



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN EKSENEL AKILI ASENKRON MOTOR
TASARIMI, MEKANİK VE ISIL ANALİZİ**

Mustafa ÖZSOY

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2023

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa ÖZSOY

20/11/2023

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN EKSENEL AKILI ASENKRON MOTOR TASARIMI, MEKANİK VE ISIL ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Mustafa ÖZSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2023

ÖZET

Elektrikli araçların gün geçtikçe yaygınlaşması, bu araçlarda kullanılan elektrik motorlarının da daha verimli olarak tasarlanmasını gerekli hale getirmiştir. Sınırlı hacimde yüksek verimli motor beklentisi, araştırmacıları aksnel akılı motorlara yönlendirmiştir. Bunun başlıca sebebi aksnel akılı motorların radyal akılı alternatiflerine göre daha yüksek tork yoğunluğunda çalışabilmeleridir. Yüksek tork yoğunluğu beklentisi ile akla ilk gelen sabit mıknatıslı motorlar, yapılarındaki mıknatısların nadir dünya elementleri kategorisinde ve neredeyse tekelleşen bir durumda olmalarından dolayı oldukça maliyetli hale gelmiştir. Ayrıca yüksek tork yoğunluğu ile çalıştırmanın sonucunda oluşan termal şartlar mıknatıslar için verimi düşüren bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeplerden dolayı üreticilerin mıknatıssız fakat yüksek tork yoğunluğu ile çalışabilen elektrik motorlarına ilgisi artmıştır. Yapısında mıknatıs bulunması ve oturmuş teknolojisi ile aksnel akılı asenkron motorlar bu beklentilere yanıt verebilir. Yüksek tork yoğunluğu elde etmek amacıyla çift hava aralıklı olarak tasarlanan aksnel akılı asenkron motorlarda verim, sabit mıknatıslı alternatiflerine göre daha düşüktür. Düşük verimin en önemli sebeplerinden birisi yüksek akım yoğunluklarında çalıştırılan çift hava aralıklı aksnel akılı asenkron motorların bakır kayıplarıdır. Bu kayıp oranını azaltmak amacıyla bu tez çalışmasında kısa devre kafesi malzemesi olarak bakır kullanılmıştır. En yüksek verimi elde etmek için aksnel akılı asenkron motorun rotorunda altı farklı oluk geometrisi ilk kez kullanılarak hıza bağlı motor performans grafikleri elde edilmiştir. Belirlenen rotor oluk geometrileri alüminyum kısa devre kafesi ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak en uygun rotor oluk geometrisi seçilmiştir. Belirlenen rotor oluğu optimize edilmiş ve yüksek verimli bir aksnel akılı asenkron motor tasarımı elde edilmiştir. Bu tasarımın üretime hazır prototipinin elde edilmesi amacıyla mekanik ve ısıl analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede referans bir elektrikli araçta kullanımı manyetik, mekanik ve termal olarak doğrulanmış çift statorlu aksnel akılı bir asenkron motor elde edilmiştir. Tasarlanan motorda 50 kW nominal çalışma koşullarında 11, 74 A/mm² akım yoğunluğunda, %94,5 verim elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 90514

Anahtar Kelimeler : Elektrikli araç, aksnel akı, asenkron motor, tasarım, analiz

Sayfa Adedi : 152

Danışman : Doç. Dr. Orhan KAPLAN

İkinci Danışman : Prof. Dr. Mehmet AKAR

AXIAL FLUX INDUCTION MOTOR DESIGN, MECHANICAL AND THERMAL ANALYSIS FOR ELECTRIC VEHICLES

(Ph. D. Thesis)

Mustafa ÖZSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2023

ABSTRACT

The widespread use of electric vehicles has made it necessary to design the electric motors used in these vehicles more efficiently. The expectation of highly efficient motors in limited volume has led researchers to axial flux motors. The main reason for this is that axial flux motors can operate at higher torque density than radial flux alternatives. Permanent magnet motors, which come to mind first with the expectation of high torque density, have become quite costly since the magnets in their structures are in the category of rare earth elements and almost monopolized. In addition, because of operating with high torque density, thermal conditions create an effect that reduces the efficiency of magnets. For these reasons, the interest of manufacturers in electric motors that do not contain magnets but can operate with high torque density has increased. Axial flux induction motors can respond to these expectations with their magnet-free and established technology. The efficiency of axial flux induction motors, which are designed with double air gap to obtain high torque density, is lower than permanent magnet alternatives. One of the most important reasons for low efficiency is the copper losses of double air gap axial flux induction motors operated at high current densities. To reduce this loss rate, copper is used as squirrel cage material in this thesis. To obtain the highest efficiency, speed dependent motor performance graphs were obtained by using six different slot geometries in the rotor of the axial-flux induction motor. The rotor slot geometries are compared with the results obtained with aluminium squirrel cage and the most suitable rotor slot geometry is selected. The rotor slot has been optimised and a high efficiency axial flux induction motor design has been obtained. Mechanical and thermal analyses were carried out to obtain a production ready prototype of this design. In this way, a double stator axial flux induction motor, which has been magnetically, structurally, and thermally verified for use in a electric vehicle, has been obtained. In the designed motor, 94.5% efficiency was achieved at a current density of 11.74 A/mm^2 at 50 kW nominal operating conditions.

Science Code : 90514

Key Words : Electric vehicle, axial flux, induction motor, design, analyses

Page Number : 152

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Orhan KAPLAN

Co-Supervisor : Prof. Dr. Mehmet AKAR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her aşamada bana yardımcı olan, akademik tecrübelerini benimle paylaşan ve rehberlik eden, karşılaştığım her zorlu durumda bana destek olan değerli danışmanlarım Doç. Dr. Orhan KAPLAN ve Prof. Dr. Mehmet AKAR'a, tez izleme süreci boyunca çalışmalarımı yönlendiren ve katkı sağlayan Prof. Dr. Erol KURT'a ve Doç. Dr. Adem DALCALI'ya teşekkür ederim. Tez çalışmalarında yaptığım çalışmalardan tez yazımına kadar her aşamada desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Doç. Dr. Mustafa EKER'e, Arş. Gör. Emre GÖZÜAÇIK'a, Öğr. Gör. Emrah ESER'e, Arş. Gör. Hilal İRGAN'a teşekkür ederim. Tez çalışmalarım boyunca yaptığım analiz ve tasarımlarda bana destek veren kıymetli arkadaşlarım Dr. Sami ARSLAN ve Öğr. Gör. Dr. Yusuf AVŞAR'a teşekkür ederim. Yapısal ve termal analizlerde desteğini esirgemeyen Burak ÖZCAN ve Yasin ÇAPAR'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| TEŞEKKÜR..... | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... | ix |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... | x |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xiv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR | 9 |
| 2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi | 11 |
| 2.2. Elektrikli Araçların Sınıflandırılması | 13 |
| 2.2.1. Bataryalı elektrikli araçlar (BEA) | 16 |
| 2.2.2. Hibrit elektrikli araçlar (HEA) | 18 |
| 2.2.3. Harici olarak şarj edilebilir hibrit elektrik araçlar (PHEA) | 20 |
| 2.2.4. Yakıt hücreli elektrikli araçlar (YHEA) | 21 |
| 2.3. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Türleri | 23 |
| 3. EKSENEL AKILI MOTORLAR VE SINIFLANDIRILMASI..... | 35 |
| 3.1. Eksenel Akılı Motorlar | 35 |
| 3.1.1. Eksenel akılı motorların sınıflandırılması | 36 |
| 3.1.2. Rotor yapısına göre eksenel akılı motorlar..... | 36 |
| 3.1.3. Stator yapısına göre eksenel akılı motorlar | 37 |
| 3.1.4. Rotor ve stator sayısına göre eksenel akılı motorlar | 38 |
| 3.1.5. Eksenel akılı motorların kullanım alanları | 42 |
| 3.2. Eksenel Akılı Asenkron Motorlar | 44 |

| | Sayfa |
|--|--------------|
| 3.2.1. Eksenel akılı asenkron motorların sınıflandırılması..... | 46 |
| 3.2.2. Eksenel akılı asenkron motor uygulamaları | 48 |
| 4. ELEKTRİKLİ ARAÇ MOTORU PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ..... | 51 |
| 4.1. Araç Verileri ve Araç Performans Özellikleri..... | 51 |
| 4.2. Elektrikli Tahrik Motoru Gücünün Belirlenmesi | 51 |
| 4.2.1. İlk hızlanma için gerekli tahrik gücü..... | 53 |
| 4.2.2. Maksimum hızda seyir için gerekli tahrik gücü | 54 |
| 4.2.3. Maksimum hızda seyir için gerekli tahrik gücü | 54 |
| 4.3. Çift Hava Aralıklı Eksenel Akılı Asenkron Motor için Hesaplamalar..... | 55 |
| 5. ÇİFT HAVA ARALIKLI EKSENEL AKILI ASENKRON MOTORLARIN SEY İLE TASARIMI..... | 67 |
| 5.1. Çift Statorlu EAASM tasarımı | 70 |
| 5.2. EAASM Lineer Modeli | 73 |
| 5.3. Rotor Bar Yapısının ve Malzemesinin Motor Performansına Etkisi..... | 77 |
| 6. MOTOR OPTİMİZASYONU VE SEY ANALİZİ SONUÇLARI..... | 91 |
| 6.1. Çok Amaçlı Genetik Algoritma ve Optimizasyon Sonuçları..... | 92 |
| 6.2. EAASM Verim Haritası | 100 |
| 6.3. EAASM Yapısal Analiz Sonuçları..... | 106 |
| 6.4. EAASM Termal Analiz Sonuçları..... | 112 |
| 7. SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 133 |
| KAYNAKLAR | 137 |
| ÖZGEÇMİŞ | 151 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|---|--------------|
| Çizelge 2.1. Sık kullanılan elektrik motorlarının karşılaştırılması | 32 |
| Çizelge 2.2. En iyi motor alternatiflerinin puanlanması | 33 |
| Çizelge 2.3. Endüstrileşmiş EA, PHEA, HEA araç teknoloji özellikleri | 34 |
| Çizelge 3.1. Farklı eksenel akıllı motor topolojilerinin karşılaştırılması..... | 42 |
| Çizelge 4.1. Referans araç verileri | 51 |
| Çizelge 4.2. Kutup sayısına göre boyutlandırma katsayısı (k_D) | 57 |
| Çizelge 4.3. Stator kutup sayısına göre rotor oluk sayıları | 58 |
| Çizelge 4.4. Soğutma tipine göre akım yoğunlukları | 59 |
| Çizelge 5.1. Belirlenen motor parametreleri | 68 |
| Çizelge 5.2. Motor tasarım parametreleri | 73 |
| Çizelge 5.3. Rotor oluk geometrisine bağlı motor performans parametreleri | 85 |
| Çizelge 5.4. Farklı güç seviyeleri için 1,2,3 numaralı oluklardaki kısa devre kafesine bağlı manyetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu | 86 |
| Çizelge 5.5. Farklı güç seviyeleri için 4,5,6 numaralı oluklardaki kısa devre kafesine bağlı manyetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu | 87 |
| Çizelge 6.1. Optimizasyon değişkenleri ve değer aralıkları | 94 |
| Çizelge 6.2. Optimizasyon algoritmasının amaç fonksiyonları ve hesaplama yöntemleri | 95 |
| Çizelge 6.3. Başlangıç tasarımı ve optimizasyon sonrası tasarım ve performans değerleri | 99 |
| Çizelge 6.4. Farklı debilerde motor parçalı üzerindeki sıcaklıkların debiye göre değişimini ifade eden değerler..... | 126 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|--|--------------|
| Şekil 2.1. Yıllara göre elektrikli araç satışı..... | 10 |
| Şekil 2.2. Jedlik Ányos tarafından yapılan ilk deneysel elektrikli araç..... | 12 |
| Şekil 2.3. Elektrik araçların enerjilendirilme biçimine göre sınıflandırılması..... | 14 |
| Şekil 2.4. Elektrikli araçların hibridizasyon derecesine göre sınıflandırılması..... | 15 |
| Şekil 2.5. Elektrikli araçların segmentlerine göre sınıflandırılması..... | 16 |
| Şekil 2.6. Elektrikli araçların sınıflandırılması..... | 16 |
| Şekil 2.7. Bataryalı elektrikli araçların bağlantı yapısı..... | 17 |
| Şekil 2.8. Seri HEA bağlantı yapısı..... | 19 |
| Şekil 2.9. Paralel HEA bağlantı yapısı..... | 19 |
| Şekil 2.10. Paralel-Seri HEA bağlantı yapısı..... | 20 |
| Şekil 2.11. PHEA bağlantı yapısı..... | 21 |
| Şekil 2.12. YHEA bileşenleri..... | 22 |
| Şekil 2.13. EA ve HEA’da kullanılabilecek elektrik motorları..... | 25 |
| Şekil 2.14. EA ve HEV için elektrik motorunun Hız-Tork karakteristiği..... | 26 |
| Şekil 2.15. ASM karakteristiği ve parametrelerin hıza göre değişimi..... | 30 |
| Şekil 2.16. EA’da kullanılan motor tipleri (a) DA motoru. (b) ASM (c) FDAM (d) ARM..... | 31 |
| Şekil 3.1. Eksenel akılı motor ve radyal akılı motor sargı ve nüveleri..... | 35 |
| Şekil 3.2. Eksenel akılı motor ve radyal akılı motor, akım ve akı yolları..... | 36 |
| Şekil 3.3. (a) Sincap Kafesli Rotor, (b) Yüzeye Monte SM Rotor..... | 37 |
| Şekil 3.4. (a) Nüvesiz Stator (b) Oluksuz Stator (c) Oluklu Stator..... | 38 |
| Şekil 3.5. Tek Stator- Tek Rotor EAM..... | 38 |
| Şekil 3.6. (a) Oluksuz (b) Oluklu çift stator içten tek rotorlu..... | 39 |
| Şekil 3.7. (a) Oluksuz (b) Oluklu çift rotor dıştan tek statorlu..... | 40 |
| Şekil 3.8. (a) NS tipinde oluklu TORUS yapı akı dağılımı (b) NS tipinde oluksuz TORUS yapı akı dağılımı (Çift Rotor-Tek Statorlu EADR)..... | 41 |

| Şekil | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 3.9. (a) Çok katmanlı EAM (b) NN Tip için akı yolu (c) NS Tip için akı yolu ... | 41 |
| Şekil 3.10. EA'larda çift rotorlu çekiş motorları | 43 |
| Şekil 3.11. EA'larda Tek hava aralıklı çekiş Motorları | 43 |
| Şekil 3.12. Eksenel akılı ve radyal akılı motor manyetik alan şekilleri..... | 44 |
| Şekil 3.13. EAASM Tek stator – Çift Rotor topolojileri | 45 |
| Şekil 3.14. EAASM Birleşimi & Stator ve Rotor yapısı | 46 |
| Şekil 3.15. Tek Stator- Tek Rotorlu EAASM ve akı yolu | 47 |
| Şekil 3.16. Çift Stator – Tek Rotorlu yapı ve akı yolu | 47 |
| Şekil 3.17. Çift Rotor – Tek Statorlu yapı ve akı yolu | 48 |
| Şekil 3.18. Evans Firmasının geliştirdiği EAASM..... | 49 |
| Şekil 4.1. Eğimli bir yolda bir araç üzerindeki direnç kuvvetleri..... | 52 |
| Şekil 4.2. Çift Rotorlu EAASM Manyetik akı yolları ve Tasarım parametreleri | 61 |
| Şekil 5.1. Çift Statorlu EAASM çeyrek modeli..... | 68 |
| Şekil 5.2. 3B ve 2B lineer modellerin tork-zaman grafiği..... | 75 |
| Şekil 5.3. 48 Stator 54 rotor oluklu EAASM 2B lineer modeli..... | 76 |
| Şekil 5.4. EAASM tasarımlarında kullanılan rotor oluk geometrileri | 76 |
| Şekil 5.5. Oluk 1 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri..... | 79 |
| Şekil 5.6. Oluk 1 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri | 79 |
| Şekil 5.7. Oluk 2 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri..... | 80 |
| Şekil 5.8. Oluk 2 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri | 80 |
| Şekil 5.9. Oluk 3 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri..... | 81 |
| Şekil 5.10. Oluk 3 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri | 81 |
| Şekil 5.11. Oluk 4 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri..... | 82 |
| Şekil 5.12. Oluk 4 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri | 82 |
| Şekil 5.13. Oluk 5 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri..... | 83 |
| Şekil 5.14. Oluk 5 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri | 83 |

| Şekil | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 5.15. Oluk 6 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri..... | 84 |
| Şekil 5.16. Oluk 6 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri | 84 |
| Şekil 5.17. Başlangıç/nominal tork ve akım oranları..... | 88 |
| Şekil 5.18. Stator/rotor çekirdeklerindeki manyetik akı yoğunlukları ve akı yolları (a) Oluk1 (b) Oluk2 (c) oluk3 (d) Oluk4 (e) Oluk5 (f) Oluk6..... | 89 |
| Şekil 6.1. Çok amaçlı genetik algoritma akış diyagramı | 93 |
| Şekil 6.2. Optimizasyonda kullanılan parametreler | 94 |
| Şekil 6.3. Opt1 modeli optimizasyon adımlarında elde edilen veriler..... | 97 |
| Şekil 6.4. Opt1 optimizasyon başarımları süreci..... | 97 |
| Şekil 6.5. Opt2 modeli optimizasyon adımlarında elde edilen veriler..... | 98 |
| Şekil 6.6. Opt2 optimizasyon başarımları süreci..... | 98 |
| Şekil 6.7. Verim Haritası | 101 |
| Şekil 6.8. Çıkış Gücü, hız ve verim ilişkisi..... | 102 |
| Şekil 6.9. Akım, hız ve verim ilişkisi | 103 |
| Şekil 6.10. Tork, hız ve çıkış gücü ilişkisi | 104 |
| Şekil 6.11. Tork, hız ve akım ilişkisi | 104 |
| Şekil 6.12. 180 Nm ile sınırlandırılmış verim haritası..... | 105 |
| Şekil 6.13. 180 Nm ile sınırlandırılmış hıza bağlı güç grafiği..... | 105 |
| Şekil 6.14. Motor gövdesi stres analizi | 107 |
| Şekil 6.15. Motor gövdesi yer değiştirme analizi | 107 |
| Şekil 6.16. Stator nüvelerinden bir tanesi için stres analizi | 108 |
| Şekil 6.17. (a) Stator Nüvelerinden bir tanesi için yer değiştirme analizi sonuçları (b) Deforme olmuş gösterim..... | 109 |
| Şekil 6.18. Kısa devre çubuğu üzerindeki gerilim analizi | 110 |
| Şekil 6.19. (a) Kısa devre çubuğu üzerindeki yer değiştirme analizi sonuçları (b) Deforme olmuş gösterim..... | 110 |
| Şekil 6.20. Motor mili üzerindeki stres analizi | 112 |

| Şekil | Sayfa |
|--|--------------|
| Şekil 6.21. Motor mili üzerindeki yer değiştirme analizi | 112 |
| Şekil 6.22. 50 kW soğutmasız motora ait kesit gösterimi üzerinden sıcaklık dağılımı.. | 117 |
| Şekil 6.23. 50 kW soğutmasız motorda bütün parçalar üzerinde yüzey sıcaklık dağılımı | 118 |
| Şekil 6.24. 75 kW soğutmasız motora ait kesit üzerinde sıcaklık dağılımı | 119 |
| Şekil 6.25. 75 kW soğutmasız motorda gövde ve diğer bileşenlerin yüzey sıcaklık dağılımı..... | 120 |
| Şekil 6.26. 50 kW sıvı soğutma uygulanan motora ait kesit gösterimi üzerinden sıcaklık dağılımı (5 l/dk debi ile) | 121 |
| Şekil 6.27. 50 kW sıvı soğutma uygulanan motorda soğutma sıvısı sıcaklığının girişten çıkışa doğru değişimi (5 l/dk) | 122 |
| Şekil 6.28. 50 kW sıvı soğutma uygulanan motorda gövde ve diğer bileşenlerin yüzey sıcaklık dağılımı (5 l/dk) | 122 |
| Şekil 6.29. 75 kW sıvı soğutma uygulanan motora ait kesit gösterimi üzerinden sıcaklık dağılımı (5 l/dk) | 123 |
| Şekil 6.30. 75 kW sıvı soğutma uygulanan motorda soğutma sıvısı sıcaklığının girişten çıkışa doğru değişimi (5 l/dk) | 124 |
| Şekil 6.31. 75 kW sıvı soğutma uygulanan motorda gövde ve diğer bileşenlerin yüzey sıcaklık dağılımı (5 l/dk) | 124 |
| Şekil 6.32. Soğutucu akışkan debisi ile sargı sıcaklığının değişimi | 127 |
| Şekil 6.33. Soğutucu akışkan debisi ile stator nüvesi sıcaklığının değişimi..... | 128 |
| Şekil 6.34. Soğutucu akışkan debisi ile rotor nüvesi sıcaklığının değişimi..... | 128 |
| Şekil 6.35. Soğutucu akışkan debisi ile motor mili sıcaklığının değişimi | 129 |
| Şekil 6.36. Soğutucu akışkan debisi ile kısa devre kafesi sıcaklığının değişimi | 130 |
| Şekil 6.37. 50 kW motor için soğutucu akışkan debisi ile sıcaklıkların değişimi | 130 |
| Şekil 6.38. 75 kW motor için soğutucu akışkan debisi ile sıcaklıkların | 131 |
| Şekil 6.39. Çift statorlu EAASM nihai tasarım 3B görünümü (a) İzometrik tam görünümü (b) İzometrik kesit çıkarılmış görünümü | 131 |
| Şekil 6.40. Çift statorlu EAASM nihai tasarımının patlatılmış görünümü..... | 132 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler | Açıklamalar |
|------------------|--|
| A | Isı veren yüzeyin alanı |
| a | İvme |
| A_c | Dairesel kesitin alanı |
| A_f | Ön kesit alanı |
| A_m | Metre başına akım değeri |
| a_p | Paralel akım yolu sayısı |
| A_r | Lineer model dikdörtgen alanı |
| A_{rms} | RMS akımı |
| A_{vf} | Araç ön alanı |
| a_w | Paralel iletken sayısı |
| B_{mg} | Hava aralığı maksimum akı yoğunluğu |
| B_{ort} | Hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğu |
| B_{1tmax} | Stator en dar bölgede manyetik akı yoğunluğu |
| \hat{B}_δ | Hava aralığı akısının genliği |
| C | Ağırlık merkezi |
| c | Özgül ısı kapasitesi |
| C_d | Aerodinamik sürtünme katsayısı |
| c_{1min} | En dar dış genişliği |
| $\cos\phi$ | Güç faktörü |
| dev | Devir |
| $D_{dış}$ | Dış çap |
| $D_{iç}$ | İç çap |

Simgeler**Açıklamalar**

| | |
|-----------|---|
| D_m | Tekerlek çapı |
| e | Emisivite |
| F_{ar} | Aerodinamik sürüklenme kuvveti |
| F_d | Tahrik kuvveti |
| f_f | Dolgu faktörü |
| F_{hr} | Tırmanma direnci kuvveti |
| f_{rc} | Yuvarlanma direnci katsayısı |
| F_{rr} | Yuvarlanma direnci kuvveti |
| g | Yerçekimi ivmesi |
| J | Akım yoğunluğu |
| k | Isıl iletkenlik |
| k_D | Boyutlandırma katsayısı |
| k_{w1} | Sargı faktörü |
| m | Araç kütlesi |
| m_1 | Faz sayısı |
| N_c | Bir bobindeki iletken sayısı |
| N_1 | Bir faz için sarım sayısı |
| N_{rpm} | Dakikadaki devir sayısı olarak motor hızı |
| n_s | Senkron hız |
| P_d | Tahrik gücü |
| P_m | Motor gücü |
| P_{max} | Maksimum güç |
| Q_r | Rotor oluk sayısı |
| rpm | Devir dakika |
| R_a | Aktif yarıçap değeri |
| S_g | Güvenlik katsayısı |
| T | Sıcaklık |

Simgeler**Açıklamalar**

| | |
|---------------|-----------------------------|
| T_a | Ortam sıcaklığı |
| T_s | Yüzey sıcaklığı |
| t_{1max} | Maksimum oluk genişliği |
| t_{1min} | Minimum oluk genişliği |
| V_{ilk} | İlk hız |
| V_h | Hat gerilimi |
| V_{kmh} | Saatte km olarak araç hızı |
| V_{max} | En yüksek hız |
| V_{rms} | RMS gerilimi |
| V_{son} | Son hız |
| V_w | Karşı rüzgar hızı |
| V_1 | Faz gerilimi |
| z_1 | Stator oluk sayısı |
| α_i | Hava aralığındaki akı oranı |
| ω_s | Açısal hız |
| Δt | Geçen süre |
| ρ | Hava yoğunluğu |
| q | Isı akısı |
| $\vec{\psi}$ | Isı akısı vektörü |
| ω | Isı kaynağı yoğunluğu |
| ζ | Isıl yayılım |
| ϕ_p | Kutup başına akı yoğunluğu |
| θ | Mekanik açı |
| σ | Stephan-Boltzmann sabiti |
| η | Verim |
| α | Yol açısı |
| ε | Zıt emk faz gerilimi oranı |

Simgeler**Açıklamalar**

°C

Santigrat derece

2P

Kutup sayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

2B

İki boyut

3B

Üç boyut

AA

Alternatif akım

ARM

Anahtarlamalı relüktans motoru

ASM

Asenkron motor

AYK

Alan yönlendirmeli kontrol

BEA

Bataryalı elektrikli araç

ÇAGO

Çok amaçlı genetik algoritma

ÇAOP

Çok amaçlı optimizasyon problemi

DA

Doğru akım

DTK

Direkt tork kontrolü

EA

Elektrikli araç

EAASM

Eksenel akılı asenkron motor

FDAM

Fırçalı doğru akım motor

GA

Genetik algoritma

HEA

Hibrit elektrikli araç

İYM

İçten yanmalı motor

PHEA

Harici olarak şarj edilebilir araç

PWM

Dalga genişlik modülasyonu

SEY

Sonlu elemanlar yöntemi

SM

Sabit mıknatıs

SMDA

Sabit mıknatıslı doğru akım motorlar

SMSM

Sabit mıknatıslı senkron motor

YHEA

Yakıt hücreli elektrikli araç

1. GİRİŞ

Günümüzde çevre kirliliğinin ve küresel ısınmanın başlıca sebeplerinden olan karbon salınımının artması elektrik enerjisi üretimi, verimli kullanımı ve planlanmasında temiz enerji kullanımının önemini ortaya çıkarmıştır [1]. Bu doğrultuda yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimi ve enerji ihtiyacının karbon salınımı olmayan kaynaklardan sağlanması yönünde çalışmalar artarak devam etmektedir. Bununla beraber mevcut enerji tüketimi ekosisteminde kullanılan bileşenlerin verimli kullanımı da önem arz etmektedir. Çünkü enerjinin üretilmesi kadar verimli tüketilmesi de temiz enerji açısından önemlidir. Bu sebeple karbon salınımı yüksek içten yanmalı motorlu (İYM) araçlar sıfır emisyon amacıyla yerini elektrikli araçlara (EA) bırakmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) verilerine göre Temmuz 2023 yılında trafiğe kayıtlı 213076 adet elektrikli ve hibrit araç bulunmaktadır [2]. TUİK tarafından yayınlanan rapora göre hibrit ve elektrikli araç sayısının toplam araç sayısına oranı %1,4'tür. Elektrikli araçlara artan talep ile bu oranın her geçen gün arttığı ve gelecekte de artmaya devam edeceği öngörülmektedir. Avrupa Birliği'nin ulaştırma politikası, iklim değişikliğiyle mücadele ve hava kirliliğini azaltma hedeflerine paralel olarak, elektrikli araçların yaygınlaştırılmasını teşvik etmektedir. Bu doğrultuda, Avrupa Birliği 2030 yılına kadar genel araç satış pazarındaki elektrikli araç satışlarının %60 seviyesine ulaşmasını hedeflemektedir [3]. Dikkat çekici bir konumda bulunan EA pazarında bu araçların çekiş motorları da bu hedeflere uygun olarak geliştirilmek durumundadır.

Dünya genelinde elektriğin %53'ü elektrikli motor sistemlerinde (12100 TWh) kullanılmakta ve bu da 6 Gton karbondioksit emisyonuna karşılık gelmektedir [4]. Uluslararası enerji ajansına göre 2030'a kadar küresel elektrik enerjisi talebinin daha fazla elektrik motoru, elektrikli araç talebi gibi sebeplere bağlı olarak %25-30 oranında artması beklenmektedir [5]. Endüstriyel enerji tüketiminde ise elektrik motorlarının özellikle de sağlam, oturmuş teknolojisi, zorlu şartlarda çalışmaya uygunluğu gibi özelliklerinden dolayı asenkron motorların payı büyüktür [6]. Asenkron motorlar (ASM) bahsedilen avantajlarının yanında özellikle verim açısından dezavantajlı durumdadırlar [7]. ASM'lerin daha verimli hale getirmelerine yönelik çalışmalar bu nedenle önem arz etmektedir. Radyal akılı asenkron motorların bu dezavantajına verim ve güç yoğunluğu açısından daha avantajlı olan Eksenel Akılı Asenkron Motorlar (EAASM) alternatif olmaktadır [8].

Elektrikli araç kullanımının gitgide yaygınlaştığı ve devletler tarafından teşvik edildiği göz önünde bulundurulduğunda başlıca otomobil üreticilerinden olan markaların yakın ve orta vade üretim planlamalarında İYM araç üretimini tamamen bitirip EA üretimine geçeceklerini açıklamalarıyla EA'lara yönelik elektrik motoru tasarımı ve üretimi daha da önem kazanmıştır. Kullanılan motorlarda mıknatıs bulunması ve mıknatıs kaynaklarının kısıtlı olması sebebiyle mıknatıs içermeyen yüksek verimli motorların tasarımı ön plana çıkmaktadır [9, 10].

Eksenel akıllı motorların en büyük dezavantajlarından birisi stator ve rotor arasındaki dengesiz çekim kuvvetidir [11]. Dengesiz çekim kuvvetinin sebep olduğu bu problemin üstesinden gelmenin en basit çözümü, çift hava aralıklı topolojiler tercih edilmesidir [12]. Çünkü çift hava aralıklı topolojilerde bir tarafın sebep olduğu eksenel çekim kuvveti, diğer taraftan aynı oranda fakat ters yönde uygulanarak sıfır net kuvvet elde edilmektedir. Çift hava aralıklı topolojiler bir diğer avantajı ise düşük hacimde daha yüksek güç yoğunluğu elde edilebilmesidir[8]. Yüksek güç yoğunluğu elde etmek EA gibi alan ve ağırlık kısıtı olan uygulamalarda talep edilen bir özelliktir. Yüksek güç yoğunluğu elde etmenin bir yolu da EAASM'yi yüksek akım yoğunluğunda çalıştırmaktır. Yüksek akım yoğunluğunda çalışma durumunda ise elektrik motorunun konvansiyonel soğutma yöntemleri yeterli olmaz [13]. Motorun çalıştırıldığı akım yoğunluğuna bağlı olarak cebri soğutma gereklidir. Çift hava aralıklı topolojiler kendi içerisinde ele alındığında çift statorlu topolojiler özellikle soğutma gömleği uygulandığı durumda tasarım avantajı sağlamaktadır [14].

Eksenel akıllı motorlar içten dışa doğru genişleyen çaplarından dolayı üç boyutlu olarak ele alınması gereken yapıdadırlar [15]. Üretim öncesinde tasarımcıların simülasyon aşamasında birbiri ile çelişkili iki hedefleri vardır. Bunlardan ilki yüksek doğruluk, ikincisi ise kısa simülasyon süresidir [16]. Bu hedefler arasındaki öncelik tasarımın hangi aşamasında olduğuna göre değişir. Başlangıçta hızlı sonuçlar elde etmek önemliyken, nihai tasarımın belirlenmesinde yüksek doğruluk daha önemli bir hedef haline gelmektedir. Yapıları gereği üç boyutlu problemler olan EAASM'lerin 2B olarak modellenebilmesi, tasarımın ilk aşamalarındaki hızlı sonuç beklentisini karşılayacaktır [17]. EAASM'lerin lineer motor olarak modellenmesi literatürde tercih edilen bir yöntemdir [18, 19]. Özellikle değişken hızlı uygulamalarda çok fazla değişkenin uygulandığı ilk tasarım aşamasında EAASM'yi lineer modeli ile değerlendirmek tasarımcılara büyük avantaj sağlamaktadır [20]. 2B olarak

modellenen EAASM'nin ise nihai modelinin elde edilebilmesi için 3B modeli ile doğrulanması tasarımın son aşamasını oluşturur [21, 22].

EAASM rotor oluk geometrisinin ve sincap kafes malzemesinin motor performansı üzerindeki etkisi oldukça yüksektir [23]. Elektrikli araçlar gibi değişken hızlı uygulamalarda yüksek verim ve düşük tork dalgalanması başlıca tasarım hedefleri arasındadır. Eksenel akıllı motorlarda motor ortalama çap değeri yüksek olduğu için özellikle yüksek güçlerde balans problemleri yaşanmaktadır [11]. Balans probleminin nedeni olan dengesiz eksenel kuvvet çift hava aralığı topolojileri ile minimize edilebilmektedir [12]. Ayrıca elektrikli araç motorlarında dikkat edilmesi gereken verimlilik, yüksek tork yoğunluğu, geniş sabit güç bölgesi, hata toleransı ve maliyet gibi parametreler çift hava aralıklı motorlar ile sağlanabilmektedir [24, 25]. Çift statorlu topolojide statorlar ve rotor üzerindeki manyetik akı dağılımına bağlı olarak rotor nüvesi boyunduruksuz olarak da tasarlanabilmektedir [26]. Rotor oluklarındaki kısa devre kafesi malzemesi olarak bakır kullanılması ise boyunduruksuz olarak daha kompakt hale getirilen çift statorlu EAASM'nin daha verimli çalışmasına olanak sağlar [27].

Radyal akıllı alternatiflerine kıyasla aynı hacimde daha yüksek tork yoğunluğu elde edilebilen eksenel akıllı motorlar, yapıları gereği üç boyutlu problemlerdir. Üç boyutlu modeller ile yapılan analizlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) analiz süresi ve işlemci yükü oldukça fazladır [28]. Eksenel akıllı motorların analiz süresini kısaltmak için kullanılan iki boyutlu modeller, üç boyutlu modellere göre daha az hesaplama gerektirdiğinden, analiz süresini önemli ölçüde azaltabilir. Bu, özellikle optimizasyon gibi karmaşık hesaplama gerektiren uygulamalar için faydalıdır [29]. Bakır kısa devre kafesi ve boyunduruksuz nüve ile belirlenen rotor oluk geometrisi, başlıca tasarım hedefi olan yüksek verimi elde etmek için optimize edilmelidir [30]. Optimizasyon problemlerinin çoğu, gerçek dünya uygulamalarında optimize edilmesi gereken birden fazla amaç içerir. Gerçek hayat problemlerinin çoğunda amaçlar genellikle çelişkilidir. Tek bir çözüm her iki amaç fonksiyonunu da tatmin etmeyecek ve bir amacın optimal çözümü problemin diğer amacı için en iyi çözüm olmayacaktır. Bu nedenle, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde tüm amaçlar için en uygun çözümleri temsil edecek bir çözüm kümesi gereklidir. Tasarlanan EAASM'de belirlenen güç seviyesinde, hedeflenen verim ile motor çalışabilmelidir. Motor tasarımı bu açıdan değerlendirildiğinde rotor oluk geometrisinin optimizasyonunda çok amaçlı genetik algoritma kullanmak uygun olacaktır [31].

Elektrikli araçlar için gerekli hız/tork veya hız/güç kombinasyonunda tork ve güç belirleyici faktörlerdir. Bu nedenle elektrikli araçlarda kullanılacak motorun verim haritasının detaylı olarak bilinmesi gerekmektedir [32]. Asenkron motorlar senkron motorların aksine yük seviyesine bağlı olarak hızı değişen motorlardır. Fakat yüke bağlı olarak değişen hız değerleri her durumda en verimli çalışmayı ifade etmez [33]. Başka bir deyişle asenkron motorlarda maksimum verim her bir çalışma frekansında belirli bir noktada elde edilebilir. Oysa elektrikli araçlar gibi değişken hızlı uygulamalarda her hız seviyesinde maksimum verimde çalışma gerekli tasarım parametrelerinden biridir. Çünkü bataryalar gibi sınırlı enerji kaynakları ile enerjilendirilen elektrik motorlarında düşük verimli motorlar aynı batarya kapasitesinde daha düşük menzil anlamına gelmektedir. Menzil artırımı için ise batarya kapasitesi artırımına gidildiğinde araç ağırlığı artacağı için bir nevi kısır döngü oluşmaktadır. Motor performansının değerlendirilmesi açısından verim haritası ile akım, gerilim, güç faktörü gibi motor performansının belirleyici parametreleri hıza bağlı olarak ele alınmalıdır.

EAASM yapısal analizleri elektrikli araçlar gibi uygulamalarda önem arz etmektedir [34]. Elektrik motorunun manyetik analizlerinin başarı ile tamamlanmasının ardından yapısal olarak doğrulanması gerekir [35]. Elektrik motorunun düzgün bir şekilde araca montajlanabilmesi için buna uygun şekilde gövde ve kapak tasarımı yapmak elzemdir. EAASM rotorunda üretilen dönme hareketinin bir mil üzerinden aktarılması gövdeden ziyade rulmanlarla ilgili bir aşamadır. Bu sebeple rulmanların eş eksenli ve düzgün yataklanması önemlidir. Genel olarak elektrik motorlarının tamamında önemli bir durum olan eş eksenleme süreci eksenel akılı motorlarda ayrıca dikkat edilmesi gereken bir konudur [36]. Rotor ve stator arasındaki manyetik çekim kuvveti kuvvet kolunun uzun olduğu eksenel akılı motorlarda balans problemlerine yol açabilir [37]. Çift statorlu tasarımlarda ise stator ve rotorun ortasında konumlandırılan rotor üzerindeki net çekim kuvveti sıfırdır [38]. Bu yönüyle çift statorlu topolojiler avantajlı konumdadır.

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Bu dönüşüm sırasında, motorun sargılarında, rotorunda ve diğer bileşenlerinde ısı üretilir [39]. Bu ısı, motorun verimliliğini ve çalışma ömrünü olumsuz yönde etkiler [40]. Termal analiz, elektrik motorunun ısıl davranışını gözlemlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile motor bileşenleri üzerindeki sıcaklık dağılımları hesaplanabilir [41]. Termal analiz, elektrik motoru tasarımının önemli bir parçasıdır. Termal analiz ile farklı yük ve çalışma koşullarında

motorun aşırı ısınmasını önlemek için gerekli soğutma sistemi test edilebilir [42]. Özellikle bu tez çalışmasındaki gibi yüksek akım yoğunluğunda çalışan motorlarda cebri soğutma gereklidir. Soğutma yöntemine uygun olarak motorun manyetik ve yapısal tasarımına uygun bir soğutma gömleği tasarıma eklenerek test edilmelidir.

Problem tanımı

Eksenel akıllı motorların geliştirilmesinde radyal akıllı motorlara nispeten daha geride kalınmasının başlıca nedeni geometrik yapılarından kaynaklanan imalat zorluklarıdır [43]. Gelişen üretim ve malzeme teknolojisi ile bu problemlerin üstesinden gelinebilmektedir [11]. Üretim yöntemlerindeki gelişmeler ile eksenel akıllı motorlar tekrar ilgi odağı haline gelmiştir. Elektrikli araçlar gibi gündün güne yaygınlaşan bir endüstride verim, menzil ve dayanıklılık gibi arayışlara eksenel akıllı motorlar başlıca alternatiflerden biridir. Elektrikli araç motorlarındaki en güçlü adaylar arasında yer alan sabit mıknatıslı motorlar, gitgide yaygınlaşan ve seri üretim olarak planlanan elektrik motorlarındaki mıknatıs kullanımı maliyet açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Üstelik mıknatıslı motorlarda özellikle yüksek devirlerde yapısal bütünlüğü korumak için önlemler almak gerekirken, asenkron motorlarda mıknatıs olmadığı için yapısal bütünlük açısından bir önlem almaya da gerek yoktur. Sabit mıknatıslı motorların yüksek akım yoğunluğunda çalıştırılmasının bir sonucu olarak mıknatısların aşırı ısınmaya maruz kalması kaçınılmazdır. Bu ısınma da sabit mıknatıslı motorlarda mıknatısların manyetik özelliklerinde bozulmalara sebep olacaktır. Bu sebeplerden dolayı mıknatıs kullanılmayan ve yüksek verimliliğe sahip olması istenen eksenel akıllı asenkron motorların, verimliliklerini artırmak amacıyla yeniden tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Tezin amacı

Elektrik motorları, elektrikli araç bileşenleri arasında en çok tüketime sebep olan bileşendir. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrikli motorları maliyet, verim ve modülerlik açısından sürekli artan beklentilere cevap vermek durumundadır. Düşük maliyet arayışı motor üreticilerini sabit mıknatıs kullanımından uzaklaştırmıştır. Bu sebeple mıknatıs içermeyen alternatifler arasında oturmuş teknolojisi, bilgi birikiminin yoğunluğu ile asenkron motorlar ön plana çıkmıştır. Verim açısından dezavantajlı olması sebebiyle asenkron motorların eksenel akıllı olarak kullanılması bu dezavantajı görece ortadan kaldırmaktadır. Çünkü

eksenel akılı motorlarda sargı sonu kayıpları radyal akılı motorlara göre daha düşüktür. Fakat motor geometrisindeki bu değişiklik %90 ve üzerinde verim değerleri ile çalıştırılan elektrikli araç motorlarındaki beklentiye karşılammamaktadır [44]. Bu verim seviyelerine EAASM ile çıkabilmek için rotor kısa devre çubuklarında alüminyum yerine bakır kullanılması gereklidir. EAASM'nin çift stator ile tasarlanması ile motor güç yoğunluğu artırılmıştır. Çift statorlu bakır kısa devresi ile tasarlanan EAASM 50kW nominal 75 kW maksimum güç seviyesinde çalıştırılarak tasarımın uygunluğu manyetik analizlerle ortaya koyulmuştur. Yüksek güç yoğunluğu ile çalışmanın getirdiği statik ve termal yüklerin etkisi bu analizlerde ortaya çıkmıştır. Bu yükleri karşılayacak yataklama ve soğutma üç boyutlu olarak tasarlanıp manyetik modele eklenmiştir. Manyetik modele eklenen motor bileşenlerinin maksimum yük altındaki davranışı statik analizler ile ortaya koyulmuştur. Gövde ve kapaklar yapılan analizlerle test edilmiştir. Bu işlemler çalışmanın mekanik analiz bölümünü oluşturmaktadır. Sargılarda ve diğer motor bileşenlerindeki ısınma ise EAASM'nin sağına ve soluna eklenen soğutma gömleklerinin içerisinde soğutma sıvısı geçirilerek farklı yüklerde test edilmiştir. Soğutma işleminin gerekliliği için EAASM'nin soğutmasız durumdaki ısınması sunulmuştur. Soğutma kanallarından farklı debilerde geçirilen soğutma sıvısı ile termal analizler tekrar edilmiştir. Değişen soğutma koşullarına göre hem motor bileşenlerindeki sıcaklıklar hem de soğutma sıvısındaki değişim takip edilmiştir. Bu işlemler çalışmanın ısıl analiz bölümünü oluşturmaktadır. Analiz sonuçlarına göre elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tasarlanan EAASM'nin manyetik, yapısal ve termal açıdan beklenen performansı sağlayabildiği gösterilmiştir. Sonuç olarak bu tez çalışmasının amacı, EAASM'lerin verimliliğini artırarak elektrikli araçlar gibi sektörlerde daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktır.

Tezin katkıları

Bu tez çalışmasının ana katkıları aşağıda özetlenmiştir:

- Referans bir elektrikli araca gerekli olan motor gücü EAASM için hesaplanmıştır.
- Belirlenen motor gücüne göre farklı stator oluk sayısı ve kutup sayısına sahip çift hava aralıklı EAASM'lerin performansları SEY modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda, üç farklı kutup sayısı (6, 8 ve 10) ve üç farklı stator oluk sayısı (36, 48 ve 60) dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre elektrikli araçlarda kullanıma en uygun kutup ve oluk sayısı belirlenmiştir.

- Literatürde ilk kez rotor kısa devre kafesi malzemesi ve rotor oluk geometrisinin EAASM performansı üzerindeki etkisi birlikte ele alınarak analiz edilmiştir. 6 farklı oluk geometrisi arasından en iyi performansın elde edildiği oluk geometrisi optimize edilmek için belirlenmiştir.
- Belirlenen rotor oluk geometrisi çok amaçlı genetik algoritma ile optimize edilerek motor verimi nominal çalışma bölgesinde %94,5 olarak elde edilmiştir. Bu sayede EAASM'nin elektrikli araçlarda kullanılabilecek yüksek verimde bir motor olduğu ortaya koyulmuştur.
- Optimize edilen motorun farklı hızlardaki performansının gözlenebilmesi için verim haritası çıkarılmıştır.
- Çift statorlu EAASM'nin gövde, kapak ve mil tasarımı özgün olarak tasarlanmış ve yapısal analizler ile doğrulanmıştır.
- Manyetik ve yapısal analizler ile doğrulanan motor, yük altında aşırı ısınmasını önlemek için yapılan soğutma termal açıdan ele alınmıştır.
- Farklı soğutma sıvısı debisi ile termal analizlerin tekrarlanıp, soğutma performansının değerlendirilmiştir.

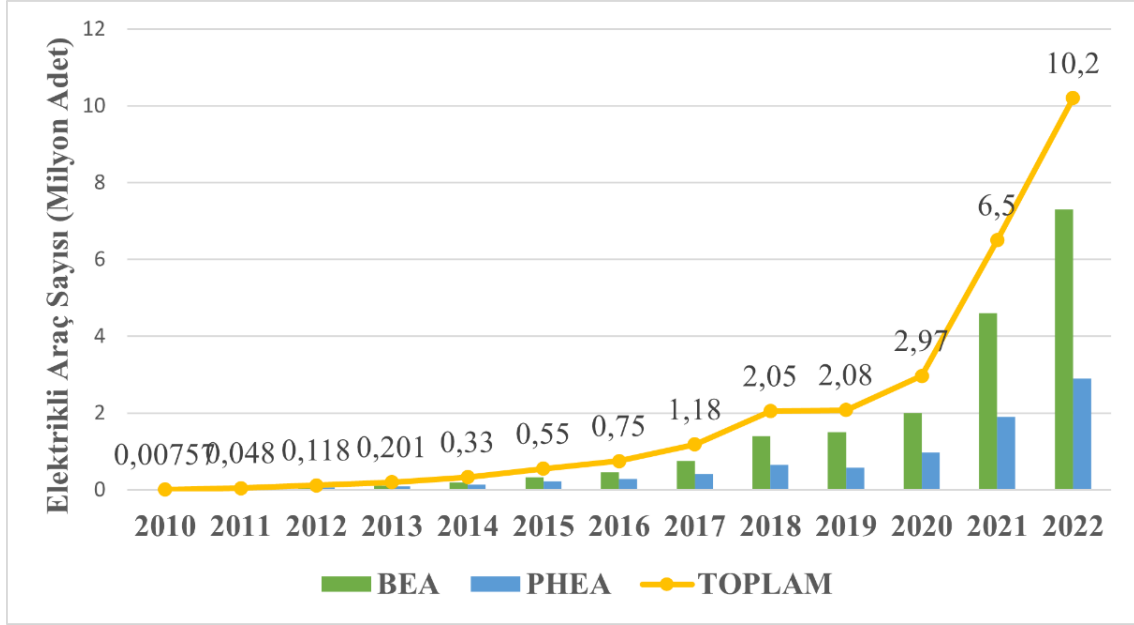
Özet olarak bu tez çalışmasında referans bir elektrikli araç için çıkış gücü hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre sürekli ve maksimum güç seviyeleri belirlenmiştir. EAASM için topoloji ve kutup/oluk sayısı SEY ile ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak yapılan analizlere göre belirlenmiştir. Topoloji ve kutup/oluk sayısı belirlenen motor 2B lineer motor olarak modellenmiş ve analiz sonuçları 3B modelin sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Çift statorlu EAASM için farklı rotor oluk geometrileri ve kısa devre kafesi malzemeleri ile motor performansları karşılaştırılmış ve en uygun rotor oluk geometrisi bakır kısa devre kafesi ile uygulanmıştır. Seçilen oluk geometrisi optimize edilerek motor verimi yükseltilmiştir. Optimize edilen motor 3B analizler ile doğrulanmış ve verim haritası çıkarılarak farklı hızlardaki davranışı ortaya koyulmuştur. Çift statorlu topolojiye uygun olarak gövde, kapak ve mil tasarlanmış ve yapısal analizler ile EAASM'nin maksimum yük altındaki yapısal dayanımı ispatlanmıştır. Yük altında aşırı ısınmaya maruz kalan sargı, nüve, kısa devre kafesi gibi motor bileşenlerinin cebri soğutmada uygulanan soğutma yöntemine göre soğutma miktarları termal analizler ile ortaya koyulmuştur. Bu işlemler sonrasında elde edilen prototip olarak üretilmeye hazır tasarım elektrikli araçlarda kullanılmak üzere sonuçlandırılmıştır.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde genel bir giriş yapılarak problem tanımı, önerilen yöntemin katkısı, çalışmanın amacı literatür üzerinden açıklanmıştır. İkinci bölümde elektrikli araçlara genel bir giriş yapılmış ve elektrikli araçların sınıflandırılması, tarihçesine ve kullanılan motor türlerine dair bilgiler verilmiştir. Bu tezin üçüncü bölümünde eksenel akılı motorlara yer verilmiştir. Eksenel akılı motorların radyal akılı motorlara göre farklılıkları, manyetik akı yolunun izlediği yol üzerinden anlatılmıştır. Ayrıca eksenel akılı motorların sınıflandırmasına dair bilgiler bu bölümde verilmiştir. Bu sayede çift statorlu EAASM'nin elektrik motorları ailesindeki yeri net olarak belirlenmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tasarlanan çift statorlu EAASM'nin gücünü belirlemek tasarımın ilk adımudur. Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tasarlanan EAASM'nin güç hesaplamaları dördüncü bölümde ifade edilmiştir. Çift hava aralıklı EAASM'nin SEY ile tasarımı beşinci bölümde incelenmiştir. Bu bölümde motor eşdeğer modeli ortaya koyulmuştur. Yine rotor oluk geometrisinin ve rotor kısa devre kafesi malzemesinin motor performansına etkisi de bu bölümde incelenmiştir. Altıncı bölümde motor optimizasyonu, optimizasyon algoritması kullanılarak ve gerekli giriş çıkış parametreleri üzerinden anlatılmıştır. Optimize edilen motorun verim analizi, yapısal ve termal değerlendirmesi de bu bölümde sunulmuştur. Yedinci bölümde sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Hava kirliliği, küresel ısınma ve petrol kaynaklarının azalması, 21. yüzyılda otomotiv endüstrisinin karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan bazılarıdır. Bu sorunlara yanıt olarak, otomotiv üreticileri elektrikli araçlara (EA'lara) yönelmektedir [45]. EA'lar, İYM yerine elektrik motorları ile çalışan araçlardır. Elektrik motorları, yakıt ve gaz karışımı yakmak yerine, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürler. Bu nedenle, EA'lar atmosfere zararlı gaz emisyonları üretmez [46]. EA'lar, geleneksel araçlara kıyasla birçok avantaja sahiptir. Daha sessiz çalışırlar, daha az bakım gerektirirler ve daha yüksek verimliliğe sahiptirler. Ayrıca, EA'lar daha düşük yakıt maliyetlerine sahiptir ve daha çevre dostudur [47]. EA'ların yaygınlaşması, otomotiv endüstrisinde devrim yaratacak bir potansiyele sahiptir. EA'lar, hava kirliliğini azaltmaya, küresel ısınmayı önlemeye ve petrol bağımlılığını azaltmaya yardımcı olabilir [48]. Tüm bu avantajlarına rağmen EA'ların yaygınlaşması önünde bazı zorluklar da vardır. Örneğin, EA'ların bataryaları oldukça pahalıdır ve şarj süreleri geleneksel araçlardan daha uzundur. Ancak, bu sorunlar modern teknoloji ile üstesinden gelinebilecek sorunlardır. Örneğin, batarya teknolojisi hızla gelişerek şarj sürelerini kısaltırken yüksek verimli elektrik motorları tasarlanarak kısıtlı enerji kaynakları daha uzun menziller ile kullanılabilir [49]. Sonuç olarak, EA'lar, 21. yüzyılın otomotiv endüstrisinde günden güne daha önemli bir rol oynayacaktır. Bu sebeple EA'ların yaygınlaşması, sürdürülebilir bir ulaşım geleceğine önemli bir katkıda bulunmaktadır.

Elektrikli araçların varlığının farklı yönlerini anlamak, ulaşım altyapısı planlamacıları, politika yapıcılar ve karar vericiler açısından, bu teknolojinin potansiyellerini ve sınırlamalarını değerlendirmek adına gereklidir. Elektrikli ve hibrit araçlar, hükümetler, çevreci örgütler ve ilgili sektörler tarafından artan talepler nedeniyle, günümüzde giderek daha önemli bir hale gelmektedir. Şekil 2.1'de 2010-2022 yılları arasındaki dünya genelindeki yıllık elektrikli araç satışlarına ilişkin bilgiler verilmektedir [50]. Şekil 2.1'de BEA bataryalı elektrikli araçları, PHEA harici olarak şarj edilebilir hibrit elektrikli araçları ifade etmektedir.



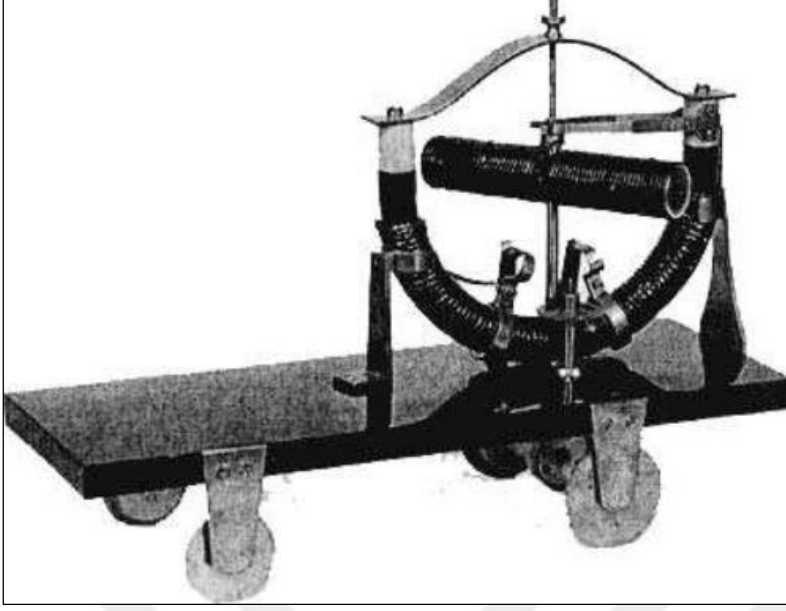
Şekil 2.1. Yıllara göre elektrikli araç satışı [50]

EA piyasasında Çin, elektrikli araçların benimsenmesinde başı çekerken, onu Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri takip etmektedir; Hindistan'ın dünya çapındaki elektrikli araç stoku ise 2018 yılında sadece beş milyondur [51]. Hafif elektrikli araçlar, elektrikli araç endüstrisinin en hızlı genişleyen kategorilerinden biridir. Hafif EA'ların çoğunluğu elektrikli iki tekerlekli araçlardır ve bu kategoride bunu elektrikli üç tekerlekli araçlar takip etmektedir. Elektrikli iki tekerlekli ve üç tekerlekli araçlar, hava kirliliğinin kalıcı bir sorun olduğu ve hızlı kentleşmeyle birlikte daha da artacağı tahmin edilen Hindistan ve Çin gibi Asya ülkelerinde daha temiz ve verimli araçların oranını artırma fırsatı sunmaktadır [52]. Türkiye'de 2023 yılındaki trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı dikkate alındığında bir önceki yıla göre %583 artış olduğu görülmektedir [2]. İYM araçlar yerine ikame olan elektrikli araçlar sayesinde hava kalitesinin iyileştirilmesi ve iklim değişikliğiyle mücadele desteklenmiş olacaktır. Çevresel faydalara ek olarak elektrikli araçların üretim ve satışı, yeni istihdam alanları yaratacak ve ekonomiye katma değer sağlayacaktır. Teknolojik ilerleme açısından değerlendirildiğinde ise elektrikli araçlar, otomotiv endüstrisinde önemli bir teknolojik ilerlemeyi temsil etmektedir. Bu alandaki gelişmeler, elektrikli araçların daha verimli, daha performanslı ve daha uygun fiyatlı hale gelmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, politika yapıcılar, araç emisyonlarını azaltmak, karbon emisyonlarını düşürmek ve petrol bağımlılığını azaltarak enerji güvenliğini artırmak için temiz enerjiyi savunmaktadır [53]. Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü'ne göre, 2030 ve 2050 yıllarında elektrikli araç talebinin sırasıyla %51 ve %62'ye ulaşacağı öngörülmektedir [54]. Yoldaki elektrikli araç sayısı arttıkça, bu araçların teknolojik yönlerini anlamak için uygun çözümlerin sağlanması ve daha yüksek verimli çalışma koşullarının oluşturulması gerekecektir.

2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi

Elektrikli araçların gelişimi son on yılda hızlanmış olsa da ilk icadı daha eskiye dayanmaktadır. Otomobiller için ilk elektrik motoru 1828 yılında bir Macar olan Anyos Jedlik tarafından tasarlanmıştır [55]. Şekil 2.2'de Jedlik tarafından üretilen elektrikli aracın fotoğrafı görülmektedir. Bunu takiben, 1830'larda İskoç Robert Anderson ve Amerikalı Thomas Davenport adlı iki mucit elektrikli bir araba geliştirmişlerdir. 1865 yılında Fransız Fizikçi Gaston Plante, şarj edilemeyen elektrikli araç bataryalarını şarj edilebilir bataryalarla değiştirmiştir [55]. Fransız Camille Faure, daha önce Plante tarafından tasarlanan kurşun asit aküleri yeniden tasarlayıp geliştirdiğinde elektrikli araçlar otomobil kullanıcıları için uygun hale gelmiştir. Bu gelişme ile Avrupa'da elektrikli otomobillerin önü açılmıştır. Iowa'dan William Morrison, 1891 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk etkili elektrikli arabayı üretmiştir [55].



Şekil 2.2. Jedlik Ányos tarafından yapılan ilk deneysel elektrikli araç [55]

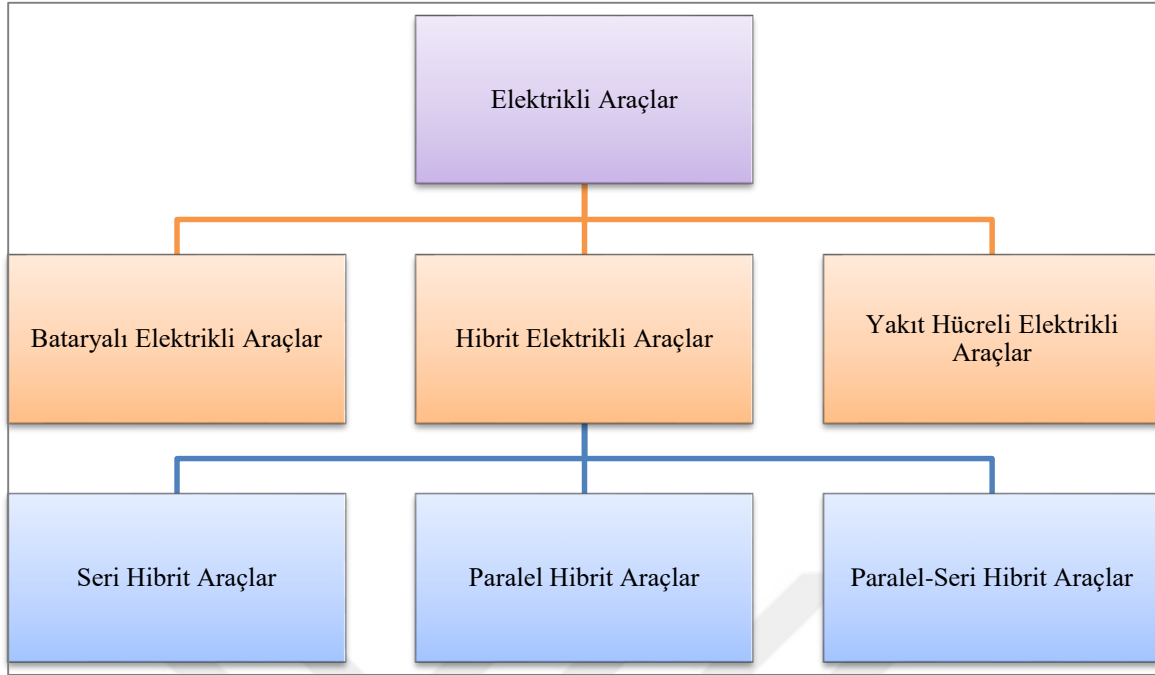
Özet olarak elektrikli araçlar ilk olarak 19. yüzyılın ortalarında ortaya çıkmıştır. 1899'da Belçikalı yarış arabası sürücüsü Camille Jenatzy'nin "La Jamais Contente" adlı elektrikli arabası ile 100 km/saat ile yeni bir kara hızı rekoru kırdı ve bu rekoru 1900 yılına kadar elinde tutmuştur [55]. Elektrikli araçlar, özellikle demiryolu araçları olmak üzere, yükleme ve yük ekipmanı şeklinde kullanılmaya devam etse de 20. yüzyılda İYM araçlara kıyasla yüksek maliyet, düşük azami hız ve kısa menzilli akülü elektrikli araçlar, özel motor olarak kullanımlarında dünya çapında bir düşüşe geçmiştir.

Günümüzde, binek araçlarda elektrikli ve diğer alternatif yakıtlı araçlara olan ilgi giderek artmaktadır. Bu ilginin temelinde, mevcut hidrokarbon bazlı ulaşım altyapısı ve elektrikli araç teknolojisindeki gelişmelerin yanı sıra, hidrokarbon yakıtlı araçlarla ilgili sorunların artan farkındalığı yer almaktadır. 2010 yılından bu yana, elektrikli araçların büyüme oranı geleneksel İYM araçlara göre çok daha yüksek olmuştur [56]. Son yıllarda, elektrikli otomobillerin küresel satışları keskin bir artış göstermiştir. 2018 yılında, küresel elektrikli binek otomobil stoku bir önceki yıla göre %63'lük bir artışla 5 milyona ulaştı. 2021'in sonunda, dünya yollarında yaklaşık 16,5 milyon elektrikli araç bulunmaktadır ve bu sayı 2018'deki miktarın üç katıdır [57]. 2018'den sonra elektrikli araç satışlarındaki yükselen trend daha da büyüyerek 2020'de 3 milyona yükselmiş ve toplam otomobil satışlarının %4,1'ini oluşturmuştur [58]. Avrupa ilk kez Çin'i geride bırakarak dünyanın en büyük elektrikli araç pazarı haline gelmiştir [59]. 2021 yılında elektrikli araç satışları 2020

rakamlarına kıyasla iki kattan fazla artarak 6,6 milyon yeni araç tescili gerçekleşmiştir [60]. Ağustos 2023 itibarıyla, tamamen elektrikli Tesla Model 3, dünyada tüm zamanların en çok satan elektrikli binek otomobildir [61].

2.2. Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

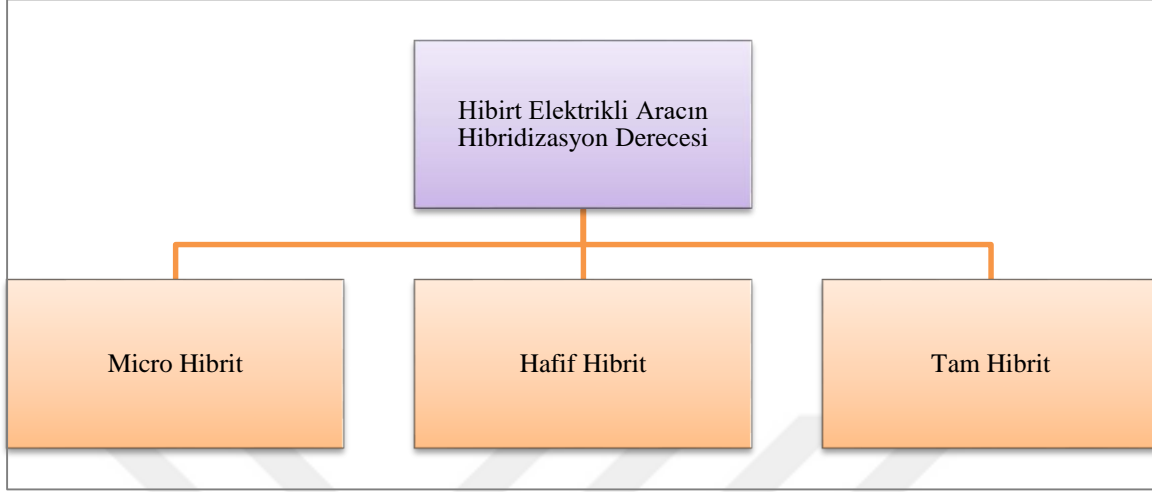
Elektrikli araç, ivmelenme ve sürüş için bir batarya grubuyla çalışan bir veya daha fazla elektrik motoru kullanır. EA tipine bağlı olarak, elektrik motoru/motorları geleneksel bir İYM araca yardımcı olur ya da araca tamamen güç sağlar. Elektrikli araçların sınıflandırmasında farklı bakış açıları yer almaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya tipleri, kullanım alanları ve yöntemleri gibi alanlardaki çalışmalar gün geçtikçe artmakta ve bu alanlarda yenikler ortaya konulmaktadır. Buna bağlı olarak sınıflandırma yöntemleri de değişmektedir. Fakat güncel durumda EA'ların sınıflandırmasında 3 yaklaşım bulunmaktadır [62]. Bu sınıflandırmalarda elektrik aracın enerjilendirilme biçimi, hibridizasyon derecesi ve market segmentleri dikkate alınmaktadır. Birinci grup olarak ele alınan enerjilendirme biçiminde elektrikli aracın, elektrik motoru ile İYM kullanımını ifade eden hibrit araçlar, İYM içermeyen bataryalı elektrikli araçlar (BEA) ve yakıt hücresel elektrikli araçlar (YHEA) bulunmaktadır. Hibrit elektrikli araçlarda (HEA) İYM ve elektrik motorunun elektrikli aracı ayrı ayrı ya da birlikte tahrik edebilecek şekilde bağlanmasına göre farklılık gösteren kullanımları bulunmaktadır. Bu farklılıklar hibrit elektrikli araçlar altında incelenmektedir. Elektrik araçların enerjilendirilme biçimine göre sınıflandırılması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Elektrik araçların enerjilendirilme biçimine göre sınıflandırılması

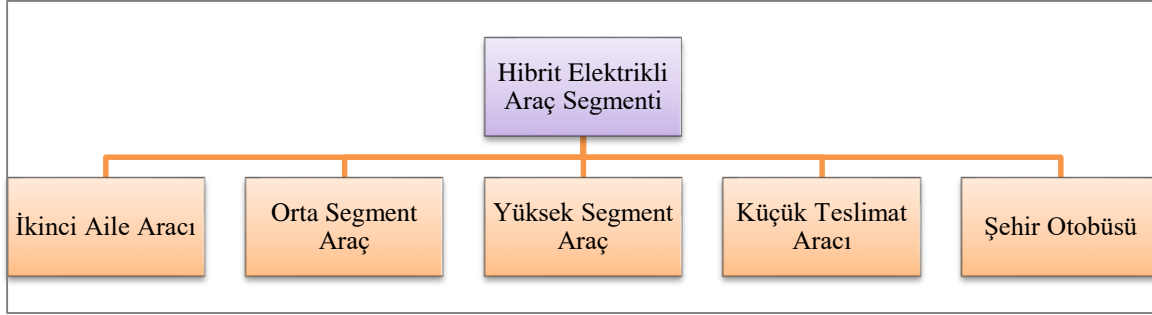
İkinci sınıflandırma biçimi aslında HEA içerisinde özel bir bölümü oluşturmaktadır. Bu sınıflandırmanın ortaya çıkmasının başlıca sebebi elektrikli araçta kullanılan elektrik motor gücünün çok geniş bir güç aralığını kapsamasıdır. Kullanılan elektrik motorunun gücüne göre mikro hibrit, hafif hibrit ve tam hibrit olarak üç sınıf bulunmaktadır [63]. Bu sınıflandırma bir anlamda aracın hibridizasyon derecesinin de bir göstergesi konumundadır [64]. Mikro hibritler 12 V'de yaklaşık 2,5 kW'lık elektrik motoru kullanır. Elektrik motoru, şehir içi sürüşte daha fazla kullanılan kalkış ve durma sürecinde İYM'ye yalnızca yardımcı olur. Bu sürüş modunda enerji tasarrufu %5 ile %10 arasındadır [62]. Hafif hibrit sınıfındaki EA'da elektrik motoru güç aralığı 100-200 V gerilimde 10-20 kW'tır. Mikro hibrit sınıfına göre, enerji tasarrufu daha fazladır ve yaklaşık %20-%30'a ulaşır. Hafif hibrit araçlar, küresel sera gazı emisyonlarının azaltılması için önemli bir rol oynayabilir, ancak tek başına yeterli değildirler. Bu araçlar kitlesel olarak benimsense bile, elektrikli araç sayısının dünya çapındaki artışı dikkate alındığında, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yeni tüketicilerin ortaya çıkması ile, sera gazı azaltım hedeflerine ulaşmak için yeterli değildirler [62]. Bu sınıflandırma yönteminin son üyesi, 200-300 V'de yaklaşık 50 kW'lık güç üretebilen elektrik motoru bulunduran tam hibrit elektrikli araçlardır. Tam hibrit EA'lar şehir içi sürüşte, gerektiğinde İYM'yi her zaman maksimum verimli bölgede çalıştırmayı başarabilirler. Çalışma esnasında talep edilen enerjinin fazlasını bataryalara yönlendiren karmaşık kontrol algoritmaları sayesinde de %30-50 oranında enerji tasarrufu sağlayabilirler. Toyota Prius bu

ailenin öncü bir üyesidir. Hibridizasyon derecesine göre sınıflandırmanın özet gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir.



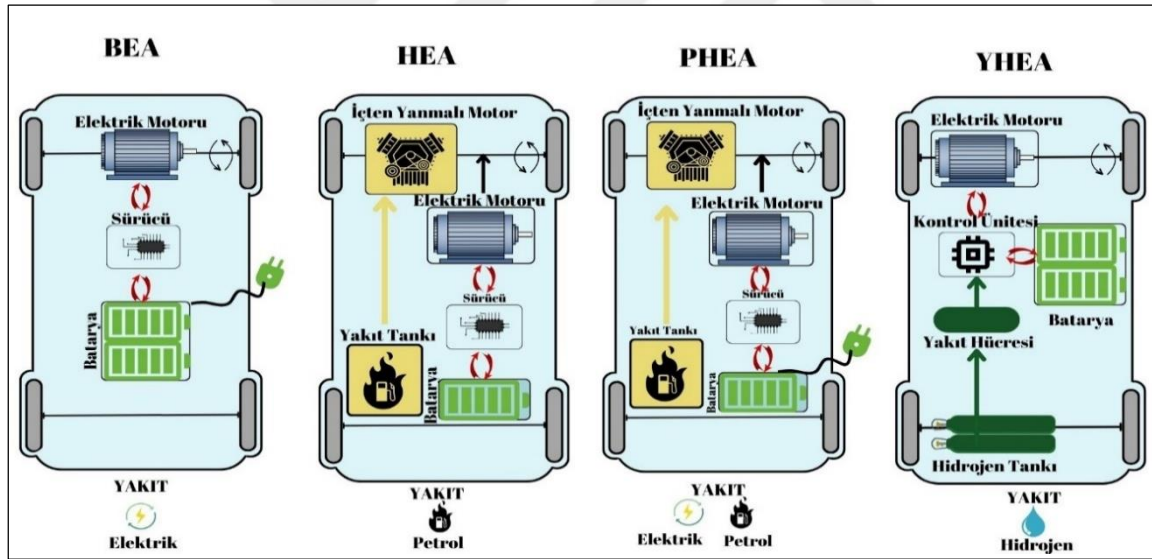
Şekil 2.4. Elektrikli araçların hibridizasyon derecesine göre sınıflandırılması

HEA'lar için yapılan üçüncü sınıflandırma yönteminde araçlar, otomobil pazarı fiyatlarına göre bir dizi kategoriye veya segmente ayrılmaktadır [64]. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi beş segment belirlenmiştir. İkinci aile arabası segmentindeki HEA'lar şehir içinde sık kullanım içindir ve nispeten düşük bir günlük mesafe kat ederler. Şehir içi kullanımda kalkış motoru olarak İYM kullanıldığında düşük verimde çalışırlar. Orta segment araçlar genellikle bir ailenin tek otomobili olarak ele alınmaktadır. Bu nedenle, şehir içinde kullanıma uygun olmalı ve aynı zamanda iyi bir yol performansı sunmalıdır. Toyota Prius bu segmentte değerlendirilebilir. Yüksek sınıf otomobil segmentindeki HEA'lar çoğunlukla şehir içi kullanım için uygun değildir. Üstün performansa sahiptirler. Bu sınıftaki araçlarda çevresel kaygılar arka planda kalmaktadır [62]. Küçük teslimat aracı segmentindeki EA'lar sadece şehir içi kullanım için tasarlanmıştır. İkinci aile otomobili segmentinden farklı olarak, bu segmentteki araçlar her gün çok sayıda kısa mesafeli yolculuk yapabilmelidirler. Kurye teslimat araçları bu sınıfta kullanılan araçlara iyi bir örnektir. Şehir içi otobüs segmenti, kentsel alanlarda genellikle turist taşımacılığı da dahil olmak üzere toplu taşımacılığa yönelik bir sınıftır [62].



Şekil 2.5. Elektrikli araçların segmentlerine göre sınıflandırılması

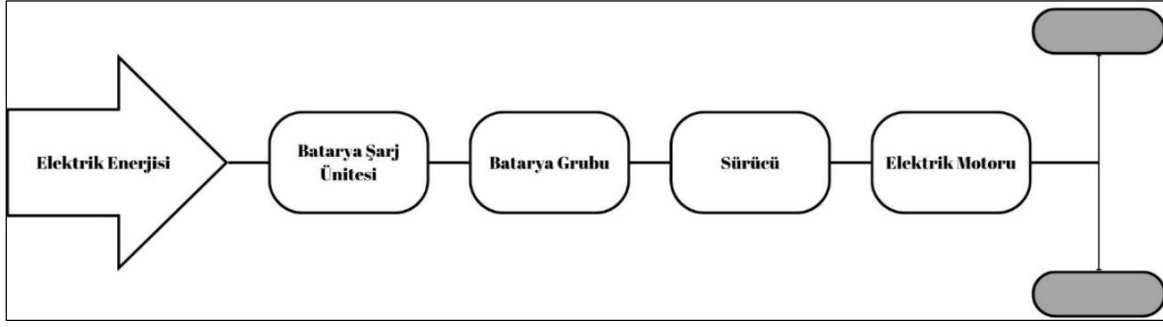
Mevcut sınıflandırma yöntemleri ve EA dünyasındaki trendler göz önünde bulundurulduğunda elektrikli araçları 4 kategoride toplamak mümkündür. Bunlar; bataryalı elektrikli araçlar (BEA), hibrit elektrikli araçlar (HEA), harici olarak şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEA) ve yakıt hücreli elektrikli araçlardır (YHEA). Bu sınıflandırma Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Elektrikli araçların sınıflandırılması

2.2.1. Bataryalı elektrikli araçlar (BEA)

Bataryalı bir elektrikli araç, tamamen elektrikli veya tam elektrikli bir araç olarak kabul edilir. BEA'lar yalnızca elektrikle çalışır ve elektrik motorları yerleşik akü paketlerinden akım çeker. BEA'larda herhangi bir İYM formu yoktur. BEA'ların bağlantı yapısı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Bataryalı elektrikli araçların bağlantı yapısı [65]

BEA'ların yalnızca elektrik enerjisi ile çalıştırıldığı göz önüne alındığında, hibrit elektrikli araçlara göre çok daha büyük kapasiteli pillere ihtiyaç duydukları görülür. Pil kapasitesinin yüksek olması, tipik olarak BEA'ların diğer EA türlerinden daha pahalı olmasına neden olur. Özellikle batarya maliyetleri, batarya üretiminde tüketilen enerji ve bataryaların ömrü gibi hususlar, her ne kadar EA'ların kullanımı çevreci olsa da karbon ayak izi açısından hala tartışma konusudur [66]. Bu tartışmalara rağmen BEA'lar kullanım esnasında sıfır egzoz emisyonuna sahiptirler ve bu yönleriyle elektrikli araçlar ailesindeki en çevre dostu elektrikli araç türüdür. Bataryaların yeniden şarj edilmesi, harici bir kaynaktan ya da rejeneratif frenleme ile mümkündür. Rejeneratif frenlemenin sağladığı kısıtlı şarj geri kazanımı araç menzilini kısıtlar niteliktedir. Fakat bu kısıtlayıcı yönlerine rağmen elektrikli araç üreticileri tarafından son yıllarda bu tip araçlara yönelim artmıştır. Bunun başlıca sebebi sıfır emisyon hedefleridir. Ülkemizde 2023 yılı itibari ile seri üretime geçen TOGG T10X isimli araç da bu kategoridedir. BEA'ların çalışma prensipleri HEA'ya göre daha basittir. Batarya ile çalışan bir elektrik motoru İYM'nin ve yakıt deposunun yerini alır ve araç hareket halinde olmadığı zamanlarda bir şarj noktasında tekrar şarj edilir [67–69]. BEA'lar yüksek verimlilik, sıfır egzoz emisyonu, yüksek hızlanma performansı ve yenilenebilir enerji kaynakları da dahil çeşitli düşük maliyetli güç istasyonları tarafından şarj edilebilirler [70,71]. Bu avantajlarının yanında BEA'ların bazı önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar; batarya maliyetlerinin yüksek olması, şarj işleminin İYM araçlara göre hala uzun sürmesi, hızlı şarj altyapısının sınırlı ve daha yavaş şarj yöntemlerine göre pahalı olması olarak sıralanabilir. Fakat bu dezavantajların bir sonucu olarak BEA'ların EA pazarında daha yüksek kabul görebilmesindeki en büyük engel bu araçların toplumsal kabulüdür [72]. Toplumsal kabul açısından daha yaygın olmaları önündeki en önemli engellerden birisi ise menzil kaygısıdır. Menzil geleneksel araçlara göre daha düşük olduğundan ve şarj işlemi zaman aldığından, tüketiciler yolculuklarını tamamlayamayacaklarından endişe etmektedir.

Bu sorun, yetersiz şarj altyapısı nedeniyle daha da kötüleşmektedir [73, 74]. Bu dezavantajların aşılmasına dair ülkeler bazında belirlenen yol haritalarına göre özellikle şarj alt yapısına dair yatırımlar BEA'ların yakın gelecekte daha önemli hale geleceğini göstermektedir [75].

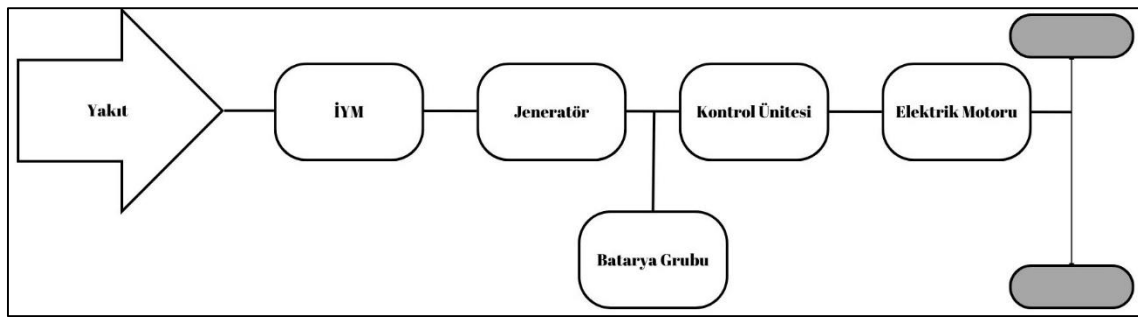
2.2.2. Hibrit elektrikli araçlar (HEA)

Bir HEA, aracı hareket ettirmek için birden fazla motora sahiptir. Bir veya daha fazla elektrik motoru ve bir İYM kullanılır. Sistemin tasarımına bağlı olarak, İYM aracı kendi başına hareket ettirebilir, aracı itmek için elektrik motoruyla birlikte hareket edebilir veya aracın akülerini şarj etmek için bir jeneratörü çalıştırabilir. Elektrik motoru aracı kendi başına hareket ettirebilir veya aracı hareket ettirirken İYM'ye yardımcı olabilir. Bazı hibritler düşük hızda çalışırken yalnızca elektrik motoruna, daha yüksek hızlarda yalnızca İYM'ye ve bazı sürüş koşullarında ise her ikisine birden başvurabilir [76]. Bir HEA elektrik motoru, İYM tarafından tahrik edilen bir jeneratör tarafından sürekli olarak şarj edilen bataryalar sayesinde çalışır. Bataryalar ayrıca rejeneratif frenleme yoluyla da şarj edilebilirler. Karmaşık elektronik kontroller aracın çalışmasını sürekli takip ederek, mevcut çalışma koşullarına göre İYM ya da elektrik motoru ile aracı hareket ettirir ya da jeneratör ile şarj işlemini kontrol eder. Sistem aküleri sürüş sırasında şarj ettiği için harici bir şarj işlemi gerekli değildir [76].

HEA'larda kullanılan motorlar, araç için ve elektrik desteği için özel olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle daha verimli çalışarak çok iyi yakıt ekonomisi ve çok düşük egzoz emisyonu sağlarlar. Ancak HEA'larda sıfır emisyon söz konusu değildir. Çünkü tüm HEA'larda İYM bulunmaktadır. HEA'lar BEA'lara göre daha uzun bir menzile sahiptirler. Ayrıca benzer bir İYM donanımlı araçtan daha uzun bir sürüş menziline de sahiptirler. Çünkü, yakıt tüketiminin en yüksek olduğu kalkış anında İYM yerine EM kullanılır. Bu sayede yakıt tüketimi minimuma indirilerek menzil artırılmış olur. HEA'lar aynı zamanda daha büyük bir İYM ile donatılmış benzer bir araçla aynı performansı, hatta daha iyisini sağlayabilme kapasitesine de sahiptirler. Bu kombinasyona sahip olan HEA rejeneratif fren enerjisi ile yeniden şarj edilip yakıt tüketimini azaltma ve optimize etme özelliklerine sahiptirler. Temel anlamda güç aktarma kombinasyonları, HEA için 3 kategoride toplanabilir bunlar;

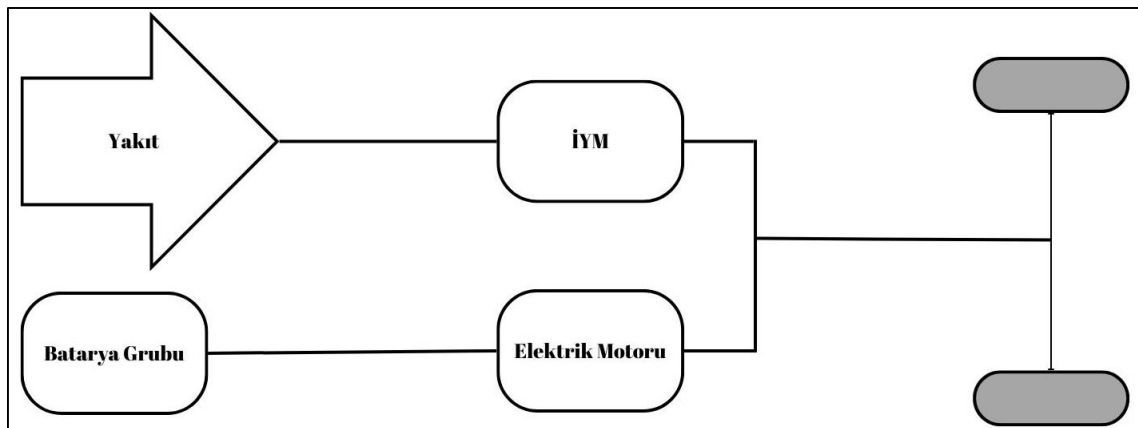
- Seri HEA,
- Paralel HEA,
- Paralel-Seri HEA

Seri-HEA teknolojisinin şematik gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir. Şekilde İYM elektrik enerjisi üretmek için kullanılır. Aracın hareket ettirilmesinde İYM kullanılmaz. Elektrik motoru ise yalnızca aracı hareket ettirme için kullanılır. Elektrik motorunun enerji kaynağı İYM tarafından şarj edilen batarya grubudur.



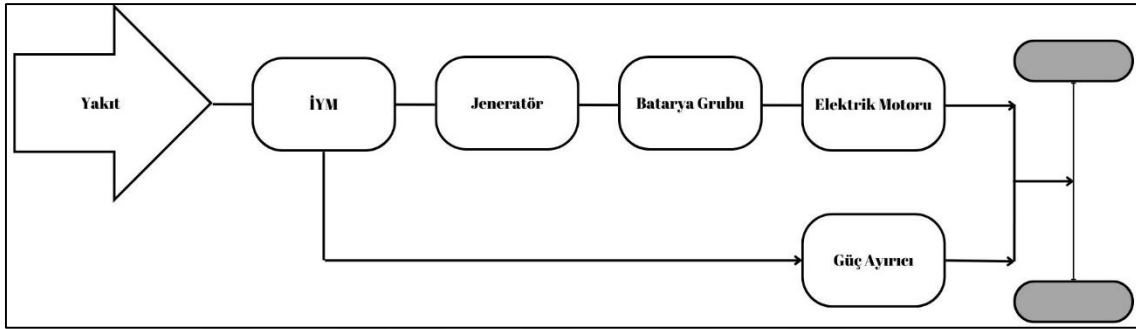
Şekil 2.8. Seri HEA bağlantı yapısı

Paralel bir HEA aracı hareket ettirmek için elektrik motorunu veya İYM ya da her ikisini birden kullanır. Bir anlamda paralel HEA teknolojisi, İYM ve jeneratör motorunun güçlerinin birleşmesi anlamına gelir [65]. Şekil 2.9 bir paralel HEA için bağlantı yapısını göstermektedir.



Şekil 2.9. Paralel HEA bağlantı yapısı

Günümüz hibritlerinin çoğu seri/paralel konfigürasyona dayanmaktadır çünkü her iki tasarımın da özelliklerine sahiptirler. Paralel-Seri-HEA Teknolojisi, Paralel-HEA ve Seri-HEA teknolojilerinin birleşiminden oluşmaktadır. Paralel-Seri ya da diğer adıyla güç bölmeli hibrit daha verimli bir hibrit güç aktarma organı tasarımı sağlamak için hem seri hem de paralel hibritlerin en güçlü özelliklerini birleştirir [77]. Şekil 2.10'da paralel-seri bağlantılı bir hibrit elektrikli aracın konfigürasyonu gösterilmektedir.



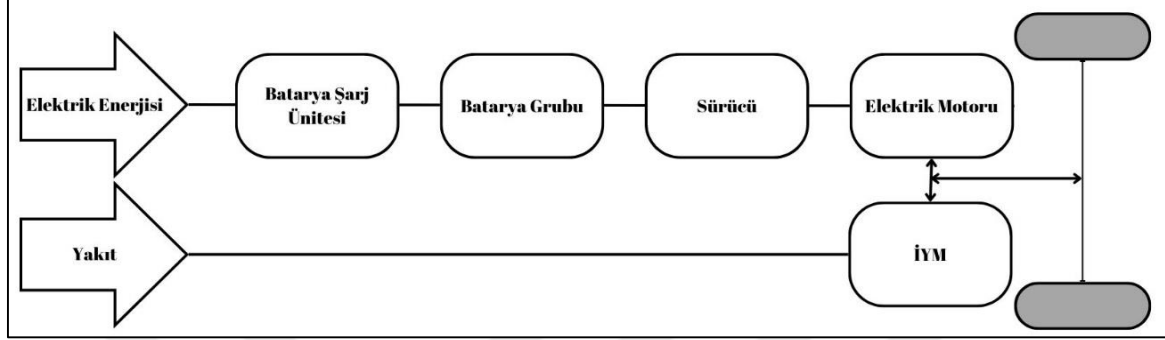
Şekil 2.10. Paralel-Seri HEA bağlantı yapısı [78]

Seri hibrit güç aktarma organlarının aksine paralel-seri HEA'da, İYM mekanik bir bağlantı aracılığıyla diferansiyele bağlanarak İYM'nin tekerlekleri doğrudan tahrik etmesini sağlar [79]. Bu tasarım, motordan gelen gücü iki yola dağıtır; biri gücü tekerleklere iletmek için mekanik bir dişli sistemi kullanırken, diğeri gücü tekerleklere iletmek için bir jeneratör ve bir elektrik motoru kullanır. Bu, EM ve İYM'nin bağımsız veya birlikte çalışarak verimliliği en üst düzeye çıkarabileceği anlamına gelir. Güçleri birleştirmek için kullanılan başlıca cihazlar gezegen dişli, elektronik olarak çalıştırılan sürekli değişken şanzıman ve manyetik sürekli değişken şanzımandır [80]. Bu hibrit bağlantı sayesinde seri HEA'lara göre batarya sistemleri küçük, İYM ise paralel bağlantı tipine göre daha küçük boyutlarda olmaktadır.

2.2.3. Harici olarak şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEA)

Şarj edilebilir hibrit elektrikli araç (PHEA), bir İYM'yi bir elektrik motoru ve pil paketi ile bir hibrit araca benzer şekilde birleştirir, ancak belirgin farklılıklar vardır. PHEA'lar genellikle daha büyük pil ünitelerine ve hibrit araçlardan daha güçlü elektrik motorlarına sahiptir, çünkü elektrik sistemi sürüş sırasında daha yüksek tork-devir aralığı gerektirir. Bu, PHEA'ların yalnızca elektrik modunda sürülebileceği ve İYM'nin tamamen kapatılabileceği anlamına gelir. Bir PHEA kullanmak, bir hibrit araç kullanmaya benzer, çünkü araç bataryaları otomatik olarak şarj eder ve koşullara bağlı olarak İYM ile elektrik motoru

arasında geçiş yapar. Bununla birlikte, PHEA sürücülerinin araç yakıt deposunu yakıt ile doldurma ve araç bataryalarını elektrik ile şarj etme seçenekleri vardır. Bir PHEA, bataryanın tüm enerjisini tüketirse yalnızca benzinle ve tüm yakıt tükenirse yalnızca batarya şarjı ile çalışabilir. Şekil 2.11’de PHEA bağlantı yapısı gösterilmektedir.



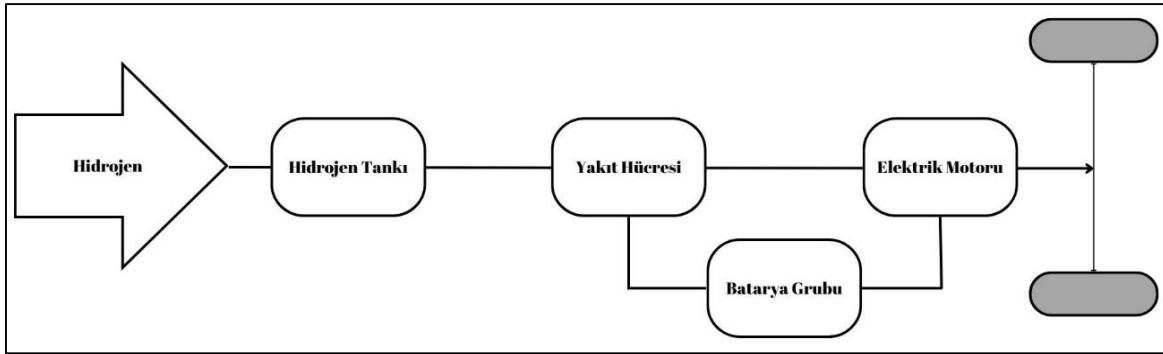
Şekil 2.11. PHEA bağlantı yapısı

2.2.4. Yakıt hücreli elektrikli araçlar (YHEA)

Gelecek için olası bir alternatif enerji kaynağı, yakıt hücrelerinin yakıtı olan hidrojenidir. Temel olarak, bir yakıt hücresi kimyasal bir reaksiyon yoluyla elektrik enerjisi üretir. Bir yakıt hücreli elektrikli araç (YHEA), yakıt hücresi tarafından üretilen elektriği, aracın tekerleklerini tahrik eden motorlara güç sağlamak için kullanır. YHEA'lar, sürüş için yalnızca elektrik enerjisi kullanmaları bakımından BEA'ye benzer, ancak enerji depolama biçimleri çok farklıdır. Bir şarj cihazından alınan elektrik enerjisini depolayan BEA'ların aksine, YHEA'lar genellikle hidrojen içeren bir kimyasal reaksiyon yoluyla kendi elektrik şarjlarını oluşturur. Bu, YHEA'ların hidrojenle doldurulabileceği ve şebekeden şarj edilmesi gerekmeyeceği anlamına gelir [81].

Yakıt hücreleri, hidrojeni havadaki oksijenle birleştirerek kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Hidrojen doğrudan saf hidrojen gazı olarak veya metanol, doğal gaz veya benzin gibi hidrokarbon yakıtlardan hidrojen çeken bir "yakıt reformatörü" aracılığıyla tedarik edilebilir. Bir yakıt hücresi, bir elektrolitin her iki tarafında bulunan iki elektrottan (anot ve katot) oluşur. Hidrojen yakıt hücresine girdiğinde, hidrojen atomları anotta elektronlarını bırakır ve elektrolitte hidrojen iyonlarına dönüşür. Anotta serbest kalan elektronlar harici bir devre üzerinden katoda doğru hareket ederken, yönlendirilebilir ve aracı hareket ettirmek için elektrik motorlarına güç sağlamak üzere kullanılabilirler. Yakıt

hücrelerinde, hidrojen iyonları katottaki oksijen molekülleriyle birleşerek su ve ısı açığa çıkarır. Yakıt hücresinin egzoz borusundan salınan tek gaz ise su buharıdır. Bir yakıt hücresi güç sisteminin birçok parçası vardır, ancak hepsinin merkezinde yakıt hücresi bulunur. Şekil 2.12’de YHEA bileşenleri gösterilmektedir. Yakıt hücresi grubu, çok sayıda ince, düz yakıt hücresinin bir araya gelmesinden oluşur. Her bir hücre elektrik üretir ve tüm hücrelerin toplam çıktısı araca güç sağlamak için kullanılır.



Şekil 2.12. YHEA bileşenleri

Saf hidrojenle çalışan araçlar gerçek sıfır emisyonlu araçlardır. YHEA'lar çevreye zararlı bazı gazlar yayacaktır, ancak bu oran İYM araçlardan çok daha azdır. Reformatör olmadan YHEA'lar fosil yakıt tüketmez ve küresel ısınmaya katkıda bulunmaz. Ancak hidrojen üretimiyle ilgili bazı emisyonlar söz konusu olabilir. YHEA'ların kişisel ulaşım için gerçekten uygulanabilir bir seçenek haline gelmesinden önce birçok engelin aşılması gerekmektedir. Bunlar depolama, ağırlık, boyut, maliyet ve başlatma süresidir. Hidrojen bir gaz olduğu için, bir depo benzinle aynı mesafeyi kat etmek için büyük miktarda hidrojene ihtiyaç vardır. Bu boyutlardaki hidrojeni yoğunlaştırılmış olarak depolamak ise oldukça tehlikelidir. Çünkü Hidrojen, yanıcı bir gazdır ve patlama riski taşır. Yanıcı olmasına ek olarak hidrojen yakıt deposu bir kaza durumunda patlayabilir. Ayrıca YHEA'ların yakıt hücreleri, yüksek voltajlı elektrik üretir ve bu da elektrik çarpma riskini artırır. Mevcut yakıt hücreleri ise oldukça büyük ve ağırdır; YHEA'ların daha pratik hale gelebilmeleri için daha küçük ve hafif olmaları gerekir. Yakıt hücreleri oldukça maliyetlidir ve yalnızca belirli sıcaklıklarda en iyi şekilde çalışabilirler. YHEA'ların son kullanıcılar açısından kullanılabilir ve yaygın hale gelmesi için değişen çalışma sıcaklıklarına ve koşullarına hızlı uyum sağlayabilecek şekilde geliştirilmeleri gerekmektedir. Çoğu otomobil üreticisi yakıt hücreli ulaşım teknolojilerini aktif olarak araştırmakta ve prototip binek araçlarını test etmektedir [76].

PHEA'ları bir HEA alt kategorisi olarak sınıflandıran kaynaklar da mevcuttur [82]. Bu şekilde genellendiğinde BEA'lar ve HEA'ların avantaj ve dezavantajları şu şekilde ifade edilebilir;

BEA avantajları:

- Enerjinin en verimli kullanımı, yakıttan tasarruf
- Daha az hareketli parça, daha az aşınma ve yıpranma
- Daha az emisyon ve daha az fosil yakıt kullanımı
- Petrol türevi yakıtı ihtiyacı yok

BEA dezavantajları:

- Geleneksel araçlardan daha düşük sürüş menzili

HEA avantajları:

- Geleneksel araçlara benzer sürüş menzili

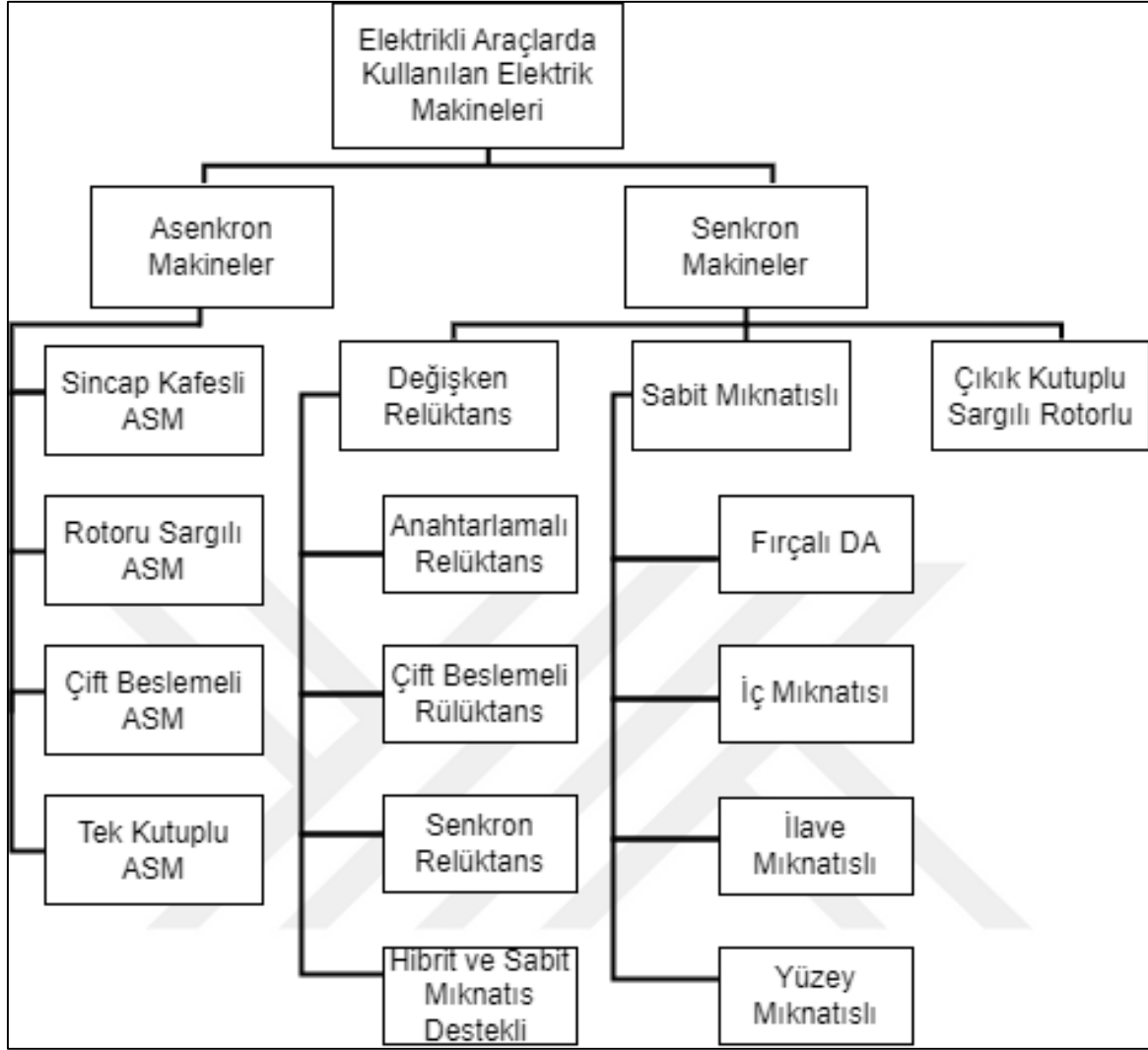
HEA dezavantajları:

- Sınırlı elektrikli sürüş menzili
- Bataryanın daha sık şarj edilmesi gerekir
- Çift tahrik sistemlerinin ağırlığı nedeniyle BEA'dan daha az verimli

2.3. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Türleri

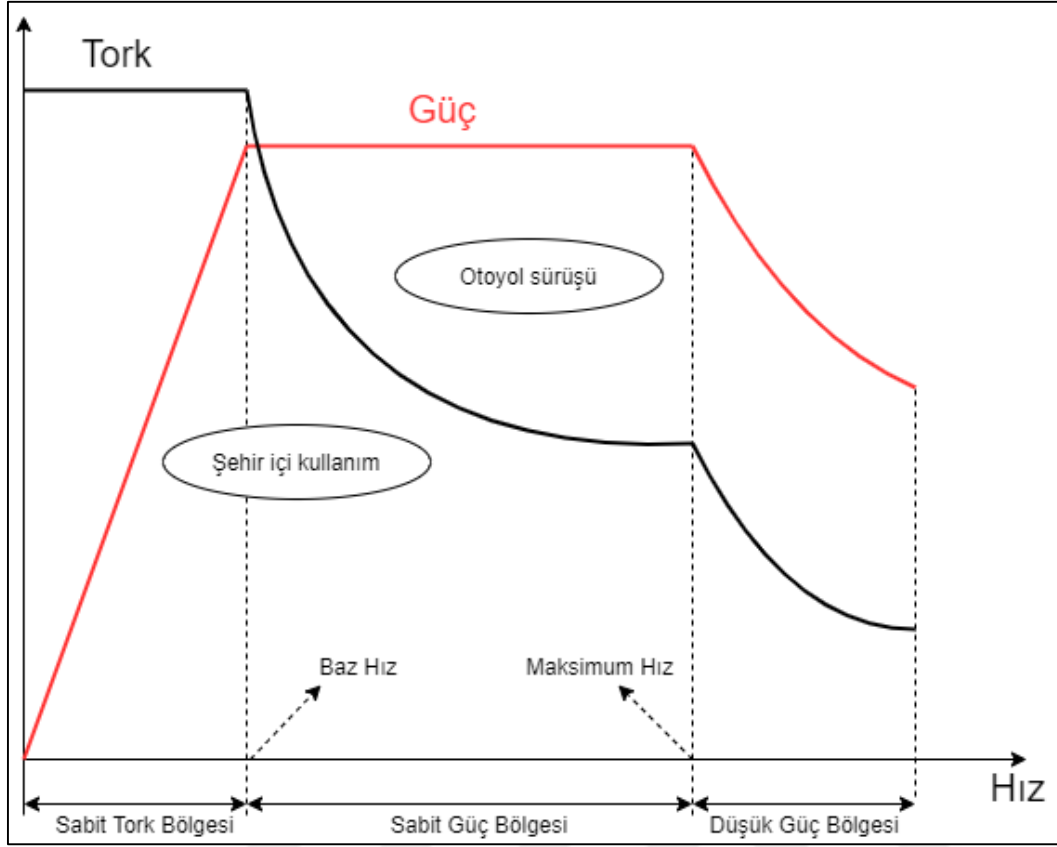
Elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden biri elektrik motorudur. Bu motor, bataryada depolanan elektrik enerjisini aracı hareket ettiren mekanik enerjiye dönüştürür. Elektrikli araçlarda kullanılan birçok farklı motor tipi vardır ve her birinin kendi avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. EA'da kullanılacak motorlarda yüksek tork ve güç yoğunluğu, geniş hız aralığı, yüksek verimlilik, dayanıklılık, düşük akustik gürültü ve düşük maliyet gibi teknik özelliklerin karşılanması beklenir [83]. Bu gereksinimler, piyasada kabul edilebilir ve rekabetçi olması gereken maliyete ek olarak çeşitli makine türleri için çok önemlidir [84]. EA'da genel anlamda doğru akım motorları, asenkron motorlar, sabit

mıknatıslı senkron motorlar, anahtarlamalı relüktans motorları olmak üzere dört sınıf motor kullanılmaktadır. Ayrıca radyal akılı ve eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler, asenkron makineler, anahtarlamalı relüktans makineleri ve akı anahtarlamalı makineler dahil olmak üzere çeşitli makine konfigürasyonları kullanılmış veya kullanılabilir potansiyel motorlardır. Bu açıdan bakıldığında seçenekler oldukça geniştir. Asenkron makineler kategorisi altında, çift beslemeli, sargılı rotorlu indüksiyon motorları şu anda herhangi bir araç uygulamasında kullanılmamaktadır [84]. Çift beslemeli asenkron motorları rotoru sargılı asenkron motorlardan ayıran başlıca özellikleri hem rotorlarının hem statorlarının harici olarak enerjilendirilebilmeleridir. Çift besleme teriminin asıl kaynağı da stator beslemesi direkt olarak şebekeden sağlanırken, rotor enerjilendirilmesinin güç konvertörü üzerinden sağlanmasıdır [85]. Rotoru sargılı motorlarda rotor sargılarına rotor bilezikleri üzerinden yalnızca direnç ile müdahale edilebilirken, çift beslemeli asenkron makinalarda rotor bilezikleri üzerinden harici bir enerjilendirme yapılarak farklı hızlarda çalışma sağlanabilmektedir. Çift beslemeli asenkron jeneratörler genellikle rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Senkron makineler kategorisi altında, çıkık kutuplu motorlar tipik olarak güç üretiminde kullanılmaktadır. Geçmişte otomotiv uygulamaları için araştırılmış olsalar da şu anda ticari elektrikli araçlar için kullanılmamaktadır [84, 86]. Alan sargılı senkron makineler, elektrikli tahrik için gerekli olan yüksek özgül güce sahip potansiyel adaylar olarak tanımlanmıştır [35]. Çift beslemeli relüktans makine topolojileri, çeşitli potansiyel uygulamalar için araştırılan birçok makine sınıfından biridir, ancak şu anda herhangi bir araçta kullanılmamaktadır [84, 87]. Şekil 2.13 EA ve HEA'da kullanılabilir elektrik motorlarını göstermektedir.



Şekil 2.13. EA ve HEA’da kullanılabilecek elektrik motorları [86]

Bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda kullanılan başlıca motor tipleri fırçasız doğru akım motoru (FDAM), doğru akım motorlar, sabit mıknatıslı doğru akım motorları (SMDA), anahtarlamalı relüktans motorları (ARM), senkron relüktans motorlar (SRM) ve asenkron motorlardır (ASM). Bu motorlar genel itibari ile Şekil 2.14’te verilen hız-tork grafiği karakteristiğinin gerekliliklerini sağlamalıdır [88]. Bu şekle göre elektrik motorlarının belirlenen baz hıza göre sabit tork değerini sağlaması, baz hızdan sonra ise sabit güçte çalışabilmeleri gerekir.



Şekil 2.14. EA ve HEV için elektrik motorunun Hız-Tork karakteristiği

Fırçasız doğru akım motoru (FDAM)

FDAM'lar rotorlarında fırça bulundurmadığı için fırça kayıpları yoktur bu sayede yüksek verimlilik ve güç yoğunluğuna sahiptirler. ASM'ye göre daha verimli ve yüksek güç yoğunluğunda olduklarından daha düşük boyutlarda üretilebilmeleri ve gelişen güç elektroniği teknolojisi sayesinde daha kolay kontrol edilebilmeleri mümkündür. Geniş bir hız aralığında yüksek torklar üretebilirler. Daha yumuşak bir çalışma karakteristiğine sahiptirler. Fırça bulundurmadıkları için çok yüksek devirlerde çalıştırılabilirler [89]. Fakat bu motorların yol alma ve kontrol algoritmalarının karmaşık olması, rotor pozisyon bilgisine ihtiyaç duymalarına ek olarak zamanla manyetik özelliklerinin zayıflaması hatta kaybetmesi gibi dezavantajları vardır.

Doğru akım motor (DAM)

Teknolojik olgunluğun yüksek olması, bataryalara direkt olarak bağlanabilmeleri gibi avantajları DA motorları EA uygulamalarında akla gelen motorlar haline getirmektedir.

Lineer tork-hız karakteristiği, düşük tork dalgalanması ve yük altında kalkış için uygun olmaları EA uygulamaları için uygun bir seçenek olmalarını sağlar [22]. Ani yük değişimlerinde performansları iyi olmakla beraber kontrolü kolaydır. Düşük hızlarda yüksek tork sağlayabilirler [88]. Fakat fırçalı olmaları hem motor verimine olumsuz etki eder hem de bakımlarını zorlaştırır [89]. Boyut olarak diğer motor tipleri karşısında dezavantajlı konumdadırlar. Bu sebeple çoğunlukla düşük güçlü uygulamalarda tercih edilirler [90]. Ayrıca DA motorların rejeneratif frenleme kapasiteleri de oldukça sınırlıdır [63].

Sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM)

Yüksek güç yoğunluğu ve verimlilikleri ile asenkron motorlara en iyi alternatif SMSM'lerdir. Piyasadaki EA'ların önemli bir oranı SMSM'dir. Verim ve güç yoğunluğu arayışları daha önce Tesla Model S gibi EA'da kullanılan ASM'den Tesla Model 3'teki gibi sabit mıknatıslı makinelerle doğru bir geçişe neden olmuştur. Fakat sargılardaki armatür reaksiyonu sebebiyle akı yolunda bozulmalar oluşur bu da demagnetizasyona sebep olur [89]. Demagnetizasyon ise motor performansını olumsuz etkilemektedir [91]. SMSM'ler sabit mıknatıs bulundurmalarından dolayı FDAM'ler ile benzerlik gösterirler. Aralarındaki fark FDAM'lerde zıt emk trapezoidal iken SMSM'lerde sinüsoidaldir. SMSM'ler FDAM'lere göre daha yüksek güçlerde üretilebilirler. Yapılarında bulunan mıknatıslar manyetik alanı sınırlandırdığı için sabit güç bölgesinde yüksek hızlara çıkma kapasiteleri sınırlıdır. Yüksek maliyetli olmalarına rağmen verimlilik açısından asenkron motorlara alternatiftirler [89].

Anahtarlamalı relüktans motor (ARM)

Yapısal olarak diğer türlere göre daha basit ve sağlamdır, rotor üzerinde kısa devre akımı bulunmaz yani sıfırdır. Bunlarla beraber sabit güç bölgesi diğer motorlara göre daha geniştir bu sayede elektrikli araçlar için uygun ve tercih edilen motorlar arasındadır. Sıcaklığa toleransları yüksektir. Bu avantajlarının yanında motor sürücüsü bazı diğer motorlara göre daha karmaşıktır. Ayrıca verimlilikleri ve tork yoğunlukları göreceli olarak düşüktür. Bu dezavantajların etkisini azaltmak için ARM'lerin rotorlarına yardımcı mıknatıslar eklenebilmektedir [89]. Yardımcı mıknatıslı ARM'lerde tork dalgalanmaları azalmakta ve verim yükselmektedir. Bu sebeplerle EA uygulamalarında tercih edilen ve araştırmacıların üzerinde çalıştığı bir motor tipidir.

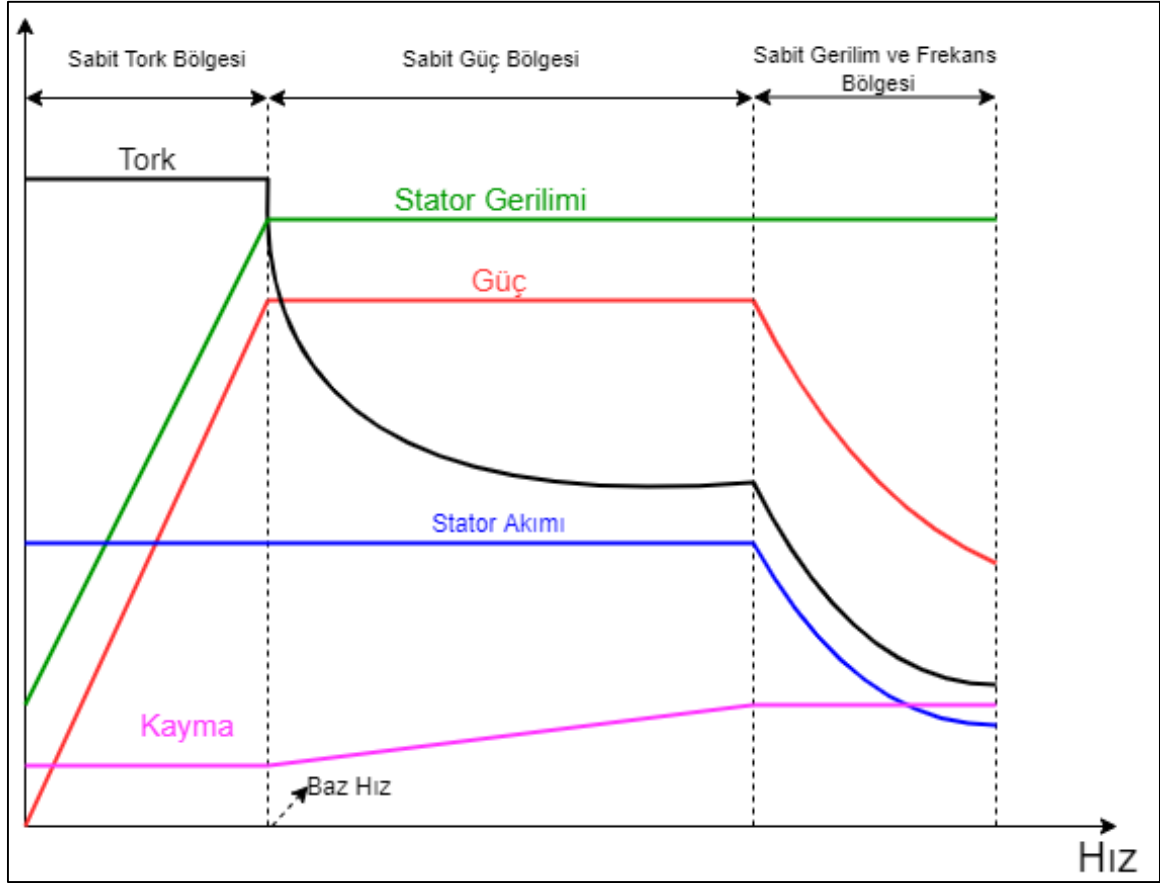
Senkron relüktans motor (SRM)

SRM basit mekanik yapıya sahiptir, mıknatıs yoktur, düşük maliyetlidir ve geleneksel alternatif akım senkron makinaya benzer bir çalışma prensibine sahiptir ancak rotor üzerinde uyarım sargıları yoktur. Bunun yerine rotor yüksek oranda anizotropik bir yapıya sahiptir. Rotor üzerinde bulundurduğu bariyerli yapı sayesinde relüktans farkı oluşturmaktadır. Bu relüktans farkına bağlı olarak hava aralığında bir akı üretebilmektedir [92]. SRM’de rotor üzerinden akım akmamaktadır. Rotor, stator üzerinde akan akım ve oluşan sinüzoidal manyetik alan ile hizaya girmeye çalışacaktır. Stator akımı hem mıknatıslanma hem de alan bozulmasını azaltmaya çalışan moment üretiminden sorumludur. Referans çatıda bu senkronizasyon, rotor d-ekseni ve stator sargılarının akım vektörü arasındaki açı olan akım açısı kontrol edilerek yapılabilir [93]. SRM, sabit mıknatıslı motorlara kıyasla daha düşük maliyet, daha basit ve güvenilir yapı, kolay kontrol edilebilmesi, sıcaklığa karşı dayanıklı olması gibi avantajlara sahiptir [94]. Ayrıca son yıllarda SRM’lerde akı bariyerlerine farklı geometri ve büyüklüklerde eklenen sabit mıknatıslar sayesinde SRM’lere oranla daha yüksek tork/güç yoğunluğu ve verim sağlanabilmektedir [95].

Asenkron motor (ASM)

Asenkron motorların basit yapıları ve dinamik performansları EA uygulamaları için çok uygundur [63]. Asenkron motorlar daha çok 5kW ve üzeri güçlerde EA’da kullanılmaktadır [90]. Sabit güç bölgesinin sınırlı olması, yüksek hızlarda verimin azalması ve kayıpların artması, rotor sargısı ya da kısa devre çubuklarının varlığı nedeniyle doğal olarak sabit mıknatıslı motorlara göre daha düşük verime sahiptirler. Düşük güç faktörü de asenkron motorun dezavantajları arasındadır. Bu sorunları çözmek için araştırmacılar tarafından önemli aşamalar kaydedilmiştir. Örneğin: sabit güç bölgesini genişletmek için çift invertör kullanımı, düşük hızlarda daha iyi performansa sahip olmak için çift beslemeli asenkron motorları birleştirmek ve tasarım aşamasında rotor sargı kayıplarını azaltmak gibi konularda kayda değer gelişmeler bulunmaktadır [96]. Asenkron motorlar DA seri motorlar kadar yüksek başlangıç torkuna sahip değildirler. Fakat bu dezavantajlar alan yönlendirmeli kontrol (AYM) ya da V/f kontrolü ile kolaylıkla aşılabılır. Asenkron motorların çalışmalarındaki en önemli zorluk karmaşık inverter yapılarıdır [89]. Diğer motor tiplerine göre daha düşük akustik gürültüye ve titreşime sahiptirler. Bütün bunların yanında asenkron motorlar üretim maliyeti ve çalışma koşulları açısından da avantajlı konumdadırlar [90].

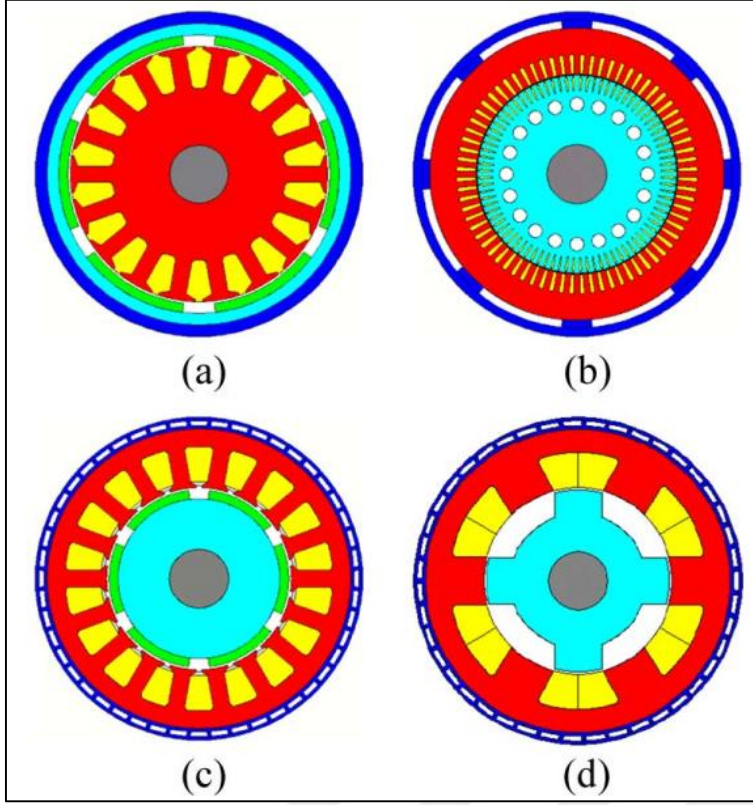
EA uygulamalarında gerekli olan geniş hız bandı aralığının sağlanması için asenkron motorların sabit güç bölgesi baz hızın 4-5 katına kadar genişletilebilir. ASM dezavantajları arasında yüksek kayıplar, düşük güç faktörü ve düşük verimlilik bulunmaktadır. Ayrıca, aynı güç değerlerinde ağırlığı ve hacmi senkron motorlardan daha büyüktür [88]. İnverter beslemeli ASM'de uygun besleme gerilimi ve frekansı seçimi ile hem yüksek başlangıç torku hem de düşük başlangıç akımı elde edilebilirken minimum kayma kontrolü ile yüksek verimli çalışma elde edilebilir [88]. ASM'de rotor bakır kayıpları, rotor frekansı ve rotor voltajı ile doğru orantılı olan motor kaymasına bağlıdır, bu da kaymanın daha yüksek olduğu, dolayısıyla rotor bakır kayıplarının daha yüksek olduğu anlamına gelir. Yüksek verimli ASM'ler, statordan daha az rotor nüve kaybı sağlayan, %3'ten daha az kayma ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır [84]. Demir kaybı ve bakır kaybının her ikisi de benzer olduğunda ASM'nin verimliliği maksimumdur [88]. Bunlara ek olarak özellikle değişken hızlı uygulamalarda frekansa bağlı nüve kayıpları yüksek devirlerde nominal çalışmaya göre fazla olduğu için verim kaybı oluşmaktadır. ASM'ler senkron hız üzerinde çalıştırıldıklarında stator sargılarından ya da kapasitörlerden uyartım akımı sağlanarak jeneratör modunda çalıştırılabilir. Bu da elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme yapabilme kabiliyetinde olduklarını gösterir. Şekil 2.15'de ASM karakteristiği ve parametrelerin hıza göre değişimi görülmektedir.



Şekil 2.15. ASM karakteristiği ve parametrelerin hıza göre değişimi

ASM'ler çoğunlukla dağıtılmış sargılı bir stator ve döküm kalıp kullanılarak üretilen sincap kafesli bir rotordan oluşur. Sargılı rotor ile üretilen ASM daha nadirdir. GM EV1 ve Tesla markasının daha önceki modelleri ASM kullanılan önemli EA'lardan bazılarıdır.

Şekil 2.16'da EA'da kullanılan motorlar iki boyutlu görünümü ile verilmiştir. FDAM ve SMSM motorlar için yüzeye montajlı sabit mıknatıs ve rotora gömülü sabit mıknatıslı motorlar gösterilmiştir.



Şekil 2.16. EA’da kullanılan motor tipleri (a) DA motoru. (b) ASM (c) FDAM (d) ARM [97]

Çizelge 2.1 EA’da sık kullanılan elektrik motorlarının verim, ağırlık, sürücü maliyeti gibi belirleyici özelliklerini avantaj ve dezavantajlarını kısa bir özet olarak göstermektedir. Ayrıca bu motorları kullanılan EA’ya örnekler de Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Bu çizelgeye göre en yüksek güçlü elektrik motoru 215 kW ile Tesla Roadstar’da kullanılmaktadır. Güncel elektrikli araçlar arasında ise 2021 ortalarında üç motorlu Tesla Model S Plaid versiyonunun piyasaya sürülmesiyle yeni performans seviyelerine ulaşıldı ve Model S Plaid, 2022 ortalarında Rimac Nevera’nın piyasaya sürülmesine kadar dünyanın en hızlı hızlanan otomobili oldu [98].

Çizelge 2.1. Sık kullanılan elektrik motorlarının karşılaştırılması [89]

| Kriter | MOTOR TİPİ | | | | |
|------------------------------------|---|---|--|--|---|
| | FDAM | Seri DA | SMSM | ARM | ASM |
| Motor Tipi | Senkron uyarımlı SM | DA Komütatör Harici Uyarım | AA Harici Uyarım | DA Senkron Uyarım | AA indüksiyon sincap kafesli |
| Rotor enerjisi | SM | DA | SM | İndüklenme | İndüklenme |
| Stator enerjisi | DA pals | DA | AA | DA Pals | AA |
| Ortalama maliyet | Yüksek | Düşük | Yüksek | Orta | Orta |
| Ağırlık | Hafif | Ağır | Orta | Orta | Orta |
| Haberleşme metodu | Dahili elektronik | Mekanik Haberleşme | Harici Elektronik | Harici Elektronik | Harici Elektronik |
| Sürücü Maliyeti | Çok yüksek | Düşük | Yüksek | Yüksek | Yüksek |
| Avantajları | Güçlü tork ve hız, Hızlı cevap, Yüksek güç, Uzun ömürlü | Düşük maliyetli, Alan zayıflatma kullanılabilir, Sabit Hız sağlayabilir, Yüksek başlangıç torku | Tork Dalgalanması Yok Yüksek Tork Yüksek Performans Dayanıklı ve daha az gürültülü | Düşük eylemsizlik momenti Özel uygulamalar için uygun Soğutma sorunu yok | Yüksek verimlilik |
| Dezavantajları | Yüksek maliyetli | Bakım gerektirmesi, Sınırlı hız, Alan sargılarının büyük olması | Karmaşık ve pahalı kontrol sistemleri | Pozisyon sersörüne ihtiyaç duyması | Karmaşık kontrol sistemleri |
| Bakım gereklilikleri | İhmal edilebilir | Fırçalar | İhmal edilebilir | İhmal edilebilir, | İhmal edilebilir, |
| Hız kontrol yöntemi | Frekans | PWM ve alan zayıflatma | PWM | Frekans, | Frekans |
| Başlangıç torku | >175% nominalin | >175% nominalin, | >200% nominalin | Nominalin %200'üne kadar | Yüksek |
| Hız aralığı | Mükemmel | Fırçalardan dolayı sınırlı, kolay kontrol | Ayarlanabilir | Ayarlanabilir | Ayarlanabilir |
| Verim | Yüksek | Düşük | Yüksek | Düşük | Yüksek |
| Uygulama alanı | HEA, BEA | HEA, BEA | HEA, BEA | BEA | HEA, BEA |
| Sadece motor ile verimlilik (%) | 80 | 80 | 97 | 94 | 90 |
| Sadece sürücü ile verimlilik (%) | 98 | 85 | 93 | 90 | 93 |
| Motor ve sürücü ile verimlilik (%) | 78 | 78 | 90 | 85 | 84 |
| Örnek | Peugout Citrojen/Berlingo (psa) | Hint Demiryolu | Nissan/Tino, Honda/İnsaght, Toyota/Prius | Holden/Ecommadore | Renault/Kangoo (Fransa), Chervolet/Silverrado |

Çizelge 2.1 yukarıda bahsedilen EA motorlarının puanlamalı karşılaştırmasını göstermektedir. Bu çizelgede güç yoğunluğu, verim, hız aralığı, tork dalgalanması gibi

objektif ölçüm yöntemleri ile değerlendirilebilen kavramlar ve kontrol edilebilirlik, güvenilirlik, teknik uygunluk gibi subjektif ölçüm yöntemleri ile değerlendirilen kavramlar birlikte ele alınmıştır. Bu çizelgedeki her bir değerlendirme kriteri en düşük sıfır, en yüksek 5 puan olmak üzere puanlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek puan 62 olarak ASM’de elde edilmiştir [65].

Çizelge 2.2. En iyi motor alternatiflerinin puanlanması [65, 22]

| Kriter | DA | ASM | SMSM | ARM | SRM |
|---------------------------|------|-----|------|------|------|
| Güç Yoğunluğu | 2,5 | 4 | 5 | 3,5 | 4 |
| Verimlik | 2,5 | 4 | 5 | 4,5 | 4,5 |
| Kontrol Edilebilirlik | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| Güvenilirlik | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Dayanıklılık | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Tork Yoğunluğu | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 |
| Hız Aralığı | 2,5 | 4 | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
| Bakım Gerekliliği | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Tork Dalgalanması/Gürültü | 3,5 | 4,5 | 4,5 | 3 | 3 |
| Aşırı Yük Kapasitesi | 3 | 4 | 4 | 4 | 4,5 |
| Teknik Uygunluk | 5 | 4,5 | 4 | 3,5 | 3,5 |
| Ömür | 3,5 | 5 | 4 | 4,5 | 4,5 |
| Ebat ve Ağırlık | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 |
| Maliyet | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 |
| Toplam | 46,5 | 62 | 60 | 56,5 | 58,5 |

Çizelge 2.2 yukarıda bahsedilen elektrik motorlarını kullanan bazı markalara ait elektrikli araçların motor güçlerini, İYM tüketim bilgilerini, batarya tiplerini ve varsa menzil bilgilerini özetleyen çizelgeyi göstermektedir. Bu çizelgeye göre en yüksek güçlü motor BMW Active EV modelinde kullanılan 125 kW’lık motor ile SMSM’dur. EA kategorisinde yer alan bu araçta 32 kWh’lık batarya ile 151 km’lik menzil sunulmaktadır. En yüksek menzil ise 365 kWh’lık batarya ile Tesla Roadstar 2009 modelinde 365 km olarak yer almaktadır. Hibrit araçlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde İYM tarafında en düşük tüketim Toyota Prius modellerinde 1,8 l/100 km olarak gösterilmiştir.

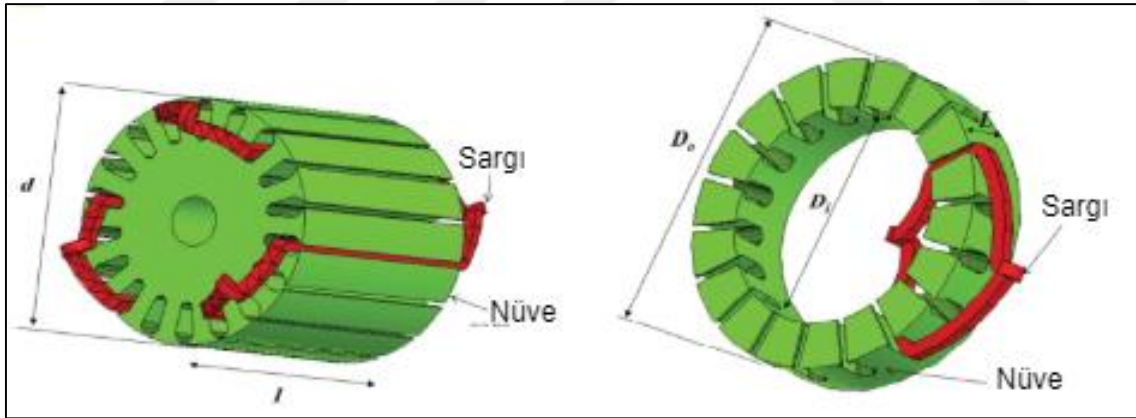
Çizelge 2.3. Endüstrileşmiş EA, PHEA, HEA araç teknoloji özellikleri [99]

| Araç | Kullanılan Motor Tipi, Gücü, Devri | İYM Verileri | Batarya |
|---------------------------|------------------------------------|------------------------|--|
| Honda insight Hibrit 2010 | FDAM, 9,7 kW-1500 rpm | 1,3 L Petrol türevi | 100,8 V, 5,75 Ah |
| Ford Fusion Hibrit | SMSM, 79 kW-6500 rpm | 2,5 L Petrol türevi | 275 V, NiMH |
| Toyota Prius Hibrit 2011 | SMSM, 1,3 kW-1800 rpm | 1,8 L Petrol türevi | 201,6, NiMH |
| Toyota Prius Hibrit 2012 | SMSM, 2,5 kW-1200 rpm | 1,8 L Petrol türevi | Invertör DA Link, 600V |
| Toyota Lexus Hibrit 2010 | SMSM, 123 kW | 3,5 L V6 Petrol türevi | 37 kWh, NiMH |
| GM Volt 2011 | SMSM, 2,5 kW-1200 rpm | 1,4 L Petrol türevi | 16 kWh, 45Ah, Li-Ion |
| Hyundai Sonat Hibrit 2011 | SMSM, 30 kW | 2,4 L Petrol türevi | Li-Polymer, Li-Ion, 375V |
| Tesla Roadstar 2009 EV | ASM, 215 kW | - | 53kWh, Li-Ion, 375 V Menzil: 365 km |
| Mitsubishi imiev | SMSM, 47 kW | - | 16kWh, Li-Ion Menzil: 160 km |
| Renault Fluence EV | SMSM, 70 kW | - | 22kWh, Li-Ion Menzil: 185 km |
| BMW Active EV | SMSM, 125 kW | - | 32kWh, Li-Ion Menzil: 151 km |

3. EKSENEL AKILI MOTORLAR VE SINIFLANDIRILMASI

En eski elektrik makinelerinden bazıları aksenal akı topolojisine sahiptir. Bu anlamda tarihteki ilk aksenal akılı makine 1831 yılında Michael Faraday tarafından tasarlanmıştır [100]. Fakat aksenal akı makinelerini kalıcı mıknatıslarla birleştiren 1974 yılında Campbell olmuştur. 1994 yılında araştırmacılar, kalıcı mıknatıs uyarımı ile küçük bir aksenal akı makinesi sunmuşlardır. Bu makinede sargı dört katmanlı bir tasarıma sahip olup, yüksek direnç dolayısıyla düşük verimlilik elde edilebilmiştir [101].

Endüstriyel uygulamalarda en sık kullanılan motorlar asenkron motorlardır. Bu motorların basit yapıda, güvenilir ve ekonomik olmalarına karşın, verimlerinin düşük olması, hacim olarak fazla yer kaplamaları, nominal hızın üzerinde sorun çıkarmaları ve moment dalgalanmaları gibi dezavantajları da vardır. Aksenal akılı motorların radyal akılı motorlara göre asıl avantajları, güç yoğunluklarının daha fazla, hacimlerinin daha az ve bu sayede ağırlıklarının da az olmasıdır. Aşağıda Şekil 3.1’de aksenal ve radyal akılı motor sargı ve nüveleri görülmektedir.



Şekil 3.1. Aksenal akılı motor ve radyal akılı motor sargı ve nüveleri [102]

3.1. Aksenal Akılı Motorlar

Aksenal akılı makinelerin (EAM) geleneksel makinelere göre iki ana farkı vardır; akı yönü ve stator ile rotor çekirdeğinin yapısı. EAM, geleneksel radyal akılı makinelerine kıyasla aksenal yönde manyetik akı üretirler. Aksenal ve radyal akı yapılarına ilişkin daha önce yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, aksenal akılı makinelerin daha yüksek verimliliğe, güç

yoğunluğuna ve üstün güç-ağırlık oranına sahip olabileceğini göstermiştir [8]. Eksenel akılı ve radyal akılı motorlardaki akım ve akı yolları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Eksenel akılı motor ve radyal akılı motor, akım ve akı yolları [103]

EAASM, aktif malzemelerin yüksek oranda kullanılması ve optimum güç yoğunluğu potansiyeline sahiptir. Eksenel akı yapısı daha büyük bir çap/uzunluk oranına sahip olduğundan ve iç çapı, radyal akı yapısına kıyasla genellikle shaft çapından çok daha büyük olacağından, eksenel akı yapısı daha iyi havalandırma ve soğutma performansı sağlayabilir. Daha yüksek özgül elektrik yüklemesinin ve daha yüksek özgül manyetik yüklemenin olası kullanımı, eksenel akı yapısının boyutunu daha da azaltabilir [8].

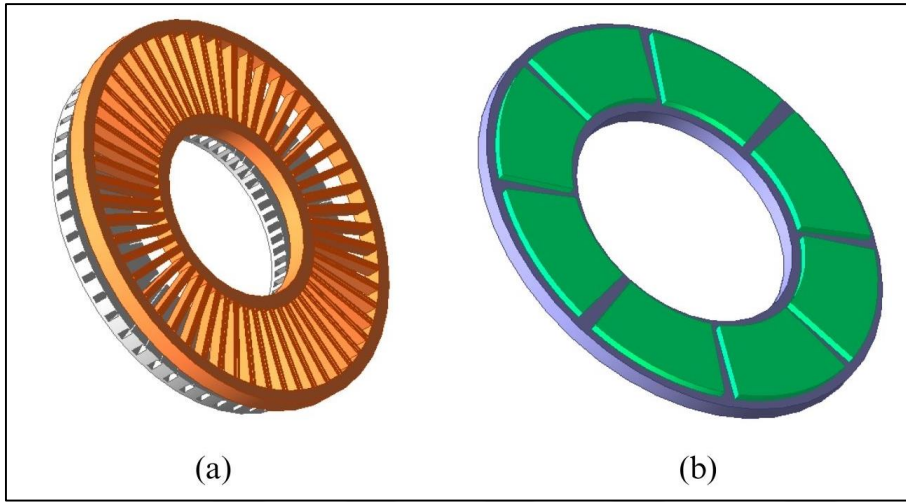
3.1.1. Eksenel akılı motorların sınıflandırılması

Eksenel akılı makineler rotor ve stator yapısına göre veya makinelerdeki stator ve rotor sayısına göre sınıflandırılabilir [43]. Rotor sincap kafesli ise asenkron motor, sabit mıknatıslar rotor yüzeyine monte edilmişse, yüzeye monte sabit mıknatıslı eksenel akılı motor, mıknatıslar içeriye entegre edilmiş/gömülü ise, gömülü sabit mıknatıslı eksenel akılı motor olarak adlandırılırlar. Stator yapısı oluklu, oluksuz ve nüvesiz tipte olabilir. Tüm bu makineler rotor ve stator sayısına göre tek, çift veya çok hava aralıklı ya da diğer bir adıyla çok kademeli olabilirler [100].

3.1.2. Rotor yapısına göre eksenel akılı motorlar

Sincap kafesli rotor, eksenel akılı asenkron motorlarda kullanılır, rotor çubuklarını sincap kafesi birleştirir. Ancak sabit mıknatıslı eksenel akılı motorlarda rotora kalıcı mıknatısları entegre etmek için iki yöntem vardır. Bunlardan ilki, mıknatısları rotor çekirdeğine monte etmektir. Mıknatıslar, makinenin uygulamasına bağlı olarak farklı şekil ve boyutta olabilir. Mıknatısın şekli, makine boyunca akı bağlantısını ve akı dağılımını büyük ölçüde etkiler, bu

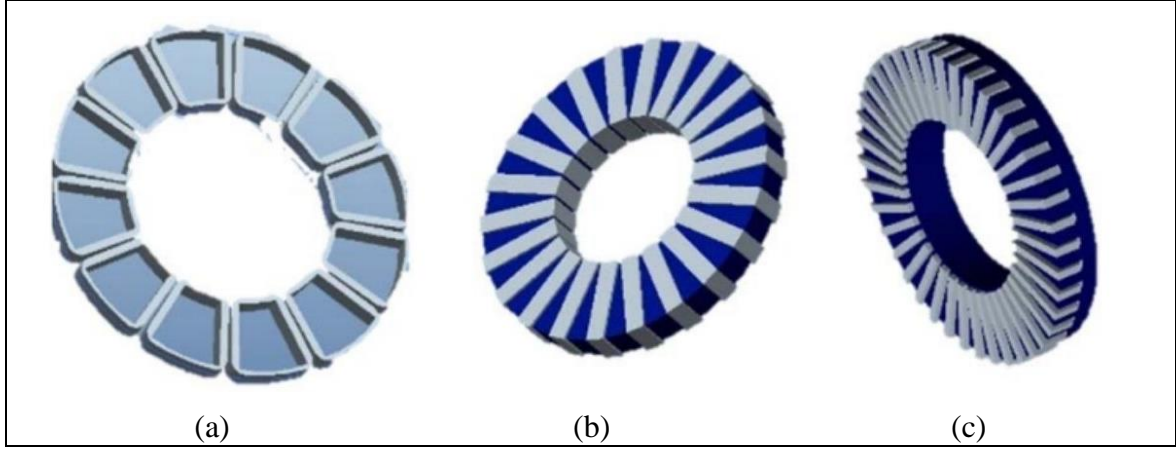
nedenle uygun şeklin seçimi bazı zorluklara neden olabilir. Gömülü mıknatıslar genellikle yapıyı mekanik olarak daha güçlü hale getirmek için rotorun demir çekirdeğinin içine gömülür. Bu yapı ayrıca mıknatısları özellikle yüksek hızlı uygulamalarda yüksek olan merkezkaç kuvvetlerinden korur. En büyük dezavantajı karmaşık ve zor üretim sürecidir. Şekil 3.3'te, sincap kafesli rotor ile yüzeye monteli sabit mıknatıslı rotor tipleri görülmektedir.



Şekil 3.3. (a) Sincap Kafesli Rotor, (b) Yüzeye Monte SM Rotor

3.1.3. Stator yapısına göre aksel akılı motorlar

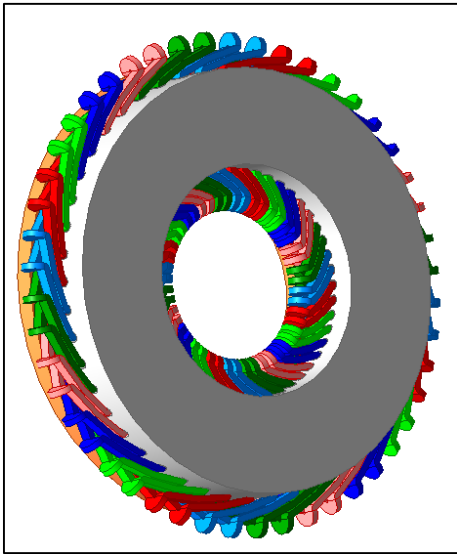
Eksenel akılı motorlar oluklu veya oluksuz olarak (Şekil 3.4b, 3.4c), üretilebilir. Oluklu yapıda akı dalgalanması, dış kayıpları ve tutma torku gibi istenmeyen bileşenler bulunmaktadır. Oluklu statorun olumlu yanı, sağlamlık ve daha dar etkili hava aralığıdır [104]. Ayrıca, farklı sargı yapıları elde etmek amacıyla oluklar izin verdiği için farklı akı dağılım seviyeleri de elde edilebilir [100]. Oluksuz tasarımda (Şekil 3.4b), oluklar nedeniyle ortaya çıkan dezavantajlar oluşmaz ve bu da genel olarak daha yüksek verimlilik sağlar. En büyük dezavantajı, mukavemetinin az olmasıdır. Nüvesiz statorda (Şekil 3.4a) ise, stator çekirdeği olmadığı için stator-rotor çekim kuvvetleri mevcut değildir. Ana akının stator nüvesinden çevresel olarak geçmediği ve bir rotordan diğerine doğrudan geçtiği makinelerde, stator çekirdeği elimine edilerek yalnızca sargılardan oluşan çekirdeksiz bir stator elde edilebilir. Nüvesiz statorlar, azaltılmış ağırlık, statorda sıfır demir kaybı gibi birçok avantaj sunar [100].



Şekil 3.4. (a) Nüvesiz Stator (b) Oluksuz Stator (c) Oluklu Stator [100]

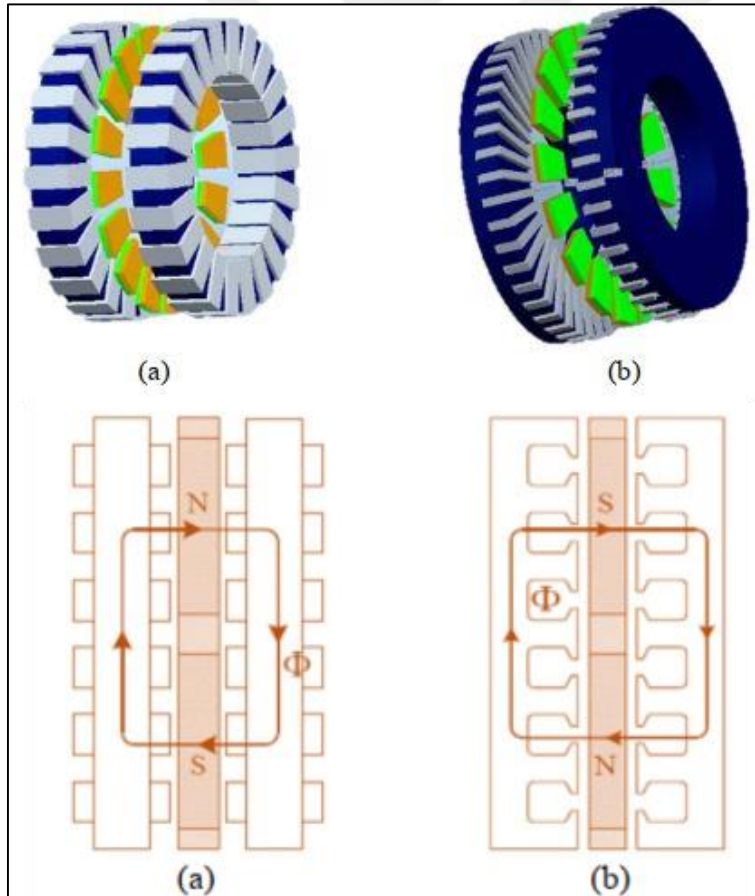
3.1.4. Rotor ve stator sayısına göre aksel akılı motorlar

Tek hava aralıklı ya da tek taraflı aksel akı topolojisi, en sade topoloji olup, sadece bir stator ve rotora sahiptir (Şekil 3.5). Yüze monteli veya gömülü kalıcı mıknatıslara sahip olabilir ve stator, söz konusu uygulamanın tipine bağlı olarak oluklu veya oluksuz olabilir. Akı yönü çevreseldir, bu nedenle akı motora aynı taraftan girer ve çıkar [100]. Bu tip makinelerin en büyük dezavantajı, üretilen düşük güç ve stator ile rotor arasındaki yüksek çekim kuvvetidir. Bu kuvvet makine mukavemetinin üzerine çıktığında makinenin şeklini bozabilir. Stator dişlerinin çıkarılması bu kuvveti önemli ölçüde azaltabilir [100].



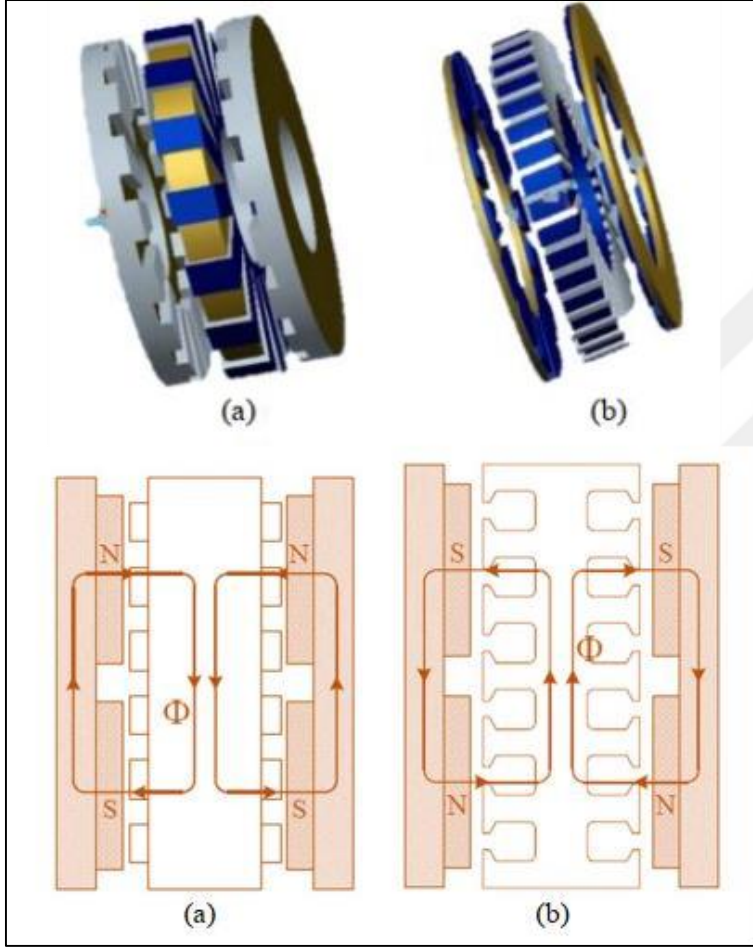
Şekil 3.5. Tek Stator- Tek Rotor EAM

Çift hava aralıklı ya da çift taraflı eksenel akılı motor, rotorun makineye yerleştirilmesine göre iki kategoriye ayrılabilir. Bunlar; iç rotor tipi veya dış rotor tipi olabilir. İç rotor topolojisinde, rotor iki stator arasında bulunur. Bu tür bir düzenlemenin avantajı, ana akı nüvenin içinden geçmediği için rotor nüvesinin elimine edilebilmesidir, böylece nüvesiz bir rotor elde edilir [100]. Bu tip bir düzenlemenin bir başka olumlu yanı, rotor her iki statordan eşit uzaklıkta olduğu için stator ve rotor arasındaki eksenel çekim kuvvetlerinin dengelenmesidir. Bununla birlikte en önemli dezavantajları, uç sargılarının uzun olması ve bu sebeple daha yüksek bakır kayıplarının oluşmasıdır. Eksenel Akılı İç Rotorlu (EAİR) motor ayrıca daha fazla endüktans üretir ve tüm bunlar verimliliğin düşmesine neden olur. Oluklu ve oluksuz statorlu EAİR ve ayrıca karşılık gelen akı yolları Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Stator sargılarının bağlantı şekline göre NN tipi veya NS tipi olarak uyarılabilirler.



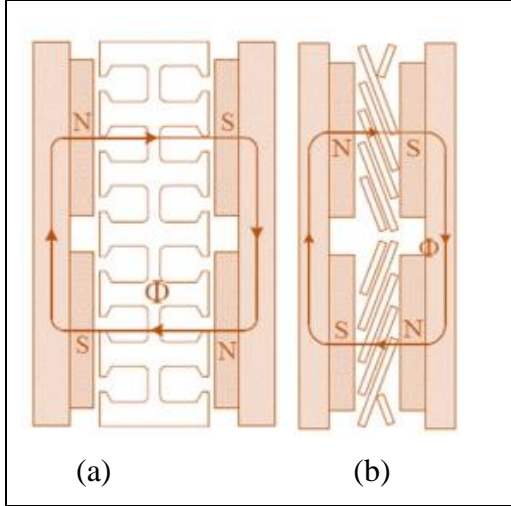
Şekil 3.6. (a) Oluksuz (b) Oluklu çift stator içten tek rotorlu [100]

Çift taraflı dış rotor düzeni, iki rotor arasındaki bir statora sahiptir. Bu motor ayrıca, makine içindeki akı yönlerine göre, NN tipi TORUS ve NS tipi TORUS olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. NN tipi TORUS yapısında rotorlar üzerindeki mıknatıslar, bir rotorun N kutupları diğer rotorun N kutuplarına bakacak şekilde düzenlenir, böylece aşağıda Şekil 3.7’de gösterildiği gibi çevresel akı yolları elde edilir.



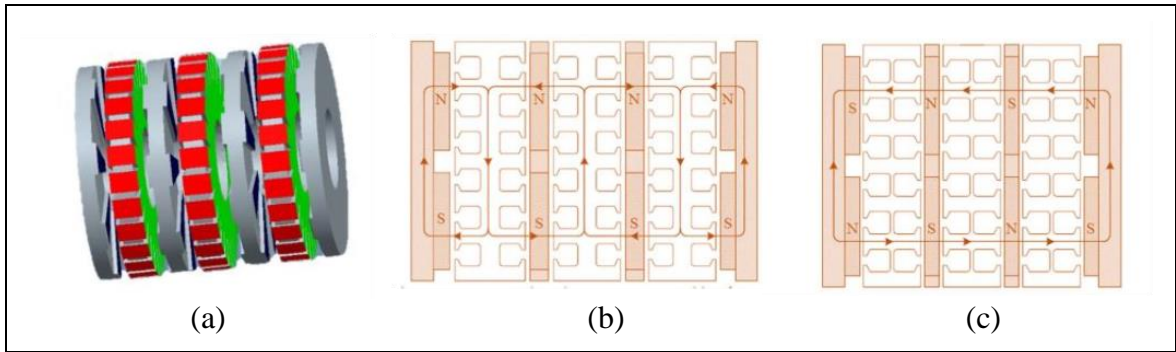
Şekil 3.7. (a) Oluksuz (b) Oluklu çift rotor dıştan tek statorlu [100]

NS tipi TORUS'ta, bir rotorun N kutupları, diğer rotorun S kutuplarına bakar ve tamamen aksel olarak hareket eden bir akı ile sonuçlanır. NS tipi akı yolları Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Şekilde akının bir rotordan diğerine aksel olarak hareket ettiği ve statorun ortadan kaldırılarak nüvesiz bir aksel akı yolu elde edilebilir. Dış rotor topolojisinin avantajları, demir ve bakır kayıplarını azaltması ve daha yüksek güç yoğunluğunun elde edilmesidir. Rotorlar, sargıların yanında dönerken fan gibi çalıştığından, bu düzenleme sayesinde soğutmanın daha kolay olduğu söylenebilir Şekil 3.9’de NS tipi oluklu ve oluksuz TORUS yapıdaki motorlar gösterilmiştir.



Şekil 3.8. (a) NS tipinde oluklu TORUS yapı akı dağılımı (b) NS tipinde oluksuz TORUS yapı akı dağılımı (Çift Rotor-Tek Statorlu EADR) [100]

Çok katmanlı eksenel akılı makineler, TORUS veya iç rotorlu olabilir. Genel olarak N sayıda stator ve N+1 sayıda rotor vardır. Çok katmanlı topolojinin temel amacı gerekli performansı elde etmek için mümkün olduğu kadar çok rotor ve statorun alternatif olarak yerleştirilmesidir. Akı yolları da şekillerde gösterildiği gibi TORUS veya iç rotorlu topoloji ile aynıdır. Temelde diğer eksenel akılı topolojiler ile aynı makine olduğundan, fakat sadece daha fazla aşamaya sahip olduğundan, benzer yapılar için benzer avantajlar sunarlar. Radyal yönde boyut sınırlaması ve yüksek güç talebi olduğunda, disk sayısını artırmak güç çıkışını artıracığından çok kademeli makineler en iyi alternatiftir [105]. Şekil 3.9'da çok katmanlı NN ve NS topolojisi için EAM ve akı yolları gösterilmiştir.



Şekil 3.9. (a) Çok katmanlı EAM (b) NN Tip için akı yolu (c) NS Tip için akı yolu [100]

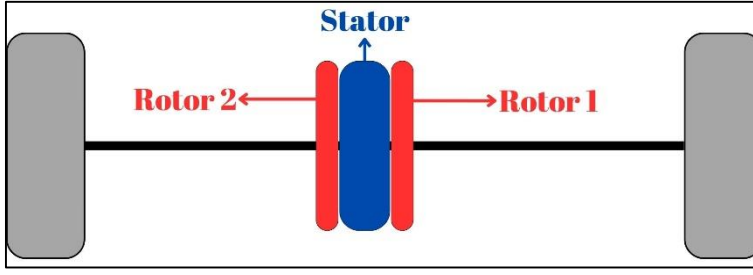
Rotor ve stator sayısına göre eksenel akılı motorların avantaj ve dezavantajları aşağıda Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı eksenel akılı motor topolojilerinin karşılaştırılması

| Eksenel Akı Topolojisi | Avantajlar | Dezavantajlar |
|------------------------|---|--|
| Tek Stator-Tek Rotor | Tasarımı ve üretimi kolaydır. | Düşük güçlü uygulamalar için uygundur. Rotor ve stator arasındaki çekim kuvveti yüksektir. |
| Çift Stator-Tek Rotor | Akı içinden geçmediği için rotor nüvesi elimine edilebilir. Rotor ortada olduğu için stator ve rotor arasındaki çekim kuvvetleri dengelenir. | Uzun sargı uçlarından dolayı yüksek bakır kayıpları vardır. Verimliliğin azalmasına yol açan daha yüksek endüktans üretilir. |
| Tek Stator Çift Rotor | Daha düşük demir ve bakır kayıpları, yüksek güç yoğunluğu sağlar. Stator sargılarının etrafındaki rotorların dönüşü, sargılar için soğutma fanı görevi görür. | Etkin hava aralığı alanı çift stator tek rotorlu motordan daha büyüktür. Çekim kuvvetleri daha büyüktür. |
| Çok Katmanlı EAM | Makinenin aynı radyal boyutundan daha yüksek güç üretilebilir. | Makinenin eksenel uzunluğu artar. |

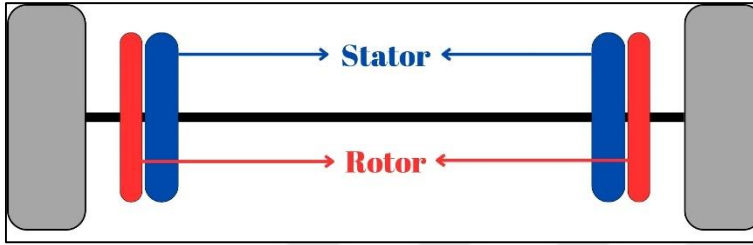
3.1.5. Eksenel akılı motorların kullanım alanları

Elektrikli araç sektöründeki gelişim ile eksenel akılı motorların bu araçlarda kullanımı gündeme gelmiştir. Eksenel akılı makinelerin radyal akılı makinelere göre daha yüksek tork yoğunluğu sağlaması gibi avantajlarının yanında sınırlı hacimde sağladıkları performans çıktısı da yüksektir. Eksenel akılı motorlar ile yapılan çalışmalar sayesinde elektrikli araçlar alanında başarıyla tamamlanan uygulamalar bulunmaktadır [106]. Literatürde diferansiyeli ortadan kaldırmaya olanak sağlayan çift rotorlu eksenel akılı motorlar ve tahrik uygulamaları için eksenel akılı iç mıknaşlı motorlar da önerilmiştir [107, 108]. Çift rotorlu topolojileri elektrikli araçlarda diferansiyel görevini de üstlenecek şekilde kullanmak için gerekli sistem Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Çift rotorlu topoloji sayesinde rotorlar farklı hızlarda dönebilmektedir. Bu sayede viraj almalarında gerekli olan farklı hızlarda dönme koşulu diferansiyel yerine direkt olarak eksenel akılı motor ile sağlanmış olur [108].



Şekil 3.10. EA'larda çift rotorlu çekiş motorları [108]

Şekil 3.11'de gösterilen tek hava aralıklı topoloji kullanılan sistem genel olarak radyal akılı motor ile tahrik edilen bir elektrikli araç ile benzer bir sistematik ile çalışır [108].



Şekil 3.11. EA'larda Tek hava aralıklı çekiş Motorları [108]

Radyal akılı motorlar için sınırlar ve dezavantajlar şu şekilde özetlenebilir.

- Rotor oluk uçlarında akı yolu daralır,
- Şaft uzunluğu fazladır,
- Soğutma için fan gereklidir,
- Rotor çekirdeği görece verimsiz kullanılır,
- Motor paket boyunun uzun olması gerekir çünkü tork sabit bir hava aralığı çapında üretilir. Bu da aksenal akılı motora göre etkili miktarda küçüktür. Aksenal akılı motorda tork üretimi sabit bir hava aralığında radyal olarak artar.

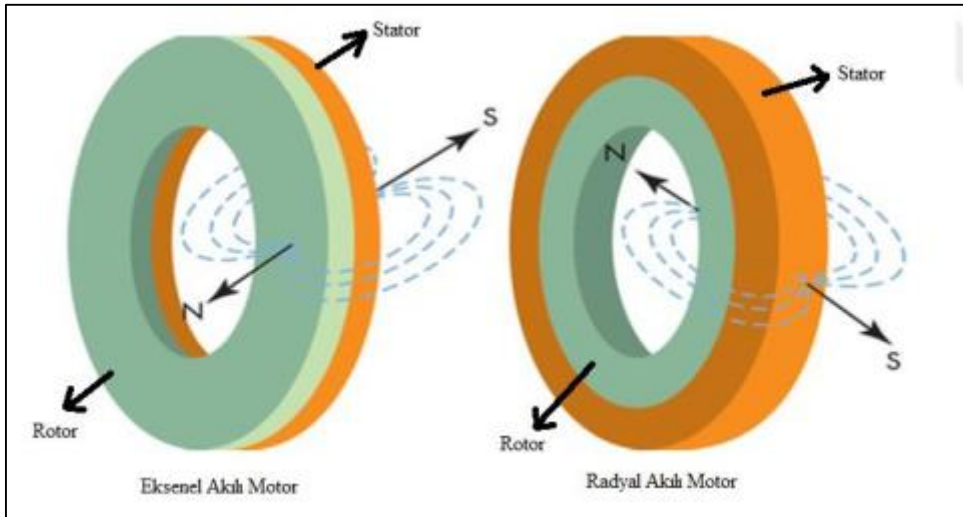
Radyal akılı motorun geometrisinde, bir aksenal akı motoruna benzer değişiklikler olmadıkça, bu sınırlamalar gerekli şekilde aşılamaz. Bu sınırlamalar göz önünde bulundurulduğunda aksenal akılı motorların avantajları şu şekilde özetlenebilir,

- Rotor doğal fan gibi çalıştığı için soğutma daha kolay yapılır,
- Yüksek tork üretimi için geniş aksenal uzunluk gerekli değildir,
- Oluklarda akı yoğunluğu değişmez,

- Rotor nüvesi etkin bir şekilde kullanılır,
- Çoklu hava aralığı topolojisi ile aynı anda farklı hızlarda çalıştırılabilir,
- Güç ve tork yoğunluğu yüksektir,
- Şaft boyu kısadır,
- Modüler yapılıdır.

3.2. Eksenel Akılı Asenkron Motorlar

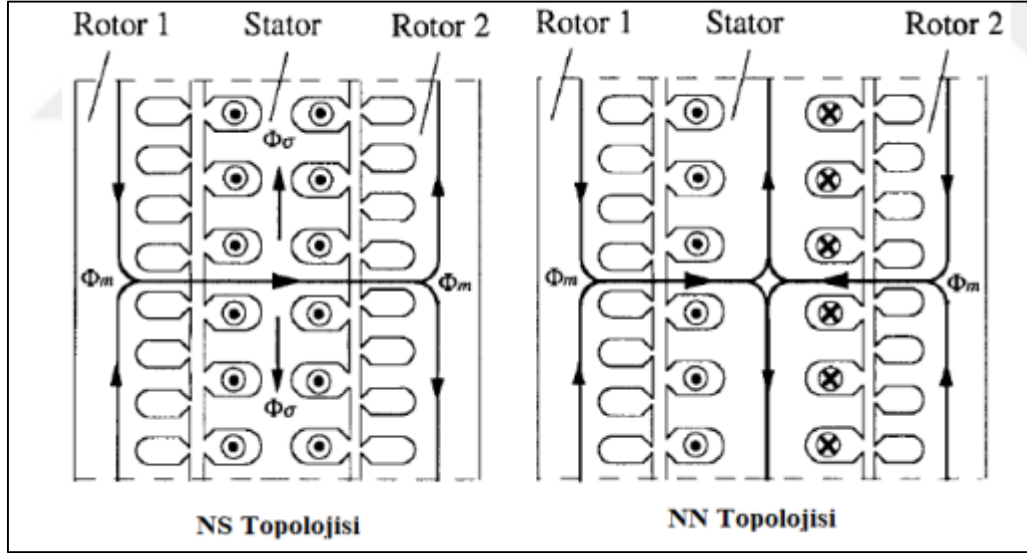
EAASM eksenel akılı indüksiyon motoru olarak da adlandırılabilir. Rotor üzerinde elektriksel ya da mıknatıslarla sağlanan bir uyartım olmadığından, bunun yerine kısa devre çubukları yani sincap kafes bulunur. Yani statordan sağlanan akımın rotor üzerinde bir gerilim indüklemesi ve bu gerilimin rotor çubuklarından bir akım akmasına sebep olması ile dönme hareketi elde edilir. EAASM’lerde stator sargıları radyal olarak konumlanır bu sayede akı eksenel olarak elde edilir. Geleneksel yapıdaki ASM’ler radyal akılı motorlardır. Bu motorlarda stator sargıları dönme hareketine paralel olarak yerleştirilmiştir. Dolayısıyla bu sargılarda akan akım radyal bir akıya sebep olur. Bu sebeple bu motorlara radyal akılı motor denir [109]. Şekil 3.12’de eksenel akılı ve radyal akılı motorların manyetik alan şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.12. Eksenel akılı ve radyal akılı motor manyetik alan şekilleri [110]

Çift rotor – tek statorlu EAASM statora uygulanan bir veya üç fazlı sinüsoidal gerilimin etkisiyle stator nüvesindeki akı yönüne bağlı olarak oluşacak olan kutuplanmaya göre NN ve NS tipi olmak üzere iki farklı topolojide elde edilir. Ayrıca bu topolojiler oluklu ya da

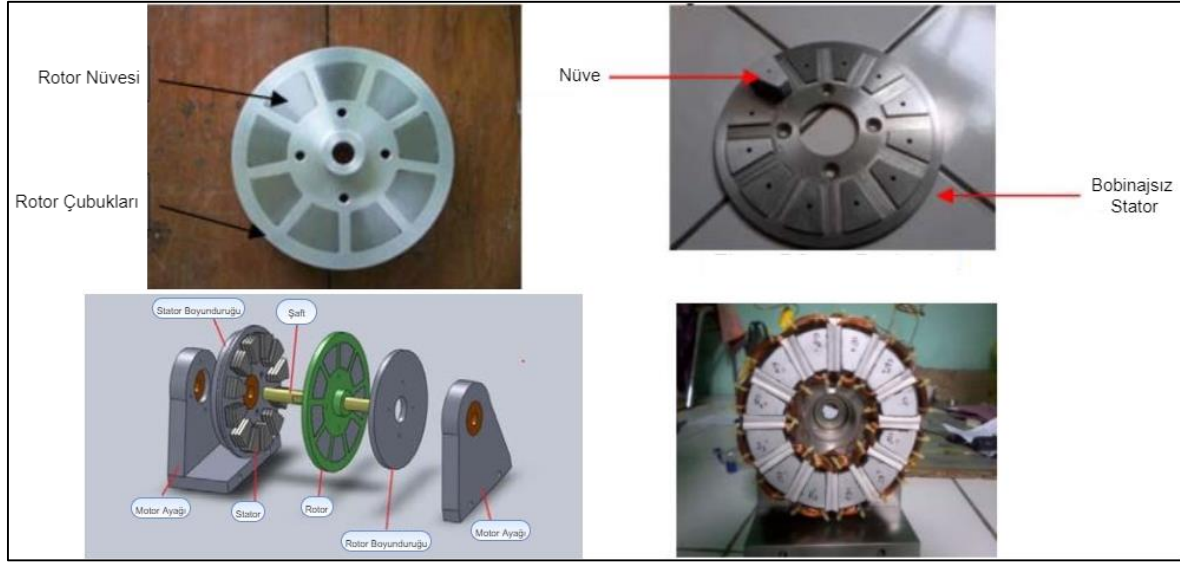
oluksuz olabilir. Oluksuz tip EAASM sadece NN tipi olabilir. Bu topolojilerde meydana gelen kutuplanmalar aşağıda Şekil 3.13’de gösterilmiştir [102]. NN topolojisinde akı stator üzerinden de geçtiği için nüve kalınlığı daha fazla olacaktır.



Şekil 3.13. EAASM Tek stator – Çift Rotor topolojileri [102]

EAASM'lerin nüvesi akı yolunun verimliliği için ferromanyetik malzemeden üretilmelidir. Bu malzeme mevcut motor üreticileri tarafından genellikle demir, toz kompozit ve amorf olarak tercih edilmektedir. Süper iletkenler de EAASM tasarımlarında ve üretimlerinde kullanılabilir [109]. Rotor çubukları ise rotorun yapısına bağlı olarak nüve üzerinde alüminyum veya bakır kısa devre çubukları kullanılarak üretilir.

Manyetik çekirdek bütünleşik bir yapıda üretilebilir. Fakat eddy kayıplarını azaltmak için oluklar dairesel olarak sarılmış bir şerit üzerinde işlem yapılarak elde edilmelidir. Bu şekilde yapılan üretimde lamine yapı elde edilebilmektedir. Şekil 3.14’de bir EAASM’ye ait stator, sargı, rotor, kısa devre kafesi ve nüveler gibi bileşenleri gösteren fotoğraflar görülebilir.



Şekil 3.14. EAASM Birleşimi & Stator ve Rotor yapısı [111]

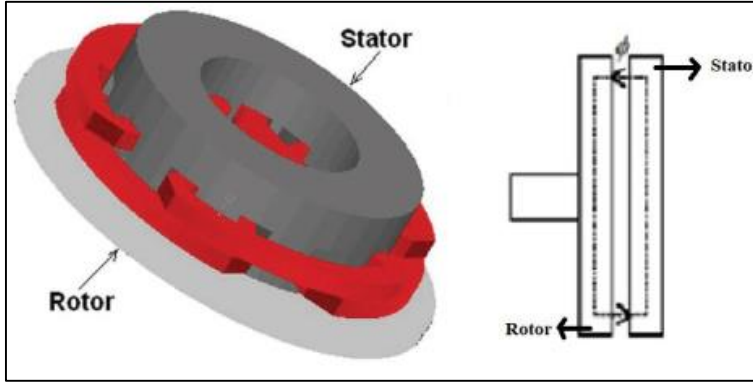
3.2.1. Eksenel akılı asenkron motorların sınıflandırılması

Eksenel akılı motorlarda çap ve motor paket boyu oranı yüksek olduğundan, başka bir ifadeyle motor çapı mil çapından büyük olduğundan, radyal akılı motorlara göre daha kolay soğutulabilirler. Aynı özelliklere sahip radyal akılı motor ile eksenel akılı motor kıyaslandığında eksenel akılı motor, maksimum tork ve tork yoğunluğu açısından iki kat daha avantajlı durumdadır [111]. EAASM'ler stator ve rotor sayılarına göre sınıflandırılabilirler [109]. Buna göre sınıflandırma:

- Tek hava aralıklı (tek stator – tek rotor) EAASM
- Çift hava aralıklı EAASM (Çift stator – tek rotor, Çift rotor – tek stator)

Tek hava aralıklı EAASM

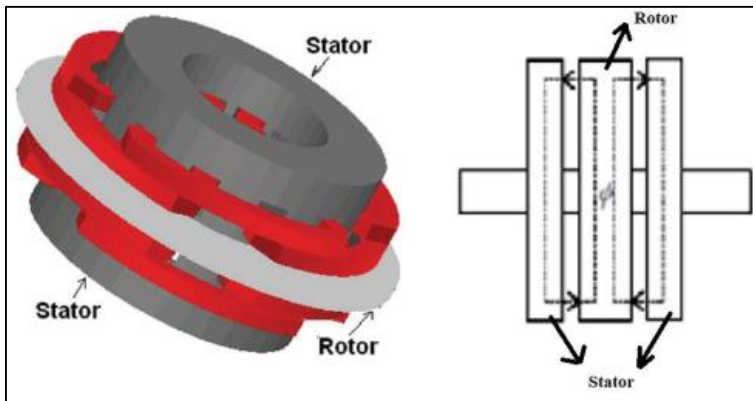
Tek stator–tek rotorlu yapıda (Şekil 3.15), çok katmanlı yapılara göre paket boyu daha kısadır. Statordaki akımdan elde edilen manyetik akı boyunduruğları ve hava aralığı üzerinden yolunu tamamlar. Tek taraflı veya tek hava aralıklı olarak da adlandırılan bu yapı EAASM'ler arasında en basit uygulanabilir yapıdır. Üretilen tork, çok katmanlı yapılara göre daha sınırlı olacağı için görece daha düşük güçlü uygulamalarda kullanılabilir [11].



Şekil 3.15. Tek Stator- Tek Rotorlu EAASM ve akı yolu [11]

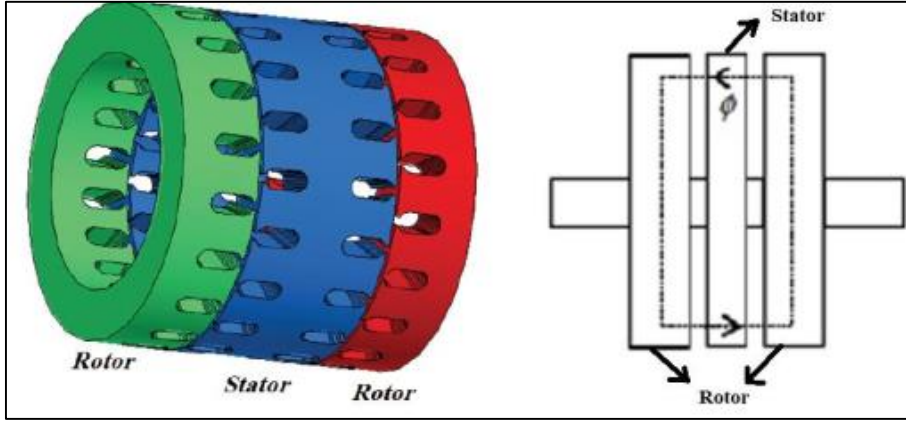
Çift hava aralıklı EAASM

Çift hava aralıklı yapıda rotor veya statordan bir tanesi birden fazla sayıdadır. Bu sebeple iki adet eksenel hava aralığı bulunur. İki stator arasında bir rotor ya da iki rotor arasında bir stator vardır. Tek taraflı EAASM'lere göre daha yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Her iki seçenekte de daha yüksek tork/güç yoğunluğu vardır. Ayrıca arada kalan parça rotor ya da stator ayırmaksızın dengeli eksenel kuvvete maruz kalacağı için tek taraflı motorlara göre avantajlıdır [11]. Aşağıdaki şekillerde çift stator – tek rotorlu yapı (Şekil 3.16) ve çift rotor – tek statorlu yapılar (Şekil 3.17) ve bu yapılarla ait akı yolları gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Çift Stator – Tek Rotorlu yapı ve akı yolu [11]

Çift rotor – tek statorlu yapıya dikkat edilecek olursa akı, stator üzerinde herhangi bir bölünmeye uğramadan rotorlar üzerindeki yolunu tamamlamaktadır. Bu avantaj nüvesiz tasarımlar için olanak sağlar.



Şekil 3.17. Çift Rotor – Tek Statorlu yapı ve akı yolu [11]

3.2.2. Eksenel akılı asenkron motor uygulamaları

EAASM'ler düzlemsel ve ayarlanabilir hava aralığı, daha iyi güç-ağırlık ve çap-uzunluk oranı, kompakt yapıları ve özellikle çok kutuplu makinelerde (12'den fazla) daha iyi verimlilik gibi özellikleriyle fanlar, tekerlekler, pompalar, ev içi uygulamalar ve elektrikli araçlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir [11].

Evans Electric firması tarafından elektrikli araç uygulamaları için geliştirilmiş 90 kW gücünde ve 300 Nm tork değerindeki yüksek güç yoğunluğuna sahip çift stator-tek rotorlu, bir asenkron motor Şekil 3.18'de görülmektedir. Geliştirilen bu motor benzer özellikteki radyal akılı muadiline göre %70 daha küçük boyutlardadır. Bu motor standart bir Tesla Roadster'daki ASM ile aynı nominal torca sahipken, çok daha kısa eksenel uzunluğu sayesinde hacminin 1/3'ü kadardır. Yağ soğutmalı 3 fazlı motor, hızlı bir şanzımanın kavramasına entegre edilebileceği P2 hibrit uygulamaları için tasarlanmıştır. P2 hibrit uygulaması Borgwarner firması tarafından tanıtılan İYM ile şanzıman arasına konumlandırılan elektrik motorunu tanımlamaktadır [112].



Şekil 3.18. Evans Firmasının geliştirdiği EAASM [112]

Fan, pompa vs. gibi düşük güçlü ev tipi uygulamalarda da tek fazlı EAASM'ler bazı avantajlara sahiptir. Statorun geometrik yapısı bu uygulamalar için uygundur. Mekanik yükün karşılandığı rotor bölümü, fan kanatları, pompa pervanesi vs. ile entegre edilebilir. Ayrıca düşük güçlü olmaları nedeniyle stator ve rotor arasındaki aksel kuvvet fazla olmadığından tek taraflı EAASM'de önemli bir dezavantaj olan aksel çekim kuvveti de bu uygulamalar için önemsiz bir hal alır.

Radyal akılı alternatiflerine göre, stator demir kayıpları, stator bakır kayıpları ve rotor bakır kayıpları yönünden EAASM avantajlı konumdadır. Fakat rotor eddy kayıpları EAASM'lerde daha yüksektir. Dolayısıyla bu yönüyle dezavantajlı konumdadır. Ayrıca kısa rotorlu ve geniş çaplı olmaları sebebiyle sürtünme kayıpları fazla olacağı için yüksek hızlarda çalıştırılmaya uygun değildirler. Başka bir deyişle rotor nüvesi yüksek hızlarda çalışma açısından mekanik dayanım yönüyle yetersizdir. Radyal akılı benzer motorlara göre özellikle tek taraflı tek stator-tek rotorlu EAASM topolojisinde aksel çekim kuvveti fazla olacağı için bir dezavantaj olarak göz önünde bulundurulmalıdır [11].

Aynı torku üreten 6 kutuplu, 380V 50Hz beslemeli, 36 stator oluklu ,32 rotor barı olan EAASM ve radyal akılı ASM ile sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerinin yapıldığı bir çalışmada, EAASM'nin radyal akılı ASM'ye göre daha yüksek verimliliğe ve güç yoğunluğuna sahip olduğu ortaya koyulmuştur [8]. Bu çalışmada sunulan karşılaştırmalı grafiklerde aksel ve radyal akılı ASM'ye ait ANSYS Maxwell ile yapılan sonlu elemanlar analizinin sonuçları gösterilmiştir. Her iki motor da altı kutuplu, 50 Hz'de 380V besleme, 36 stator oluğu ve 32 rotor çubuğu ile tasarlanmıştır. Karşılaştırmalarda kararlı durum ve geçici

durum performans parametreleri kullanılmıştır. Motorların tam yükte, boşta ve kademeli yüklerdeki testleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aksel akılı ASM'nin %60'ın üzerindeki yüklerde radyal akılı ASM'ye göre daha yüksek verimliliğe sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca aksel akılı ASM'nin, radyal akılı ASM'ye göre daha yüksek güç/ağırlık oranına sahip olduğu anlaşılmaktadır [8].



4. ELEKTRİKLİ ARAÇ MOTORU PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Analitik modelleme için, sürüş çevrimlerinde temsil edilen araç hareketlerinin dinamikleri ve araç sistemleri formüller yardımıyla matematiksel olarak ifade edilmelidir. Newton'un ikinci yasasına göre, bir nesnenin ivmesi, üzerine uygulanan net kuvvetle orantılıdır. Başka bir deyişle, üzerine uygulanan net kuvvet sıfır olmadığında bir nesne hızlanır. Benzer şekilde, yol üzerindeki bir araç, yerçekimi kuvvetinin, hava direncinin ve lastik yuvarlanma direncinin üstesinden gelen itiş/çekiş kuvveti nedeniyle hareket eder. Aracın hareket ettiği ivme ve hız, aktarma organı tarafından tekerleğe iletilen güce, aracın boş kütesine (araçtaki tüm bileşenler ve yolcular dahil), yolun durumuna ve aracın aerodinamiğine bağlıdır [113].

4.1. Araç Verileri ve Araç Performans Özellikleri

Tahrik sisteminden beklenen güç, bir aracın performans beklentilerine ve araç fiziksel verilerine bağlıdır. Bu tez çalışmasında tasarlanan motorun, referans bir aracın teknik verilerine göre sağlaması gereken kriterler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

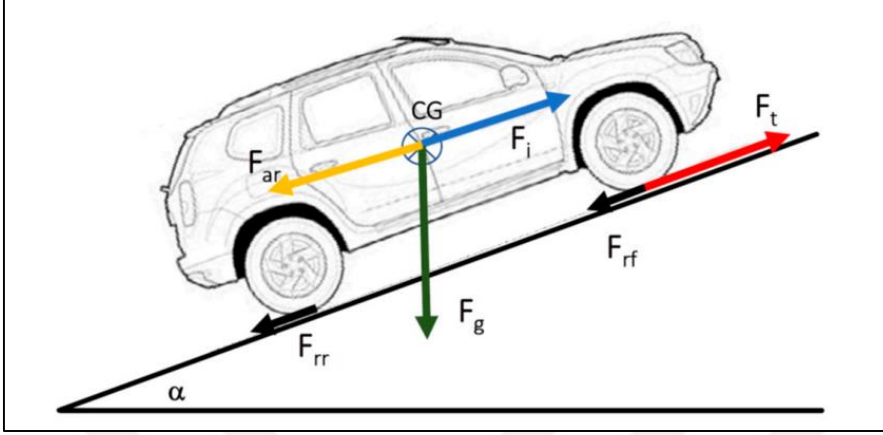
Çizelge 4.1. Referans araç verileri

| | | |
|----------------|------------------------------|------|
| M | Araç ağırlığı (kg) | 1250 |
| C_d | Sürüklenme katsayısı | 0,2 |
| A_f | Ön kesit alanı (m^2) | 2 |
| V_{max} | Maksimum hız (km/h) | 110 |
| 0-100 hızlanma | 0-100 hızlanma süresi (s) | 15 |
| g | Yerçekimi ivmesi (m/s^2) | 9,8 |
| P | Hava yoğunluğu (kg/m^3) | 1,25 |

4.2. Elektrikli Tahrik Motoru Gücünün Belirlenmesi

Bir elektrikli araçtaki tahrik motorunun, aracı hızlandırmak ve nominal hızda hareket ettirmek için yeterli gücü sağlaması gerekir. Aslında bu güç, yuvarlanma, aerodinamik ve

tırmanma dirençlerinin toplamından oluşan ve yol yükü olarak adlandırılan dirençlerin üstesinden gelebilmeyi ifade eder [114].



Şekil 4.1. Eğimli bir yolda bir araç üzerindeki direnç kuvvetleri [114]

Şekil 4.1, ağırlık merkezi CG olan bir araç üzerindeki kuvvet vektörlerini göstermektedir. Yuvarlanma direnci kuvveti F_{rr} olarak ifade edilmiş olup yol yüzeyinde hareket eden tekerlekler tarafından üretilir. Bu direncin değeri, Eşitlik (4.1)'de gösterildiği gibi araç kütlesine ve yol açısına bağlıdır.

$$F_{rr} = f_{rc} mg \cos \alpha \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)'de f_{rc} lastiğin yuvarlanma direnci katsayısını ve α yol açısını gösterir. f_{rc} değeri neredeyse sabittir ve araç hızıyla pek değişmez. f_{rc} 'nin kabul edilen değeri 0,015'tir. Ancak elektrikli araçların geliştirilen özel lastikleri ile 0,005'e düşürülmüştür [115]. Araç kütlesi m ile yerçekimi ivme sabiti ise g ile ifade edilir.

F_{ar} , Şekil 4.1'deki aerodinamik sürükleme kuvvetini gösterir. Bu direnç kuvveti, araca etki eden hava kaynaklı oluşur ve değeri, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi araç ön alanına, araç hızına ve karşı rüzgâr hızına bağlıdır.

$$F_{ar} = 0,5 \rho C_d A_{vf} (V + V_w)^2 \quad (4.2)$$

Eşitlik (4.2)'de ρ hava yoğunluğunu, C_d aerodinamik sürtünme katsayısını, A_{vf} aracın ön alanını ve V ve V_w sırasıyla araç hızını ve karşı rüzgâr hızını temsil eder. Hava yoğunluğu değeri nem, yükseklik ve sıcaklığa göre değişir ancak çoğu durumda tipik değeri $1,201 \text{ kg} / \text{m}^3$ 'tür. C_d 'nin tipik değeri 0,3'tür. Ancak elektrikli araçların ana bileşenleri geleneksel araçlara göre daha esnek yerleştirilebildiği ve soğutma için daha az kanala ve araç altı boru tesisatına ihtiyaç duyduğu için elektrikli araçlarda bu değer 0,2'ye düşürülebilir [115]. Beaufort ölçeğine göre rüzgâr hızının ortalama değeri 5 m/s olarak alınabilir [116].

F_{hr} Şekil 4.1'deki yokuş tırmanma direnç kuvvetini göstermektedir. Bu kuvvetin değeri, Eşitlik (4.3)'te gösterildiği gibi yol açısının bir fonksiyonudur. α yol açısının araç düzlemine göre derece olarak değeridir.

$$F_{hr} = mg \sin(\alpha) \quad (4.3)$$

Tahrik motorundan elde edilmesi gereken güç, aracın farklı konumları için değişir. Başka bir deyişle aracın 0-100 hızlanması, en yüksek hızı, yokuş tırmanma performansı gibi sınır değerlerinde farklı güç seviyeleri hesaplanır. Buna göre belirlenen referans aracın farklı koşullar altındaki güç gereksinimi hesaplamaları sonraki bölümlerde yapılmıştır.

4.2.1. İlk hızlanma için gerekli tahrik gücü

Elektrikli aracı duran konumundan hızlandırmak için gereken gücün değeri, araç teknik verilerinde belirtilen kısıta göre hesaplanır. Başka bir deyişle genellikle 0-100 hızlanması ile belirtilen ivme değerine göre hesaplanmalıdır. Buna göre F_d ile gösterilen tahrik kuvveti, a ile gösterilen aracın ilk ivmesi ve yol yüklerinin toplanmasıyla elde edilir. Bu hesaplamalarda aracın düz bir yolda olduğu varsayılır yani eğim açısı $\alpha = 0$ olacaktır ve bu yüzden F_{hr} değeri de sıfıra eşit olacaktır.

$$F_d = ma + F_{rr} + F_{ar} + F_{hr} \quad (4.4)$$

F_{rr} ve F_{ar} eşitlikte tekrar yerine yazıldığında Eşitlik (4.5) elde edilir. İşlemlerde km/h olarak verilen hız değerleri m/s birimine çevrilerek hesaplamalar yapılmalıdır. Bu çevirme işleminde km/h'den m/s'e geçiş katsayısı 3.6'dır.

$$F_d = ma + f_{rc}mg + 0,5\rho C_d A_{vf} (V + V_w)^2 \quad (4.5)$$

İvme değeri Eşitlik (4.6)'ya göre hesaplanır. Δt , V_{ilk} olarak ifade edilen ilk hızdan V_{son} ile ifade edilen son hıza ulaşana kadar geçen süreyi ifade eder.

$$a = \frac{V_{son} - V_{ilk}}{\Delta t} \quad (4.6)$$

Referans araç parametreleri Eşitlik (4.5)'te yerine yazılırsa; $F_d = 2,61 kN$ olarak elde edilir. Motordan elde edilmesi gereken tahrik gücü Eşitlik (4.7) kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_d = F_d V \quad (4.7)$$

Buna göre referans aracın ivmelenme kuvvetinden elde edilen güç $P_d = 72,5 kW$ 'tır.

4.2.2. Maksimum hızda seyir için gerekli tahrik gücü

Bu bölümde elektrikli aracı maksimum hızda sürmek için gereken gücün değeri hesaplanmıştır. Araç çoğunlukla otoyol sürüşlerinde bu durumda olacaktır. Aracın sabit bir maksimum hızda hareket ettiği varsayılırsa, Eşitlik (4.8) aşağıdaki şekilde yazılabilir. Değerler yerine yazıldığında $F_d = 0,377 kN$ olarak elde edilir. Kuvvet değeri Eşitlik (4.7)'de yerine yazılırsa maksimum hızda seyir için gereken güç $P_d = 11,52 kW$ olarak elde edilir.

$$F_d = f_{rc}mg + 0,5\rho C_d A_{vf} (V + V_w)^2 \quad (4.8)$$

4.2.3. Maksimum hızda seyir için gerekli tahrik gücü

Sınır değeri olarak elektrikli aracın 12,5 m/s (45km/h) sabit hızla %30 eğimli bir yokuşta hareket ettiği varsayılacaktır. Bir araç bir yokuşu sabit hızla tırmandığında, yokuş tırmanma direncinin yanı sıra sürtünme ve aerodinamik dirençlerin de üstesinden gelmesi gerekir. Buna göre gerekli olan tahrik kuvveti Eşitlik (4.9)'a göre hesaplanır.

$$F_d = f_{rc}mg \cos \alpha + 0,5\rho C_d A_{vf} (V + V_w)^2 + mg \sin \alpha \quad (4.9)$$

Bir aracın %30 eğimli bir yolda sürüş yapması, her 100 m yatay hareketinde 30 m tırmanma yapacağı anlamına gelir. α yol açısı buna göre hesaplanır. %30 eğimli bir yol için $\alpha = 16,7^\circ$ olarak hesaplanır. Buna göre gerekli kuvvet $F_d = 3,655kN$ olarak hesaplanır. Kuvvet değerinden güç değerini elde etmek için Eşitlik (4.7) kullanıldığında yokuş tırmanma sürüşünde gereken güç $P_d = 45,68kW$ olarak elde edilir.

Tahrik motoru, aracın farklı çalışma koşulları altındaki güçler arasından en yüksek olanının değerini sağlayabilmelidir. Buna göre hesaplanan güç değerleri arasında en yüksek olanın, ivmelenme için gereken güç (72,5 kW) olduğu görülür. Fakat bu değer sürekli olarak sağlanması gereken bir değer değildir. Sadece ilk hızlanma için gereken maximum güç değeridir. İkinci en yüksek değer yokuş tırmanma için gerekli güç (45,68 kW) değeridir. Bu değer yokuş tırmanma gibi ivmelenmeye göre daha sürekli bir çalışma gerektirdiği için bu değer kullanılacaktır. Araç hız değerinin km/h biriminden motor şaft hızı rpm'e dönüştürülmesi için gerekli hesaplama Eşitlik (4.10)'da verilmiştir.

$$V_{kmh} = 0,1885N_{rpm} D_m \quad (4.10)$$

Bu eşitlikte V_{kmh} aracın km/h olarak hızını, N_{rpm} motorun rpm olarak devir sayısını, D_m ise m olarak tekerlek çapını ifade etmektedir. Diferansiyel oranı 2,35 ve vites oranı 2,65 olarak [117] , baz hızın ise 4000 rpm olduğu kabul edilirse, 18 inç bir lastik boyutuna sahip araçta baz hız yaklaşık olarak 55 km/h olarak elde edilir. Araç parametrelerine göre maksimum hız olan 110 km/h hızındaki devir sayısı ise Eşitlik (4.10)'a göre hesaplandığında yaklaşık olarak 8000 rpm olarak elde edilir. Buna göre tasarlanan asenkron motorun farklı kontrol yöntemleri (FOC, V/f, DTC vb.) ile kontrolü yapılarak besleme frekansı değiştirilerek bu devir sayısı elde edilebilir.

4.3. Çift Hava Aralıklı Eksenel Akıllı Asenkron Motor için Hesaplamalar

Daha önce belirlenen sınır değerlerine göre bu bölümde 50 kW çıkış gücünde, %92 verime sahip, güç faktörü değeri 0,9 olarak hedeflenen bir çift statorlu EAASM için boyutlandırma hesapları aşağıda ifade edilmiştir. Buna göre kullanılacak olan asenkron motora ait hedeflenen tasarım parametreleri ve motor özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Motor gücü: 50 kW
- Maksimum güç: 75 kW
- Nominal verim: %92
- Nominal güç faktörü: 0,9
- Hat gerilim: 230 V_{rms}
- Senkron hız: 4000 rpm
- Faz sayısı: 3
- Stator bağlantı tipi: Yıldız

Hat geriliminin belirlenmesinde elektrikli araçlarda çoğunlukla tercih edilen DC bara gerilimi 400 V ve yaklaşık kayıplar göz önünde bulundurulmuştur. Belirlenen özelliklere ek olarak, hesaplamaların yapılabilmesi için kutup sayısının da belirlenmesi gerekir. Kutup sayısı seçiminde düşük kutup sayılı kombinasyonlarda gürültü, ağırlık ve motor hacmi artacaktır [118]. Yüksek kutup sayılarına sahip kombinasyonlarda sınırlı hız ve frekansta kayıplar artacaktır. Buna göre ilerleyen bölümlerde sebepleri karşılaştırmalı olarak verilmek üzere hesaplamalarda kullanılmak üzere 8 kutup seçilmiştir.

8 kutuplu motora uygulanacak hat geriliminin 230 V (Y-bağlı), senkron hızın 4000 rpm, stator sargılarının ise seri olarak bağlandığı kabul edilmiştir. Buna göre senkron hızdaki frekans Eşitlik (4.11)'e göre 266,67 Hz olarak elde edilir. Hesaplamalarda devir sayısı saniyedeki devir olarak kullanılacaktır. Buna göre senkron hızda saniyedeki devir sayısı $n_s = 66,67 dev / s$ olarak elde edilir.

$$n_s = \frac{120f}{2P} \quad (4.11)$$

Eksenel akılı motor tasarımlarında motorun geometrik şekli itibariyle içten dışa doğru genişleyen bir yapı olmasından dolayı, iç çap, dış çap oranının belirlenmesi hem stator hem de rotordaki diş kalınlıklarını etkileyeceği için önem arz etmektedir. Buna göre endüstride süregelen tecrübelerle göre belirlenmiş olan, maksimum momentin meydana geldiği katsayı olan $1/\sqrt{3}$ oranı, yapılacak olan hesaplamalarda kullanılacaktır [119]. Bununla beraber literatürde farklı kutup sayıları için farklı k_D değerleri belirlemeye yönelik çalışmalar da bulunmakta olup, bu değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kutup sayısına göre boyutlandırma katsayısı (k_D)

| 2P | 2 | 4 | 6 | 8 | 10-12 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| k_D | 0,52-0,57 | 0,62-0,68 | 0,70-0,72 | 0,74-0,75 | 0,75-0,77 |

Motor dış çapının motor iç çapına oranı k_d 0,57 olarak kabul edilirse, çıkış gücünü hesaplamada kullanılacak bu parametreye bağlı olarak k_D parametresi, Eşitlik (4.12)'ye göre hesaplanır. Eşitlik (4.12)'ye göre $k_D = 0,131$ olarak hesaplanır.

$$k_D = \frac{1}{8}(1+k_d)(1-k_d^2) \quad (4.12)$$

Seri bağlı stator sargıları için faz akımı Eşitlik (4.13)'e göre hesaplanır. Burada $P_{çıkış}$ çıkış gücünü, m_1 faz sayısını, V_1 faz gerilimini, η verimi ve $\cos \phi$ güç faktörünü ifade etmektedir. Güç faktörü ve verim için sınır değeri sırasıyla 0,92 ve 0,9 olarak belirlenmiştir.

$$I_{a_{\max}} = \frac{P_{çıkış}}{m_1(2V_1)\eta \cos \phi} \quad (4.13)$$

Stator dış çapı $D_{dış}$ Eşitlik (4.14)'te gösterildiği gibi hesaplanır. Burada, ε sargılardaki zıt emk'nın faz gerilimine oranını, k_{w1} sargı faktörünü, B_{mg} hava aralığındaki maksimum akı yoğunluğunu, A_m metre başına düşen akım değerini ifade etmektedir.

$$D_{dış} = \sqrt[3]{\frac{\varepsilon P_{çıkış}}{\pi k_D k_{w1} n_s B_{mg} A_m \eta \cos \phi}} \quad (4.14)$$

Hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğu B_{ort} değerinin maksimum akı yoğunluğu B_{mg} değerine oranı α_i ile ifade edilir ve Eşitlik (4.15)'e göre hesaplanır. Sinüsoidal giriş gerilimi için bu oran $2/\pi$ 'dir.

$$\alpha_i = \frac{B_{ort}}{B_{mg}} \quad (4.15)$$

Giriş gerilimine göre manyetik akı değeri Eşitlik (4.16)'ya göre hesaplanır.

$$\phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{dış}^2 (1 - k_d^2) \quad (4.16)$$

Bir statordaki bir faz için stator sarım sayısı N_1 ile ifade edilir. Bu değer in faz akımı ile hesaplanmasında Eşitlik (4.17) kullanılır. N_1 Değeri ayrıca Eşitlik (4.18)'de gösterildiği gibi akı değeri üzerinden de hesaplanabilir.

$$N_1 = \frac{\pi D_{dış} (1 + k_d) A_m}{4m_1 \sqrt{2} I_a} \quad (4.17)$$

$$N_1 = \frac{\varepsilon V_1}{\pi \sqrt{2} f k_w \phi_f} \quad (4.18)$$

Motor kutup sayısı ve bir kutuba düşen oluk sayısına göre seçilebilecek rotor oluk sayısı Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Bu çizelgedeki değerler bir kural olmaktan ziyade tavsiye edilen oluk kombinasyonlarıdır.

Çizelge 4.3. Stator kutup sayısına göre rotor oluk sayıları sayıları [120]

| Kutup Çifti Sayısı | q1 | Rotor Oluk Sayısı | |
|--------------------|----|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 | 4 | 18 20 22 28 30 33 34 | |
| | 6 | 25 27 28 29 30 43 | |
| | 2 | 2 | 16 18 20 30 33 34 35 36 |
| | | 3 | 24 28 30 32 34 45 48 |
| | | 4 | 30 36 40 44 57 59 |
| | | 5 | 36 42 48 50 70 72 74 |
| 3 | 6 | 42 48 54 56 60 61 62 68 76 82 86 90 | |
| | 4 | 2 | 20 22 28 44 47 49 |
| | | 3 | 34 36 38 40 44 46 |
| | | 4 | 44 46 50 60 61 62 82 83 |
| | | 2 | 26 30 34 35 36 38 58 |
| | 6 | 3 | 42 46 48 50 52 56 60 |
| 2 | | 69 75 80 | |
| 2.5 | | 86 87 93 94 | |

Bir fazdaki bir kutba düşen oluk sayısı Eşitlik (4.19)'a göre hesaplanır. Bura da S_1 stator oluk sayısını ifade etmektedir.

$$q_1 = \frac{S_1}{2pm_1} \quad (4.19)$$

Statordaki sargı sayısı, çift katmanlı sargılarda oluk sayısı ile aynı olacaktır. Eğer stator sargısı 4 paralel iletken elde edilirse ve paralel akım yolu sayısı 1, bir bobindeki iletken sayısı çift katmanlı sargı için Eşitlik (4.20)'de gösterildiği şekilde bulunur.

$$N_c = \frac{a_p a_w N_1}{S_1 / m_1} \quad (4.20)$$

Özellikle elektrikli araç tahrik motorları gibi yüksek performans ve düşük hacim/ağırlık beklenen uygulamalarda, soğutma ayrıca önem kazanmaktadır. Bunun sebebi sınırlı bir hacimde yüksek performansta çalıştırılmak istenen motor sargılarının yüksek akımlar çekerek ısınacak olmasıdır. Bu nedenle sargıları soğutmak amacıyla motor tasarımında farklı yöntemler kullanılarak soğutma sağlanabilir. Bu soğutma yöntemlerine göre akım yoğunluğu ve ilgili soğutma tipi Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Soğutma tipine göre akım yoğunlukları [13]

| Soğutma yöntemi | Akım yoğunluğu J [A/mm^2] |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Konveksiyonla soğutma | 2-4 |
| Cebri hava soğutma | 4-8 |
| Su soğutmalı stator gömleği | 6-14 |
| Doğrudan iletken içi soğutma | 10-25 |
| Doğrudan daldırma ve spreysel soğutma | 8-28 |

Çift statorlu tasarımda stator sargılarındaki ısınmaya karşı stator gömleği ile soğutma uygulanmıştır. Buna göre stator sargılarındaki akım yoğunluğu nominal çalışmada $J_a 10 A/mm^2$, kısa süreli çalışmada maksimum değer olarak $25 A/mm^2$ kabul edilirse stator iletken kesit alanı Eşitlik (4.21)'e göre hesaplanır.

$$S_a = \frac{I_a}{a_w J_a} \quad (4.21)$$

50 kW bir asenkron motor için bakır iletkenli bir stator sargısı için oluklardaki doluluğu ifade eden dolgu faktörü 0,6 olarak kabul edilebilir. Buna göre stator oluğu kesit alanı Eşitlik (4.22)'den elde edilir. Burada f_f stator sargılarındaki dolgu faktörüdür.

$$S_{oluk} = \frac{S_a N_c q_1}{f_f} \quad (4.22)$$

Bir oluktaki iletken sayısına göre minimum oluk aralığı Eşitlik (4.23)'e göre elde edilir. Burada z_1 stator oluk sayısını ifade eder.

$$t_{1min} = \frac{\pi D_{iç}}{z_1} \quad (4.23)$$

Stator nüvesindeki en dar bölgede manyetik akı yoğunluğu Eşitlik (4.24)'e göre hesaplanır.

$$B_{1max} \approx \frac{B_{mg} t_{1min}}{c_{1min}} \quad (4.24)$$

Maksimum stator oluk genişliği ise Eşitlik (4.25)'e göre belirlenir.

$$t_{1max} = \frac{\pi D_{dış}}{z_1} \quad (4.25)$$

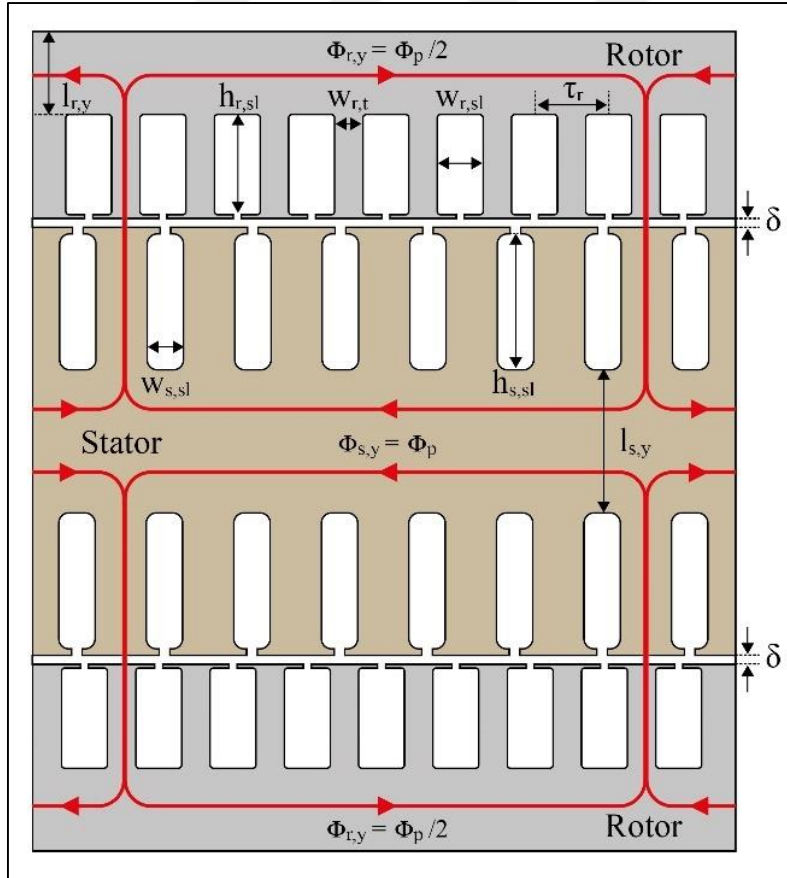
Bitsi ve diğerleri (2020) [121], çift rotorlu EAASM için analitik hesaplamaları gerçekleştirmişlerdir. Buna göre, çift hava aralıklı EAASM için tasarım parametreleri elde edilebilir. EAASM'nin hava aralığındaki akı yoğunluğunun tam bir sinüs dalgası olduğu varsayılırsa, hava aralığındaki akı yoğunluğu Eşitlik (4.26)'ya göre hesaplanır. Bu denklemde \hat{B}_δ hava aralığı akısının genliği, p kutup sayısı, θ hava aralığı çevresi etrafında uzanan mekanik açı ve ω_s açısal hızdır [121].

$$B_{\delta} = \hat{B}_{\delta} \sin\left(\frac{p}{2}\theta - \omega_s t\right) \quad (4.26)$$

Hava aralığı akı yoğunluğunun bir kutup alanı üzerinde entegre edilmesiyle, kutup başına temel hava aralığı manyetik akısı, ϕ_p olarak gösterilir ve her hava aralığı için Eşitlik (4.27) kullanılarak hesaplanır [121].

$$\phi_p = \frac{(D_{dış}^2 - D_{iç}^2) \hat{B}_{\delta}}{2p} \quad (4.27)$$

Rotor ve stator boyunduruğu üzerindeki ϕ_p akı yollarının yönleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu şekilde NN tipi yapı ifade edilmiştir. NS tipi topolojide akı rotor üzerinde bölünmeyeceği için rotor boyunduruğu daha kısa olacaktır. Rotor boyunduruğundaki maksimum akı ve rotor çekirdek dişlerindeki maksimum akı sırasıyla Eşitlik (4.28) ve (4.29)'e göre hesaplanır. Burada Q_r rotor oluklarının sayısını göstermektedir [121].



Şekil 4.2. Çift Rotorlu EAASM Manyetik akı yolları ve Tasarım parametreleri

$$\phi_{r,y} = \frac{\phi_p}{2} \quad (4.28)$$

$$\phi_{r,t} = \frac{\pi(D_{dış}^2 - D_{iç}^2)\hat{B}_\delta}{4Q_r} \quad (4.29)$$

Hesaplanan akı değerlerine bağlı olarak, rotor nüvesinin aksenal uzunluğu $l_{r,y}$ Eşitlik (4.30) 'e göre hesaplanır. Burada $\hat{B}_{r,y}$ rotor çekirdeğindeki maksimum manyetik akı yoğunluğu ve $C_{r,lam}$ rotor laminasyonundaki sıkıştırma katsayısıdır [121].

$$l_{r,y} = \frac{2\phi_{r,y}}{(D_{dış} - D_{iç})\hat{B}_{r,y}C_{s,lam}} = \frac{\hat{B}_\delta(D_{dış} + D_{iç})}{2p\hat{B}_{r,y}C_{r,lam}} \quad (4.30)$$

Stator boyunduruğunda manyetik akı $\phi_{s,y}$ ve stator dişlerindeki manyetik akı $\phi_{s,t}$ Eşitlik (4.31) ve (4.32)'ye göre hesaplanır. Burada, Q_s stator oluklarının sayısını göstermektedir [121].

$$\phi_{s,y} = \phi_p \quad (4.31)$$

$$\phi_{s,t} = \frac{\pi(D_{dış}^2 - D_{iç}^2)\hat{B}_\delta}{4Q_s} \quad (4.32)$$

Rotor aksenal uzunluğuna benzer şekilde, hesaplanan akı değerlerine bağlı olarak, stator çekirdeğinin aksenal uzunluğu $l_{s,y}$ Eşitlik (4.33)'e göre hesaplanır. Burada $\hat{B}_{s,y}$ stator nüvesindeki maksimum manyetik akı yoğunluğu ve $C_{s,lam}$ stator laminasyonundaki sıkıştırma katsayısıdır [121].

$$l_{s,y} = \frac{2\phi_{s,y}}{(D_{dış} - D_{iç})\hat{B}_{s,y}C_{s,lam}} = \frac{\hat{B}_\delta(D_{dış} + D_{iç})}{p\hat{B}_{s,y}C_{s,lam}} \quad (4.33)$$

Tasarlanan motorun tork-hız grafiğini elde etmek için tek fazlı eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Stator bakır kayıpları Eşitlik (4.34)'e göre hesaplanır. Burada ρ_{cu} bakır öz direncini ve l_c sargı uzunluğunu göstermektedir [118].

$$R_s = \rho_{cu} \frac{l_c W}{A_{cu}} \quad (4.34)$$

Elektrikli araçlar için H termal sınıfında maksimum 180 °C sıcaklık kabul edilir. Bakırın belirli bir sıcaklıktaki öz direnci Eşitlik (4.35)'e göre elde edilir [118].

$$(\rho_{cu})_{\varphi} = (\rho)_{20^{\circ}C} \left(1 + \frac{1}{273} (\varphi - 20) \right) \quad (4.35)$$

Stator kaçak reaktansının hesaplanmasında Eşitlik (4.36) kullanılır. Eşitlik (4.37) ile gösterilen toplama kaçak reaktansı ifade eden X_1 hesaplanırken, X_{1s} oluk kaçak reaktansı, X_{1e} sargı ucu kaçak reaktansı ve X_{1d} türev kaçak reaktansının toplamı dikkate alınır [120].

$$X_1 = X_{1s} + X_{1e} + X_{1d} \quad (4.36)$$

$$X_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{L_i (N_1)^2}{pq_1} \left(\lambda_{1s} k_{1X} + \frac{l_{1c}}{L_i} \lambda_{1e_{1c}} + \frac{l_{1ds}}{L_i} \lambda_{1e_{ds}} + \lambda_{1d} \right) \quad (4.37)$$

Dikdörtgen yarı açık oluk yapısına göre λ_{1s} [120];

$$\lambda_{1s} = \frac{h_{11}}{3b_{11}} + \frac{h_{12}}{b_{11}} + \frac{2h_{13}}{b_{11} + b_{14}} + \frac{h_{14}}{b_{14}} \quad (4.38)$$

Sargı ucu giriş ve çıkış uzunluklarının eşit olması durumunda l_{1e} , λ_{1e} ve λ_{1d} Eşitlik (4.39) ve (4.40)'e göre hesaplanır. Burada ω_c ortalama sargı aralığını ve k_{sat} doyma katsayısını göstermektedir [120].

$$\lambda_{1e} = 0,34q_1 \left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{\omega_c}{l_{1e}} \right) \quad (4.39)$$

$$\lambda_{1d} = \frac{m_1 q_1 \tau k_{\omega 1}^2}{\pi^2 g' k_{sat}} \tau_{d1} \quad (4.40)$$

Türev kaçak reaktans faktörü τ_{d1} ise Eşitlik (4.41)'e göre hesaplanır.

$$\tau_{d1} = \frac{\pi^2 (10q_1^2 + 2)}{27} \sin\left(\frac{30^\circ}{q_1}\right) - 1 \quad (4.41)$$

Pratikte, hava aralığı akı frekansı, oluklardaki manyeto motor kuvvet (mmk) yoğunluğu nedeniyle bir dizi harmoniğe sahiptir. Bu da sargılarda n. dereceden harmoniklerin oluşmasına neden olur ($n = 6N + 1$). Akıdaki harmoniklerin bir diğer nedeni de stator ve rotor oluk ağızlarıdır. Oluk ağızlarındaki bu açıklıklar hava aralığında dalgalanmalara neden olur. Ayrıca doyma ve hava aralığındaki düzensizlik de mmk'da harmoniğe neden olmaktadır. Bu nedenle stator ve rotor oluk sayılarının aynı olmaması ve uygun oranlarda (%15-30 farklı sayıda) seçilmesi önemlidir. HEA uygulamalarında rotor oluk geometrisi, trapezoidal kenarlar şeklinde paralel dişlere sahip trapezoidal geometri ile önerilmiştir. Bu oluk geometrisi, harmoniklere karşı minimum direnç ile maksimum kısa devre çubuğu kesit alanı sağlar [118]. Kapalı rotor olukları, nominal güç faktörü ile maksimum torku ve başlatma torkunu azaltır, ancak aynı zamanda başlatma akımını, gürültüyü ve titreşimi de azaltır [120].

Rotor oluklarının boyutlarını belirlemek için öncelikle rotor çubuklarından akan nominal akım değeri Eşitlik (4.42)'ye göre belirlenir. Burada K rotor mmk'nın stator mmk'sına oranı, I_a stator faz akımı, W statorda faz başına sarım sayısı, k_{ω} sargı faktörüdür [118].

$$I_b = K \frac{2m_1 W k_{\omega}}{Q_r} I_a \quad (4.42)$$

Rotor kısa devre kafesindeki kısa devre halkalarında akan akım Eşitlik (4.43)'e göre hesaplanır [118].

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \sin\left(\frac{\pi 2P}{2Q_r}\right)} \quad (4.43)$$

Statora indirgenen rotor direncini hesaplamak için çubuk/halka eşdeğer dirençleri Eşitlik (4.44)'e göre hesaplanmalıdır. Burada K_R kısa devre çubuklarındaki deri etkisi katsayısını temsil eder.

$$R_{be} = \rho_{Cu} \left[\frac{L}{A_b} K_R + \frac{l_{er}}{2A_{er} \sin^2 \left(\frac{\pi p}{2Q_r} \right)} \right] \quad (4.44)$$

Kısa devre kafesindeki halka kesit uzunluğu Eşitlik (4.45)'e göre hesaplanır.

$$l_{er} = \frac{D_{dış} + D_{iç}}{2} \pi \quad (4.45)$$

Rotor kısa devre kafesi direnci Eşitlik (4.46)'ya göre hesaplanır [122]. W_1 stator sargılarındaki seri sarım sayısını ifade eder [118]. Kısa devre çubuğu uzunluğu ise Eşitlik (4.47)'ye göre hesaplanır.

$$R_2 = \frac{4m_1 (k_w W_1)^2}{Q_r} \left(R_{bar} + \frac{R_{ring}}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Q_r}} \right) \quad (4.46)$$

$$l_{bar} = \frac{D_{dış} - D_{iç}}{2} \quad (4.47)$$

Kısa devre çubuğu direnci Eşitlik (4.48)'e göre hesaplanır. Burada k_{g2} rotorun termal faktörü, Υ_2 rotor çubuklarının iletkenliği, A_{bar} ise rotor çubuklarının alanıdır.

$$R_{bar} = \frac{k_{g2} (D_{dış} - D_{iç})}{2\Upsilon_2 A_{bar}} \quad (4.48)$$

Kısa devre halkalarının direnci hesaplanırken iç ve dış çaplara göre ortalama çap dikkate alınarak hesaplama yapılabilir. Statora indirgenmiş rotor kısa devre kafesi kaçak reaktansını hesaplamak için eşdeğer rotor çubuğu kaçak reaktansı Eşitlik (4.49)'a göre hesaplanmalıdır.

Burada, λ_r rotor oluğu şekline özel geometrik kaçak permenans katsayısı, λ_{dr} rotor türevsel kaçak permenans katsayısı, λ_{er} kısa devre kafesi kaçak permenans katsayısı anlamına gelir [118].

$$X_{be} = 2\pi f \mu_0 L (\lambda_r K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \quad (4.49)$$

Mıknatıslanma reaktansını hesaplamak için, mıknatıslanma mmk'ı Eşitlik (4.50)'ye göre hesaplanır. Burada, K_c Carter katsayısını, F_{mcs} stator çekirdeği boyunduruk mmk, F_{mts} stator dişleri mmk, F_{mcr} rotor çekirdeği boyunduruk mmk, F_{mtr} rotor dişleri mmk, ve D_g hava aralığını temsil eder [118].

$$F_m = 2 \left(K_c D_g \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr} \right) \quad (4.50)$$

Motorun rölanti durumunda, etkin hava aralığı amper yasası kullanılarak Eşitlik (4.51)'e göre bulunur [121].

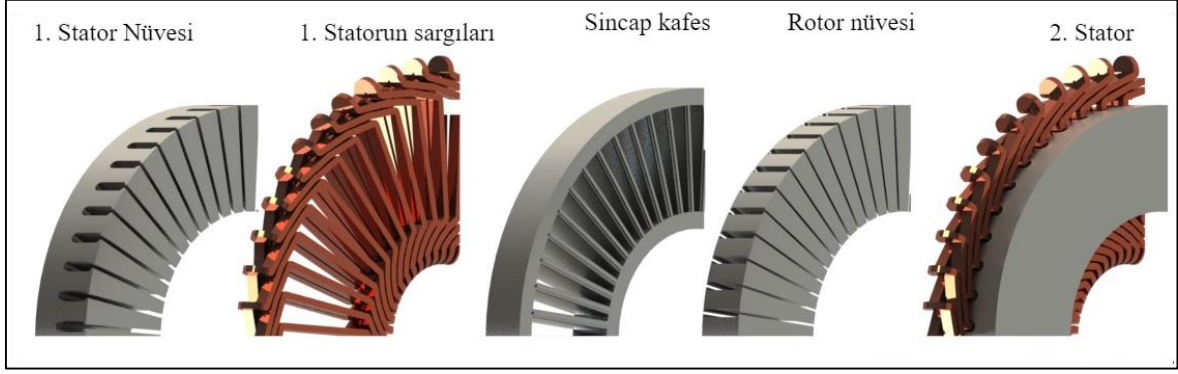
$$\delta' = \frac{\mu_0 Q_s k_1 n_s i_s \sin \phi}{\pi p \hat{B}_\delta} \quad (4.51)$$

Hava aralığının gerçek uzunluğu ise Eşitlik (4.52)'ye göre hesaplanır. Burada K_{cs} ve K_{cr} sırasıyla stator ve rotor Carter katsayılarını göstermektedir [121].

$$\delta = \frac{\delta'}{K_{cs} K_{cr}} \quad (4.52)$$

5. ÇİFT HAVA ARALIKLI EKSENEL AKILI ASENKRON MOTORLARIN SEY İLE TASARIMI

Çift hava aralıklı EAASM'lerde mümkün olan iki topoloji çift stator ve çift rotor topolojisidir. EA motorlarında aranan başlıca özelliklerden biri olan, belirli bir hacimde maksimum tork yoğunluğunu her iki topolojide de elde etmek mümkündür [123]. Çift hava aralıklı topolojilerin farklı stator oluk sayısı ve motor kutup sayısı ile EA'da kullanılmasına dair yapılan karşılaştırmada 50 kW nominal, 75 kW maksimum güçte çalışmada 8 kutuplu çift rotorlu topoloji öne çıkmıştır [123]. Çift rotor ve çift stator topolojilerin tek başına motor performansı açısından ele alınması yanıltıcı olabilmektedir. Çünkü elektrikli araçlarda sınırlı hacimde yüksek performans elde etmek için elektrik motorları yüksek akım yoğunlukları ile çalıştırılmaktadır [124]. Yüksek akım yoğunluğunda çalışmanın getirdiği termal yük ise ayrıca ele alınmalıdır [125]. Çünkü akım yoğunluğunun seviyesine göre soğutma şeklinin belirlenmesi gerekir. Elektrikli araçlarda tercih edilen soğutma yöntemi açısından probleme yaklaşıldığında sıvı soğutmalı cebri soğutma öne çıkmaktadır [126]. Sıvı soğutma ile çift rotorlu topoloji ve çift statorlu topoloji kendi içlerinde kıyaslandığında ise çift statorlu topolojide soğutma daha etkili olarak planlanabilir [127]. Bunun sebebi elektrik motorlarında ısınmanın başlıca sebebinin sargılardan geçen akım olmasıdır. Termal iletim göz önünde bulundurulduğunda direkt olarak sargılara ya da sargılara en yakın konumda uygulanan soğutma daha etkili olacaktır. Çift statorlu topolojide statorlar rotoru sağından ve solundan çevrelemektedir. Statorların motorun durağan parçaları olmasının sağladığı avantaj kullanılarak her bir statora soğutma gömleği eklenerek soğutma sağlanabilir. Bu tez çalışmasında da termal koşullara dikkate alınarak çift statorlu EAASM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan motorun çeyrek modeline ait patlatılmış görünüm Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Çift Statorlu EAASM çeyrek modeli

Motor tasarımında belirlenmesi gereken başlıca parametrelerden bazıları motorun çıkış gücü, hedeflenen güç faktörü ve verim değerleridir. Kullanılacak olan asenkron motora ait hedeflenen tasarım parametreleri ve motor özellikleri Çizelge 5.1’de verildiği gibidir.

Çizelge 5.1. Belirlenen motor parametreleri

| Parametre | Değer |
|----------------------------|--------|
| Motor gücü (kW) | 50 |
| Nominal verim (%) | 92 |
| Nominal güç faktörü | 0,9 |
| Hat gerilimi (V_{rms}) | 230 |
| Senkron hız (rpm) | 4000 |
| Faz sayısı | 3 |
| Stator bağlantı tipi | Yıldız |
| DC Bara Gerilimi (V) | 400 |

Kutup ve oluk sayısına göre dış çapı, iç çapları, oluk boyutları, hava aralığı ve eşdeğer devre parametreleri hesaplanan motorların analizi için SEY ile analiz yapan ANSYS Electronics yazılımında tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Stator nüvelerinde lamine çelik, rotor nüvesinde ise katı çelik kullanılmıştır. Rotor kısa devre kafesinde kayıpları azaltmak amacıyla bakır kullanılmıştır. Motor yüksek akım yoğunluğunda çalıştırıldığı için konvansiyonel soğutmaya göre sargılardan daha yüksek akım geçmektedir.

Bu da bakır kısa devre kafesi sayesinde kayıplara direkt olarak etki ederek verimi yükseltmektedir.

Eksenel akılı motorların yapısı geleneksel radyal akılı motorlara göre daha karmaşıktır. Çapın içten dışa genişlemesi nedeniyle, manyetik akı yolu iç çapta en kısa ve dış çapta en uzundur [15]. Bu, iç çapta daha dar diş kalınlığı ve dış çapta daha geniş dişler ile sonuçlanır. Farklı diş kalınlıkları, iç çapta doygunluğa daha yakın dişler ve dış çapta daha düşük akı yoğunluğu ile sonuçlanır. Bu nedenle eksenel akılı motorlar üç boyutlu (3B) olarak ele alınması gereken problemlerdir. 3B modeller ile yapılan benzetimler uzun analiz sürelerine ve ekstra işlemci yüküne neden olmaktadır [24, 128]. Bu da tasarımcılar için zorluklara neden olmaktadır. Eksenel akılı motorların ortalama çap değerlerine sahip boyutları kullanılarak elde edilen iki boyutlu (2B) lineer eşdeğer modeller kullanılarak tasarım sürecinin 3B modelden kaynaklanan ekstra yükü önemli ölçüde azaltılabilir [17].

Çift hava aralıklı topolojiler de eksenel akılı motorlar ailesinde bulunduğu için, çift statorlu EAASM'ler de lineer eşdeğer modelleri ile kullanılabilirler. Çift hava aralıklı topolojilerde NN veya NS topolojileri kullanılarak hava aralıkları arasındaki rotor boyunduruğunda, manyetik akının rotor nüveden stator nüvesine doğrudan geçmesine veya stator nüvelerden ayrı ayrı akı yolunu tamamlaması sağlanabilir. Bu da rotor oluk yapısında geleneksel radyal akılı indüksiyon motorlara kıyasla farklı oluk tasarımlarına olanak sağlamaktadır. Çift hava aralıklı topolojiler arasında çift rotorlu Eksenel Akılı motorların yüksek akım yoğunluğu seviyelerinde daha yüksek tork yoğunluğu sağladığı bildirilmiştir [129]. Çift hava aralıklı tasarımlarda NS topolojisi ile nüvesiz tasarımlar da mümkün hale gelmektedir [130]. Bu sayede, motor verimini etkileyen nüve kayıpları azaltıldığı için nüvesiz tasarımların motor verimine katkı sağladığı bildirilmiştir [26]. Stator manyetik akısının rotor nüvesi üzerinde bölünmeden akı yolunu tamamlaması, rotor nüvesinin oluk sayısı kadar parçadan oluşmasına neden olmaktadır. Üretim aşamasında, bu engel katı bir rotor nüvesi kullanılarak aşılabilir. Ancak bu durumda rotor nüvesinin radyal olarak konumlandırılması gereken laminasyonları elde edilemez. Rotor nüvesinin bu şekilde üretilmesi de motor verimliliği üzerinde olumsuz bir etki yaratacaktır. Fakat lamine imalat tekniklerindeki gelişmeler ile rotor nüvesinin istenilen formda üretilmesi mümkün hale gelmiştir [26].

5.1. Çift Statorlu EAASM tasarımı

Asenkron motorlarda kısa devre kafesi malzemesi olarak çoğunlukla Alüminyum (Al) tercih edilmektedir. Döküm kısa devre kafesleri de aynı şekilde çoğunlukla alüminyum malzemeden üretilse de gelişen teknoloji ile bakır (Cu) enjeksiyon yöntemi ile de döküm kısa devre kafesleri üretilmektedir. Özellikle NEMA sınıflandırmasında D sınıfında yer alan yüksek kaymada çalışan motorlar için özel Al ve Cu alaşımları da kullanılmaktadır [131]. Bakır sincap kafesler alüminyum kafeslere göre daha düşük dirence sahiptir ve bu nedenle verimlilikte avantaj sağlar. Ancak alüminyum, bakıra göre daha kolay şekillendirilebildiği ve nispeten ucuz bir malzeme olduğu için tercih edilmektedir. Örneğin NEMA C ve D sınıfı motorlarda genellikle yüksek dirençli bakır alaşımlı malzeme tercih edilmektedir [131].

Rotor oluk geometrisinin tasarımı motor performansının belirlenmesinde önemli bir aşamadır. Çünkü tork hız eğrisinin şekli büyük ölçüde bu adımda belirlenir. Tipik olarak rotor olukları trapezoidal, dikdörtgen, yuvarlak veya Boucherot geometrilerine sahiptir [132, 133].

EAASM'de, radyal akılı motorlarda olduğu gibi, düşük deri etkisine sahip rotor çubukları düşük başlangıç torku ve yüksek verimle sonuçlanır. Yüksek deri etkisinde ise tam tersi bir etki gözlenir. Özellikle hızlanma sırasında, deri etkisi rotor çubuğu akımının, çubuğun üst kısmında yoğunlaşmasına neden olur ve bu da başlangıç torku ve başlangıç akımının belirlenmesinde etkin bir rol oynar. Motor dururken, deri etkisi, akımı çubuğun üst kısmından akmaya zorlar. Sincap kafesin çubuklarının bu üst kısmı yüksek direnç ve reaktansa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Yüksek direnç ve reaktans ile düşük anlık akım ve yüksek tork elde edilir [23].

Çift Statorlu EAASM'de, çift kafes yapısı ve rotor geometrik şekillerinde derin oluklar ile yüksek verim, yüksek kalkış torku, düşük kalkış akımı ve düşük nominal kaymanın aynı anda elde edilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla rotor oluk yapısı değiştirilerek geçici ve kararlı durum çalışması için değişken bir direnç elde etmek mümkündür [134]. Düşük hızlarda, yüksek çubuk direnci başlangıç torkunu artırır. Ancak yüksek hızlarda yüksek çubuk direnci, verimi olumsuz yönde etkiler [134]. Kayma motor yükü ile orantılı olarak artacaktır. Bu da rotor frekansında bir artış anlamına gelir. Yüksek rotor frekansında kaçak

reaktans da artacağından motor performansı üzerinde olumsuz etkiler gözlenmektedir [134]. Rotor şeklinin tork hız eğrisi üzerindeki etkisi incelendiğinde, kısa ve geniş çubukların daha yüksek başlangıç torku ve daha yüksek güç faktörü sağladığı, derin ve geniş çubukların ise verimlilikte avantaj sağladığı gösterilmiştir [135]. Yuvarlak olukların aynı oluk alanında dikdörtgen oluklara göre daha iyi akustik performans sağladığı bildirilmiştir [136].

Derin oluklu motorlar daha yüksek kaçak reaktansa sahiptir. Bu da düşük başlangıç akımı anlamına gelir. Açık oluklar yüksek hava aralığı konsantrasyonuna neden olur, bu da düşük güç faktörü, yüksek hava aralığı relüktansı ve dışlarda yüksek dalgalanma kayıplarının yanı sıra gürültü ve titreşim anlamına gelir. Açık oluklar ayrıca daha yüksek mıknatıslama akımı gerektirir. Ancak açık oluklu motorlarda kaçak reaktans daha düşüktür. Tam yükteki motor torku, motor kaçak reaktansı ile ters orantılıdır. Başka bir deyişle, açık oluklu motorlar düşük güç faktörü pahasına yüksek devrilme momentine ve yüksek çekme torkuna sahiptir. Yarı kapalı oluklu motorlarda oluk açıklığının genişliği açık oluklu motorlara göre daha dardır. Bu şekilde, hava aralığı özellikleri açık oluktan daha iyidir. Avantajları daha düşük hava aralığı konsantrasyon faktörü, daha düşük mıknatıslama akımı, düşük dış dalgalanma kaybı ve daha az gürültüdür. Genellikle asenkron motorlarında tercih edilen oluk tipidir. Dezavantajı ise kaçak akı ve kaçak reaktansın biraz daha yüksek olmasıdır. Bu motorlarda güç faktörü daha iyi, ancak devrilme momenti ve çekme momenti açık oluğa göre daha düşüktür.

Kapalı oluklardaki yüksek kaçak reaktans, kalkış akımını sınırlar. Dezavantajı ise yüksek kaçak reaktansın aşırı yük kapasitesini azaltmasıdır. Yarı kapalı oluklar daha iyi aşırı yük kapasitesine sahiptir. Derin konik (derin trapez) şekilli oluklar genellikle yuvarlak bir üst oluk kısmı ile kullanılır. Bunun nedeni, oluğun altındaki dikdörtgen bölgedeki yüksek kaçak reaktansın, başlangıçta akımın çoğunu yuvarlak üst bölgeden akmaya zorlamasıdır. Bu düzenli olmayan akım dağılımı etkin rotor direncini artırır ve böylece kalkış torkunu yükseltir. Oluk sayısı arttıkça dış titreşim kayıpları azalır. Oluk ağzı açıklıkları hava aralığı relüktansını artırır ve hava aralığı relüktansı oluğun konumuna göre değişir. Hava aralığındaki değişen relüktans dış dalgalanma kaybına ve gürültüye neden olur. Dış dalgalanma kaybı ve gürültü, oluk sayısı artırılarak veya dar oluk ağzılı yarı kapalı oluklar ile minimize edilebilir. Bu işlemlerden sonra hem stator hem de rotor olukları için optimizasyon uygulanabilir ve daha hassas ölçümler ile daha iyi motor performansları elde edilebilir [137].

Motorun tasarım amacı elektrikli araçlarda kullanılmak olduğundan, daha iyi başlangıç torku ve nominal çalışmada yüksek verim hedeflenmiştir. Bu nedenle rotor geometrilerinde çift odacıklı oluklar da analiz edilmiştir. Yüksek verim elde edebilmek için rotor çubuklarında bakır tercih edilmiştir. Sincap kafeste kullanılan bakırın etkisini karşılaştırmak için daha yaygın olarak kullanılan alüminyum kafes motor analizleri de aynı rotor oluk geometrilerinde gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin ve oluk geometrilerinin etkilerini adil bir şekilde karşılaştırmak için stator parametreleri her motor için aynı değerlerde seçilmiştir. Karşılaştırmalar, EAASM'lerin 2B lineer modelleri üzerinde SEY kullanılarak yapılan analizlerin sonuçlarına dayanmaktadır. Motorlar değişken hızlı uygulamalarda kullanılacağından, sonuçlar hıza bağlı tork, akım, verim ve güç grafikleriyle ifade edilmiştir. Bu grafikleri elde etmek için motorların 2B lineer modelleri parametrik olarak analiz edilmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen motor elektrikli araç tahrik motoru olarak kullanılacağından, motor gereksinimleri ve ilgili boyutlandırma uygun şekilde belirlenmiştir [136]. Motor tasarım kriterleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Radyal akılı bir asenkron motorda kutup sayısı, stator oluk sayısı ve çubuk sayısına bağlı olarak tork ve akım dalgalanmalarının incelendiği bir çalışmada tasarımcılara bazı öneriler verilmiştir [138]. Bu nedenle, 8 kutuplu bir motor için, kısa devre çubukları eğri olmadığında stator oluk kombinasyonları 24, 48 ve 72 olarak önerilmiştir. Rotor oluk sayısı ise 24 stator oluğu için 22, 26, 34, 48 stator oluğu için 30, 50, 54, 58, 72 stator oluğu için 42, 50, 58 ve 82 olarak önerilmiştir [138]. Böylece minimum tork ve akım dalgalanmasının elde edildiği kombinasyonlardan biri olarak 8 kutuplu 48/54 oluk sayısı tercih edilmiştir.

Çizelge 5.2. Motor tasarım parametreleri

| Parametre | Değer |
|---|--------------------|
| Kutup sayısı | 8 |
| Stator oluk sayısı | 48 |
| Rotor oluk sayısı | 54 |
| Dış çap (mm) | 245 |
| İç çap (mm) | 150 |
| Stator kalınlığı (mm) | 40 |
| Rotor kalınlığı (mm) | 30 |
| Hava aralığı (mm) | 0,7 |
| Stator sargıları | Bakır |
| Rotor malzemesi (katı) | JFE_Steel_50JN1000 |
| Stator malzemesi (laminasyonlu) | JFE_Steel_35JN270 |
| Nominal frekans (Hz) | 266,67 |
| Nominal Hız (rpm) | 4000 |
| Laminasyon faktörü | 0,97 |
| Bss0 – Stator oluk ağzı genişliği (mm) | 2,5 |
| Bss1 – Stator oluğu maksimum kama genişliği (mm) | 6,5 |
| Bss2 – Stator oluğu üst gövde genişliği (mm) | 6,5 |
| Hss0 – Stator oluk ağzı yüksekliği (mm) | 1,5 |
| Hss1 – Stator oluğu maksimum kama yüksekliği (mm) | 1,5 |
| Hss2 – Stator oluğu gövde yüksekliği (mm) | 18,75 |

5.2. EAASM Lineer Modeli

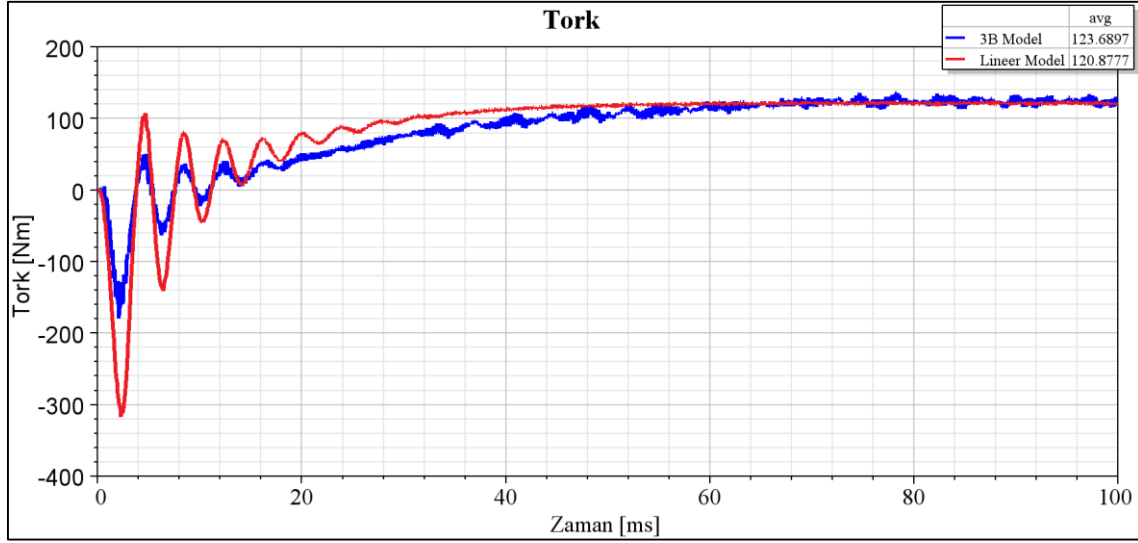
EAASM'nin nihai tasarımı 3B olarak ele alınması gereken bir problemdir. Ancak tasarımcılar nihai modelden önce birçok farklı alternatif tasarımlarında uygulamak

isteyebilirler. Bu da 3B modellerde oldukça zaman alıcıdır [128]. Bu nedenle EAASM'lerin daha hızlı sonuç alınabilen 2B lineer modeller üzerinden analiz edilmesi tercih edilen yöntemlerden biridir [20]. 2B tasarımlarda, özellikle sargı ucu etkileri gibi sadece 3B modellerle ölçülebilen etkiler, kabul edilebilir doğrulukta analiz edilebilmektedir [24]. EAASM'lerin ortalama çapa dayalı 2B lineer modellerinde çözümün doğruluğu, ortalama çapa benzer bir şekilde, ancak farklı çap değerlerine sahip daha fazla sayıda dilim ile artırılabilir [16, 139, 140]. Her durumda, 2B modeller analiz süresi açısından avantajlıdır. Ancak ara süreçlerin çoğu 2B modellerle gerçekleştirilse de prototipleme öncesinde 3B nihai model tasarımcılar tarafından dikkate alınmaktadır. EAASM 2B ortalama modelinde, iç ve dış çapın değerinin oluk ve diş ölçülerine göre elde edilen 2B lineer model kullanılır. Eksenel akıllı motorlarda rotor ve stator birbirine paralel konumlandırıldığı için ortalama çap değerinden alınan kesitin açılması ile 2B lineer modelin uzunluğu elde edilir. 3B modelden alınan dairesel kesitin A_c alanı ile 2B lineer modelin uzunluğuna göre elde edilen A_r dikdörtgen alanı birbirine eşittir. A_c ve A_r sırasıyla Eşitlik (5.1) ve Eşitlik (5.2)'ye göre hesaplanır [141].

$$A_c = \frac{\pi}{2p} (D_{dış}^2 - D_{iç}^2) \quad (5.1)$$

$$A_r = \frac{(D_{dış}^2 - D_{iç}^2)}{2} \frac{\pi (D_{dış} + D_{iç})}{p} = \frac{\pi}{2p} (D_{dış}^2 - D_{iç}^2) \quad (5.2)$$

Ortalama çaptan alınan tasarım parametrelerine göre elde edilen 2B lineer model ile analiz edilen çift statorlu EAASM ve 3B model kullanılarak analiz edilen bir motorun zamana bağlı tork grafiği Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen analiz çalışmalarında kullanılan bilgisayarın CPU işlemcisi Intel Core i5-6500HQ 3.2Ghz olup bilgisayarın bellek hızı 8 Gb RAM'dir. 2B ve 3B modellerde, Şekil 5.4'te Oluk1 olarak tanımlanan oluk geometrisi 50 kW nominal güçte bakır sincap kafes ile analiz edilmiştir. Buna göre kararlı durumdaki ortalama moment değerleri 3B ve lineer modeller için sırasıyla 123,84 Nm ve 120,88 Nm olarak elde edilirken, akımlar 205,72 A_{rms} ve 196,05 A_{rms} olarak elde edilmiştir. Buna göre 3B model referans alındığında, sonuçların %2,39 bağlı hata ile elde edildiği anlamına gelmektedir.

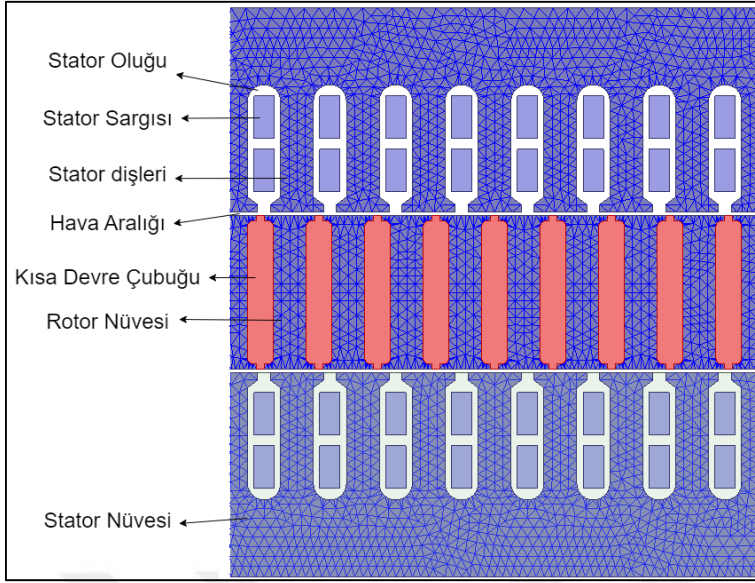


Şekil 5.2. 3B ve 2B lineer modellerin tork-zaman grafiği

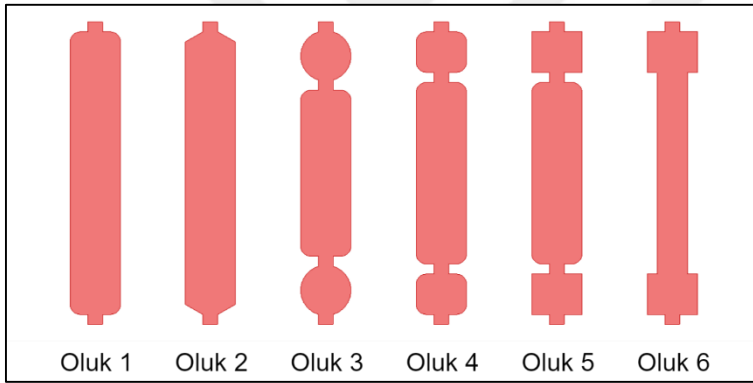
3B model yerine 2B model ile çalışmanın SEY açısından bazı dezavantajları vardır. Bunlardan en önemlisi, sargı uçları ve sincap kafes halkaları gibi motor bileşenlerinin yaklaşık eşdeğer dirençler olarak ifade edilmesidir. Buna ek olarak, kaykış işlemi 2B model aracılığıyla geometrik şekilden ziyade harici bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. 2B modelde, motorun aktif bileşenleri de SEY ile dikkate alınmaktadır. 3. boyut yani Z eksen, statorun aktif yarıçap değeri R_a ile ifade edilir. Bu değer Eşitlik (5.3)'e göre hesaplanır [141]. 2 boyutlu lineer motor modelinde, bir merkez etrafında dönen bir parça olmadığı için rotor hareketi yer değiştirme olarak tanımlanmalıdır. Yine lineer modelden dolayı açısız hareket olmadığından üretilen bir tork da yoktur. Bunun yerine doğrusal düzlemde bir kuvvet elde edilir. Elde edilen kuvvet yarıçap değeri ile çarpılarak 3B modelden elde edilen tork değeri ifade edilir.

$$R_a = \frac{D_{dış} - D_{iç}}{2} \quad (5.3)$$

EAASM'nin rotor oluk geometrisi ve rotor kısa devre kafesinin motor performansına etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen SEY analizlerinde motorların 2B lineer modelleri kullanılmıştır. Şekil 5.3, 1 numaralı rotor oluğunun kullanıldığı 2B lineer çift statorlu EAASM modeli gösterilmektedir. Şekil 5.4 aynı stator özelliklerinde fakat, farklı rotor oluk geometrisi ile çözülen motorlara ait rotor oluk geometrilerini göstermektedir.



Şekil 5.3. 48 Stator 54 rotor oluklu EAASM 2B lineer modeli



Şekil 5.4. EAASM tasarımlarında kullanılan rotor oluk geometrileri

Belirlenen rotor oluk geometrilerinde motor kalkış torku, güç faktörü ve verim gibi motor performansını belirleyen faktörler dikkate alınmaktadır. Daha iyi başlangıç torku ve güç faktörü elde etmek için derin ve geniş oluklar önerilmektedir [24].

Soğutma, elektrik motorlarında daha verimli çalışma için önemli bir faktördür [142]. Elektrikli araçlarda giderek daha yaygın olarak kullanıldığından sıvı soğutmalı bir tasarım uygulanmıştır. Buna göre stator sargılarının sıvı soğutmalı stator ceketi ile soğutulduğu tasarımlarda stator sargılarındaki akım yoğunluğu $6-14 \text{ A/mm}^2$ aralığında olmalıdır [13]. Maksimum yükte çalışma koşullarında akım yoğunluğu 25 A/mm^2 değerini aşabilir [143].

5.3. Rotor Bar Yapısının ve Malzemesinin Motor Performansına Etkisi

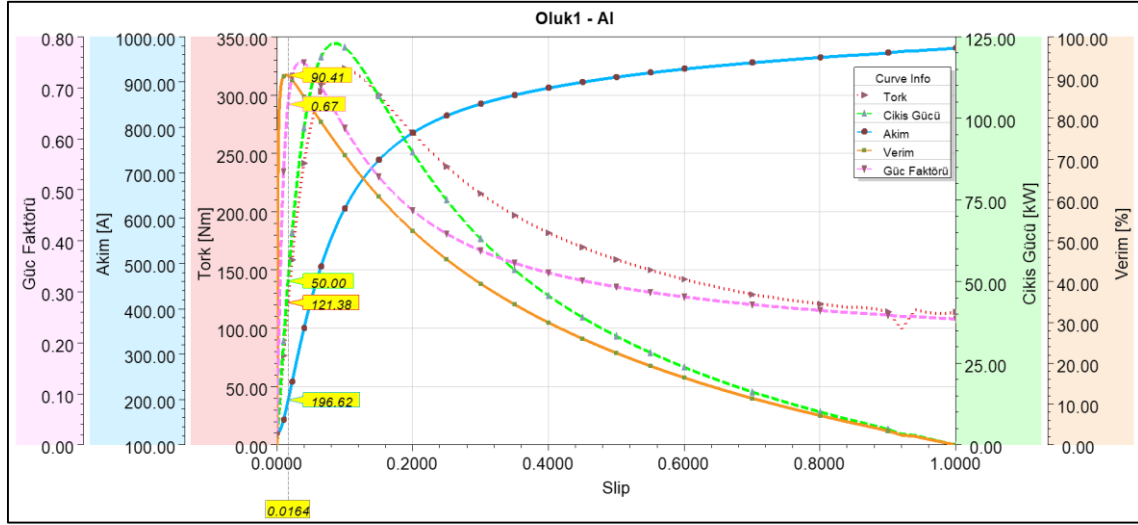
Hıza bağlı grafikler motor performansının değerlendirilmesinde iyi bir göstergedir. Çünkü rotor miline binen yük arttıkça dönüş hızı azalacak ve buna bağlı olarak da kayma artacaktır. Şebeke beslemeli EAASM'lerde kayma değerine bağlı olarak elde edilen sonuçlar motorun kalkış torku, çekme torku, devrilme torku ve nominal çalışması hakkında bilgi verir. Bu kayma ve deri etkisi birlikte düşünüldüğünde stator sargılarında sabit bir frekans varken rotor çubuklarında yüke göre değişken bir frekans oluşacaktır. Bu değişken frekans rotor çubuklarında akan akımın endüktansında ve deri etkisinden dolayı akımın dağılımında farklılıklara neden olacaktır. Bu noktada rotor olukları ve dolayısıyla rotor kısa devre çubuklarının geometrik şekli, hıza bağlı tork performansı üzerinde önemli etkilere neden olacaktır [23].

Düşük hızlarda, yüksek çubuk direnci başlangıç torkunu artıracaktır. Ancak, yüksek hızlarda, yüksek çubuk direnci verimliliği olumsuz etkileyecektir. Kısa ve geniş rotor olukları daha iyi başlangıç torku ve güç faktörü için doğru seçimken, derin ve geniş oluklar verimlilik açısından avantajlıdır [134]. Geleneksel radyal akılı asenkron motorlarda olduğu gibi EAASM'lerde de sincap kafes malzemesi olarak genellikle alüminyum kafes tercih edilmektedir. Bu tercihin öncelikli nedeni maliyet, sonrasında ise alüminyumun erime noktası ve iletkenlik gibi metalurjik özellikleridir. Çubuklar fabrikasyon alüminyum olarak üretilebildiği gibi uygun kalıplar kullanılarak döküm olarak da üretilebilmektedir. Üretim teknolojilerindeki ilerleme ile döküm kafesler her geçen gün daha fazla ve daha geniş kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Ayrıca maliyet açısından dezavantaj olarak görülse de yüksek verimli motorlara olan talep ve artan mıknatıs maliyetleri nedeniyle kafes malzemesi olarak bakır kullanımı tekrar gündeme gelmiştir [27]. Bakır çubuklar sayesinde sincap kafesten kaynaklanan kayıplarda %54 daha az kayıp elde edilebilmektedir [144]. Şekil 5.5-Şekil 5.16 arasındaki grafiklerde, farklı rotor oluk geometrileri kullanılarak bakır ve alüminyum çubukların SEY analizinin sonuçlarını göstermektedir. Analizlerde kullanılan bilgisayarın işlemcisi CPU Intel Core i5-6500HQ 3.2Ghz ve bellek hızı 8 Gb RAM'dir. Analizlerde TAU mesh yöntemi kullanılmıştır. Mesh ağlarındaki eleman sayısı Oluk 1 için 23566'dır. Parametrik analizlerde 99 adımın her biri için 0.1s'ye kadar geçici çözüm yöntemi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen çözümlerde zaman adımı $8e^{-5}$ s olarak belirlenmiştir.

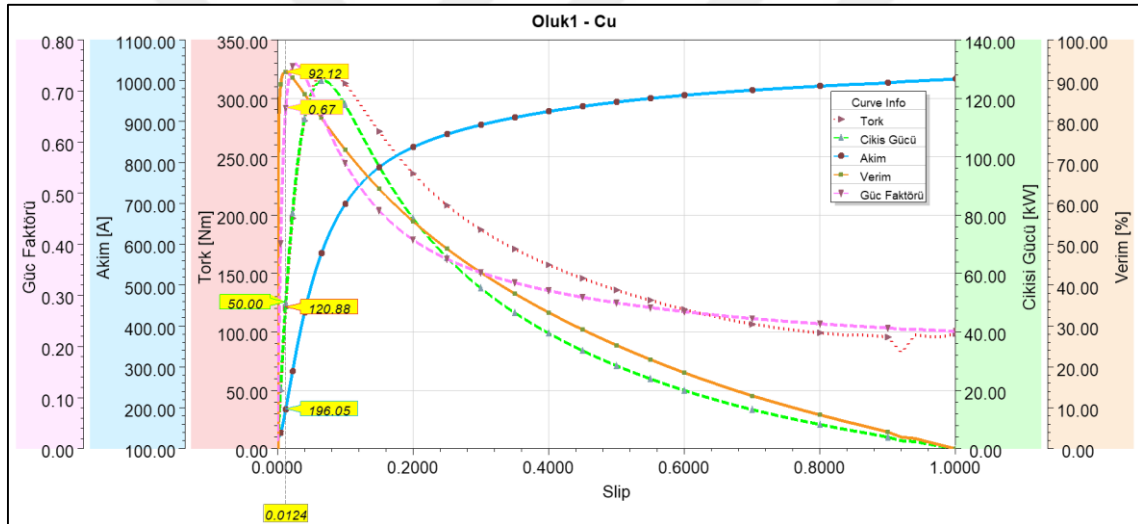
Oluk 1'in şekli, daha önce üretilmiş ve test edilmiş bir çift statorlu EAASM olduğu için AURAGEN G8500 rotor slotuna benzer bir slot geometrisi ile belirlenmiştir [141]. Bu oluk şeklinin boyutları belirlenirken 50 kW şaft gücüne göre temel boyutlar elde edilmiştir. Elde edilen iç ve dış çap değerlerine göre statorda en ince dış kalınlığı 3,32 mm olarak belirlenmiştir. Rotorda ise oluk sayısı fazla olduğu için oluk adımı daha kısadır. Buna bağlı olarak rotor dişlerinde doymunluk oluşmaması için rotor oluklarının ana gövde genişliğinin stator oluklarının ana gövdesine göre daha dar belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan tasarımlarda 54 oluklu rotorlarda en dar bölgedeki rotor diş genişliği 3,73 mm olarak belirlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi en dar bölge dişlerin iç çapında oluşmaktadır.

Oluk tasarımında nüvelerdeki doymunluklar dikkate alınarak tasarımlar belirlenmiştir. Motor performansının belirleyici parametreleri olan tork, akım, verim, güç faktörü ve şaft gücü parametrik analizler kullanılarak SEY ile ölçülmüştür. Analizlerde, özellikle değişken hızlı uygulamalarda motor performansının belirlenmesinde iyi bir yol gösterici olması nedeniyle hıza bağlı sonuçlar değerlendirilmiştir. Her bir oluk tipi için rotor oluğu boyutlandırıldıktan sonra rotor çubuğu malzemesi önce alüminyum daha sonra bakır olarak belirlenmiş ve analizler tekrarlanmıştır.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da oluk 1'in performans grafikleri sunulmuştur. Şekillerdeki tork grafiklerine bakıldığında, devrilme torkunun alüminyum kafeste 3600 rpm'de, Cu kafeste ise 3700 rpm'de gerçekleştiği görülmektedir. Bu hızlardaki tork değerleri sırasıyla 322,79 Nm ve 323,67 Nm olarak elde edilmiştir. Başlangıç torkları Al ve Cu kafes için sırasıyla 114 Nm ve 98,5 Nm olarak ölçülmüştür. 50 kW çıkış gücünde her bir motorun performans verileri grafikler üzerinde gösterilmiştir. Buna göre 50 kW çıkış gücünde rotor oluğu olarak oluk 1 kullanıldığında Al kafesin verim, güç faktörü, tork ve akım değerleri sırasıyla %90,41, 0,67, 121,38 Nm ve 196,62A'dir. Bu değerler Cu kafeste %92,12, 0,67, 120,88 Nm, 196,05 A olarak ölçülmüştür. Nominal güce Al kafeste 3934 rpm, Cu kafeste ise 3950 rpm hızda ulaşılmıştır.

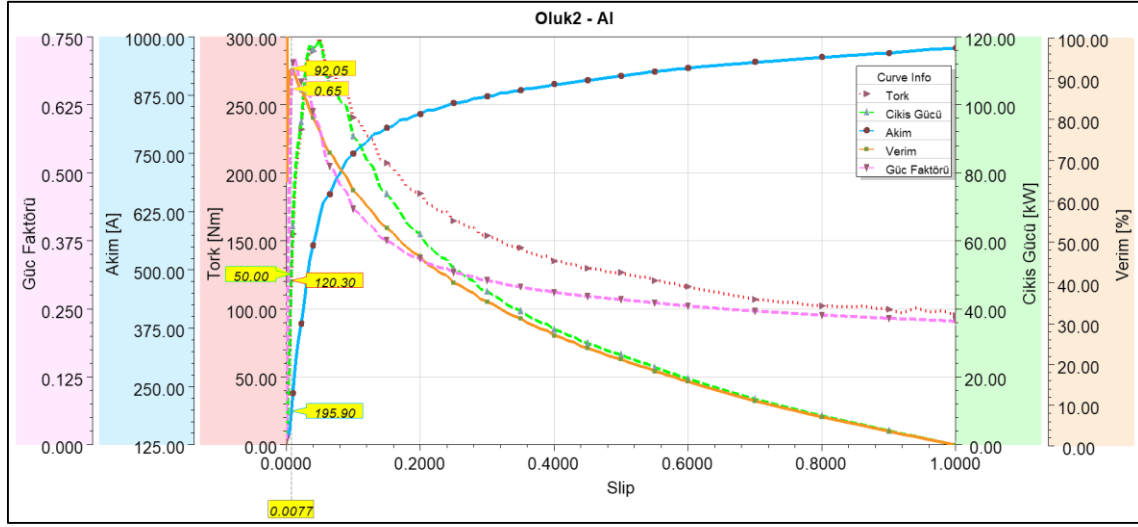


Şekil 5.5. Oluk 1 Al kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri

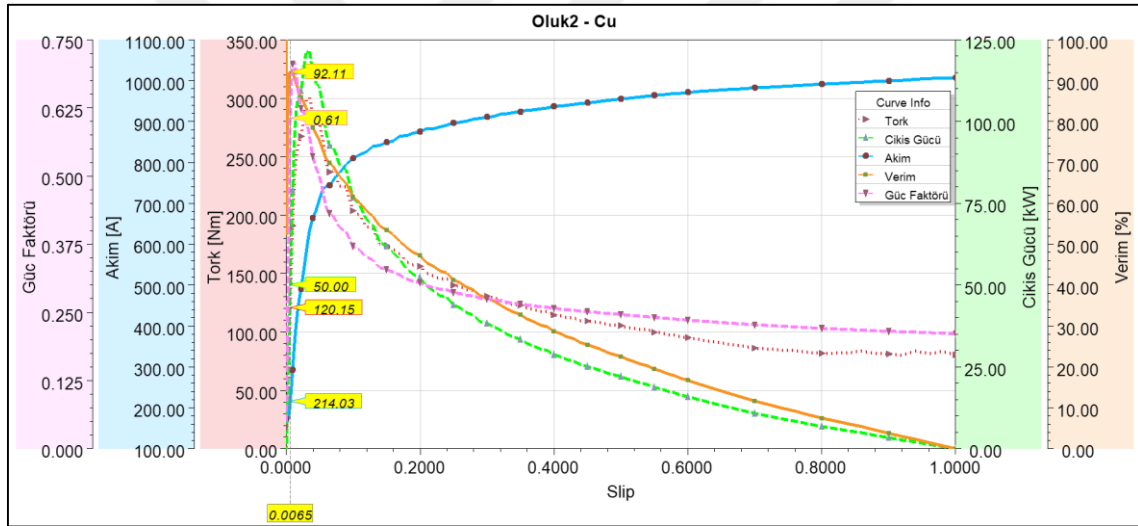


Şekil 5.6. Oluk 1 Cu kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8, oluk 2'nin performans grafiklerini göstermektedir. Tork grafiklerinde, devrilme torku Al kafes için 3800 rpm'de ve Cu kafes için 3860 rpm'de meydana gelmiştir. Bu hızlardaki tork değerleri Al için 299,12 Nm ve Cu için 301,14 Nm'dir. Başlangıç torku Al kafes için 94,9 Nm ve Cu kafes için 80,41 Nm'dir. 50 kW çıkış gücünde verimlilik, güç faktörü, tork ve akım değerleri 3969 rpm'de Al kafes için %92,05, 0,65, 120,30 Nm ve 195,9 A'dir. Cu kafes için 3974 rpm'de bu değerler sırasıyla %92,11, 0,61, 120,15 Nm ve 214,03 A'dir.

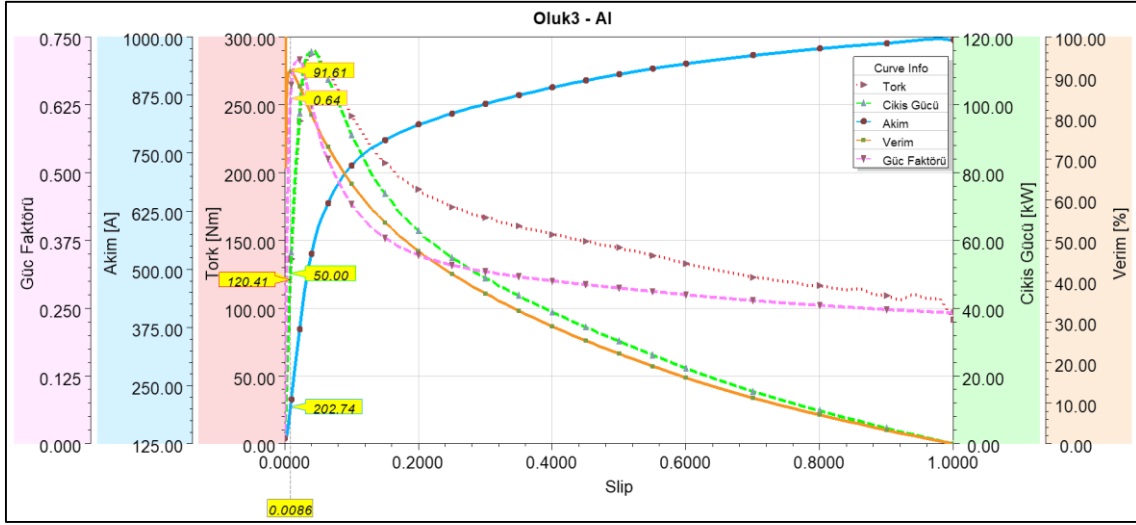


Şekil 5.7. Oluk 2 Al kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri

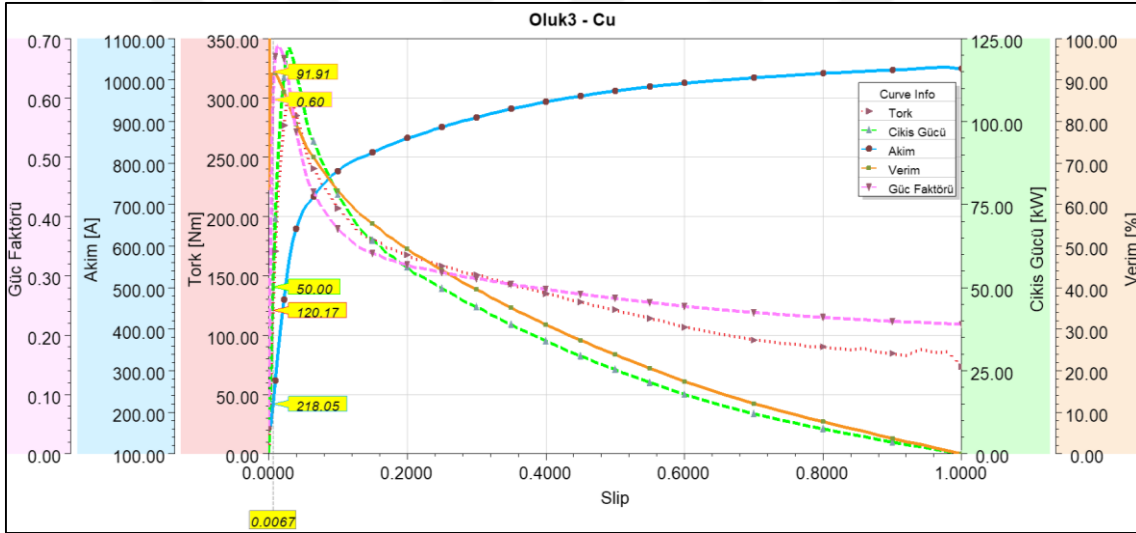


Şekil 5.8. Oluk 2 Cu kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 oluk 3 için performans grafiklerini göstermektedir. Buna göre, devrilme torku Al kafes için 3820 rpm'de 289,56 Nm olarak elde edilirken, Cu kafes için 3880 rpm'de 301,03 Nm olarak elde edilmiştir. Başlangıç torkları Al ve Cu kafesler için sırasıyla 91,5 Nm ve 73,58 Nm olarak elde edilmiştir. Al ve Cu için 3966 rpm ve 3973 rpm'de elde edilen nominal güç değeri için verimlilik, güç faktörü, tork ve akım değerleri Al kafes için %91,61, 0,64, 120,41Nm ve 202,74 A'dir. Bu değerler Cu kafes için %91,91, 0,6, 120,17 Nm ve 218,05 A'dir.

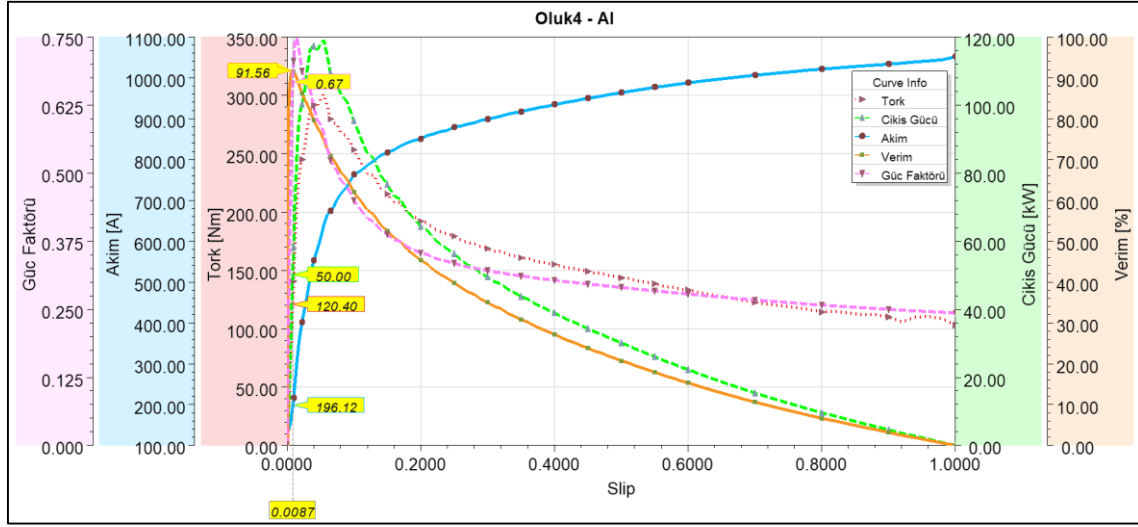


Şekil 5.9. Oluk 3 Al kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri

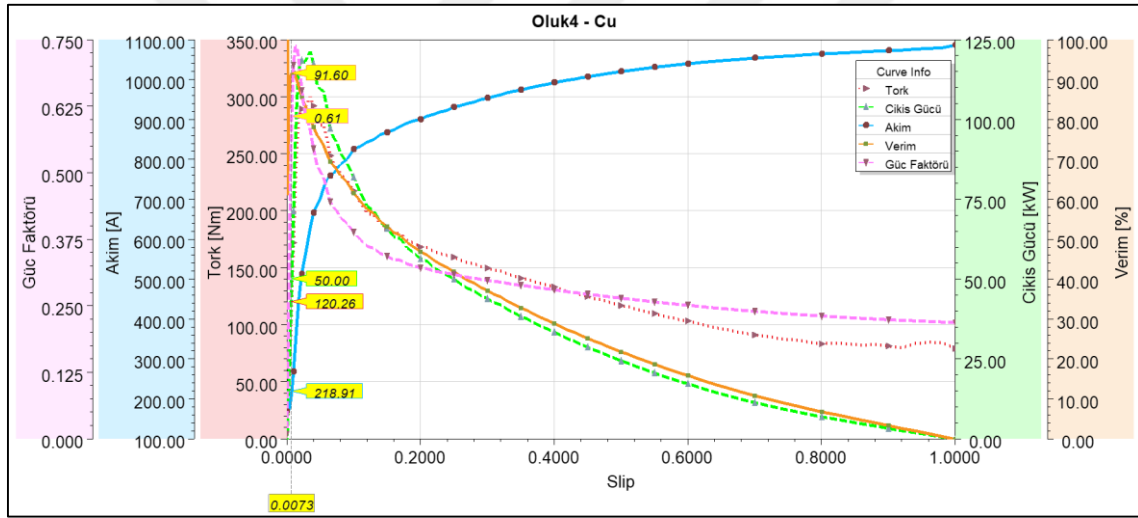


Şekil 5.10. Oluk 3 Cu kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de kaymaya bağlı olarak oluk 4’ün verim, güç faktörü, tork ve akım değerleri gösterilmektedir. Buna göre, devrilme torkları Al ve Cu kafesler için sırasıyla 3780 rpm ve 3860 rpm’de 300,94 Nm ve 300,14 Nm olarak elde edilmiştir. Başlangıç torku Al kafes için 103.1 Nm ve Cu kafes için 79.41 Nm’dir. 50 kW çıkış gücü, Al kafeste 3965 rpm’de %91,56 verimlilik, 0,67 güç faktörü, 120,4 Nm tork ve 196,12A stator akımı ile elde edilmiştir. Cu kafeste ise 3971 rpm’de %91,60 verim, 0,61 güç faktörü, 120,26 Nm tork ve 218,91 A akım ile nominal güç elde edilmiştir.

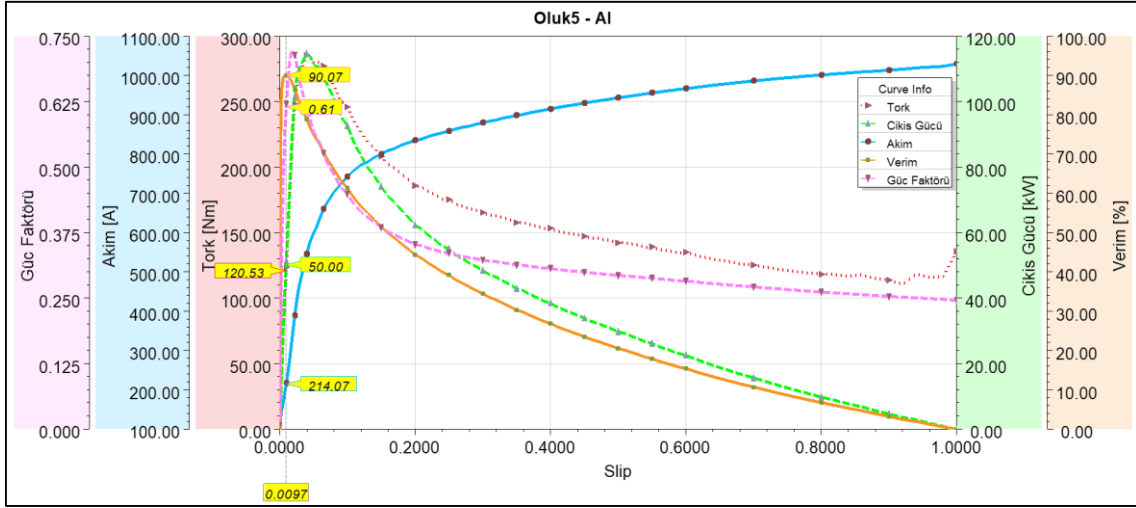


Şekil 5.11. Oluk 4 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri

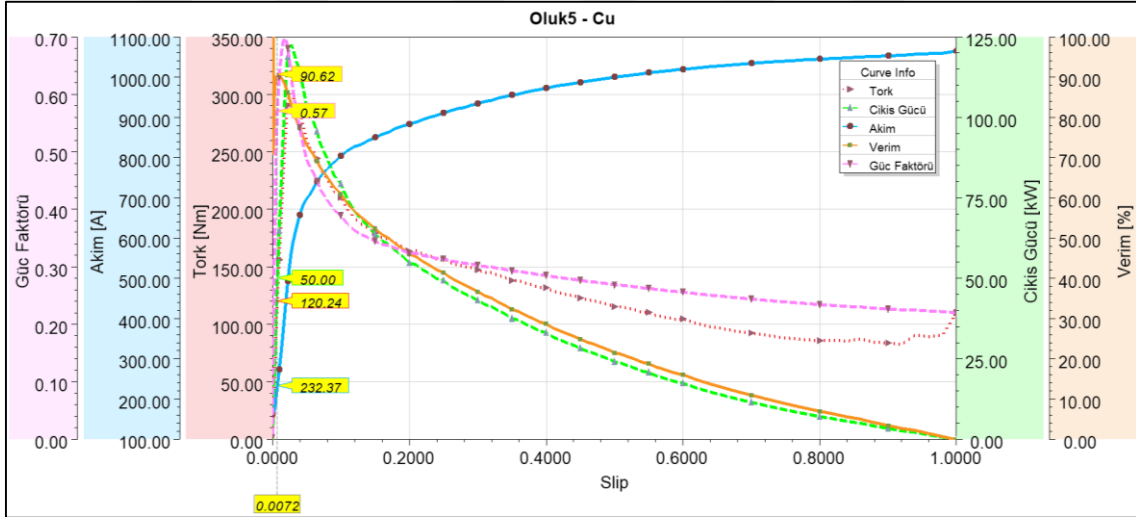


Şekil 5.12. Oluk 4 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 oluk 5 için performans grafiklerini göstermektedir. Grafiklere göre Al kafeste 50 kW çıkış gücü 3961 rpm'de elde edilmiştir. Cu kafeste ise bu güce 3971 rpm'de ulaşılmıştır. Al kafes için bu güç değerinde verim, güç faktörü, tork ve akım değerleri sırasıyla %90,07, 0,61, 120,53 Nm ve 214,07 A olmuştur. Bu veriler Cu kafes için sırasıyla %90,62, 0,57, 120,24 ve 232,37 A olarak elde edilmiştir. Devrilme momenti Al ve Cu kafesler için 3840 rpm ve 3890 rpm hızlarda sırasıyla 285,26 Nm ve 301 Nm olarak elde edilmiştir. Slot5 için Al ve Cu kafesli motorlar için elde edilen başlatma torkları sırasıyla 135,9 Nm ve 110,2 Nm'dir.

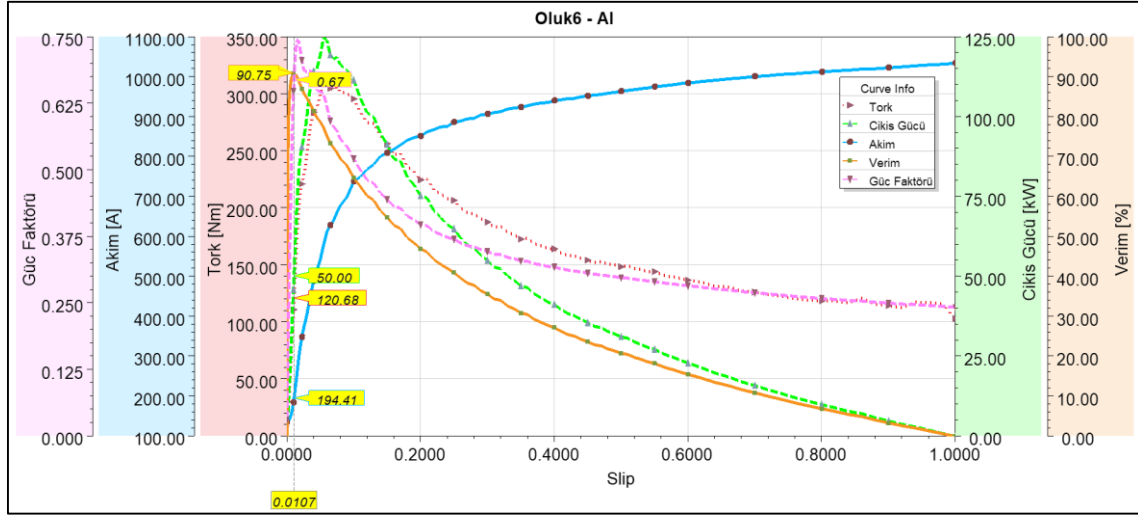


Şekil 5.13. Oluk 5 Al kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri

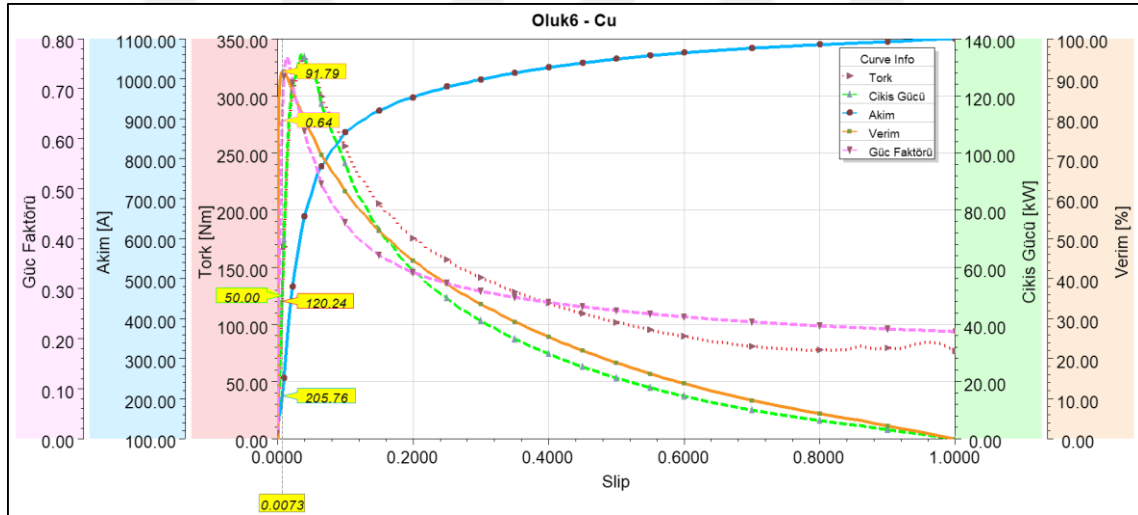


Şekil 5.14. Oluk 5 Cu kısa devre kafesi için hıza bağlı performans grafikleri

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 oluk 6 için performans grafiklerini göstermektedir. Buna göre, arıza torku Al kafes için 3780 rpm'de 314,82 Nm ve Cu kafes için 3860 rpm'de 332,77 Nm olarak elde edilmiştir. Başlangıç torkları Al ve Cu kafesler için sırasıyla 103,13 Nm ve 77,20 Nm olarak elde edilmiştir. Al kafes için 3957 rpm'de elde edilen nominal güç değeri için verimlilik, güç faktörü, tork ve akım değerleri %90,75, 0,67, 120,68Nm ve 194,41 A'dir. Bu değerler Cu kafes için 3970 rpm'de %91,79, 0,64, 120,24 Nm ve 20576 A'dir.



Şekil 5.15. Oluk 6 Al kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri



Şekil 5.16. Oluk 6 Cu kısa devre kafesi için hızla bağlı performans grafikleri

Şekil 5.5- Şekil 5.16 da grafiksel olarak ifade edilen değerlerin bir özeti Çizelge 5.3'de verilmiştir. Buna göre, 50 kW nominal güç en yüksek verimle Cu malzeme kafeslerde elde edilebilmektedir. En yüksek güç faktörü olan 0,67, Al alternatiflerinden daha düşük olan 1. oluk hariç, Cu kafeslerde elde edilmiştir. Ayrıca, Cu kafeslerin nominal çıkış gücü tüm rotor oluğu tiplerinde 4 ila 13 rpm daha düşük hızlarda elde edilmiştir. Çift odacıklı oluklar kendi aralarında incelendiğinde, Al ve Cu arasındaki hız farkı, oluğun üst tarafının köşeli olduğu 5 ve 6 numaralı oluklarda biraz daha belirgin hale gelmiştir. Olukların üst kafes geometrisinin etkisini incelemek için 3, 4 ve 5 numaralı oluklar kendi aralarında karşılaştırıldığında, en yüksek verim 3 numaralı Cu oluk ile elde edilirken, en iyi güç faktörü 0,67 ile 4 numaralı Al oluk ile elde edilmiştir.

Çizelge 5.3. Rotor oluk geometrisine bağlı motor performans parametreleri

| Rotor Oluk Geometrisi / Kısa Devre Kafesi Malzemesi | Hız (rpm) | Verim (%) | Güç Faktörü | Tork (Nm) | Akım (A) |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|----------|
| Oluk1 / Al | 3934 | 90,41 | 0,67 | 121,38 | 196,62 |
| Oluk1 / Cu | 3950 | 92,12 | 0,67 | 120,88 | 196,05 |
| Oluk2 / Al | 3969 | 92,05 | 0,65 | 120,30 | 195,90 |
| Oluk2 / Cu | 3974 | 92,11 | 0,61 | 120,15 | 214,03 |
| Oluk3 / Al | 3966 | 91,61 | 0,64 | 120,41 | 202,74 |
| Oluk3 / Cu | 3973 | 91,91 | 0,60 | 120,17 | 218,05 |
| Oluk4 / Al | 3965 | 91,56 | 0,67 | 120,40 | 196,12 |
| Oluk4 / Cu | 3971 | 91,60 | 0,61 | 120,26 | 218,91 |
| Oluk5 / Al | 3961 | 90,07 | 0,61 | 120,53 | 214,07 |
| Oluk5 / Cu | 3971 | 90,62 | 0,57 | 120,24 | 232,37 |
| Oluk6 / Al | 3957 | 90,75 | 0,67 | 120,68 | 194,41 |
| Oluk6 / Cu | 3970 | 91,79 | 0,64 | 120,24 | 205,76 |

Verimlilik ve güç faktörü gibi performans ölçütlerini sargılardaki akım yoğunluğu ve nüvelerdeki akı yoğunluğu ile değerlendirmek motor tasarımı için daha anlamlıdır. Bu nedenle Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te her bir oluk tipinin 50 kW, 75 kW ve 120 kW'daki akım ve akı yoğunluğu değerlerinin bir özeti gösterilmektedir. Buna göre, stator ve rotorda kullanılan nüve malzemeleri dikkate alındığında, 2,1 T manyetik akı yoğunluğundan daha yüksek akı yoğunluklarında doyma meydana gelecektir. Stator sargılarındaki akım yoğunluğu için, sıvı soğutmalı stator ceketini ile 25 A/mm^2 değerinin üzerindeki akım yoğunluklarında, sargılarda meydana gelen termal yük karşılanamayacaktır. Bu nedenle tüm oluk tipleri arasında 120 kW çıkış gücü sadece 3 numaralı oluk ile Cu kafes kullanıldığında elde edilebilmektedir. Ancak bu seviyedeki tork dalgalanması %17 olduğu için bu güç seviyesinde elektrikli araçlarda kullanıma uygun değildir. Tüm oluk seçeneklerinde belirtilen sınır değere göre 50 kW çıkış gücü elde edilebilmektedir. Fakat elektrikli araçlarda

çekiş motoru olarak kullanılabilmesi için 50 kW nominal ve 75 kW maksimum çıkış gücünü, maksimum %10 tork dalgalanması ile elde edilmek istendiğinde seçenekler daralmaktadır. Hem alüminyum hem de bakır kafes ile bu kısıtları karşılayabilen tek seçenek 1 numaralı rotor olmaktadır. Sadece alüminyum kafes ile 4 numaralı oluk bu kısıtları karşılayabilmektedir Çizelge 5.4 ayrıca her bir oluk geometrisinde alüminyum ve bakır kafesler kullanıldığında farklı güç seviyelerinde hava aralığının ortalama akı yoğunluğunu da göstermektedir. Bu değer, 0,577T ile 0,695T arasında bir ortalama hava aralığı manyetik akı yoğunluğu olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.4. Farklı güç seviyeleri için 1,2,3 numaralı oluklardaki kısa devre kafesine bağlı manyetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu

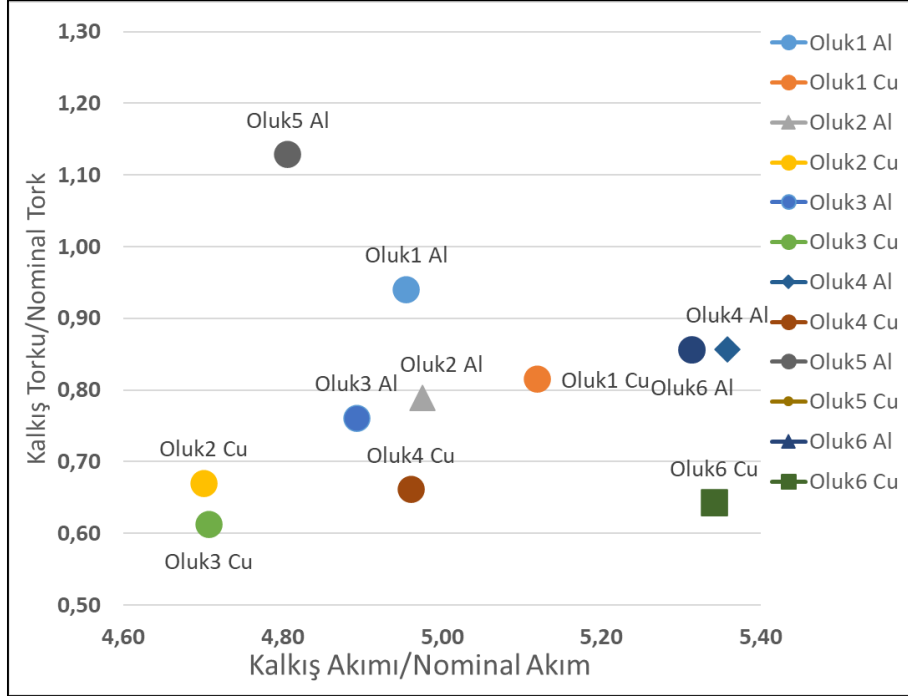
| | | Çıkış Gücü (kW) | Stator Nüvesindeki B_{max} (T) | Sargılardaki J_{max} (A/mm ²) | Rotor Nüvesindeki B_{max} (T) | Kısa Devre Çubuklarındaki J_{max} (A/mm ²) | Hava Aralığındaki B_{avg} (T) | Tork Dalgalanması (%) |
|--------|----|-----------------|----------------------------------|---|---------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------|
| Oluk 1 | Al | 50 | 1,9353 | 12,1512 | 1,5974 | 7,1415 | 0,6378 | 4,9501 |
| | | 75 | 2,0657 | 16,5960 | 1,5681 | 10,7538 | 0,6253 | 4,6797 |
| | | 122 | 2,3504 | 34,5923 | 1,2073 | 26,0059 | 0,6195 | 3,6899 |
| | Cu | 50 | 1,8738 | 11,7440 | 1,6075 | 6,6631 | 0,6388 | 5,7758 |
| | | 75 | 2,0710 | 16,6867 | 1,5727 | 10,7272 | 0,6253 | 4,4717 |
| | | 122 | 2,3374 | 36,2180 | 1,1773 | 27,7221 | 0,6185 | 4,4466 |
| Oluk 2 | Al | 50 | 1,9940 | 11,9145 | 1,7475 | 9,5648 | 0,6266 | 10,6041 |
| | | 75 | 2,1561 | 16,9679 | 1,9785 | 13,6918 | 0,6457 | 17,5189 |
| | | 119 | 2,5149 | 37,9433 | 2,1326 | 47,5079 | 0,6949 | 29,2804 |
| | Cu | 50 | 1,9341 | 12,2535 | 1,7826 | 9,4387 | 0,6079 | 16,8961 |
| | | 75 | 2,1904 | 15,8236 | 2,0133 | 16,7510 | 0,5771 | 8,5708 |
| | | 122 | 2,3967 | 37,2987 | 2,2445 | 59,3174 | 0,6950 | 33,2838 |
| Oluk 3 | Al | 50 | 2,0745 | 9,9689 | 1,7518 | 8,9269 | 0,6393 | 17,0706 |
| | | 75 | 2,1434 | 14,6790 | 1,7790 | 17,6224 | 0,6332 | 19,0345 |
| | | 116 | 2,3992 | 28,0181 | 2,0166 | 30,7491 | 0,6450 | 22,1670 |
| | Cu | 50 | 2,0095 | 9,8229 | 1,8086 | 8,2986 | 0,6250 | 14,0013 |
| | | 75 | 2,1825 | 14,3615 | 1,8110 | 18,7653 | 0,6237 | 20,8513 |
| | | 125 | 2,3704 | 23,8245 | 2,0954 | 31,3248 | 0,6741 | 17,0595 |

Çizelge 5.5. Farklı güç seviyeleri için 4,5,6 numaralı oluklardaki kısa devre kafesine bağlı manyetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu

| | | Çıkış Gücü (kW) | Stator Nüvesindeki B_{max} (T) | Sargılardaki J_{max} (A/mm ²) | Rotor Nüvesindeki B_{max} (T) | Kısa Devre Çubuklarındaki J_{max} (A/mm ²) | Hava Aralığındaki B_{avg} (T) | Tork Dalgalanması (%) |
|--------|----|-----------------|----------------------------------|---|---------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------|
| Oluk 4 | Al | 50 | 1,9466 | 10,5242 | 1,6689 | 7,8151 | 0,6324 | 8,5145 |
| | | 75 | 2,0667 | 12,8679 | 1,8840 | 13,8868 | 0,661 | 6,5597 |
| | | 119 | 2,3578 | 26,9268 | 2,2290 | 34,2567 | 0,6469 | 26,6253 |
| | Cu | 50 | 2,0962 | 11,5201 | 1,9231 | 8,5003 | 0,6383 | 11,5755 |
| | | 75 | 2,4575 | 31,4627 | 2,0943 | 49,2515 | 0,6437 | 26,6616 |
| | | 121 | 2,4087 | 32,0494 | 2,1030 | 40,3298 | 0,6522 | 26,6219 |
| Oluk 5 | Al | 50 | 2,0970 | 10,6219 | 1,8360 | 12,9833 | 0,6519 | 19,5637 |
| | | 75 | 2,0854 | 15,3228 | 0,8140 | 19,8549 | 0,6224 | 16,7720 |
| | | 115 | 2,4478 | 27,8966 | 2,0596 | 29,5352 | 0,6405 | 18,9449 |
| | Cu | 50 | 1,9386 | 10,5513 | 1,8313 | 11,7339 | 0,6350 | 15,0984 |
| | | 75 | 2,1707 | 17,8593 | 2,0551 | 23,8050 | 0,6458 | 23,5898 |
| | | 122 | 2,3728 | 27,0752 | 2,1144 | 33,7235 | 0,6276 | 40,3297 |
| Oluk 6 | Al | 50 | 1,8842 | 9,6180 | 1,3349 | 10,0398 | 0,6415 | 15,9998 |
| | | 75 | 2,0272 | 12,4118 | 1,6035 | 21,4854 | 0,6260 | 13,5777 |
| | | 125 | 2,3421 | 31,2747 | 1,5024 | 39,4789 | 0,6423 | 19,4112 |
| | Cu | 50 | 1,9070 | 9,8367 | 1,4013 | 13,0427 | 0,6428 | 17,2224 |
| | | 75 | 2,0697 | 14,9273 | 1,3466 | 18,4682 | 0,6422 | 15,2608 |
| | | 135 | 2,4301 | 31,5760 | 1,5415 | 51,0047 | 0,6167 | 24,9212 |

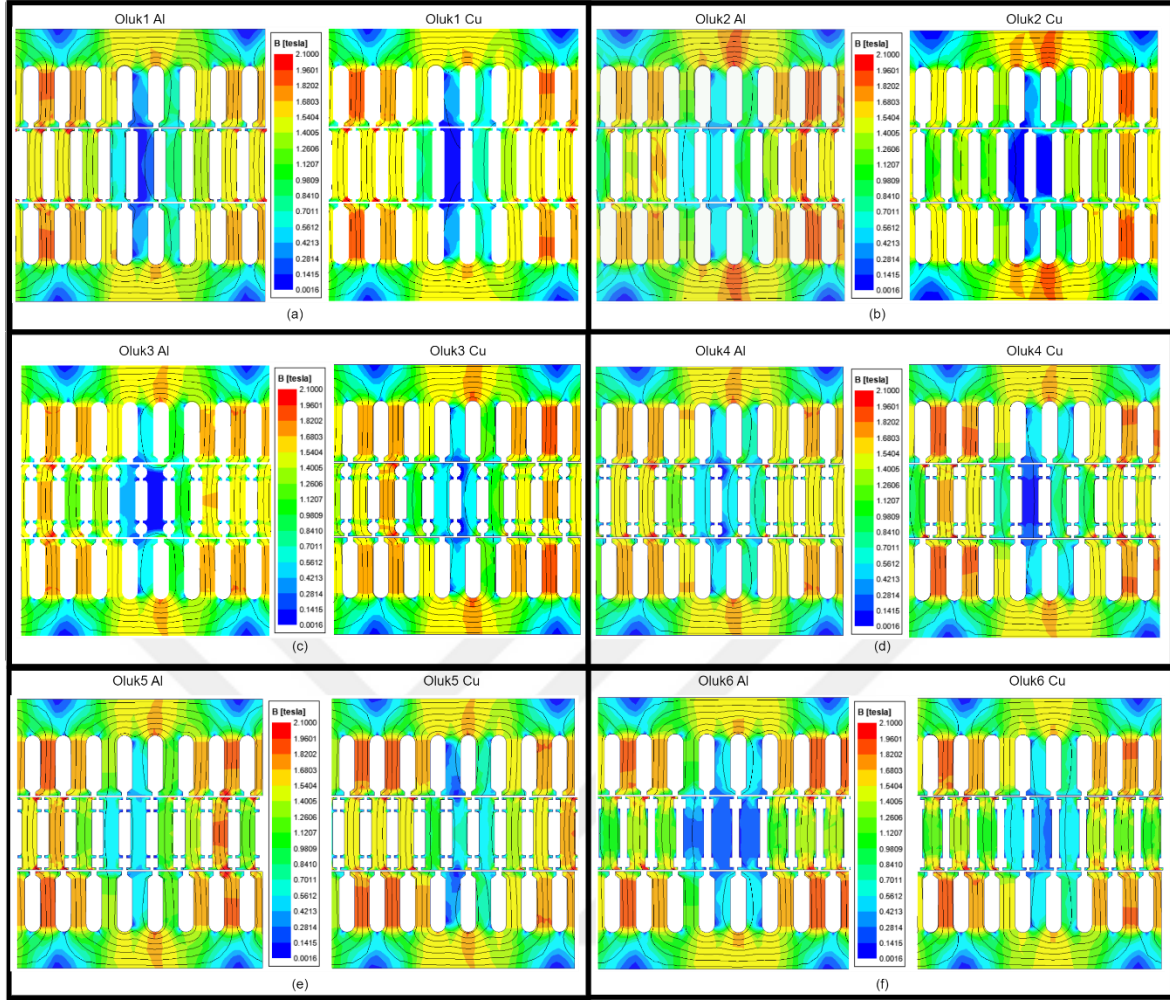
Şekil 5.17'de her bir rotor oluşunun kalkış/nominal akım ve tork değerlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Tasarlanan motorun rotor oluk geometrisinin seçiminde düşük akım ve yüksek tork öncelikli ise Şekil 5.17 bu konuda ön bilgi sağlayacaktır. Buna

göre 2 ve 3 numaralı Cu kafes oluk geometrileri bu konuda öne çıksa da diğer tasarım kriterlerini karşılamadığı için uygun bulunmamıştır.



Şekil 5.17. Başlangıç/nominal tork ve akım oranları

Rotor oluk geometrilerinin 2B parametrik SEY analizleri ANSYS Electronics yazılımı ile tam modeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre, 50 kW nominal güçte rotor ve stator nüveleri üzerindeki manyetik akı yoğunluğu ve 1/6 modeller üzerindeki akı çizgilerinin dağılımı Şekil 5.18’de ifade edilmiştir. Buna göre motor bileşenlerinde herhangi bir doyma olmadığı, sadece dış bölgelerinde ihmal edilebilir lokal doyma meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.18. Stator/rotor çekirdeklerindeki manyetik akı yoğunlukları ve akı yolları (a) Oluk1 (b) Oluk2 (c) Oluk3 (d) Oluk4 (e) Oluk5 (f) Oluk6

Sonuçlar bir bütün olarak ele alınıp değerlendirildiğinde bu bölümde, elektrikli araçlarda çekiş motoru olarak kullanılmak üzere farklı rotor oluk geometrileri ve farklı kısa devre kafesi malzemeleri ile nominal gücü 50 kW ve maksimum gücü 75 kW olan 8 kutuplu bir EAASM tasarlanmıştır. 6 farklı rotor oluk geometrisi hem alüminyum hem de bakır kafesler kullanılarak SEY ile test edilmiştir. Analizlerde, analiz süresi ve işlemci yükü açısından avantaj sağladığı için EAASM'lerin 2B lineer modelleri kullanılmıştır. Rotor oluk şekli ve kafes malzemesinin motor çıkış parametreleri üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla stator tasarımı tüm motorlar için aynı şekilde uygulanmıştır. Bu şekilde 12 motor 98 farklı hızda analiz edilmiş ve kaymaya bağlı performans grafikleri elde edilmiştir. Analiz sonucunda nominal çalışmada en yüksek verim %92,12 ile bakır kafesli 1 numaralı rotor oluk geometrisi seçildiğinde elde edilmiştir. Bu motorda 50 kW çıkış gücünde stator sargılarındaki akım $196,05 A_{rms}$ olarak ölçülmüştür. Stator sargılarında $11,744 A/mm^2$

akım yoğunluğu ölçülmüştür. Stator soğutma ceketi kullanılarak EAASM'nin 25 A/mm^2 akım yoğunluğuna kadar çalıştırılabilmesi nedeniyle bu değer tasarım kısıtı olarak belirlenmiştir. Ayrıca bir diğer sınırlayıcı faktör olarak stator ve rotor nüvelerindeki manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri 2,1 T olarak belirlenmiştir. Elektrikli araçlarda yüksek verim ve yüksek termal tolerans gibi önemli kriterler arasında yer alan sessiz çalışmayı da sağlamak için maksimum %10 tork dalgalanması hedeflenmiştir. Bu tasarım kriterlerine göre her bir rotor oluk geometrisi ve kısa devre kafesi malzemesi için stator dışlarındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu ve sargılardaki maksimum akım yoğunluğu 50 kW, 75 kW güç seviyelerinde ve her bir motorun devrilme torkunda ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, rotor nüvesindeki maksimum manyetik akı yoğunluğu, rotor çubuklarındaki maksimum akım yoğunluğu, hava aralığı ortalama akı yoğunluğu ve tork dalgalanması analiz edilmiştir. En düşük tork dalgalanması tüm güç seviyelerinde 1 numaralı olukta elde edilmiştir. 50 kW ve 75 kW çıkış gücünde, 1 numaralı oluktaki tork dalgalanma değerleri sırasıyla alüminyum kafes için %4,95, %4,68 ve bakır kafes için %5,78, %4,47 olarak elde edilmiştir. Bu oluk tipleri ve malzemelerinde de diğer tüm alternatiflerde olduğu gibi hem akı yoğunluğu hem de akım yoğunluğu açısından 120 kW seviyesinde tasarım sınır değerleri aşılmıştır. En uygun seçenek olarak belirlenen 1 numaralı rotor oluk geometrisinde bakır kafesler ile alüminyum kafeslere kıyasla daha yüksek verim elde edilmiştir. Sonuç olarak, ana hedefler olan yüksek verim ve düşük tork dalgalanması bakır kafesli motor ile 1 numaralı rotor geometrisinde elde edilmiştir.

6. MOTOR OPTİMİZASYONU VE SEY ANALİZİ SONUÇLARI

Elektrik motoru üreticileri, sınırlı hacimde belirlenen performans gereksinimlerini korurken, esas olarak üretim maliyetlerini ve malzemeleri en aza indirmek amaçlayan optimize edilmiş motorların geliştirilmesini her zaman talep etmişlerdir. Bununla birlikte, elektrik makinelerinin optimum tasarımı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışı nedeniyle doğrusal olmayan tasarım parametrelerine bağlı olduğundan karmaşık bir konudur [145]. Motor tasarım hedeflerini karşılamak genellikle zordur. Örneğin yüksek verimliliğe sahip düşük maliyetli ve yüksek güç yoğunluklu motorlar sıklıkla hedeflenir. Bu nedenle, optimum tasarım ile istenilen ideale en yakın tasarım elde edilebilir ve genellikle uzlaşmış bir nihai çözüm seçilir. Tasarım sürecinin basitleştirilmiş hali, iki ana başlık altında ele alınabilir. Bunlardan birincisi klasik optimizasyon teknikleri (deterministik yöntemler), ikincisi ise stokastik yani değişken ve rastlantısal yöntem olarak genetik algoritma (GA) yöntemidir [145].

Holland [146] GA'yı bir bilgisayar algoritması olarak sunduğundan beri, GA'nın çeşitli bilimsel alanlarda çok çeşitli uygulamaları ortaya çıkmış ve GA'nın karmaşık problemleri, özellikle de optimal tasarım problemlerini çözebilecek kadar güçlü olduğu kanıtlanmıştır. Doğal seçim ve doğal genetik mekaniğine dayanan evrimsel arama algoritmalarından birisi olarak GA'lar, en basit şekilde, en uygun olanın hayatta kalması kavramını uygular. Değerlendirme sırasında atanan uygunluk değerine doğrudan bağlı olan üreme başarısı önemli bir ölçüttür. Bu rastgele süreçte, en az uygun çözümün üreme şansı düşükken, en uygun çözümün üreme şansı daha yüksektir. En iyiyi arama süreci, kromozomları temsil eden rastgele oluşturulmuş bir popülasyondan başlar ve belirli sayıda genetik işlem neslinden sonra optimum çözüme ulaşır. Optimizasyon, dize yapılarının bir nesilden diğerine hayatta kalmasına dayanır; burada bir önceki nesilden hayatta kalanların bilgi bitleri veyahut diğer bir adlandırma ile genleri kullanılarak yeni bir geliştirilmiş nesil oluşturulur.

Arama kromozomları temsil eden dizilerin rastgele oluşturulmuş bir popülasyonundan başlar ve genetik işlemler uygulanarak belirli sayıda nesilden sonra optimum çözüme ulaşır. Arama sonsuza kadar devam edebilir. Bu nedenle, algoritmaya durma zamanının geldiğini söylemek için bir durdurma kuralı gereklidir. Bu, birçok farklı yolla elde edilir ve aynı zamanda kullanıcıya ve probleme bağlıdır. Olası yöntemlerden bazıları; nesil sayısını sabitlemek ve tüm nesillerin en iyi bireyini optimum sonuç olarak kullanmak, geçen süreyi

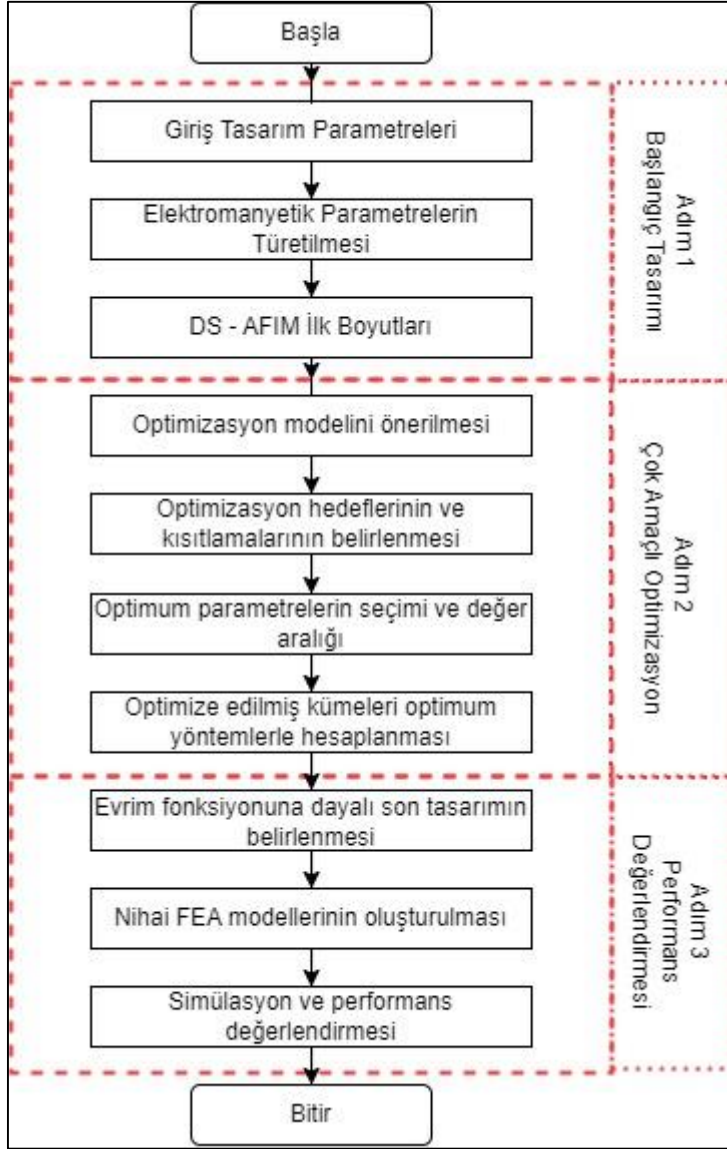
sabitlemek ve optimum sonucu benzer şekilde seçmek veya tüm popülasyonun belirli bir hata payı ile ortalama bir uygunluğa yakınsamasına izin vermektir. GA'nın parametreleri algoritmanın çalışma şeklini şekillendirir.

6.1. Çok Amaçlı Genetik Algoritma ve Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon problemlerinin çoğu, gerçek dünya uygulamalarında optimize edilmesi gereken birden fazla amaç içerir. Gerçek hayat problemlerinin çoğunda amaçlar genellikle çelişkilidir. Tek bir çözüm her iki amaç fonksiyonunu da tatmin etmeyecektir ve bir amacın optimal çözümü problemin diğer amacı için en iyi çözüm olmayacaktır. Bu nedenle, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde tüm amaçlar için en uygun çözümleri temsil edecek bir çözüm kümesi gereklidir.

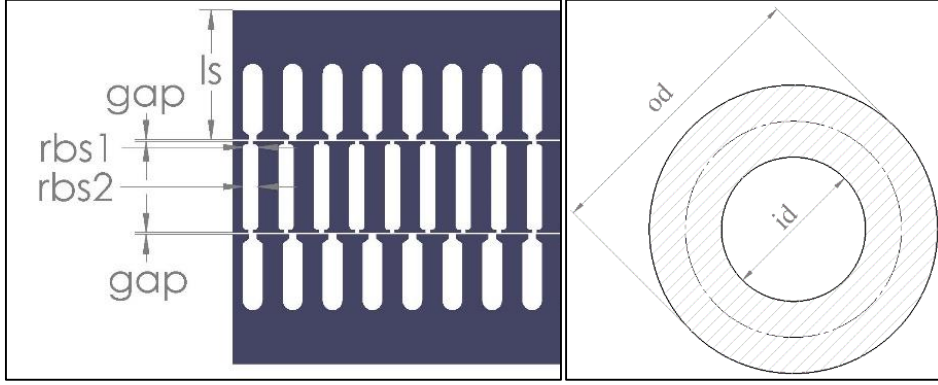
Popülasyon tabanlı çözümler kullanan evrimsel yöntemlerin özelliği, çok amaçlı optimizasyon problemleri (ÇAOP'lar) için çok uygundur. ÇAOP'yi çözmek için kullanılan yaklaşımlar, baskın olmayan çözümler kümesini bulmayı amaçlar. Bu yaklaşımlar, her nesilde baskın olmayan bir çözüm kümesi olan pareto cephesinin yaklaşımını üretebilir. Bu özellik, bu yaklaşımları ÇAOP için uygun hale getirmektedir. Probleme ilgili çok az ön bilgi gerektirmesi, pareto cephesinin şekline ve sürekliliğine daha az duyarlı olması, kolay uygulanabilirliği, sağlamlığı ve paralel yürütülebilmesi evrimsel algoritmaların avantajlarından bazılarıdır.

Popülasyon tabanlı bir yaklaşım olan GA'lar ÇAOP'leri çözmek için çok uygundur. GA'lar türlerin kökenini açıklayan evrim teorisinden esinlenmiştir. Doğada güçlü bireyler, genlerini üreme yoluyla gelecek nesillere aktarmak için zayıf ve düşük uygunluklu bireylerden daha fazla fırsata sahiptir. Çok amaçlı GA, tek bir çalışmada bir dizi çoklu baskın olmayan çözüm bulmak için değiştirilebilir. GA'lar bir çözüm uzayının farklı bölgelerini eşzamanlı olarak arayabilir. Bu, GA'ların zor ÇAOP'ler için gerekli olan çeşitli çözümler bulmasına olanak tanır. GA'nın çaprazlama operatörü, pareto cephesinin keşfedilmemiş bölgelerinde yeni baskın olmayan bireyler oluşturmak için farklı hedeflere göre iyi çözümlerin kritik noktalarından yararlanabilir. Bu özellikler GA'yı ÇAOP'ler için en popüler sezgisel yaklaşımlardan birisi haline getirmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan algoritmanın akış diyagramı Şekil 6.1'de ifade edilmiştir.



Şekil 6.1. Çok amaçlı genetik algoritma akış diyagramı

Bu tez çalışmasında çok amaçlı genetik algoritmanın (ÇAGO) giriş parametresi olarak sadece rotor oluk parametreleri belirlenmiştir. Stator sargı yapısı ile oluk parametreleri bütün rotor oluklarının motor performansına etkisini ayrı ayrı ortaya koymak amacıyla sabit tutulmuştur. Rotor oluklarındaki parametreler Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Belirlenen optimizasyon parametrelerinde değer aralıkları dış kalınlıkları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Ayrıca başlangıçta belirlenen tasarımda %5,77 gibi düşük bir tork dalgalanması elde edilmiştir. Bu sebeple tork dalgalanmasında daha etkili olan rotor oluk ağzı yükseklikleri optimizasyona dahil edilmemiştir. Optimizasyonda kullanılan rotor oluk parametreleri ve motor çapı parametreleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Giriş parametrelerinin özeti ve değer aralığı Çizelge 6.1’de ifade edilmiştir.



Şekil 6.2. Optimizasyonda kullanılan parametreler

Çizelge 6.1. Optimizasyon değişkenleri ve değer aralıkları

| Değişken | Açıklama | Değer Aralığı |
|------------------|--|--------------------------|
| g | Hava aralığı (mm) | [0,5; 0,8] |
| l _s | Stator paket boyu (mm) | [35; 45] |
| d _{dış} | Motor dış çapı (mm) | [235; 275] |
| rbs1 | Rotor oluk gövdesi başlangıcı genişliği (mm) | [4; 5,5] |
| rbs2 | Rotor oluk gövdesi bitişi genişliği (mm) | [4; 5,5] |
| s | Kayma | [0,00612927; 0,00749] |

Optimizasyonda kullanılan giriş parametrelerine göre değişen üç adet amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Motor performansının ölçülmesinde kullanılan bu amaç fonksiyonlarından ilki, motor performansının belirli bir güç değerinde sağlanması gerektiğini ifade eden motor çıkış gücüdür. Bu değer 50 kW'a eşit veya büyük olması belirli ölçülerde kayma değeri değiştirilerek ölçülebilmektedir. İkinci amaç fonksiyonu motorun verimini ifade etmektedir. Buna göre motor çıkış gücüne eklenen kayıplar ile motor giriş gücü elde edilmektedir. Bu sayede motor verimi hesaplanır. Üçüncü ve son amaç fonksiyonu güç faktörüdür. Bu değer bilindiği üzere motor girişine uygulanan aktif ve reaktif güç değerleri kullanılarak ölçülmektedir. Bu üç amaç fonksiyonu ve SEY'de tanımlı denklemleri Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

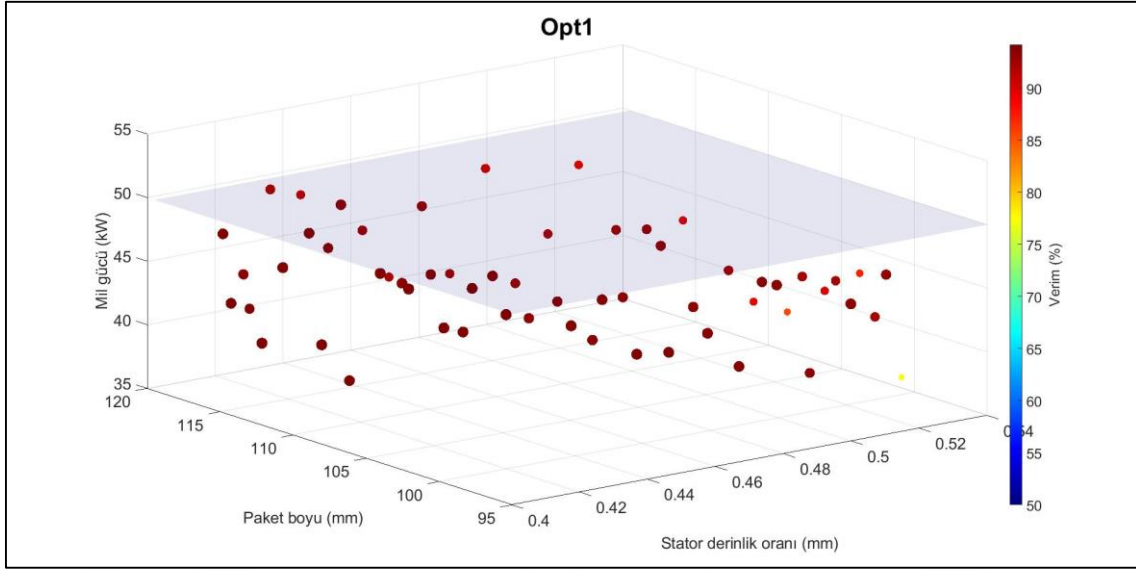
Çizelge 6.2. Optimizasyon algoritmasının amaç fonksiyonları ve hesaplama yöntemleri

| | Hesaplama Yöntemi | Amaç Fonksiyonu | Hedef Değer |
|-------------|--------------------------------------|--|----------------|
| Çıkış Gücü | $P_o=T*w$ | (Moving1.Force_x*Moving1.Speed) | ≥ 50 (kW) |
| Verim | $\eta = P_o/P_{in}$ | $((\text{avg}(\text{Moving1.Force_x}*\text{Moving1.Speed}))/(\text{avg}(\text{Moving1.Force_x}*\text{Moving1.Speed})+(\text{avg}(\text{CoreLoss})+\text{avg}(\text{EddyCurrentLoss})+\text{avg}(\text{ExcessLoss})+\text{avg}(\text{HysteresisLoss})+\text{avg}(\text{SolidLoss})+\text{avg}(\text{StrandedLossR})+(0.042*(96.70173755*V_m_s)))))*100$ | ≥ 94 (%) |
| Güç Faktörü | $\text{Cos}\theta = P_{in}/ S_{in} $ | $\text{avg}(\text{cos}(\text{atan}((0.6*((\text{InputVoltage}(\text{PhaseB})-\text{InputVoltage}(\text{PhaseC}))*\text{Current}(\text{PhaseA})+(\text{InputVoltage}(\text{PhaseC})-\text{InputVoltage}(\text{PhaseA}))*\text{Current}(\text{PhaseB})+(\text{InputVoltage}(\text{PhaseA})-\text{InputVoltage}(\text{PhaseB}))*\text{Current}(\text{PhaseC})))))/((\text{avg}(\text{Moving1.Force_x}*\text{Moving1.Speed})+(\text{avg}(\text{CoreLoss})+\text{avg}(\text{EddyCurrentLoss})+\text{avg}(\text{ExcessLoss})+\text{avg}(\text{HysteresisLoss})+\text{avg}(\text{SolidLoss})+\text{avg}(\text{StrandedLossR})+(0.042*(96.70173755*V_m_s))))))$ | ≥ 0.8 |

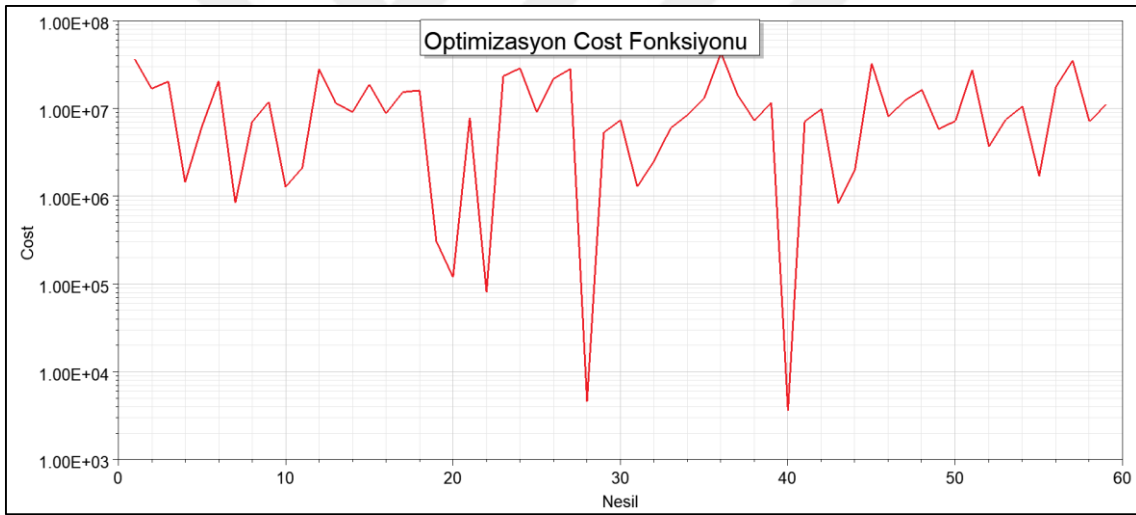
Elde edilen analiz sonuçlarına göre, motorun %94 ve üzerinde bir verimle nominal gücü üretmesi amacıyla tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon süresini kısaltmak amacıyla daha önceki analizlerde olduğu gibi optimizasyon sürecinde de motorun 2B lineer modeli kullanılmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak “Multi-Objective Genetic Algorithm (RandomSearch)” tercih edilmiştir. Rotor geometrisinin optimizasyonu ana hedef olduğu için stator parametrelerinden hiçbirisi optimizasyon algoritmasına dahil edilmemiştir. Rotor sincap kafes malzemesinde bakır kullanımı bu tezin yenilikçi yönlerinden birisi olduğu için ve ayrıca, motor verimine etkisi optimizasyon öncesinde yapılan analizlerle ortaya konulduğundan bakır kısa devre kafesi kullanılmıştır. Rotor oluk geometrisinde oluk gövdesi başlangıç genişliği (rbs1), oluk gövde bitişi genişliği (rbs2) optimize edilmiştir. Özellikle tork dalgalanmasında etkili olan gövde başlangıcının hava aralığına mesafesini ifade eden (rhs0), oluk gövdesinin omuz yüksekliğini ifade eden (rhs1) zaten düşük tork dalgalanması elde edildiği için optimizasyona dahil edilmemiştir. Oluk geometrisinde bir diğer yükseklik ifadesi olan oluk gövde yüksekliği (rhs2) ise zaten NS topolojisi kullanıldığı için sabit olmak zorundadır. Oluk yüksekliğindeki bir kısaltma işlemi rotor akısının rotor

nüvesinde ikiye ayrılmasına sebep olacak bir bölünmeye sebep olacaktır. Tersî durumda ise rotor oluğu, simetrik tersî alınarak SEY modeli üretildiğinden çakışma söz konusu olacağından hatalı geometriye sebep olacaktır. Bu yüzden rhs2 değeri rotor boyunduruk uzunluğuna uygun olarak belirlenmiştir. Motorun belirlenen nominal güce doyum olmadan farklı hava aralığı değerlerinde ulaşabilmesi için stator boyunduruk uzunluğu (ls) ve hava aralığı mesafesi (g) de optimizasyona dahil edilmiştir. Motorun başlangıç parametresi olarak belirlenen dış çap değeri optimizasyon parametreleri arasında yer almaktadır. Dış çapı ifade eden bu değer optimizasyona dahil edilirken, stator sargı direnci ve sargı sonu dirençlerine de etkisi göz önünde bulundurularak tasarımda bu dirençleri ifade eden yerlere ortalama çap değeri kullanılarak dahil edilmiştir.

Optimizasyon işlemi için hedeflenen değerler asenkron motor için ulaşılması yüksek hedeflerdir. Bu sebeple tanımlanan üç amaç fonksiyonu tek bir hata fonksiyonu içinde belirli ağırlıklar ile tekrar tanımlanabilir. Optimizasyonun ana hedefi olan yüksek verim ancak iyi bir güç faktörü ile elde edilebilecektir. Bu sebeple tanımlanan hata fonksiyonunun içinde %60 ağırlık ile birincil önem verime ayrılırken, hedeflenen güç değeri ve güç faktörü geri kalan kısımda eşit oranda ağırlıklandırılmıştır. Bu sayede %60 ağırlıkta verim hedefi, %20'şer ağırlıkta güç ve güç faktörü hedefleri yeni amaç fonksiyonu içerisinde tanımlanmıştır. Elde edilen yeni amaç fonksiyonu hedeflenen değer ile elde edilen değer arasında farka göre çalıştığından bir nevi hata fonksiyonudur. Bu hata fonksiyonunun minimize edildiği durumda optimizasyon da aynı oranda gerçekleşmiş olacaktır. Optimizasyon sonuçlarının hepsini aynı anda göstermek amacıyla oluşturulan grafik Şekil 6.3'te verilmiştir. Buna göre 50 kW seviyesine geçen sadece 3 iterasyon elde edilebilmiştir. Şekil 6.4'de verilen cost fonksiyonuna göre istenen hedeflere ulaşamamıştır.



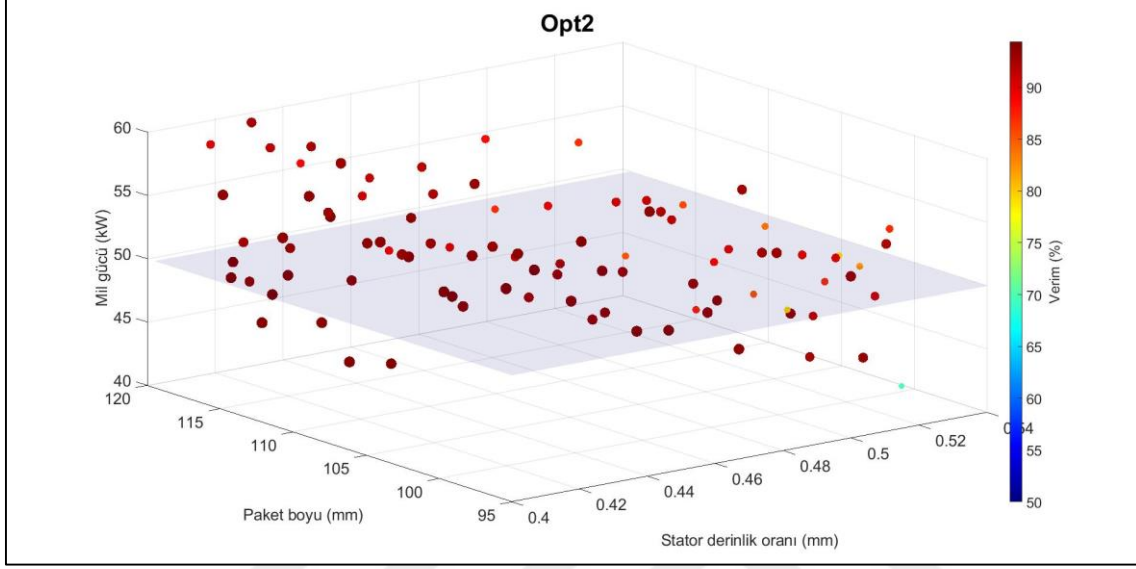
Şekil 6.3. Opt1 modeli optimizasyon adımlarında elde edilen veriler



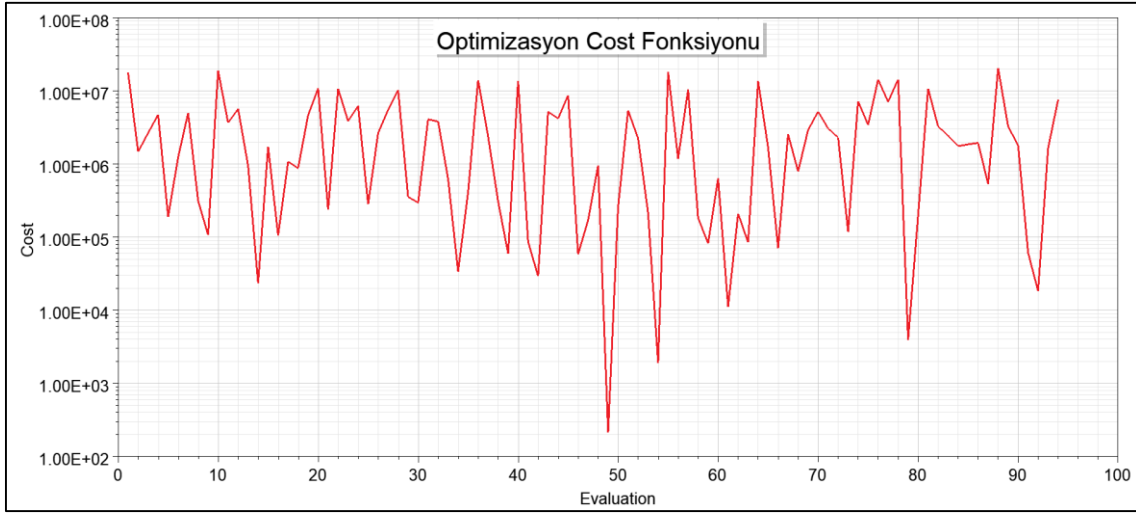
Şekil 6.4. Opt1 optimizasyon başarımlı süreci

Optimizasyon işlemi sonucunda %93,31 verim ile nominal çıkış gücü elde edilebilmiştir. Buna göre verim hariç optimizasyon hedefine ulaşıldığı görülmüştür. Bu verim değeri belirlenen bir kayma değerinde olduğu için daha yüksek verimler, optimizasyon sonucu elde edilen çıkış değerleri kullanılarak elde edilecek verim haritasında %94 üzerinde beklenmektedir. Fakat 100 iterasyon ile sınırlanan optimizasyon işleminde spir sayısı ve paralel kol sayısı sırasıyla 10 ve 4 olarak belirlendikten sonra %66,89 doluluk oranıyla stator sargı yapısı değiştirilerek Opt2 isimli model elde edilmiştir. Elde edilen yeni modelde diğer bütün değişkenler sabit tutularak bir önceki model olan Opt1 isimli modelde kullanılan optimizasyon algoritması aynı şekilde kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Yeni

modelde 94 iterasyon sonucunda tanımlı bütün amaç değerlerine ulaşılmıştır. Opt2 modeline ait optimizasyon sonuçlarını ifade eden grafik Şekil 6.5'te verilmiştir. Buna göre optimizasyon işlemi sonucunda bütün amaçlara ulaşıldığı görülmektedir. Opt2 modeline ait cost fonksiyonunun çıktısı Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.5. Opt2 modeli optimizasyon adımlarında elde edilen veriler



Şekil 6.6. Opt2 optimizasyon başarımlı süreci

Başlangıç tasarımı, Opt1 ve Opt2 modeline ait tasarım optimizasyonu parametreleri ve motor performans değerleri Çizelge 6.3'te özetlenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre başlangıç değerleri göz önünde bulundurulduğunda Opt1 modelinde hava aralığı 0,5585 mm'ye düşerken Opt2 modelinde 0,6605 mm'ye düşmüştür. Bu değerlere

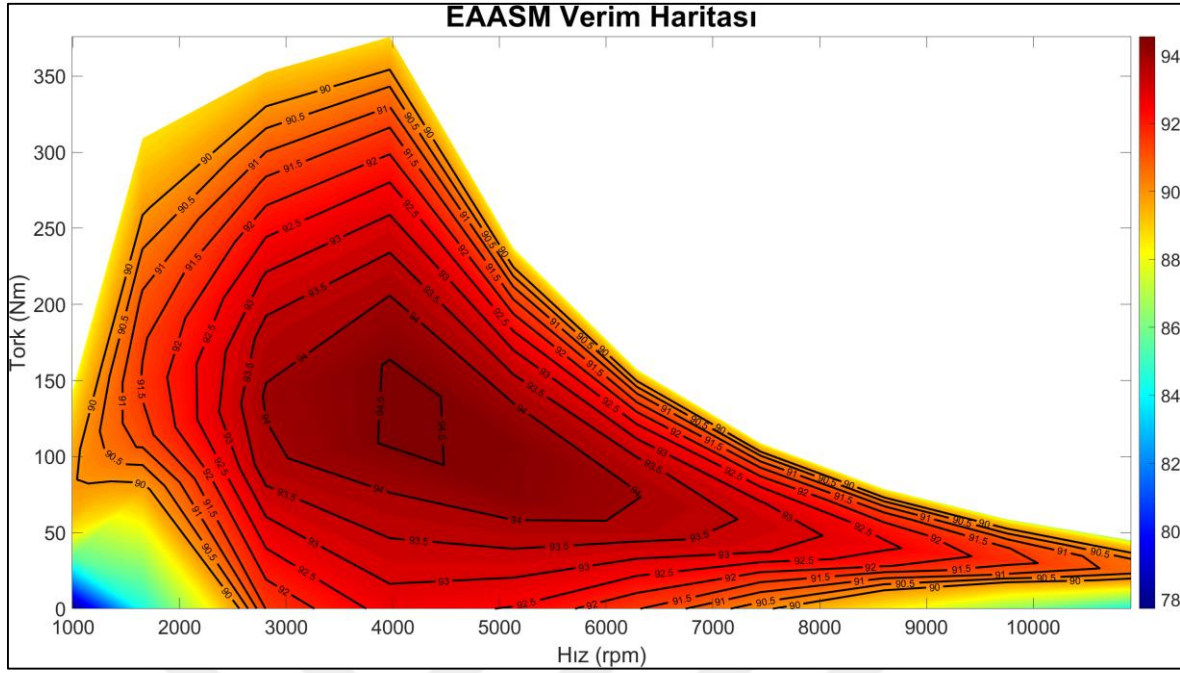
bakılarak birincil öncelikteki verim hedefine ulaşmak için hava aralığının düşürülmesi gerektiği sonucu çıkarılmaktadır. EAASM dış çap değerinin ve stator boyunduruğunun başlangıç değerine göre her iki modelde de artmış olması nüve kayıplarını artırsa da hava aralığının azalması ve güç faktöründeki yükselmeler sayesinde verime olumsuz etkisi sınırlı kalmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre nominal güçte %94 verim değerinden daha yüksek bir verim ile çalışabilecek bir EAASM için büyük ebatlarda ve dolayısı ile daha maliyetli bir tasarımın gerekli olduğu sonucu çıkmaktadır.

Çizelge 6.3. Başlangıç tasarımı ve optimizasyon sonrası tasarım ve performans değerleri

| Değişken | Açıklama | Değer Aralığı | Başlangıç Tasarımı | Opt1 | Opt2 |
|------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------|----------|----------|
| g | Hava aralığı (mm) | [0,5; 0,8] | 0,7 | 0,5585 | 0,6605 |
| ls | Stator paket boyu (mm) | [35; 45] | 40 | 42,8625 | 41,7688 |
| od | Motor dış çapı (mm) | [235; 275] | 245 | 251,4963 | 274,2123 |
| rbs1 | Rotor oluk gövdesi üst genişliği (mm) | [4; 5,5] | 5 | 5,3875 | 4,9315 |
| rbs2 | Rotor oluk gövdesi alt genişliği (mm) | [4; 5,5] | 5 | 5,1402 | 4,8690 |
| s | Kayma | [0,00612927; 0,0749] | 0,01250 | 0,00714 | 0,00729 |
| N | Devir sayısı (rpm) | - | 3950 | 3971 | 3971 |
| P _{out} | Mil gücü (kW) | - | 50.015 | 49,228 | 50,098 |
| η | Verim (%) | - | 92,12 | 93,311 | 94,021 |
| pf | Güç faktörü | - | 0,689 | 0,787 | 0,818 |

6.2. EAASM Verim Haritası

Elektrik motorlarının performans analizinde önemli göstergelerden birisi de hıza bağlı tork değerlerinin verim ile birlikte sunulmasıdır. Elektrikli araçlarda motorun farklı hızlardaki performans değerlendirmesi tork hız ve verimin birlikte sunulduğu verim haritaları kullanılarak ifade edilebilir. Verim haritalarını iki temel bölgeye ayırmak gerekirse birinci bölge sabit tork bölgesi ikinci bölge sabit güç bölgesi olacaktır [147]. Sabit tork bölgesi çoğunlukla şehir içi kullanımları ifade eden, baz hıza kadar olan bölgedeki çalışmayı ifade eder. Bu bölgede gerilim ve frekans değişimleri sayesinde sınırlar belirlenir. Sabit tork bölgesinde çıkış gücü baz hız değerine kadar artış gösterir. Baz hızdan sonra mil torkunda düşüş, mil hızında ise artış olacağı için sabit bir güç elde edilir. Bu bölgenin adı bu yüzden sabit güç bölgesidir [148]. Sabit güç bölgesinde otoyol sürüşü gibi yüksek hızlarda çalışmayı belirten çalışma durumu izlenmiş olacaktır. Hem sabit tork hem de sabit güç bölgesinde motor tek bir tork ya da hız değerinde çalıştırılmayabilir. Her hız değerinde farklı tork değerlerinde çalışma durumunun da doğru bir performans analizi açısından ele alınması gerekir. Bu tez çalışmasında da EAASM'nin verim haritasının elde edilebilmesi için 3B yarım modeller kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı hız değerlerini her bir tork değerinde elde edebilmek için gerilim, kayma ve frekans değiştirilerek analizler yapılmıştır. Analizlerde frekans 66,667 Hz ile 733,33 Hz arasında değiştirilerek 1000 rpm ile 11000 rpm arasında bir hız aralığı elde edilmiştir. Bu aralıktaki 10 farklı frekans seviyesinde %0,3 ile %2,7 arasındaki 10 farklı kayma değerinde 188 V, 140 V, 94 V ve 48 V olmak üzere dört farklı sargı beleme gerilimi kullanılarak toplamda 400 analiz ile değerlendirilmiştir. Bu sayede başta verim haritası olmak üzere hıza bağlı çıkış gücü ve akım grafikleri edilmiştir. Şekil 6.7'de EAASM'nin verim haritası hıza ve torka bağlı renklendirilmiş grafik kullanılarak verilmiştir.



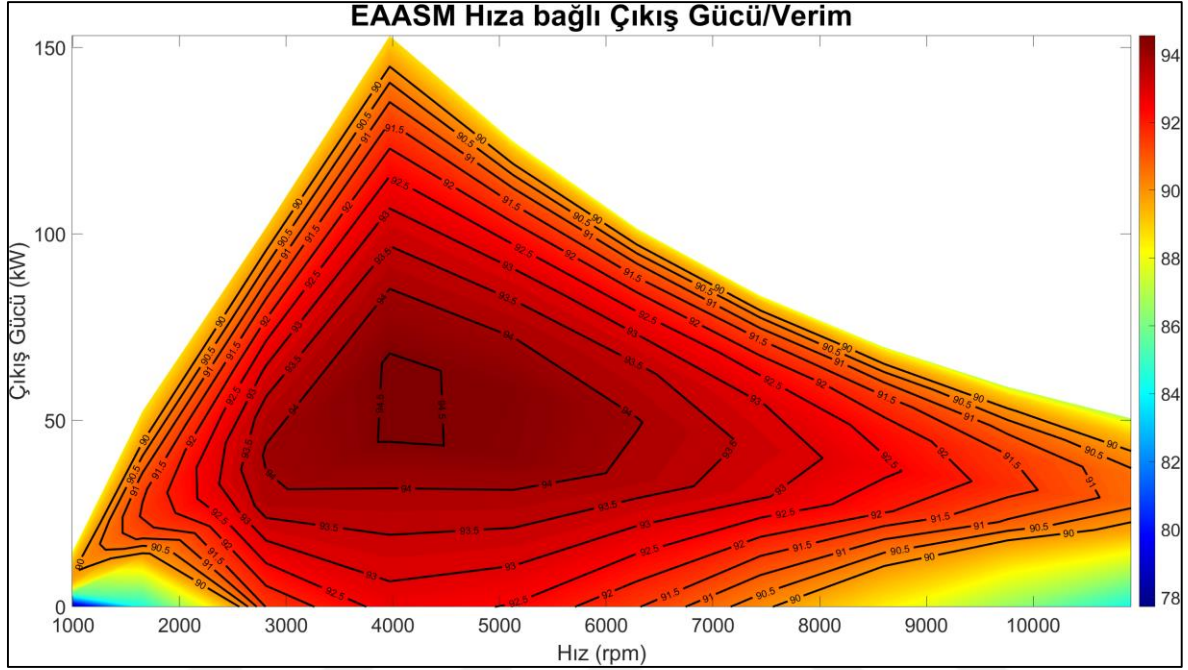
Şekil 6.7. Verim Haritası

Şekil 6.7’de gösterilen 3B grafikte yatay eksen (X eksen) hızı, dikey eksen (Y eksen) çıkış torkunu, renklendirilerek ifade edilen eksen (Z eksen) verimi göstermektedir. Tork değeri maksimum 375 Nm olarak 4000 Nm baz hız değerinde elde edilmiştir. Analizlerde akım sınırlaması yapılmamıştır. Tork ve verim değerleri maksimum senkron hız 11000 rpm olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu sınırlar motorun kapasitesini ifade etmesi açısından grafiklerde gösterilmiştir. Verim haritasında maksimum verim değeri 4000 rpm baz hız çevresinde ve 120 Nm tork değeri için %94,5 olarak elde edilmiştir. 75 kW çıkış gücünün 180 Nm tork ile 4000 rpm hızındaki verimi ise %94’tür. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen optimizasyon işlemi de bu değerlerde yani 50kW çıkış gücünde maksimum verim elde etmeye yönelik yapılmıştır. Buna göre verim haritası ile optimizasyonun başarılı olduğu ispatlanmıştır. EAASM’nin düşük hız ve tork değerlerinde daha düşük verim ile çalıştığı grafikte görülmektedir. Verim değerleri Eşitlik (6.1)-(6.3)’e göre hesaplanmaktadır [149]. Motorun tüm kapasitesini ifade eden verim grafiğini tek başına değerlendirmek yanlış olacaktır. Çünkü baz hız olarak belirlenen 4000 rpm’e kadar çıkış gücü artmalı sonrasında ise sabit kalmalıdır. Buna göre motorun kapasitesini ifade eden çıkış gücü de hıza bağlı olarak ifade edilmelidir

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} \quad (6.1)$$

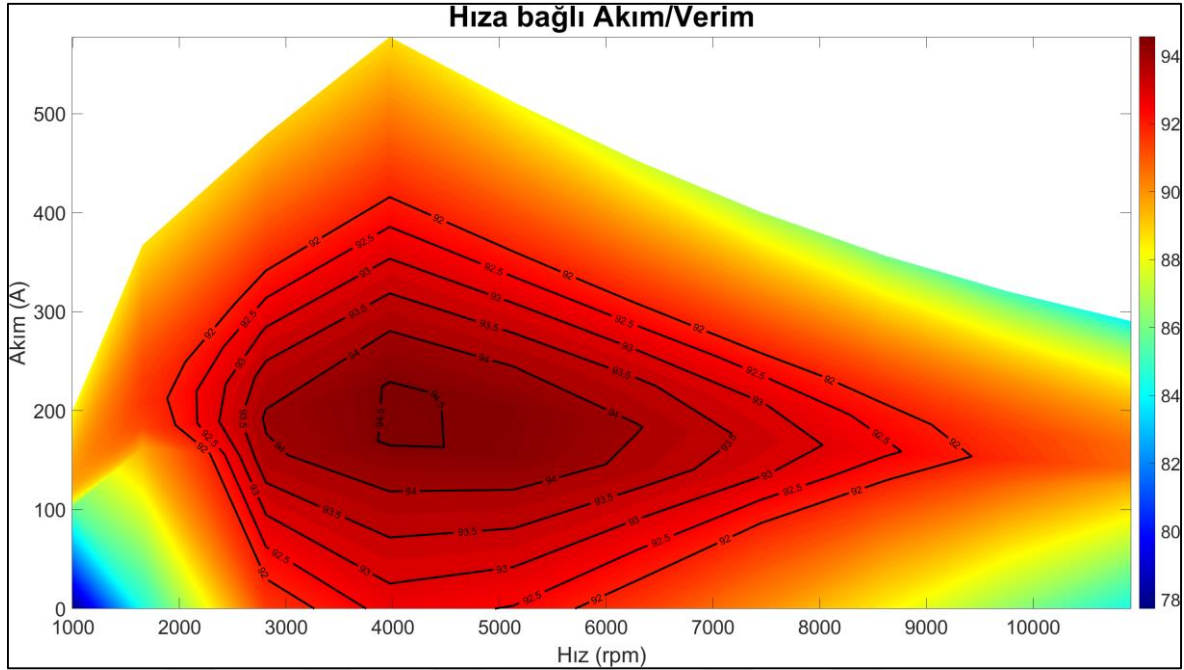
$$P_{\text{çıkış}} = P_{\text{giriş}} - P_{\text{toplam kayıp}} \quad (6.2)$$

$$P_{\text{toplam kayıp}} = P_{\text{demir}} + P_{\text{bakır}} + P_{\text{mekanik}} \quad (6.3)$$



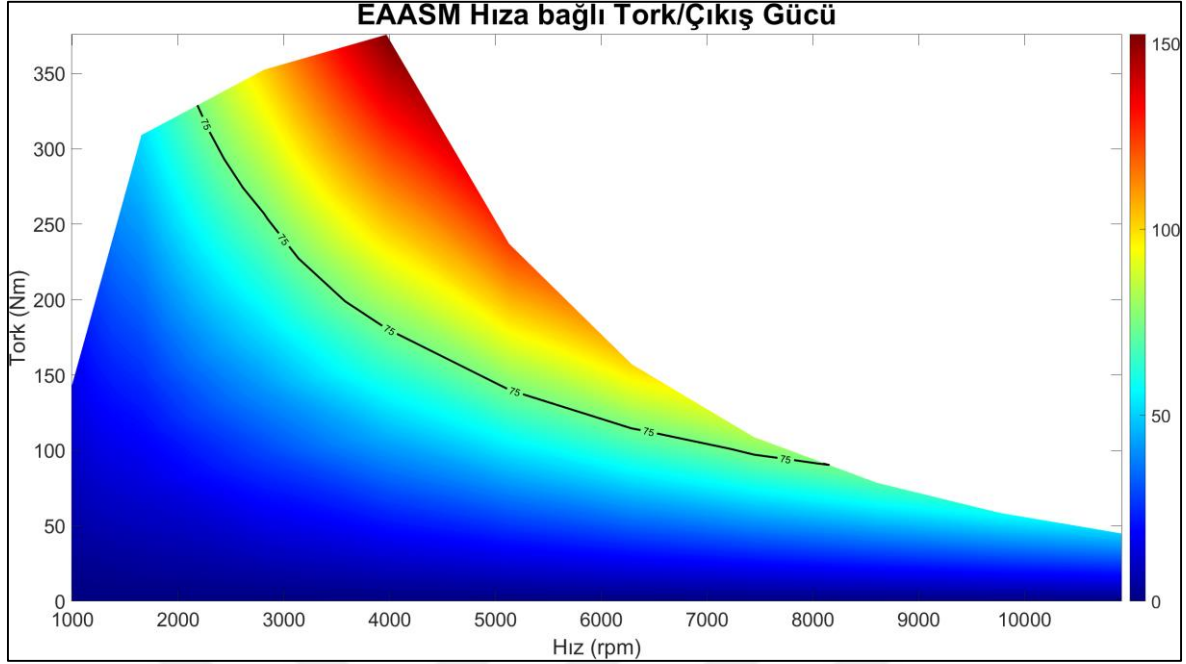
Şekil 6.8. Çıkış Gücü, hız ve verim ilişkisi

Şekil 6.8’de motorun hıza bağlı çıkış gücü ve verim değerleri grafik üzerinde ifade edilmiştir. Bu grafiğe göre 4000 rpm baz hıza kadar giriş gücünün yükseldiği sonrasında ise düşme eğilimine geçtiği görülmektedir. Baz hızdan sonra hızdaki düşme EAASM’nin baz hızdan sonra sabit güç üretmediğini ifade etmektedir. EAASM’nin çıkış gücü belirlenirken tork grafiği ile birlikte bu durumda göz önünde bulundurulmalıdır. Mil torku ve çıkış gücü belirlendikten sonra üçüncü belirleyici parametre olarak akım değerleri de dikkate alınmalıdır. Çünkü motor akımı sargı akım yoğunlukları üzerindeki en belirleyici parametredir. Literatürde farklı soğutma yöntemleri kullanılarak, elektrikli araçlarda 30 A/mm² akım yoğunluğuna kadar akım yoğunlukları kabul edilebilmektedir [150]. Fakat bu tez çalışmasında belirlenen soğutma yöntemine göre maksimum akım yoğunluğu 75 kW çıkış gücünde 15 A/mm² değerine uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 6.9’da EAASM’nin hıza bağlı akım ve verim değerleri gösterilmiştir.

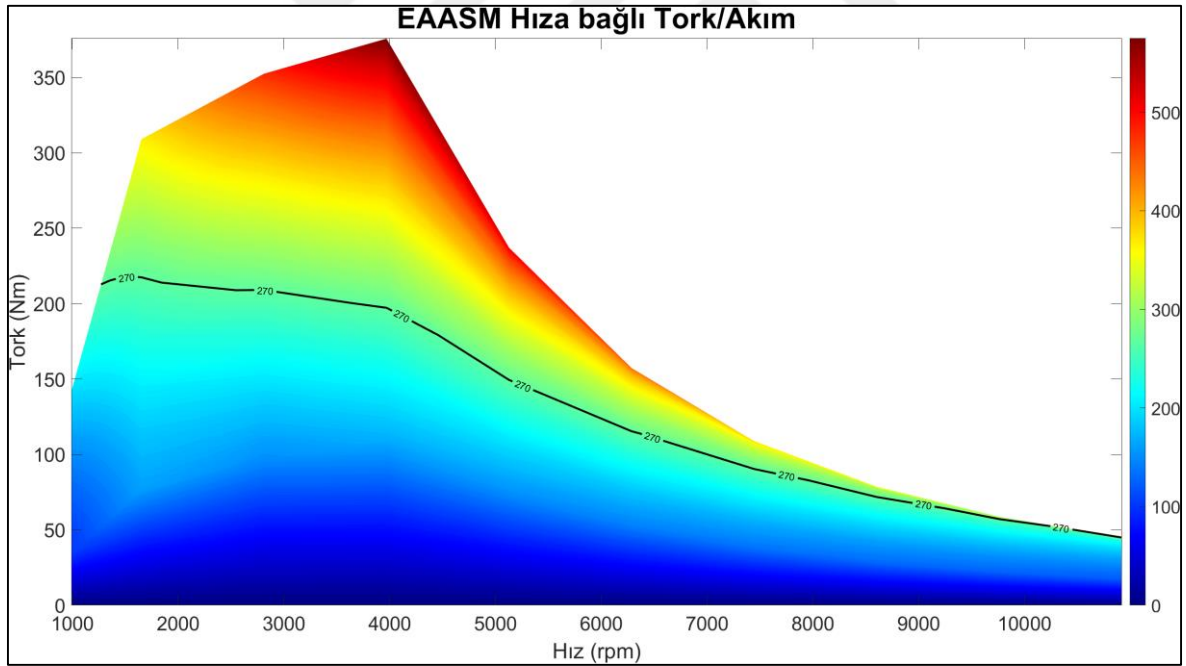


Şekil 6.9. Akım, hız ve verim ilişkisi

Şekil 6.10'da motorun hıza bağlı tork ve çıkış gücü değerleri grafik üzerinde ifade edilmiştir. Bu grafikte dikkate alınması gereken durum 4000 rpm baz hıza kadar çıkış gücünün yükselmesi sonrasında ise sabit kalabilmesidir. Buna göre motorun sabit güç çalışma bölgesi belirlenebilir. EAASM'nin 4000 rpm'de yaklaşık 180 Nm değerinde sabit tork bölgesini sonrasında ise sabit güç bölgesini oluşturabileceği grafik üstünde işaretlenen çizgi ile gösterilmiştir. 75 kW çıkış gücünün başladığı sabit hız yaklaşık 2200 rpm, 330 Nm değerinde ise sabit tork bölgesinin elde edilemeyeceği görülmektedir. Bu çıkarıma göre sabit tork bölgesi belirlenmelidir. Ayrıca motor akımları da göz önünde bulundurularak Şekil 6.11'de maksimum akım yoğunluğunun elde edildiği 270 A değeri grafikte işaretlenmiştir.



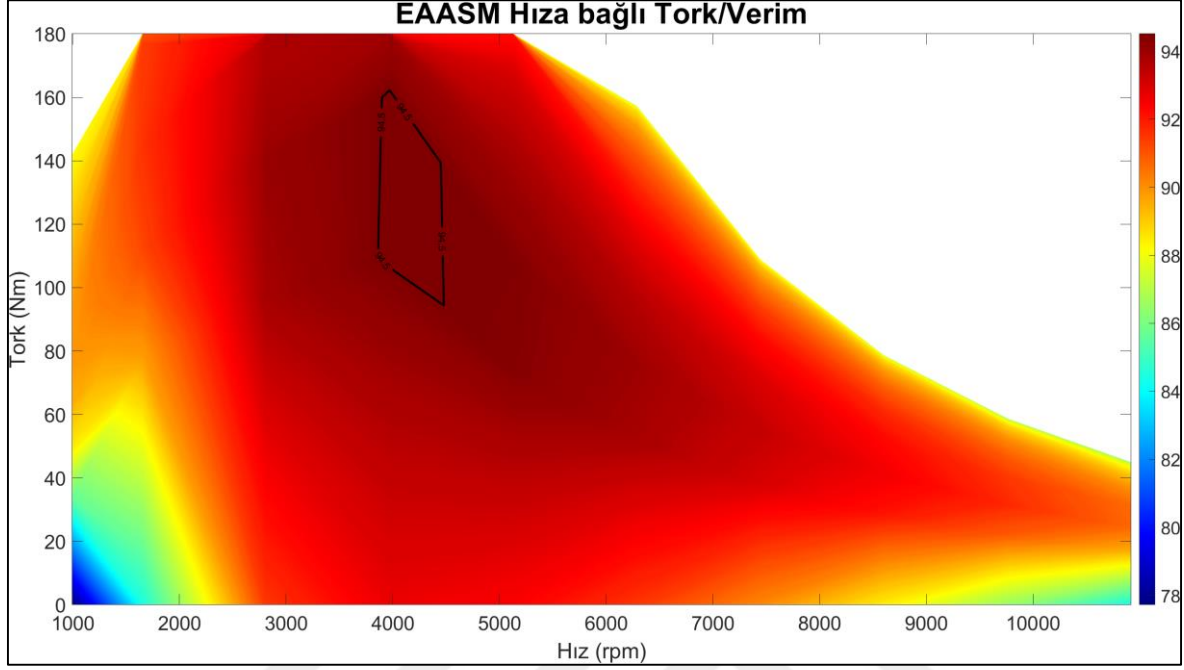
Şekil 6.10. Tork, hız ve çıkış gücü ilişkisi



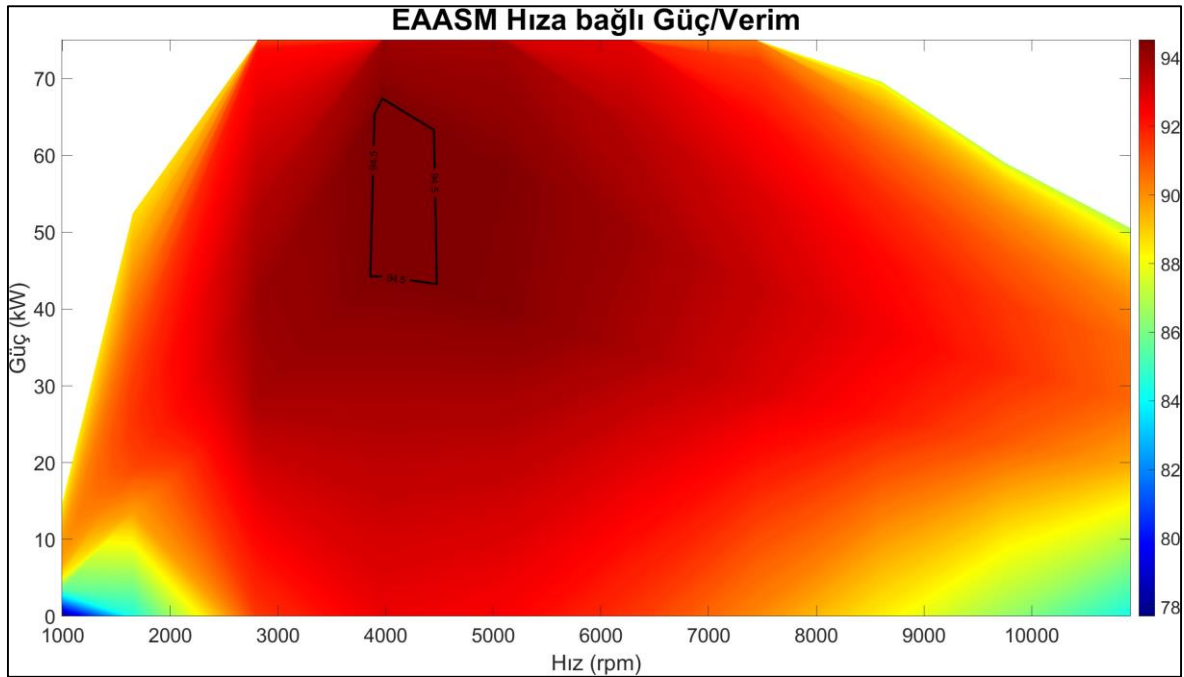
Şekil 6.11. Tork, hız ve akım ilişkisi

Şekil 6.12'de çıkış torku 180 Nm ile sınırlandırıldığında elde edilen tork-hız grafiği ile gösterilen verim haritası ifade edilmiştir. Şekil 6.13'e ise 75 kW ile sınırlandırılan tork-hız-güç grafiği gösterilmiştir. Bu grafiklere uygun olarak 4000 rpm baz hızında 180 Nm sabit tork bölgesi, 75 kW çıkış gücünde sabit güç bölgesinin ise 7500 rpm'e kadar elde edilebildiği

görülmektedir. Bu durumda 75 KW bir motor için maksimum hız değeri 7500 rpm olacaktır. Bu grafiklerde yalnızca maksimum verimin elde edildiği bölgeler etiketlenmiştir.



Şekil 6.12. 180 Nm ile sınırlandırılmış verim haritası

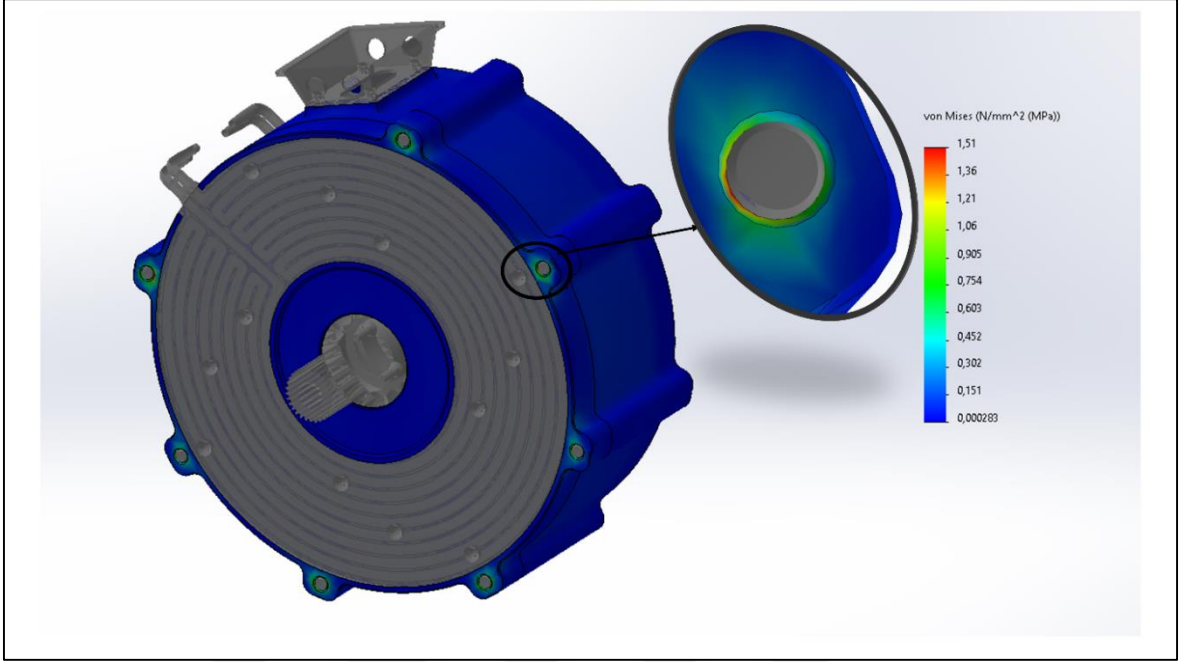


Şekil 6.13. 180 Nm ile sınırlandırılmış hıza bağlı güç grafiği

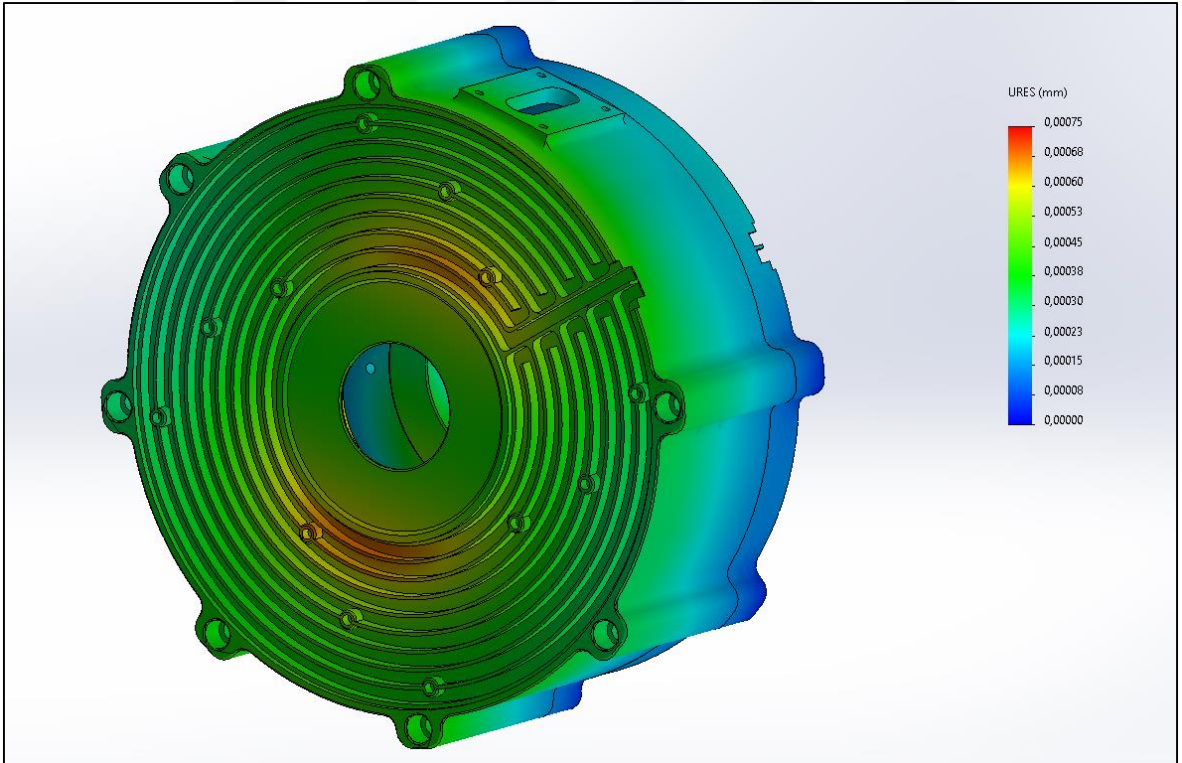
6.3. EAASM Yapısal Analiz Sonuçları

EAASM'ler, elektrikli araçlar ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorların başarılı bir şekilde çalışması için yapısal olarak sağlam olmaları gerekmektedir [34]. EAASM'lerin yapısal analizleri, motorun manyetik analizlerinin tamamlanmasının ardından yapılır [35]. Bu analizler, motorun statik ve dinamik yüklere karşı dayanıklılığını değerlendirmek için yapılır. EAASM'lerin yapısal analizi, gövde ve kapak tasarımını, rulmanların eş eksenli olmasını ve rotor ve stator arasındaki manyetik çekim kuvvetini içermektedir [36]. EAASM'lerin gövde ve kapak tasarımı, motorun araca düzgün bir şekilde montajlanmasını sağlamalıdır. Bu tasarım, motorun ağırlığını ve boyutlarını da dikkate almalıdır. EAASM'lerde, rotorun dönme hareketi bir mil üzerinden aktarılır. Bu mil, rulmanlar tarafından desteklenir. Rulmanların eş eksenli ve düzgün yataklanması, motorun düzgün çalışması için önemlidir. Eş eksenleme, motorun rotor ve stator eksenlerinin aynı hizada olmasını sağlayan bir işlemdir. Bu işlem, EAASM'lerin tamamında önemli olmakla birlikte, eksenel akıllı motorlarda özellikle dikkat edilmesi gereken bir konudur. EAASM'lerde, rotor ve stator arasında bir manyetik çekim kuvveti bulunur [37]. Bu kuvvet, kuvvet kolunun uzun olduğu eksenel akıllı motorlarda balans problemlerine yol açabilir.

Bu tez çalışmasında çift hava aralıklı bir topoloji kullanılmış ve rotorun her iki tarafında eşit çekim kuvveti sağlanarak balans probleminin önüne geçilmiştir. Başka bir deyişle rotor üzerindeki net kuvvet sıfırdır. Bu sayede sağa ya da sola doğru dengesiz çekim oluşmayacaktır [11]. Her ne kadar dengesiz bir çekim kuvveti öngörülme de motorun tek taraflı olarak sabitlendiği durumda rotor ağırlığı rulmanlar üzerinden gövdeye aktarılacağı için gövde üzerindeki gerilme ve yer değiştirme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere ait sonuçlar Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Şekil 6.14'de gösterilen gövde stres analizine göre maksimum gerilme motor sabitleme noktalarında 1,51 Mpa olarak elde edilmiştir. Akma mukavemeti 276 Mpa olan Al 6061 malzeme için bu değer oldukça düşüktür. Çelik gövdeye göre alüminyum gövde kullanmanın mekanik dayanım açısından dezavantajları olsa da soğutmanın daha önemli olduğu uygulamalarda alüminyum gövde kullanmak bir gerekliliktir. Çünkü alüminyumun ısı iletim katsayısı çeliğe göre daha yüksektir. Şekil 6.15'te ise gövde üzerindeki yer değiştirme analizi sonuçları gösterilmiştir. Buna göre maksimum yer değiştirme, sabitleme noktalarının en uzağında ve 0,00075 mm olarak elde edilmiştir. Bu değerler balans anlamında avantaj sağlayan çift hava aralıklı topoloji sayesinde elde edilebilmiştir.

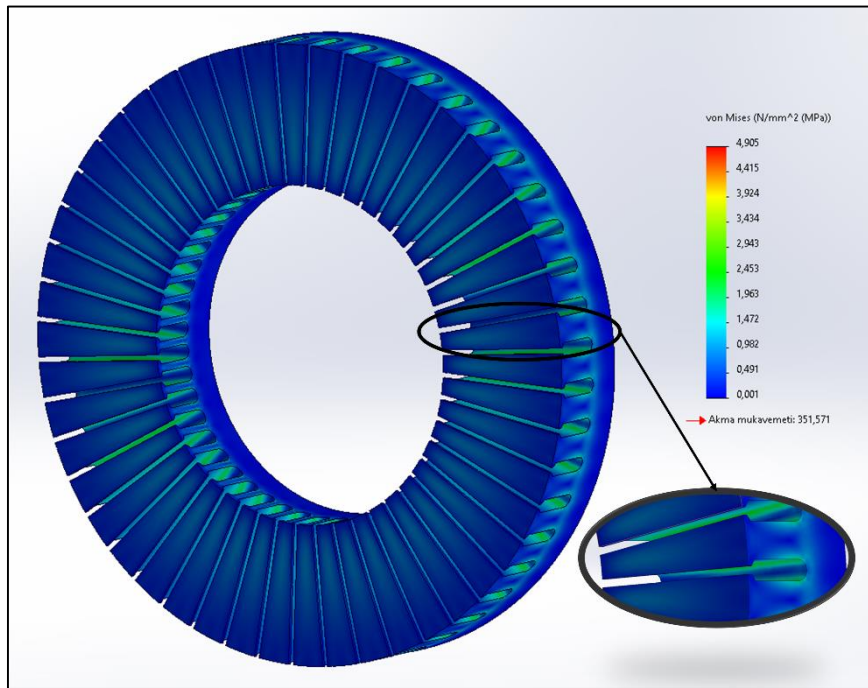


Şekil 6.14. Motor gövdesi stres analizi

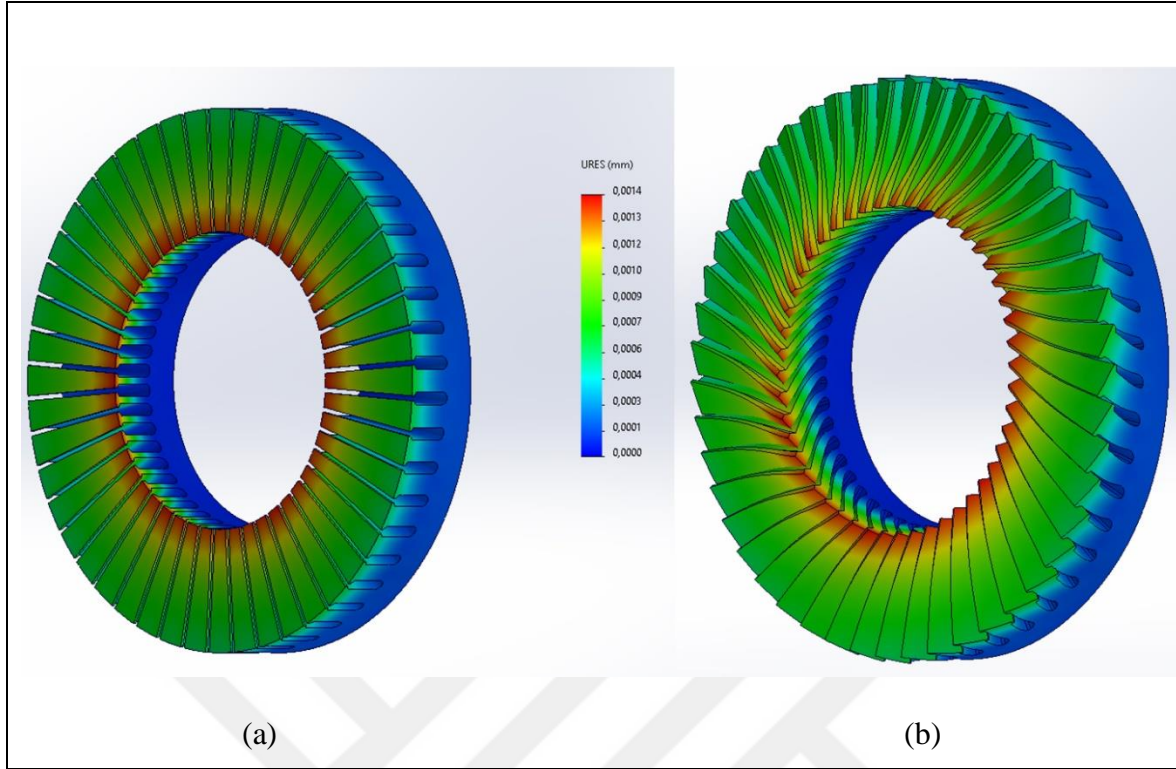


Şekil 6.15. Motor gövdesi yer değiştirme analizi

Şekil 6.16’da stator dişlerinde gerilme analizi sonuçları gösterilmiştir. Stator yüzeyinden dönme hareketini sağlayan manyetik kuvvete göre elde edilen sonuçlarda maksimum gerilme 4,9 Mpa olarak stator dişlerinin dış çapında gözlenmiştir. Laminasyonlu elektrik çeliğinin akma mukavemeti 351 Mpa olduğu göz önünde bulundurulduğunda kullanılan malzemenin uygun olduğu görülür. Şekil 6.17(a)’da stator dişlerindeki yer değiştirme analizine ait sonuçlar ifade edilmiştir. Buna göre maksimum yer değiştirme 0,0014 mm olarak dişlerin en ince olduğu iç çap bölgelerinde gözlemlenmiştir. Şekil 6.17(b)’de ise deforme olmuş gösterim verilmiştir.

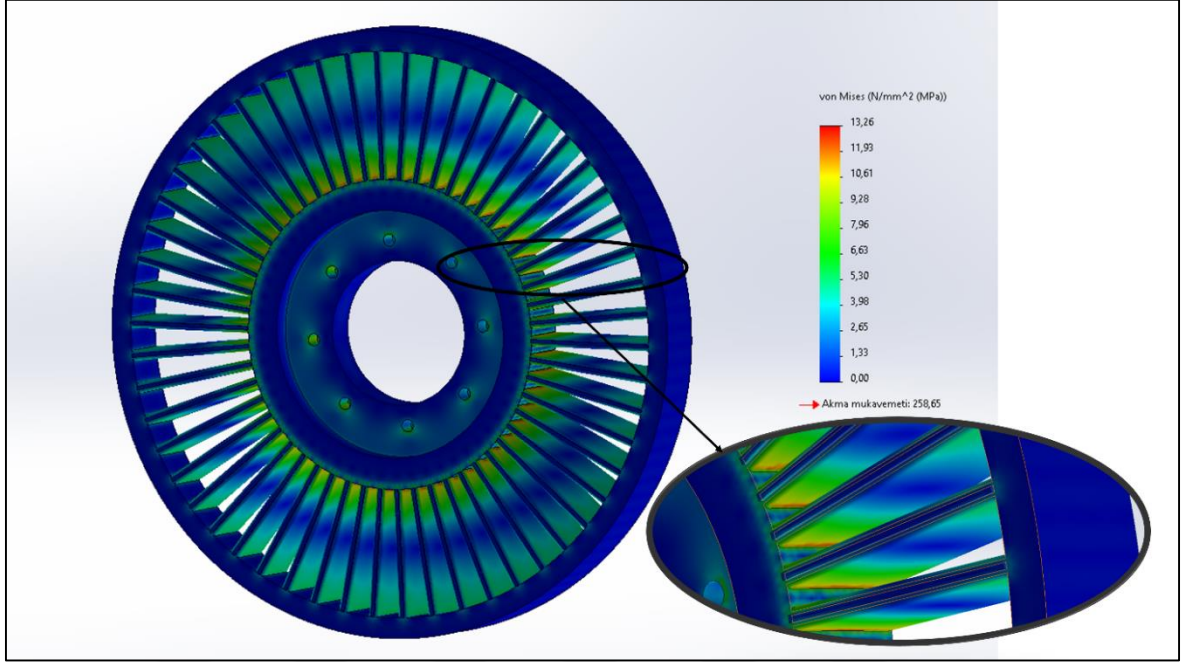


Şekil 6.16. Stator nüvelerinden bir tanesi için stres analizi

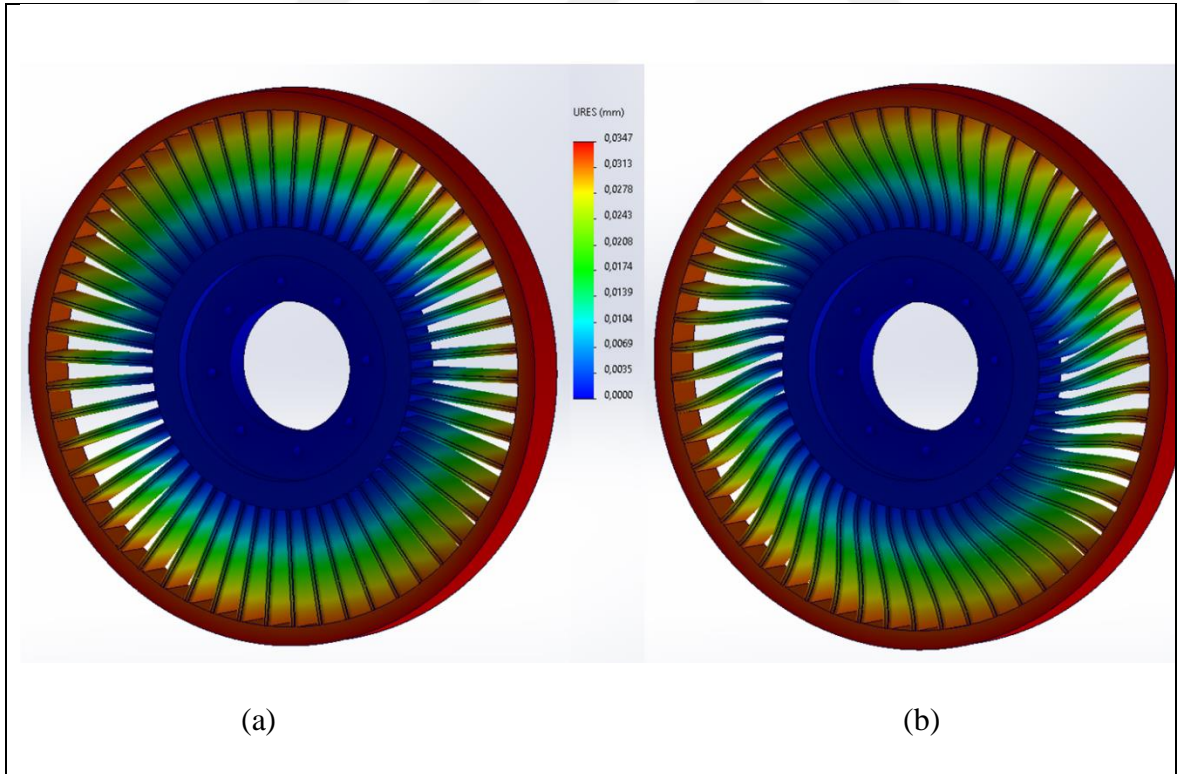


Şekil 6.17. (a) Stator Nüvelerinden bir tanesi için yer değıştirme analizi sonuçları (b) Deforme olmuş gösterim

Şekil 6.18’de bakır malzemeden üretilen rotor kısa devre kafesinin gerilim analizi gösterilmiştir. Bakırın akma mukavemeti alüminyuma göre daha düşük olduğu için bu parçanın ayrıca incelenmesi gereklidir. Kısa devre kafesinin de dahil olduğu dönme hareketinin olduğu rotor üzerinde en yüksek gerilme kuvveti 13.26 Mpa olarak iç kısımlarda elde edilmiştir. Bunun sebebi EAASM motorun avantajlı noktasını oluşturan kuvvet kolunun uzun olmasıdır. Şekil 6.19(a)’da rotor kısa devre kafesindeki yer değıştirme analizine ait sonuçlar ifade edilmiştir. Buna göre maksimum yer değıştirme 0,347 mm olarak dış çap bölgelerinde gözlemlenmiştir. Şekil 6.19(b)’de ise deforme olmuş gösterim verilmiştir.



Şekil 6.18. Kısa devre çubuğu üzerindeki gerilim analizi

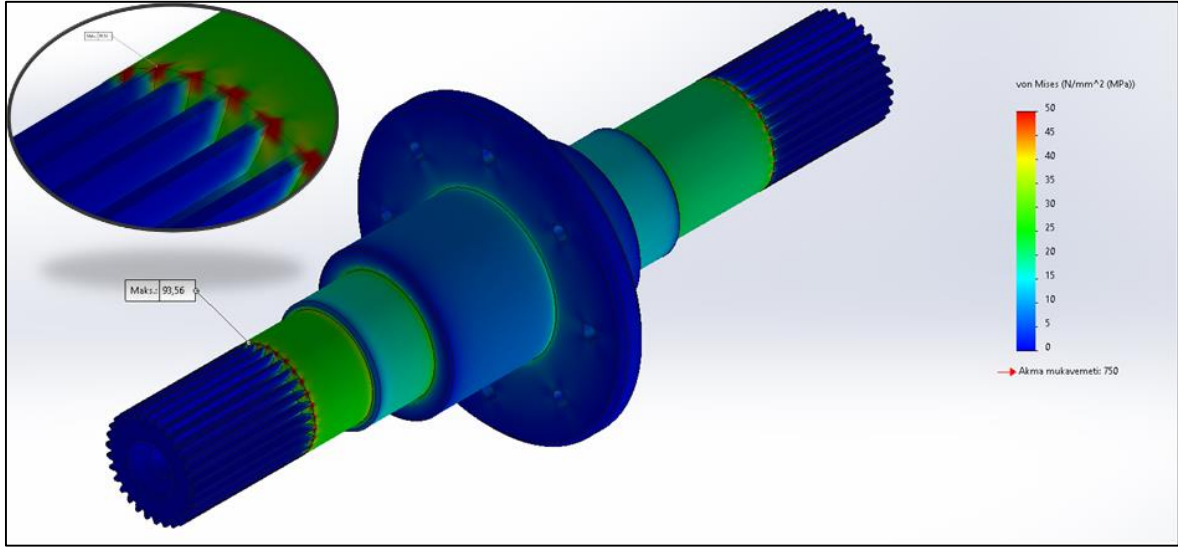


Şekil 6.19. (a) Kısa devre çubuğu üzerindeki yer değiştirme analizi sonuçları (b) Deforme olmuş gösterim

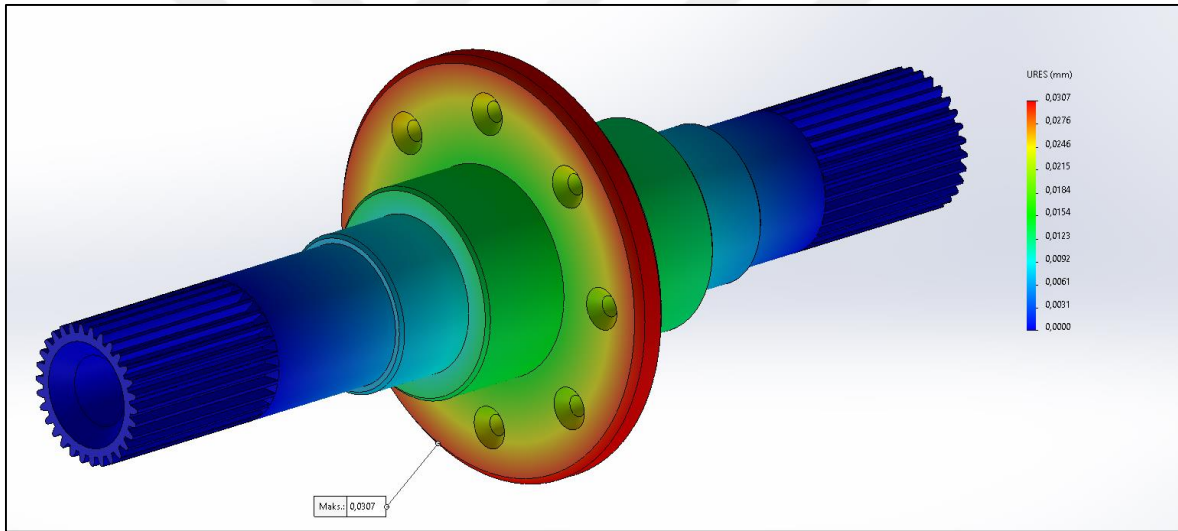
Şekil 6.20’de rotor mili üzerindeki gerilim analizi sonuçları gösterilmiştir. EAASM’de elektromekanik enerji dönüşümünde bir nevi son mekanik parçayı ifade motor mili, üretilen torkun akuple bir şekilde iletilebilmesi için çok önemli bir parçadır. Bu parçanın gereğinden ince tasarlanması halinde EAASM’de üretilen tork mil üzerinden aktarılamayacaktır. Bu sebeple mil çapını belirlemede önemli göstergelerden biri motor milinin güvenlik katsayısıdır [151]. Motor mili özelinde değerlendirildiğinde ise diğer motor parçalarından farklı olarak burulma analizi daha sağlıklı bir değerlendirmeye olanak sağlayacaktır [151]. EAASM mil için burulma analizi maksimum tork değeri olan 180 Nm’de gerçekleştirilmiştir. Mil üzerindeki en zorlayıcı durum olarak maksimum momentte motorun aniden durması göz önünde bulundurularak burulma analizi gerçekleştirilmiştir. Motor mil malzemesi olarak 42CrMo4 kodlu ıslah çeliği kullanılmıştır. Bu malzemenin akma mukavemeti 750 Mpa’dır. Şekil 6.20’de mil üzerindeki gerilme analizi sonuçları gösterilmiştir. Buna göre maksimum gerilme mil akuplesi için tasarlanan dişlerin başladığı bölgelerde 93.56 Mpa olarak elde edilmiştir.

Güvenlik katsayısının hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifade Eşitlik (6.4)’de gösterilmiştir [152]. Elde edilen değerlere göre EAASM milinin güvenlik katsayısı 4,65 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.21’de ise motor mili üzerindeki yer değiştirme analizine ait sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre yer değiştirme en yüksek 0,03 mm olarak motor milinin rotor ile montajının sağlandığı bölgede görülmüştür.

$$S_g = \frac{\text{Akma mukavemeti} \times 0,58}{\text{Maksimum burulma}} \quad (6.4)$$



Şekil 6.20. Motor mili üzerindeki stres analizi



Şekil 6.21. Motor mili üzerindeki yer değiştirme analizi

6.4. EAASM Termal Analiz Sonuçları

Bu tez çalışmasında her ne kadar ana hedef EAASM'nin soğutulması olmasa da özellikle akım yoğunluklarından kaynaklanan sebeplerden dolayı sıvı soğutma mecburiyeti doğmaktadır. Bu açıdan sıcaklığın makine içinde nasıl dağılım gösterdiği genel hatlarıyla incelenmiştir. Üretilen ısı makine içerisinde iletim, taşınım ve radyasyon yoluyla transfer edilir. EAASM içinde ısı transferinin iletimle yapıldığı parçalar çelik, bakır gibi katı parçalar ve yalıtım malzemeleridir. Sıvı soğutmalı motor soğutmasında, konveksiyonla ısı transferi

hava ve soğutma suyunda görülür [153]. Radyasyonla ısı transferi elektrik makinelerinde çoğunlukla ihmal edilmektedir [154].

Isı transferinin iletimle oluştuğu durumlarda, ısı iletimi iki temel prensip ile karakterize edilir ve bu, kararlı durum koşulları altında geçerlidir [154]. İlk yasa, enerjinin korunumunu belirtir. Yani ısı akısı vektörünün sapması, ısı kaynağı yoğunluğuna eşittir. Bu yasaya göre, enerji korunur. Yani ısı akış vektörünün diverjansı, belirli bir bölgede tanımlanan ısı kaynağı yoğunluğuna eşdeğerdir. Bunu ifade eden yasanın matematiksel ifadesi Eşitlik (6.5)'te verilmiştir [153].

$$\omega = \nabla \cdot \vec{\psi} \quad (6.5)$$

Eşitlik (6.5)'te $\vec{\psi}$ ısı akısı vektörünü ifade eder. Isı akısı vektörü, normal yönde birim alan başına ısı transfer oranını gösterir. ω ise ısı kaynağı yoğunluğudur. Eşitlik (6.6)'da, tanımlı bir noktadaki sıcaklık gradyanı ile ısı akısının yani birim zamandaki birim alandaki ısı geçişi miktarının orantılı olduğunu ifade eder. Buna göre iletimle ısı transferi olduğu durumlarda, izotropik (eş yönlü) bir bölgedeki, herhangi bir noktadaki ısı akısı sıcaklık gradyanı ile orantılıdır [153].

$$\vec{\psi} = -k\nabla T \quad (6.6)$$

Eşitlik (6.6)'da k termal iletkenlik ve T sıcaklıktır. Eksi işareti ısı geçişinin yönünü belirtir. Yani termodinamiğin ikinci yasasında ifade edilen, ısının yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklık bölgelerine doğru aktığı gösterilmektedir. Eşitlik (6.5)'te gösterilen $\vec{\psi}$ 'nin Eşitlik (6.6)'da yerine koyulması ile Poisson denklemi elde edilir. Eşitlik (6.7)'de verilen Poisson denklemi motorun herhangi bir noktasındaki sıcaklığı hesaplamının bir yöntemidir [153].

$$\nabla^2 T = -\frac{\omega}{k} \quad (6.7)$$

Konveksiyonla ısı transferi temel olarak doğal ve zorlanmış konveksiyon olarak ikiye ayrılabilir. Doğal konveksiyon bir fan veya başka bir soğutma aparatı olmadan soğumadır. Doğal konveksiyonda Newton soğuma kanunu geçerlidir [153]. Bunu ifade eden matematiksel ifade Eşitlik (6.8)'de verilmiştir. Buna göre konveksiyonla ısı transferi ısıtılan

cismin bitişindeki ortam (hava) ve sıcaklık farkına bağlı olarak gerçekleşir. Eşitlik (6.8) 'de α konveksiyonla ısı transfer katsayısı, A ısı veren yüzeyin alanı, T_s ve T_a sırasıyla veren yüzey ve ortam sıcaklıklarıdır.

$$Q = \alpha A(T_s - T_a) \quad (6.8)$$

EAASM'lerde daha karmaşık ısı geçişleri ısınan katı ve hava arasındaki sıcaklık farklarıdır. Bu ısı geçişlerinde yüzey geometrisi ve özelliklerinin katı ve hava sıcaklık farkları ile birlikte ele alınması gerekir. Isı transfer katsayısı da buna göre hesaplanmalıdır. Elektrik makinaları farklı geometri ve özelliklerde üretildiğinden bu parametre için kesin değer vermek mümkün değildir. Basit geometriler için literatürde bazı katsayılar önerilmektedir [155].

Isı transferi, birçok mekanik sistemde kritik bir faktördür ve genellikle bir fan aracılığıyla ya da soğutma kanalları içerisinde dolaşan bir sıvı ile pompa yardımıyla gerçekleştirilir. Farschtschi (1992) çalışmasında [156], zorlanmış havalandırma ile ısı transfer katsayısının belirlenmesine yönelik bir hesaplama metodu sunulmuştur. Dessouky ve ark. (1998) [157] stator nüvesinde laminasyon kullanılan durumlarda ısı transfer katsayısının hesaplanmasına dair geleneksel olmayan yöntemler sunmuştur. Su ile soğutma yapılması, kanal tasarımına bağlı olarak ya doğrudan ya da dolaylı şekillerde gerçekleştirilebilir [158]. Bununla birlikte, zorlanmış konveksiyon durumlarında ısı transfer katsayısının belirlenmesi daha karmaşıktır. Çünkü bu katsayı sadece daha önce belirtilen parametrelerin bir fonksiyonu olmayıp, aynı zamanda soğutucu akışkanın hızı, akışkanın özellikleri, kanalın özellikleri ve makineye uygulanma biçimi gibi faktörlerin bir fonksiyonudur [153]. Bu konuda bazı yaklaşımlar literatürdeki [154, 159] çalışmalarda bulunabilir.

Radyasyon ile ısı transferi bu tez çalışmasında sunulan EAASM'de dikkate alınmamıştır. Fakat radyasyon ile ısı iletiminde kullanılan, Stephan-Boltzmann denkleminin siyah bir cisim için radyasyonu Eşitlik (6.9) ile tanımlanabilir [153].

$$Q = e\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \quad (6.9)$$

Burada σ , Stephan-Boltzmann sabiti olup $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 'tür. Burada ısı yayan cismin mükemmel siyah cisim olduğu varsayılmaktadır. Gerçek yüzeyler mükemmel siyah siyah cisim olmayıp, etkinliklerine emisivite (e) denir. Hesaplamalarda emisivite katsayısı için

pratik bir değer olan 0,9 kabul edilebilir [160]. Elektrik motorunda ısı yayan ve alan yüzeyler siyah cisim olmayıp emisiviteyi çok düşük olduğundan radyasyonla transfer edilen ısı akısı ihmal edilecek seviyelerde olduğundan ihmal edilmiştir.

Bütün motordaki ısı iletim göz önüne alındığında, üç boyutlu ısı akışını tanımlayan kısmi diferansiyel denklem, difüzyon denklemi olarak adlandırılır. Bu denklem Eşitlik (6.10)'da gösterildiği gibidir. Eşitlik (6.10)'da $\zeta = k / \rho c$ m²/s cinsinden difüzyon hızı (ısı yayılımı), k W/m°C cinsinden ısı iletkenlik, c kJ/kg°C cinsinden özgül ısı kapasitesi, q ısı akısı (W veya birim yüzey alanı için W/m²) ve ρ kg/m³ cinsinden özgül yoğunluktur [160]. EAASM'nin içerdiği üç boyutlu karmaşıklık ve sıvı soğutma ile birlikte ele alındığında çok daha zorlu bir hale gelen ısı transferi problemi bu tez çalışmasında sayısal analiz yöntemi kullanarak ele alınmış ve SEY kullanılarak sonuçlandırılmıştır.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\zeta} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{k} \frac{\partial q}{\partial t} \quad (6.10)$$

Elektrik makinelerinin termal modellerinin oluşturulması literatüre göre iki şekilde yapılmaktadır [161]. Bunlardan ilki gruplandırılmış parametre yöntemi, diğeri ise nümerik analiz yöntemidir. Elektrikli araç teknolojisinde de düşük hacimde yüksek güçlü motorların kullanımına olan talep yükseldiği için elektrik motorlarının soğutulmasına dair araştırmalar da artmaktadır. Bu tez çalışmasının ana hedefi EAASM'nin soğutulması değilse de tasarlanan motorun belirlenen güç seviyelerinde ihtiyaç duyulan akım yoğunluğunda çalışabilmesi için soğutma işlemi bir mecburiyet olarak ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla nümerik yöntemlerden SEY kullanılarak termal analizler gerçekleştirilmiştir. Termal analizlerde Siemens çözüm motorunu, SolidWorks arayüzü ile kullanan FLOEFD yazılımı kullanılmıştır. Analiz için öncelikle motor parçaları ile uyumlu bir gövde tasarımı yapılmıştır. Gövde tasarımında her iki stator nüvesine arka yüzlerinden temas edecek şekilde alüminyum malzeme kullanılmıştır. Alüminyum kullanılmasını asıl amacı ısı iletim katsayısının gövde malzemesi olarak kullanılan çeliğe göre daha yüksek olmasıdır. EAASM gövdesinde kullanılan 6061 kodlu Alüminyumun termal iletkenlik değeri 170 W/mK iken 304 kalite paslanmaz çelik için bu değer 16 W/mK'dır. Buna göre kullanılan alüminyum, çeliğe göre 10,6 kat daha iyi termal iletkenliğe sahiptir. Bu durum etkili bir soğutma açısından avantaj sağladığı gibi toplam ağırlık açısından da avantaj sağlayacaktır. En önemli

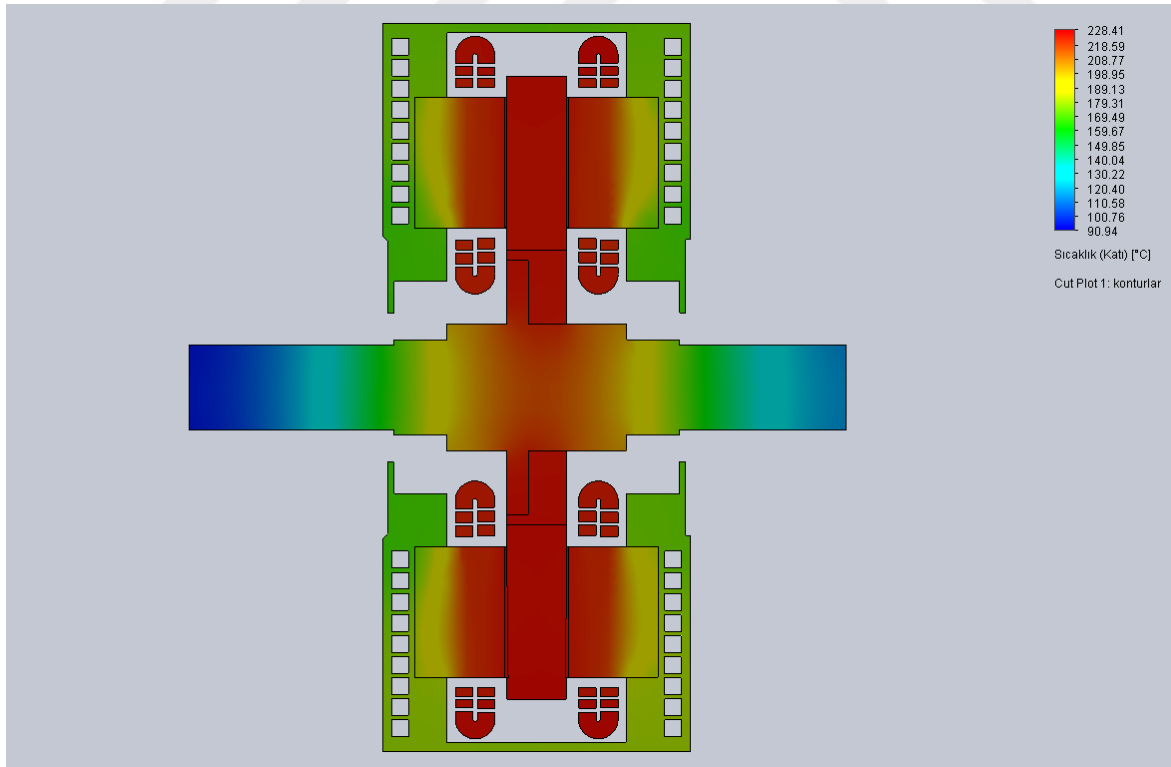
dezavantajı olarak mekanik dayanımı ise yapısal analizler ile test edilmiş ve EAASM'de kullanımının mekanik açıdan uygun olduğu ortaya koyulmuştur.

Termal analizlerde kullanılacak olan motor gövdesinin tasarımında sıvı soğutmalı stator gömleği kullanılacağından buna uygun olarak tasarım belirlenmiştir. Stator nüvesinin her iki tarafından nüvelere monte edilen 8mmx8mm kanal boyutlarına sahip kapaklar motora eklenmiştir. Kanalların bulunduğu gövdenin kapağı ise ayrıca gövdeye montajlanmıştır. Soğutma sıvısının giriş ve çıkışı için her iki tarafa bağlantı ucu eklenmiştir. Soğutma sıvısı olarak ise etilen glikol ve su karışımı kullanılmıştır [162]. Elektrik motorlarında bu şekilde bir karışım kullanmanın bazı avantajları şu şekilde sıralanabilir [163];

- Yüksek kaynama noktası: 106°C kaynama noktasına sahiptir, bu da kaynamadan önce çok fazla ısı emebileceği anlamına gelir. Fazla ısınan elektrik motorları için önemlidir.
- Düşük donma noktası: Donma noktası -37°C, bu da soğuk iklimlerde donmadan kullanılabilmesi anlamına gelir. Kışları soğuk geçen bölgelerde kullanılan elektrik motorları için önemlidir.
- Toksik değildir: Toksik değildir, bu da elektrik motorlarında kullanımının güvenli olduğu anlamına gelir. İnsanların maruz kalma riski olan alanlarda kullanılan elektrik motorları için önemlidir.
- Korozyon önleyici: Elektrik motorunun metal parçalarını pas ve korozyondan korumaya yardımcı olur. Çok fazla ısı ve neme maruz kalan elektrik motorları için önemlidir.

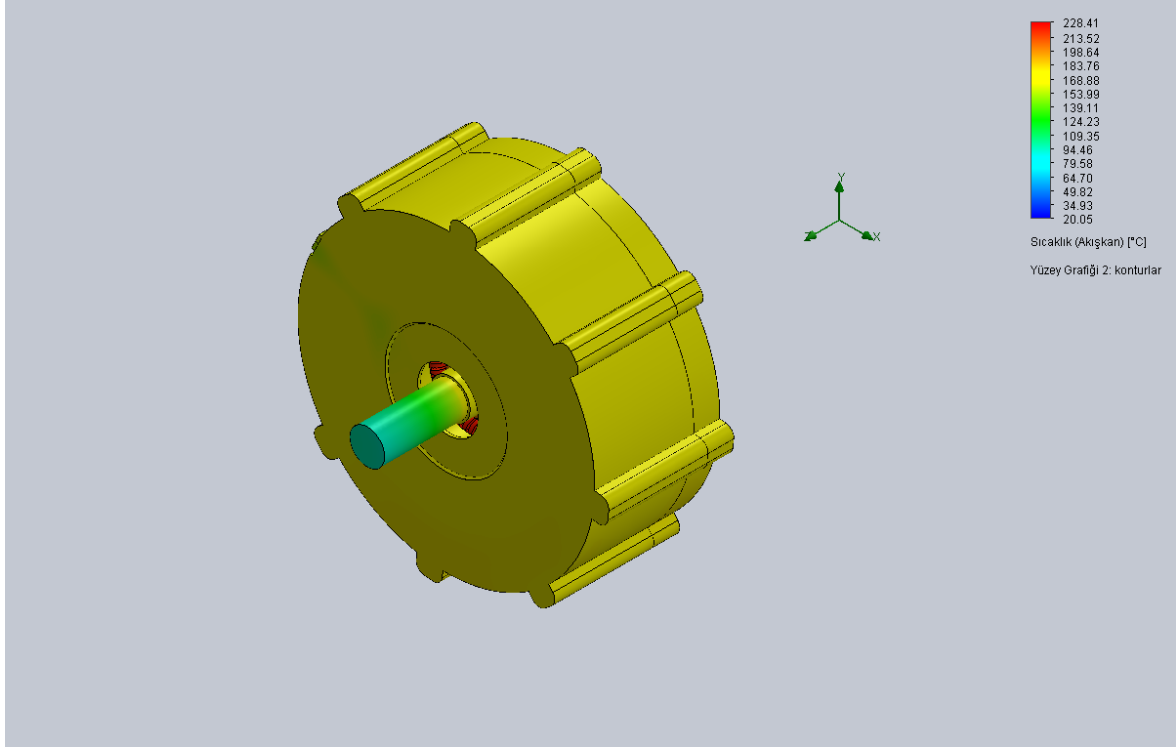
Belirtilen özelliklerine ek olarak, etilen glikol nispeten ucuz ve bulunması kolaydır. Bu da onu elektrik motorları için uygun maliyetli ve kullanışlı bir soğutucu yapar. Ayrıca etilen glikol ve su karışımı tipik olarak kapalı döngü sistemlerde kullanılır. Soğutma sıvısının motor içinde dolaştırıldığı ve daha sonra bir depoya geri gönderildiği anlamına gelir. Soğutma sıvısının buharlaşmasını veya kirlenmesini önlemeye yardımcı olur. Karışımdaki etilen glikol miktarı genellikle motorun kullanılacağı iklime göre belirlenir. Soğuk iklimlerde, soğutma sıvısının donmasını önlemek için daha yüksek bir etilen glikol konsantrasyonu kullanılır. Sıcak iklimlerde, soğutucunun kaynamasını önlemek için daha düşük bir etilen glikol konsantrasyonu kullanılır. Elektrik motorlarında soğutucu olarak etilen glikol ve su kullanımı, EAASM'den ısıyı uzaklaştırmanın güvenli ve etkili bir yoludur. Bu sayede motorun ömrünün uzamasına ve performansını artırmaya yardımcı olur.

Bu tez çalışması kapsamında 50 kW nominal ve 75 kW maksimum güç değerlerinde çalıştırılan motorların durgun durum termal analizleri gerçekleştirilmiştir. 50 kW çıkış gücündeki bir EAASM'nin termal kayıpları tanımlanarak yapılan analizlerde elde edilen EAASM'ye soğutma uygulanmadığı takdirde meydana gelen sıcaklık dağılımının kesit görünümü kullanılarak Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Bu şekilde maksimum sıcaklık sargılar ve kısa devre kafesinde 227-228 °C olarak elde edilmiştir. Elektrik motorlarındaki sargılarda H sınıfı yalıtım malzemesi kullanıldığında sargılar, 180 °C'e kadar dayanabilmektedir. Fakat sargılardaki ısı kayıpları göz önünde bulundurulduğunda sargı sıcaklıklarının 125 °C değerine kadar yükselmesi daha kabul edilebilirdir. Şekil 6.22'de de görüldüğü gibi EAASM için soğutmasız durumda bu koşul sağlanamamaktadır. Bu sebeple motorda soğutma işlemi uygulanmıştır. Şekilde sıcaklığın diğer motor parçaları ve gövde üzerindeki dağılımı da görülmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde 20 °C ortam sıcaklığında gövde malzemesinin alüminyum olmasından dolayı kısmen bir soğutma sağlandığı görülse de gövdeden daha uzak bölgelerdeki rotor ve buna bağlı olarak rotor milinde bir ısınma olduğu görülmektedir. Rotor kısa devre kafesindeki sıcaklık 227 °C, rotor milindeki sıcaklık iç bölgelerde 215 °C, mil uçlarında ise 95-115 °C aralığında gözlenmiştir.



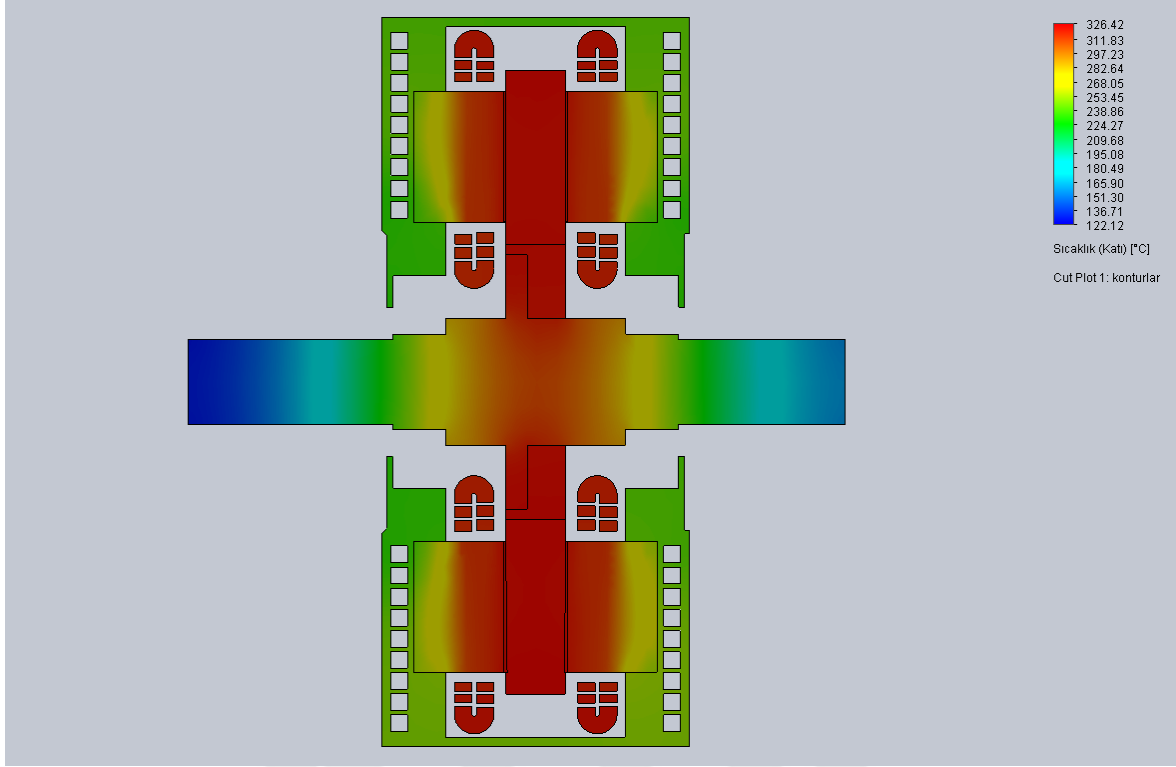
Şekil 6.22. 50 kW soğutmasız motora ait kesit gösterimi üzerinden sıcaklık dağılımı

Şekil 6.23'te ise gövde üzerindeki termal dağılım gösterilmiştir. Buna göre alüminyum gövdede ortalama sıcaklık değeri $177\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak görülmüştür. Her ne kadar alüminyum erime sıcaklığı $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ olsa da bu değer oldukça yüksektir. Başta stator sargıları olmak üzere motor bileşenlerinin ve gövdenin soğutulması mecburiyeti vardır [13].



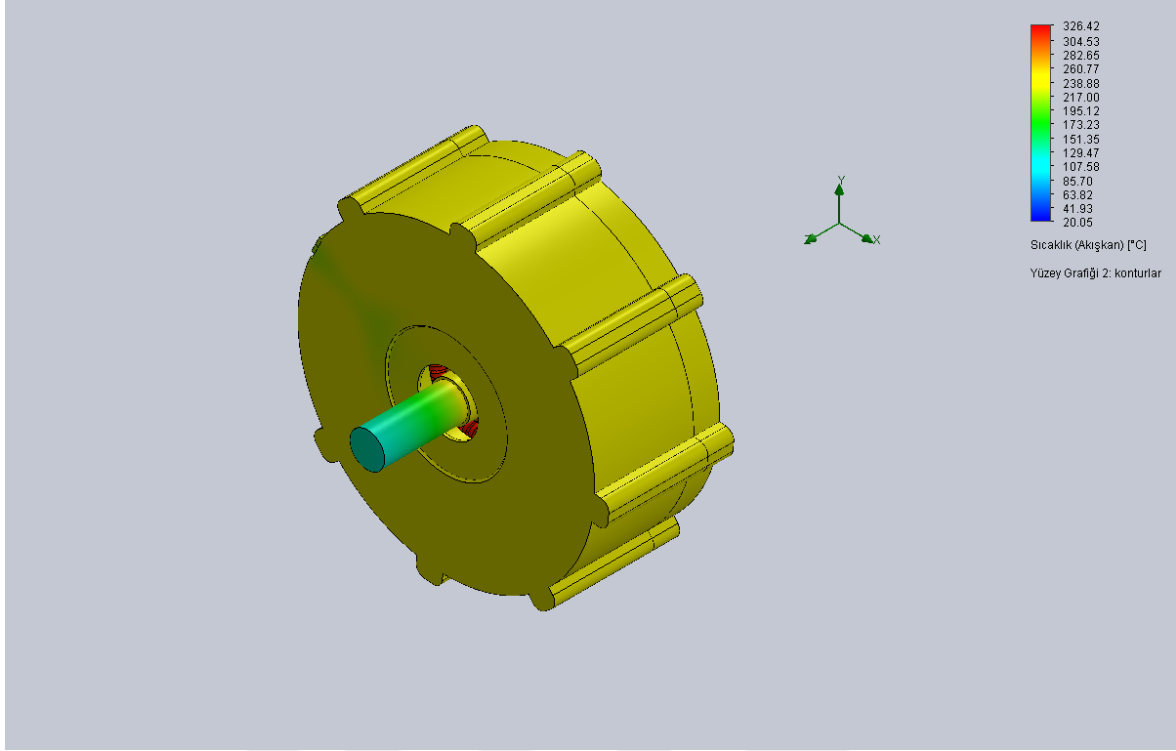
Şekil 6.23. 50 kW soğutmasız motorda bütün parçalar üzerinde yüzey sıcaklık dağılımı

Şekil 6.24'de 75 kW maksimum güçte çalıştırılan EAASM'nin sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Bu analizde kullanılan değerler de 50 kW'da olduğu gibi ANSYS Maxwell'de termal tanımlamalar yapılarak gerçekleştirilen analizlerden elde edilmiştir. Maxwell'den alınan kayıplar FLOEFD'ye Watt/m^3 olarak tanımlanmıştır Şekil 6.24'e göre sargı ve kısa devre kafesi sıcaklıkları $320\text{-}325\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak gözlenmiştir. Mil üzerindeki sıcaklık ise $130\text{-}310\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Yine stator nüvelerinde de laminasyon ekseninin olduğu düzlemde $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dan başlayarak $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerine kadar değişen bir sıcaklık dağılımı gözlenmiştir. 50 kW'a göre kıyaslandığında motor bileşenlerinde ortalama %40 sıcaklık artışı gözlenmiştir. Gövde ile nüvelerin temas ettiği bölgelerde yine termal iletim sağlanmış ve kısmen soğutma gözlenmiştir. Bu sebeple gövde sıcaklığı da yükselmiştir. Fakat Şekil 6.24'e göre sıvı akışı olmadan istenilen soğutmanın sağlanamadığı açıktır.



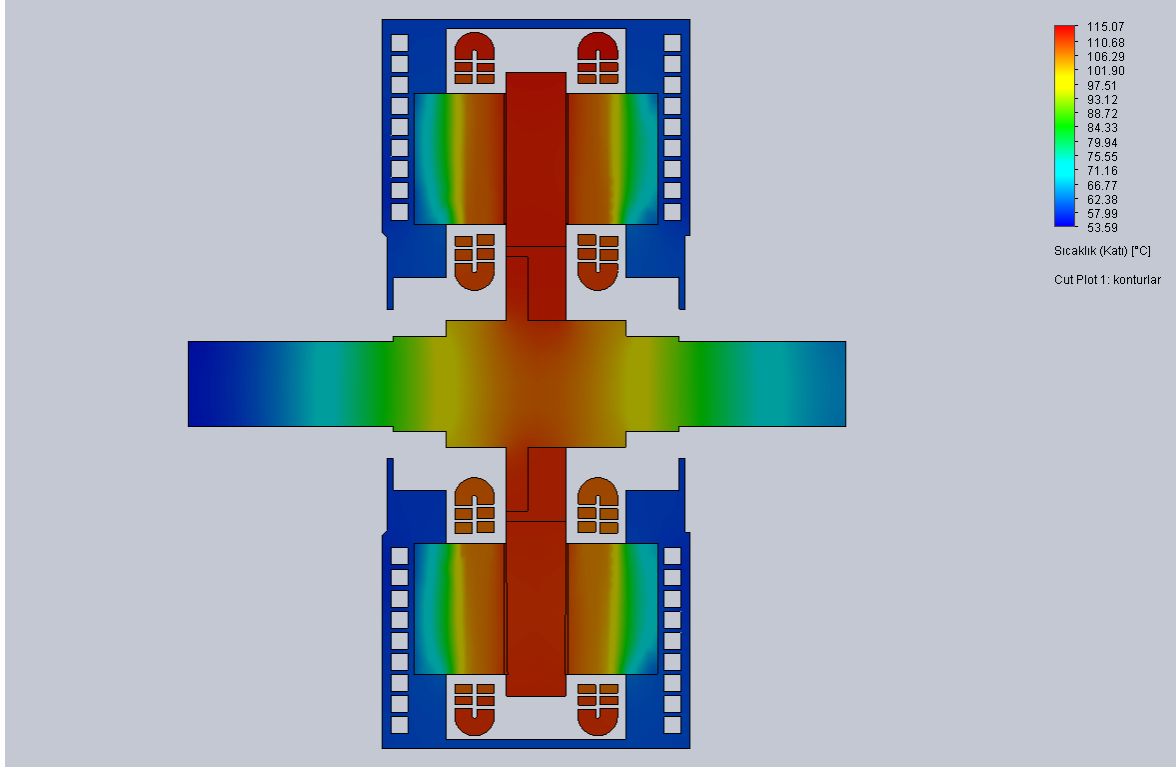
Şekil 6.24. 75 kW soğutmasız motora ait kesit üzerinde sıcaklık dağılımı

Şekil 6.25'te gövde üzerindeki termal sıcaklık dağılımını gösterilmiştir. Buna göre alüminyum gövdede sıcaklık değeri 273 °C'ye kadar yükselmiş ve ortalama 240 °C olarak görülmüştür. 75 kW'da da 50 kW'da olduğu gibi alüminyum gövdenin bütünlüğü açısından bir sorun gözlenmese de sıcaklık değerlerinin kontrol altına alınabilir seviyelere getirilmesi gerektiği görülmektedir.



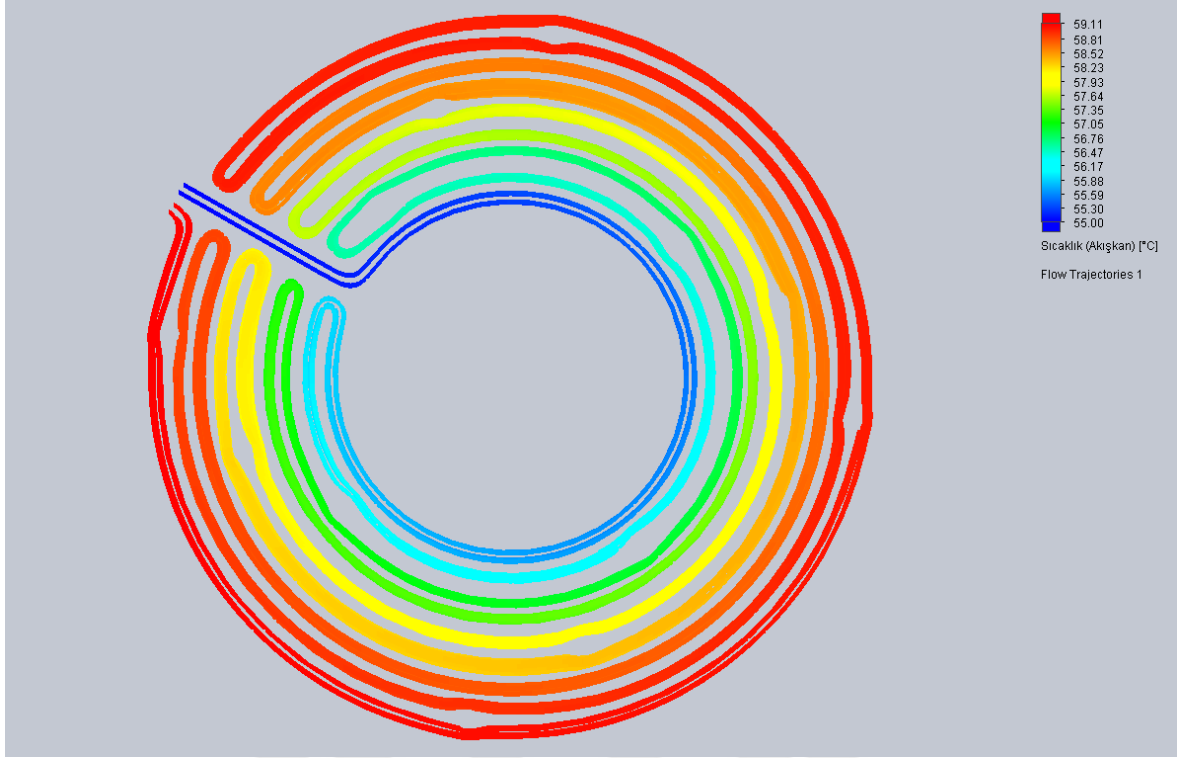
Şekil 6.25. 75 kW soğutmasız motorda gövde ve diğer bileşenlerin yüzey sıcaklık dağılımı

50 kW motor için 5 l/dk debi ile soğutma sıvısı uygulandığında sıcaklık dağılımlar aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Şekil 6.26’de kesit görünümü üzerinden sunulan grafiklerde motor bileşenleri ayrı ayrı incelenecek olursa, ısınmanın kaynağı olan stator sargıları ile soğutma sıvısının geçtiği soğutma kanalları arasından sıcaktan soğuğa doğru bir geçiş olduğu gözlenebilir. Rotora montajlanan mil üzerinde de rotora temas eden bölgelerden dışarıya doğru azalan bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. 50 kW nominal güçte soğutma uygulanmadığında 246,5 °C’ye kadar olan sargı sıcaklıkları, 5 l/dk soğutma sıvısı ile soğutulduğunda 108°C’ye kadar soğutulmuştur. Yapılan analizlerde kapalı bir soğutma sistemi harici bir soğutma pompasıyla kullanılacak şekilde planlanmıştır. Yani soğutma sıvısı bir depoda tutularak harici bir pompa sayesinde motorda dolaştırılacaktır. Bu sebeple soğutma sıvısı sıcaklığı ortalama değeri 55 °C olarak ele alınmıştır. İçten yanmalı motorlarda 80-90 °C olarak belirlenen bu değer elektrik motorlarında daha düşük değerlerde olmalıdır [164]. Çünkü içten yanmalı motorlarda, yüksek verim için yüksek sıcaklık gerekliken, elektrik motorlarında yüksek sıcaklık verime olumsuz etki etmektedir. Bu değer H sınıfı yalıtım kullanıldığında sürekli çalışmada kabul edilebilir sıcaklık olan 125 °C değerinin altındadır. Rotor kısa devre kafesi açısından incelendiğinde de benzer bir çizelge mevcuttur. Buna göre kısa devre kafesinde 112 °C’ye kadar soğutma sağlanabilmiştir

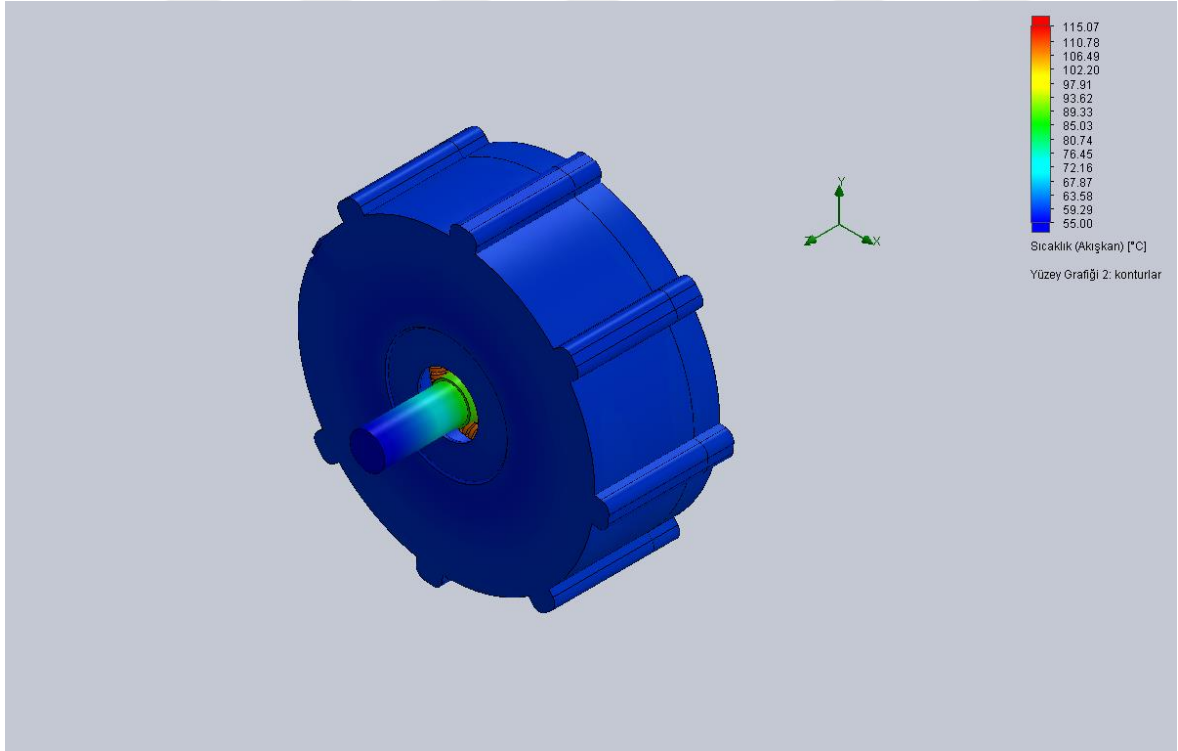


Şekil 6.26. 50 kW sıvı soğutma uygulanan motora ait kesit gösterimi üzerinden sıcaklık dağılımı (5 l/dk debi ile)

Şekil 6.27’de 50 kW nominal güçte 5 l/dk debi ile soğutma sıvısı ile soğutma işlemi sonucunda soğutma sıvısında meydana gelen değişim görülmektedir. Buna göre akışkan giriş sıcaklığı 55 °C iken çıkış sıcaklığı 59 °C olarak gözlenmiştir. Bu değer soğutma akışkanının 96 °C olan kaynama noktasının oldukça altındadır. Şekil 6.28’de ise motor parçalarının tamamı üzerindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Buna göre alüminyum gövdede sıcaklık değeri 77 °C’ye kadar yükselmiş ve ortalama 59 °C olarak görülmüştür. Bu sıcaklık değerlerine göre EAASM’nin 50 kW nominal güçte çalışması için etkili bir soğutma yapıldığı söylenebilir.

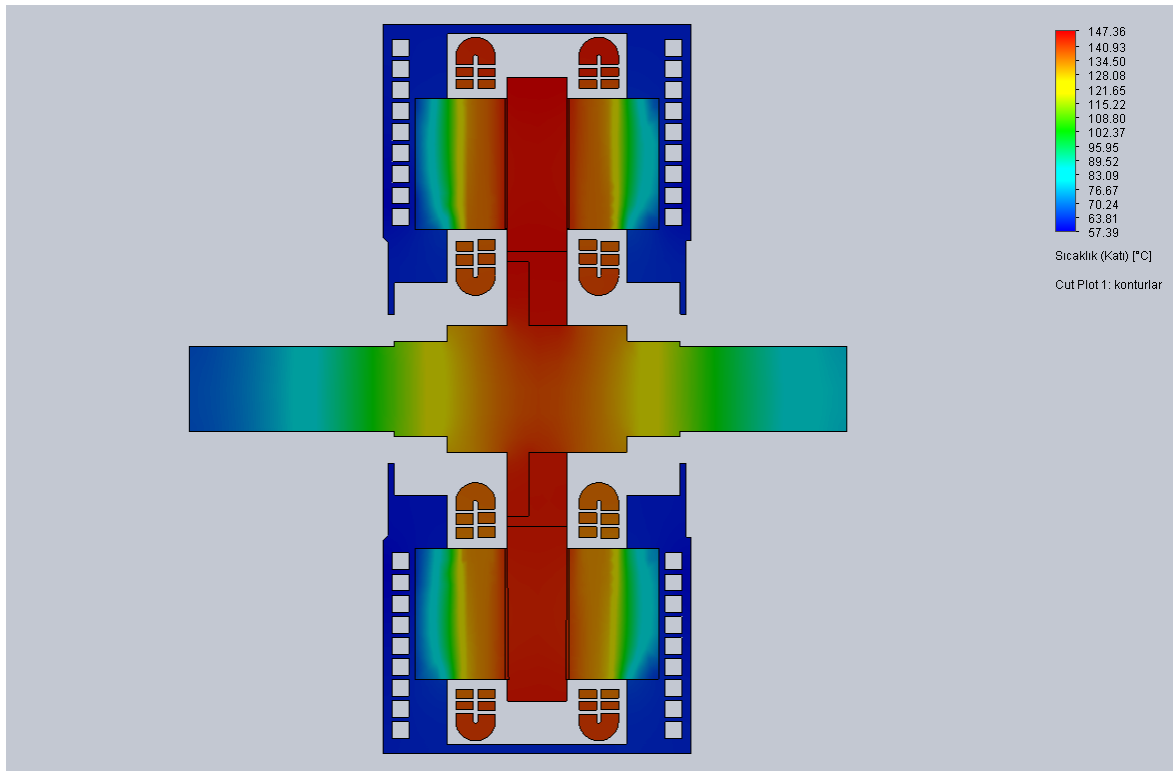


Şekil 6.27. 50 kW sıvı soğutma uygulanan motorda soğutma sıvısı sıcaklığının girişten çıkışa doğru değişimi (5 l/dk)



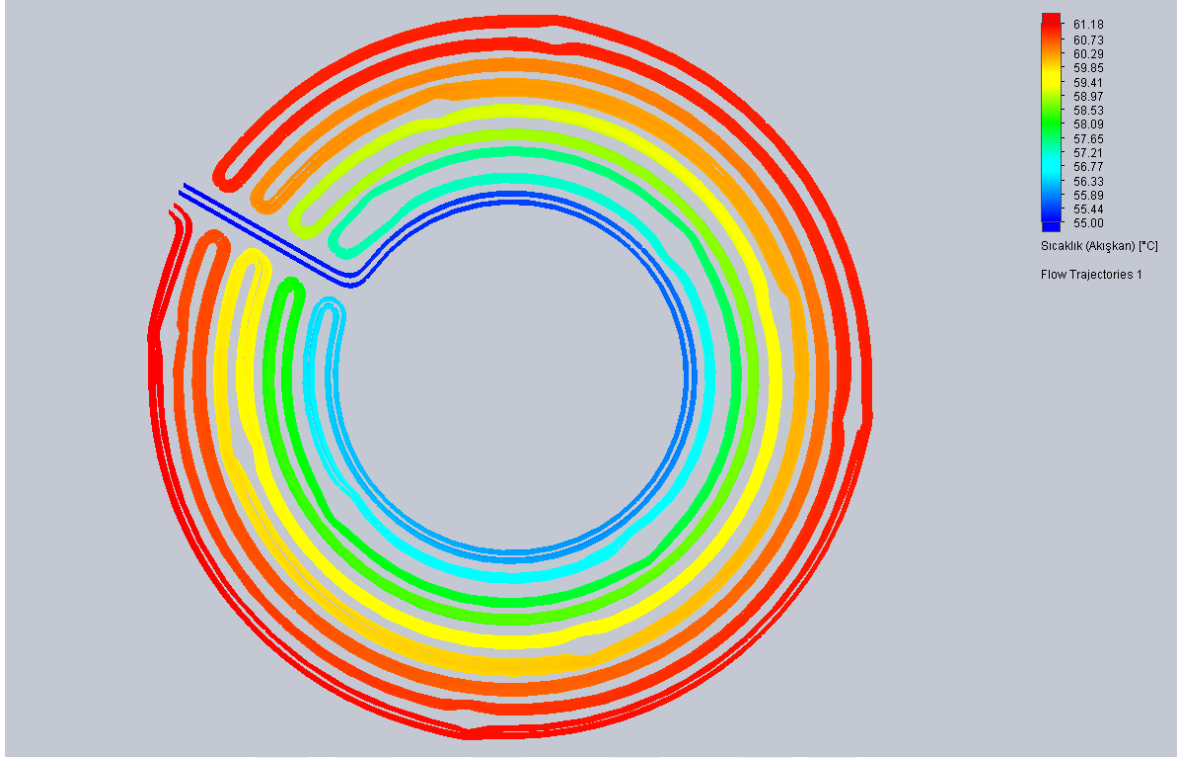
Şekil 6.28. 50 kW sıvı soğutma uygulanan motorda gövde ve diğer bileşenlerin yüzey sıcaklık dağılımı (5 l/dk)

Şekil 6.29’da 75 kW maksimum güçte çalıştırılan EAASM’ye ait motorun montajından alınan kesit ile sunulan termal dağılım gösterilmiştir. Buna göre sargılarda ortalama 138 °C sıcaklık gözlenmiştir. Rotor kısa devre çubuğundaki akıma bağlı olarak en yüksek ortalama sıcaklık kısa devre kafesinde ve 145 °C olarak gözlenmiştir. Motor milinde ise en yüksek sıcaklık yine rotor ve mil bağlantı bölgesinde 144 °C olarak elde edilse de mil üzerindeki ortalama sıcaklık değerinin 118 °C olduğu Şekil 6.29’da görülmektedir. Soğutma sıvısı ile rotor kısa devre kafesi ve sargılar arasında sıcaklık dağılımına bakılarak 75 kW maksimum güçte çalışan EAASM için gerekli soğutmanın yapılabildiği anlaşılmaktadır.

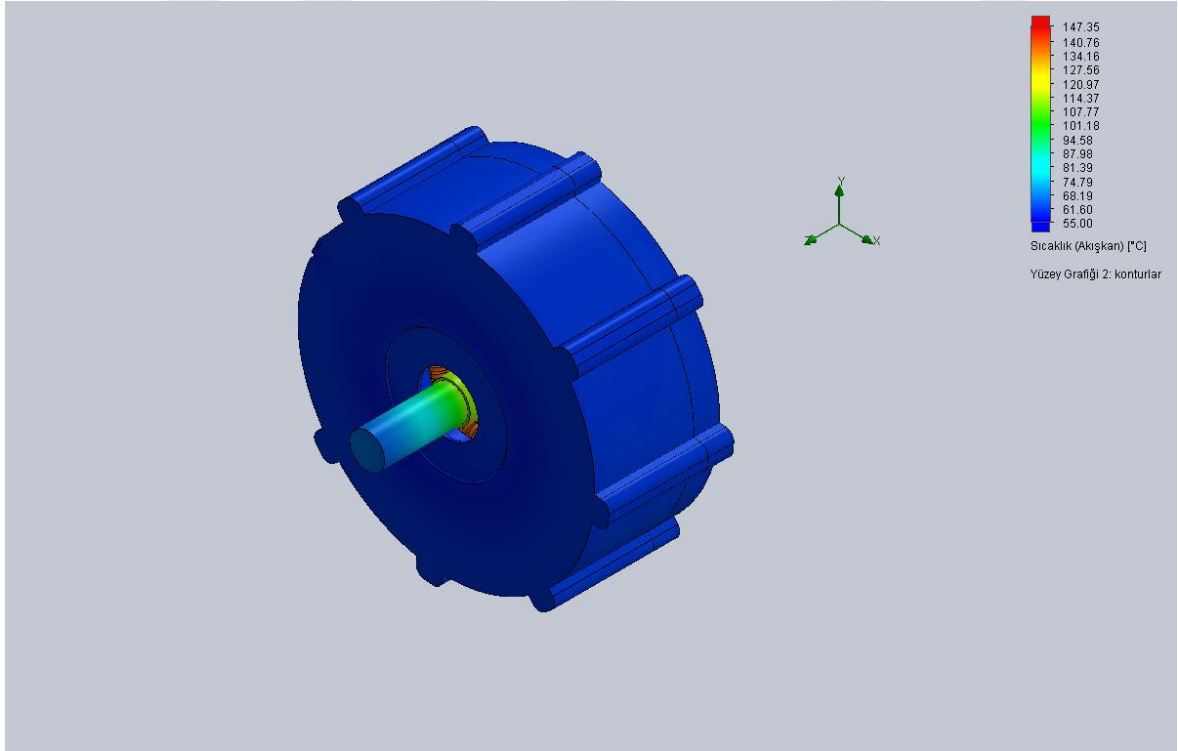


Şekil 6.29. 75 kW sıvı soğutma uygulanan motora ait kesit gösterimi üzerinden sıcaklık dağılımı (5 l/dk)

Şekil 6.30’da 75 kW maksimum güçte çalışan motor için termal kayıplar tanımlandıktan sonra gerçekleştirilen durgun durum termal analizden alınmış sonuçların akışkan sıcaklığına etkisi sunulmuştur. Akışkan giriş sıcaklığı 55 °C iken çıkış sıcaklığı 61 °C olarak gözlenmiştir. Şekil 6.31’de motor parçalarının her biri üzerindeki termal dağılım üç boyutlu görünüm üzerinden sunulmuştur. Şekil 6.31’e göre alüminyum gövde üzerindeki ortalama sıcaklık ise 6,5 °C olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 75 kW maksimum güçte çalıştırılan EAASM’nin etkili şekilde soğutulduğu söylenebilir.



Şekil 6.30. 75 kW sıvı soğutma uygulanan motorda soğutma sıvısı sıcaklığının girişten çıkışa doğru değişimi (5 l/dk)



Şekil 6.31. 75 kW sıvı soğutma uygulanan motorda gövde ve diğer bileşenlerin yüzey sıcaklık dağılımı (5 l/dk)

EAASM'nin farklı debilerdeki soğutma performansını gözlemlemek için soğutma sıvısı 10 farklı debi değeri kullanılarak analiz edilmiştir. Buna göre EAASM'nin her bir parçası ve soğutma sıvısı sıcaklıklarını gösteren veriler Çizelge 6.4'te gösterilmiştir. Çizelgede sunulan veriler, SEY kullanılarak çözümlenen EAASM modelinde 457,455 düğüm noktasına uygulanan analiz sonucunda elde edilmiştir. Analiz, 2500 iterasyon kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Çizelge 6.4'teki veriler bu analiz sonuçlarından elde edilmiştir.

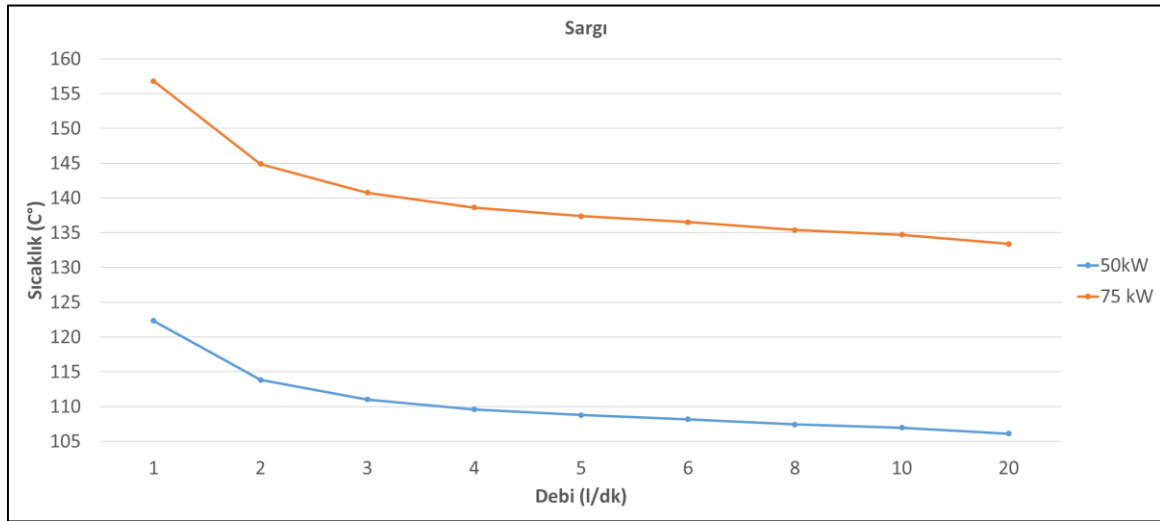


Çizelge 6.4. Farklı debilerde motor parçalı üzerindeki sıcaklıkların debiye göre değişimini ifade eden değerler

| | Debi (l/dk) | Soğutmasız | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 20 |
|------------------------------------|--------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 50 kW için sıcaklık değerleri (C°) | Akışkan 1 | 200,95 | 74,65 | 65,04 | 61,75 | 60,09 | 59,09 | 58,43 | 57,61 | 57,13 | 56,33 |
| | Akışkan 2 | 198,84 | 73,95 | 64,60 | 61,43 | 59,84 | 58,88 | 58,25 | 57,47 | 57,02 | 56,29 |
| | Stator 1 | 227,76 | 100,90 | 92,31 | 89,49 | 88,08 | 87,23 | 86,66 | 85,93 | 85,48 | 84,63 |
| | Stator 2 | 229,18 | 102,04 | 93,27 | 90,38 | 88,92 | 88,05 | 87,46 | 86,71 | 86,25 | 85,38 |
| | Rotor | 251,66 | 126,13 | 117,53 | 114,70 | 113,28 | 112,43 | 111,85 | 111,12 | 110,67 | 109,82 |
| | Kısa devre kafesi | 252,09 | 126,01 | 117,38 | 114,53 | 113,11 | 112,25 | 111,68 | 110,94 | 110,49 | 109,64 |
| | Motor mili | 200,76 | 103,41 | 96,64 | 94,39 | 93,41 | 92,68 | 92,29 | 91,72 | 91,27 | 90,74 |
| | Stator sargıları 1 | 246,36 | 122,32 | 113,82 | 111,03 | 109,60 | 108,76 | 108,18 | 107,41 | 106,97 | 106,12 |
| | Stator sargıları 2 | 246,59 | 122,62 | 114,17 | 111,40 | 110,02 | 109,18 | 108,61 | 107,87 | 107,42 | 106,57 |
| 75 kW için sıcaklık değerleri (C°) | Akışkan 1 | 268,53 | 84,49 | 70,12 | 65,17 | 62,67 | 61,16 | 60,15 | 58,90 | 58,16 | 56,85 |
| | Akışkan 2 | 265,18 | 83,36 | 69,38 | 64,63 | 62,24 | 60,81 | 59,86 | 58,67 | 57,98 | 56,77 |
| | Stator 1 | 308,46 | 124,13 | 111,51 | 107,33 | 105,24 | 103,99 | 103,14 | 102,05 | 101,39 | 100,09 |
| | Stator 2 | 310,76 | 125,95 | 113,09 | 108,80 | 106,63 | 105,35 | 104,47 | 103,34 | 102,67 | 101,33 |
| | Rotor | 347,90 | 165,56 | 153,02 | 148,82 | 146,71 | 145,45 | 144,60 | 143,49 | 142,84 | 141,54 |
| | Kısa devre kafesi | 348,58 | 165,41 | 152,81 | 148,60 | 146,47 | 145,21 | 144,36 | 143,24 | 142,59 | 141,28 |
| | Motor mili | 274,96 | 133,66 | 123,94 | 120,65 | 119,03 | 118,02 | 117,40 | 116,51 | 116,05 | 115,01 |
| | Stator sargıları 1 | 337,10 | 156,80 | 144,87 | 140,75 | 138,62 | 137,38 | 136,52 | 135,37 | 134,70 | 133,40 |
| | Stator sargıları 2 | 337,54 | 157,38 | 145,11 | 141,02 | 138,96 | 137,72 | 136,87 | 135,77 | 135,10 | 133,81 |

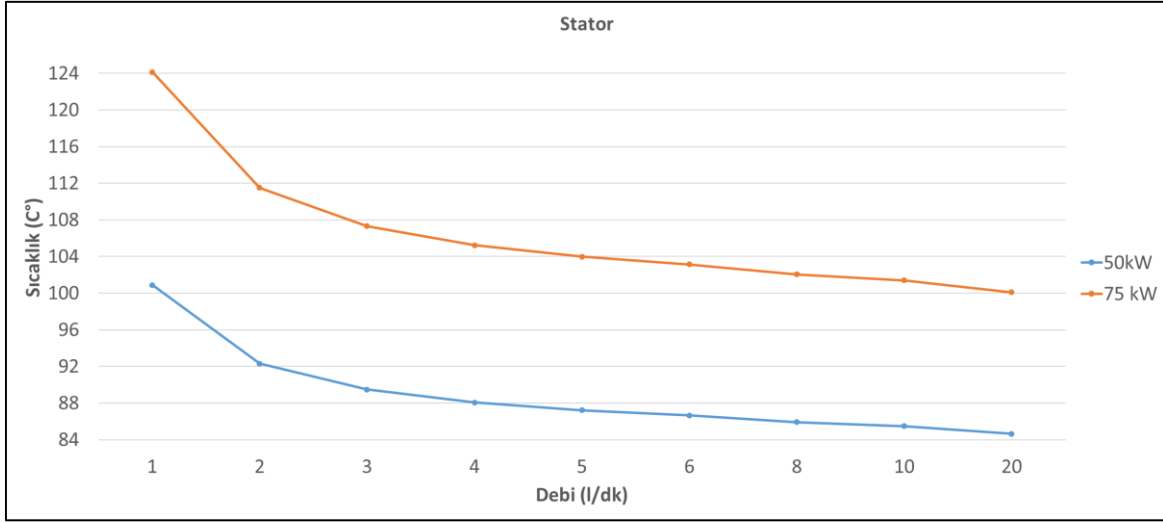
Şekil 6.32’de 50 kW ve 75 kW gücünde çalıştırılan EAASM’nin sargı sıcaklık değişimi, akışkan debisine bağlı olarak gösterilmiştir. Grafiğe göre 55 °C giriş sıcaklığına sahip bir akışkan ile soğutulan EAASM’nin 2 l/dk debiden itibaren yeteri kadar soğutulabildiği söylenebilir. Debi artışına bağlı olarak soğutma da arttığı grafikte görülmektedir. H sınıfı yalıtımda sürekli çalışma sıcaklığın 125 °C, maksimum sıcaklığın ise 180 °C olması göz önünde bulundurulduğunda bu tez çalışmasında 75 kW maksimum güç seviyesi olarak belirlendiğinden, akışkan debisinin 5 l/dk olduğu durumda sargı sıcaklıklarınının 140 °C altına

düştüğü anlaşılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda ise 10 l/dk değerinde soğutmaların yapıldığı görülmektedir [165]. Gerekli ve yeterli soğutma için sargı sıcaklıkları baz alındığından daha yüksek debi değerleri incelenmemiştir. Ek olarak grafikten görüldüğü gibi akışkan debisinin 4 veya 5 l/dk dan sonraki artışlarında, sargılardaki sıcaklık düşümündeki azalma gittikçe azalmaktadır. Yani eğri iyice yataya yaklaşmaktadır. Debiyi artırmak ancak pompalama enerjisini artıracak, karşılığında sağlanacak sıcaklık düşümü ise çok az olmaktadır.



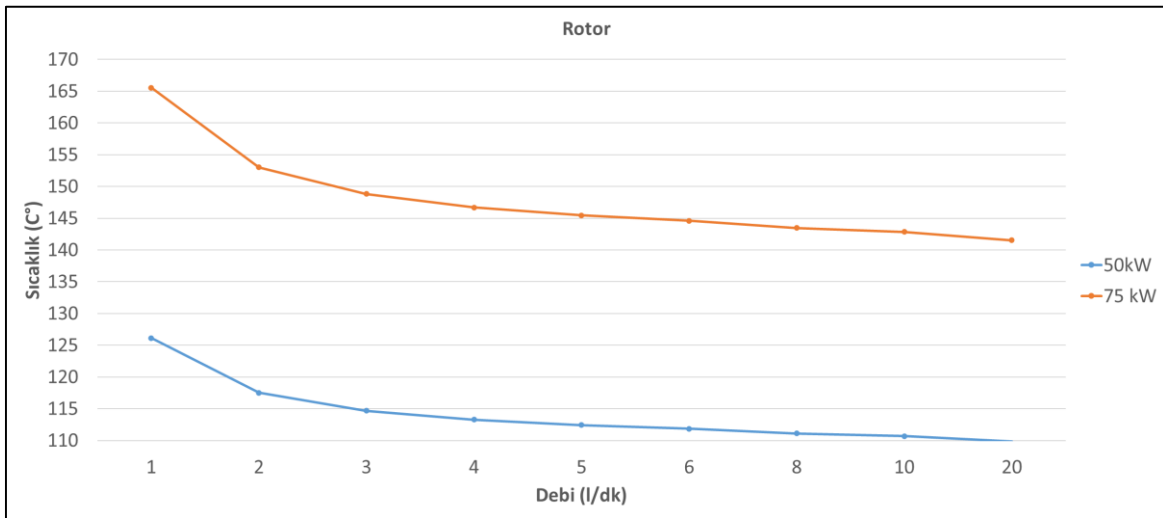
Şekil 6.32. Soğutucu akışkan debisi ile sargı sıcaklığının değişimi

Şekil 6.33'te EAASM stator nüvelerinden bir tanesine ait debiye bağlı soğutma performansını ifade eden grafik gösterilmektedir. Lamine çelik olarak üretilen stator nüvelerindeki aşırı ısınma olarak belirtilen sıcaklıklar 500 C° olarak bildirilmiştir [166]. Aşırı ısınma durumunda verim kaybı, aşınma ve yıpranmada artış, malzeme ömründe azalma gibi istenmeyen durumlar oluşabilir. Bunun nedeni, ısının çelikteki atomların kararsızlaşmasına ve hizalanmalarını kaybetmesine neden olmasıdır. Bu, çekirdeğin manyetik özelliklerini kaybetmesine ve bunun sonucunda motorun veriminin düşmesine neden olabilir. Aşırı ısınmanın çekirdeğin manyetik özellikleri üzerindeki etkisinin miktarı, çeliğin türü, çekirdeğin sıcaklığı ve çekirdeğin sıcaklığa maruz kaldığı sürenin uzunluğu dahil olmak üzere bir dizi faktöre bağlıdır. Genel olarak, sıcaklık ne kadar yüksek ve maruz kalma süresi ne kadar uzun olursa, etki o kadar büyük olacaktır. Şekil 6.33'te 75 kW'da 5 l/dk debi değerinden itibaren stator nüve sıcaklığının 104 C° seviyesine düştüğü görülmektedir.



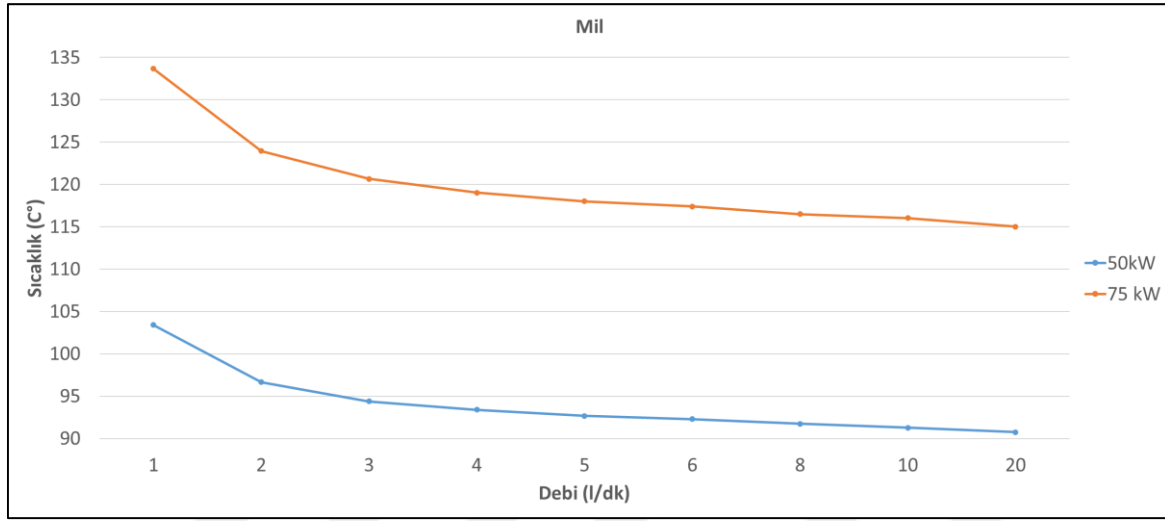
Şekil 6.33. Soğutucu akışkan debisi ile stator nüvesi sıcaklığının değişimi

Elektrik motorlarındaki çekirdeklerin manyetik olumsuz etkileri Curie sıcaklığında başlar [167]. Curie sıcaklığı, ferromanyetik bir malzemenin manyetik özelliklerini kaybettiği sıcaklıktır. Demir için Curie sıcaklığı 770°C 'dir [168]. EAASM rotor nüvesinde 50JN1000 kodlu çelik katı olarak modellenmiştir. Bu sayede laminasyonlu çelikte daha düşük sıcaklıklarda başlayan manyetik özellikteki bozulmalar soğutma açısından dezavantajlı bölgede bulunan rotor nüvesinde daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelecektir. Rotor nüvesinin soğutma açısından dezavantajlı olmasının sebebi ise soğutma sıvısına daha uzak olması fakat rotor akımından dolayı stator nüvesine göre daha fazla ısıya maruz kalmasıdır. Şekil 6.34'te rotor nüvesinin debiye bağlı sıcaklık değişimi görülmektedir.



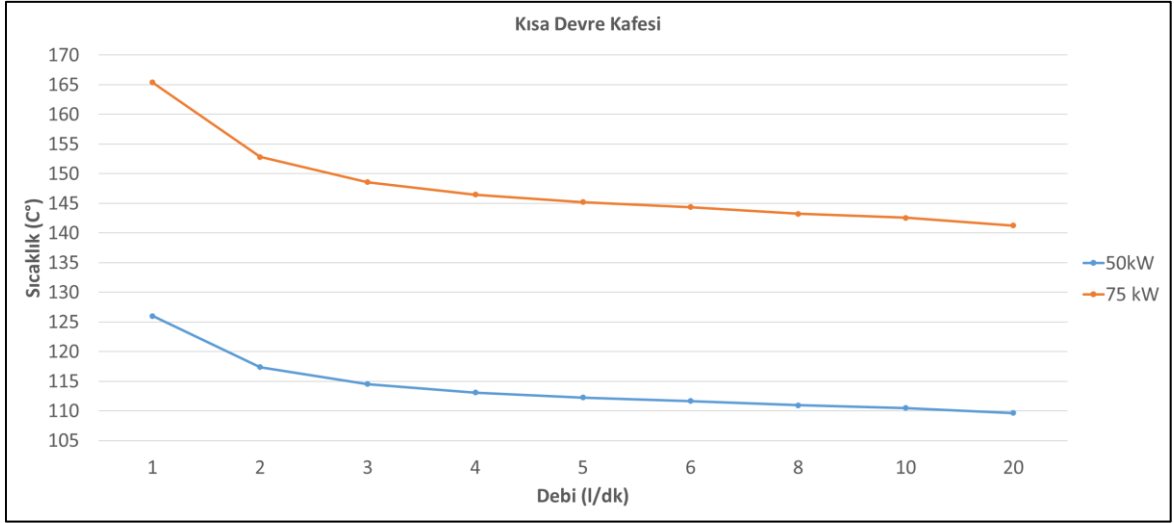
Şekil 6.34. Soğutucu akışkan debisi ile rotor nüvesi sıcaklığının değişimi

Şekil 6.35'te debiye bağlı mil sıcaklığı verilmiştir. Mildeki ısınmanın asıl sebebi rotor kısa devre kafesi ile olan temastır. Mil sıcaklığını sadece yapısal bütünlük açısından incelemek EAASM için yeterli olacaktır. Çünkü motor milinin motorun çalışmasına manyetik açıdan kayda değer bir etkisi yoktur. 42CrMo4 kodlu ıslah çeliğinin erime noktası 1416 °C'dir [169]. Maksimum güçte 5 l/dk debi ile soğutulan EAASM'de mil ortalama sıcaklığı 118 °C olarak elde edilmiştir.



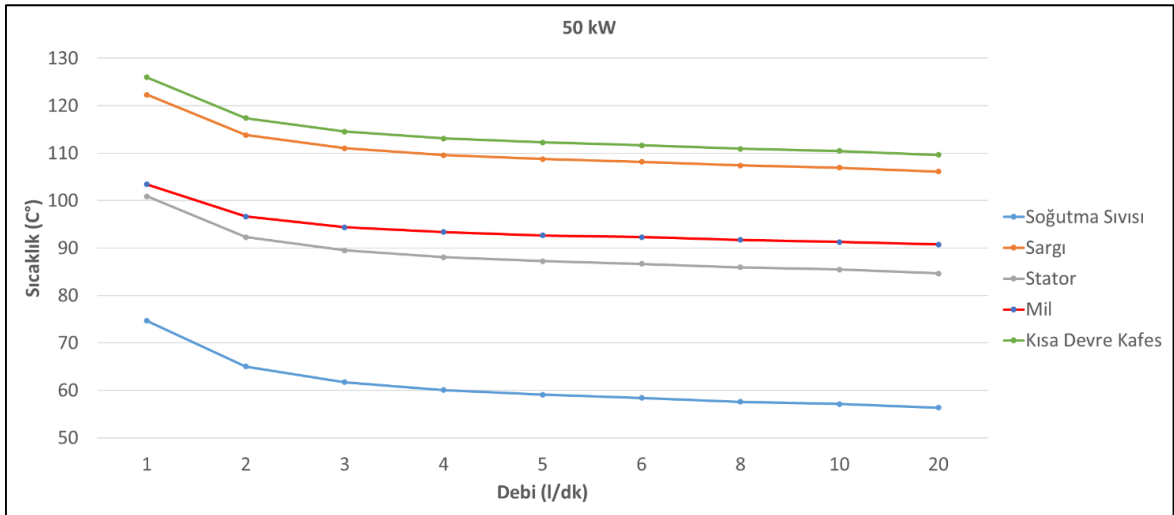
Şekil 6.35. Soğutucu akışkan debisi ile motor mili sıcaklığının değişimi

Şekil 6.36'da bakır kısa devre kafesinin debiye bağlı sıcaklık değişimi 50 kW ve 75 kW gücünde çalıştırılan EAASM'ler için gösterilmiştir. Erime sıcaklığı 1085 °C olan bakır kısa devre kafesinde maksimum güçte 5 l/dk ile soğutulan EAASM kısa devre kafesi ortalama sıcaklığı 145 °C olarak elde edilmiştir.

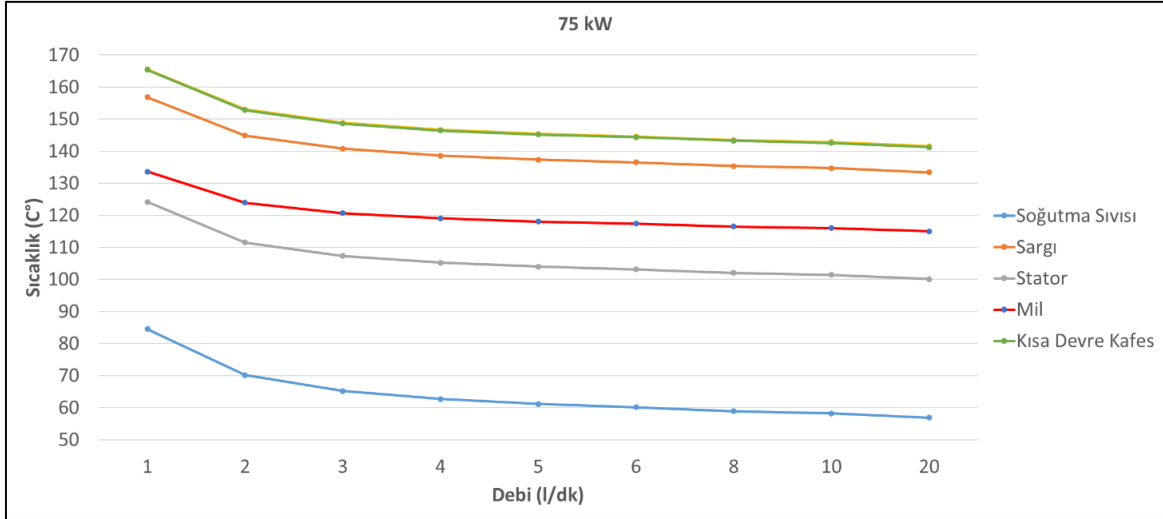


Şekil 6.36. Soğutucu akışkan debisi ile kısa devre kafesi sıcaklığının değişimi

Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’de ise EAASM’nin 50 kW ve 75 kW çalışma koşullarında her bir motor bileşeninin ve soğutma sıvısının sıcaklığını debiye bağlı olarak göstermektedir. Şekil 6.37 50 kW için bütün parçaların debiye bağlı sıcaklıklarını gösterirken Şekil 6.38 75 kW yani maksimum güçte çalışan EAASM’nin debiye bağlı sıcaklık dağılımların özetini göstermektedir. Her iki güç seviyesinde de kısa devre kafesi ve buna bağlı olarak rotor nüvesi en çok ısınan motor parçalarıdır.

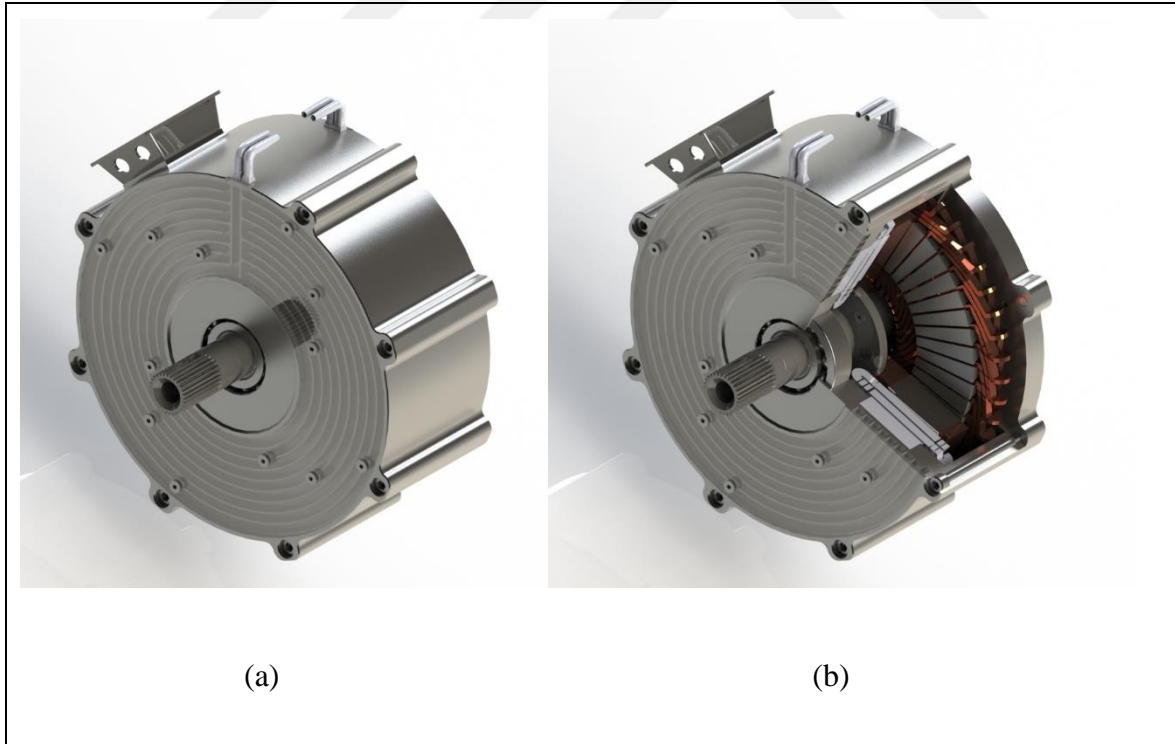


Şekil 6.37. 50 kW motor için soğutucu akışkan debisi ile sıcaklıkların değişimi

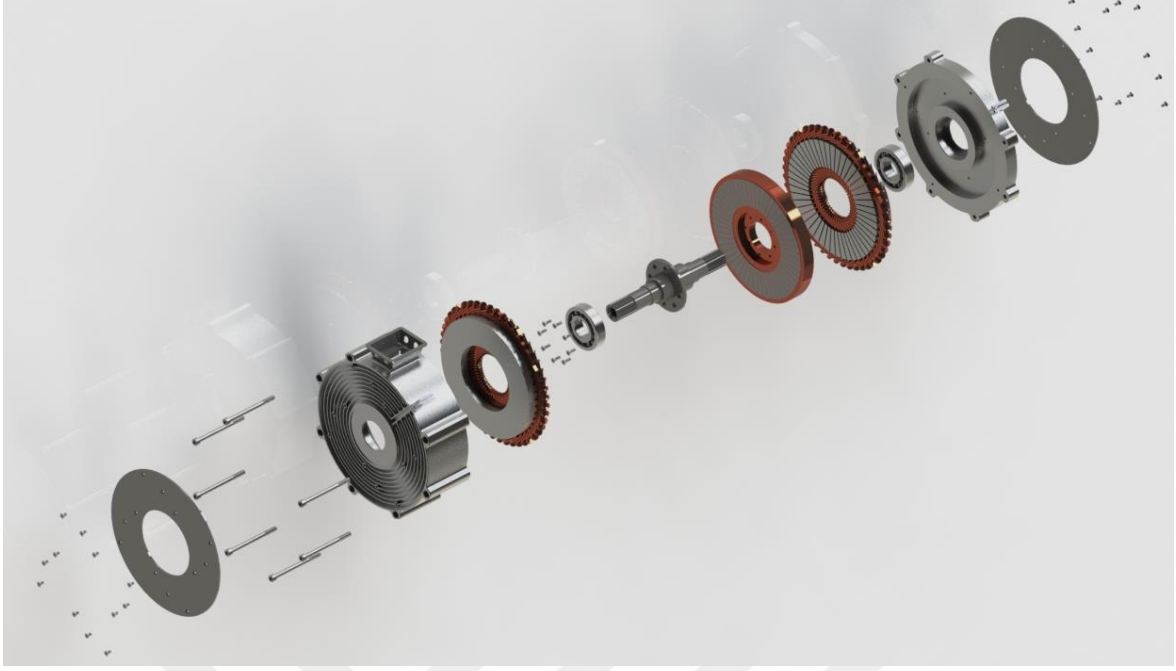


Şekil 6.38. 75 kW motor için soğutucu akışkan debisi ile sıcaklıkların

Manyetik, yapısal ve termal analizler sonucunda elde edilen çift statorlu EAASM'nin 3B görünümü Şekil 6.39'da gösterilmiştir. EAASM bileşenlerini göstermek için Şekil 6.40'ta patlatılmış görünüm verilmiştir.



Şekil 6.39. Çift statorlu EAASM nihai tasarım 3B görünümü (a) İzometrik tam görünümü (b) İzometrik kesit çıkarılmış görünümü



Şekil 6.40. Çift statorlu EAASM nihai tasarımının patlatılmış görünümü

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında referans bir elektrikli araç belirlenerek bu aracın performans kriterlerine göre gerekli olan elektrikli çekiş motorunun çıkış gücü hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre gerekli motorun nominal ve maksimum gücü belirlenmiştir. BEA'larda kullanılmak üzere radyal akıllı alternatiflere göre belirgin avantajları bulunan eksenel akıllı bir motor tercih edilmiştir. Eksenel akıllı motor ailesinde tork yoğunluğunda avantaj sağladığı için çift hava aralıklı topoloji kullanılmıştır. Çift hava aralıklı topolojiler arasında her ne kadar çift rotorlu topoloji daha yüksek performans çıktıları üretebilse de soğutma açısından tasarım avantajı sağladığı için çift statorlu topoloji kullanılmıştır. Asenkron motorların mıknatıssız olmalarıyla sağladığı avantaj dikkate alınarak motor tipi asenkron motor olarak belirlenmiştir. Çift statorlu EAASM'nin kutup/oluk sayısı belirlenmiş ve hedeflenen performans kriterleri çerçevesinde EAASM 3B modeli elde edilmiştir. Fakat 3B modellerde analiz süresinin uzun olması göz önünde bulundurularak çift statorlu EAASM'nin eşdeğer 2B Lineer modeli oluşturulmuştur. ANSYS Electronics yazılımı kullanılarak 2B lineer model ile 3B modelin sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu yazılımda analiz süresinde avantaj sağlayan EAASM 2B lineer modeli kullanılmıştır. Çift statorlu topolojide rotor boyunduruğunu ortadan kaldırmaya olanak sağlayan NS topolojisi göz önünde bulundurularak rotor oluk geometrileri belirlenmiştir. Daha önce radyal akıllı asenkron motorlarda sunulan oluk geometrileri çift statorlu bir EAASM'de ilk kez bu tez çalışmasında sunulmuştur. Elektrikli araçlarda yüksek verim beklentisi esas alınarak EAASM kısa devre kafesi malzemesi olarak bakır kullanılmıştır. 6 farklı oluk geometrisi asenkron motorlarda yaygın olarak kullanılan kısa devre kafesi malzemesi olan alüminyum ile analiz edilmiştir. Aynı EAASM'ler aynı oluk geometrileri ile bakır kısa devre kafesi kullanılarak ayrıca analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre 50 kW çıkış gücünde en yüksek verim %92,12 ile bir numaralı oluk geometrisinde bakır kısa devre kafesi ile elde edilmiştir. Bu oluk yapısının belirlenmesinde nüvelerdeki doyum ve nominal çalışma gücündeki tork dalgalanması da dikkate alınmıştır. Buna göre nominal çalışmada bakır kısa devre kafesinde bir numaralı oluk geometrisinde %5,77 tork dalgalanması görülmüştür. Bu motorda en yüksek manyetik akı yoğunluğu stator dış bölgelerinde ve 2,07 T olarak görülmüştür. Yapılan çalışmalarda bakır kısa devre kafesi ve oluk geometrisi ile EAASM'nin elektrikli araçlarda kullanılabileceği ortaya koyulmuştur.

Oluk geometrisi ve bakır kısa devre kafesi ile 2B lineer modelin analizleri gerçekleştirilerek sunulan motorda daha yüksek verim hedeflerini yakalamak amacıyla ÇAGO kullanılmış ve oluk geometrileri değiştirilerek tasarım hedefleri sağlanmıştır. Optimize edilen EAASM 3B modeli ile analiz edilerek verim haritası elde edilmiştir. Elektrikli araçlarda performans ölçüsü olarak belirlenen verim haritası hıza bağlı grafiklerle bütün performans parametreleri için ayrı ayrı sunulmuştur. Performans kriterleri belirlenirken motorun yapısal değerlendirmesi ve soğutma ihtiyacı da göz önünde bulundurulmuştur. Bu açıdan bakıldığında motor çok yönlü olarak ele alınmış ve tasarım ve analizler bu çerçevede gerçekleştirilmiştir.

EAASM'nin yapısal açıdan ele alınmasında gövde, kapak ve mil tasarımı belirlenmiştir. Motor gövdesi ve kapaklar hem statora uygun boyutlarda hem de termal soğutmaya sağlayacak altyapıya uygun olarak belirlenmiştir. Mil çapı ve dişlileri ise EAASM iç çap boyutu kısıtlaması göz önünde bulundurularak maksimum torku karşılayabilecek şekilde belirlenmiştir. Buna göre EAASM'nin 75 kW maksimum gücü 180 Nm tork ile ürettiği göz önünde bulundurularak mil çapı güvenlik katsayısına göre belirlenmiştir. Mil üzerindeki burulma yüksek olduğu için mil malzemesi olarak ıslah edilmiş mil çeliği kullanılmıştır. Buna göre mil çapı 40 mm olduğunda güvenlik katsayısı 4,65 olarak elde edilmektedir. Mekanik analizlerin SOLIDWORKS yazılımı kullanılmıştır. Bu analizlerde stator dişleri, stator nüvesi ve gövde üzerinde gerilme ve yer değiştirme analizleri yapılarak motorun belirlenen güç değerlerinde yapısal bütünlüğü koruduğu gösterilmiştir.

Yüksek verimliliği sağlamak amacıyla yüksek akım yoğunluğunda çalıştırılan EAASM'nin soğutma performansı, soğutucu kanallarından farklı debilerde akışkan geçirilerek ele alınmıştır. Bu sayede hem EAASM'nin termal performansı değerlendirilmiş hem de soğutucu akışkanın motor bileşenleri açısından değerlendirmesi yapılmıştır. EAASM'nin termal kayıpları ANSYS Maxwell yazılımında gerekli tanımlamalar yapılarak elde edilmiş ve FLOEFD yazılımında bütün motor parçaları için tanımlanmıştır. Isıl analizler, durgun durum şartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre soğutmanın termal rejime ulaşması gözetilerek analizler sonuçlandırılmıştır. Soğutma sıvısı olarak etilen, glikol ve su karışımı kullanılmıştır. Elektrik motorunun çalıştığı ortam sıcaklığında geniş bir sıcaklık yelpazesi elde etmek amacıyla %50 su ve %50 etilen glikol karışımı kullanılmıştır. Soğutma performansının ortaya koyulması için EAASM ilk olarak soğutmasız olarak analiz edilmiştir. Soğutmanın farklı akışkan hızları ile analiz edilmesi ile motorun termal

performansı gözlenmiştir. Buna göre soğutmasız durumda 50 kW nominal ve 75 kW maksimum çalışma koşullarında termal analizler gerçekleştirilmiştir. Maksimum güçte soğutma uygulanmadığında sargı sıcaklıkları ortalama 337 °C iken 5 l/dk debi ile soğutma sıvısı uygulandığında stator sargılarındaki sıcaklık ortalama 137 °C değerine düşürülmüştür. Motorun diğer parçalarındaki soğutma da benzer şekilde izlenmiştir.

EAASM tasarımında kısa devre kafesi malzemesi olarak bakır kullanımı yüksek performans beklentisine önemli ölçüde cevap vermiştir. Fakat çift hava aralıklı ve çok katmanlı aksel akı motor tasarımlarında manyetik akı dağılımına göre oldukça farklı şekillerde akı dağılımları elde etmek mümkündür. Bu akının nüvelerdeki dağılımı yumuşak manyetik malzemelerle eklemeli imalat yöntemi kullanılarak çok daha geniş yelpazede incelenebilir. Yine kısa devre kafesinde kaykılı rotor çubuklarının EAASM performansına etkisi değerlendirilebilir. Farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak daha yüksek performans çıktıları üretebilen oluk geometrileri hem stator hem de rotor için belirlenebilir. Termal performansı yükseltmek amacıyla soğutma kanalları optimize edilerek daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca EAASM'de soğutma açısından direkt müdahalenin daha kısıtlı olduğu motor mili oyuklu yapıda tasarlanarak rotor için ayrıca soğutma sağlanabilir.



KAYNAKLAR

1. Bai, Y., He, H., Li, J., Li, S., Wang, Y., and Yang, Q. (2019). Battery Anti-Aging Control for a Plug-in Hybrid Electric Vehicle with a Hierarchical Optimization Energy Management Strategy. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117841.
2. İnternet: TÜİK. (2023). *Motorlu Kara Taşıtları Ocak-2023*. Web: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2023-49433>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
3. Thiel, C., Julea, A., Iborra, B.A., Echevarria, N.D.M., Peduzzi, E., Pisoni, E., Vilchez, J.J.G., and Krause, J. (2019). Assessing the impacts of electric vehicle recharging infrastructure deployment efforts in the European Union. *Energies*, 12, 2409.
4. de Almeida, A.T., Ferreira, F.J.T.E., and Fong, J. (2023). Perspectives on electric motor market transformation for a net zero carbon economy. *Energies*, 16, 1248.
5. İnternet: IEA (2022). *World Energy Outlook 2022, Paris*. Web: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
6. Uzun, H., Akar, O, Demirci, A, Akuner, M.C., and Terzi, U.K. (2018). Analyzing high efficiency asynchronous motors using scalar control technique. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6, 23-26.
7. Payán, M.B., Fernandez, J.M.R., Ortega, J.M.M., and Santos, J.M.R. (2019). Techno-economic optimal power rating of induction motors. *Applied Energy*, 240, 1031-1048.
8. Cao, Z., Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Soong, W.L., and Summers, J. R. (2020). A Comparative Study of Axial-Flux versus Radial-Flux Induction Machines. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 1-6.
9. Li, Y., Lei, G., Bramerdorfer, G., Peng, S., Sun, X., and Zhu, J. (2021). Machine learning for design optimization of electromagnetic devices: recent developments and future directions. *Applied Sciences*, 11(4), 1627.
10. Sun, X., Shi, Z., Zhu, J. (2020). Multiobjective design optimization of an IPMSM for EVs based on fuzzy method and sequential taguchi method. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics*, 68, 10592-10600.
11. Nasiri-Gheidari, Z. (2012). A survey on axial flux induction motors. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 88(2), 300-305.
12. Mei, J., Lee, C.H.T., Kirtley, J. (2020). Design of axial flux induction motor with reduced back iron for electric vehicles. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 293-301.
13. Ponomarev, P. (2013). *Tooth-coil permanent magnet synchronous machine design for special applications*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 31-32.

14. Le, W., Lin, M., Lin, K., Liu, K., Jia, L., Yang, A., and Wang, S. (2021). A novel stator cooling structure for yokeless and segmented armature axial flux machine with heat pipe. *Energies*, 14(18), 5717.
15. Wolnik, T. (2020). Alternate computational method for induction disk motor based on 2D FEM model of cylindrical motor. *Archives of Electrical Engineering*, 69(1), 233-244.
16. Dianati, B., Kahourzade, S., and Mahmoudi, A. (2019). *Axial-flux induction motors for electric vehicles*. 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Hanoi, Vietnam, 1-6.
17. Özsoy, M., Kaplan, O., and Akar, M. (2023). Implementation of different 2D finite element modeling approaches in axial flux induction motors. *Electric Power Components and Systems*, 51(19), 2385-2396.
18. Nobahari, A., Darabi, A., and Hassannia, A. (2017). *Axial flux induction motor, design and evaluation of steady state modeling using equivalent circuit*. 2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, Iran, 353-358.
19. Madhavan, R., and Fernandes, B.G. (2010). *A novel axial flux segmented SRM for electric vehicle application*. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, Italy, 1-6.
20. Cao, Z., Mahmoudi, A., Kahourzade, S., and Soong, W.L. (2021). *An overview of axial-flux induction machine*. 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, Australia, 1-6.
21. Lee, J. G., Yeo, H. K., Jung, H. K., Kim, T. K., and Ro, J. S. (2019). Electromagnetic and thermal analysis and design of a novel-structured surface-mounted permanent magnet motor with high-power-density. *IET Electric Power Applications*, 13(4), 472-478.
22. Yilmaz, M. (2015). Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 80-99.
23. Özsoy, M., Kaplan, O., and Akar, M. (2023). FEM-based analysis of rotor cage material and slot geometry on double air gap axial flux induction motors. *Ain Shams Engineering Journal*, 102393.
24. Dianati, B., Kahourzade, S., and Mahmoudi, A. (2020). Optimization of axial-flux induction motors for the application of electric vehicles considering driving cycles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(3), 1522-1533.
25. Huang, S., Luo, J., Leonardi, F., and Lipo, T.A (1999). A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(2), 185-191.

26. Selema, A., Ibrahim, M. N., Vansompel, H., and Sergeant, P. (2022). *Development of yokeless axial flux machine using 3D-printed shape-profiled Core*. 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 1763-1769.
27. Finley, W. R., and Hodowanec, M. M. (2001). Selection of copper versus aluminum rotors for induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(6), 1563-1573.
28. Deeb, R., Janda, M., and Makki, Z. (2012). Comparison of 2D and 3D FEM analysis of the magnetic field in a PM servo motor. *Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering*, 72, 297-309.
29. Isfahani, A. H., Ebrahimi, B. M., and Lesani, H. (2008). Design optimization of a low-speed single-sided linear induction motor for improved efficiency and power factor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(2), 266-272.
30. Peniak, A., Makarovic, J., Rafajdus, P., Vavrus, V., Makys, P., Buhr, K., and Fajtl, R. (2017). Design and optimization of switched reluctance motor for electrical vehicles. *Electrical Engineering*, 99, 1393-1401.
31. El Nemr, M., Afifi, M., Rezk, H., and Ibrahim, M. (2021). Finite element based overall optimization of switched reluctance motor using multi-objective genetic algorithm (NSGA-II). *Mathematics*, 9, 576.
32. Akar, M., Eker, M., Özsoy, M., and Gerçekçioğlu, H. S. (2022). Efficiency analysis of axial flux synrm in variable speed applications. *Machines*, 10, 838.
33. Rahman, K. M., and Ehsani, M. (1996). *Performance analysis of electric motor drives for electric and hybrid electric vehicle applications*. Power Electronics in Transportation, Dearborn, MI, USA, 49-56.
34. Li, Y., Yang, H., Lin, H., Wang, W., and Fang, S. (2019). A novel magnet-axis-shifted hybrid permanent magnet machine for electric vehicle applications. *Energies*, 12(4), 641.
35. Lin, Y., Huang, Y., and Zhang, T. (2022). Comprehensive design and analysis of rotor stress for hspmm considering cooling method. *Machines*, 10(6), 475.
36. Deng, W., and Zuo, S. (2018). Axial force and vibroacoustic analysis of external-rotor axial-flux motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2018-2030.
37. Aydin, M., Huang, S., and Lipo, T. A. (2004). *Axial flux permanent magnet disc machines: A review*. In Conference Record of SPEEDAM, Madison WI, 8, 61-71.
38. Nguyen, T. D., and Foo, G. (2013). Sensorless control of a dual-airgap axial flux permanent magnet machine for flywheel energy storage system. *IET Electric Power Applications*, 7(2), 140-149.
39. Eker, M., ve Özsoy, M. (2022). Effect of demagnetization faults on line start AF-PMSM performance. *Journal of Power Electronics*, 22, 1001-1009.

40. Madonna, V., Giangrande, P., Lusuardi, L., Cavallini, A., and Galea, M. (2018). *Impact of thermal overload on the insulation aging in short duty cycle motors for aerospace*. 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, UK, 1-6.
41. Lee, Y., Hahn, S. Y., and Kauh, S. K. (2000). Thermal analysis of induction motor with forced cooling channels. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(4), 1398-1402.
42. Raj, E. F. I., Appadurai, M., Darwin, S., and Thanu, M. C. (2023). Detailed study of efficient water jacket cooling system for induction motor drive used in electric vehicle. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 17, 1277-1288.
43. Chan, C. C. (1987). Axial-field electrical machines - design and applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2(2), 294-300.
44. Mazali, I. I., Daud, Z. H. C., Hamid, M. K. A., Tan, V., Samin, P. M., Jubair, A., Ibrahim, K. A., Kob, M. S. C., Xinrui, W., and Talib, M. H. A. (2022). Review of the methods to optimize power flow in electric vehicle powertrains for efficiency and driving performance. *Applied Sciences*, 12(3), 1735.
45. Alanazi, F. (2023). Electric vehicles: Benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation. *Applied Sciences*, 13(10), 6016.
46. Kalakanti, A. K., and Rao, S. (2023). Computational challenges and approaches for electric vehicles. *ACM Computing Surveys*, 55(14), 311, 1-35.
47. Vega-Perkins, J., Newell, J. P., and Keoleian, G. (2023). Mapping electric vehicle impacts: greenhouse gas emissions, fuel costs, and energy justice in the United States. *Environmental Research Letters*, 18(1), 014027.
48. Manojlović, A. V., Medar, O. M., Anđelković, A. S., and Tomić, M. A. (2023). Environmental impact assessment of the electric vehicles: A case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 1007-1016.
49. Roy, H., Roy, B. N., Hasanuzzaman, M., Islam, M. S., Abdel-Khalik, A. S., Hamad, M. S., and Ahmed, S. (2022). Global advancements and current challenges of electric vehicle batteries and their prospects: A comprehensive review. *Sustainability*, 14(24), 16684.
50. Internet: IEA. (2023). *Global EV Outlook 2023*, Paris, France. Web: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
51. Block, D., and Harrison, J. (2014). *Electric vehicle sales and future projections*. Washington: University of Central Florida, 2-12.
52. Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., and Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 505570.

53. Mandel, T., Kranzl, L., Popovski, E., Sensfuß, F., Müller, A., and Eichhammer, W. (2023). Investigating pathways to a net-zero emissions building sector in the European Union: what role for the energy efficiency first principle? *Energy Efficiency*, 16, 22.
54. Pieltain Fernández, L., Gómez San Román, T., Cossent, R., Mateo Domingo, C., and Frías, P. (2011). Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 206-213.
55. Morimoto, M. (2015). Which is the first electric vehicle? *Electrical Engineering in Japan*, 192(2), 31-38.
56. Song, M. R., Chu, W., and Im, M. (2022). The effect of cultural and psychological characteristics on the purchase behavior and satisfaction of electric vehicles: A comparative study of US and China. *International Journal of Consumer Studies*, 46(1), 345-364.
57. International Energy Agency. (2022). *Global EV outlook 2022: Securing supplies for an electric future*. Paris: OECD Publishing, 3-10.
58. İnternet: Paoli, L., and Gül, T. (2023). *Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales*. France: International Energy Agency, <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
59. İnternet: IEA. (2021). *Global EV outlook 2021*, IEA, Paris, France. Web: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
60. Ivanova, G., and Moreira, A. C. (2023). Antecedents of electric vehicle purchase intention from the Consumer's perspective: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(4), 2878.
61. İnternet: GreenCars. (2023). *The Tesla Model Y is The Best Selling Car in The World*. Web: <https://www.greencars.com/news/the-tesla-model-y-is-the-best-selling-car-in-the-world>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
62. Soylu, S. (Ed.) (2011). *Electric vehicles - The benefits and barriers*. Primorje-Gorski Kotar: IntechOpen, 1-31.
63. Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704-718.
64. Maggetto, G., and Van Mierlo, J. (2000). *Electric and electric hybrid vehicle technology: A survey*. In IEE Seminar Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles (Ref. No. 2000/050), Durham, UK, 1/1-111.
65. Demir, U., ve Aküner, M. C. (2018). Elektrikli bir araç için tekerlek içi asenkron motorun tasarım ve optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1517-1530.
66. Xia, X., Li, P. (2022). A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. *Science of The Total Environment*, 814, 152870.

67. Tie, S. F., and Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102.
68. Peng, M., Liu, L., and Jiang, C. (2012). A Review on the economic dispatch and risk management of the large-scale plug-in electric vehicles (PHEVs)-penetrated power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1508-1515.
69. Amjad, S., Neelakrishnan, S., and Rudramoorthy, R. (2010). Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1104-1110.
70. Shareef, H., Islam, M. M., and Mohamed, A. (2016). A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 403-420.
71. Castro, T. S., De Souza, T. M., and Silveira, J. L. (2017). Feasibility of electric vehicle: Electricity by grid \times photovoltaic energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1077-1084.
72. Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., and Esfahanian, V. A. (2017). Review of battery electric vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414-430.
73. Ashique, R. H., Salam, Z., Bin Abdul Aziz, M. J., and Bhatti, A. R. (2017). Integrated photovoltaic-grid dc fast charging system for electric vehicle: A review of the architecture and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1243-1257.
74. Kumar, M. S., and Revankar, S. T. (2017). Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1266-1285.
75. Weiss, M., Patel, M. K., Junginger, M., Perujo, A., Bonnel, P., and van Grootveld, G. (2012). On the electrification of road transport - learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles. *Energy Policy*, 48, 374-393.
76. Erjavec, J. (2012). Hybrid, electric, and fuel-cell vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1243-1257
77. Grammatico, S., Balluchi, A., and Cosoli, E. (2010). *A series-parallel hybrid electric powertrain for industrial vehicles*. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France, 2010, 1-6.
78. Kahireh, M., Kanagachidambaresan, G. R., and Williamson, S. S. (2022). *E-mobility a new era in automotive technology*. Switzerland: Springer International Publishing, 17-28.
79. Chan, C. C., Bouscayrol, A., and Chen, K. (2010). Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(2), 589-598.

80. Jian, L., and Chau, K. T. (2009). A novel electronic-continuously variable transmission propulsion system using coaxial magnetic gearing for hybrid electric vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 7(2), 1291-1296.
81. Zhu, Z. Q., and Howe, D. (2007). Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 746-765.
82. Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., and Marquez-Barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles: technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404.
83. El Hadraoui, H., Zegrari, M., Chebak, A., Laayati, O., and Guennouni, N. (2022). A multi-criteria analysis and trends of electric motors for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 13(4), 65.
84. Agamloh, E., von Jouanne, A., and Yokochi, A. (2020). An overview of electric machine trends in modern electric vehicles. *Machines*, 8(2), 20.
85. Doğan, Z., Kurt, M. Ş., and Emeksiz, C. (2015, 1-3 Ekim). *Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinde arıza teşhisi*. 3. Anadolu Enerji Sempozyumu, Muğla, 361-366.
86. Boldea, I., Tutelea, L.N., Parsa, L., and Dorrell, D. (2014). Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), 5696-5711.
87. Zhang, X., Bowman, C.L., O'Connell, T. C., and Haran, K. S. (2018). Large electric machines for aircraft electric propulsion. *IET Electric Power Applications*, 12(6), 767-779.
88. Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J., and Jiang, L. (2017). Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 3(3), 1-17.
89. Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., and Mehrjardi, R. T. (2021). State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967-984.
90. Bhatt, P., Mehar, H., and Sahajwani, M. (2019). *Electrical motors for electric vehicle – A comparative study*. In Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA) 2019, Indore, India.
91. Akar, M., and Eker, M. (2013). Demagnetization fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 89(2a), 229-233.
92. Limane Mahamat, A., Gözüaçık, E., and Akar, M. (2023). Sensitivity-based design and optimization of line start synchronous reluctance motor. *Electric Power Components and Systems*, 51, 2499–2511,
93. Gözüaçık, E., and Akar, M. (2023). Senkron Relüktans motor analitik hesabı ve tasarımı. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 12(1), 86-100.

94. Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M. N., and Hossain, E. (2017). A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development. *Energies*, 10(8), 1217.
95. Bozkurt, A., Baba, A. F., and Oner, Y. (2021). Design of outer-rotor permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor for electric vehicles. *Energies*, 14(13), 3739.
96. Hashemnia, N., and Asaei, B. (2008). *Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles*. 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 1-5.
97. Zeraoulia, M., Benbouzid, M. E. H., and Diallo, D. (2006). Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(6), 1756-1764.
98. İnternet: Eric, S. (2023). *Rimac nevera electric hypercar sets 23 records*. Web: <https://www.caranddriver.com/news/a43917904/rimac-nevera-electric-hypercar-sets-23-records/> , Son Erişim Tarihi: 7.11.2023.
99. Rahman, F., and Dutta, R. (2013). *AC motor control applications in vehicle traction*. West Sussex: Wiley, 453–486.
100. Amin, S., Khan, S., and Hussain Bukhari, S.S. (2019). *A comprehensive review on axial flux machines and its applications*. In 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, Pakistan, 1-7.
101. Tremelling, D.D. (2009). *On the design and analysis of a printed circuit board in a high speed surface permanent magnet axial flux machine*. Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, 2-262.
102. Neelima, P., Manjeera, C., and Babu, V. R. (2014). Modelling of axial flux induction machines and it application as differential in electrical vehicles. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 1(12), 1-10.
103. İnternet: Ferretti, L. (2023). *Axial Flux Motor vs Radial Flux Motor: A Focus on Magnetic Field Orientation - Traxial Available online*. Web: <https://traxial.com/uncategorized/axial-flux-motor-vs-radial-flux-motor-a-focus-on-magnetic-field-orientation/>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
104. Versele, C., De Greve, Z., Vallee, F., Hanuise, R., Deblecker, O., Delhayé, M., and Lobry, J. (2009). *Analytical design of an axial flux permanent magnet in-wheel synchronous motor for electric vehicle*. In 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, 1-9.
105. Proca, A. B., Keyhani, A., El-Antably, A., Lu, W., and Dai, M. (2003). Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(3), 386-391.

106. Ficheux, R. L., Caricchi, F., Crescimbin, F., and Honorati, O. (2001). Axial-flux permanent-magnet motor for direct-drive elevator systems without machine room. *IEEE Trans Ind Appl*, 37(1), 1693-1701.
107. Profumo, F., Zhang, Z., and Tenconi, A. (1997). Axial flux machines drives: A new viable solution for electric cars. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(1), 39-45.
108. Aydin, M. (2004). *Axial flux surface mounted permanent magnet disc motors for smooth torque traction drive applications*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, University of Wisconsin, Madison, 18-27.
109. Er, E. (2019). *Eksenel akıllı indüksiyon motor tasarım arayüzü geliştirilmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 10-31.
110. Mushid, F. C., and Dorrell, D. G. (2017). *Review of axial flux induction motor for automotive applications*. In 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 146-151.
111. Ashari, M., Suryoatmojo, H., Riawan, D. C., Mardiyanto, R., Fahmi, D., Hidayat, S., and Adam, K. B. (2015). Design and implementation of axial flux induction motor single stator - single rotor for electric vehicle application. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 1, 497-502.
112. İnternet: Electric Vehicle News. (2016). *Evans electric previews new axial flux*. Web: <http://www.electric-vehiclenews.com/2016/05/evans-electric-previews-new-axial-flux.html>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
113. Adegbohun, F., von Jouanne, A., Phillips, B., Agamloh, E., and Yokochi, A. (2021). High performance electric vehicle powertrain modeling, simulation and validation. *Energies*, 14(5), 1-22.
114. Ehsani, M., Rahman, K. M., and Toliyat, H. A. (1997). Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(1), 19-27.
115. Larminie, J., and Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. (Second Edition). West Sussex: John Wiley & Sons, 187-217.
116. Huler, S. (2007). *Defining the wind: The beaufort scale, and how a 19th-century admiral turned science into poetry*. New York: Crown Publishers, 474-475.
117. İnternet: Emrax. (2017). Emrax motors are suitable for variety of applications. Web: <https://emrax.com>, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.
118. Amirian, H. (2010). *Design of a novel rotary compact power pack for the series hybrid electric vehicle*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, University of Bradford, Bradford, 76-139
119. Gieras, J. F., Wang, R. J., and Kamper, M. J. (2008). *Axial flux permanent magnet brushless machines*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 10-79

120. Boldea, I. A. and Nasar, S. (2002). *The induction machine handbook*. Boca Raton: CRC Press, 150-227.
121. Bitsi, K., Beniakar, M. E., Wallmark, O., and Bosga, S. G. (2020). *Preliminary Electromagnetic Sizing of Axial-Flux Induction Machines*. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 284-290.
122. Baranov, G., Zolotarev, A., Ostrovskii, V., Karimov, T., and Voznesensky, A. (2021). Analytical model for the design of axial flux induction motors with maximum torque density. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), 24.
123. Özsoy, M., Kaplan, O., and Akar, M. (2022). The effect of stator slot number and pole number on motor performance in double-sided axial flux induction motors for electric vehicles. *Electrical Engineering*, 104, 4289–4304.
124. Tikadar, A., Kumar, N., Joshi, Y., and Kumar, S. (2020). *Coupled electro-thermal analysis of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles*. In 2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, FL, USA, 249-256.
125. Yildirim, M., Polat, M., and Kürüm, H. (2014). *A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles*. In 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 218-223.
126. Guo, Y., and Wang, A. (2021). *Thermal Design and Simulation of Winding Cooling for Permanent Magnet Synchronous Motor of Electric Vehicle*. In 2021 IEEE 4th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS), Huzhou, China, 01-05.
127. Bi, Y., Chai, F., and Chen, L. (2021). The study of cooling enhancement in axial flux permanent magnet motors for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(5), 4831-4839.
128. Egea, A., Almandoz, G., Poza, J., and Gonzalez, A. (2010). *Axial flux machines modelling with the combination of 2D FEM and analytic tools*. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, Italy, 1-6.
129. Mahmoudi, A., Ping, H. W., and Rahim, N. A. (2011). *A comparison between the TORUS and AFIR axial-flux permanent-magnet machine using finite element analysis*. In 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, ON, Canada, 242-247.
130. Nishanth, F. N. U., Verdegheem, J. Van, and Severson, E. L. (2021). *Recent advances in analysis and design of axial flux permanent magnet electric machines*. In 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, 3745-3752.
131. Bonnett, A. H., and Albers, T. (2000). *Squirrel cage rotor options for A.C. induction motors*. In IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 54–67.

132. Williamson, S., and McClay, C.I. (1996). Optimization of the geometry of closed rotor slots for cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32(3), 560-568.
133. Orság, O., Rusnok, S., Sobota, P., and Kačor, P. (2017). *Influence of rotor slot shape on the parameters of induction motor*. 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, Italy, 1-6.
134. Lordoglu, A., Gulbahce, M. O., Kocabas, D. A. (2021). A comprehensive disturbing effect analysis of multi-sectional rotor slot geometry for induction machines in electrical vehicles. *IEEE Access*, 9, 49590-49600.
135. Junaid Akhtar, M., Behera, R. K., and Parida, S. K. (2014). *Optimized rotor slot shape for squirrel cage induction motor in electric propulsion application*. 2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Kurukshetra, India, 1-5.
136. Pao-La-Or, P., Peaiyoung, S., Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn, S. (2007). *Effects of the geometry of the rotor slots on the mechanical vibration of three-phase induction motors*. In Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization, Beijing, China, 434-438.
137. Yetgin, A. G., and Durmuş, B. (2021). Optimization of slot permeance coefficient with average differential evolution algorithm for maximum torque values by minimizing reactances in induction machines. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2685–2693.
138. Joksimović, G., Melecio, J. I., Tuohy, P. M., and Djurović, S. (2020). Towards the optimal ‘slot combination’ for steady-state torque ripple minimization: an eight-pole cage rotor induction motor case study. *Electrical Engineering*, 102, 293-308.
139. Corey, C., Kim, J.H., Sarlioglu, B. (2019). *2-D modeling and experimental testing of single rotor dual stator axial-flux permanent magnet machines*. In 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2996-3003.
140. Gözüaçık, E., Eker, M., and Akar, M. (2023). Multislice analysis of axial flux synchronous reluctance motor based on 2d finite element method linear model. *Journal of Magnetism*, 28, 219-226.
141. Colombo, L. (2021). *Electromagnetic sizing of axial-flux induction machines and experimental validation*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 17-49.
142. Gundabattini, E., Kuppan, R., Solomon, D. G., Kalam, A., Kothari, D. P., and Abu Bakar, R. (2021). A Review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 497-505.
143. Dorrell, D. G., Knight, A. M., Evans, L., and Popescu, M. (2012). Analysis and design techniques applied to hybrid vehicle drive machines—assessment of alternative IPM and induction motor topologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(10), 3690-3699.

144. Kirtley, J.L., Cowie, J.G., Brush, E.F., Peters, D.T., and Kimmich, R. (2007). *Improving induction motor efficiency with die-cast copper rotor cages*. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, 1-6.
145. Cvetkovski, G., Lefley, P., Petkovska, L., and Ahmed, S. (2012). *Optimal design of a novel single phase PM BLDC motor using genetic algorithm*. In 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Novi Sad, Serbia, DS1c.4-1-DS1c.4-8.
146. Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems*. Massachusetts: MIT Press, 66-74.
147. Miguel-Espinar, C., Heredero-Peris, D., Villafafila-Robles, R., and Montesinos-Miracle, D. (2023). Review of flux-weakening algorithms to extend the speed range in electric vehicle applications with permanent magnet synchronous machines. *IEEE Access*, 11, 22961-22981.
148. Tian, Y., Wang, Z., Ji, X., Ma, L., Zhang, L., Hong, X., and Zhang, N. (2023). A concept dual-motor powertrain for battery electric vehicles: principle, modeling and mode-shift. *Mechanism and Machine Theory*, 185, 105330.
149. Chapman, S. (2005). *Electric machinery fundamentals*. New York: McGraw-Hill Education, 307-396.
150. Gai, Y., Kimiabeigi, M., Chuan Chong, Y., Widmer, J. D., Deng, X., Popescu, M., Goss, J., Staton, D. A., and Steven, A. (2019). Cooling of automotive traction motors: schemes, examples, and computation methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(3), 1681-1692.
151. Soyaslan, M., Avşar, Y., Fenercioglu, A., and Sarihan, F. (2023). Design and production of belt drive elevator traction machine: Modelling of Double side belt system. *Journal of Polytechnic*, 1-1.
152. Soyaslan, M., Eldoğan, O., Avşar, Y., ve Fenercioglu, A. (2019). *Asansör tahrik sistemleri için dıştan rotorlu sürekli miknatıslı bir senkron motorun tasarımı ve prototip üretim*. Tamamlanmış Tubitak Projesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, 120-123.
153. Sahin, F. (2001). *Design and development of a high-speed axial-flux permanent-magnet machine*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands, 143-163.
154. Ghahfarokhi, P. S., Kallaste, A., Belahcen, A., and Vaimann, T. (2020). Analytical thermal model and flow network analysis suitable for open self-ventilated machines. *IET Electric Power Applications*, 14(6), 929-936.
155. Morgan, V. T. (1975). The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders. *Advances in Heat Transfer*, 11, 199–264.
156. Farschtschi, A. (1992). Temperature calculation in electrical machines. *European Transactions on Electrical Power*, 2(3), 153–159.

157. Dessouky, Yasser, G., Williams, B. W., and Fletcher, J. E. (1998). Cooling enhancement of electric motors. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 145(1), 57–60.
158. Jack, A. G., Mecrow, B. C., and Cowan, K. (1992). *Calculation of temperature in directly cooled electrical machines*. In IEE Colloquium on Thermal Aspects of Machines, London, UK, 6/1-6/4.
159. Smyth, R. (1997). *Thermal analysis of fluid flow parallel to rotating surfaces*. In IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Honolulu, HI, USA, 1531-1536.
160. Miller, T. J. E., and Hendershot Jr. J. R. (1995). *Design of brushless permanent magnet motors*. Oxford University Press, 496-519.
161. Malloy, A. (2013). *Thermal management of the permanent magnets in a totally enclosed axial flux permanent magnet synchronous machine*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Imperial College London, London, 54-62.
162. Rivière, N., and Popescu, M. (2021). *Multi-physics optimisation of a high speed copper rotor induction motor for a traction application using a metamodel based approach*. In The 10th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2020), Online Conference, 461-466.
163. Zahn, M., Ohki, Y., Fenneman, D. B., Gripshover, R. J., and Gehman, V. H. (1986). Dielectric properties of water and water/ethylene glycol mixtures for use in pulsed power system design. *Proceedings of the IEEE*, 74(9), 1182-1221.
164. Mutlu, Y. (2011). *Elektrikli araç motorunun soğutma sistem tasarımı*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 39-55.
165. Tokuyama, T., Nakatsu, K., Nishihara, A., Sasaki, K., and Saito, R. (2014). *A novel direct water and double-sided cooled power module for HEV/EV inverter*. 2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), Toyama, Japan, 6-9.
166. Takahashi, N., Morishita, M., Miyagi, D., and Nakano, M. (2010). Examination of magnetic properties of magnetic materials at high temperature using a ring specimen. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(2), 548-551.
167. Jiang, Q., Cui, X. F., and Zhao, M. (2004). Size effects on curie temperature of ferroelectric particles. *Applied Physics A*, 78, 703-704.
168. Takahashi, N., Morishita, M., Miyagi, D., and Nakano, M. (2011). Comparison of magnetic properties of magnetic materials at high temperature. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 4352-4355.
169. Panfil-Pryka, D., Kulka, M., Makuch, N., Michalski, J. and Dziarski, P. (2020). The effect of temperature distribution during laser heat treatment of Gas-Nitrided 42CrMo4 steel on the microstructure and mechanical properties. *Coatings*, 10(9), 824.





Gazili olmak ayrıcalıktır