

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

3 FAZLI ASENKRON MOTORLARIN MODELLENMESİ VE
ANALİZİ

Muhammet KARADEDE

Danışman
Doç. Dr. Melik Ziya YAKUT

ISPARTA - 2025



© 2025 [Muhammet KARADEDE]

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

30/01/2025

Muhammet KARADEDE

.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Araçlar	13
3.2. Motorun Modelleme Süreci	13
3.3. Simülasyon Süreci.....	14
3.4. Veri Toplama ve Karşılaştırma	15
3.5. Değerlendirme ve Doğrulama	15
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	16
4.1. ANSYS Maxwell ile Modelleme	16
4.1.1. Yeni bir proje oluşturma	16
4.1.2. Geometri tasarımı.....	17
4.1.3. Malzeme seçimi	18
4.1.4. Sargıların tanımlanması	19
4.1.5. Meshleme (ağ yapısı)	20
4.1.6. Sınır şartları ve yükleme koşulları	21
4.1.7. Çözüm ayarları ve çözümleme	21
4.1.8. Sonuçların görselleştirilmesi ve raporlama	22
4.1.9. Sonuç ve optimizasyon	23
4.2. Üç Fazlı Asenkron Motor.....	24
4.2.1. Volt electric motors VM 90L-2 motor parametreleri	24
4.2.2. Volt electric motors VM 90L-2 motor.....	27
4.2.3. Elektriksel giriş gücünün hesaplanması	27
4.2.4. Motor kutup sayısının doğrulanması.....	27
4.3. Modellemeye Geçiş.....	28
4.3.1. 2 Boyutlu modelleme	29
4.3.2. 3 Boyutlu modelleme	52
4.4. Simülasyon.....	56
4.5. Stator Sargı Dirençlerinin Ölçülmesi	64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	73

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

3 FAZLI ASENKRON MOTORLARIN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Muhammet KARADEDE

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Melik Ziya YAKUT

Bu tez çalışmasında, Volt Electric Motors VM 90L-2 model üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun ANSYS Student 2025 R1 yazılımı kullanılarak 2D ve 3D modellemesi gerçekleştirilmiş ve elektromanyetik analizleri yapılmıştır. Motorun temel performans parametreleri olan güç faktörü, verimlilik, anma hızı, stator direnci, giriş gücü ve çıkış gücü gibi değerler analiz edilmiştir. Giriş gücü elle hesaplanmış, stator dirençleri ölçümlenmiştir. Simülasyon sonuçları ile katalog değerleri karşılaştırılarak motorun performansı ve tasarım doğruluğu değerlendirilmiştir.

ANSYS Maxwell ortamında yapılan simülasyonlar sırasında, motorun stator ve rotor tasarımları oluşturulmuş, manyetik akı yoğunluğu ve tork değerleri gibi parametreler detaylı şekilde incelenmiştir. Analiz sonuçları, motorun enerji verimliliği ve mekanik performansı hakkında önemli ipuçları sağlamıştır. Motorun katalog değerleriyle yapılan karşılaştırmalar sonucunda, simülasyon verilerinin gerçek ölçümlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu çalışma, üç fazlı asenkron motorların tasarım, modelleme ve performans analizi süreçlerine yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunmakta ve elektromanyetik analiz yazılımlarının elektrik motorlarının tasarım ve optimizasyonundaki önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: ANSYS Maxwell, 2D ve 3D modelleme, Güç faktörü, Verimlilik, Stator direnci, Giriş gücü

2025, 73 sayfa

ABSTRACT

Master's Thesis

MODELING AND ANALYSIS OF THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS

Muhammet KARADEDE

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Mechatronics**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Melik Ziya YAKUT

In this thesis, the 2D and 3D modeling of the Volt Electric Motors VM 90L-2 model three-phase squirrel-cage asynchronous motor was carried out using ANSYS Student 2025 R1 software, and its electromagnetic analyses were performed. The fundamental performance parameters of the motor, including power factor, efficiency, nominal speed, stator resistance, input power, and output power, were analyzed. Input power was calculated manually, and stator resistances were measured. Simulation results were compared with catalog values to evaluate the motor's performance and design accuracy.

During the simulations conducted in the ANSYS Maxwell environment, the stator and rotor designs of the motor were created, and parameters such as magnetic flux density and torque values were examined in detail. The analysis results provided significant insights into the motor's energy efficiency and mechanical performance. Comparisons with the catalog values revealed that the simulation data were consistent with actual measurements.

This study offers a comprehensive approach to the design, modeling, and performance analysis of three-phase asynchronous motors, emphasizing the importance of electromagnetic analysis software in the design and optimization of electric motors.

Key Words: ANSYS Maxwell, 2D and 3D modeling, Power factor, Efficiency, Stator resistance, Input power

2025, 73 pages

TEŞEKKÜR

Tezimin yürütülmesinde desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Melik Ziya YAKUT'a çalışma süresince bana desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan eşime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Muhammet KARADEDE
ISPARTA, 2025



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Üç fazlı asenkron motor.....	1
Şekil 1.2. Tesla bobini.....	3
Şekil 1.3. Üç fazlı asenkron motoru oluşturan parçaların tanımları	5
Şekil 4.1. Machine type ekranı.....	17
Şekil 4.2. Stator properties ekranı.....	18
Şekil 4.3. Rotor properties ekranı	18
Şekil 4.4. Malzeme seçim ekranı	19
Şekil 4.5. Stator winding ekranı.....	20
Şekil 4.6. Rotor winding ekranı	20
Şekil 4.7. Solution setup ekranı	22
Şekil 4.8. Sonuç ekranı.....	23
Şekil 4.9. Volt electric motors VM 90L-2 etiket çizelgesi	24
Şekil 4.10. Volt electric motors VM 90L-2 etiketi.....	25
Şekil 4.11. Volt electric motors VM 90L-2 motor mekanik ölçüleri	26
Şekil 4.12. Motor seçim ekranı	29
Şekil 4.13. Motor solution setup ekranı	30
Şekil 4.14. Motor Solution Setup Ekranı-2.....	31
Şekil 4.15. Motor properties ekranı.....	31
Şekil 4.16. Stator özellikler ekran	32
Şekil 4.17. Stator oluk yapısı-1 (Yarı açık oluklu stator).....	33
Şekil 4.18. Stator oluk yapısı-2 (Kapalı oluklu stator)	34
Şekil 4.19. Stator oluk yapısı-3 (Yarı kapalı oluklu stator).....	35
Şekil 4.20. Stator oluk yapısı-4 (Yarı açık oluklu stator).....	36
Şekil 4.21. Stator oluk yapısı-5 (Yarı açık oluklu stator).....	36
Şekil 4.22. Stator oluk yapısı-6 (Açık tip stator oluk)	37
Şekil 4.23. Stator oluk geometrisi (Kapalı oluklu stator)	38
Şekil 4.24. Volt electric motors VM 90L-2 motor stator oluk yapısı.....	38
Şekil 4.25. Stator oluk geometrisi ölçüleri.....	39
Şekil 4.26. Stator'un 2 boyutlu modellemesi.....	39
Şekil 4.27. Volt electric motors VM 90L-2 motor stator görüntüsü.....	40
Şekil 4.28. Volt electric motors VM 90L-2 motor stator oluk yapısı görünümü	40
Şekil 4.29. Stator sargı ekranı	41
Şekil 4.30. Rotor özellikler ekranı	42
Şekil 4.31. Rotor oluk yapısı-1 (Yarı oluklu rotor – damla şekilli oluk)	43
Şekil 4.32. Rotor oluk yapısı-2 (Damla şekilli geniş tabanlı oluk).....	44
Şekil 4.33. Rotor oluk yapısı-3 (Trapez tabanlı oluk).....	45
Şekil 4.34. Rotor oluk yapısı-4 (Trapez tabanlı ve yuvarlatılmış köşeli oluk)	46
Şekil 4.35. Rotor oluk geometrisi (Yarı oluklu rotor – damla şekilli oluk)	47
Şekil 4.36. Rotor oluk geometrisi ölçüleri	47
Şekil 4.37. 2 Boyutlu rotor modellemesi	48
Şekil 4.38. Volt electric motors VM 90L-2 motor rotor yapısı genel görünümü	49
Şekil 4.39. Volt electric motors VM 90L-2 motor ring görüntüsü	49
Şekil 4.40. Rotor sargı-ring ekranı	50
Şekil 4.41. 2 Boyutlu rotor ve stator modellemesi.....	51
Şekil 4.42. Veri doğrulama ekranı.....	51
Şekil 4.43. 2 Boyutlu analiz ekranı	52
Şekil 4.44. 3 Boyutlu model oluşturma ekranı.....	53

Şekil 4.45. 3 Boyutlu model seçim ekranı	53
Şekil 4.46. 3 Boyutlu model seçim ekranı-2	54
Şekil 4.47. Rotor ve stator'un 3 boyutlu modellemesi	54
Şekil 4.48. Veri doğrulama ekranı	55
Şekil 4.49. Set eddy effects ekranı	55
Şekil 4.50. Veri doğrulama ekranı-2	56
Şekil 4.51. Solution setup ekranı	56
Şekil 4.52. Report-trace ekranına giriş arayüzü	57
Şekil 4.53. Report-trace ekranı.....	57
Şekil 4.54. Analyze all buton simgesi	58
Şekil 4.55. Motorun 1 milisaniye'deki konumu	58
Şekil 4.56. Motorun 2 milisaniye'deki konumu	59
Şekil 4.57. Motorun 3 milisaniye'deki konumu	59
Şekil 4.58. Motorun 4 milisaniye'deki konumu	60
Şekil 4.59. Motorun 5 milisaniye'deki konumu	60
Şekil 4.60. Motorun 6 milisaniye'deki konumu	61
Şekil 4.61. Motorun 7 milisaniye'deki konumu	61
Şekil 4.62. Motorun 8 milisaniye'deki konumu	62
Şekil 4.63. Motorun 9 milisaniye'deki konumu	62
Şekil 4.64. Motorun 10 milisaniye'deki konumu	63
Şekil 4.65. Motorun 1 milisaniye'deki manyetik akı yoğunluğu	63
Şekil 4.66. Volt electric motors VM 90L-2 motor yıldız bağlantı şeması.....	64
Şekil 4.67. Volt electric motors VM 90L-2 motor bağlantı kutusu.....	65
Şekil 4.68. Birinci faz: U1 ve U2 arasındaki direnç	65
Şekil 4.69. İkinci faz: V1 ve V2 arasındaki direnç	66
Şekil 4.70. Üçüncü faz: W1 ve W2 arasındaki direnç	66
Şekil 5.1. Hız - verimlilik grafiği	67
Şekil 5.2. Hız - güç faktörü grafiği	68
Şekil 5.3. Ansys maxwell analiz değerleri	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Volt electric motors VM 90L-2 motor genel bilgileri	25
Çizelge 4.2. Volt electric motors VM 90L-2 motor elektrik bilgileri.....	26
Çizelge 4.3. Volt electric motors VM 90L-2 motor mekanik bilgileri.....	26
Çizelge 5.1. Analiz sonuçları ve teknik değerler.....	69



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
D	Rotor çapı (metre)
DTC	Doğrudan tork kontrolü (Direct torque control)
F	Rulman yükü (Newton)
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi (Finite element method)
FOC	Alan yönlendirmeli kontrol (Field oriented control)
IE2, IE3	Enerji verimliliği standartları
L	Rotor uzunluğu (metre)
n	Dönme hızı (rpm veya rps)
P ₂	Motorun nominal gücü (Watt)
PWM	Darbe genişlik modülasyonu (Pulse width modulation)
R ₁	Stator direnci (Ohm)
R ₂	Rotor direnci (Ohm)
VFD	Değişken frekanslı sürücüler (Variable frequency drives)
X ₁	Stator kaçak reaktansı (Ohm)
X ₂	Rotor kaçak reaktansı (Ohm)
cos(φ)	Güç faktörü
μ	Sürtünme katsayısı
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
η	Verimlilik (%)

1. GİRİŞ

Endüstriyel sistemler ve modern otomasyon teknolojileri, günümüz üretim faaliyetlerinin temel taşı haline gelmiştir. Bu sistemlerde çok çeşitli uygulamalara uygun çözümler sunan elektrik motorları, özellikle üç fazlı asenkron motorlar, önemli bir yer tutmaktadır (Şekil 1.1). Dayanıklılığı, yüksek verimliliği ve düşük maliyeti nedeniyle bu motorlar, endüstriyel alanda pompalardan fanlara, kompresörlerden taşıma sistemlerine kadar geniş bir yelpazede yaygın olarak kullanılmaktadır.

Üç fazlı asenkron motorlar, endüstriyel alanda, otomasyonda ve ev gereçlerinde en yaygın kullanılan elektrik motorlarıdır. Bu motorlar, üç fazlı alternatif akım (AA) ile çalışır ve güçlü yapıları sayesinde yüksek verimlilik sağlar. Asenkron motorlarda, stator manyetik alanı tarafından indüklenen gerilimle rotor hareket etmeye başlar. Rotorun hızı, stator manyetik alanının hızından biraz daha düşük olur. Bu özellik, motorun asenkron olmasına yol açar ve motorun çalışma prensibi, elektromanyetik indüksiyon yasalarına dayanır.



Şekil 1.1. Üç fazlı asenkron motor

Üç fazlı asenkron motorlar genellikle dayanıklı, bakımı kolay ve uygun maliyetli olmalarıyla bilinir. Bu motorlar, farklı hızlarda ve tork değerlerinde çalışabilen bir yapıya sahip olup, hız kontrolü yapılabilmesi için ek sistemler de entegre edilebilir. Motorun çalıştığı yük koşullarına göre hız ve tork değerleri değişir, ancak motorun

verimliliği genel olarak yük arttıkça daha yüksek olur. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan pompalar, fanlar, kompresörler ve taşıma sistemleri buna örnektir.

Bu motorların genellikle düşük bakım gereksinimi en büyük avantajlarından biridir. Ayrıca, güvenilirlikleri yüksektir ve aşırı ısınma gibi durumlarda güvenlik önlemleri devreye girer. Üç fazlı asenkron motorlar, hem düşük hem de yüksek güç gereksinimlerine sahip sistemlerde kullanılabilir, bu da onları çok yönlü ve esnek bir seçenek haline getirir. Motorun verimliliği ve uzun ömürlü olması, onları modern sanayi ve otomasyon sistemlerinde vazgeçilmez kılar.

Üç fazlı asenkron motorlar, endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan elektrik motorlarıdır. Bu motorlar, elektrik enerjisinin üç fazlı sistemle beslenmesi prensibine dayanır. Motorun temel bileşenleri, stator ve rotor olarak iki ana parçadan oluşur. Stator, motora elektrik enerjisi sağlayan dış bobinlere sahiptir, rotor ise dönen kısımdır ve motorun mekanik iş yapmasını sağlar. Üç fazlı sistemde, üç farklı gerilim kaynağından gelen akımlar, statorun içinde dönen manyetik bir alan yaratır. Bu manyetik alan, rotor üzerinde indüksiyon etkisi yaratır ve rotorun hareket etmesine neden olur.

Üç fazlı asenkron motorların avantajlarından biri, yapılarının oldukça basit olmasıdır. Stator ve rotor arasındaki manyetik etkileşim motorun hareketini sağlar, bu da motorun tasarımını ve üretimini kolaylaştırır. Ayrıca, üç fazlı elektrik sistemleri daha dengeli ve verimli enerji dağılımı sağlar, bu da motorun daha stabil çalışmasına olanak tanır. Motorun yüksek tork üretme kapasitesi ve düşük bakım gereksinimleri, onu özellikle endüstriyel alanlarda tercih edilen bir seçenek haline getirir.

Bu motorlar, genellikle sabit hızda çalışan sistemlerde kullanılır. Ancak hız kontrolü yapılabilmesi için çeşitli teknolojiler ve yöntemler uygulanabilir. Varyatörler, frekans inverterleri ve diğer hız kontrol sistemleri, motorun hızını ayarlamak ve motoru farklı yük koşullarına göre optimize etmek için kullanılır. Motorun çalışma koşullarına göre hız, tork ve akım değerleri değişkenlik gösterebilir. Yük arttıkça motor verimliliği de genellikle artar, bu da motorun geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilmesini sağlar.

Son olarak, üç fazlı asenkron motorların güvenilirlikleri ve dayanıklılıkları, onları uzun vadeli kullanım için ideal hale getirir. Çoğu zaman bakımı kolaydır ve mekanik aşınma gibi problemler minimum seviyededir. Bununla birlikte, motorun düzgün çalışabilmesi için doğru besleme, yeterli soğutma ve aşırı ısınmadan kaçınılması gereklidir. Üç fazlı asenkron motorlar, endüstriyel makinelerden ev cihazlarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha verimli ve çevre dostu modelleri piyasaya sunulmaktadır.



Şekil 1.2. Tesla bobini

Üç fazlı asenkron motorların kökeni, 19. yüzyılın sonlarında elektrik enerjisinin hızlı bir şekilde yaygınlaşmaya başladığı döneme dayanır. Bu tür motorların tarihindeki en önemli dönüm noktalarından biri, Nikola Tesla'nın alternatif akım (AC) teknolojisine olan katkılarıdır. Tesla, 1887-1888 yıllarında çok fazlı alternatif akım sistemlerini geliştirmiş ve bu sistemlerin motorlara uygulanmasını mümkün kılmıştır. Tesla'nın geliştirdiği çok fazlı sistemler, dönemin doğru akım (DC) motorlarına kıyasla daha verimli ve güvenilir bir çözüm sunmuştur. 1888 yılında Tesla, çok fazlı sistemler için dönen manyetik alan prensibini keşfetmiş ve bu prensip, asenkron motorların temelini oluşturmuştur (Şekil 1.2).

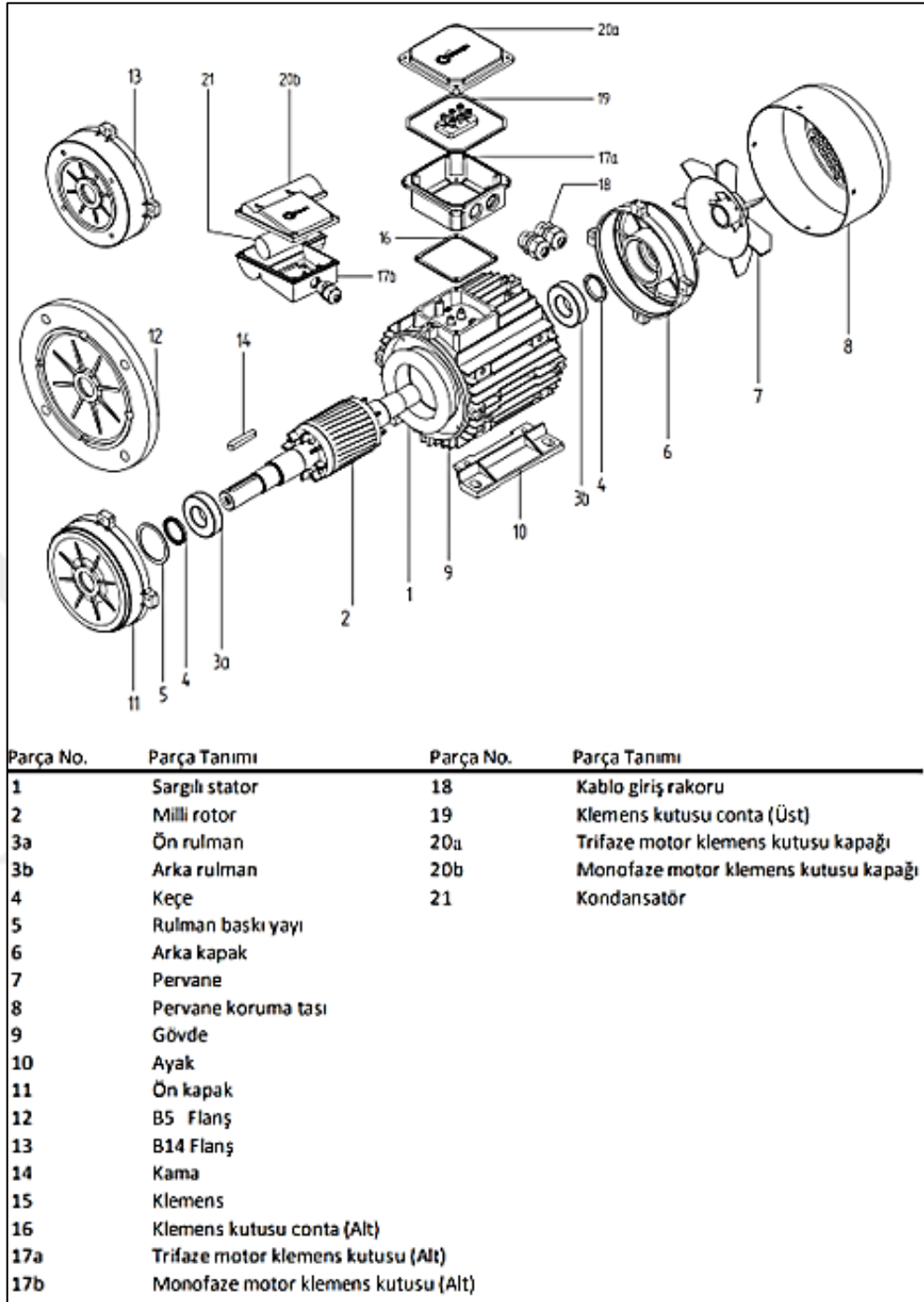
Dönen manyetik alan prensibine dayanan asenkron motorlar, kısa süre içinde pratik uygulamalara dönüşmüştür. 1891 yılında Alman mühendis Friedrich August Haselwander, üç fazlı asenkron motorun ilk prototipini geliştirmiştir. Aynı dönemde, Charles P. Steinmetz gibi diğer bilim insanları ve mühendisler de alternatif akım

motorlarının teorik temellerini güçlendirmiştir. Bu gelişmeler, endüstriyel elektrik sistemlerinin standartlaştırılmasını sağlarken, üç fazlı asenkron motorların endüstride yaygınlaşmasının da önünü açmıştır. Özellikle 20. yüzyılın başında bu motorlar, yüksek verimlilikleri, dayanıklılıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle büyük ilgi görmeye başlamıştır.

Üç fazlı asenkron motorların yaygınlaşmasında elektrik iletim sistemlerinin gelişimi önemli bir rol oynamıştır. Özellikle George Westinghouse'un Tesla'nın alternatif akım patentlerini satın alması ve bu teknolojiyi geniş çapta kullanması, motorların hızlı bir şekilde benimsenmesine olanak tanımıştır. Bu motorlar, elektrik enerjisinin uzak mesafelere taşınmasını sağlayan üç fazlı iletim hatlarıyla uyumlu şekilde çalışıyordu. Böylece, santrallerden uzak fabrikalarda ve tesislerde kolaylıkla kullanılabilirdi. Aynı dönemde, enerji tasarrufu ve düşük bakım gereksinimleri gibi avantajları, bu motorları hem sanayi devriminin hem de elektrikleşmenin temel unsurlarından biri haline getirmiştir.

20. yüzyılın ortalarından itibaren, üç fazlı asenkron motorlar, endüstriyel otomasyonun temel taşlarından biri haline gelmiştir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, bu motorların tasarımında da büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Daha iyi manyetik malzemelerin kullanımı, verimliliklerini artırmış, kontrol sistemlerindeki gelişmeler ise hassasiyetlerini yükseltmiştir. Özellikle elektronik kontrollü sürücüler (VFD) ile bu motorların hız ve tork ayarı mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmeler, üç fazlı asenkron motorların sadece büyük endüstriyel uygulamalarda değil, aynı zamanda HVAC sistemleri, pompa sistemleri ve otomotiv sektörü gibi birçok farklı alanda kullanılmasını sağlamıştır.

Günümüzde, üç fazlı asenkron motorlar, modern elektrik sistemlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla da entegre edilebilmeleri sayesinde sürdürülebilir enerji sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadırlar. Örneğin, rüzgar türbinlerinde ve güneş enerjisi santrallerinde kullanılan motorların çoğu bu prensibe dayanmaktadır. Ayrıca, bu motorların modüler tasarımları ve kolay bakım özellikleri, onları dünya genelinde tercih edilen bir çözüm haline getirmiştir. Yüzyılı aşkın süredir gelişimini sürdüren bu teknoloji, sanayi uygulamalarının temel taşlarından biri olarak önemini korumaktadır.



Şekil 1.3. Üç fazlı asenkron motoru oluşturan parçaların tanımları

Üç fazlı asenkron motorlar, dayanıklılığı, verimliliği ve basit yapıları sayesinde endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Motorun yapısı, döner manyetik alan prensibiyle çalışacak şekilde tasarlanmıştır ve temel olarak stator, rotor, mil, gövde, rulmanlar, ve bağlantı kutusu gibi ana parçalardan oluşur. Her bir parça, motorun işlevselliğinde önemli bir rol oynar (Şekil 1.3).

- Stator, motorun sabit duran kısmıdır ve motorun gövdesine monte edilmiştir. Ana işlevi, döner manyetik alan oluşturarak rotoru harekete geçirmektir. Stator, ince çelik sacların birbirine preslenmesiyle oluşan bir göbekten ve bu göbeğin üzerine sarılmış üç fazlı sargılardan meydana gelir. Çelik saclar, manyetik kayıpları azaltmak için izole edilmiştir. Motorun ana manyetik alanını üretir ve alternatif akımın frekansına göre döner bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, rotor üzerinde bir akım indükleyerek dönme hareketine neden olur.
- Rotor, statorun iç kısmında yer alan, motorun döner parçasıdır. Asenkron motorlarda rotor genellikle iki tipte üretilir: kafes tipi rotor ve sargılı rotor.
 - Kafes Tipi Rotor: Alüminyum veya bakır çubuklar, rotorun gövdesine yerleştirilir ve her iki uçta bir halka ile birleştirilir. Bu yapı, kafes görünümünü andırdığı için bu adı almıştır. Genelde basit ve dayanıklıdır, bu yüzden küçük ve orta ölçekli motorlarda tercih edilir.
 - Sargılı Rotor: Daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve rotor sargıları, üç fazlı bir sistemde düzenlenmiştir. Bu tür rotorlarda, rotor akımı kontrol edilerek motorun başlangıç momenti artırılabilir. Büyük endüstriyel motorlarda kullanılır.
- Mil, rotorun ortasından geçen ve rotorun ürettiği dönme hareketini dışarıya aktaran parçadır. Çelikten yapılmaktadır ve dayanıklılığı artırmak için yüzeyi sertleştirilmiştir. Döner mekanik enerjiyi, motorun bağlı olduğu yük veya makineye iletir. Mil, genellikle rulmanlar aracılığıyla sabitlenmiştir.
- Motorun dış yapısını oluşturan gövde, stator ve rotor gibi iç parçaları dış etkenlerden korur. Genellikle dökme demir veya alüminyum alaşımdan üretilir. Hafif motorlarda alüminyum gövde tercih edilirken, ağır sanayi motorlarında dökme demir kullanılır. Motorun iç bileşenlerini toz, nem ve darbelere karşı korur. Ayrıca motorun soğutulmasını sağlayan kanatçıklar da gövdenin bir parçasıdır.
- Rulmanlar, rotorun gövdeye sürtünmeden dönmesini sağlar ve milin düzgün bir şekilde hareket etmesini destekler. Rulmanlar, genellikle çelikten yapılmış yuvarlak

bilyelerden veya silindirik makaralardan oluşur. Rotorun mil üzerindeki hareketini destekleyerek sürtünmeyi en aza indirir. Bu, motorun verimliliğini artırır ve aşınmayı azaltır.

- Bağlantı kutusu, motorun elektriksel bağlantılarının yapıldığı bir bölümdür. Stator sargılarına bağlanan uçlar, burada üç fazlı bir terminal bloğunda birleştirilir. Ayrıca bağlantı kutusunda fazlar arasındaki bağlantılar yıldız (Y) veya üçgen (Δ) olarak düzenlenebilir. Motorun enerji kaynağına güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlar ve sargıların farklı bağlantı yöntemleriyle çalıştırılmasına olanak tanır.
- Üç fazlı asenkron motorlarda, çalışma sırasında oluşan ısıyı dağıtmak için soğutma sistemleri bulunur. Rotor miline bağlı bir fan, motorun dış gövdesindeki kanatçıklarla birlikte hava akışı sağlar ve motoru soğutur. Gövde üzerindeki kanatçıklar, ısının daha geniş bir yüzeye yayılmasını sağlayarak motorun aşırı ısınmasını önler.

Sonuç olarak, üç fazlı asenkron motorlar, basit ve sağlam tasarımlarıyla dikkat çeker. Her bir parça, motorun verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için özenle tasarlanmıştır. Bu yapı, motorların hem küçük uygulamalarda hem de büyük endüstriyel sistemlerde kullanılmasını mümkün kılar.

Üç fazlı asenkron motorun çalışma prensibi, dönen manyetik alan ve elektromanyetik indüksiyon ilkelerine dayanır. Motorun stator kısmına üç fazlı alternatif akım uygulandığında, stator sargılarında döner bir manyetik alan oluşur. Üç fazlı akım, fazlar arasında 120° 'lik faz farkına sahip olduğundan, bu akım sıralı bir şekilde hareket eder ve stator sargıları boyunca dönen bir manyetik alan yaratır. Bu manyetik alan, senkron hız olarak adlandırılan sabit bir hızda döner. Senkron hız, stator sargılarındaki kutup sayısına ve alternatif akımın frekansına bağlıdır.

Rotor, statorun oluşturduğu döner manyetik alan içinde yer alır ve genellikle iki şekilde tasarlanır: kafes tipi veya sargılı rotor. Döner manyetik alan, rotor ile stator arasında bir göreceli hareket oluşturur. Bu hareket, rotor çubuklarında elektromanyetik indüksiyon yoluyla bir akım üretir. Faraday'ın indüksiyon yasasına göre, döner manyetik alan bir elektrik akımı oluşturmak için bir iletkeni kesmek

zorundadır. Rotor, bu indüklenen akım nedeniyle bir manyetik alan üretir ve bu manyetik alan, statorun dönen manyetik alanıyla etkileşime girerek rotorun dönmesini sağlar.

Motorun "asenكرون" olarak adlandırılmasının nedeni, rotorun hızının statorun dönen manyetik alan hızına (senkron hız) hiçbir zaman tam olarak ulaşamamasıdır. Rotor hızı ile senkron hız arasındaki bu fark, kayma olarak adlandırılır ve motorun çalışması için gereklidir. Eğer rotor, senkron hızda dönmeye çalışırsa, rotor çubukları manyetik alanı kesmez ve indüklenen akım sıfıra düşer. Bu durumda motor çalışmaz. Kayma genellikle düşük bir oranda (yüzde birkaç) tutulur ve motorun verimli çalışmasını sağlar.

Üç fazlı asenkron motorlarda, rotorun dönme yönü stator sargılarında oluşturulan döner manyetik alanın yönüne bağlıdır. Döner manyetik alanın yönü, üç fazlı akımın sıralamasına göre değişir. Eğer faz sırası değiştirilirse, döner manyetik alanın yönü tersine döner ve bu da rotorun dönüş yönünü değiştirir. Bu özellik, motorun kullanım alanlarında yön kontrolünü kolaylaştırır ve sanayi uygulamalarında büyük avantaj sağlar.

Sonuç olarak, üç fazlı asenkron motorun çalışma prensibi basit ama etkili bir manyetik etkileşim mekanizmasına dayanır. Döner manyetik alan, elektromanyetik indüksiyon ve rotor hareketi arasındaki ilişki, motorun dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırır. Bu prensip, motorun düşük maliyetle yüksek verimlilik sağlamasına olanak tanır ve onu endüstriyel otomasyon, HVAC sistemleri, pompalar ve taşıma sistemleri gibi geniş bir uygulama yelpazesinde vazgeçilmez bir teknoloji haline getirir.

Asenkron motorlar, rotor yapısı, faz sayısı ve kullanım amacı gibi farklı kriterlere göre geniş bir çeşitliliğe sahiptir. Her bir motor tipi, belirli bir uygulama için optimize edilmiştir. Bu çeşitlilik, asenkron motorların endüstriyel ve günlük yaşamın birçok alanında vazgeçilmez olmasını sağlamıştır. Motor seçimi yapılırken, uygulama gereksinimleri, maliyet ve enerji verimliliği gibi faktörlerin dikkate alınması, en uygun motorun seçilmesi için kritik öneme sahiptir.

ANSYS Maxwell, elektrik makineleri, elektromanyetik cihazlar ve elektromanyetik alanların simülasyonu için kullanılan bir yazılımdır. Bu program, mühendislerin cihazların performansını analiz etmesini, optimize etmesini ve tasarımlarını geliştirmesini sağlayan kapsamlı araçlar sunar. Maxwell, düşük frekansta çalışan elektromanyetik cihazlar için çözümler sunar ve birçok sektörde yaygın olarak kullanılır.

Maxwell’de simülasyon süreci, genellikle şu adımlardan oluşur:

- Geometri Tasarımı: Simüle edilecek cihazın 2D veya 3D modeli oluşturulur.
- Malzeme Tanımlama: Manyetik, elektriksel ve termal özelliklere sahip malzemeler atanır.
- Meshleme: Simülasyon doğruluğunu artırmak için cihazın geometri alanı ince bir ağ yapısına bölünür.
- Sınır Şartları ve Uygulamalar: Elektromanyetik alanlar için sınır şartları ve uyarma akımları tanımlanır.
- Analiz ve Raporlama: Çözüm tamamlandıktan sonra manyetik alan dağılımları, tork, güç kayıpları ve diğer performans parametreleri raporlanır.

Bu çalışma, Volt Electric Motors’a ait VM 90L-2 model 3 fazlı sincap kafesli asenkron motorun reel ölçümleri ile ANSYS Maxwell analizinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Üç fazlı asenkron motorların tasarım ve analiz süreçlerine yönelik kapsamlı bir rehber sunmayı amaçlamaktadır. ANSYS Maxwell kullanılarak gerçekleştirilen modelleme ve simülasyonlar, elektrik motorlarının enerji verimliliği, performansı ve dayanıklılığını artırmak için önemli ipuçları sağlamaktadır. Tezin ilk bölümlerinde, üç fazlı asenkron motorların tasarım parametreleri detaylandırılmıştır. Devamında, ANSYS Maxwell yazılımının modelleme ve simülasyon süreçlerindeki rolü incelenmiş ve bu yazılımın motor performansını iyileştirme üzerine etkileri örneklerle gösterilmiştir. Çalışmanın son bölümlerinde ise üç fazlı asenkron motorların 2D ve 3D modelleme süreçleri ele alınarak, tasarım parametrelerinin analizi ve optimizasyonu üzerine odaklanılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren, modern yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır. Günlük hayatta ev aletlerinden endüstriyel makinelere, ulaşım araçlarından enerji üretim sistemlerine kadar pek çok alanda kullanılırlar. Bu kullanımdan kaynaklı endüstride kullanılan elektriğin %65'ini elektrik motorları tüketmektedir. Dolayısıyla elektrik enerjisinin tüketiminde en büyük paya sahip olan elektrik motorlarında enerji verimliliği çalışmaları büyük öneme sahiptir.

Elektrik motorları verimlilik yönünden incelenmiş ve tasarruf önerilerinde bulunulmuştur. Enerji veriminin öneminin anlaşılması üzerinde işletmelerinde verim deneyleri yapılmaya başlanmış ve verileri kullanılarak, firmanın yaklaşık motor verim envanteri hesaplanmıştır (Akdemir, 2003).

Bilgisayar destekli elektromekanik tasarım araçları (RMxpert, EMSS ve EMPulse) kullanılarak 3 fazlı ve 1 fazlı asenkron motorlar tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Motorların manyetik akı dağılımları, ağ örüntüleri ve performans eğrileri incelenmiş, sürme devresi eklenerek performans karşılaştırmaları yapılmıştır (Tarımer, 2005).

Üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motorun tasarımı, eşdeğer devre parametreleri ve performans analizleri için bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma yardımıyla motorun etiket değerleri ve akı yoğunlukları programa girilerek, motorun stator ve rotor oluk geometrik boyutları belirlenmiş ve bu boyutlarla eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır. Performans analizi, boştaki ve kısa devre koşullarında yapılan deneylerle doğrulanmış, elde edilen motor verileri Matlab/Simulink modelinde analiz edilmiştir (Tezcan, 2008).

Asenkron motorların tasarımında sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak manyetik vektör potansiyel ve manyetik akı yoğunluğu değişimleri incelenmiş, enerji ve moment değerleri hesaplanmıştır. Tasarım ve analiz süreçleri için Matlab programlama dilinde bir program geliştirilmiştir (Bezek, 2009).

Rotor yapıları farklı olan üç farklı yüzey mıknatıslı doğru akım motorunun tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiş; motorların hız, verim, moment ve hava aralığı akı

dağılımları karşılaştırılmıştır. Tasarımlarda Maxwell programı kullanılarak girdap akım etkisi, moment-hız karakteristikleri ve manyetik analizler incelenmiş, motorların temel yapı ve manyetik özellikleri açısından kıyaslanabilirliği sağlanmıştır (Gündoğdu ve Kömürgöz, 2010).

İki fazlı asenkron motorun modellemesi ele alınmıştır. Motorun geometrik boyutlarına dayalı olarak ANSYS Maxwell yazılımında 2D ve 3D modeller oluşturulmuş, motorun kalkış anındaki geçici süreçleri aynı programda hesaplanmıştır. Ayrıca, MATLAB/Simulink ortamında motorun matematiksel modeline dayalı bir model oluşturulmuş ve motor akımları ile moment dalga şekilleri karşılaştırılmıştır. ANSYS ve MATLAB/Simulink modelleri, simetrik iki fazlı güç kaynağı kullanılarak yapılan ölçümlerle doğrulanmıştır (Ferková, 2013).

MATLAB/GUIDE yazılım ortamında üç fazlı asenkron motorların performansını simüle eden bir yazılım programı geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları 1 beygir gücü (hp) ve 20 hp motorlar için incelenmiş, transiyent yanıt, rotor direnci başlangıcı ve doğrudan bağlantı (DoL) başlangıç yöntemleri gibi analizler yapılmıştır. MATLAB/Simulink'te sabit referans çerçevesi kullanılarak simülasyonda standart değişkenler belirlenmiştir (Noor, 2013).

5.5 kW gücünde asenkron motorun geometrik, elektriksel ve manyetik boyutlandırmasını yapan Matlab-GUI tabanlı bir arayüz programı geliştirilmiştir. Geliştirilen arayüz ile motor performans eğrileri elde edilerek tasarım parametrelerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Endüstriyel ürünlerle kıyaslama yapılarak programın performansı test edilmiştir (Zöhra ve Akar, 2016).

Motorların değiştirilmesi durumunda ne kadar tasarruf edileceği ve yatırımın geri dönüşü süresi hesaplanmıştır. Elde edilen verilerden yola çıkarak Türkiye geneli için yaklaşık tasarruf ve yatırımın geri dönüş süresi hesaplanmıştır (Büyük, 2018).

Elektrik motorlarının enerji tüketimindeki yüksek payı göz önüne alındığında, özellikle endüstride en çok kullanılan motor türü olan 3 fazlı asenkron motorlar bu çalışmaların odak noktası haline gelmiştir. 3 fazlı asenkron motorlar, dayanıklılıkları, düşük bakım gereksinimleri ve geniş güç aralıklarında çalışabilme yetenekleri

nedeniyle endüstriyel tesislerde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu durum 3 fazlı asenkron motorun irdelenmesinde büyük öneme sahiptir.

Tasarım kriterleri ve performans değerlerine bağlı olarak motorun ana boyutları, daha sonra stator ve rotorun fiziksel boyutlandırılması ve elektriksel hesaplamaları, endüksiyonlar ve magnetik alan şiddetleri, stator ve rotor ağırlıkları, kayıplar ve verim hesaplamalarını yapmıştır (Coşkun, 2019).

Golf arabası elektrikli aracında tahrik gücü olarak kullanılan düşük voltajlı asenkron motorun tasarımı ele alınmıştır. Tasarım süreci, ANSYS Maxwell RMxprt simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve motor özellikleri belirlenerek, indüksiyon motorunun ana boyutları, sargıları, stator ve rotor olukları hesaplanmıştır. Tasarlanan motor, 48V, 3HP çıkış gücüne sahip, üç fazlı, 50 Hz frekansında, NEMA sınıf C tasarımında olup, %86.07 verim, 0.82 güç faktörü ve %3.62 kayıp slip değerlerine sahiptir (Imawati, 2019).

Asenkron motorların verimliliği üzerine yapılan bu çalışma, rotor oluk uzunluklarının optimizasyonunun motor performansına etkisini incelemiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak yapılan analizlerde, farklı oluk uzunlukları için optimal verim değerleri belirlenmiş ve yaklaşık %0.6'nın üzerinde bir verim artışı elde edilmiştir (Demir vd., 2021).

Elektrikli araçlarda kullanılan motor sürücülerinin tasarımına odaklanmış ve hafif elektrikli araçlar için üç fazlı gerilim kaynaklı evirici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Asenkron motorların parametrelerine ve araç dinamik özelliklerine uygun sürücü tasarlanarak doğrudan moment kontrol yöntemi Matlab ortamında denenmiş ve TMS320F28379D DSP modülü kullanılarak vektör kontrollü sürüş testleri yapılmıştır (Sözen, 2021).

Asenkron motor (ASM) için Ansys-Maxwell, Ansys-Simplorer ve MATLAB-Simulink yazılımlarını entegre eden bir simülasyon platformu geliştirilmiştir. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile motor modeli oluşturulmuş, sürücü devresi ve kontrol sistemi eklenerek arızalı durumlar dahil ASM'nin performansı ve dinamik davranışı incelenmiştir (Sun ve Çıra, 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Volt Electric Motors VM 90L-2 model üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun 2D ve 3D modellemesi ANSYS Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme, motorun fiziksel yapısı, manyetik özellikleri ve elektriksel parametrelerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonuçları ile motorun katalog değerleri karşılaştırılarak doğruluk ve performans değerlendirmesi yapılmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Araçlar

Bu çalışmada, elektromanyetik alanların incelenmesi ve analiz edilmesi için endüstriyel bir standart olan ANSYS Maxwell yazılımı tercih edilmiştir. Volt Electric Motors VM 90L-2 model üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun 2D ve 3D modellemesi ANSYS Maxwell V16.2 versiyon yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım sayesinde, manyetik akı dağılımı, tork, güç faktörü ve enerji kayıpları gibi kritik parametreler detaylı bir şekilde incelenmiş ve modellenmiştir. Stator sargılarının direnç değerlerinin hassas bir şekilde ölçülmesi amacıyla ohmmetre kullanılmıştır. Her bir faz için ayrı ayrı gerçekleştirilen bu ölçümler, simülasyon sonuçlarının doğrulanmasında önemli bir rol oynamıştır. Volt Electric Motors tarafından sağlanan motor katalog verileri, simülasyon modelinin doğrulaması ve karşılaştırılması için temel bir kaynak olarak kullanılmıştır. Yüksek işlem gücü ve gelişmiş grafik kartına sahip bir bilgisayar sayesinde, karmaşık simülasyonlar kısa sürede tamamlanmıştır. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması ve daha derinlemesine analiz edilmesi için matematiksel hesaplamalar yapılmıştır.

3.2. Motorun Modelleme Süreci

İncelenen elektrik motorunun sayısal ortamda gerçekleştirilen tasarım süreci, teknik dokümanlar ve fiziksel ölçümlerden elde edilen veriler ışığında iki ve üç boyutlu olarak hayata geçirilmiştir. Tasarımda özellikle stator-rotor yapıları ile bunlar arasındaki boşluk değerleri hassasiyetle ele alınmıştır.

Sistemin manyetik performansını optimize etmek amacıyla malzeme seçimleri şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Stator çekirdeğinde manyetik kayıpların minimuma indirilmesi için Si-Fe alaşımlı çelik tercih edilmiştir.
- Rotor yapısında benzer şekilde silisyum katkılı çelik katmanlar kullanılmıştır.
- İletken sargılarda maksimum elektriksel performans için saf bakır malzeme değerlendirilmiştir.
- Stator ve rotor arasındaki mesafe, optimum manyetik akı dağılımı gözetilerek belirlenmiştir.

Sayısal analizin hassasiyetini artırmak için kritik bölgelerde yoğunlaştırılmış hesaplama ağı oluşturulmuştur. Elektromanyetik çözümlemede 50 Hz'lik çalışma frekansı baz alınmış, gerilim ve akım değerleri nominal işletme koşullarına uygun biçimde tanımlanmıştır.

3.3. Simülasyon Süreci

Sistemin enerji kullanım verimliliğini belirlemek için güç katsayısı değerlendirmeye alınmıştır. Enerji dönüşüm oranı, giriş ve çıkış güçlerinin karşılaştırılmasıyla tespit edilmiştir. Mekanik yükleme altında üretilen faydalı güç ölçümlenmiştir. Ayrıca, manyetik alan rotasyonu ile rotor dönüş hızı arasındaki fark olan kayma değeri hesaplanmıştır.

- Performans Parametrelerinin Analizi:
 - Güç Faktörü: Motorun elektrik enerjisini ne kadar etkin kullandığını belirlemek için hesaplanmıştır.
 - Verimlilik: Giriş gücü ve çıkış gücü oranı ile elde edilmiştir.
 - Çıkış Gücü: Motorun mekanik yük altında sağladığı güç analiz edilmiştir.
 - Kayma (Slip): Rotorun hızı ile statorun döner manyetik alan hızı arasındaki fark hesaplanmıştır.

- Giriş Gücünün Hesaplanması: Denklem (3.1)'de ifade edildiği gibi motorun giriş gücü, akım ve voltaj değerleri kullanılarak manuel olarak hesaplanmıştır.

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde; P_{in} : Giriş gücü, V : Gerilim, I : Akım, $\cos(\phi)$: Güç faktörü'dür.

- Sonuçların Görselleştirilmesi: Motorun manyetik alan dağılımı, verimlilik ve güç faktörü eğrileri grafiksel olarak analiz edilmiştir. 2D ve 3D modellerdeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları incelenmiştir.

3.4. Veri Toplama ve Karşılaştırma

Motorun gerçek çalışma koşullarındaki performansını değerlendirmek ve simülasyon sonuçlarının doğruluğunu teyit etmek amacıyla bir dizi ölçüm ve karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda deneysel veriler toplanmış ve teorik sonuçlarla mukayese edilmiştir.

- Stator Direnci Ölçümleri:

Her bir faz sargısının elektriksel direnci, ohm metre kullanılarak ayrı ayrı ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

- Simülasyon ve Katalog Değerlerinin Karşılaştırılması:

Motorun temel performans parametreleri olan güç faktörü, verimlilik, anma hızı ve çıkış gücü değerleri, üretici katalogunda verilen bilgiler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda ortaya çıkan farklılıklar analiz edilerek motorun genel performans değerlendirmesi yapılmıştır.

3.5. Değerlendirme ve Doğrulama

Simülasyon sonuçları ile ölçülen değerler arasındaki farklar yorumlanmıştır. Motorun performansı hem teorik hem de deneysel verilerle desteklenmiştir. Enerji verimliliği ve kayıplar açısından motorun uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu detaylı yöntem sayesinde motorun tüm parametreleri ayrıntılı olarak incelenmiş ve gerçek dünya uygulamaları için bir doğrulama süreci oluşturulmuştur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

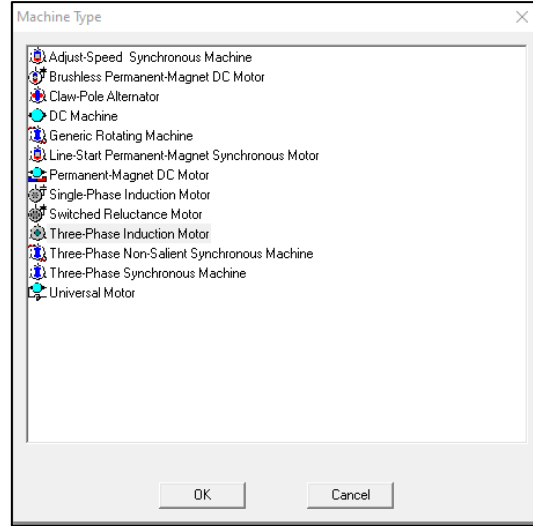
4.1. ANSYS Maxwell ile Modelleme

ANSYS Maxwell, elektrik makineleri, elektromanyetik cihazlar ve elektromanyetik alanların simülasyonu için kullanılan bir yazılımdır. Bu program, mühendislerin cihazların performansını analiz etmesini, optimize etmesini ve tasarımlarını geliştirmesini sağlayan kapsamlı araçlar sunar. Maxwell, düşük frekansta çalışan elektromanyetik cihazlar için çözümler sunar ve birçok sektörde yaygın olarak kullanılır. Elektrik makineleri (motorlar, jeneratörler), transformatörler, sensörler ve aktüatörlerin tasarımı için tercih edilir.

Modelleme işlemi yapılmadan önce üç fazlı asenkron motorun temel yapısı ve parametreleri tespit edilmelidir. Bunlar, motorun boyutları, malzeme özellikleri, sargı dizilimi, kutup sayısı ve gerilim değerleri gibi unsurları içerir. Bu parametreler, motorun çalışma koşullarını simüle etmek için gereklidir.

4.1.1. Yeni bir proje oluşturma

ANSYS Maxwell programını açılarak, yeni bir proje başlatılır. "New Design" seçeneği seçilerek yeni bir tasarım oluşturulur. "Insert RMXprt Design" seçeneği seçilerek "Machine Type" ekranına ulaşılır. Machine Type Ekranı Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu tasarımda, 3 fazlı asenkron motor için elektromanyetik simülasyonlar yapılır.



Şekil 4.1. Machine type ekranı

4.1.2. Geometri tasarımı

2D modelleme yaparken, motorun geometri tasarımının doğru bir şekilde yapılması önemlidir. Genellikle, motorun "kesit" şeklinde bir modelini oluştururuz. Stator özellikleri ekranı Şekil 4.2’de verilmiştir. Rotor özellikleri ekranı Şekil 4.3’de verilmiştir.

- Stator ve Rotor Geometrisi:

3 fazlı asenkron motorun stator ve rotorları 2D düzlemde modellenenecektir.

Stator: Genellikle dış halka şeklinde modellenir ve içerisinde sargılar bulunur.

Rotor: İçerideki döner kısım olarak tanımlanır. Rotor genellikle silindirik bir yapıya sahiptir.

- Delik ve Kanal Yapıları:

Motorun tasarımına bağlı olarak, rotor ve stator arasındaki hava boşluğu (gaps) ve kanal yapıları da modellenmelidir.

- Kesit Modeli:

Bu aşamada, motorun bir kesiti tasarlanır. Yani, stator ve rotor arasındaki etkileşimleri simüle etmek için genellikle bir “yarım” veya “çeyrek” kesit oluşturulur. Bu, simülasyonları hızlandırır ve işlem süresini kısaltır.

Stator						
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only	
Outer Diameter	0	mm	0mm	Outer diameter of the st...	☐	
Inner Diameter	0	mm	0mm	Inner diameter of the st...	☐	
Length	0	mm	0mm	Length of the stator core	☐	
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the s...	☐	
Steel Type	Not Assigned			Steel type of the stator ...	☐	
Number of Slots	0			Number of slots of the s...	☐	
Slot Type	1			Slot type of the stator c...	☐	
Lamination Se...	0			Number of lamination s...	☐	
Press Board T...	0	mm		Magnetic press board t...	☐	
Skew Width	0		0	Skew width measured i...	☐	

Şekil 4.2. Stator properties ekranı

Rotor						
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only	
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the r...	☐	
Number of Slots	0			Number of slots of the r...	☐	
Slot Type	1			Slot type of the rotor core	☐	
Outer Diameter	0	mm	0mm	Outer diameter of the ro...	☐	
Inner Diameter	0	mm	0mm	Inner diameter of the ro...	☐	
Length	0	mm	0mm	Length of the rotor core	☐	
Steel Type	Not Assigned			Steel type of the rotor c...	☐	
Skew Width	0		0	Skew width measured i...	☐	
Cast Rotor	☐			Rotor squirrel-cage win...	☐	
Half Slot	☐			Half-shaped slot (un-sy...	☐	
Double Cage	☐			Double-squirrel-cage wi...	☐	

Şekil 4.3. Rotor properties ekranı

4.1.3. Malzeme seçimi

Modelde kullanacağınız malzemelerin doğru şekilde seçilmesi çok önemlidir. ANSYS Maxwell, farklı malzeme türleri için yerleşik veritabanlarına sahiptir. Şekil 4.4’de malzeme seçim ekranı verilmiştir.

• Stator Malzemesi:

Genellikle manyetik özelliklere sahip bir çelik (örneğin, silikon çelik) kullanılır. Yüksek manyetik geçirgenlik, düşük kayıplar için tercih edilir.

• Rotor Malzemesi:

Genellikle bakır veya alüminyum malzeme kullanılır. Rotoru modellemek için malzeme seçiminde iletkenlik özelliklerine dikkat edilmelidir.

• Yalıtım Malzemeleri:

Motor sargıları için kullanılan yalıtım malzemeleri (örneğin, plastik kaplamalar) da tanımlanmalıdır.

/	Name	Location	Origin	Type	Relative Permeability
	Alnico5	SysLibrary	Materials	Magnet	B-H Curve...
	Alnico9	SysLibrary	Materials	Magnet	B-H Curve...
	aluminum	SysLibrary	Materials	Conductor	1.000021
	aluminum_EC	SysLibrary	Materials	Conductor	1.000021
	aluminum_no2_EC	SysLibrary	Materials	Conductor	1.000021
	Arnold_Magnetics_Alnico 2, Cast_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics	Magnet	B-H Curve...
	Arnold_Magnetics_Alnico 2, Sintered_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics	Magnet	B-H Curve...
	Arnold_Magnetics_Alnico 3, Cast_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics	Magnet	B-H Curve...
	Arnold_Magnetics_Alnico 4, Cast_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics	Magnet	B-H Curve...
	Arnold_Magnetics_Alnico 5, Cast_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics	Magnet	B-H Curve...
	Arnold_Magnetics_Alnico 5, Sintered_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics	Magnet	B-H Curve...

View/Edit Materials... Add Material... Clone Material(s) Remove Material(s) Export to Library...

Şekil 4.4. Malzeme seçim ekranı

4.1.4. Sargıların tanımlanması

Asenkron motorun sargıları, statorun içinde yer alır ve elektrik akımı ile manyetik alan oluşturur. Stator Winding Ekranı Şekil 4.5’de verilmiştir. Rotor Winding Ekranı Şekil 4.6’da verilmiştir. Bu sargıların modelleme süreci şu adımlardan oluşur:

- Stator Sargılarının Yerleşimi:

Statorun etrafındaki dişlere yerleştirilecek sargılar, genellikle bir "coil" olarak tanımlanır.

- Sargı Dizilimi:

3 fazlı bir motor için 3 ayrı sargı grubu vardır. Bu sargıların 120 derece aralıklarla yerleştirilmesi gerekmektedir. Her bir grup için akım yönü ve fazlar belirlenmelidir.

Winding | End/Insulation |

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Winding Layers	2			Number of winding layers	☐
Winding Type	Whole-Coiled			Stator winding type	☐
Parallel Branch...	0			Number of parallel bran...	☐
Conductors pe...	0		0	Number of conductors ...	☐
Coil Pitch	0			Coil pitch measured in ...	☐
Number of Stra...	0		0	Number of strands (nu...	☐
Wire Wrap	0	mm		Double-side wire wrap t...	☐
Wire Size	Diameter: 0mm			Wire size, 0 for auto-de...	☐

☐ Show Hidden

Şekil 4.5. Stator winding ekranı

Winding |

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Bar Conductor ...	Not Assigned			Select bar conductors ...	☐
End Length	0	mm	0mm	Single-side end extend...	☐
End Ring Width	0	mm	0mm	One-side width of end ri...	☐
End Ring Height	0	mm	0mm	Height of end rings (in ...	☐
End Ring Con...	Not Assigned			Select End ring conduc...	☐

☐ Show Hidden

Şekil 4.6. Rotor winding ekranı

4.1.5. Meshleme (ağ yapısı)

- Mesh (Ağ) Yapılandırması:

ANSYS Maxwell, çözüm doğruluğunu artırmak için "mesh" işlemi yapar. Bu işlem, modelin geometrisinin küçük hücrelere (elemanlara) bölünmesini sağlar.

Düşük frekanslı elektromanyetik simülasyonlar için ince mesh kullanmak, doğruluğu artırabilir ancak çözüm süresini uzatabilir.

Mesh yoğunluğu, motorun kritik bölümlerinde (örneğin, stator ve rotor arasındaki boşluk) daha ince olmalıdır.

- Yüzey ve Hacim Mesh'i:

ANSYS Maxwell, modelin hem yüzey hem de hacimsel öğelerini meshler. Bu, motorun manyetik alanlarını daha hassas bir şekilde analiz etmenizi sağlar.

4.1.6. Sınır şartları ve yükleme koşulları

Motorun simülasyonunda doğru sınır koşullarını belirlemek gereklidir. Bu koşullar, motorun çalışma ortamını simüle eder:

- Dış Alan:

Modelin etrafında, manyetik alanın serbestçe yayıldığı bir ortam (vacuum veya air) belirlenmelidir.

- Yükleme Koşulları:

3 fazlı akım kaynakları, her faz için uygun gerilim ve frekanslarla motorun sargılarına bağlanmalıdır.

3 fazlı bir besleme için, her fazın 120 derece faz farkıyla çalışması sağlanır.

- Simülasyon Tipi:

- AC analizi: Motorun çalışma koşullarında akım ve manyetik alanları incelemek için AC analizi yapılır.

4.1.7. Çözüm ayarları ve çözümleme

Modeli oluşturduktan sonra, çözüm ayarlarını yapmanız gerekir, Solution Setup Ekranı ekranı Şekil 4.7’de verilmiştir.

- Çözüm Parametreleri:

Zaman-domain analizi veya harmonik analiz gibi çözüm türleri seçilebilir.

Analiz sırasında, motorun manyetik alanları, tork ve güç kayıpları gibi parametrelerin hesaplanması sağlanır.

- Çözüm Adımları:

Motorun çalışmaya başlaması, yük altındaki davranışı ve sonrasında analiz sonuçlarının gözlemlenmesi sağlanır.

Operation Type:	Motor	
Load Type:	Const Power	
Rated Output Power:	0	W
Rated Voltage:	0	V
Rated Speed:	0	rpm
Operating Temperature:	75	cel

Şekil 4.7. Solution setup ekranı

4.1.8. Sonuçların görselleştirilmesi ve raporlama

Simülasyon tamamlandıktan sonra elde edilen veriler görselleştirilir, Şekil 4.8’de sonuç ekranı verilmiştir. Verilen ekran temsildir.

- Manyetik Alan Dağılımı:

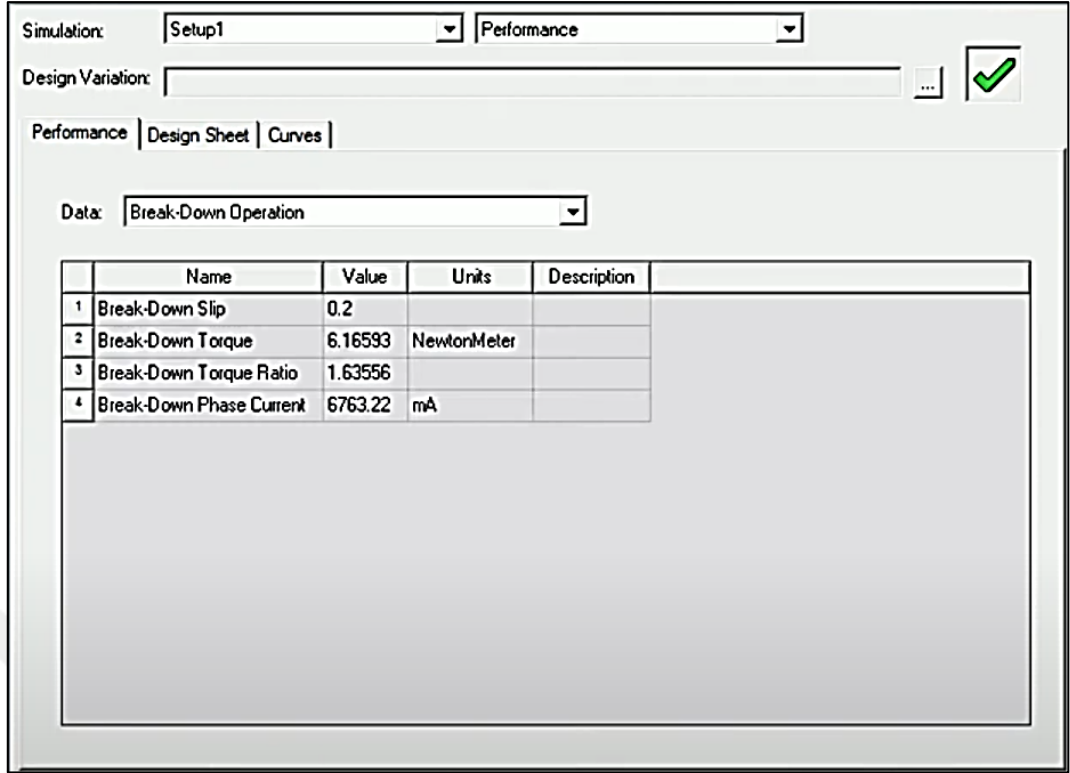
Stator ve rotor arasındaki manyetik alanların görselleştirilmesi, alan yoğunluklarını ve torku değerlendirmek için kullanılır.

- Verimlilik Analizi:

Motorun verimliliği, kayıplar ve tork üretimi hesaplanarak motorun performansı hakkında bilgi alınır.

- Raporlama:

Çözüm sonuçları, grafikler, veriler ve simülasyon çıktılarıyla birleştirilerek raporlanır. Bu, motorun tasarımının doğruluğunu ve verimliliğini kontrol etmek için faydalıdır.



Şekil 4.8. Sonuç ekranı

4.1.9. Sonuç ve optimizasyon

Sonuçlar doğrultusunda motor tasarımını optimize etmek mümkündür. ANSYS Maxwell ile, motorun verimliliğini artıracak tasarım iyileştirmeleri yapılabilir, örneğin:

- Stator sargılarının düzenlenmesi,
- Rotor yapısının değiştirilmesi,
- Manyetik alan kayıplarının azaltılması.

Bu adımlar, daha verimli ve daha dayanıklı motorların tasarlanmasına olanak tanır.

Sonuç olarak, ANSYS Maxwell ile üç fazlı asenkron motorun 2D modellemesi, motorun performansını değerlendirmek ve tasarımını optimize etmek için kapsamlı bir araçtır. Bu adımları takip ederek, motorun elektromanyetik davranışlarını simüle edebilir ve tasarımda iyileştirmeler yapılabilir.

4.2. Üç Fazlı Asenkron Motor

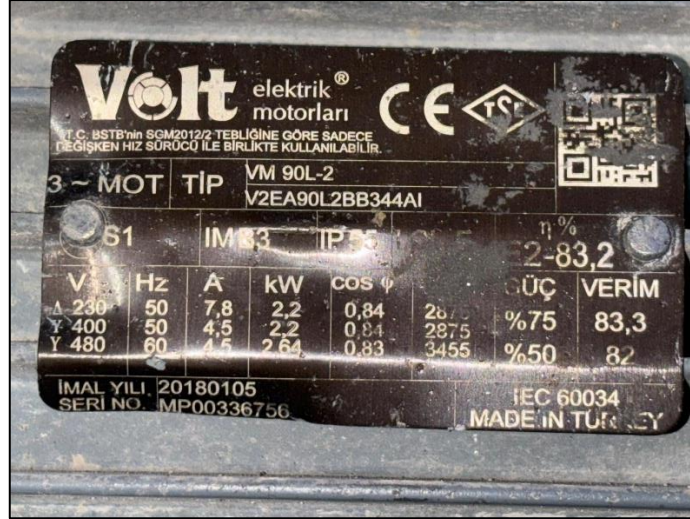
Bu çalışmada, Volt Electric Motors firması tarafından üretilen VM 90L-2 model üç fazlı asenkron motor incelenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bu motor modeli, kompakt tasarımı ve yüksek performans karakteristikleri ile öne çıkmaktadır. Motorun teknik özellikleri, performans parametreleri ve çalışma karakteristikleri detaylı olarak ele alınmış olup, yapılan analizler ve ölçümler bu bölümde sunulmuştur. İncelenen motor, standart IEC normlarına uygun olarak üretilmiş olup, endüstriyel tesislerde güvenilir ve verimli çalışma imkanı sunmaktadır.

4.2.1. Volt electric motors VM 90L-2 motor parametreleri

Volt electric [®] motors USE WITH VARIABLE SPEED DRIVE ONLY ACC. EU REGULATION 640/2009 CE TSE							
3~MOT	Type	VM 90L-2				η%	
S1	IM B3	IP 55	I.CL.F			IE2 - 83,2	
V	Hz	A	kW	cos φ	1 / min	LOAD	EFF.
Δ 230	50	7,8	2,2	0,84	2875	%75	83,3
Y 400	50	4,5	2,2	0,84	2875		
Y 480	60	4,5	2,64	0,83	3455	%50	82

Şekil 4.9. Volt electric motors VM 90L-2 etiket çizelgesi

İncelenen VM 90L-2 motorunun fiziksel ve teknik özelliklerini detaylı olarak göstermek amacıyla, motor üzerindeki etiket bilgisi Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da sunulmuştur. Bu etiket, motorun temel çalışma parametrelerini ve sertifikasyon bilgilerini içermektedir.



Şekil 4.10. Volt electric motors VM 90L-2 etiketi

Motorun teknik özellikleri, daha sistematik bir şekilde incelenmek üzere aşağıdaki çizelgelerde kategorize edilmiştir. Çizelge 4.1'de motorun genel özellikleri, kullanım alanları ve standartları belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Volt electric motors VM 90L-2 motor genel bilgileri

Tip	V2EA90L2AB3	Verimlilik Sınıfı	IE2
Pout [kW]	2,2	Titreşim Sınıfı	A
Devir [d/d]	2875	Ağırlık [kg]	17
Gövde	90L	Koruma Sınıfı	IP55
Akım [A]	7,8	Soğutma Tipi	IC 411
cos φ	0,84	İzolasyon Tipi	F
Dönüş Yönü	SY-SYA	Sıcaklık Sınıfı	B
Çalışma Tipi	S1	Yapı Tipi	IM B3
Ortam Sıcaklığı [°C]	-20...+40	Çalışma Yüksekliği [m]	1000

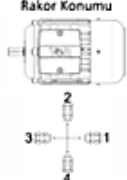
Motorun elektriksel karakteristikleri, nominal çalışma koşullarındaki değerleri ve koruma sınıfı gibi önemli parametreleri Çizelge 4.2'de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.2. Volt electric motors VM 90L-2 motor elektrik bilgileri

V1	%Yük	T [Nm]	I [A]	rpm	P2 [W]	cos ϕ	Verimlilik	Hz
400	100	7,32	4,5	2869	2201	0,84	83,9	50
400	75	5,42	3,7	2906	1650	0,77	84,1	50
400	50	3,58	3	2939	1104	0,65	82,6	50
Kalkış Akımı	Ia [A]	38	Devrilme Momenti		Mik [Nm]	24,6		
	Ia / In	4,87			Mik / Mn	3,36		
Kalkış Torku	Ma [Nm]	22,8	Boşta Çalışma Akımı		[A]	2,4		
	Ma / Mn	3,11	Boşta Çalışma Gücü		[W]	227		

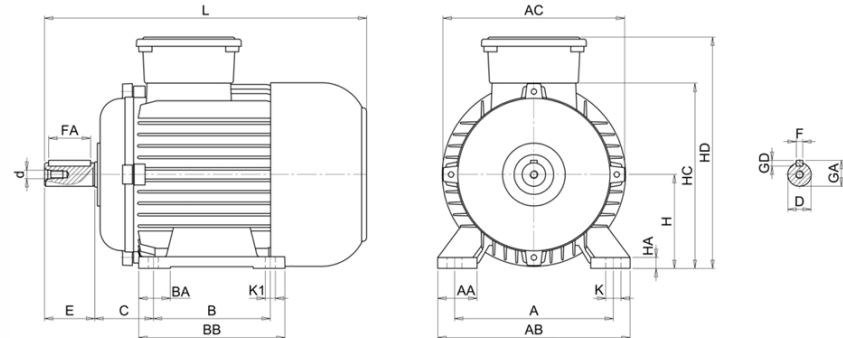
Sistemin mekanik özellikleri, çalışma hızı, moment değerleri ve rulman bilgileri gibi önemli parametreler Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Volt electric motors VM 90L-2 motor mekanik bilgileri

Ön Rulman	6205-ZZ	Ses Basıncı - 50 Hz - dB[B]	80	
Arka Rulman	6205-ZZ	Ses Basıncı - 60 Hz - dB[B]	87	
Sabit Yatak	YOK	Gövde Malzemesi	Alüminyum	
Yağlama	-	Ön Kapak Malzemesi	Alüminyum	
Gres Miktarı	-	Klemens Kutu Malzemesi	Polyamid	
Gres Tipi	-	Rakor Tipi	PG 11	
Kama	8*7*40	Rakor Konumu	4	
Balans	G 1,6 Yarım Kama			

Montaj ve yerleşim planlaması için gerekli olan motor boyutları ve bağlantı noktalarının ölçüleri Şekil 4.11’de verilmiştir.

MEKANİK ÖLÇÜLER																
A	AA	AB	AC	AD	B	B'	BA	BB	C	D	d	E	F	FA	GA	
140	40	179	172	-	125	-	35	155	56	24	M8	50	8	40	27	
GD	H	HA	HC	HD	K	K1	L	LA	LB	M	N	P	S	S1	T	
7	90	12	177	225	15	10	328	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Şekil 4.11. Volt electric motors VM 90L-2 motor mekanik ölçüleri

Bu teknik veriler ışığında, VM 90L-2 motorunun endüstriyel uygulamalar için uygun karakteristiklere sahip olduğu ve standart çalışma koşullarında güvenilir performans sunabileceği görülmektedir.

4.2.2. Volt electric motors VM 90L-2 motor

Motorun katalog değerlerinde belirtilmeyen bazı önemli parametreler, temel elektrik makineleri prensipleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar motorun performans karakteristiklerinin daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamaktadır.

4.2.3. Elektriksel giriş gücünün hesaplanması

Motorun şebekeden çektiği elektriksel gücün belirlenmesi için üç fazlı sistemlerde kullanılan temel güç denklemi olan Denklem (4.1) kullanılmıştır:

• Motor Giriş Gücü (P_{in})

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de kullanılan parametreler:

- P_{in} : Giriş gücü (W)
- V: Faz gerilimi (V) = 400V
- I: Faz akımı (A) = 4.5A
- $\cos(\phi)$: Güç faktörü = 0.84

Bu değerler Denklem (4.1)'de yerine konulduğunda motorun giriş gücü:

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 4.5 \cdot 0.84$$

$$P_{in} = 2611.32 \text{ W (yaklaşık 2.61 kW)}$$

olarak hesaplanmıştır.

4.2.4. Motor kutup sayısının doğrulanması

Motorun kutup sayısının belirlenmesi için, senkron hız ve şebeke frekansı arasındaki ilişkiyi gösteren Denklem (4.2) kullanılmıştır:

• Kutup Sayısı (P)

$$P = \frac{120.f}{N_s} \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de yer alan parametreler:

- N_s : Senkron hız (rpm) = 2875 rpm
- f : Şebeke frekansı (Hz) = 50 Hz
- P : Kutup sayısı

Denklem (4.2)'ye değerler yerleştirildiğinde:

$$P = \frac{120.50}{2875}$$

$$P = 2.086 \text{ (2 Kutuplu)}$$

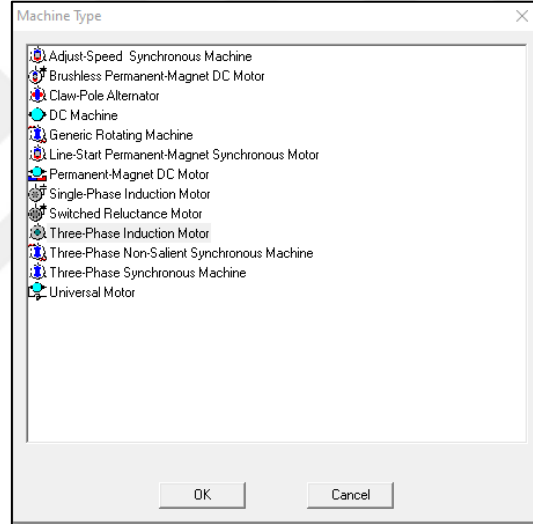
Denklem (4.2)'den elde edilen bu sonuç, motorun 2 kutuplu olarak tasarlandığını matematiksel olarak doğrulamaktadır.

4.3. Modellemeye Geçiş

VM 90L-2 asenkron motorunun elektromanyetik analizini gerçekleştirmek için ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, elektrik makinelerinin tasarım ve analizinde yaygın olarak tercih edilen sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Modelleme süreci, öncelikle motorun iki boyutlu (2D) tasarımı ile başlamış, ardından üç boyutlu (3D) analize geçilmiştir. Bu yaklaşım, hem hesaplama verimliliği hem de sonuçların doğruluğu açısından optimum bir çözüm sunmaktadır. Modelleme aşamaları, motorun geometrik yapısının oluşturulması, malzeme özelliklerinin tanımlanması ve çözüm parametrelerinin belirlenmesi adımlarını içermektedir.

4.3.1. 2 Boyutlu modelleme

Şekil 4.12’de ANSYS Maxwell motor seçim ekranının açılması için öncelikle "Insert RMxprt Design" modülüne geçiş yapılır. Ardından, projeye uygun bir motor tipi belirlemek için seçim ekranında "Three-Phase Induction Motor" seçeneği işaretlenir. Bu motor türü, rotor ve stator yapısına göre doğrusal olmayan malzemelerle analiz edilebilen bir model sunar. Kullanıcı, gerekli giriş parametrelerini (güç, frekans, gerilim, kutup sayısı vb.) girerek motorun boyutlandırılmasını ve manyetik analizini başlatabilir. Ayrıca, tasarımı özelleştirmek için geometri, malzeme ve sargı düzenlemeleri yapılabilir. Bu seçim, enerji verimliliği ve performans analizi açısından detaylı simülasyon yapılmasına olanak tanır.



Şekil 4.12. Motor seçim ekranı

Properties: Project2 - RMXprtDesign1

General | IndM3 |

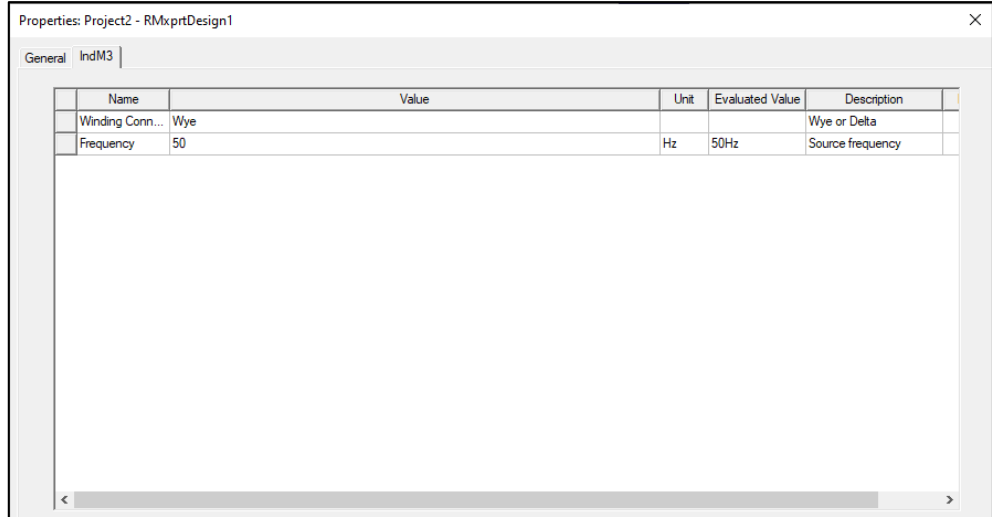
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Name	Setup1				☒
Enabled	☒				☐
Operation Type	Motor			Motor or generator	☒
Load Type	Const Power			Mechanical load type	☐
Rated Output ...	2200	W	2200W	Rated mechanical or el...	☐
Rated Voltage	400	V	400V	Applied or output rated ...	☐
Rated Speed	2875	rpm	2875rpm	Given rated speed	☐
Operating Tem...	25	cel	25cel	Operating temperature	☐

Şekil 4.13. Motor solution setup ekranı

ANSYS Maxwell Solution Setup ekranında 3 fazlı asenkron motorun parametrelerini ayarlarken, nominal güç, anma gerilimi, nominal hız ve çalışma sıcaklığı gibi temel parametreler tanımlanır (Şekil 4.13).

- Nominal Çıkış Gücü: 2200W
- Anma Gerilimi: 400V
- Nominal Hız: 2875rpm
- Çalışma Sıcaklığı: 25°C

3 fazlı asenkron motor analizi yapılırken çalışma sıcaklığının 25°C olarak alınmasının temel nedeni, temel oda koşulları motorun nominal çalışma koşullarına en yakın durumu temsil etmesidir. Motor kataloğunda çalışma sıcaklığı -20°C ...+40°C gibi geniş bir aralığının belirtmektedir. Elektrik motorları çalışırken, bakır sargılar ve demir çekirdek gibi bileşenlerde ısı üretimi meydana gelir. Bu ısı, özellikle sargılarda direncin artmasına yol açar ve motorun performansını etkiler. Standartlara göre, genellikle F yalıtım sınıfına sahip motorlarda, sargı sıcaklığı 40°C ortam sıcaklığına kadar artış gösterebilir. Bu sıcaklık değeri, motorun elektriksel kayıplarını, verimliliğini ve termal kararlılığını doğru bir şekilde analiz etmek için kullanılır. Ayrıca, bu değer, motorun gerçek çalışma koşullarında karşılaşılabilecek termal yükleri simüle etmek için ideal bir referanstır.



Şekil 4.14. Motor Solution Setup Ekranı-2

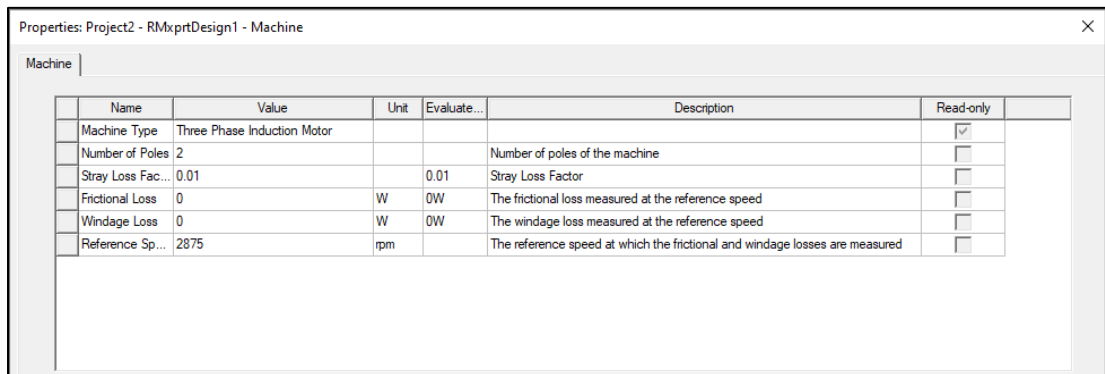
- Frekans: 50Hz

3 fazlı asenkron motorlarda frekansın 50 Hz olması, elektrik şebekesinin standart frekansıdır. Bu frekans değeri, birçok ülkede elektrik şebekelerinin çalışma standartlarına dayanır. Elektrik enerjisi, genellikle alternatif akım (AC) formunda üretilir ve dağıtılır. Dünya genelinde iki standart şebeke frekansı vardır:

50 Hz: Avrupa, Asya, Afrika ve diğer bazı bölgelerde kullanılır.

60 Hz: Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve bazı diğer bölgelerde kullanılır.

Türkiye gibi birçok ülkede şebeke frekansı 50 Hz'dir, dolayısıyla 3 fazlı asenkron motorlar bu frekansta çalışacak şekilde tasarlanır (Şekil 4.14).



Şekil 4.15. Motor properties ekranı

- Kutup Sayısı : 2
- Dağınık Kayıp Faktörü : 0.01

- Sürtünme Kaybı : 0 W
- Rüzgar Kaybı : 0 W
- Referans Hızı: 2875 rpm

Properties: Project2 - RMxpDesign1 - Machine

Stator

Name	Value	Unit	Evaluate...	Description	Read-only
Outer Diameter	135	mm	135mm	Outer diameter of the stator core	☐
Inner Diameter	70	mm	70mm	Inner diameter of the stator core	☐
Length	90	mm	90mm	Length of the stator core	☐
Stacking Factor	0.92			Stacking factor of the stator core	☐
Steel Type	M19_24G			Steel type of the stator core	☐
Number of Slots	24			Number of slots of the stator core	☐
Slot Type	2			Slot type of the stator core	☐
Lamination Se...	0			Number of lamination sectors	☐
Press Board T...	0	mm		Magnetic press board thickness, 0 for non-magnetic press board	☐
Skew Width	0		0	Skew width measured in slot number	☐

Şekil 4.16. Stator özellikler ekran

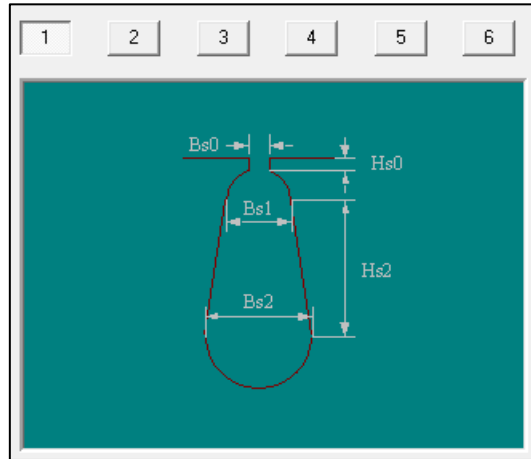
- Stator Dış Çap: 135mm
- Stator İç Çap: 70mm
- Uzunluk: 90mm
- İstifleme Faktörü: 0.92
- Çelik Tipi: M19_24G
- Stator Slot Sayısı: 24
- Slot Tipi: 2
- Laminasyon Sektörü: 0
- Baskı Levhası Kalınlığı: 0
- Eğilme Genişliği: 0

ANSYS Maxwell'de motor modellemesi yapılırken, stator ve rotor çekirdeklerinin gerçekçi davranışını simüle etmek için Stacking Factor (İstifleme Faktörü) parametresinin doğru tanımlanması gerekmektedir. Stacking Factor (İstifleme Faktörü), manyetik çekirdek içinde yer alan gerçek manyetik malzemenin oranını ifade eder. M19, M36 gibi Silisli manyetik çeliklerde %92 verimlilik ele alınır. Bu faktör, manyetik çekirdek yapısında bulunan gerçek manyetik malzeme oranını ifade eder ve Denklem (4.3)'te gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\text{Factor (SF)} = \frac{\text{Manyetik Malzeme Hacmi}}{\text{Toplam Çekirdek Hacmi}} \quad (4.3)$$

Modelleme sürecinde, ANSYS Maxwell yazılımının malzeme kütüphanesinden uygun malzemelerin seçimi ve atanması önemli bir aşamadır. Malzeme seçimi yapılırken, öncelikle yazılımın 'Materials' menüsüne girilir ve buradan motor bileşenleri için gerekli malzemeler belirlenir. Stator ve rotor çekirdekleri için manyetik özellikleri yüksek bir malzeme gerektiğinden, yazılımın kütüphanesinde bulunan silisyum çelik ailesi içerisinde M19_24G seçilmiştir.

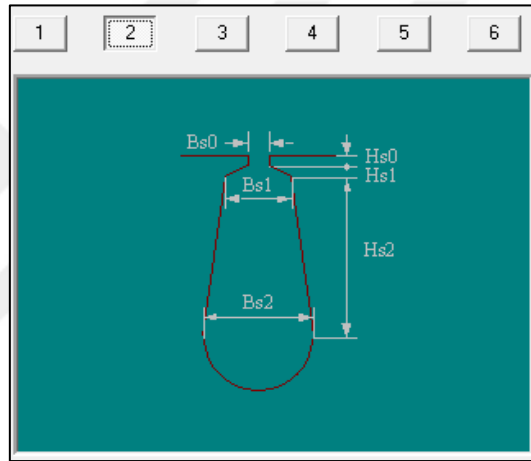
M19_24G çeliği, elektrik motorları ve transformatörlerde yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı bir silisyum çeliği türüdür. Yaklaşık %3.5 silisyum içeriğine sahip olan bu malzeme, yüksek manyetik geçirgenlik, düşük histerezis kaybı ve minimum eddy akımı kayıpları gibi üstün elektromanyetik özellikleri ile öne çıkmaktadır. Mekanik dayanıklılığı ve kolay işlenebilirliği sayesinde motor çekirdeklerinin üretiminde tercih edilen M19_24G çeliği, düşük enerji kayıpları ve yüksek verimlilik sağlar. Bu özellikler, motorlarda daha az ısınma, düşük gürültü seviyesi ve uzun kullanım ömrü gibi avantajlar sunar. ANSYS Maxwell yazılımında motor modellemesi yapılırken, stator ve rotor çekirdekleri için M19_24G malzemesi seçilmiştir. VM 90L-2 asenkron motorunun manyetik çekirdeği için uygun bir malzeme olan M19_24G çeliği, yüksek verimli motorlar (IE2, IE3 gibi) için iyi bir seçimdir. Bu malzeme seçimi, yazılımın malzeme kütüphanesinde yer almakta olup, doğrusal olmayan B-H eğrisi ve kayıp karakteristikleri gibi elektromanyetik özellikleri tam olarak tanımlanmış durumdadır. Böylece simülasyon sonuçlarının gerçek motor davranışını daha doğru yansıtması sağlanmıştır.



Şekil 4.17. Stator oluk yapısı-1 (Yarı açık oluklu stator)

- B_{s0} : Oluk ağzı genişliği, açıklığın dar olduğunu gösteriyor.
- B_{s1} ve B_{s2} : Oluk içindeki genişlikler, oluk yapısının iç kısmının daha geniş olduğunu ve sargılar için yeterli alan sağlandığını ifade ediyor.
- H_{s0} , H_{s1} , H_{s2} : Oluk derinlik ölçümleri, oluk profilinin sargıları tam anlamıyla saracak şekilde tasarlandığını gösteriyor.

Şekil 4.17’de verilen oluk yapısı, yarı açık tasarımın tipik bir örneğidir. Açık ve kapalı olukların avantajlarını birleştiren bir yapı sağlar. Yarı açık oluklar, hem sargı yerleştirme kolaylığı hem de manyetik akı yoğunluğu açısından iyi bir denge sunar. Ayrıca, manyetik alanın düzgün bir şekilde yönlendirilmesine olanak tanır.

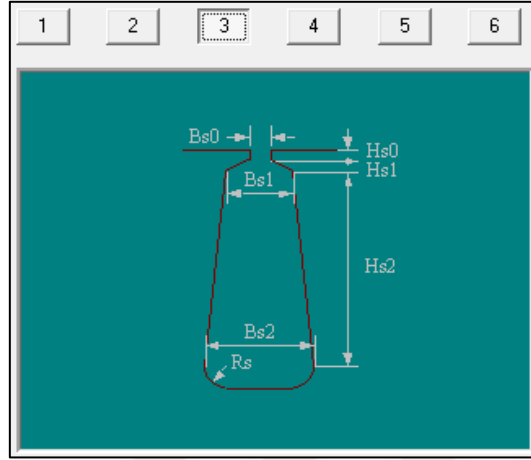


Şekil 4.18. Stator oluk yapısı-2 (Kapalı oluklu stator)

- B_{s0} : Oluk ağzının oldukça dar olduğu görülmektedir. Bu, olukların neredeyse kapalı bir yapıya sahip olduğunu gösterir.
- H_{s0} ve H_{s1} : Oluk ağzının daralmasıyla birlikte sargılar için yerleştirme alanının sadece oluk derinliğine erişimle sınırlı olduğu görülüyor.
- B_{s1} ve B_{s2} : İç genişlikler sargıların düzgün şekilde yerleştirilebileceği yeterli alan sağlar.
- H_{s2} : Oluk derinliği, sargıların yerleştirilmesi ve manyetik alanın optimize edilmesi için tasarlanmıştır.

Şekil 4.18’de verilen oluk yapısı, manyetik akıyı daha iyi yönlendirir. Mekanik gürültü daha azdır. Daha yoğun bir manyetik alan sağlar. Sargı yerleştirilmesi daha zordur, özel üretim süreçleri gerekebilir. Soğutma kapasitesi açık oluklara göre daha düşüktür.

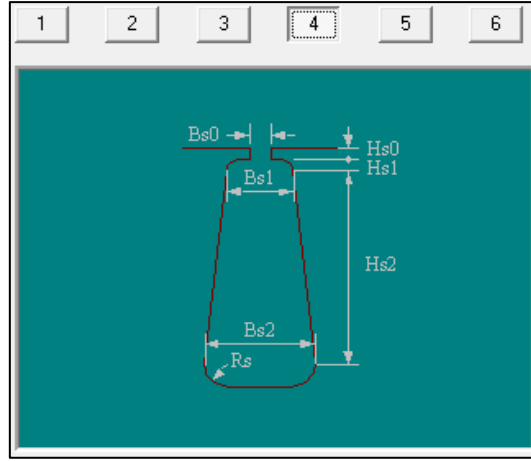
Bu yapı, özellikle düşük gürültü ve yüksek verimlilik gerektiren uygulamalarda tercih edilir.



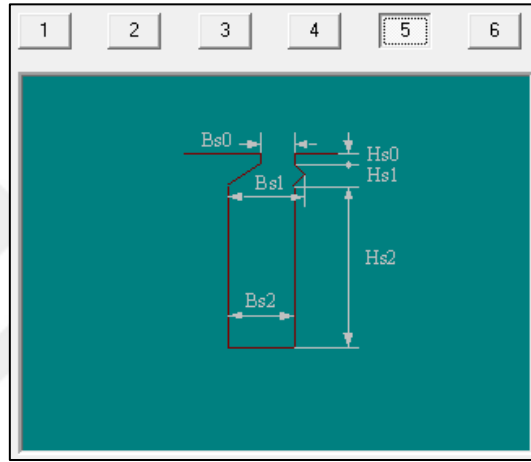
Şekil 4.19. Stator oluk yapısı-3 (Yarı kapalı oluklu stator)

- Bs0: Oluk ağzının genişliği dar, ancak tamamen kapalı değil. Bu, sargı yerleştirme açısından kapalı oluklara göre daha kolaydır.
- Hs0 ve Hs1: Oluk ağzındaki daralma, manyetik akı yoğunluğunu artırmayı hedeflerken sargı yerleştirme işlemini de belirli ölçüde sınırlar.
- Bs1 ve Bs2: Oluk iç kısmı, sargılar için geniş bir alan sunar.
- Rs: Oluk tabanının yuvarlatılmış olması, mekanik dayanıklılığı artırır ve üretimde kolaylık sağlar.
- Hs2: Oluk derinliği, sargıların yerleştirilmesi için optimize edilmiştir.

Şekil 4.19’da verilen oluk yapısı, kapalı oluklara benzer şekilde manyetik akının daha iyi yönlendirilmesini sağlar. Tamamen kapalı oluklara göre sargıların yerleştirilmesi daha kolaydır. Açık oluklara kıyasla daha düşük sızıntı vardır. Mekanik gürültü seviyesi açık oluklara göre daha azdır. Kapalı oluklara kıyasla manyetik performansı biraz daha düşük olabilir. Isı dağılımı tamamen açık oluklara göre daha sınırlıdır. Bu tasarım, sargı yerleştirme kolaylığı ile manyetik akı kontrolü arasında bir denge sağlar ve genellikle orta düzeyde verimlilik ve düşük gürültü gerektiren uygulamalarda tercih edilir.



Şekil 4.20. Stator oluk yapısı-4 (Yarı açık oluklu stator)

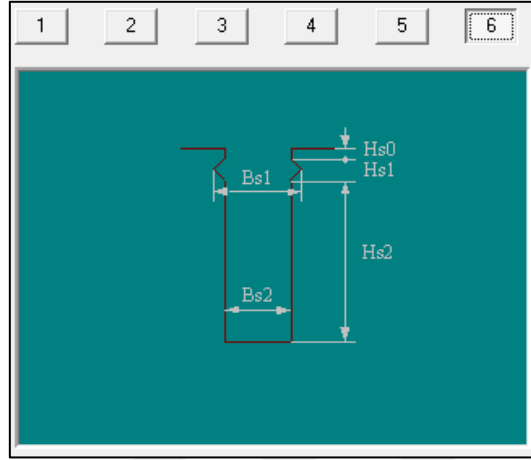


Şekil 4.21. Stator oluk yapısı-5 (Yarı açık oluklu stator)

- Bs0: Yarı-açık oluklarda, üst açıklık (Bs0) geniştir ve bobinlerin kolayca yerleştirilebilmesine imkan tanır.
- Bs1 ve Bs2: Oluk genişliği aşağıya doğru daralır, bu da manyetik akının yönlendirilmesini kolaylaştırır.
- Hs0, Hs1 ve Hs2: Çizimdeki farklı yükseklik ölçüleri, oluk derinliğini gösterir. Yarı-açık oluklar genellikle derinlik ve genişlik açısından belirli bir denge sunar.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilen oluk yapıları, açıklığın geniş olması, sargıların yerleştirilmesini kolaylaştırır. Daha geniş açıklıklar, sargılardan gelen ısıнын daha iyi yayılmasını sağlar. Yarı-açık olukların üretimi genellikle daha basit ve daha düşük maliyetlidir. Daha geniş açıklık, manyetik akı kaçaklarını artırabilir. Daha Fazla Gürültü: Açıklığın daha geniş olması, mekanik ve elektromanyetik gürültünün artmasına neden olabilir. Bu, oluk girişinin açık olduğu ancak tam olarak kapalı

olmadığı bir yapıdır. Bu yapı, hem kolay sarım hem de makul manyetik performans sağlayarak, genellikle orta büyüklükteki asenkron motorlarda tercih edilir.

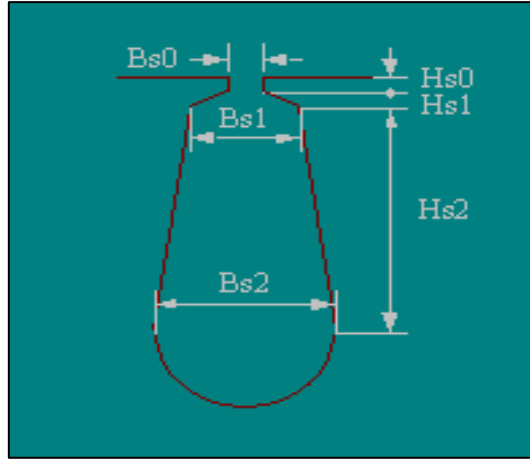


Şekil 4.22. Stator oluk yapısı-6 (Açık tip stator oluk)

- Bs1: Üst açıklık geniş ve açık bir yapıya sahiptir. Bu durum, bobinlerin yerleştirilmesini oldukça kolaylaştırır.
- Bs2: Oluk aşağıya doğru genişler, bu da bobinlerin daha kolay yerleştirilmesini sağlar.
- Hs0, Hs1 ve Hs2: Oluk derinliğini ve boyutlarını gösterir. Açık oluk yapısı, daha fazla hava boşluğu sağlayarak ısıнын daha etkili bir şekilde yayılmasını sağlar.

Şekil 4.22’de verilen oluk yapısı, geniş açıklık, sargıların yerleştirilmesini çok kolay hale getirir. Daha açık bir yapı, sargılardan yayılan ısıнын daha iyi dağılmasına olanak tanır. Daha Fazla Manyetik Kaçak: Açık yapı, manyetik akının bir kısmının kaçmasına neden olabilir, bu da motorun manyetik verimliliğini bir miktar azaltır. Bu oluk, açık tip oluk olarak tanımlanır. Açık oluklar, sargıların kolay yerleştirilmesi ve soğutmanın daha etkili olması gerektiği yerlerde tercih edilir. Ancak manyetik kaçaklar nedeniyle bu oluk tipi, tamamen kapalı veya yarı-açık oluklara göre daha fazla kayıplara neden olabilir.

Ansys Maxwell’in bize sunmuş olduğu 6 adet stator oluk tipinden 3 Fazlı asenkron motorumuzun stator oluk yapısına ait olan “2” numaralı oluk modelinin seçimini stator özellikleri ekranından daha önce yapılmıştır.



Şekil 4.23. Stator oluk geometrisi (Kapalı oluklu stator)

- Hs0: 1mm
- Hs1: 1mm
- Hs2: 10mm
- Bs0: 2mm
- Bs1: 5mm
- Bs2: 7mm

Oluk ölçülerine statordan ölçmüş olduğumuz veriler girilmektedir.

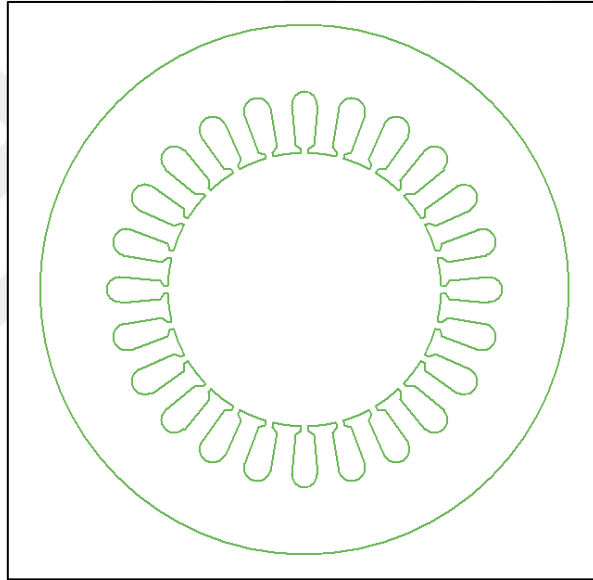


Şekil 4.24. Volt electric motors VM 90L-2 motor stator oluk yapısı

Properties: Project2 - RMXprtDesign1 - Machine						
Slot						
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only	
Auto Design	☐			Auto design Hs2, Bs1 and Bs2	☐	
Parallel Tooth	☐			Design Bs1 and Bs2 based on Tooth Width	☐	
Hs0	1	mm	1mm	Slot dimension: Hs0	☐	
Hs1	1	mm	1mm	Slot dimension: Hs1	☐	
Hs2	10	mm	10mm	Slot dimension: Hs2	☐	
Bs0	2	mm	2mm	Slot dimension: Bs0	☐	
Bs1	5	mm	5mm	Slot dimension: Bs1	☐	
Bs2	7	mm	7mm	Slot dimension: Bs2	☐	

Şekil 4.25. Stator oluk geometrisi ölçüleri

Seçimi yapılan “Kapalı Oluklu Stator” yapısına ait ölçüleri Şekil 4.25’de gösterilen oluk geometrisi özellikleri ekranında veri girişi yapılmıştır.



Şekil 4.26. Stator'un 2 boyutlu modellemesi

Şekil 4.25’de gösterilen oluk geometrisi özellikleri bölümünde veri girişi yapıldıktan sonra Ansys Maxwell’in oluşturmuş olduğu 2 Boyutlu Stator modellemesi Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.27. Volt electric motors VM 90L-2 motor stator görüntüsü

Volt Electric Motors VM 90L-2 Motor'a ait stator görüntüsü Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.28. Volt electric motors VM 90L-2 motor stator oluk yapısı görünümü

Volt Electric Motors VM 90L-2 Motor'a ait stator oluk görüntüsü Şekil 4.27 ve şekil 4.28'de verilmiştir.

Properties: Project2 - RMxprtDesign1 - Machine

Winding | End/Insulation |

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Winding Layers	1			Number of winding layers	☐
Winding Type	Whole-Coiled			Stator winding type	☐
Parallel Branches	1			Number of parallel branches of stator winding	☐
Conductors per Slot	54		54	Number of conductors per slot, 0 for auto-design	☐
Number of Strands	2		2	Number of strands (number of wires per conductor), 0 for auto-design	☐
Wire Wrap	0	mm		Double-side wire wrap thickness, 0 for auto-pickup in the wire library	☐
Wire Size	Diameter: 0.574mm			Wire size, 0 for auto-design	☐

Şekil 4.29. Stator sargı ekranı

Şekil 4.29’da verilen stator sargı ekranında statora ait sargı verilerinin girişi yapılmıştır.

- Winding Layers (Sargı Katmanları): 1

Motor statorunda tek bir katmanlı sargı tasarımına sahip olduğunu ifade eder.

- Winding Type (Sargı Tipi): Whole-Coiled

Bu, sargıların her bir faz için tüm olukları kapsadığı anlamına gelir. Tam sargı (Whole-Coiled) genellikle düşük titreşim ve dengeli bir manyetik alan sağlar.

- Parallel Branches (Paralel Dal Sayısı): 2

Stator sargıları, her faz için iki paralel dal olarak düzenlenmiştir. Bu tasarım, motorun akım taşıma kapasitesini artırır.

- Conductors per Slot (Oluk Başına İletken Sayısı): 54

Her bir olukta 54 iletken bulunduğunu belirtir. Bu, motorun manyetik ve elektriksel performansına etki eder.

- Number of Strands (Tel Sayısı): 2

Her bir iletken iki telden oluşmaktadır. Bu, akım taşıma kapasitesini artırmak ve kayıpları azaltmak için kullanılan bir tekniktir.

- Wire Wrap (Tel Sarımı): 0

Bu parametre genellikle çift sargılı sistemler için kullanılır ve burada 0 olduğu için uygulanmamış.

- Wire Size (Tel Çapı): 0.574 mm

Sargı tellerinin çapı 0.574 mm olarak seçilmiş. Tel çapı, motorun direnç ve akım taşıma kapasitesi üzerinde doğrudan etkilidir.

Properties: yeni proje - RMxprtDesign1 - Machine

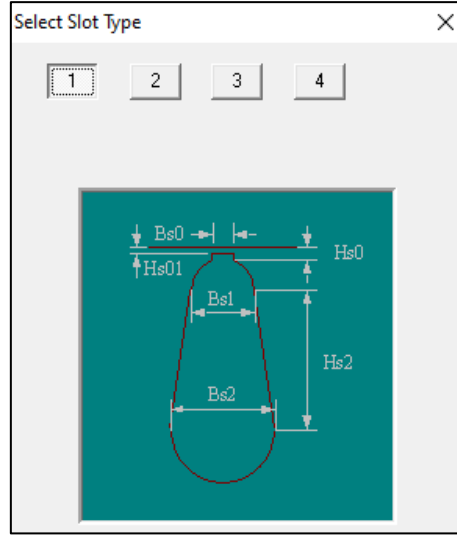
Rotor

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Stacking Factor	0.92			Stacking factor of the rotor core	☐
Number of Slots	18			Number of slots of the rotor core	☐
Slot Type	1			Slot type of the rotor core	☐
Outer Diameter	69.3	mm	69.3mm	Outer diameter of the rotor core	☐
Inner Diameter	34	mm	34mm	Inner diameter of the rotor core	☐
Length	85	mm	85mm	Length of the rotor core	☐
Steel Type	M19_24G			Steel type of the rotor core	☐
Skew Width	1		1	Skew width measured in slot number	☐
Cast Rotor	☒			Rotor squirrel-cage winding is cast	☐
Half Slot	☐			Half-shaped slot (un-symmetric)	☐
Double Cage	☐			Double-squirrel-cage winding	☐

Şekil 4.30. Rotor özellikler ekranı

Şekil 4.30’da verilen rotor özellikler ekranında rotora ait verilerin girişi yapılmıştır.

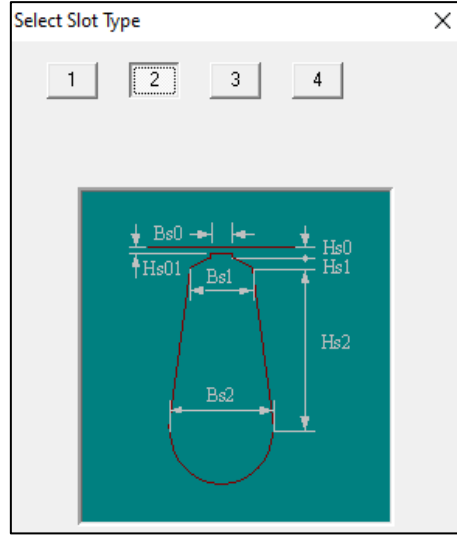
- İstifleme Faktörü: 0.92
- Oluk Sayısı: 18
- Oluk Tipi: 1
- Rotor Dış Çap: 69.3 mm
- Rotor İç Çap: 34 mm
- Uzunluk: 85 mm
- Çelik Türü: M19_24G
- Eğim Genişliği: 1 (Rotor oluklarının eksen boyunca eğimli olduğunu belirtir.)
- Cast Rotor (Döküm Rotor): İşaretli (Rotorun döküm olduğunu ifade eder.)
- Half Slot (Yarım Oluk): İşaretlenmemiş. (Asimetrik bir oluk düzenlemesinin bulunmadığını gösterir.)
- Double Cage (Çift Kafes): İşaretlenmemiş. (Rotorun çift kafes tasarımı olmadığını belirtir. Bu, basit bir sincap kafesli rotor yapısına sahip olduğunu gösterir.)



Şekil 4.31. Rotor oluk yapısı-1 (Yarık oluklu rotor – damla şekilli oluk)

- Hs0: Oluk girişindeki yalıtım boşluğunu veya hava boşluğunu gösterir. Oluk genişliğini başlatan üst kısmın yüksekliğidir.
- Hs1: Dar boyun kısmının yüksekliğini ifade eder. Akı yoğunluğunu kontrol etmek ve akının rotor laminasyonlarında doğru şekilde dağıtılmasını sağlamak için önemli bir parametredir.
- Hs2: Oluk içindeki toplam yüksekliği temsil eder. Rotor çubuklarının (sincap kafesi çubuklarının) yerleştiği kısmın derinliğini tanımlar.
- Bs0: Oluk ağzının genişliğini gösterir. Bu genişlik, akı yoğunluğunu düzenler ve oluk içindeki manyetik doyuma etki eder.
- Bs1: Dar boyun kısmının genişliğidir. Akının dar bir alandan geçmesi sağlanarak rotor akışı kontrol edilir.
- Bs2: Oluk tabanının genişliğini ifade eder. Bu genişlik, rotor çubuklarının alanını ve motorun elektriksel özelliklerini etkiler. Daha geniş bir taban, daha fazla akım taşıma kapasitesi sağlar.

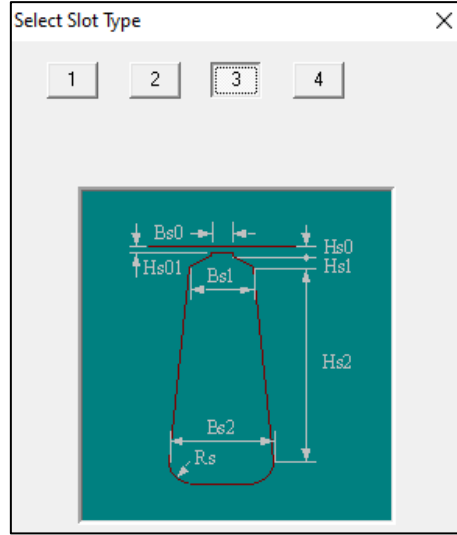
Şekil 4.31’de verilen oluk yapısı, dar boyun kısmı, manyetik akıyı rotor laminasyonları içinde eşit şekilde yayılmasına yardımcı olur. Dar ağız kısmı (Bs0), rotorun doyma eğrisini kontrol etmeye yardımcı olur, bu da motorun verimliliğini artırır. Oluk geometrisi, rotor laminasyonlarında kayıpları minimuma indirir. Derin oluklar, yüksek tork gereksinimlerini karşılayacak şekilde optimize edilmiştir.



Şekil 4.32. Rotor oluk yapısı-2 (Damla şekilli geniş tabanlı oluk)

- Bs1: Boyun kısmı, dar bir geçiş sağlar ve manyetik akının kontrol edilmesine yardımcı olur. Akı yoğunluğunu düzenleyerek verimli bir manyetik devre oluşturur.
- Bs2: Oluk tabanı daha geniş bir yapıya sahiptir. Bu, rotor çubuklarının daha fazla akım taşımasına olanak tanır. Geniş taban, yüksek moment üretimi için uygundur.
- Hs0 ve Hs1: Bu parametreler, oluk ağzının ve boyun kısmının yüksekliğini ifade eder. Bu yükseklikler, akı yoğunluğunu ve kayıpları optimize etmek için tasarlanmıştır.
- Hs2: Oluk derinliği, rotor çubuklarının yerleştiği bölgeyi tanımlar. Derinlik, motorun yük altında yüksek tork üretme kapasitesini artırır.

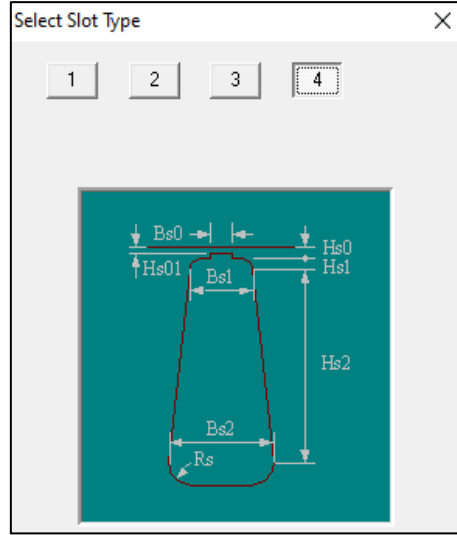
Şekil 4.32’de verilen oluk yapısı, daha geniş taban, rotor çubuklarının daha fazla akım taşımasını sağlar. Dar boyun kısmı, akının etkili bir şekilde yönlendirilmesine yardımcı olur. Geometri, histerezis ve fuko kayıplarını azaltacak şekilde optimize edilmiştir.



Şekil 4.33. Rotor oluk yapısı-3 (Trapez tabanlı oluk)

- Hs0: Oluk girişindeki kısa yüksekliği ifade eder ve genellikle manyetik akının başlangıç dağılımını etkiler.
- Hs1: Dar boyun kısmının yüksekliğidir ve akı yoğunluğunun kontrol edilmesine yardımcı olur.
- Hs2: Oluk boyunca toplam derinliği ifade eder. Derinlik, motorun tork üretim kapasitesini artırır.
- Bs0: Oluk ağzının genişliğidir. Dar ağız kısmı, akı yoğunluğunun yönlendirilmesine yardımcı olur.
- Bs1: Daraltılmış boyun kısmının genişliğini temsil eder. Bu özellik akının istenilen yoldan geçmesini sağlar.
- Bs2: Oluk tabanının genişliğidir. Daha geniş bir taban, motorun rotor çubuklarının daha fazla akım taşımaya izin verir.
- Rs: Oluk tabanındaki yuvarlatılmış kısmın yarıçapını ifade eder. Bu tasarım, akı akışını pürüzsüzleştirir ve mekanik dayanımı artırır.

Şekil 4.33’de verilen oluk yapısı, taban genişliği trapez şekilli olup, motorun kayma (slip) aralığında daha dengeli bir performans sağlar. Oluk tabanındaki yuvarlak yarıçap, rotor çubuklarının mekanik dayanıklılığını artırır ve kayıpları azaltır. Akıyı kontrol eder ve manyetik doygunluğu düzenler. Tabanın yuvarlatılmış tasarımı mekanik dayanımı artırır. Akı akışını optimize ederek histerezis ve fuko kayıplarını azaltır. Trapez şekli, motorun yük altında daha verimli çalışmasını sağlar.

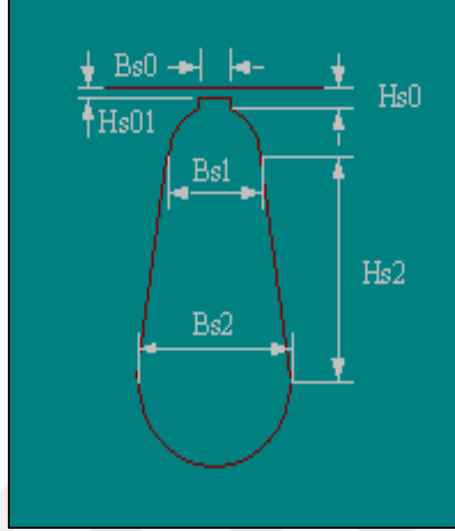


Şekil 4.34. Rotor oluk yapısı-4 (Trapez tabanlı ve yuvarlatılmış köşeli oluk)

- Hs0: Oluk girişindeki küçük yüksekliği ifade eder. Bu, oluk içindeki manyetik akının başlangıç dağılımını etkiler.
- Hs1: Oluk boyunun yüksekliğidir. Akı yoğunluğu bu dar alanda kontrol edilir.
- Hs2: Oluk boyunca toplam derinliği ifade eder. Bu derinlik, motorun tork kapasitesini ve akım taşıma kapasitesini etkiler.
- Bs0: Oluk ağzının genişliğidir. Dar ağız, akının yönlendirilmesine yardımcı olur.
- Bs1: Oluk boyunun genişliğini ifade eder. Dar boyun tasarımı, akıyı etkin bir şekilde yönlendirir.
- Bs2: Oluk tabanının genişliğidir. Daha geniş taban, rotor çubuklarının daha fazla akım taşımasına olanak tanır.
- Rs: Oluk tabanındaki yuvarlatılmış köşe yarıçapını ifade eder. Bu tasarım, mekanik dayanımı artırır ve kayıpları azaltır.

Şekil 4.34’de verilen oluk yapısı, geniş taban tasarımı, motorun yüksek akım taşıma kapasitesini destekler. Tabanın köşe noktalarının yuvarlatılmış olması, mekanik dayanıklılığı artırır ve rotor çubuklarında gerilme noktalarını azaltır. Manyetik akı yoğunluğunu kontrol ederek, verimliliği artırır ve doygunluğu önler. Trapez tabanlı tasarım, motorun ağır yüklerde yüksek tork üretmesine olanak tanır. Yuvarlatılmış taban tasarımı, fuko ve histerezis kayıplarını en aza indirir. Oluk geometrisi, rotor çubuklarının mekanik dayanımını artırır.

Ansys Maxwell'in bize sunmuş olduğu 4 adet rotor oluk tipinden 3 Fazlı asenkron motorumuzun rotor oluk yapısına ait olan "1" numaralı oluk modelinin seçimini rotor özellikleri ekranından yapılmıştır.



Şekil 4.35. Rotor oluk geometrisi (Yarık oluklu rotor – damla şekilli oluk)

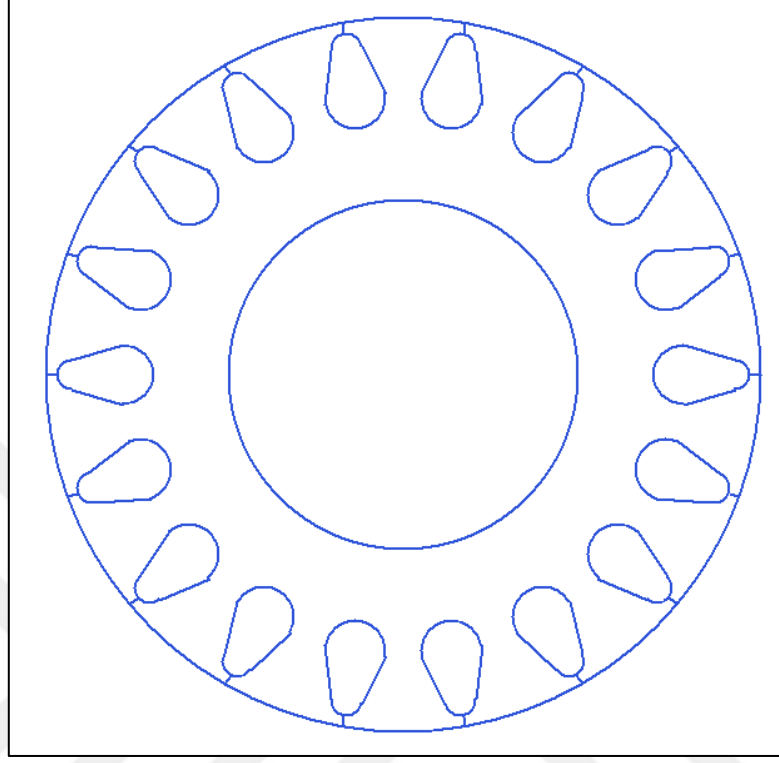
- Hs0: 1mm
- Hs01: 0mm
- Hs2: 5mm
- Bs0: 0mm
- Bs1: 3mm
- Bs2: 6mm

Oluk ölçülerine statordan ölçülen veriler girilmiştir.

Properties: Project2 - RMXprtDesign1 - Machine						
Slot						
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only	
Hs0	1	mm	1mm	Slot dimension: Hs0	☐	
Hs01	0	mm	0mm	Slot dimension: Hs01	☐	
Hs2	5	mm	5mm	Slot dimension: Hs2	☐	
Bs0	0	mm	0mm	Slot dimension: Bs0	☐	
Bs1	3	mm	3mm	Slot dimension: Bs1	☐	
Bs2	6	mm	6mm	Slot dimension: Bs2	☐	

Şekil 4.36. Rotor oluk geometrisi ölçüleri

Seçmiş olduğumuz “Yarık Oluklu Rotor – Damla Şekilli Oluk” yapısına ait ölçüleri Şekil 4.36’da gösterilen oluk geometrisi özellikleri ekranında veri girişi yapılmıştır.



Şekil 4.37. 2 Boyutlu rotor modellemesi

Şekil 4.36’da Gösterilen oluk geometrisi özellikleri bölümünde veri girişi yapıldıktan sonra Ansys Maxwell’in oluşturmuş olduğu 2 boyutlu rotor modellemesi şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.38. Volt electric motors VM 90L-2 motor rotor yapısı genel görünümü



Şekil 4.39. Volt electric motors VM 90L-2 motor ring görüntüsü

Properties: Project2 - RMXprtDesign1 - Machine

Winding

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Bar Conductor Type	cast_aluminum_75C			Select bar conductors Type	☐
End Length	9	mm	9mm	Single-side end extended bar length	☐
End Ring Width	14	mm	14mm	One-side width of end rings (in axial direction)	☐
End Ring Height	10	mm	10mm	Height of end rings (in radial direction)	☐
End Ring Conductor ...	cast_aluminum_75C			Select End ring conductor Type	☐

Şekil 4.40. Rotor sargı-ring ekranı

- Bar Conductor Type (Çubuk İletken Türü): cast_aluminum_75C

Rotor çubuklarının malzemesi olarak döküm alüminyum kullanılmıştır.

- End Length (Son Uzunluk): 9 mm

Rotor çubuklarının uçlarında, bir tarafa uzanan bölümün uzunluğunu ifade eder. Bu, çubukların rotor son halkalarına bağlanması için gerekli olan alanı tanımlar.

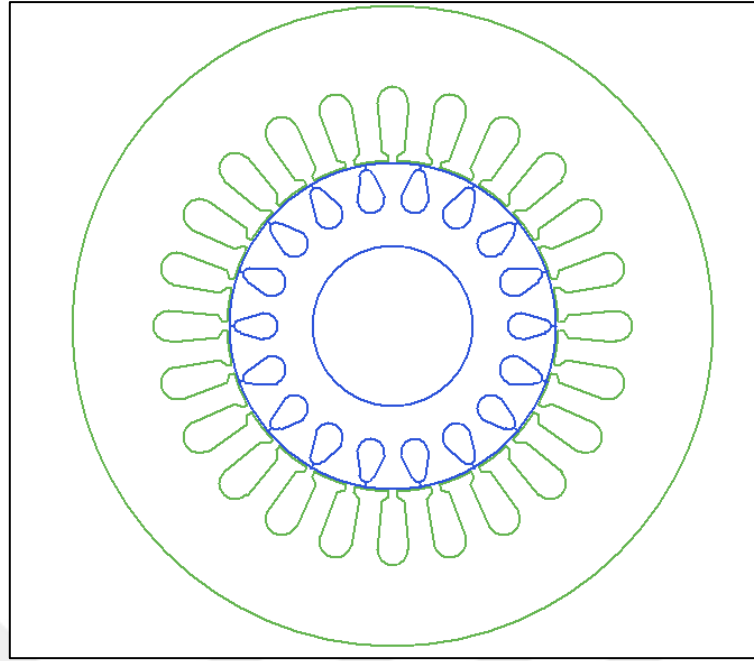
- End Ring Width (Son Halka Genişliği): 14 mm

Rotor son halkasının eksen yönündeki genişliğidir. Bu genişlik, rotorun akım taşıma kapasitesini ve mekanik sağlamlığını etkiler.

- End Ring Height (Son Halka Yüksekliği): 10 mm

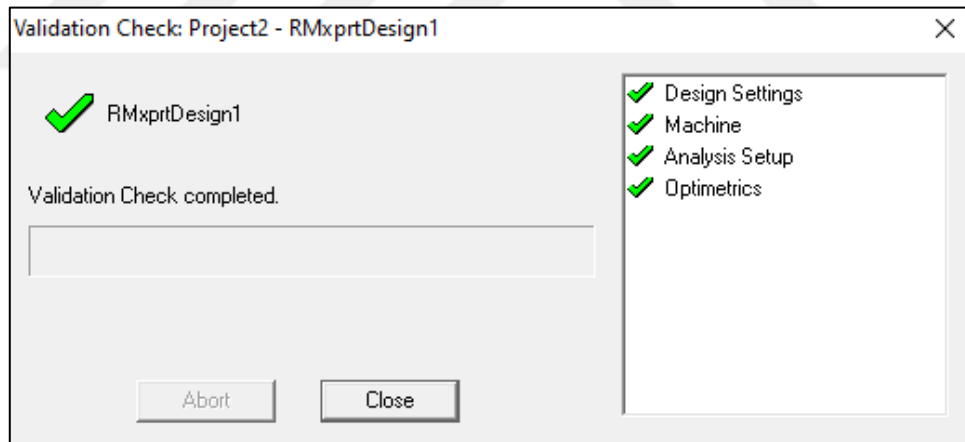
Rotor son halkasının radyal yöndeki yüksekliğidir. Bu, son halkaların akım taşıma kapasitesine ve rotorun moment üretme performansına etki eder.

- End Ring Conductor (Son Halka İletken Malzeme): cast_aluminum_75C Son halkaların da döküm alüminyumdan yapıldığını belirtir.

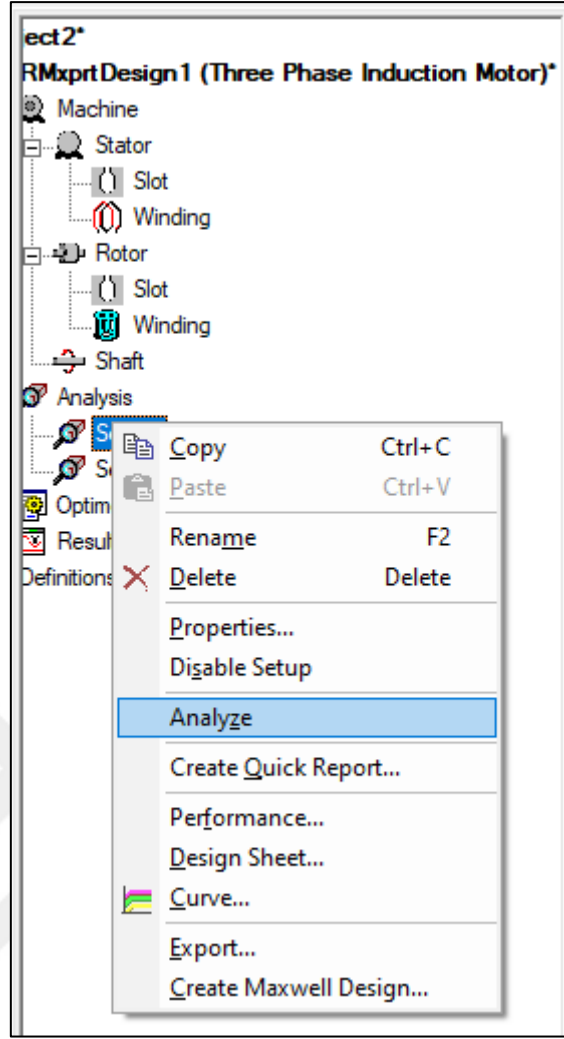


Şekil 4.41. 2 Boyutlu rotor ve stator modellemesi

2 Boyutlu modelleme de veri girme işlemi yapıldıktan sonra veri doğrulunu kontrol etmek amacıyla “Validate” butonuna tıklanır ve veri doğrulaması yapılır (Şekil 4.42).



Şekil 4.42. Veri doğrulama ekranı

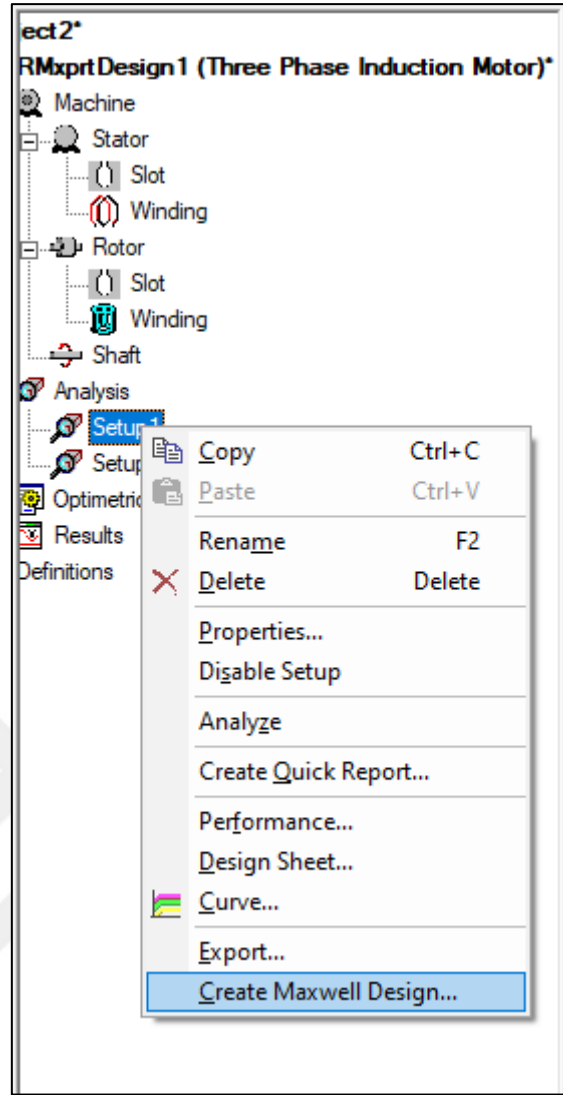


Şekil 4.43. 2 Boyutlu analiz ekranı

Setup bölümünden açılan sekmelerden “Analyze” seçeneği seçilir, 2 Boyutlu Modellemenin Analiz sonuçlarına ulaşılır (Şekil 4.43).

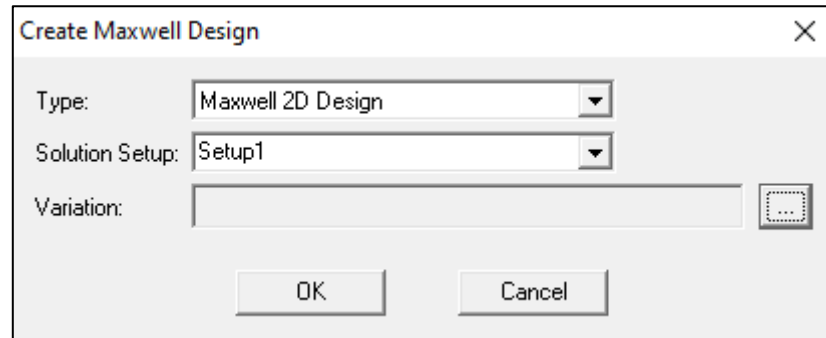
4.3.2. 3 Boyutlu modelleme

2 Boyutlu Modelleme yapılırken girmiş olduğumuz modelleme parametreleri 3 boyutlu modelleme içinde kullanılmaktadır.



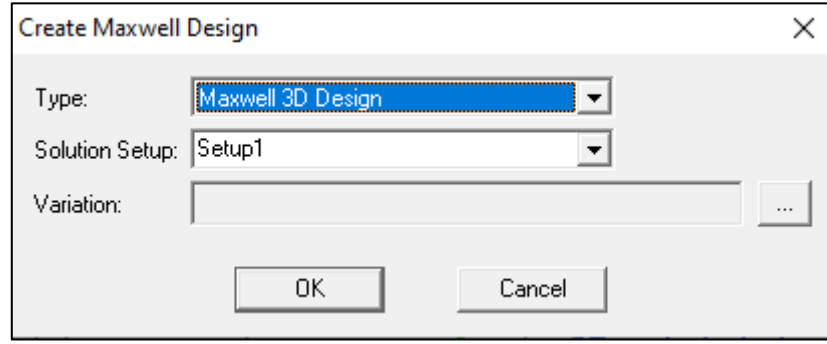
Şekil 4.44. 3 Boyutlu model oluşturma ekranı

Setup bölümüne sağ tıklayarak “Create Maxwell Design” seçeneğini seçtiğimizde 3 Boyutlu Modellemenin yapılacağı ekrana ulaşılır (Şekil 4.44).



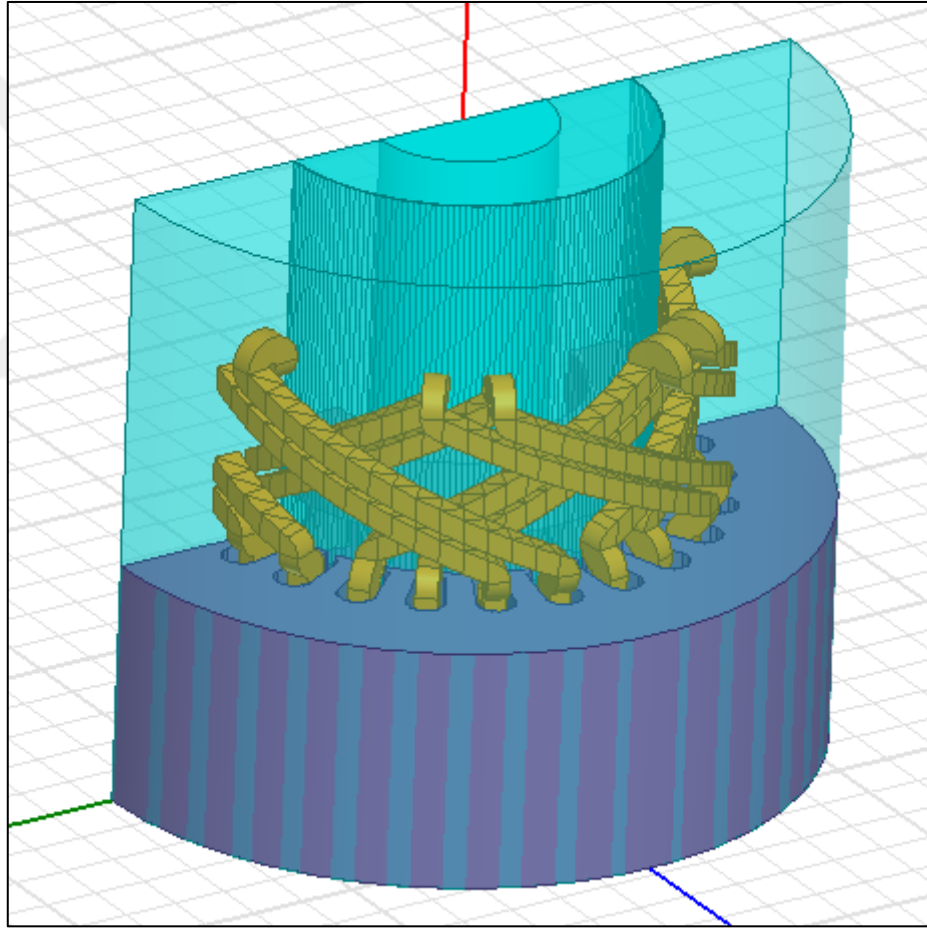
Şekil 4.45. 3 Boyutlu model seçim ekranı

“Type” bölümünü tıklayarak “Maxwell 3D Design” seçeneği seçilir (Şekil 4.46).



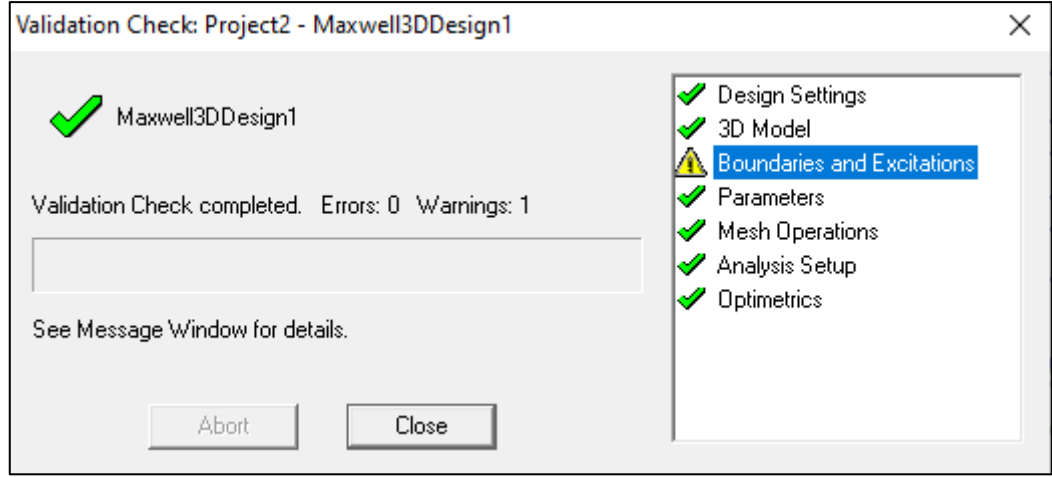
Şekil 4.46. 3 Boyutlu model seçim ekranı-2

“OK” butonuna tıklanarak 3 Boyutlu model oluşturulur (Şekil 4.47).



Şekil 4.47. Rotor ve stator'un 3 boyutlu modellemesi

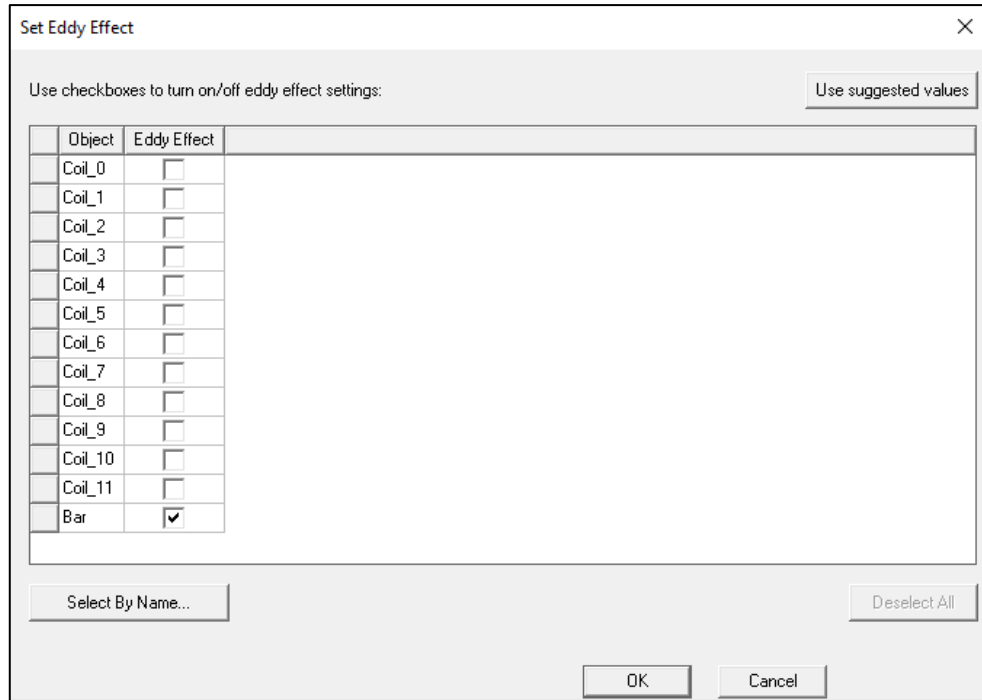
3 Boyutlu modelleme de veri girme işlemi yapıldıktan sonra veri doğruluğunu kontrol etmek amacıyla “Validate” butonuna tıklanır ve veri doğrulaması yapılır.



Şekil 4.48. Veri doğrulama ekranı

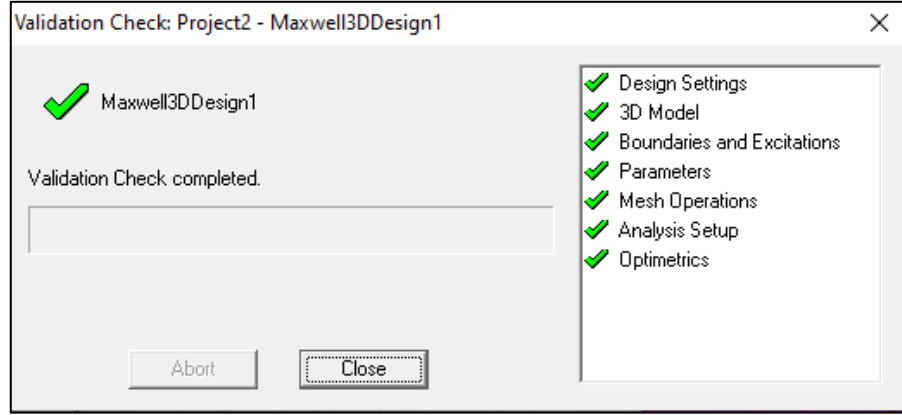
Veri doğrulama ekranında “Boundaries and Excitations” uyarı verecektir (Şekil 4.48).

Bu problemi çözmek için “Close” butonuna basılır. Ana ekranda CTRL+A yapılarak 3 boyutlu modelin tamamı seçilir ve sağ tıklanarak “Assign Excitation” seçenekleri açılır. “Set Eddy Effects...” seçeneği seçilir ve Set Eddy Effect ekranı açılır (Şekil 4.49).



Şekil 4.49. Set eddy effects ekranı

“Bar” tik’i kaldırılır ve “OK” butonuna tıklanarak sayfadan çıkılır. “Validate” butonuna tıklanarak, veri doğrulaması tekrar yapılır.

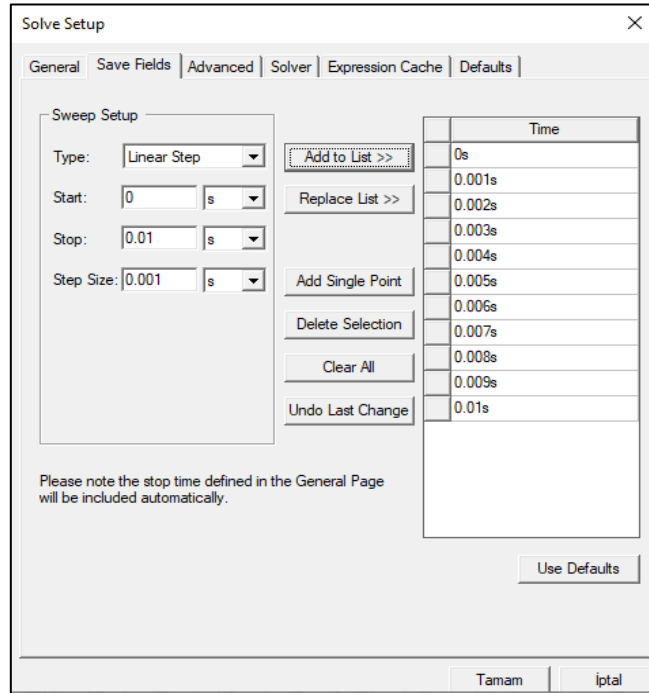


Şekil 4.50. Veri doğrulama ekranı-2

2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Modelleme işlemleri yapıldı. Veri doğrulamaları yapılmıştır (Şekil 4.50).

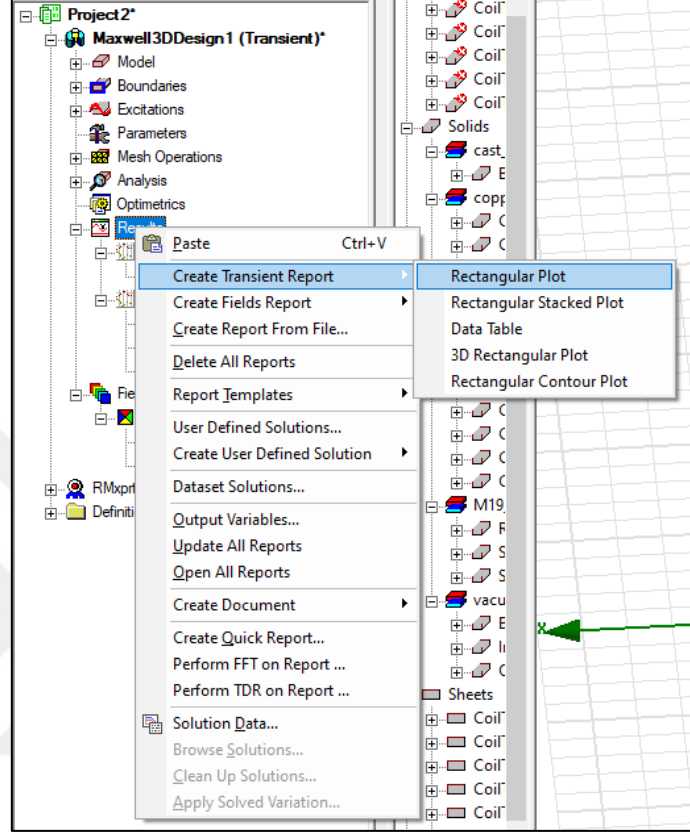
4.4. Simülasyon

Solution Setup ekranına girilir.

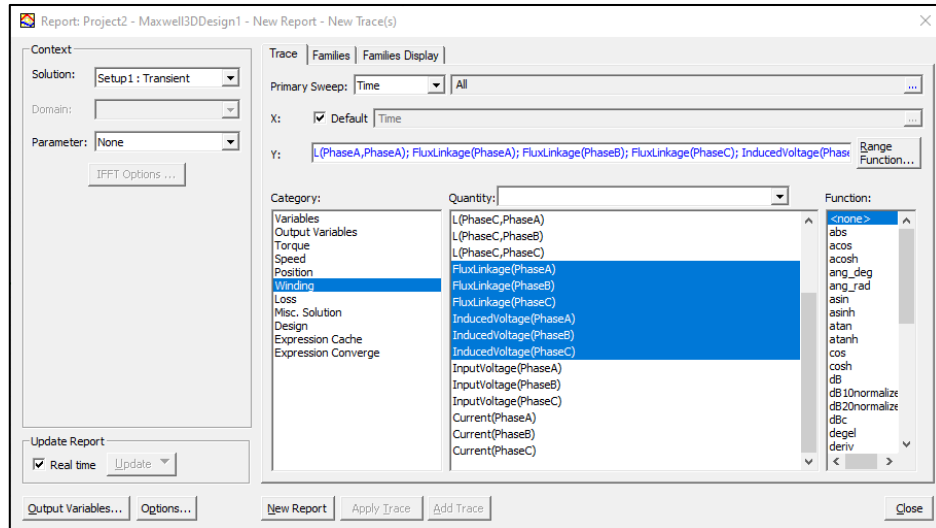


Şekil 4.51. Solution setup ekranı

Save Fields sekmesine geçilir. Step size 0.001 olarak değiştirilir. “Add to list” yapılır “Tamam” butonu ile kapatılır. Bu ekranda simülasyon yapılacak zaman aralığının başlama ve bitiş zamanları belirlenmiştir (Şekil 4.51).



Şekil 4.52. Report-trace ekranına giriş arayüzü



Şekil 4.53. Report-trace ekranı

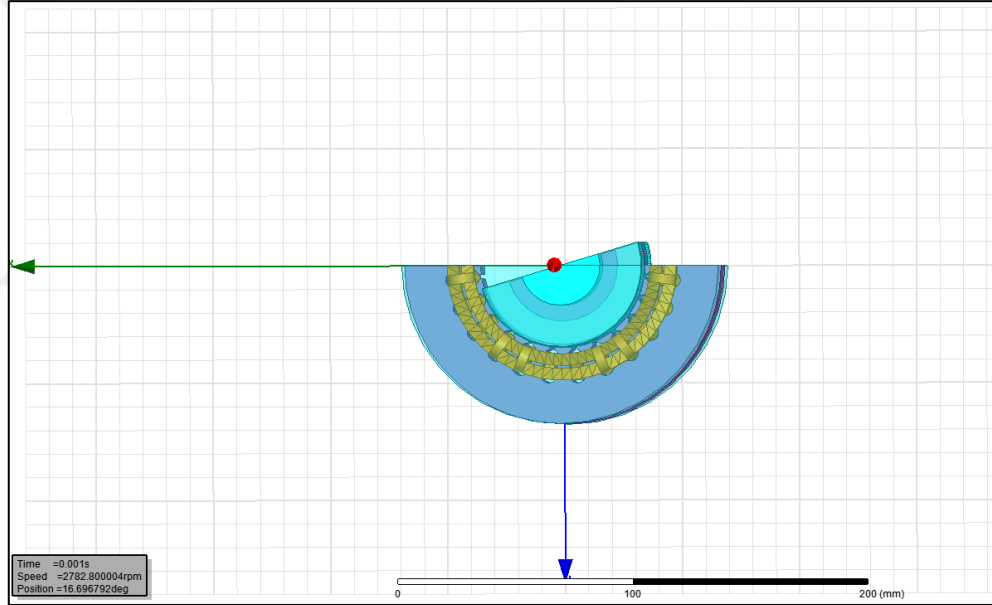
Report-Trace Ekranında raporlanmak istenen parametrelerin seçimi yapılmaktadır (Şekil 4.53). Sargı sekmesindeki Faz A, Faz B ve Faz C'ye ait akı bağlantısı seçilir,

bunlara ek olarak indüklenen voltajlar için InducedVoltage(PhaseA), InducedVoltage(PhaseB) ve InducedVoltage(PhaseC) seçilir. “New Report” tıklanarak raporlamak istenen parametrelerin “Results” başlığı altında toplanması sağlanır.



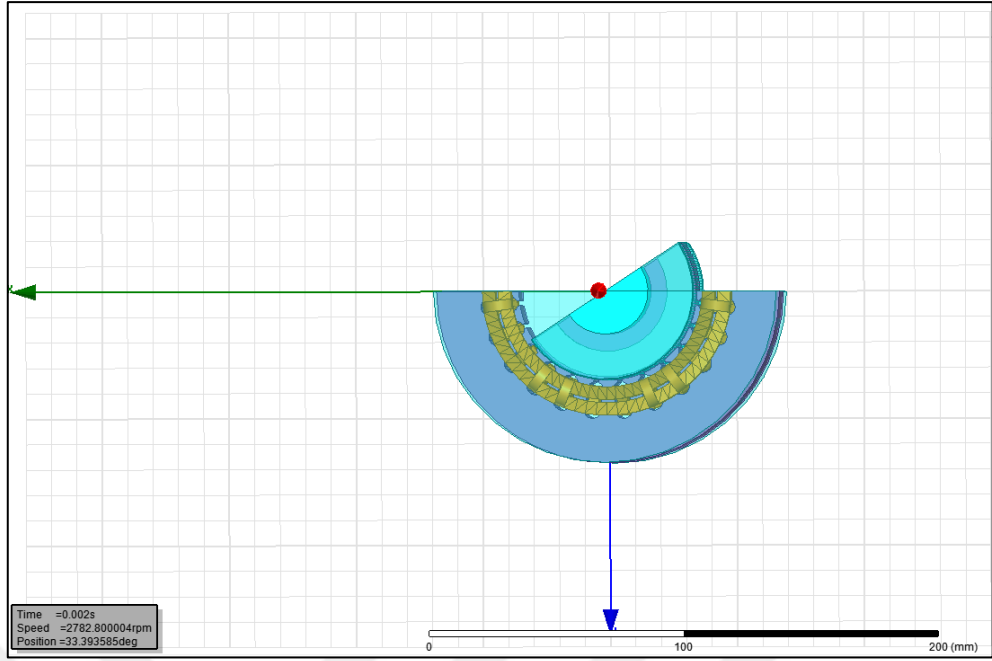
Şekil 4.54. Analyze all buton simgesi

“Analyze All” butonuna tıklanarak bu bölüme kadar girmiş olduğumuz tüm verilerin analiz edilmesi sağlanır (Şekil 4.54). Analiz işlemi tamamlandıktan “Time” ibaresinin üzerine tıklanarak Solution Setup ekranında seçmiş olduğumuz zaman dilimlerinden istediğim zamanın simülasyonu incelenebilir.



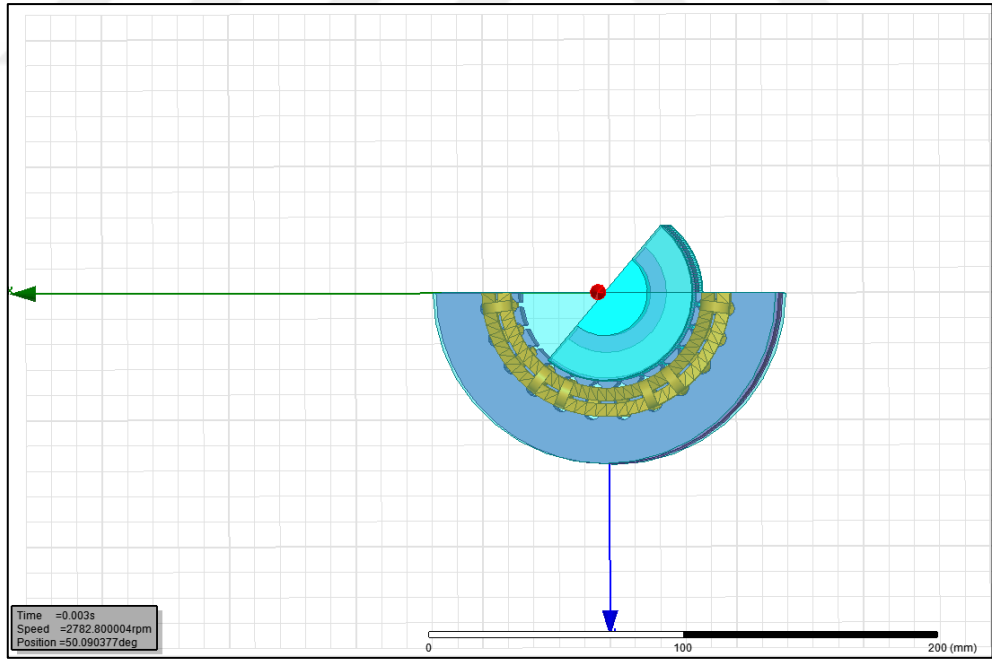
Şekil 4.55. Motorun 1 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.55’de motorun 1 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm’dir. Rotor 16.69 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



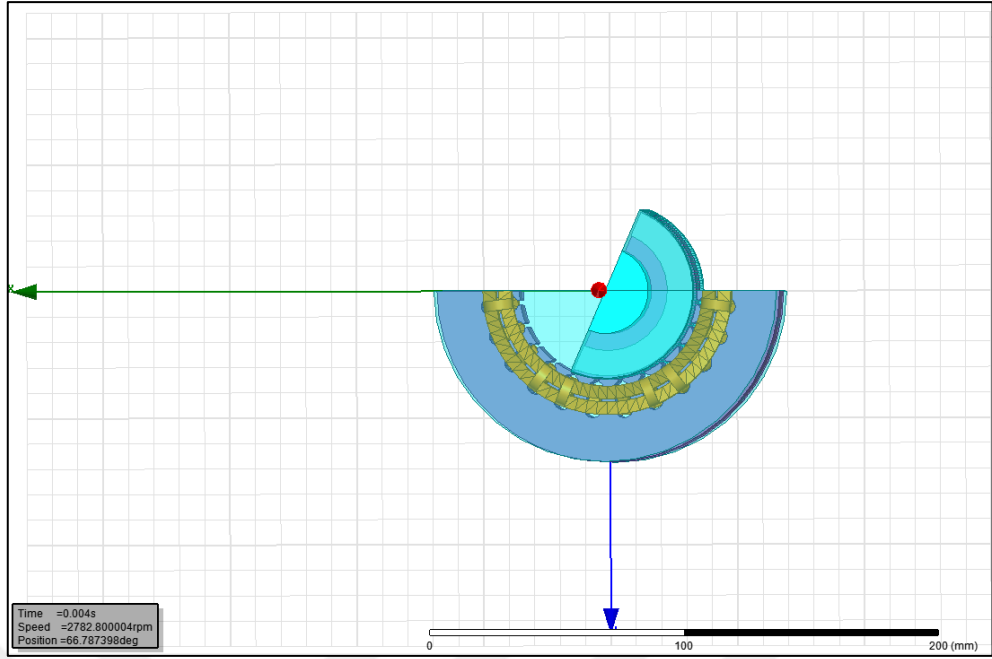
Şekil 4.56. Motorun 2 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.56'da motorun 2 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 33.39 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



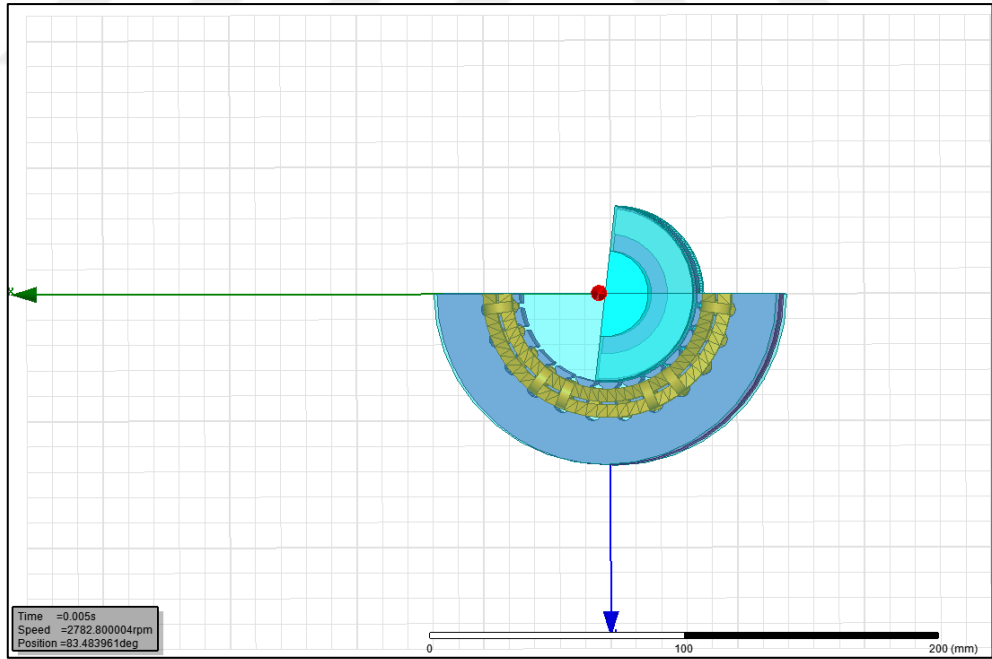
Şekil 4.57. Motorun 3 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.57'de motorun 3 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 50.09 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



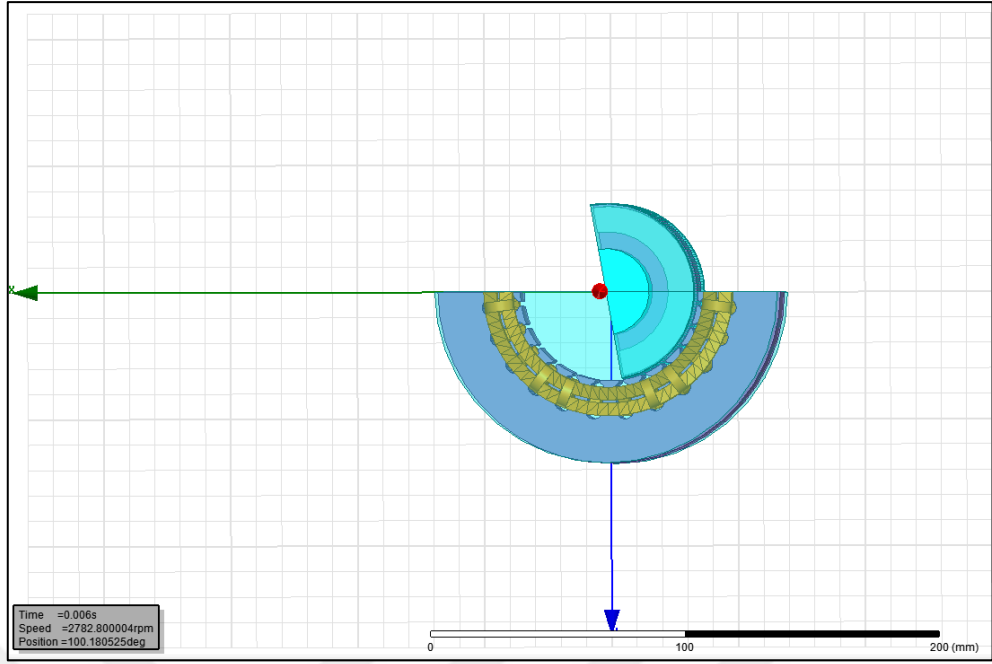
Şekil 4.58. Motorun 4 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.58'de motorun 4 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 66.78 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



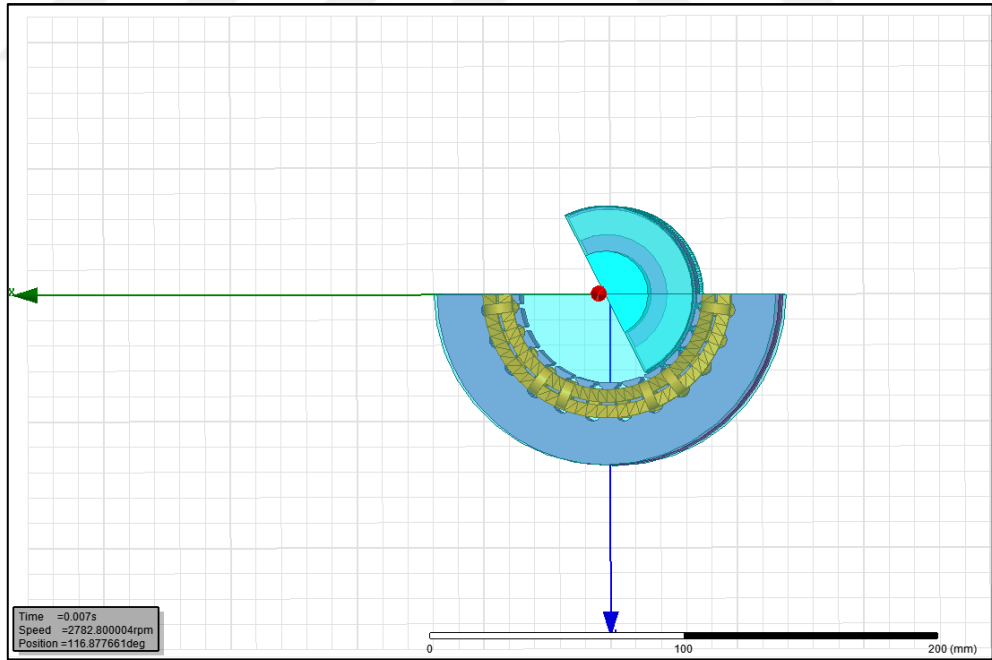
Şekil 4.59. Motorun 5 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.59'da motorun 5 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 83,48 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



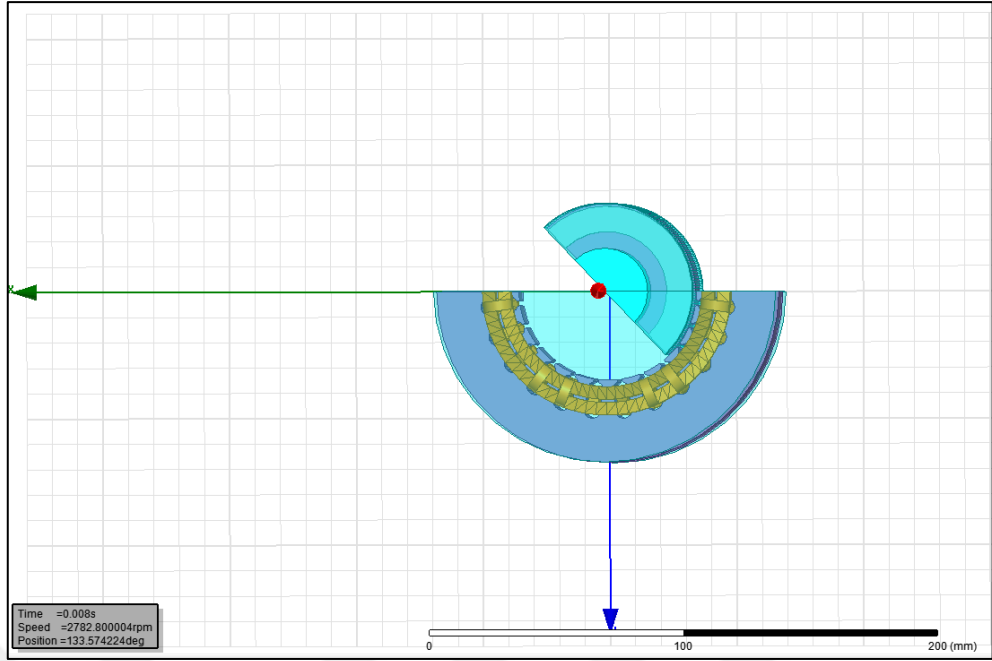
Şekil 4.60. Motorun 6 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.60'da motorun 6 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 100.18 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



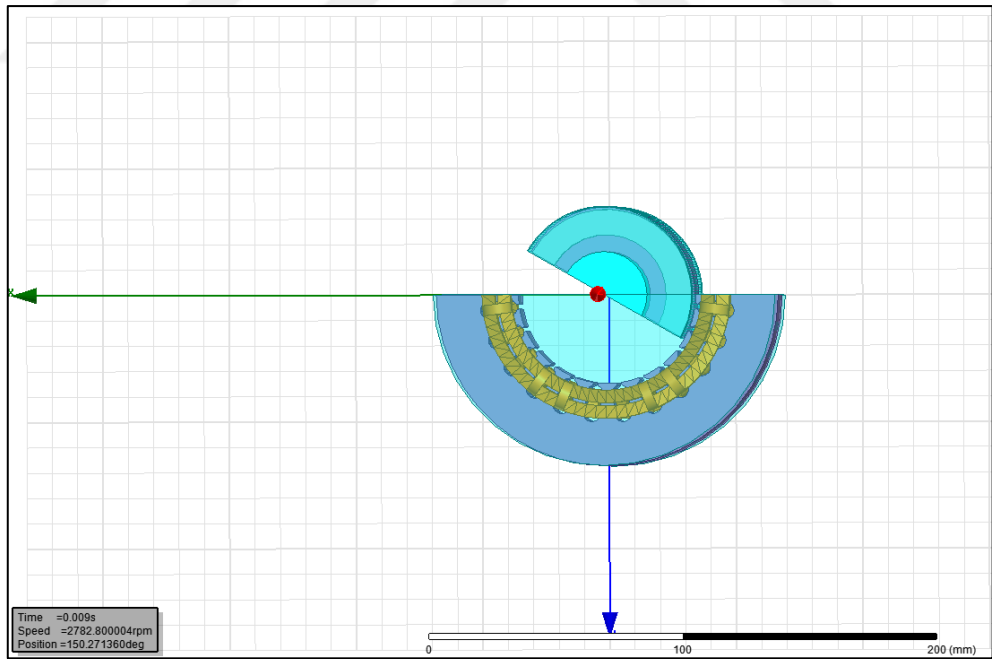
Şekil 4.61. Motorun 7 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.61'de motorun 7 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 116.87 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



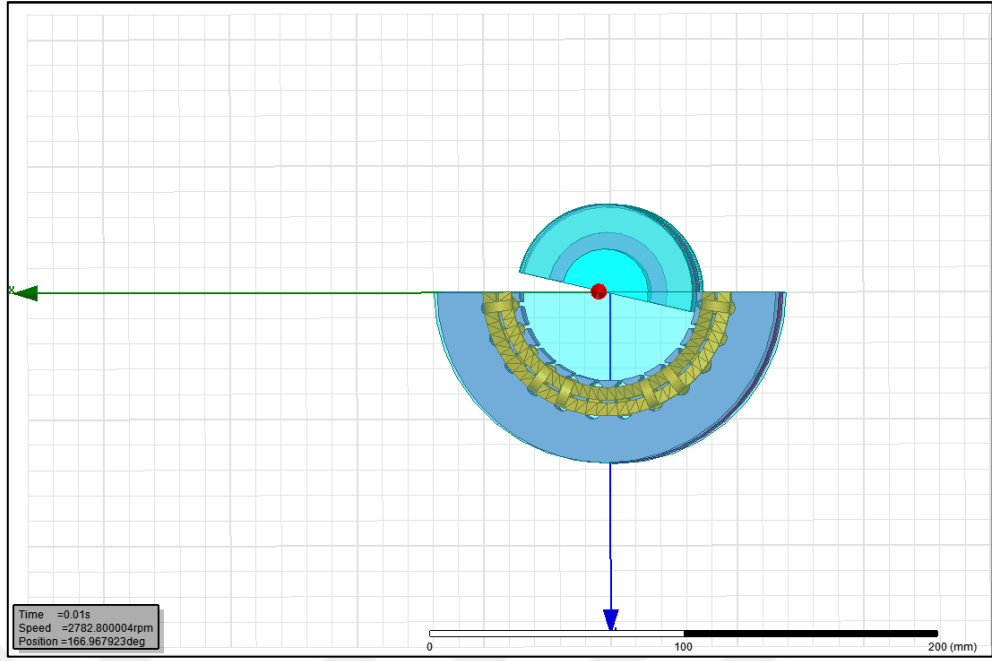
Şekil 4.62. Motorun 8 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.62'de motorun 8 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 133.57 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



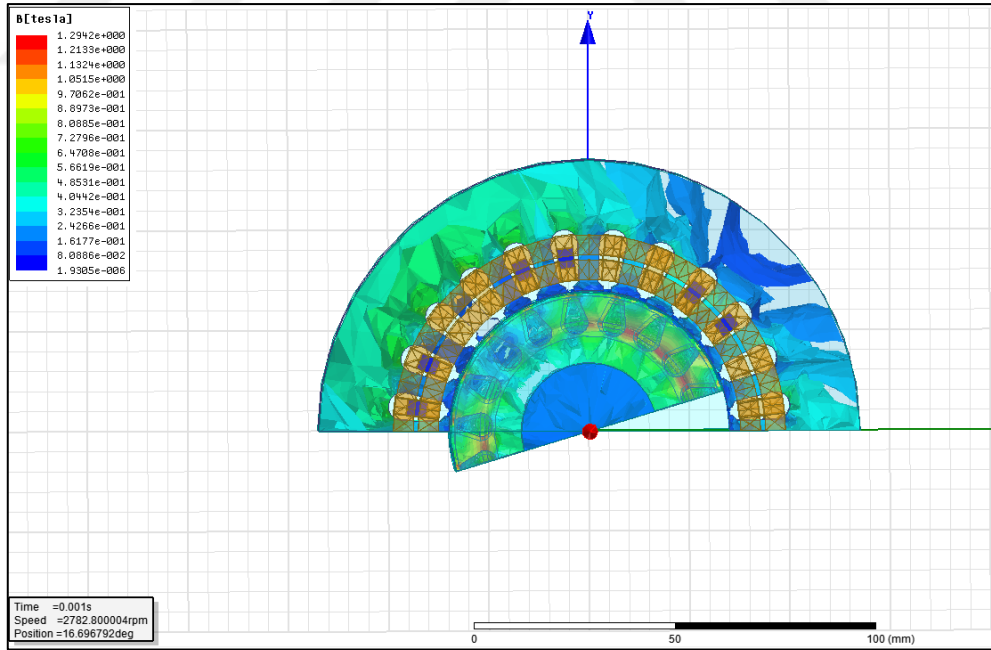
Şekil 4.63. Motorun 9 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.63'de motorun 9 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm'dir. Rotor 150.27 derecelik dönme hareketi yapmıştır.



Şekil 4.64. Motorun 10 milisaniye'deki konumu

Şekil 4.64’de motorun 10 milisaniyedeki konumu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm’dir. Rotor 166.96 derecelik dönme hareketi yapmıştır.

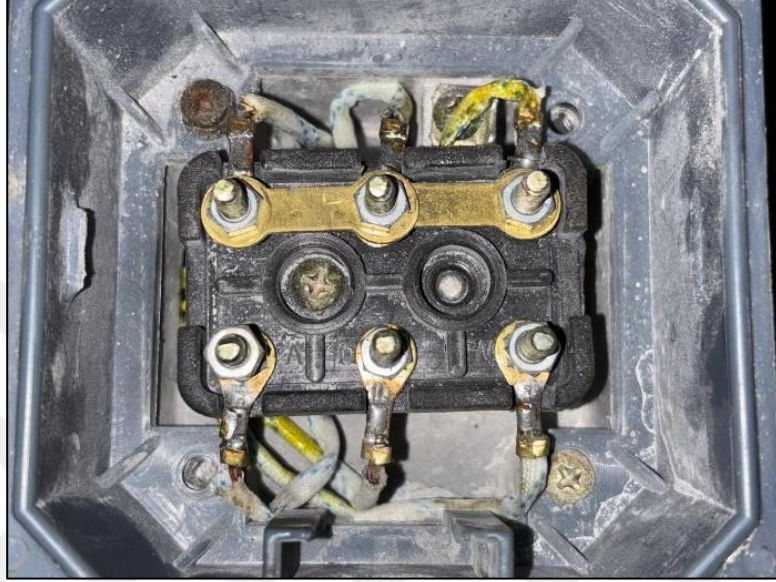


Şekil 4.65. Motorun 1 milisaniye'deki manyetik akı yoğunluğu

Şekil 4.65’de motorun 1 milisaniyedeki manyetik akı yoğunluğu verilmiştir. Motorun hızı 2782.8 rpm’dir. Rotor 16.69 derecelik dönme hareketi yapmıştır.

4.5. Stator Sargı Dirençlerinin Ölçülmesi

Motorun bağlantı şemasını (yıldız veya üçgen) belirlemek önemlidir. Bu, ölçüm yapılacak noktaları belirleyecektir. Analizini yapmış olduğumuz motor yıldız bağlantı şeması ile bağlanmıştır (Şekil 4.66).



Şekil 4.66. Volt electric motors VM 90L-2 motor yıldız bağlantı şeması

Sargılarda herhangi bir kopukluk veya kısa devre olup olmadığını kontrol etmek için öncelikle her bir fazı karşılayan karşıda bir adet kısa devre olmalıdır. Birden fazla kısa devre olması fazlar arasında kısa devre olduğunu gösterir.

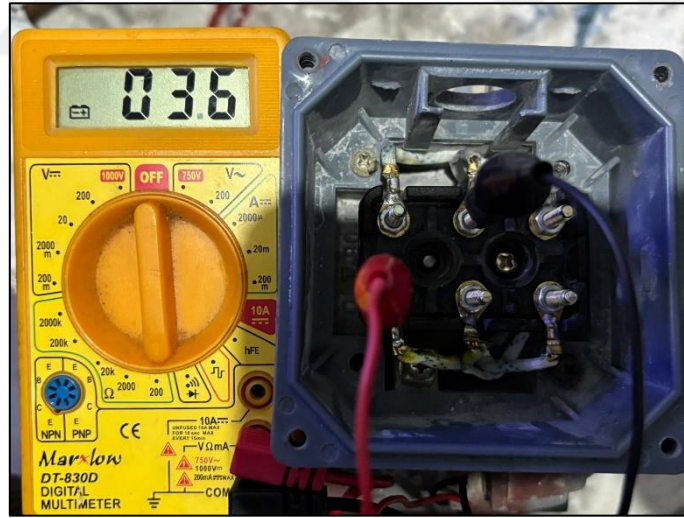
Ölçüm öncesi, motorun besleme gerilimi kesinlikle kesilmelidir. Motorun tamamen soğuması beklenmelidir. Çünkü sıcaklık, direnci etkiler. Hassas bir ohmmetre veya dijital multimetre kullanılmalıdır. Elektrik çarpması riskine karşı gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır. Bağlantı klemensleri ölçüm için sökülür.



Şekil 4.67. Volt electric motors VM 90L-2 motor bağlantı kutusu

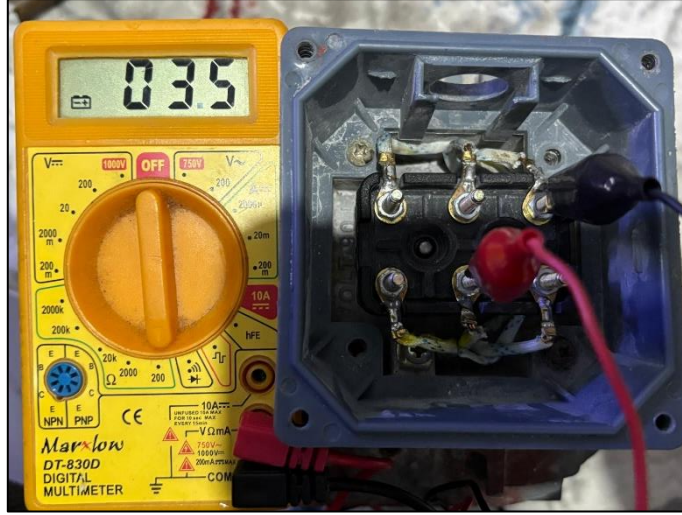
Şekil 4.68’de sol üstten başlayarak problemlerin sırası şu şekildedir: W2, U2, V2
Sol alttan başlayarak problemlerin sırası şu şekildedir: U1, V1, W1

Birinci faz: Multimetrenin problemlerini U1 ve U2 terminallerine dokundurulur. Şekil 4.68’de ölçülen değerin görseli değeri verilmiştir. U1-U2: 3.6 ohm



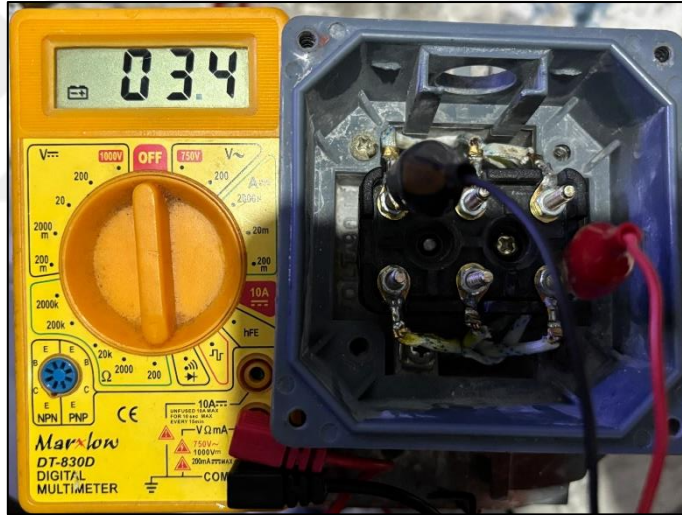
Şekil 4.69. Birinci faz: U1 ve U2 arasındaki direnç

İkinci faz: Problemleri V1 ve V2 terminallerine dokundurulur. Şekil 4.69’da ölçülen değerin görseli değeri verilmiştir. V1-V2: 3.5 ohm



Şekil 4.70. İkinci faz: V1 ve V2 arasındaki direnç

Üçüncü faz: Problemleri W1 ve W2 terminallerine dokundurulur. Şekil 4.70’de ölçülen değerin görseli değer verilmiştir. W1-W2: 3.4 ohm

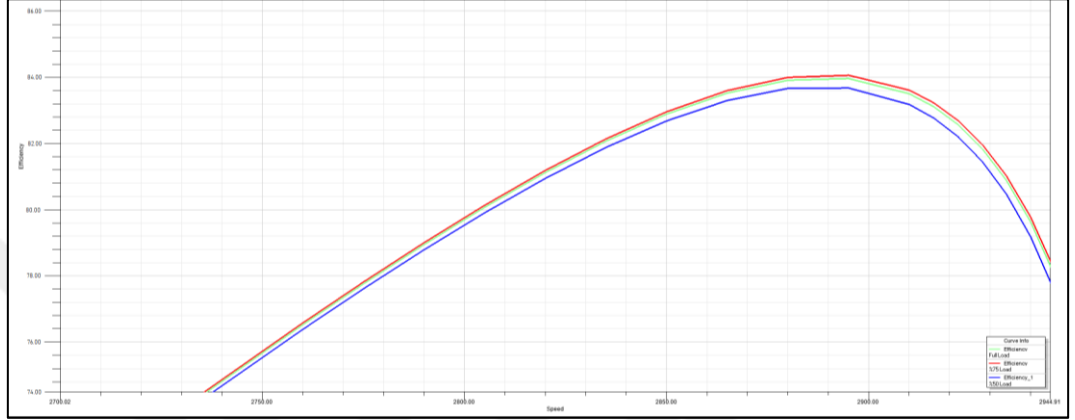


Şekil 4.71. Üçüncü faz: W1 ve W2 arasındaki direnç

Tüm fazlar için okunan direnç değerleri birbirine yakın olmalıdır. Eğer bir fazın direnci diğerlerinden belirgin şekilde düşük veya yüksekse, o fazda bir sorun olabilir (kısa devre, açık devre veya izolasyon arızası gibi).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik motorlarının performans analizleri, verimlilik ve güç faktörü gibi kritik parametrelerin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, kullanılan yazılım ve yapılan sayısal analizler ile motorun katalog değerleri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların doğruluk oranları incelenmiştir.



Şekil 5.1. Hız - verimlilik grafiği

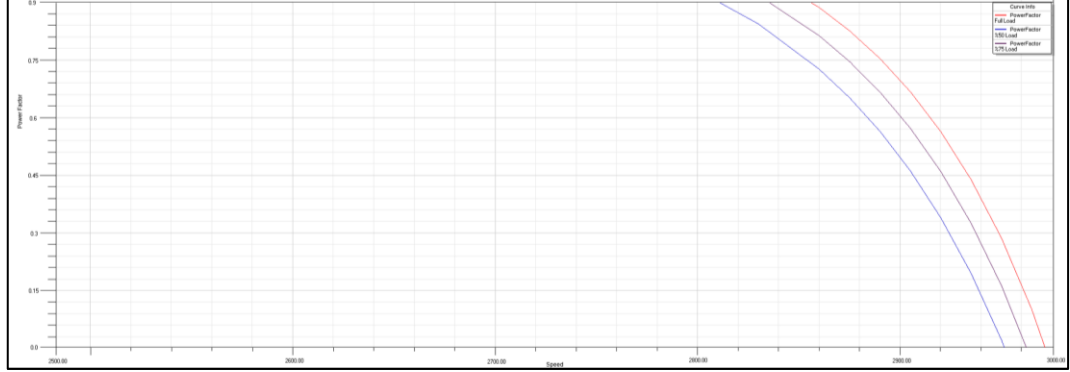
Şekil 5.1'de net olarak görüldüğü gibi, motorun hızı arttıkça verimlilik de artmaktadır. Bu durum, motorun tasarımı ve çalışma prensibi ile doğrudan ilişkilidir.

Grafikte, düşük hızlarda verimliliğin daha düşük olduğu görülür. Bunun nedeni, düşük hızlarda kayıpların (örneğin sürtünme kayıpları) daha yüksek olmasıdır. Düşük hızlarda, akışkanın (örneğin hava veya yağ) motor parçaları üzerinde oluşturduğu sınır tabaka daha kalın olur. Bu daha kalın sınır tabaka, daha fazla viskozite (akışkanın akmaya karşı direnci) anlamına gelir ve dolayısıyla sürtünmeyi artırır.

Grafikte belirli bir hızdan sonra verimlilik artışı yavaşlar ve hatta bazı durumlarda sabit kalabilir veya hafifçe azalabilir. Bu nokta, motorun en verimli çalıştığı hız olarak kabul edilir.

Hız - Verimlilik Grafiği incelendiğinde asenkron motorun tam yükte ki, %75 yükte ki ve %50 yükte ki hız-verimlilik eğrisi verilmiştir. Tam yükte verimliliğin %83.2212 olduğu, %75 yükte verimliliğin %84.1839 olduğu, %50 yükte verimliliğin %83.8992 olduğu verisi elde edilmiştir. Motor'un teknik bilgilerini kontrol ettiğimizde tam yükte verimliliğin %83.9 olduğu, %75 yükte verimliliğin %84.1 olduğu, %50 yükte

verimliliğin %82.6 değerine ulaştığı görülmüştür. Tam yükte %99.19 doğruluk oranı (%0.81 hata), %75 yükte %99.90 doğruluk oranı (%0.10 hata), %50 yükte %98.43 doğruluk oranı (%1.57 hata) elde edilmiştir.



Şekil 5.2. Hız - güç faktörü grafiği

Şekil 5.2'deki grafik incelendiğinde motorun tam yükte ki, %75 yükte ki ve %50 yükte ki hız-güç faktörü eğrisi verilmiştir. Tam yükte güç faktörü 0.845242 olduğu, %75 yükte güç faktörü 0.796174 olduğu, %50 yükte güç faktörü 0.63629 olduğu verisi elde edilmiştir. Motor'un teknik bilgilerini kontrol ettiğimizde tam yükte güç faktörü 0.84 olduğu, %75 yükte güç faktörü 0.77 olduğu, %50 yükte güç faktörü 0.65 değerine ulaştığı görülmüştür. Tam yükte %99.38 doğruluk oranı (%0.62 hata), %75 yükte %96.60 doğruluk oranı (%3.40 hata), %50 yükte %97.89 doğruluk oranı (%2.11 hata) elde edilmiştir.

Output Power	2199.91	W	
Input Power	2643.45	W	
Efficiency	83.2212	%	
Power Factor	0.845242		
Stator Resistance	3.50675	ohm	

Şekil 5.3. Ansys maxwell analiz değerleri

Çıkış gücü (Output Power) incelendiğinde Ansys Maxwell analizi sonucunda 2199.91W değerine ulaşılmıştır. Motor'un teknik bilgilerin de bu değer 2.2kW 'dır. %99.99 Doğruluk oranı elde edilmiştir.

Giriş gücü (Input Power) incelendiğinde Ansys Maxwell analizi sonucunda 2643.45W değerine ulaşılmıştır. Motor'un teknik bilgilerin de bu değere yer verilmemiştir. Bölüm 4.2.3'de yapmış olduğumuz hesaplamalar sonucunda

2611.32W değerine ulaşılmıştır. Ansys Maxwell analizi ve hesaplamalar yapılırken sürtünme ve rüzgar kayıpları göz ardı edilmiştir. %98.76 Doğruluk oranı elde edilmiştir.

Stator Direnci (Stator Resistance) incelendiğinde Ansys Maxwell analizi sonucunda 3.50675 ohm değerine ulaşılmıştır. Motor'un teknik bilgilerin de bu değere yer verilmemiştir. Bölüm 4.5'de yapmış olduğumuz ölçümler sonucunda birinci faz, ikinci faz ve üçüncü fazın ortalama değeri 3.5 ohm değerine ulaşılmıştır. %99.80 Doğruluk oranı elde edilmiştir (Şekil 5.3).

Çizelge 5.1. Analiz sonuçları ve teknik değerler

	Analiz Değerli	Teknik Değerleri
Verimlilik (Tam Yük)	%83.2212	%83.9
Verimlilik (%75 Yük)	%84.1839	%84.1
Verimlilik (%50 Yük)	%83.8992	%82.6
Güç Faktörü (Tam Yük)	0.845242	0.84
Güç Faktörü (%75 Yük)	0.796174	0.77
Güç Faktörü (%50 Yük)	0.63629	0.65
Giriş Gücü	2643.45W	2611.32W
Çıkış Gücü	2199.91W	2200W
Stator Direnci	3.50675 ohm	3.5 ohm

Yapılan analiz sonucunda, Ansys Maxwell analiz değerlerinin ve katalog değerlerinin arasında yüksek bir uyum sağlandığı görülmüştür. Bu değerler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Şekil 5.1'de gösterildiği üzere, analiz sonuçlarına göre tam yükte motorun verimlilik değeri %83.2212 olarak hesaplanmış ve teknik değer olan %83.9 ile karşılaştırıldığında %0.81 hata oranı tespit edilmiştir. %75 yükte %99.90 doğruluk oranı sağlanırken, %50 yükte ise %98.43 doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu farklılıklar, modelleme sürecinde kullanılan malzeme özellikleri, manyetik doygunluk etkileri ve sayısal analiz yöntemlerinin bazı ideal varsayımlar içermesinden kaynaklanabilir. Ayrıca, motorun iç kayıpları, havalandırma koşulları ve sıcaklık değişimlerinin analiz ortamında tam olarak modellenememesi, hata paylarının ortaya çıkmasına neden olabilir.

Şekil 5.2’de gösterildiği gibi, motorun güç faktörü analizlerinde de katalog değerleri ile elde edilen sonuçlar arasında küçük farklar gözlemlenmiştir. Tam yükte güç faktörü 0.845242 olarak hesaplanmış ve katalog değeri olan 0.84 ile %99.38 doğruluk sağlanmıştır. %75 yükte %96.60 doğruluk oranı, %50 yükte ise %97.89 doğruluk oranı elde edilmiştir. Güç faktöründeki hata oranlarının temel sebepleri arasında, motorun manyetik devresinde oluşan harmonikler, rotor kayıpları ve analiz yazılımında kullanılan nüve malzemesinin katalog değerlerinden farklı davranışlar sergileyebilmesi yer almaktadır. Ayrıca, rotor ve stator arasındaki hava aralığındaki belirsizlikler de güç faktörünün küçük sapmalar göstermesine neden olabilir.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada belirli bir motor modeli için kapsamlı bir analiz yapılmış ve güç faktörü ile verimlilik değerleri üzerindeki etkileri detaylı olarak ele alınmıştır. Rotor oluk tipleri ve stator geometrisi üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları literatürde yaygın olarak ele alınmış olsa da, mevcut çalışmada belirli bir motorun katalog değerleri ile birebir uyum sağlayan sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan analiz yöntemi ve doğrulama süreci, motorun çalışma koşullarına dair daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, motorun mevcut tasarımının güç faktörü ve verimlilik açısından yüksek doğrulukla modellendiğini ve katalog değerleri ile örtüştüğünü göstermektedir. Bu bağlamda, çalışmanın sanayi uygulamaları açısından da önemli bir katkı sunduğu söylenebilir. Gelecekteki çalışmalar, farklı yük ve sıcaklık koşullarında motor performansının incelenmesi yönünde genişletilebilir. Ayrıca, farklı rotor ve stator yapılarına sahip motor modelleri için benzer analizlerin yapılması, verimlilik ve güç faktörünün iyileştirilmesine yönelik yeni tasarım optimizasyonları sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Akdemir, B. (2003). *A Fazlı Asenkron Motorların MC3PHAC Mikrodenetleyicisi Kullanılarak Hız Kontrolü*. (Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Bezek, M. Ç. (2009). *Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Asenkron Motor Analizinin MATLAB'da Gerçekleştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Büyük, S. (2018). *Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği Mevzuatının Türkiye Pazarına Etkisinin Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü)
- Coşkun, A. (2019). 3 Fazlı 600 kW gücünde kısa devre kafesli rotorlu asenkron motorun tasarımı: fiziksel boyutlandırılması ve elektriksel hesaplamaları. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 12(3), 1651-1665. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.647472>
- Demir, N., Minaz, M. R., & Kuncan, M. (2021). 3 Fazlı 37 kW'lık asenkron motorlarda rotor oluk uzunluklarının motor verimine etkilerinin araştırılması. *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2(1), 18-28.
- Ferková, Ž., & J. K. (2013). Two-phase asynchronous motor - simulation and measurement. *Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne*, (4), 25-30.
- Gündoğdu, T., & Kömürgöz, G. (2010). Design of Surface Mounted Permanent Magnet Machines. *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*. Aralık 02-05, Bursa, Turkey, 298-302.
- Imawati, İ., Wijaya, F. D., & Sugiyantoro, B. (2019). Design and Simulation of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor in Low Voltage System 48v 50hz 3hp For Electric Golf Cart. *11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*. October 10-11, Pattaya, Thailand, 1-6.
- Noor, S., Hamzah, M. K., & Yunus, P. M. (2013). Three Phase Induction Motor Analysis Using MATLAB/Guide. *IEEE 7th SAME THING International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013)*. June 03-04, Langkawi, Malaysia, 161-166.
- Sözen, F. (2021). *Hafif Elektrikli Araçlar için 3 Fazlı Asenkron Motor Sürücü Sisteminin Tasarımı ve Uygulanması*. (Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Sun, D., & Çıra, F. (2022). Sonlu elemanlar yöntemi ile asenkron motorun PWM arızasının analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 217-228. <https://doi.org/10.46578/humder.1200773>

- Tarımer, İ. (2005). Bilgisayar destekli asenkron motor tasarımı. *Politeknik Dergisi*, 8(1), 19-24.
- Tezcan, M. Y. A. G., Çanakoğlu, A. İ., & Turan, M. (2008). Three Phase Induction Motor Design and FFT Analysis. *Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı*. Kasım 26-30, Bursa, Türkiye, 1-5.
- Zöhra, B., & Akar, M. (2016). MATLAB Grafik Arayüzü Kullanılarak 3 Fazlı Asenkron Motorların Analitik Modellenmesi. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*. October 26-28, Adana, 3652-3659.



ÖZGEÇMİŞ

