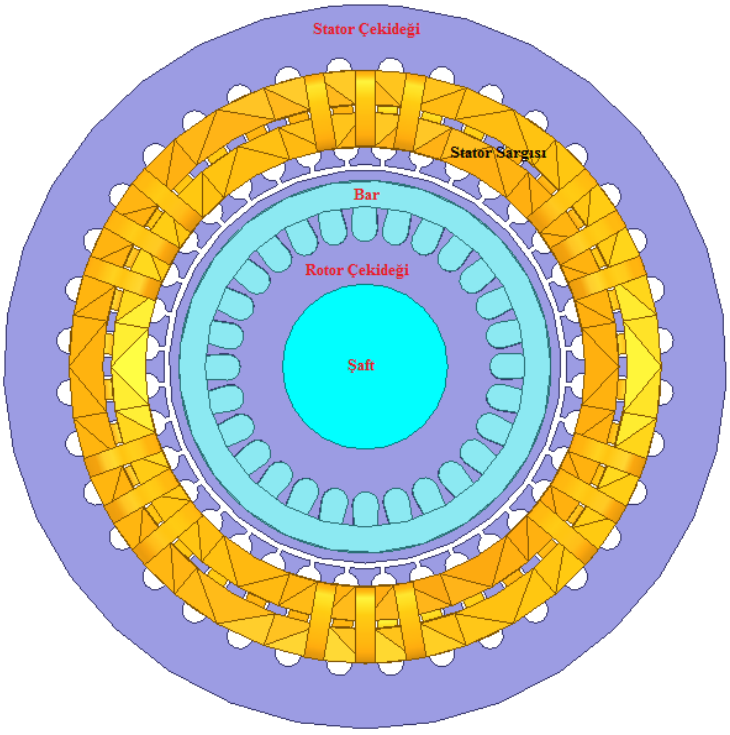
Tablodan da görüleceği üzere izolasyon sınıflarının belirlenmesinde ortam sıcaklığı da önemli bir faktördür. Bu çalışmada yapılan analizlerde ortam sıcaklığı 40 °C olarak alınmıştır.

5.1 Asenkron Motorun Mekaniksel Tasarımı

Termal analizde kullanılan makina üç boyutlu olarak tasarlanmıştır. Çünkü sıcaklık dağılımlarının daha iyi belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Motor geometrisi, Ansys Electronics Desktop Maxwell 3D yazılımı ile elde edilmiştir.



Şekil 5.1 Asenkron motor geometrisi



Şekil 5.2 Motor geometrisinin yan kesitten görünümü

Şekil 5.2'de gösterilen motor yapısında stator, rotor ve şaft yapılarında çelik alaşımlı M19_24G malzemesi kullanılmıştır. Stator sargı malzemesi bakır iken rotor çubukları ise alüminyumdur. Termal analizin yapılması için kullanılan malzemelerin tanımlamaları doğru yapılmalıdır. Aksi durumda doğru olmayan sonuçlar elde edilmektedir. Aşağıdaki tabloda bu analizde kullanılan malzemelerin özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 5.2 Malzeme özellikleri

Malzeme	**Termal iletkenlik ($W/m^2.°C$)**	**Özel sıcaklık (J/kg.°C)**	**Yoğunluk (kg/m^3)**
Çelik M19_24G	45,0	481,0	7872,0
Bakır	400,0	385,0	8933,0
Alüminyum	237,50	951,0	2689,0
Hava	0,0260	1007,0	1,1614

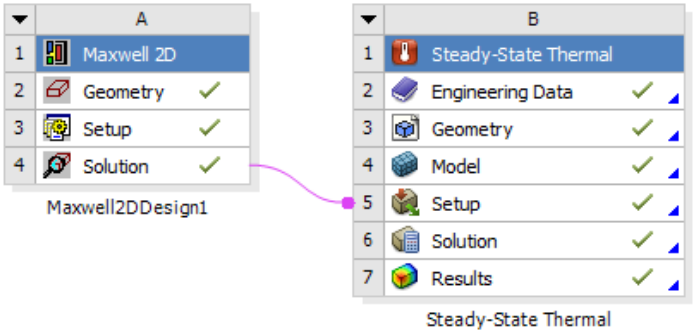
Özel sıcaklık, bir maddenin sıcaklığını bir derece (°C) artırılması için gereken enerji değeridir. Havanın termal iletkenlik değeri çok düşük olduğundan stator ve rotor arasındaki termal akışkanlığını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle özel uygulamalarda gelişmiş soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada dikkat edilmesi gereken konu malzemenin termal iletkenliğidir. Çünkü ısı yayılımı üzerinden önemli bir etkiye sahiptir. Termal iletkenlik, ısının belirli bir bölgeden başka bir bölge transferi olarak tanımlanmaktadır.

5.2 Asenkron Motorun Termal Analizi

Bu çalışmada, Ansys Workbench programında Electronics Desktop ve Steady-State Thermal yazılımlarının birbirleri ile eşleştirilmesiyle termal analiz yapılmıştır.

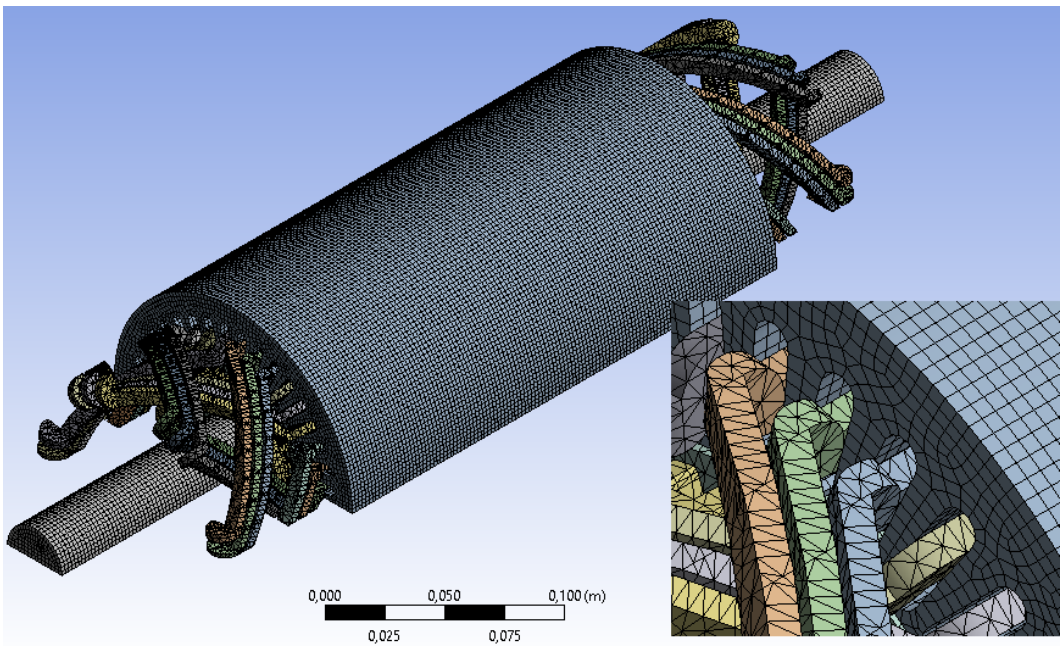
Electronics Desktop yazılımı ile edilen kayıplar Steady-State Thermal yazılımı tarafından değerlendirilerek sonuçlar elde edilmiştir.

Yazılımda Electronics Desktop yazılımının sonuçları Steady-State Thermal yazılımının başlangıç kurulumunu oluşturmaktadır. Workbench ortamı bu etkileşimi sağlamada analiz sonuçlarının elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Aşağıdaki şekilde eşleştirme bağlantısı gösterilmiştir.



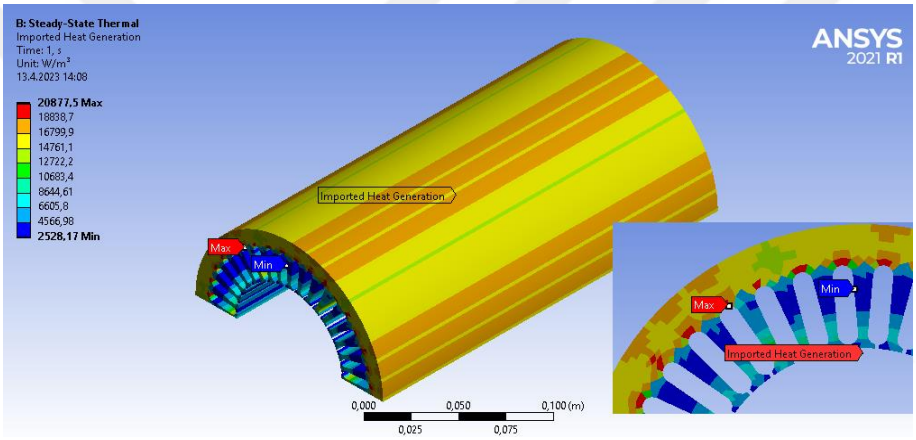
Şekil 5.3 Maxwell ve steady-state thermal eşleştirme

Analize başlamadan önce makinada kullanılan malzemelerinin tanımlamaları kütüphaneden çekilerek yapılmıştır. Termal analizin gerçekleştirilmesi için modelin ağ yapısının çıkarılması gerekmektedir. Bu çalışmada ağ yapısı 0,002 m element boyutu ile gerçekleştirilmiştir ve aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Ağ yapısının küçük olması analiz sonuçlarının doğruluğunu artırmaktadır.



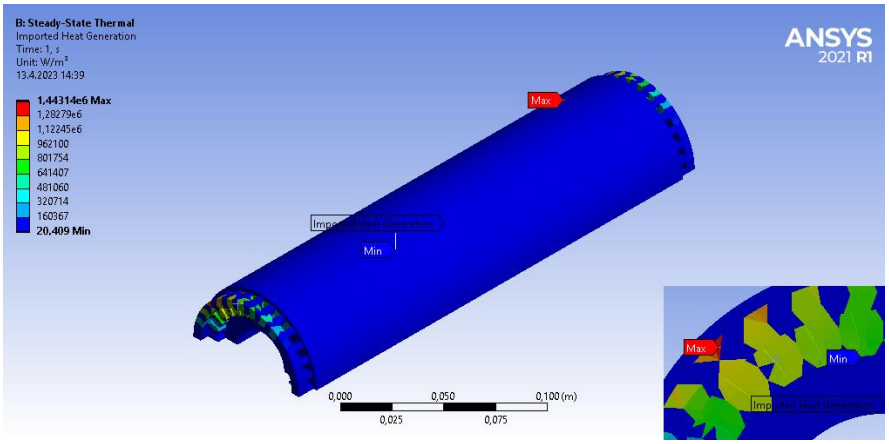
Şekil 5.4 Mekanik modelin ağ yapısı

Electronics Desktop yazılımı ile elde edilen kayıpların doğru bir şekilde değerlendirilmesi için çalışmada stator ve rotor yapılarının ayrı ayrı ısı üretim değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Electronics Desktop yazılımından Steady-State Thermal yazılımına aktarılmıştır. Aşağıdaki şekilde stator çekirdek yapısının ısı üretim değerleri gösterilmiştir. Isı üretim değeri çekirdek üzerindeki birim küp başına düşen elektriksel kayıpları ifade etmektedir. Aynı zamanda bir enerji biçiminin (elektrik, mekanik, kimyasal, nükleer enerji vb.) termal enerjiye dönüşmesidir. Daha önceden de ifade edildiği gibi bu kayıplar ile sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek ve en düşük ısı üretim değerleri gösterilmiştir. En yüksek değerler stator oluk diplerinde 20877,5 W/m^3 iken en düşük değerler ise ön diş yüzeylerinde 2528,17 W/m^3 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.5 Stator çekirdek yapısının ısı üretim değerleri

Aşağıdaki şekilde rotor çekirdek ve çubuk yapılarının ısı üretim değerleri gösterilmiştir. En yüksek değerler rotor çubuklarında gözlemlenirken en düşük değerler ise rotor çekirdek yüzeyinde gözlenmiştir.



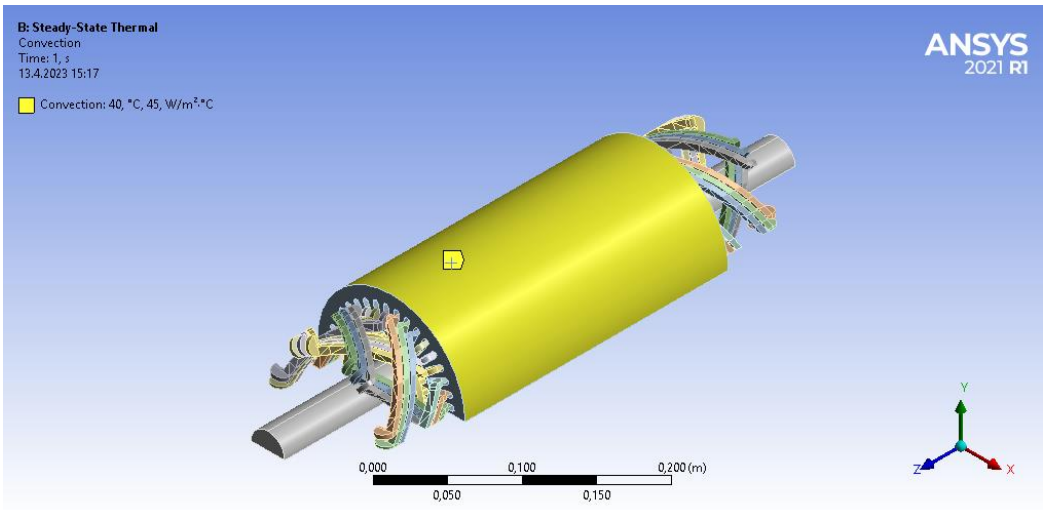
Şekil 5.6 Rotor çekirdek yapısının ısı üretim değerleri

Elde edilen ısı üretim değerleri ile termal analiz gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.3'de Electronics Desktop yazılımından elde edilen ısı üretim değerleri gösterilmiştir. Hacim (m^3) başına düşen kayıplar belirli bir ölçeklendirme katsayısı ile oluşturulmuştur. Ayrıca rotor çubuklarının kayıp değerleri toplam şeklinde belirtilmiştir.

Tablo 5.3 Hacim kaybı yoğunlukları

Yapı	**Toplam Kayıp (W/m^3)**	**Ölçeklendirme Faktörü**
Stator	10,9351	1,02266
Stator Sargıları	43,5337	1,00
Rotor	0,438306	1,01047
Rotor Çubukları	82,9701	0,999

Bu noktada diğer bir önemli husus ise analizi yapılacak yapının sınır koşullarının belirlenmesidir. Sınır koşulları belirlenirken motor yapısında kullanılan malzemelerin özellikleri dikkate alınmalıdır. Sıcaklık analizi için iki önemli parametrenin olması gerekmektedir. Bunlar sıcaklık kaynağı ve ısı yayılımıdır. Çalışmada sıcaklık kaynağı elektriksek kayıplar olarak belirlenmiştir. Isı yayılımı ise sıcaklık akışını doğrudan etkilemektedir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi ısı yayılımı stator çekirdeği üzerinden gerçekleşmektedir. Bu yapının hava veya başka bir madde ile temas ettiği düşünüldüğünden soğutma etkisi oluşturmaktadır.



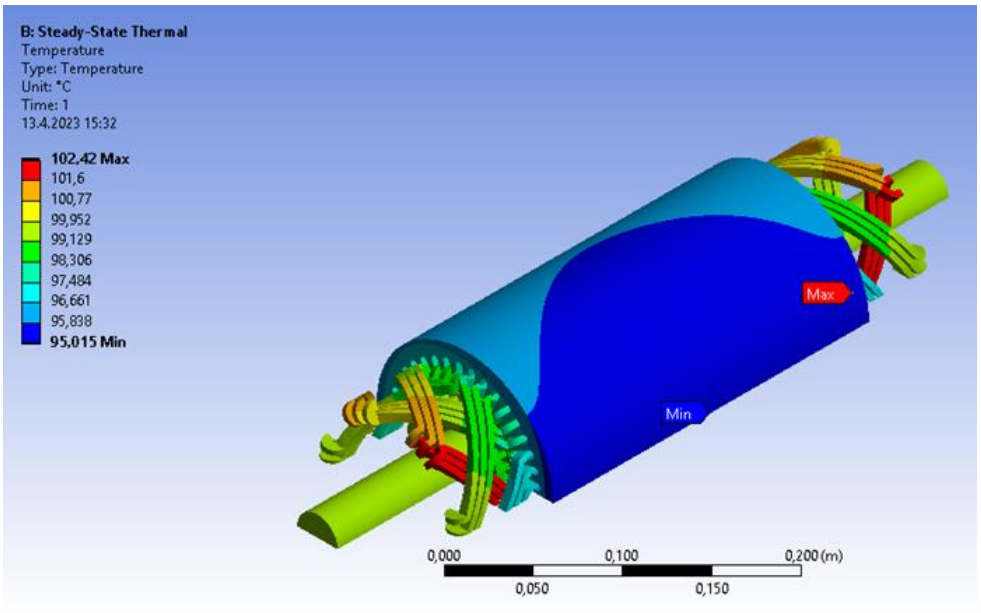
Şekil 5.7 Isı yayılımı

Stator yüzeyinde ısı yayılımın gerçekleştirilmesi için sarı bölge sınır koşulu olarak belirlenmiştir. Motor sıcaklık izolasyonlarında ortam sıcaklığı 40 °C olarak dikkate alındığından aynı değer burada da kullanılmıştır. Stator çekirdeğinde kullanılan M19_24G malzemesinin termal iletkenlik katsayısı 45 W/m^2.°C olduğundan ısı yayılımı için de aynı katsayı kullanılmıştır.

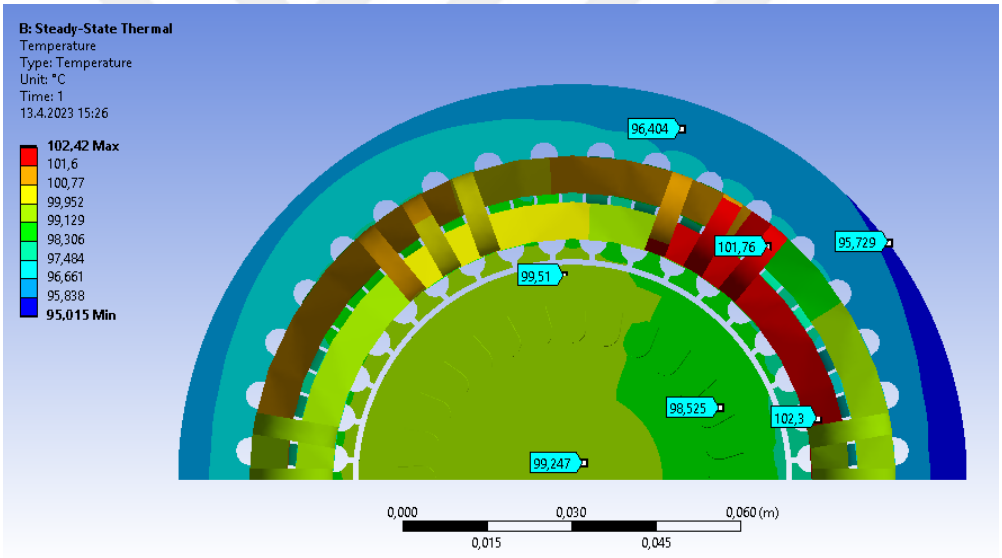
Tablo 5.4 Sınır koşulları

Parametreler		
Sıcaklık kaynağı	Elektriksel kayıplar	
Isı yayılımı (Konveksiyon)	Ortam sıcaklığı (40 °C)	Termal iletkenlik katsayısı (45 W/m^2.°C)

Yukarıda anlatılan sınır koşullarına göre termal analiz kararlı hal durumu için makinanın 120 ile 140 ms arasındaki çalışma süresinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8 Termal analiz sonuçları



Şekil 5.9 Termal analiz sonuçlarının yan kesiti

Analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek sıcaklık değeri stator sargısında 102,42 °C olarak ölçülmüştür. En düşük sıcaklık değeri ise stator çekirdek yüzeyinde 95,015 °C olmuştur. Rotor çevresinde sıcaklık değeri 99,51 °C iken şaft çevresi 99,247 °C olduğu görülmüştür.

6
ASENKRON MOTORUN YAPISAL ANALİZİ

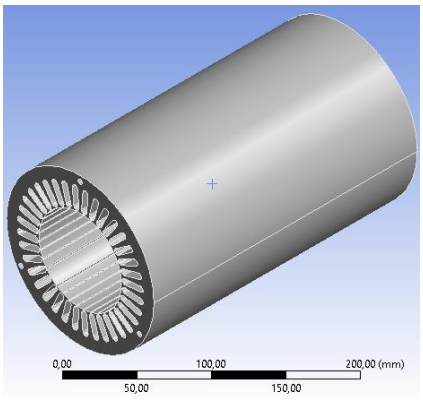
Bu bölümde modal ve stres analizleri incelenmiştir. Asenkron motorlar çalışırken belirli oranlarda titreşim üretmektedirler. Dolayısıyla dinamik özelliklerinde de değişmeler meydana gelmektedir. Değişmelerin motorun mekanik yapısının nasıl etkilediğini gözlemlemek için modal analizi yapılmıştır. Bununla birlikte motor şaftına bağlanan mekanik yükün stres altındaki rotor ve şaft yapısının toplam yer değiştirmeleri de incelenmiştir.

6.1 Asenkron Motorun Modal Analizi

Modal analizi sistemlerin belirli frekans ortamlarında dinamik özelliklerinin belirlenmesidir. Yapısal olarak asenkron motorun statoru incelenmiştir. Çeşitli kayıplardan dolayı titreşimler meydana gelmektedir [55]. Modal analizi kullanılacak yapının dinamik karakteristiklerinin geliştirilmesine ve optimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Neredeyse tüm yapılar rezonans frekansında yüksek genlikli titreşim üretirler [56]. Bu nedenle motorun titreşim ve gürültüsünü olumlu yönde geliştirmek için modal analizi kullanılmaktadır.

Motora uygulanan gerilim ile oluşan manyetik alan kuvvetinin frekansı motorun doğal frekansına yakın veya uyumlu olursa motor rezonans durumunda olacaktır. Aynı zamanda motorun kullanıldığı ortamda bulunan diğer mekanik sistemler de rezonans olayına neden olabilecektir. Bu durumlarda ise titreşim ve gürültü gibi olumsuzluklar meydana gelmektedir [57]. Oluşan titreşim ve gürültünün azaltılması ve motora uygulanan uyarma frekansının belirlenmesi için motor parçalarının doğal frekansı incelenmektedir [58]. Asenkron motorun statoruna gerilim uygulandığı ve daha çok dış ortama maruz kaldığı için genel itibariyle modal analizi statora uygulanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada stator yapısının modal analizi incelenmiştir.

Stator yapısı motor muhafazası içerinde sabitlendiği için analiz aşamasında da belirli noktalarda sabitlenmiştir. Analiz için kullanılan stator yapısı aşağıda gösterilmiştir. Malzeme yapısı olarak M19_24G çelik malzemesi seçilmiştir.

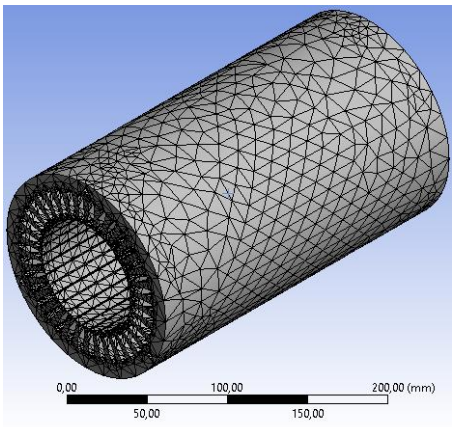


Şekil 6.1 Modal analizi için stator yapısı

Tablo 6.1 M19_24G malzemesinin yapısal özellikleri

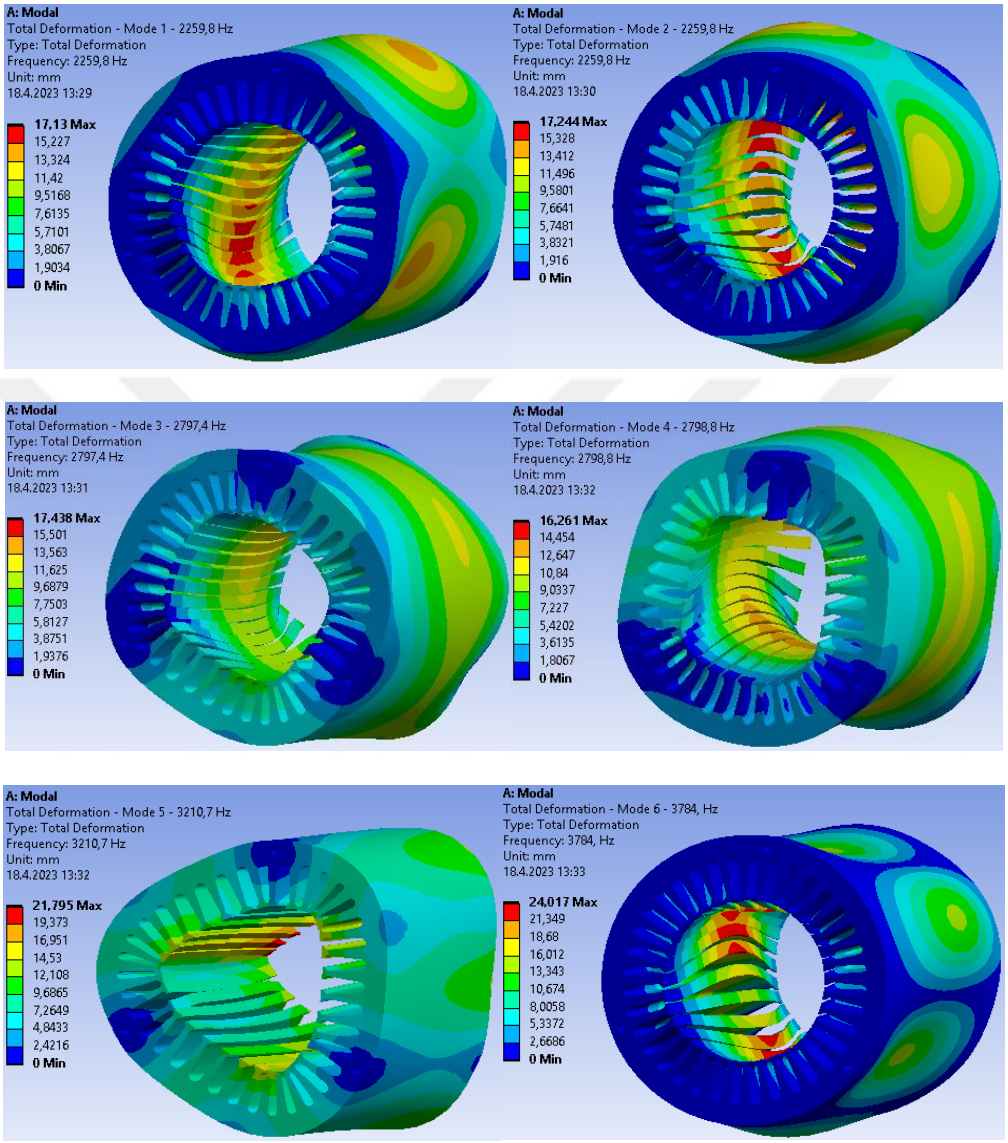
Özellikler	**Değerler**
Yoğunluk	$7{,}85 \times 10^{-6}$ kg/mm^3
Young modülü	2×10^5 MPa
Poission oranı	0,3
Hacim modülü	$1{,}667 \times 10^5$ MPa

Burada; young ve hacim modülü, sırasıyla sertlik ve basınç altında oluşan değerleridir. Aşağıdaki analizi gerçekleştirilen statorun ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Modal analizi için ağ yapısı

Yapılan modal analizine göre sistemin doğal frekansları bulunmuştur. Doğal frekanslar sırasıyla 2259,8; 2797,4; 2798,8; 3210,7; ve 3784 Hz olarak belirlenmiştir. Doğal frekans durumunda elde edilen toplam deformasyon görselleri aşağıda gösterilmiştir.

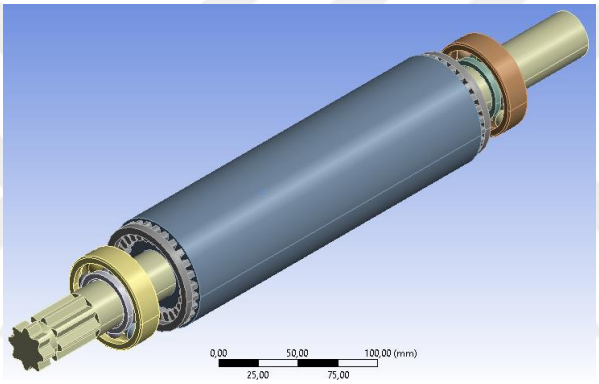


Şekil 6.3 Doğal frekans altında toplam deformasyon değişimleri

Sonuçlar incelendiğinde doğal frekansın artmasıyla stator yapısında deformasyon oranın arttığı gözlenmiştir. En az deformasyon oranı 2259,8 Hz'de gerçekleşmiştir. Deformasyonlar genellikle stator dişlerinin orta kısımlarında maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bu noktalardaki yüksek deformasyonlar aynı zamanda titreşim ve gürültünün kaynağı olarak da gösterilebilir. Yani farklı frekanslardaki titreşimler ve gürültüler deformasyona neden olmuştur.

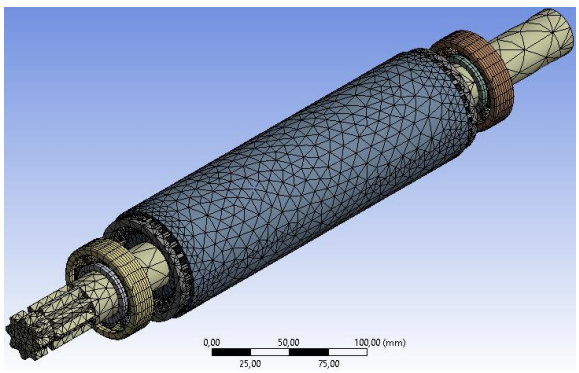
6.2 Asenkron Motorun Stres Analizi

Tasarlanan asenkron motorun belirli şartlar altında stres analizi gerçekleştirilmiştir. Manyetik analiz sonucundan elde edilen moment grafiğine göre makinanın üretmiş olduğu moment 3,91 Nm olarak belirlenmiş idi. Stres analizi için Ansys Static Structural yazılımı kullanılmıştır. Motorun stres analizinin yapılması için daha sonrasında makina geometrisinde değişiklikler yapılmıştır. Motor şaftına bağlanan mekanik yükün şaft, rotor ve rotor çubuklarına olan etkisi incelenmiştir. Bunun için yükün bağlanacağı mile dişliler eklenmiştir. Rotor hareketi için motor milinin her iki tarafına simetri biçimde, iki adet dış çapı 65 mm olan rulmanlar yerleştirilmiştir. Rulmanlar yapısal olarak çelik malzemesinden oluşturulmuştur. Aşağıdaki şekilde dişlerin ve rulmanların yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Şaft dişleri ve rulmanlar

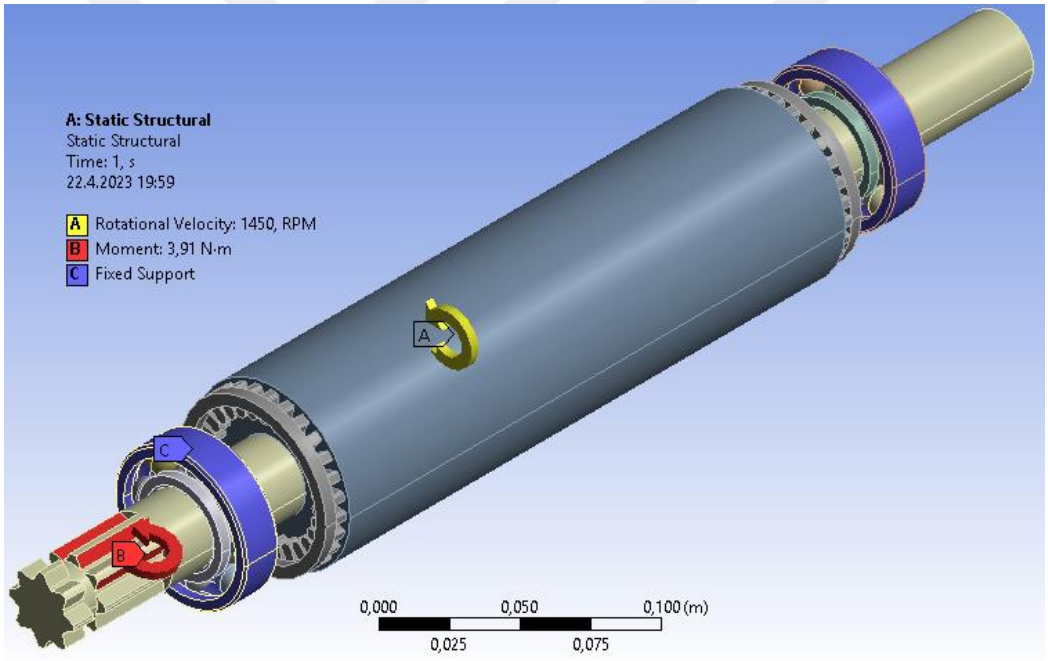
Kullanılan geometride manyetik ve termal analizlerde olduğu gibi rotor ve şaft M19_24G malzemesinden, rotor çubukları ise alüminyumdan oluşturulmuştur. Stres analizinin gerçekleştirilmesi için öncelikle ağ yapısı oluşturulmuş ve sınır koşulları belirlenmiştir.



Şekil 6.5 Şaft dişleri ve rulmanların ağ yapısı

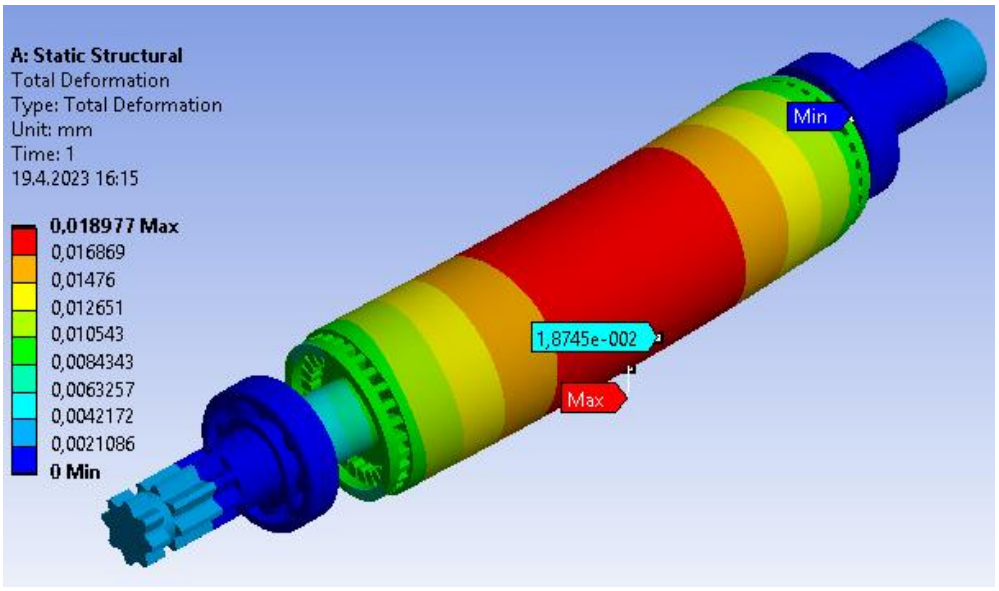
Tablo 6.2 Stres analizi için sınır koşulları

Parametreler	**Değerler**
Dönüş hızı ve yönü	1450 dev/dk ve saat yönünün tersi
Uygulanan moment ve yönü	3,91 Nm ve saat yönünün tersi
Sabit destekler	Rulmanların dış bileziği



Şekil 6.6 Stres analizi için belirlenen sınır koşulları

Yukarıda tanımlanan koşullara göre analiz sonuçları elde edilmiştir. Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Stres analizi sonuçları

Sonuçlara göre, rotor yapısında maksimum 0,0189 mm'lik bir deformasyon meydana gelmiştir. Bu oran rotor çapıyla karşılaştırıldığında (% 0,0144) gerçekten de makul sınırlar içerisinde olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte sabit olan rulmanlarda dönüş hızına bağlı olarak herhangi bir deformasyon meydana gelmemiştir. Yüke maruz kalan mil dişlerinin ise neredeyse deformasyona uğramadığı görülmüştür.

7
SONUÇ

Asenkron motorun çoklu fizik tasarımı için gereken analizler sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür araştırmasına göre uygun analiz ve tasarım yöntemi belirlenerek kapsamlı değerlendirmeler yapılmıştır.

Elektromanyetik ve termal analizler çalışmanın odak noktası olarak belirlenmiştir. Bu analizlerin yapılma yöntemleri araştırılarak alt başlıklar halinde incelenmiş ve bu yöntemlerin birbirleri ile olan üstünlükleri ve dezavantajları açıklanmıştır. Daha sonra bu çalışma için uygun olan yöntem seçilmiştir. Elektromanyetik ve termal analizler Sonlu Elemanlar (SE) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak elektromanyetik analiz yapılmıştır. Bu analiz için Electronics Desktop yazılımı kullanılmıştır. Aynı yazılım ile termal analizde gerekli olan mekanik geometri de elde edilmiştir. Elektromanyetik analiz ile elektriksel kayıplar belirlenmiştir. Motorlarda ısı kaynağı elektriksel kayıplar olduğu için sonuçlar Workbench programında Steady-State Thermal yazılımına aktarılmıştır.

Termal analizde sınır koşulları önem arz ettiğinden sınır koşullarında olması gereken kavramlar detaylı bir biçimde açıklanmıştır. Uygun sınır koşullarına göre stator ve rotor çekirdekleri, stator sargısı, rotor çubukları ve motor şaftında oluşan sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sıcaklık değerlerinin maksimum ve minimum değerleri saptanmıştır.

Bir sonraki aşamada asenkron motorun yapısal olarak harmonik ve stres analizleri yapılmıştır. Stator çekirdeğinin doğal frekansları Ansys Modal yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu frekansların stator çekirdeğinde yapısal olarak ne kadarlık bir toplam deformasyona uğradığı belirlenmiştir.

Stres analizi ile şaft, rotor çekirdeği ve rotor çubuklarında meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir. Bunun için Ansys Static Structural yazılımı kullanılmıştır. Motor şaftına iki adet rulman ve momentin uygulanması için dişler eklenmiştir. Elektromanyetik analiz sonucundan elde edilen moment değeri bu analizde de kullanılarak rotor yapısında meydana gelen değişmeler gözlenmiştir.

Genel değerlendirme yapıldığında, bu çalışma bir makinanın tasarım aşamasından üretime kadar olan süreçte gerçekleştirilmesi gereken testlerin ön hazırlık aşamasını oluşturmaktadır. Tasarlanması planlanan motorun prototip aşamasına geçmeden önce gerçekten üretilebilir olup olmadığı bu analizler ile belirlenebileceği çıkarımı oluşmuştur. Sonuç olarak mekanik, elektromanyetik, termal, harmonik ve stres analizlerinin nasıl ve hangi yöntemlerle yapılacağı detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Motor tasarımcıları açısından kapsamlı bir analiz için değerli bir kaynak olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] V. Anand, B. S. Ram, A comprehensive investigation of the design of solar-powered induction motor-driven electric vehicle (SIM-EV), Materials Today: Proceedings, Volume 56, Part 6, 2022, Pages 3682-3686, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.438.

[2] M. Mahmoud Y. et al. "Effect of poles, slots, phases number and stack length changes on the optimal design of induction motor." 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON) (2017): 466-471.

[3] M.J. Akhtar, R.K. Behera, (2019), Optimal design of stator and rotor slot of induction motor for electric vehicle applications. IET Electr. Syst. Transp., 9: 35-43. https://doi.org/10.1049/iet-est.2018.5050.

[4] Y. Xie, J. Guo, P. Chen, Z. Li, Coupled Fluid-Thermal Analysis for Induction Motors with Broken Bars Operating under the Rated Load. Energies 2018, 11, 2024. https://doi.org/10.3390/en11082024.

[5] N. Arbab, W. Wang, A. H. Isfahani and B. Fahimi, "Temperature effects on steady state performance of an induction machine and a Switched Reluctance machine," 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI, USA, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/ITEC.2014.6861826.

[6] X. Wang, D. Jingjuan, P. Gao, H. Lv, (2017). Thermal comparison of a CFD analysis and a lumped parameter model of an air-cooled induction machine for EVs. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 54. 1-20. 10.3233/JAE-160092.

[7] M. Bhambere, S. Chaudhari, (2022). Numerical analysis of heat transfer from perforated fins of an induction motor housing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1259. 012011. 10.1088/1757-899X/1259/1/012011.

[8] M. Baranski, (2019), "FE analysis of coupled electromagnetic-thermal phenomena in the squirrel cage motor working at high ambient temperature", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 38 No. 4, pp. 1120-1132. https://doi.org/10.1108/COMPEL-10-2018-0384.

[9] S. Čorović, N. Šutar and D. Miljavec, "Modeling of Thermal Effects in Induction Machines due to the Stator End-Windings," 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ME49197.2020.9286670.

[10] S. Nategh, H. Zhang, O. Wallmark, A. Boglietti, T. Nassen and M. Bazant, "Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 1, pp. 79-89, Jan. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2821619.

[11] M. Vukotić, S. Lutovski, N. Šutar, D. Miljavec, and S. Čorović, "Thermal Effects in the End-Winding Region of Electrical Machines," Energies, vol. 16, no. 2, p. 930, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020930.

[12] S. Madhavan, R. D. P B, E. Gundabattini, and A. Mystkowski, “Thermal Analysis and Heat Management Strategies for an Induction Motor, a Review,” Energies, vol. 15, no. 21, p. 8127, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15218127.

[13] Z. A. Abdul Karim, A. H. Mohd Yusoff, (2014). Cooling System for Electric Motor of an Electric Vehicle Propulsion. Advanced Materials Research, 903, 209–214. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.903.209

[14] A. Bhosale, S. Nandagopal, D. Jebaseelan, S. K. Ramasami, L. N. Chokkalingam, Air flow analysis of 20 hp three phase induction motor, Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 13, 25 (2022)

[15] M. Gebauer, T. Blejchař, T. Brzobohatý, T. Karásek, and M. Nevřela, “Determination of Aerodynamic Losses of Electric Motors,” Symmetry, vol. 14, no. 11, p. 2399, Nov. 2022, doi: 10.3390/sym14112399.

[16] J. Zhang, R. Wang, Y. Fang, and Y. Lin, “Insulation Degradation Analysis Due to Thermo-Mechanical Stress in Deep-Sea Oil-Filled Motors,” Energies, vol. 15, no. 11, p. 3963, May 2022, doi: 10.3390/en15113963.

[17] P. Chen, Y. Xie, and D. Li, “Thermal Field and Stress Analysis of Induction Motor with Stator Inter-Turn Fault,” Machines, vol. 10, no. 7, p. 504, Jun. 2022, doi: 10.3390/machines10070504.

[18] A. Hassan, C. Quanfang, S. Abbas, et al. Comparative Thermal Analysis of Carbon Nanotubes and Their Metal Composites with Copper and Aluminum as Winding Material in Induction Motor. J. Electr. Eng. Technol. 17, 2353–2365 (2022). https://doi.org/10.1007/s42835-022-01072-9.

[19] C. Guo, L. Long, Y. Wu, K. Xu, H. Ye, Electromagnetic-thermal coupling analysis of a permanent-magnet in-wheel motor with cooling channels in the deepened stator slots, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 35, 2022, 102158, ISSN 2214-157X, https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102158.

[20] M. Appadurai, E. Fantin Irudaya Raj, K. Venkadeshwaran, Finite element design and thermal analysis of an induction motor used for a hydraulic pumping system, Materials Today: Proceedings, Volume 45, Part 7, 2021, Pages 7100-7106, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.944.

[21] Z. Rehman, K. Seong, Three-D Numerical Thermal Analysis of Electric Motor with Cooling Jacket. Energies 2018, 11, 92. https://doi.org/10.3390/en11010092.

[22] Ansys, https://www.ansys.com/applications/electric-motors, 21.04.2023.

[23] Chapman, Stephen J. Electric Machinery Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 2012.

[24] A. E. Fitzgerald, et al., “Electric Machinery,” 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 1990.

[25] Scott D. Sudhoff, “Power Magnetic Devices: a Multi-Objective Design Approach”, Wiley & Sons, Incorporated, John, New Jersey, 2014.

[26] Inst Tools, https://instrumentationtools.com, 15.04.2023.

[27] Tutorialspoint, https://www.tutorialspoint.com, 15.04.2023.

[28] L. Aarniovuori, M. Niemelä, J. Pyrhönen, W. Cao and E. B. Agamloh, "Loss Components and Performance of Modern Induction Motors," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 1253-1259, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507189.

[29] R. Buinac and V. Tomljenović, "Determination of the torque-speed characteristic of induction motor in electric machinery education," 2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, 2013, pp. 765-769.

[30] Vlado Ostović; Edition: View all formats and editions; Publisher: Springer-Verlag, New York, 1989.

[31] J. Nazarzadeh and V. Naeini, 'Magnetic Reluctance Method for Dynamical Modeling of Squirrel Cage Induction Machines', Electric Machines and Drives. InTech, Feb. 28, 2011. doi: 10.5772/14798.

[32] U. Valverde, J.P. Nadeau, D. Scaravetti, J.F. Leon, Innovation through Pertinent Patents Research based on Physical Phenomena Involved, Procedia CIRP, Volume 21, 2014, Pages 515-520, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.061.

[33] Schuddebeurs, Jeroen. (2014). De-risking Integrated Full Electric Propulsion (IFEP) vessels using advanced modelling and simulation techniques.

[34] M. Amrhein and P. T. Krein, "Induction Machine Modeling Approach Based on 3-D Magnetic Equivalent Circuit Framework," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 339-347, June 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2046998.

[35] E. Ravaioli, B. Auchmann, M. Maciejewski, H.H.J. ten Kate, A.P. Verweij, Lumped-Element Dynamic Electro-Thermal model of a superconducting magnet, Cryogenics, Volume 80, Part 3, 2016, Pages 346-356, ISSN 0011-2275, https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.04.004.

[36] R. Ibtiouen, S. Mezani, O. Touhami, N. Nouali and M. Benhaddadi, "Application of lumped parameters and finite element methods to the thermal modeling of an induction motor," IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485), Cambridge, MA, USA, 2001, pp. 505-507, doi: 10.1109/IEMDC.2001.939354.

[37] J. P. Wang, D. K. Lieu, W. L. Lorimer and A. Hartman, "Comparison of lumped parameter and finite element magnetic modeling in a brushless DC motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 5, pp. 4092-4094, Sept. 1997, doi: 10.1109/20.619673.

[38] P. Cabral, A. Adouni, "Induction Motor Thermal Analysis Based on Lumped Parameter Thermal Network." KnE Engineering, 5(6), 2020, 451–464. https://doi.org/10.18502/keg.v5i6.7061.f

[39] M. S. Shephard and M. K. Georges, Automatic three-dimensional mesh generation by the finite octree technique. Int. J. Numer. Meth. Engng., 1991, 32: 709-749. https://doi.org/10.1002/nme.1620320406

[40] M. Bern, D. Eppsteın, (1995). Mesh Generatıon and Optimal Triangulation. Computing in Euclidean Geometry, 47–123. doi:10.1142/9789812831699_0003

[41] J. A. Martins and E. C. Romao, “The Importance of Accurate Boundary Condition in Obtaining Reliable Shearing Stresses on a Torsional Finite Element Simulation”, Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 12, no. 3, pp. 8482–8487, Jun. 2022.

[42] A. Cheng, D. T. Cheng, (2005). "Heritage and early history of the boundary element method". Engineering Analysis with Boundary Elements. 29 (3): 268. doi:10.1016/j.enganabound.2004.12.001

[43] J. N. Reddy, (2009). "Second order differential equations in one dimension: Finite element models". An Introduction to the Finite Element Method (3rd ed.). Boston: McGraw-Hill. p. 110

[44] C. P. Priyanka, N. S. Nair and G. Jagdanand, "Thermal Analysis of Multiphase Induction Motor for Electric Vehicle Applications" 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Anaheim, CA, USA, 2022, pp. 801-806, doi: 10.1109/ITEC53557.2022.9813800.

[45] F. Graffeo, S. Vaschetto, A. Miotto, F. Carbone, A. Tenconi, and A. Cavagnino, “Lumped-Parameters Thermal Network of PM Synchronous Machines for Automotive Brake-by-Wire Systems,” Energies, vol. 14, no. 18, p. 5652, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14185652.

[46] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller and C. Mejuto, "Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 3, pp. 871-882, March 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011622.

[47] P. H. Mellor, D. Roberts, D. R. Turner, (1991). Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. IEE Proceedings B Electric Power Applications, 138(5), 205. doi:10.1049/ip-b.1991.0025

[48] A. Kačenka, A. C. Pop, I. Vintiloiu and D. Fodorean, "Lumped Parameter Thermal Modeling of Permanent Magnet Synchronous Motor," 2019 Electric Vehicles International Conference (EV), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/EV.2019.8892937.

[49] D. Lian, Z.Q. Zhu, Y. Zhang, "A Hybrid Lumped-Parameter and Two-Dimensional Analytical Thermal Model for Electrical Machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 1, pp. 246-258, Jan.-Feb. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3029997.

[50] D. A. Staton and A. Cavagnino, "Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 10, pp. 3509-3516, Oct. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.922604.

[51] Y. Yang, B. Bilgin, M. Kasprzak, S. Nalakath, H. Sadek, M. Preindl, J. Cotton, N. Schofield, A. Emadi, (2017), Thermal management of electric machines. IET Electr. Syst. Transp., 7: 104-116. https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0050.

[52] Harding, Kevin. (2018). Heat transfer introduction.

[53] Lienhard John H. A Heat Transfer Textbook. Fifth ed. Dover Publications 2020.

[54] Science Notes, https://sciencenotes.org, 21.04.2023

[55] S. Bhadouria, B.N. Agrawal, S.K. Singh, P.K.S. Nain, (2022). Study and Modal Analysis of Induction Motor by Using ANSYS. In: Singari, R.M., Kankar, P.K., Moona, G. (eds) Advances in Mechanical Engineering and Technology. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9613-8_47.

[56] M. L. Chandravanshi, A. K. Mukhopadhyay, (2013). Modal Analysis of Structural Vibration. 14. 10.1115/IMECE2013-62533.

[57] Y. Li, J. Du, J. Xia, "Vibration and Modal Analysis of Small Induction Motor", Proceedings of the International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics, Atlantis Press,903-907,2352-5401, 2015, https://doi.org/10.2991/ameii-15.2015.168.

[58] X.-H. Li, S.-R Huang, L.-Z. Li, Calculation and analysis of vehicle vibration and noise of permanent magnet synchronous motor applied in electric vehicle [J].Electric Machines and Control 2013:17(8) : 37-42.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. S. DOĞAN, Y. ÖNER "Multiple Physics Design of Induction Motor", Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 2023. (Kabul edildi, yayın aşamasındadır.)