

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN
SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI**

**Hazırlayan
Alim MUSAYEV**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU**

Yüksek Lisans Tezi

**Mayıs 2021
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN
SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Alim MUSAYEV**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU**

**Mayıs 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Alim MUSAYEV

Gnza

YÖNERGEYE UYGUNLUK

"Elektrikli Araç Tahrik Sistemleri İçin Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı"adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Alim MUSAYEV

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

KABUL VE ONAY

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU danışmanlığında **Alim MUSAYEV** tarafından hazırlanan "**Elektrikli Araç Tahrik Sistemleri İçin Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı**" adlı bu çalışmamız tarafımdan Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

31/05/2021

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

Üye : Prof. Dr. Ferhat DALDABAN

Üye : Doç. Dr. Ahmet ÖNEN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /...../

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU' ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca gösterdikleri her türlü destek ve yardımdan dolayı tüm hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince beni destekleyen ve bu günlere gelmemde emeği olan annem ve babama, desteğini esirgemeyen birlikte yaşadığım arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Alim MUSAYEV

Mayıs 2021, KAYSERİ

ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

Alim MUSAYEV

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2021
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÜSTKOYUNCU

ÖZET

Dünya nüfusundaki artış beraberinde ulaşım sıkıntısını da ortaya çıkarmıştır. Trafiğe çıkan araç sayısı her geçen gün artılgöstermektedir. Bu durumda ulaşım sektöründe kullanılan içten yanmalı motora sahip olan araç sayısındaki artış çevreye salınan CO₂ miktarını da artırmıştır. Günümüzde dünyada kullanılan enerjinin büyük bir kısmı fosil enerji kaynaklarından karılanmakta olup bu enerjinin % 26 gibi büyük kısmı da ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Bunun akabinde enerji kullanımına bağlı olarak ulaşım araçları % 26 CO₂ emisyonu oluşturmaktadır [1]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorlu araçların yerine daha az çevre kirliliğine yol açan ve çevre dostu olan elektrikli araçların kullanımı her geçen gün artmaktadır. Elektrikli araçların tahrik sistemlerinde kullanılan elektrik motorları ve güç kaynağı olan batarya sistemleri üzerine daha uzun menzilli ve yüksek performanslı elektrik araçların üretilebilmesi amacıyla literatürde yapılmış olan çok sayıda çalışmaya bulunmaktadır [2]. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorunun da, elektrikli aracın menzili, verimliliği ve performansı üzerinde önemli bir rolü vardır. Bu doğrultuda elektrikli araç üreticileri tarafından farklı özellikler sahip elektrik motorları tercih edilmektedir [3].

Bu tez çalışması, elektrikli araç motoru tasarımı ve benzetim çalışmaları üzerinedir. Çalışmada öncelikle elektrikli araç teknolojisinde kullanılan elektrik motorları incelenmiş ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu doğrultuda, Toyota firmasının üretmiş olduğu 2004 model Prius elektrikli aracının sürekli/sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) tasarımı temel alınmış ve ilgili motorun simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından referans alınan bu motor tasarımı üzerinde farklı değişiklikler yapılarak çok sayıda tasarım ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre en iyi değerlerin elde edildiği SMSM tasarımları seçilerek, referans alınmış SMSM yapısı ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, elektrik motorları, sürekli mıknatıslı senkron motor

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLE PROPULSION SYSTEMS

Alim MUSAYEV

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, May 2021

Supervisor: Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU

ABSTRACT

The increase in the world's population has brought along a transportation problem. The number of vehicles in the traffic is increasing day by day. In this case, the increase in the number of vehicles with internal combustion engines used in the transportation sector increased the amount of CO₂ emitted into the environment. Nowadays, most of the energy used in the world is met by fossil energy resources, and 26 % of this energy is used in the transportation sector. In this case, depending on the energy use, transportation vehicles are generating 26 % of the CO₂ emission. The use of Electric Vehicles (EVs), which cause less environmental pollution and are environmentally friendly, instead of internal combustion engine vehicles, which are widely used today, is increasing day by day. There are many studies in the literature about electric motors and battery systems that are used in the propulsion systems of electric vehicles in order longer-range and high-performance electric vehicles to be produced. The electric motor used in electric vehicles also plays an important role in the range, efficiency and performance of the EV. In this direction, electric motors with different characteristics are preferred by electric vehicle manufacturers.

This thesis is based on the motor design and simulation studies for EVs. In the thesis, first of all, the electric motors used in Electric Vehicle technology were examined with the focus on permanent magnet synchronous motors (PMSM). In this case, permanent magnet synchronous motor design of the 2004 model Prius Electric Vehicle manufactured by Toyota was taken as a basis and the simulation of the relevant motor was carried out. After, different changes were made on this engine design, which was taken as a reference, many other designs and simulation studies were carried out. According to the simulation results, the PMSM designs with the best values were selected and compared with the referenced PMSM structure.

Keywords: Electric Vehicles, electric motors, permanent magnet synchronous motor

İÇİNDEKİLER

ELEKTRİKLİ ARAÇ TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

BİLGİSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR ve ŞİMLER	x
TABLOLAR LİSTESİ	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

1.1.Elektrikli Araçlar ile İlgili Literatür Taraması	4
1.1.1.Elektrikli Araçlar ile İçten Yanmalı Motorlu Araçların Karşılaştırılması	5
1.2.Elektrikli Araç Çeşitleri	6
1.2.1.Tamamen Elektrikli Araçlar	6
1.2.2.Hibrit Elektrikli Araçlar	7
1.2.3.Yakıt Pili Elektrikli Araçlar	10
1.3.Elektrikli Araçların Şarj Teknikleri	10
1.3.1.Klasik Kablolu Batarya Şarj Yöntemleri	11
1.3.2.Kablosuz Şarj Yöntemi	12
1.3.3.Batarya Değişirme Yöntemi (Quick Drop)	12
1.4.Elektrikli Araçların Bugünü ve Gelecek Beklentileri	13

2. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

2.1.Elektrik Motorlarının Tarihçesi	16
2.1.1.Elektrikli Motorlarının Sınıflandırılması.....	17
2.2.Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları.....	17
2.2.1.Doğru Akım Motorları	18
2.2.2.Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	19
2.2.3.Asenkron Motorlar	21
2.2.4.Anahtarlamalı Relüktans Motorlar	23
2.3.Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Motor Tiplerinin Karşılaştırılması	24

3. BÖLÜM

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR

3.1.SMSM Literatür Taraması.....	28
3.2.SMSM Çeşitleri.....	28
3.2.1.Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor	28
3.2.2.Dahili (Gömülü) Mıknatıslı Senkron Motor	29
3.3.Elektrik Araç Üreticileri Tarafından Kullanılan SMSM Çeşitleri.....	30

4. BÖLÜM

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

5. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR ve SİMGELER

Sembol	Anlamı
CO ₂	Karbondiyoksit
ÇYM	Çıtan Yanmalı Motor
EA	Elektrikli Araç
DAM	Doğru Akım Motoru
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
ASM	Asenkron Motor
ĞM	Ğndüksiyon Motor
ARM	Anahtarlmalı Relüktans Motor
NiCd	Nikel Kadmiyum
NiMH	Nikel Metalhidrit
Pb - Acid	KurÇun Asit
Li - Çyon	Lityum Çyon
Li - S	Lityum Kükürt
AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
GM	General Motors
YMSM	Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor
MG	Motor Jeneratör (Generator)
Zn - Air	Çinko Hava
Li - Air	Lityum Hava
LiPo	Lityum Polimer
NdFeB	Neodyum Demir Boron
SM	Sürekli Mıknatıs
km	Kilometre

dev/dak	Devir/dakika
V	Volt
kW	Kilowatt
A	Amper
rpm	Revolutions per Minute
bg	Beygir Gc
Nm	Newtonmetre
mm	Milimetre
P	Kutup Sayısı
$T_{\max}$	Maksimum Tork
$T_{\min}$	Minimum Tork
T_{ort}	Ortalama Tork
n	Devir Sayısı
f	Frekans

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Elektrikli araçlarda kullanılan pil teknolojileri ve özellikleri.....	5
Tablo 1.2.	ğarj istasyonu tipleri ve parametreleri	12
Tablo 1.3.	Türkiye genelinde tercih edilen EA markaları ve araç sayıları	15
Tablo 2.1.	Elektrikli araçlarda kullanılan motor çeğileri	24
Tablo 2.2.	Elektrikli motor çeğilerinin karğılağılması(+ avantaj, - dezavantaj,0 nötr).....	25
Tablo 3.1.	SMSM yapılarının karğılağılması	30
Tablo 3.2.	SMSM kullanılan bazı elektrikli araçlar	31
Tablo 4.1.	Toyota prius 2004 modelinde kullanılan SMSM'ye ait temel parametreler	33
Tablo 4.2.	Tasarlanan IPM motorlar ile Prius 2004 IPM motorunun temel tasarım parametrelerinin karğılağılması.....	35
Tablo 4.3.	Prius 2004 modeli için simülasyon sonuçları	36
Tablo 4.4.	Model-1 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	38
Tablo 4.5.	Model-2 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	39
Tablo 4.6.	Model-3 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	41
Tablo 4.7.	Model-4 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	42
Tablo 4.8.	Model-5 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	44
Tablo 4.9.	Model-6 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	45
Tablo 4.10.	Model-7 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	47
Tablo 4.11.	Model-8 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	48
Tablo 4.12.	Model-9 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	50
Tablo 4.13.	Model-10 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	51
Tablo 4.14.	Model-11 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karğılağılması.....	53
Tablo 4.15.	250A'lık Akımın Tepe Değeri için Prius 2004 model ile diğ er on bir motor modellerinin karğılağılması.....	53

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Tamamen elektrikli araçların Çematik gösterimi.....	7
Şekil 1.2.	Hibrit elektrikli aracın Çematik gösterimi.....	7
Şekil 1.3.	Seri hibrit elektrikli aracın Çematik görünümü.....	8
Şekil 1.4.	Paralel hibrit elektrikli aracın Çematik görünümü	9
Şekil 1.5.	Seri - paralel hibrit elektrikli aracın Çematik görünümü	9
Şekil 1.7.	Kablolu hızlı Çaj yöntemi	11
Şekil 1.8.	Elektrikli araçların kablosuz Çaj tekniği.....	12
Şekil 1.9.	EA yıllara göre artışı grafiği.....	13
Şekil 1.10.	Türkiye genelinde elektrikli ve hibrit araç sayısı.....	14
Şekil 2.1.	Doğru akım motorlarının tork - hız karakteristiği.....	18
Şekil 2.2.	Sürekli mıknatıslı rotor yapısı	20
Şekil 2.3.	Sürekli mıknatıslı senkron motorun tork - hız karakteristiği	21
Şekil 2.4.	Sincap kafes tipli bir rotorun sargısı	22
Şekil 2.5.	Asenkron motorların tork - hız karakteristiği.....	22
Şekil 2.6.	Anahtarlama relüktans motorların tork- hız karakteristiği.....	23
Şekil 2.7.	EA teknolojisinde kullanılan elektrik motorlarının güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması	26
Şekil 2.8.	EA teknolojisinde kullanılan elektrik motorlarının güvenilirliğe göre karşılaştırılması	26
Şekil 2.9.	EA teknolojisinde kullanılan elektrik motorlarının verimliliğe göre karşılaştırılması	27
Şekil 3.1.	Yüzey mıknatıslı senkron motor yapısı.....	29
Şekil 3.2.	Gömülü mıknatıslı motor yapısı.....	30
Şekil 3.3.	Marka, model ve yıllara göre elektrikli araçlarda kullanılan rotor laminasyonları	32
Şekil 4.1.	Tasarlanan sürekli mıknatıslı senkron motor yapıları.....	34
Şekil 4.2.	Prius 2004 IPM motora ait tork grafiği	36
Şekil 4.3.	Model-1 IPM motora ait tork grafiği.....	37
Şekil 4.4.	Model-2 IPM motora ait tork grafiği.....	39
Şekil 4.5.	Model-3 IPM motora ait tork grafiği.....	40
Şekil 4.6.	Model-4 IPM motora ait tork grafiği.....	42

ğekil 4.7. Model-5 IPM motora ait tork grafiğı.....	43
ğekil 4.8. Model-6 IPM motora ait tork grafiğı.....	45
ğekil 4.9. Model-7 IPM motora ait tork grafiğı.....	46
ğekil 4.10. Model-8 IPM motora ait tork grafiğı.....	48
ğekil 4.11. Model-9 IPM mot ora ait tork grafiğı.....	49
ğekil 4.12. Model-10 IPM motora ait tork grafiğı.....	51
ğekil 4.13. Model-11 IPM motora ait tork grafiğı.....	52



GİRİŞ

Çıten yanmalı motorlu (ÇYM) araçlar incelendiğinde, Çair içi kullanımda içten yanmalı motorlu araçlar için verimliliğin yaklaşık % 16 civarında olduğu görölmektedir [4]. Çıten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandığında elektrikli araçların (EA) çok daha yüksek verimliliğe sahip olmaları bu araçların tercih sebeplerinden birisi olmaktadır [4]. Bunun yanında dünya genelinde petrol rezervlerinin azalması ve küresel ısınma, elektrikli araçlarının tercih edilmesinin en önemli sebepleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte EA kullanımı için gerekli altyapı eksikliği, araçların pahalı oluÇuve menzil problemleri gibi bazı temel hususlar tüketicilerin EA'lara tedbirli bir Çıkilde yaklaşmasını beraberinde getirmektedir [4].

Elektrikli araçların tarihsel gelişimine bakıldığında bu araçların XIX. yüzyıldan beri kullanılmakta olduğu görölmektedir. 1835 yılında Profesör Stratingh tarafından Hollanda'da EA geliştirilmiştir [5]. 1895 yılında Solomon ve Morris tarafından iki koltuklu Electrobats adı verilmiş EA geliştirilmiştir. 1901'de "New York Taxi" firması tarafından elektrikli araçların taksi olarak kullanılmasına bağlanmıştır [5]. 1900-1912 yılları arası elektrikli araç tarihine elektrikli otomobillerin altın çağı olarak yazılmıştır [6, 7].

Fosil yakıtlarla çalışa otomobillerin seri üretimine geçilerek ilgili araçların çok daha ucuz fiyata satılmasından sonra ise içten yanmalı motorlu araçlar daha yaygın Çıkilde kullanılmaya bağlanmıştır [6, 7]. Çıten yanmalı motorların oluştırdığı hava kirliliği ve 1970'li yılların bağındaki petrol krizi sonrasında petrol fiyatının artması sebebiyle elektrikli otomobiller yeniden gündeme gelmiştir. Bu süreçte, elektrikli araçların batarya ve menzil kısıtlarını gidermek için yeni bir elektrikli otomobil çeÇidiolan hibrit elektrikli araçlarının geliştirilmesi çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalala ilgili en somut adım 1997 yılında Japonya'da atılmış ve ilk hibrit elektrikli araç geliştirilerek piyasaya sürölmüştür [7].

Toyota firmasının üretmiş olduğu hibrit araç olan Prius modeli dünyada en çok satılan hibrid elektrikli otomobillerden birisi olmuştur Elektrikli araçların günümüzde bu kadar gündeme gelmesinde en etkili hususlardan birisi, Tesla Motors firmasının tek Şarjla 330 km'den fazla yol alabilen Roadster markalı elektrikli aracını pazara sürmesidir. Tesla Motors firmasının elektrikli araçlar hususunda elde ettiği başarı, diğer büyük araç firmalarını elektrikli araç üretimine teşvik etmiş ve bu konuda harekete geçmelerini sağlamıştır [8, 9].

Elektrikli araçların en önemli bileşenleri arasında, ilgili aracın hareketini sağlayan elektrik motoru ve sürücü sistemi yer almaktadır. Günümüzde elektrikli araç üreticileri tarafından kullanılan elektrik motorların aşağıdaki gibi sıralanabilmesi mümkündür [10]:

- Doğru akım motoru (DAM),
- Sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM),
- Asenkron motor (ASM),
- Anahtarlama relüktans motor (ARM).

Elektrikli araç üreticileri kendi elektrikli araç modellerinde bu elektrik motorları üzerinde çeşitli gelişmeler yaparak daha yüksek performans sağlayan elektrikli araç üretmeyi amaçlamaktadır.

Dünya devletlerinin izlediği çevre kirliliğinin azaltılması politikası, vergi indirimleri gibi sebepler, elektrikli araçların satışının artırasında etkili olmuştur. Dünya genelinde elektrikli otomobil satışları 2020 yılında, 2019 yılına göre % 43 artışla 3.2 milyonu aşmıştır. 2021 yılı için elektrikli araç satışlarının 4.6 milyona ulaşması öngörülmektedir [11, 12].

Tezin Amacı

Ulaşımda çok uzun süredir kullanılan içten yanmalı motorlu araçların yerine daha az çevre kirliliği oluşturan ve çevre dostu olarak bilinen elektrikli araçların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Elektrikli araçların performans ve verimlilikleri hususunda en

önemli bileşenlerden olan elektrik motorları konusunda sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) üreticiler tarafından sıklıkla seçilen bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında, Toyota firmasının ürettiği 2004 model Prius aracında kullanılmakta olan SMSM temel alınarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlgili motorun performansını geliştirmeye yönelik olarak çok sayıda tasarım yapılmış ve bu tasarımlardan elde edilen benzetim sonuçları ile referans motora ait sonuçlar karşılaştırılmıştır.



1. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

1.1.Elektrikli Araçlar ile İlgili Literatür Taraması

Elektrikli araçlar denildiğinde, klasik içten yanmalı motorlu araçlardan farklı olarak tasarımında elektrik motoru kullanılan ve dolayısıyla fosil yakıt yerine elektrik enerjisiyle çalışan araçlar anlaşılmaktadır.

Bir elektrikli araç iki temel sistemden oluşmaktadır:

- Elektrik Sistemi: Bataryalar, eviriciler ve elektrik motorları,
- Mekanik Sistem: Aktarım bileşenleri, diferansiyel ve tekerlekler.

Elektrik sisteminin iki ana bileşeni olan batarya ve elektrik motoru, etkili ve verimli bir çekiş sistemi için büyük önem taşımaktadır [13].

Elektrikli araçların ve içten yanmalı motorlu araçların verimliliğine bakıldığında, bir dizel ÖM aracın verimliliği % 32 iken, tamamen elektrikli araçlar için verimlilik % 60'lara ulaşabilmektedir [1,5].

Elektrikli araçların önemli ve pahalı parçalarından biri olan piller, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bünyesinde depolayan birimlerdir. Aynı kimyasal yapılı, aynı ölçülere ve aynı elektrik kapasitesine sahip olan piller toplanarak bir araya getirilerek pil grupları oluşturulur, bu gruba da kısaca batarya adı verilir [13].

Tablo 1.1'de elektrikli araç teknolojilerinde kullanılan pil teknolojileri ve özellikleri verilmiştir [14].

Tablo 1.1. Elektrikli araçlarda kullanılan pil teknolojileri ve özellikleri [14]

Pil Çeşitleri	Nominal Voltaj (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü (Çevrim)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı
Pb-Acid	2	35	1000	Yok	-15, +50
NiCd	1.2	50-80	2000	Var	-20, +50
NiMH	1.2	70-95	<3000	Nadir	-20, +60
Zebra	2.6	90-120	>1200	Yok	+245,+300
Li-Ion	3.6	118-250	2000	Yok	-20, +60
LiPo	3.7	130-225	>1200	Yok	-20, +60
LiFePo ₄	3.2	120	>2000	Yok	-45, +70
Zn-Air	1.65	460	200	Yok	-10, +55
Li-S	2.5	350-650	300	Yok	-60, +60
Li-Air	2.9	1300-2000	100	Yok	-10, +70

1.1.1. Elektrikli Araçlar ile İçten Yanmalı Motorlu Araçların Karşılaştırılması

İçten yanmalı motorlu araçlar ile elektrikli araçların, çalışma ve boşta bekleme performansı, gürültülü çalışması, moment dalgalanması, güvenli sürüş ve verimlilik gibi farklı açılardan karşılaştırılabilmesi mümkündür.

Klasik içten yanmalı motorlu otomobillerle kıyaslandığında elektrikli otomobiller çok daha yüksek bir verimliliğe sahiptir.

İçten yanmalı motorlu araçlarda aracı çalıştırmak için marş motorunun krank milini yaklaşık 200/250 dev/dak'da döndürmesi gereklidir. Bu yerine getirildikten sonra yakıt enjeksiyonu başlar ve krank mili 800/850 dev/dak boşta bekleme hızına ulaştığı zaman, içten yanmalı motorlu araç hareket etmek için hazır olur [1]. Elektrikli otomobillerde ise krank milinin hareket ettirilmesine ve boşta beklenmesine ihtiyaç duyulmaz.

Elektrikli araçlarda düşük devirlerde elde edilen maksimum moment ve bunun geniş bir aralıkta sürdürülebilmesi elektrikli araçlarda vites değiştirme gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Bu sebepten dolayı elektrikli araçlar genellikle tek vitesli olmaktadır. Elektrikli aracın geriye gitmesi eylemi ise motorun ters yönde çalıştırılmasıyla sağlanmaktadır ve bu sebepten dolayı elektrikli otomobillerde geri vites gerekliliği duyulmamaktadır. Elektrikli araçların bu şekildeki tasarımı, bu otomobilleri inanılmaz

Çok ilde basit, güvenilir ve kompakt yapmakta olup bu durum da elektrikli otomobil kullanıcılarının sürüş keyfini artırmaktadır [1].

Elektrikli ve klasik içten yanmalı motorlu araçların Çarj ve yakıt istasyonları karşılaştırıldığında, ülkemizde ve dünya genelinde elektrikli otomobiller için Çarj istasyonlarının sayısı yakıt istasyonlarıyla kıyaslandığında çok düşük olduğu görülmektedir. Türkiye Cumhuriyeti genelinde toplam olarak 800 adet elektrikli otomobillerin Çarj edilmesi için kullanılan Çarj istasyonu bulunmaktadır. Buna karşın olarak ülkemizde içten yanmalı motorlu araçların enerji kaynağı olarak kullanılan 13000 akaryakıt istasyonu ve yaklaşık 10000 lpg istasyonu bulunmaktadır [1]. Bu verilerden de görüldüğü gibi Çarj istasyonları ile akaryakıt istasyonları arasında büyük fark vardır. Bunun başlıca sebebi günümüzde elektrikli araç sayısının içten yanmalı motorlu araç sayısına göre çok daha az olmasıdır. Bu durum bazı farklılıklarla birlikte dünya geneli için de geçerlidir [1].

1.2. Elektrikli Araç Çeşitleri

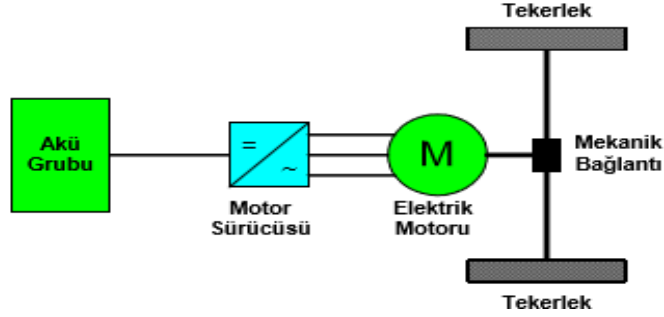
Elektrikli araçların temel olarak üç grupta sınıflandırılabilmesi mümkündür [5]:

- Tamamen Elektrikli Araçlar,
- Hibrit Elektrikli Araçlar,
- Yakıt Pili Elektrikli Araçlar.

Bundan sonraki kısımda ilgili araç çeşitlerinin detaylarına yer verilecektir.

1.2.1. Tamamen Elektrikli Araçlar

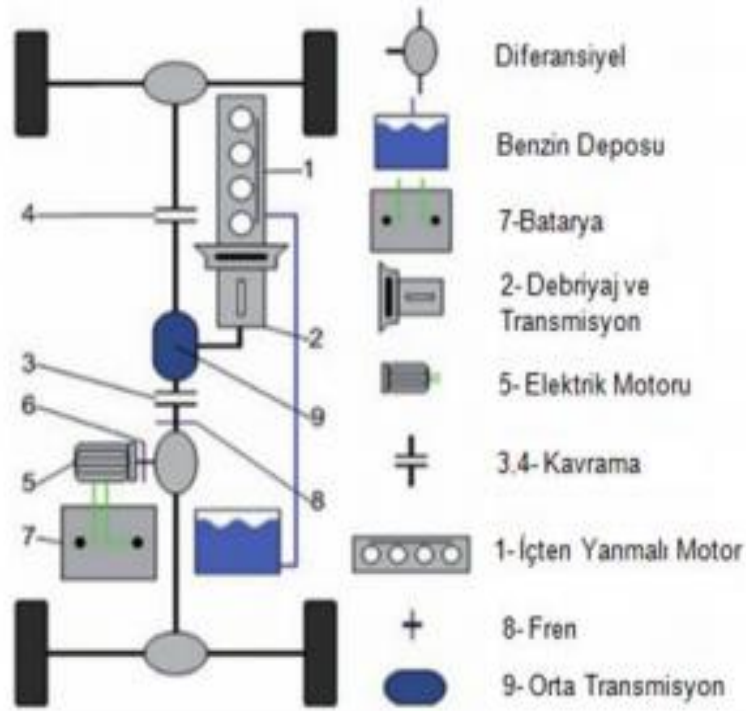
Tamamen elektrikli araçlarda isminden de anlaşılacağı üzere aracın çalıştırılması ve hareket ettirilmesi sadece elektrik enerjisi ile gerçekleştirilmektedir. Tamamen elektrikli araçlarda klasik içten yanmalı motor yerine elektrik motoru kullanılmaktadır. Aracın çalışabilmesi için gerekli olan enerji ise aracın bataryasından sağlanmaktadır. Şekil 1.1’de tamamen elektrikli araçların şematik gösterimi verilmiştir [15].



Şekil 1.1. Tamamen elektrikli araçların Çematik gösterimi [15]

1.2.2.Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrid elektrikli araçlar, tamamen elektrikli araçların dezavantajlarını gidermek amacıyla geliştirilmiş araç modelleridir. Hibrit elektrikli araçlar, elektrik motoru ile içten yanmalı motorun birlikte kullanıldığı araçlar olarak tanımlanabilir. Şekil 1.2’de hibrit elektrikli aracın Çematik gösterimi verilmiştir [5].



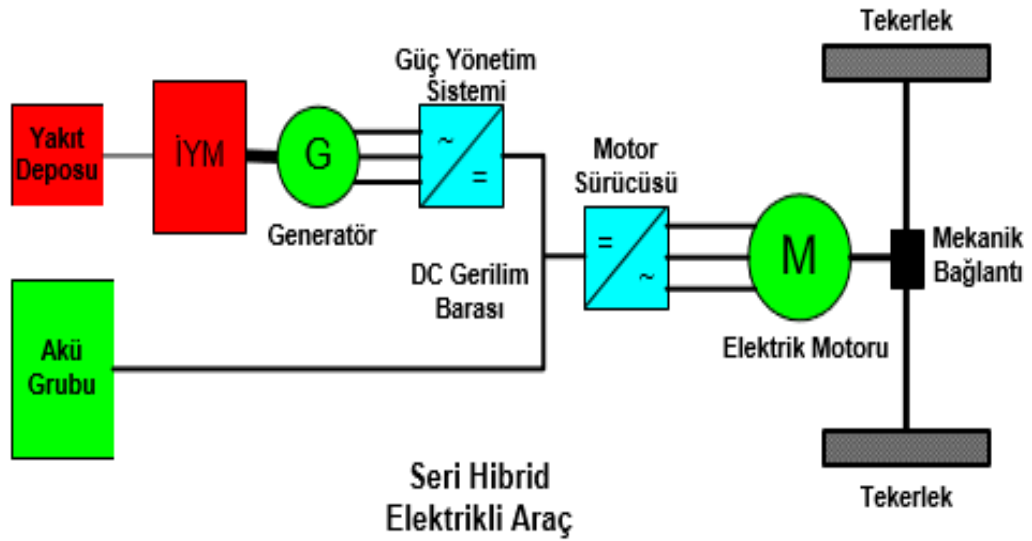
Şekil 1.2. Hibrit elektrikli aracın Çematik gösterimi [5]

Hibrit elektrikli araçların geliştirilmesindeki başlıca sebepler, tamamen elektrikli araçlara ait menzil ve şarj problemlerini ortadan kaldırmaktır.

Hibrit elektrikli araçlar genel olarak üç temel sınıfta gruplandırılabilir:

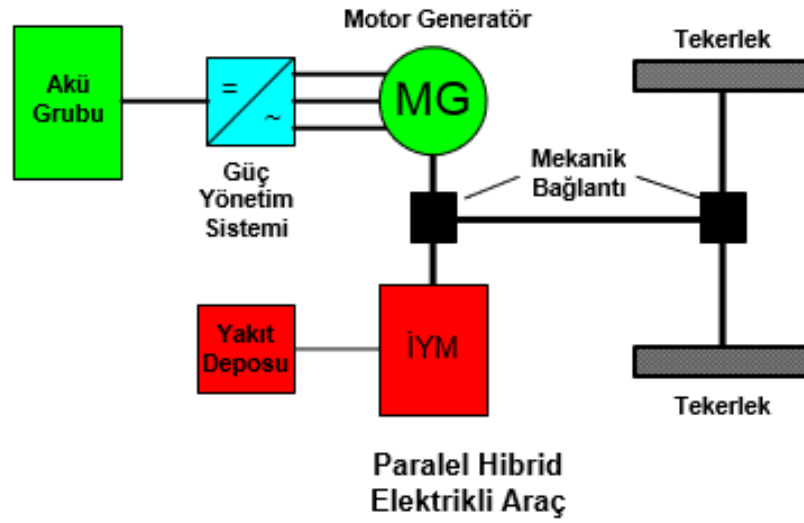
- Seri Hibrid Elektrikli Araçlar,
- Paralel Hibrid Elektrikli Araçlar,
- Seri-Paralel Elektrikli Hibrid Araçlar.

Seri hibrit elektrikli araçlarda tekerleklere iletilen tahrik gücü, elektrik motorundan sağlanmaktadır. Güç ünitesi ise içten yanmalı motor ve jeneratörden oluşmaktadır[5]. Şekil 1.3'te seri hibrit elektrikli aracın şematik görünümü verilmiştir [15].



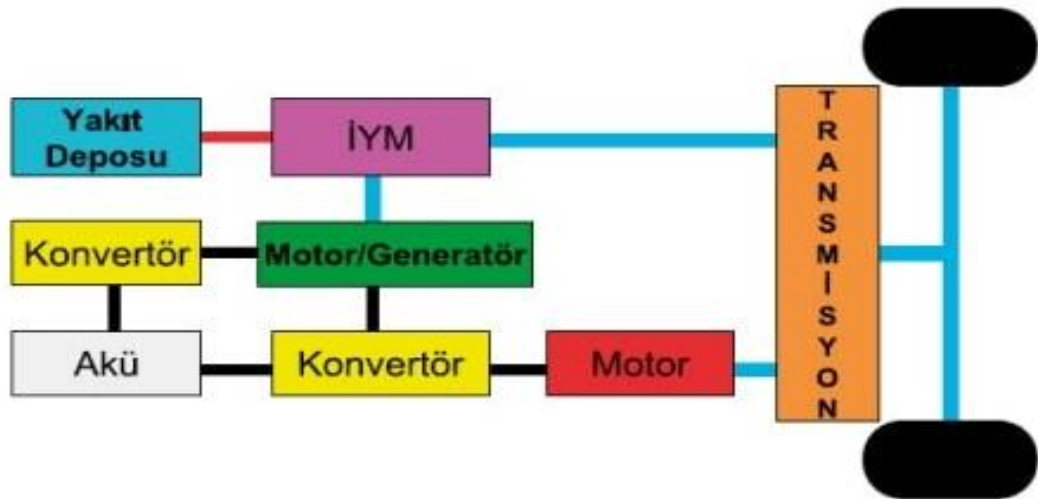
Şekil 1.3. Seri hibrit elektrikli aracın şematik görünümü [15]

Paralel hibrit elektrikli araçta, içten yanmalı motor ve elektrik motoru, ikisi birlikte aracı tahrik edebilmektedir. Şekil 1.4'te paralel hibrit elektrikli aracın şematik görünümü verilmiştir [15].



Şekil 1.4. Paralel hibrid elektrikli aracın Çematik görünümü [15]

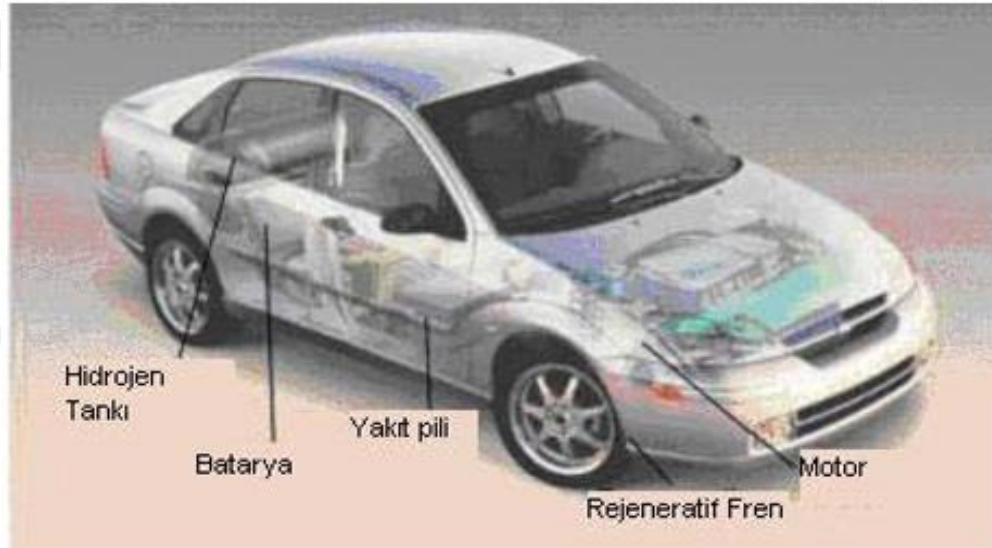
Seri-paralel hibrit elektrikli araçlarda ise hem paralel hem de seri tahrik sisteminin avantajları kullanmakta olup daha güçlü ve enerji verimliliği daha yüksek otomobiller tasarlanabilmektedir. Toyoto firmasının ürettiği Prius model araç, bu tür bir araç olup Şekil 1.5'te seri-paralel hibrit elektrikli aracın Çematik görünümü gösterilmiştir [15].



Şekil 1.5. Seri - paralel hibrit elektrikli aracın Çematik görünümü [15]

1.2.3.Yakıt Pilli Elektrikli Araçlar

Yakıt pilleri ile enerji üretilmesi sistemi, hidrojenin oksijen ile birleştirilerek enerji üretimine dayanmaktadır. Yakıt pillerinin çalışma prensibi elektroliz işleminin tam tersidir. Yakıt pili uygulamalarında, çevre sorunlarının az olması ve kolaylıkla taşınabilir olması, yakıt pillerinin ilerleyen zamanda dünya genelinde yaygın olarak kullanılabileceğinin bir göstergesidir [16]. Bir yakıt pil hücresinin çıkış gerilimi 0.7 V seviyesindedir. Çıkış geriliminin istenilen seviyeye artırılması için çok sayıda yakıt pil hücresi seri şekilde bağlanmaktadır [15]. Şekil 1.6'da yakıt pilli araç sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Yakıt pilli araç [15]

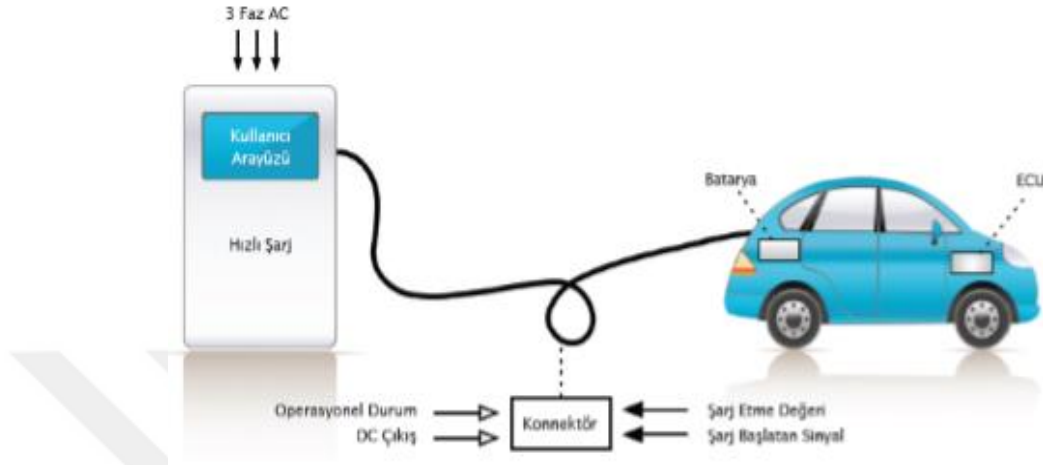
1.3.Elektrikli Araçların Şarj Teknikleri

Elektrikli araçlar için temelde kullanılan üç farklı şarj yönteminin bulunduğu söylenebilir:

- Klasik Kablolu Batarya şarj Yöntemleri,
- Kablosuz şarj Yöntemi,
- Batarya Değiştirme Yöntemi (Quick Drop) [5].

1.3.1.Klasik Kablolu Batarya Şarj Yöntemleri

Bu yöntemle elektrik araçlarının Şarj olması Şekil 1.7’de gösterilmiştir [5].



Şekil 1.7. Kablolu hızlı Şarj yöntemi [5]

Bu yöntemle elektrikli araçların Şarjı iÇemsi Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 Şarj teknikleri olarak üç ayrı gruba ayrılmıştır [5]:

- Birinci Seviye

Bu Şarj tekniğinde elektrikli araçlar konutların önünde veya iÇyerlerinde park halindeyken uzun sürede Şarj edilir. Bu yöntemle Şarj, 120 - 220 V AA gerilim beraberinde 1.2 - 3.8 kW güç ve 5 - 12 saatlik zaman süresinde tam Şarj olanağı sunar [5].

- İkinci Seviye

İkinci seviye Şarj tekniğinde elektrikli otomobiller otobanlara ve ya Çehirlerarası yollar üzerine koyulan Şarj istasyonları vasıtasıyla daha hızlı bir Çekilde Şarj edilmektedir. Bu yöntemle Şarj, 208 - 240 AA beraberinde 3.8 - 15 kW güç ve 4 saatlik zaman diliminde Şarj etme olanağı sunar [5].

- Üçüncü Seviye

Üçüncü seviye Şarj tekniği hızlı Şarj etme tekniği olarak öne çıkmaktadır. Bu Şarj yönteminde hem AA hem de DA kaynağından beslenme yapılabilmektedir. 25 -

50 dakikalık bir zaman diliminde hızlı Şarj etme yöntemidir. Tablo 1.2’de bu üç seviye Şarj yöntemlerinin parametreleri verilmiştir [5].

Tablo 1.2. Şarj istasyonu tipleri ve parametreleri [5]

Parametre	ŞARJ İSTASYONU TİPLERİ			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 3 (DC)
Gerilim Değeri	120 - 220 VAC	208 - 240 VAC	208 - 240 VAC	600 VDC
Güç Seviyesi (kW)	1.2 - 3.8	3.8 - 15	>15 - 96	>15 - 240
Akım Değeri (A)	15 - 20	20 - 80 A	>85 A	
Şarj Süresi (Saat)	5 - 12	1 - 4	0.25 - 0.50	

1.3.2.Kablosuz Şarj Yöntemi

Elektrikli otomobillerin Şarj olması için kullanılan ikinci Şarj yöntemi ise kablosuz Şarj yöntemidir. Kablosuz Şarj yönteminde, kablo bağlantısı olmadığı, prizler ve araçlardan sarkan kablolar ve kablo bağlantıları bulunmadığı için bu ekipmanlardan doğacak olan riskler de ortadan kalkmaktadır [5]. Şekil 1.8’de elektrikli araçların kablosuz Şarj tekniği gösterilmiştir [5].



Şekil 1.8. Elektrikli araçların kablosuz Şarj tekniği [5]

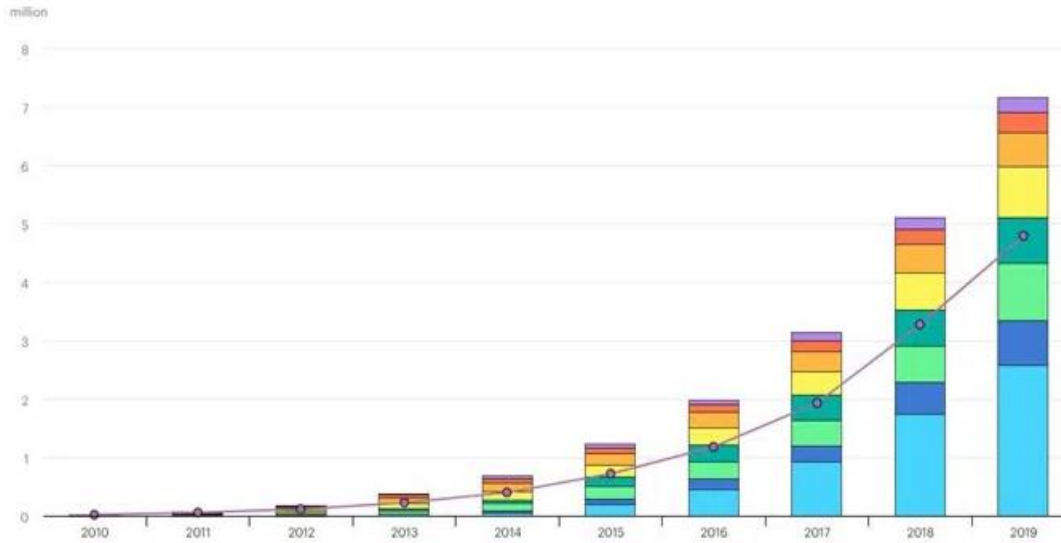
1.3.3.Batarya Değiştirme Yöntemi (Quick Drop)

Elektrikli araçların Şarj olması için kullanılan üçüncü Şarj tekniği ise batarya değiştirme yöntemi (Quick Drop) olarak verilebilir. Batarya değiştirme tekniği ile 90 saniye gibi kısa bir zaman dilimi içinde deŞarj olmuş bir batarya yeni bir tam dolu bataryayla

değiştirilmektedir. Elektrikli araçtan alınmış olan deşarj olunmuş batarya sistem aracılığıyla testlerden geçirilerek, soğutuculu şarj ünitesine kaldırılmaktadır. Soğutuculu şarj ünitesine kaldırılan deşarj olmuş batarya burada üç fazla beslenen 50 kW'lık bir enerji ile yaklaşık olarak 30 dakikalık bir zaman süresinde tekrar tam şarj edilebilmektedir [5].

1.4.Elektrikli Araçların Bugünü ve Gelecek Beklentileri

Gelecek zamanlarda dünya genelindeki petrol rezervlerinin azalacak olması, küresel ısınma gibi sebepler ve dünya devletlerinin EA yönelik çalışmalarını tüketicilerin elektrikli araçlara yönelmesini son yıllarda hızlandırmıştır. Bu doğrultuda EA satışları her geçen yıl bir önceki yıla göre artış göstermektedir. Şekil 1.9'da dünya genelinde elektrikli araçların yıllara göre artış grafiği gösterilmiştir [11].

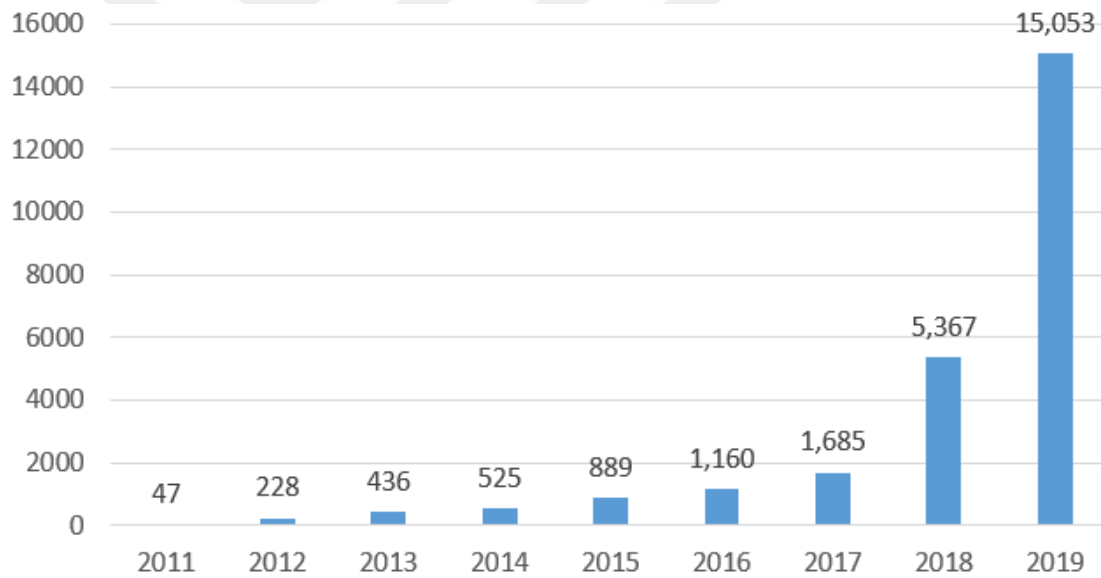


Şekil 1.9. EA yıllara göre artış grafiği [11]

2020 yılında EA satışları, bir önceki yıla göre % 43 oranında artışla 3.2 milyona ulaşmıştır. Bu artışla birlikte dünya genelinde trafikte olan elektrikli araç sayısı toplam 10 milyonu aşmıştır. 2020 yılında satılan elektrikli araçların % 84.4'lük büyük bir kısmı Avrupa ve Çin'de yer almaktadır. 2021 yılı için dünya genelinde satılması planlanan toplam elektrikli araç sayısının 4.6 milyon civarında olması öngörülmektedir [12].

Yıllık 2-3 milyon civarında olan elektrikli araç satışlarının 2025 yılında yıllık 10 milyon olacağı düşünülmektedir. Dünya genelinde önemli yere sahip olan elektrikli araç üretici firmaları 2025 yılında toplam olarak 15 milyon civarında EA üretmeyi hedeflediklerini açıklamaktadırlar [17].

Türkiye genelinde elektrikli araç satışı bakıldığında her geçen yıl artış eğilimi olduğu görülmektedir. Türkiye'de ilk olarak 2011 yılında 47 araç satışı gerçekleştirilmiştir. 2019 yılı verilerinde ise Türkiye'de trafikte olan toplam 15.053 elektrikli ve hibrit elektrikli araç bulunduğu görülmektedir. Şekil 1.10'da Türkiye genelinde yıllara göre elektrikli ve hibrit elektrikli araç sayısı gösterilmiştir [17].



Şekil 1.10. Türkiye Genelinde Elektrikli Ve Hibrit Araç Sayısı [17]

2020 yılında Türkiye genelinde toplamda 10.049 elektrikli ve hibrit elektrikli araç satışı gerçekleştirilmiştir. Tablo 1.3'te Türkiye genelinde geçmişten günümüze kadar yıllara göre EA satış sayıları ve tercih edilen elektrikli araç markaları verilmiştir [17].

Tablo 1.3. Türkiye genelinde tercih edilen EA markaları ve araç sayıları [17]

Marka-Model	Segment	2020	2019	2018	2017	2016	2015
BMW i3	C ₂	23	50	37	35	24	83
Jaguar I-PACE	E ₇	60	119	38			
Mini COPPER SE	B ₂	76					
Renault ZOE	B ₂	60	31	79	42	20	36
Smart EQ	A ₆	42	22	1			
Toplam EA sayısı		261	222	155	77	44	119

Elektrikli araç üretici firmalarının gelecek planlamasına bakıldığında Porsche firmasının, 2023 yılına kadar üreteceği araçların % 50'sinin EA olacağını hedeflediği görülmektedir. Bunun dışında GM, Toyota, Renault ve Nissan gibi araç üretici firmaları tarafından 2021'e kadar 1 milyonun üzerinde EA satışı hedeflenmektedir [17].

Türkiye için elektrikli araçların gelecek planlamasına bakıldığında TOGG projesi kapsamında 2022 yılında EA üretimi ve satışının hedeflendiği görülmektedir [18].

2. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

2.1. Elektrik Motorlarının Tarihçesi

1821'de İngiliz fizikçi Faraday "Yeni elektromanyetik hareketler ve manyetizma teorisi" üzerine yayınladığı makalede, içinden akım geçen bir iletken maddenin manyetik alan tarafından manyetik bir kuvvet ile itildiğini gözlemlediğini açıklamıştır. 1822'de İngiliz fizikçi Barlow, esasen tek kutuplu bir elektrik makinesi olan Barlow tekerliğini icat etmiştir [10, 19]. Bundan sonraki zamanlarda Macar fizikçi Yedlik 1827 yılında dünyanın ilk dinamosunu (doğru akım jeneratörü) icat etmiştir. İngiliz fizikçi Sturgeon 1833 yılında DA elektrik motorunu Londra'daki Adelaide pratik bilimler galerisinde halka açık bir şekilde tanıtmış bu buluşta tarihte ilk kullanılabilen elektrik motoru olarak kabul edilmiştir. Tarihin ilk gerçek elektrik motoru ise 1834 yılında Rus fizikçi Jacobi tarafından çalıştırılmasını doğrudan döndüren elektrik motoru icadıdır. Bu motorun gücü 15 W, rotor hızı ise 80-120 dev/dak idi. Elektrik makineleri için ilk patent 1837'de Amerikalı mucit Davenport tarafından alınmıştır. İlk mucit Davidson 1837 - 1842 yılları arasında torna ve araç modelleri için birkaç sürücü yapmış ve ilk elektrik lokomotifini icat etmiştir. İtalyan fizikçi ve mühendis Galileo Ferraris, 1885'de ilk iki fazlı asenkron motoru icat etmiş ancak böyle bir motorun % 50'den fazla verime sahip olmayacağını düşünerek motoru geliştirme çalışmalarına devam etmemiştir. 1887 yılında Tesla, Ferraris'den bağımsız iki fazlı bir indüksiyon motoru icat etmiş ve bu motorun patentini almıştır. Rus elektrik mühendisi Dolivo - Dobrovolsky tarafından 1889 -1991 yılları arasında "Sincap kafesi" şeklinde rotor icat edilmiştir. Bu yönde yapılan çalışmalar sonucunda günümüzde endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olan üç fazlı asenkron motor geliştirilmiştir [19, 20].

2.1.1.Elektrikli Motorlarının Sınıflandırılması

Elektrikli motorların kullanım alanlarına, faz sayına vb. özelliklerine göre çok sayıda çeşitleri bulunmaktadır. Bununla birlikte elektrik motorlarının doğru akım ve alternatif akım motorları olmak üzere iki temel grupta incelenebilmesi mümkündür. Alternatif akım motorları aşağıdaki gibi sıralanabilir [21, 22]:

- Tek Fazlı ve Çok Fazlı Asenkron Motorlar,
- Tek Fazlı ve Çok Fazlı Senkron Motorlar,
- Histeresis Motorlar,
- Relüktans Motorlar.

Doğru akım motor çeşitleri ise aşağıdaki gibi verilebilir:

- Paralel (Gönt)ve Seri Sarımlı Motorlar,
- Sabit Mıknatıslı Motorlar,
- Birleşik (Compound) Tip Motorlar.

Bu iki temel motor çeşidinin yanı sıra, çalışma prensibi bu motor çeşitlerinden yararlanarak tasarlanan motor çeşitleri de bulunmaktadır. Bu motor çeşitlerinden bazıları aşağıdaki gibi verilebilir [21, 22, 23]:

- Hibrit Motorlar,
- Adım (Step) Motorları,
- Servo Motorlar.

2.2.Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları

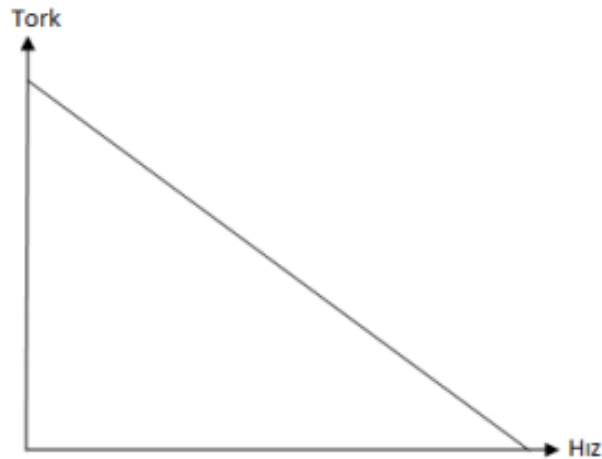
Elektrikli araçların ayrılmaz önemli bileşenlerinden olan güç yönetimi ve batarya sistemleri gibi elektrik motorları da elektrikli aracın performansı ve menzili açısından önemli bir yere sahiptir. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları bataryada depolanan elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek araç tekerlerinin çekici gücünü

sağlamaktadır. Elektrik motorları klasik içten yanmalı motorlarla kıyaslandığında yaklaşık olarak % 80 enerji tasarrufu sağlamaktadır [21, 23]. Bunun yanı sıra elektrik motorları içten yanmalı motorlarından farklı olarak daha iyi hızlanma ve oldukça sessiz çalışma özelliklerine sahiptir. Ayrıca rejeneratif frenleme sistemleri vasıtasıyla elektrik motoru çalıştığı zaman aküyü şarj edebilmektedir [21, 23]. Elektrikli araç teknolojisinde kullanılan genel olarak dört temel elektrik motoru kullanılmaktadır [24]:

- Doğru Akım Motorları (DA Motor),
- Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM),
- Asenkron Motorlar (ASM),
- Anahtarlama Relüktans Motorlar (ARM).

2.2.1. Doğru Akım Motorları

Doğru akım motorları, 20. yüzyıldan başlayarak elektrikli araç teknolojisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Doğru akım motorları, doğru akımla beslenmekte olup bu motorların rotor kısmında endüvi sargısı, statör kısmında ise alan sargısı bulunmaktadır. Doğru akım motorlarının yapısında fırça bulunmaktadır. Doğru akım motorların bu fırçalı yapısı ve teknolojinin zaman geçtikçe daha da gelişmesi nedeniyle, doğru akım motorlarının elektrikli araç teknolojisinde ve sanayide kullanımı azalmıştır [3]. Şekil 2.1’de doğru akım motorlarının tork - hız karakteristiği verilmiştir [25].



Şekil 2.1. Doğru akım motorlarının tork - hız karakteristiği [25]

ğekil 2.1’de verilen karakteristiktten de görüldüğü gibi doğru akım motorlarında, hızın artmasıyla tork da aynı oranda azalmaktadır.

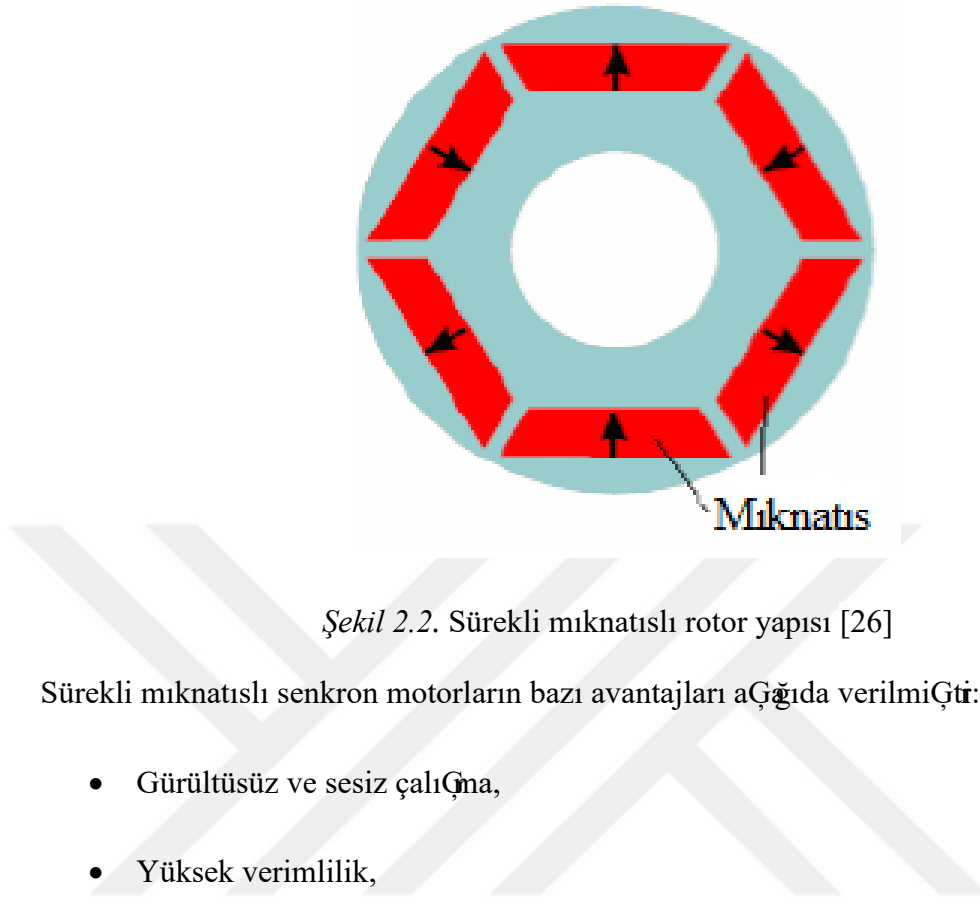
Doğru akım motorlarının özellikle geçmiş yıllarda elektrikli araçlarda kullanılmasının nedenleri arasında bu motorların kolay kontrol edilebilirliği ve sağlam motor yapısına sahip olması yer almaktadır. Bunun yanı sıra doğru akım motorlarının diğer önemli özelliğı doğrudan elektrikli aracın bataryası ile bağlanarak çalışabilmesidir. Doğru akım motorlarında enerji kayıpları en çok rotor kısmında görülür ve bu nedenle yüksek güçlerde motorun rotor kısmının soğutulmasına gerek duyulur. Bu sıkıntılardan dolayı doğru akım motorları günümüzde elektrikli araç üreten firmalar tarafından yaygın olarak kullanılmamaktadır. Özellikle güç elektroniğinin gelişmesinden sonra elektrikli araç teknolojisinde doğru akım motorlarının yerini asenkron ve senkron motorlar almıştır [3].

2.2.2.Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, manyetik alan oluşturmak için sargı yerine mıknatısların kullanıldığı yapıya sahip olan motor çeşiddir. Sürekli mıknatıslı senkron motorların bu çalışma prensibi sayesinde rotor kısmındaki kayıplar ve bakım gereksinimi minimuma indirilmiştir.

Senkron motorlarda asenkron motorlardan farklı olarak kayma olmamaktadır. Bunun sebebi senkron motorda, asenkron motordan farklı olarak rotor devir sayısının döner alanın devir sayısı ile aynı olmasıdır. Sürekli mıknatıslı senkron motorun önemli bileşeni olan rotordaki manyetik alan mıknatıslar tarafından oluşturulduğundan, harici doğru akım kaynağına gereksinim duyulmamaktadır [3].

ğekil 2.2’de örnek olarak bir sürekli mıknatıslı rotor yapısı gösterilmiştir [26].



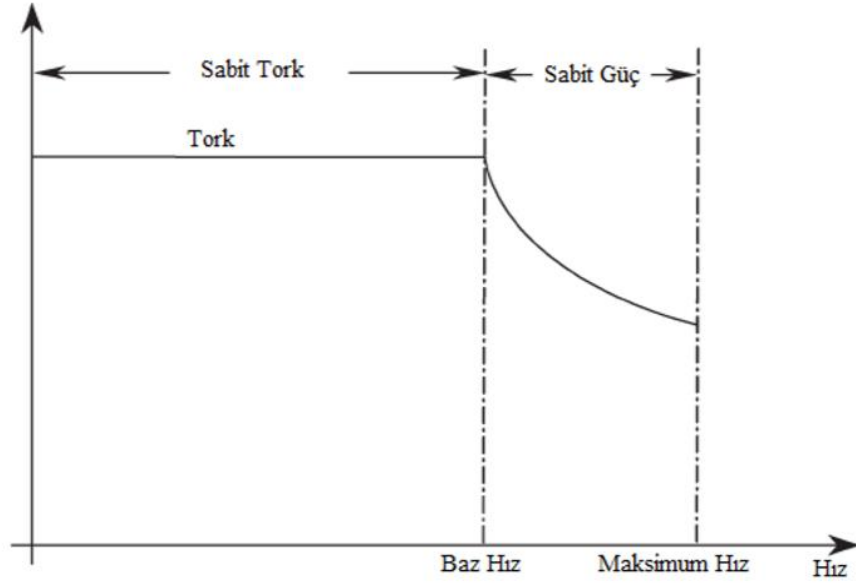
Şekil 2.2. Sürekli mıknatıslı rotor yapısı [26]

Sürekli mıknatıslı senkron motorların bazı avantajları aşağıda verilmiştir:

- Gürültüsüz ve sesiz çalışma,
- Yüksek verimlilik,
- Küçük boyutlu yapıya ve hafif ağırlığa sahip olma,
- Yüksek güç yoğunluğu.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, doğru akım motorları ve asenkron motorlarla kıyaslandığında üstün özelliklere sahiptir. Sürekli mıknatıslı senkron motorların bu özellikleri yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar asenkron motorlarla kıyaslandığında, yüksek hızlarda motorun verimliliğinin daha düşük olması ve mıknatısların özelliklerini kaybetme risklerinin bulunması bu motorların bazı dezavantajlarıdır.

Şekil 2.3'te SMSM'nin tork- hız karakteristiği gösterilmiştir [25].



Şekil 2.3. Sürekli mıknatıslı senkron motorun tork - hız karakteristiği [25]

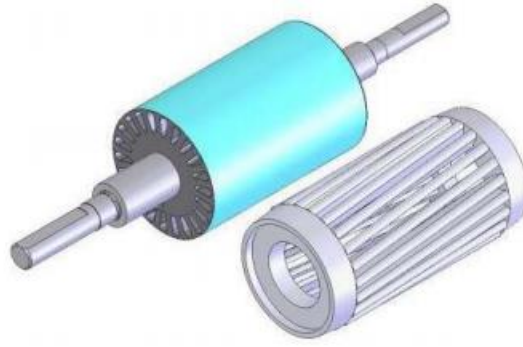
Şekil 2.3'te verilen tork - hız karakteristiğinden de görülebileceği üzere sürekli mıknatıslı senkron motorların sabit güç bölgesi kısadır. Bu nedenle yüksek hız gerektiren uygulamalarda bu motor çeşitlerinin kullanımı elverişli değildir [25, 3].

2.2.3. Asenkron Motorlar

Asenkron motorlar, doğru akım motorlarıyla kıyaslandığında daha basit ve ucuz yapıya sahiptir. Asenkron motorların bazı önemli avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Basit ve düşük maliyetli yapı,
- Minimum bakım gereksinimi ihtiyacı,
- Yüksek güç üretebilme,
- Yüksek verimlilik.

Rotor yapısına göre, sincap kafes tipli ve bilezikli tip olmak üzere iki grupta sınıflandırılan asenkron motorlar içerisinde daha çok kullanılan sincap kafes tipi rotora sahip olanlardır. Şekil 2.4'te sincap kafes tipi bir rotor gösterilmiştir [10].

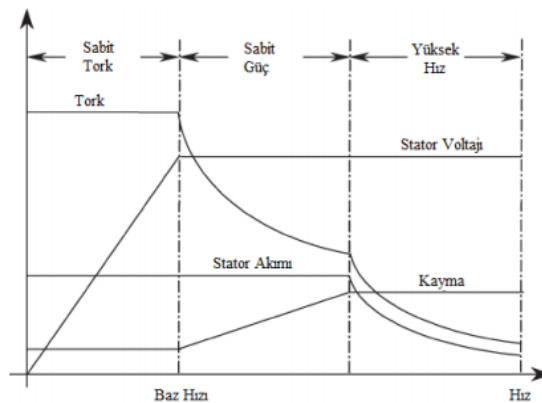


Şekil 2.4. Sincap kafes tipli bir rotorun sargısı [10]

Şekil 2.4'te verilmiş rotorun sargı yapısı dikkatle incelendiğinde, sincap kafes tipli rotoru oluşturan çubukların bu rotor eksenine paralel şekilde yerleştirilmesini görebilmekteyiz [27].

Asenkron motorlarda kullanılan sargılı (bilezikli) tipli rotor üretiminde, sargılar paketlenmektedir. Bu saçların paketlenerek silindirik şekline getirilmesinden sonra, rotor yapısının üzerinde olan oluklara üç fazlı alternatif akım sargılar yerleştirilir. Yerleştirilmiş bu üç fazlı sargılar üçgen veya yıldız şeklinde bağlandıktan sonra, oluklara yerleştirilmiş sargılardan çıkarılan üç uç rotor miline yalıtılarak üç adet bileziğe bağlanır [27, 28].

Tek fazlı çeşitleri de bulunan asenkron motorların yüksek güç gerektiren uygulamalarda üç fazlı versiyonları kullanılmaktadır. Dolayısıyla elektrikli araçlarda kullanılan asenkron motorlar da üç fazlı asenkron motorlardır. Şekil 2.5'te asenkron motorların tork - hız karakteristiği verilmiştir [25].



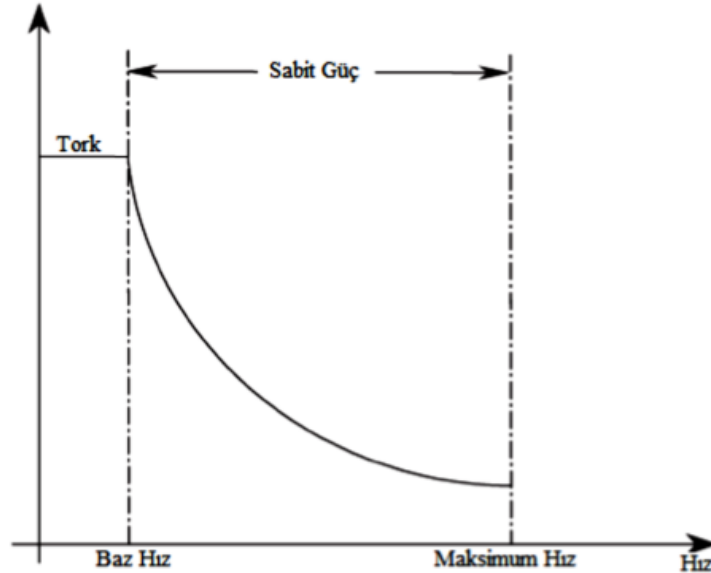
Şekil 2.5. Asenkron motorların tork - hız karakteristiği [25]

2.2.4. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar

Anahtarlamalı relüktans motorlar diğer motor çeşitlerine göre daha basit yapıya sahiptirler. Anahtarlamalı relüktans motorların sadece stator kısmında sargı olup rotor kısmında sargı veya sürekli mıknatıs bulunmamaktadır. Bu yapısı nedeniyle, anahtarlamalı relüktans motorlar, diğer motor çeşitlerine göre daha yüksek tork değerine ulaşabilir ve daha yüksek hızlarda çalışabilirler. Anahtarlamalı relüktans motorlar, stator sargılarına uygulanan akımın relüktansı değiştirilmesi ve bunu uygun olarak rotorun hareket etmesi prensibi ile çalışmaktadır [29, 3]. Anahtarlamalı relüktans motorların bazı avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Güvenli yapı,
- Bakım maliyetinin düşük olması,
- Yüksek hızlarda çalışabilme,
- Hızlı ve kolay soğutulabilme.

Şekil 2.6’da anahtarlamalı relüktans motorun tork - hız karakteristiği verilmiştir [25].



Şekil 2.6. Anahtarlamalı relüktans motorların tork- hız karakteristiği [25]

ARM’ler yapısı gereği sürücü devresiz çalışmazlar ve eğer sürekli mıknatıslı motorlarla kıyaslandığında daha ağır ve büyük boyutlara sahiptirler. Aynı zamanda

özellikle düğühızlarda tork dalgalanması mevcuttur. Anahtarlamalı relüktans motorlar bu dezavantajları nedeniyle elektrikli araç teknolojisinde daha az tercih edilmektedir [30].

2.3.Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Motor Tiplerinin Karşılaştırılması

Günümüzde elektrikli araç sektörüne olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır, bunun petrol rezervlerinin azalması ve çevre kirliliğinin artması gibi bir çok sebebi vardır.

Tablo 2.1’de araç firmalarının elektrikli araç modellerinde tercih ettikleri elektrik motoru çeğileri verilmiştir [10, 31].

Tablo 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan motor çeğileri [10, 31]

Elektrikli Araç	Yıl	Kullanıldığı motor Tipi
Fiat Panda Elettra	1990	DA Motor
Toyota Prius	1997	Sürekli mıknatıslı Senkron Motor
Ford Think City	1999	Çıduksiyon Motor
Fiat Doblo	2000	Çıduksiyon Motor
Tesla Model S	2012	Çıduksiyon Motor
Volkswagen Golf EV	2014	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
Fiat 500 e	2014	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
Tesla Model X	2016	Çıduksiyon Motor
Nissan Leaf	2017	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
Tesla Model 3	2017	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
Chevrolet Bolt EV	2018	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
Ford Focus EV	2018	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Çıduksiyon motorlar, elektrikli araçların tahrik sistemlerinde olgunluğa ulaşmaları, yüksek güvenilirlikli olmaları ve bakım gerektirmemeleri nedeni ile elektrikli araç sektöründe yaygın olarak tercih edilen bir motor çeğidir. Çıduksiyon motorlarına alternatif olarak, manyetik alanı üretmek için sabit mıknatıs kullanmalarından dolayı sabit mıknatıslı senkron motor da umut vermektedir. Bu sayede, daha yüksek verimlilik ve daha yüksek güç yoğunluğu elde edilebilmektedir. Anahtarlamalı relüktans motorları da basit ve sağlam yapıları nedeniyle, elektrikli araçlarda kullanım için potansiyele sahiptir. Bunun yanı sıra Tesla, Ford ve Fiat gibi büyük üretici firmalar kendi elektrikli

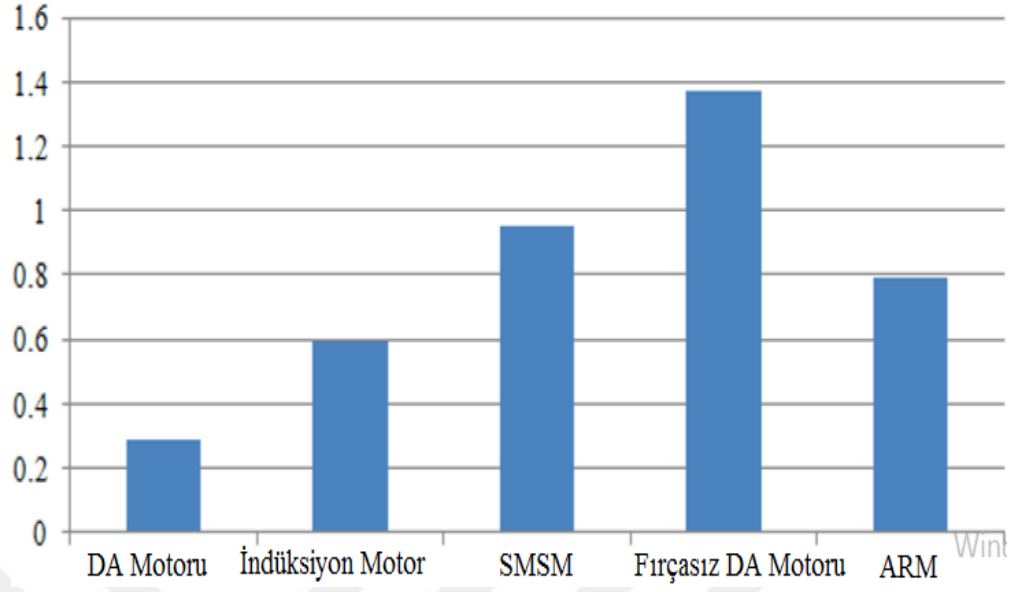
araç modellerinde asenkron motor, Toyota, Nissan ve honda firmaları ise elektrikli araç üretiminde genellikle sürekli mıknatıslı senkron motorlar kullanmaktadırlar [32].

Elektrikli araç teknolojisinde kullanılan motor çeşitleri; verimlilik, yapım maliyeti, menzili, motorun hızı, motorun performansı, motorun sağlamlığı ve güvenilirliği gibi farklı özelliklere göre karşılaştırıldığında elektrikli araç üretici firmaların ne gibi özelliklere göre elektrikli motor çeşitlerini kullandığı anlaşılabılır. Tablo 2.2’de elektrikli araç üretiminde kullanılan motor çeşitlerinin farklı özellikleri karşılaştırılmıştır [32].

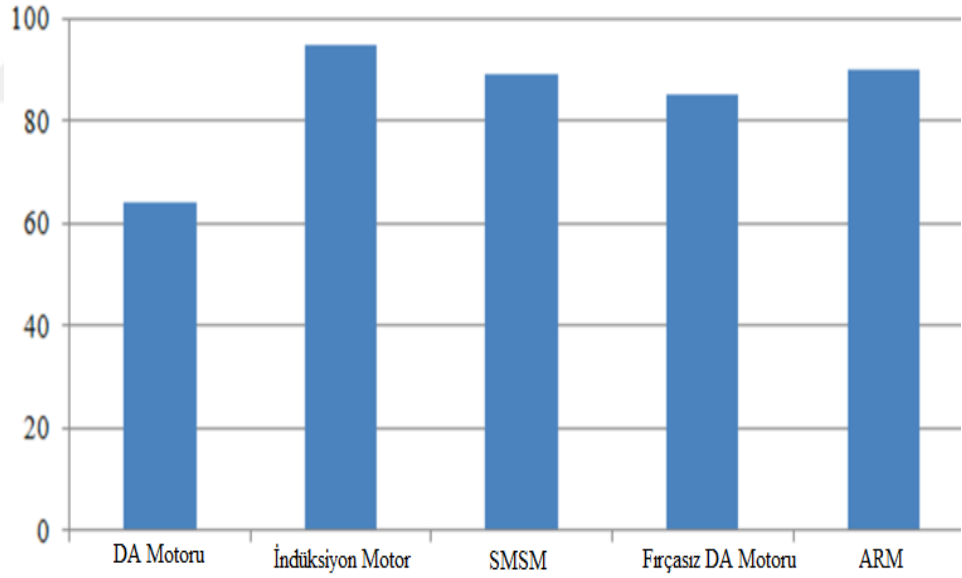
Tablo 2.2. Elektrikli motor çeşitlerinin karşılaştırılması (+ avantaj, - dezavantaj, 0 nötr)[32]

Özellikler	Motor Çeşidi			
	DAM	ASM	SMSM	ARM
Maliyet	0	++	-	+
Tork/Güç Yoğunluğu	-	0	++	0
Verimlilik	-	+	++	+
Kontrol Edilebilirlik	++	+	+	0
Güvenirlik	-	++	+	++
Motor Boyutları/Ağırlık	-	+	++	+
Sağlamlık	0	++	+	++
Gürültü/Titreşim/Moment Dalgalılığı	-	++	++	-
Motor Ömrü	-	++	+	++

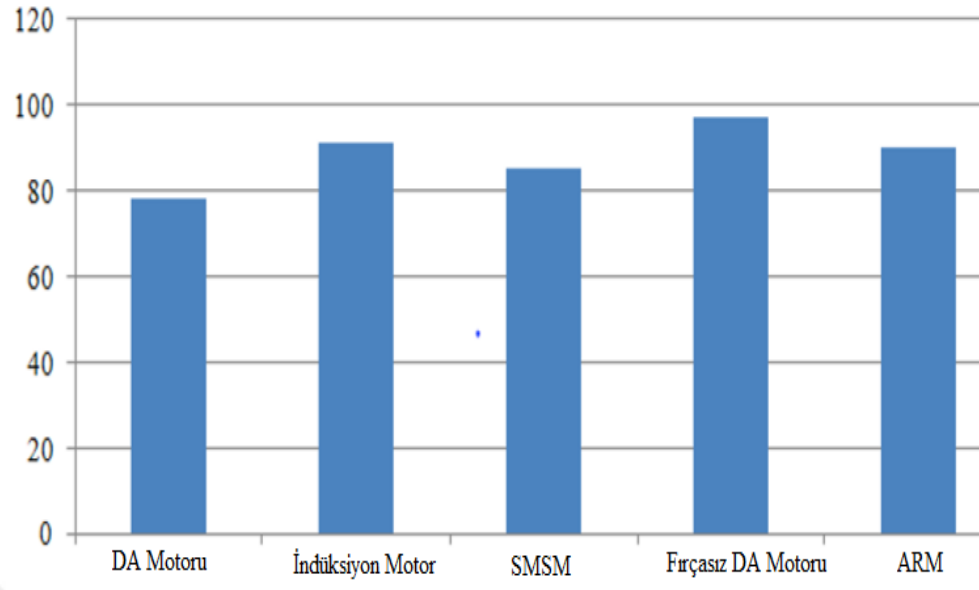
Tablo 2.2' de verilmış motor karşılaştırılmasına bakıldığında, asenkron motor ve sürekli mıknatıslı senkron motor çeşitleri gürültülü çalışma, moment dalgalanma ve verimlilik gibi özellikler bakımından diğer motor çeşitlerinden daha da avantajlı konumda olduğunu görmektedir. Bu kıyaslamalar dışında elektrik motorlarının güç yoğunluğu, güvenilirlik ve verimlilik üzerine karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçları şekil 2.7, 2.8 ve 2.9 da verilmiştir [31].



Şekil 2.7. EA teknolojisinde kullanılan elektrik motorlarının güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması [31]



Şekil 2.8. EA teknolojisinde kullanılan elektrik motorlarının güvenirliğe göre karşılaştırılması [31]



Şekil 2.9. EA teknolojisinde kullanılan elektrik motorlarının verimliliğe göre karşılaştırılması [31]

3. BÖLÜM

SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLAR

3.1.SMSM Literatür Taraması

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, yüksek verimlilik, sesiz çalışma özelliği, motor boyutlarının küçük ve hafif ağırlıklı olması gibi bazı özelliklerinden dolayı elektrikli araç teknolojisinde tercih edilen elektrik motor çeşitlerinden biridir [31, 9].

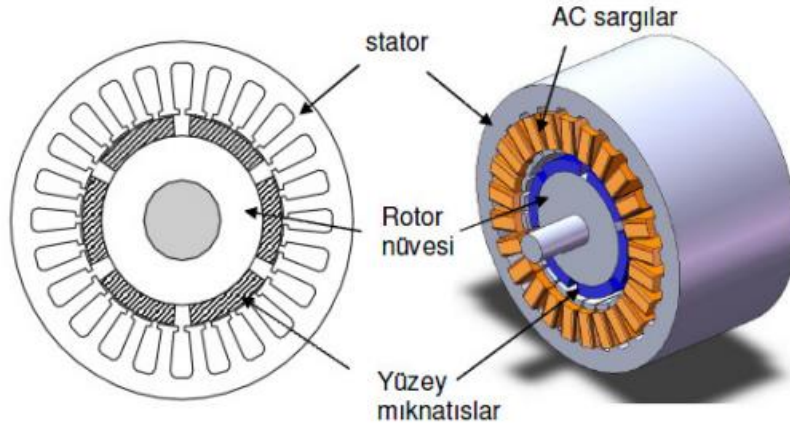
Nissan, Honda, Toyota ve Tesla Motors gibi çok sayıda elektrikli araç üreticisi sürekli mıknatıslı senkron motorları kendi elektrikli araç tahrik sistemlerinde kullanmaktadır. Elektrikli araçların geniş hız - moment aralığında çalışması istendiğinde, yüzey mıknatıslı motor yapıları yerine gömülü mıknatıslı yapıların kullanılması tercih edilmektedir [9, 33].

3.2.SMSM Çeşitleri

SMSM'ler temel olarak yüzey mıknatıslı ve dahili (gömülü) mıknatıslı olmak üzere iki farklı yapıya sahiptir.

3.2.1.Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor

Yüzey mıknatıslı senkron motorlar (YMSM), SMSM'lerde kullanılan mıknatısların geliştirilmesinden sonra en fazla kullanılan motor yapısı olmuştur. Kontrolünün basit olması ve düşük maliyetli yapısından dolayı YMSM'ler elektrikli araç sistemlerinde sıkça tercih edilen bir motor yapısıdır. Şekil 3.1'de yüzey mıknatıslı motor yapısı verilmiştir [34].

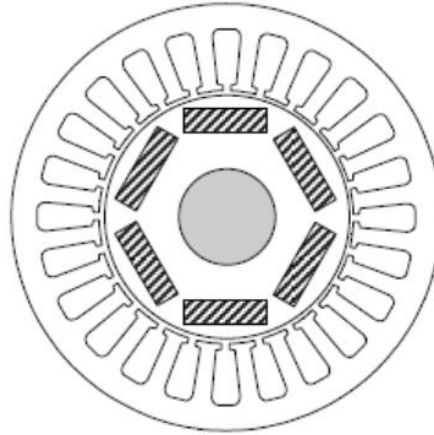


Şekil 3.1. Yüzey mıknatıslı senkron motor yapısı [34]

YMSM'ler, diğer motor yapılarıyla kıyaslandığında daha küçük boyutlara sahip olmaları, yüksek moment üretebilmeleri ve maliyetlerinin düşük olması gibi önemli avantajlara sahiptir. YMSM'lerin dezavantajları ise yüksek hız gerektiren uygulamalarda rotorun yüzeyine monte edilmiş mıknatıslarda mekanik problemlerin ortaya çıkmasıdır. Bu sebepten dolayı YMSM'ler yüksek hız gerektiren uygulamalarda tercih edilmemektedir [34].

3.2.2.Dahili (Gömülü) Mıknatıslı Senkron Motor

Dahili mıknatıslı senkron motor yapısında, rotordaki mıknatıslar içeriye doğru gömülü şekilde yer almaktadır. Dahili mıknatıslı senkron motorların bazı avantajları, daha sağlam bir yapıda olmaları, titreşim ve gürültü seviyelerinin düşük olması ve yüksek hız gerektiren uygulamalarda etkin olarak kullanılabilmesidir. Bu tip yapıya sahip olan motorların dezavantajları ise rotor yapısının karmaşık olmasından dolayı üretim maliyetinin yüksek olması ve kontrol edilmesinin zor olmasıdır [34]. Şekil 3.2'de gömülü mıknatıslı bir motor yapısı verilmiştir [34].



Şekil 3.2. Gömülü mıknatıslı motor yapısı [34]

Yüzey mıknatıslı motor yapısına göre, bu motor yapılarının en büyük üstünlüğü tasarımı daha az mıknatıs kullanımı ile istenilen güç seviyesine ulaşılmasıdır. Tablo 3.1’de SMSM yapılarının bazı özelliklere göre karşılaştırılması verilmiştir [35, 36].

Tablo 3.1. SMSM yapılarının karşılaştırılması [35, 36]

Motor Yapısı	Yüzey Mıknatıslı Motorlar	Dahili Mıknatıslı Motorlar
Çeşit	Fırçasız DA veya SMSM	SMSM
Akı Dağılımı	Kare/ Sinüzoidal	Sinüzoidal
Eddy Kayıpları	Yüksek	Düşük
Hız limiti	$1.2 \times \omega_R$	$3 \times \omega_R$
Relüktans Momenti	Yok	Var
Yüksek Hızlara Uygunluk	Yok (önlem alınmaz ise)	Var
Motor Kontrolü	Nispeten kolay	Karmaşık
Rotor Yapısı	Basit	Karmaşık

3.3. Elektrik Araç Üreticileri Tarafından Kullanılan SMSM Çeşitleri

Günümüzde sürekli mıknatıslı senkron motorlar, birçok araç üreticisi tarafından tercih edilmektedir. Tablo 3.2’de bazı elektrikli araç üretici firmaların sürekli mıknatıslı senkron motor kullanarak ürettiği elektrikli araç modelleri ve bu araçların bazı temel özellikleri verilmiştir [5, 15].

Tablo 3.2. SMSM kullanılan bazı elektrikli araçlar [5, 15]

Üretici	Honda EV plus	Nissan Hypermini	Nissan Altra EV	Daihatsu Hijet EV	Tesla Model 3
Motor Çeşidi	SMSM	SMSM	SMSM	SMSM	SMSM
Batarya tipi	NiMH	Li-İyon	Li-İyon	NiMH	Li-İyon
Güç (kW)	49	24	62	43	250
Hız (km/h)	129	100	120	100	210
Menzil (km)	190	115	190	100	340
Satış Fiyatı (\$)	20000	36000	31670	23990	35000

Sadece Tablo 3.2’de verilen firmalar değil birçok araç üreticisi kendi elektrikli araç tahrik sistemlerinde SMSM kullanmaktadır. Chevrolet firmasının ürettiği Chevrolet Bolt model elektrikli aracın motoru 2016’da GM firması tarafından geliştirilmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak normal yapı ile yeni uygulanacak olan yapı arasında moment ve hız değerlerine göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunun ardından çok damarlı iletken yerine, iletkenler kullanılmaya bağlanmıştır. Bu sayede oluk doluluk oranının da yükseltilmesi sağlanmıştır. Elektrik motorunun stator kısmında ise, stator oluklarında iki parça yalıtım malzemesi kullanılarak stator yapısı basitleştirilmiştir. Stator kısmında olan açıklıkların, uzantıları ve yerleşme konumları farklı şekillerde tasarlanarak, moment dalgalanması ve radyal kuvvetler minimum değerlerine indirilmiştir. SMSM’nin rotor kısmında ise V tipli yapının kullanıldığı görülmektedir. Chevrolet Bolt model elektrikli araçta kullanılan bu motor yapısı sayesinde, aynı firmanın Chevrolet Spark model elektrikli aracıyla kıyaslandığında tasarımda % 30 daha az mıknatıs kullanılmış ve daha küçük ölçülerde motor üretilebilmiştir. Chevrolet Bolt modelinde kullanılan motor, maksimum 200 bg güç ve 360 Nm maksimum tork sağlayabilmektedir. Bu elektrikli aracın ulaştığı maksimum menzil 383 km ve maksimum hız 150 km/s değerlerindedir [32].

Nissan firmasının ürettiği 2013 model Nissan Leaf elektrikli aracında daha önceki 2011 model elektrikli aracında kullanılan elektrik motora göre birçok iyileştirme yapılmıştır. Yeni motor yapısında U tipi mıknatıs kullanılarak motor yapısının boyutları küçültülmüştür. Tasarımda kullanılan malzeme maliyeti ve elektrik motorunun kütlesi azaltılmıştır. Bu çalışmada dışında motorun bağlantı kutusu kısmı da kolay

soğutulabilmesi için, motorun dış gövdesine yakın şekilde konumlandırılmıştır. Ayrıca motorun gürültü seviyesinin minuma indirilmesi doğrultusunda çalışmalar yapılmıştır. Nissan Leaf modelinde kullanılan motor, maksimum 150 bg güç ve 320 Nm maksimum tork sağlayabilmektedir. Bu elektrikli aracın ulaştığı maksimum menzil 378 km ve maksimum hız 144 km/s değerlerindedir [32].

Elektrikli araçlar hususunda önemli başarılar elde eden Tesla Motors firmasının ürettiği olduğu Tesla Model 3 elektrikli aracın tahrik sisteminde kullanılan elektrik motoru da SMSM'dir. Tesla Model 3 elektrikli aracında üç fazlı, altı kutuplu ve gömülü sabit mıknatıslı senkron motor yapısı kullanılmıştır. Tesla Model 3 modelinde kullanılan motor, maksimum 340 bg güç ve 350 Nm maksimum tork sağlayabilmektedir. Bu elektrikli aracın ulaştığı maksimum menzil 354 km ve maksimum hız 209 km/s değerlerindedir [37, 38].

Farklı elektrikli araç üretici firmalar tarafından araçlarında kullandıkları SMSM'lere ait farklı rotor yapıları şekil 3.3'te gösterilmiştir [32].



Şekil 3.3. Marka, model ve yıllara göre elektrikli araçlarda kullanılan rotor laminasyonları [32]

4. BÖLÜM

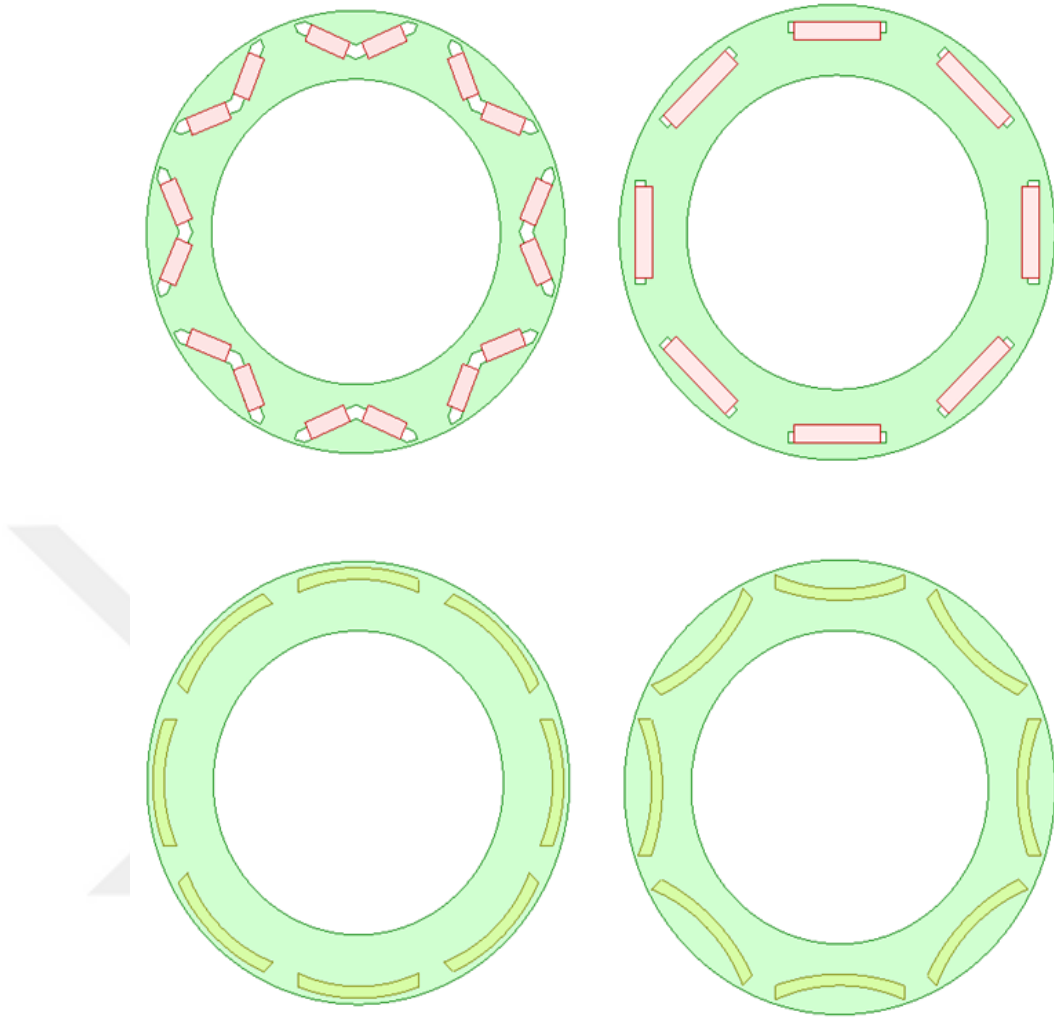
SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

Bu çalışmada Toyota firmasının ürettiği 2004 model Prius aracında kullanıldığı olduğu SMSM'nin ANSYS Maxwell programı ile analizi yapılmış ve bu referans motor tasarımı temel alınarak farklı motor tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu hususta rotor yapısında yer alan sürekli mıknatısın yeri ve geometrisi dikkate alınarak değişiklikler yapılmış ve her yeni geometri için ANSYS Maxwell programı vasıtasıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Referans alınan Toyota Prius 2004 modeline ait motor yapısının sahip olduğu özellikler ve rotor geometrisinin sahip olduğu karakteristikler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Toyota prius 2004 modelinde kullanılan SMSM'ye ait temel parametreler

Rotor Dış Çapı (mm)	160.4
Rotor İç Çapı (mm)	110.64
Kutup Sayısı (P)	8
Sabit Mıknatısların Sınırlı Çapı (mm)	157.44
Kanal Tabanından göğüt Yüzeyine Olan Mesafe (mm)	7.28
Kanal Kalınlığı (mm)	4.7
Kanal Geniçliği (mm)	14
Kanal Yüksekliği (mm)	3
Mıknatıslar Arasındaki Minimum Mesafe (mm)	4.5

Referans alınan motor yapısı içerisindeki sürekli mıknatısların yeri ve göğütli değıştirilerek, ANSYS Maxwell programı vasıtasıyla yapılmış motor yapıları temel hatları ile göğüt 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tasarlanan sürekli mıknatıslı senkron motor yapıları

Şekil 4.1'de verilen motor yapılarına bakıldığında, referans alınmış motor yapısında olan V tipli sürekli mıknatısların yerine tek mıknatıslı rotor yapısı kullanılarak yapılmış motor tasarımları görülmektedir.

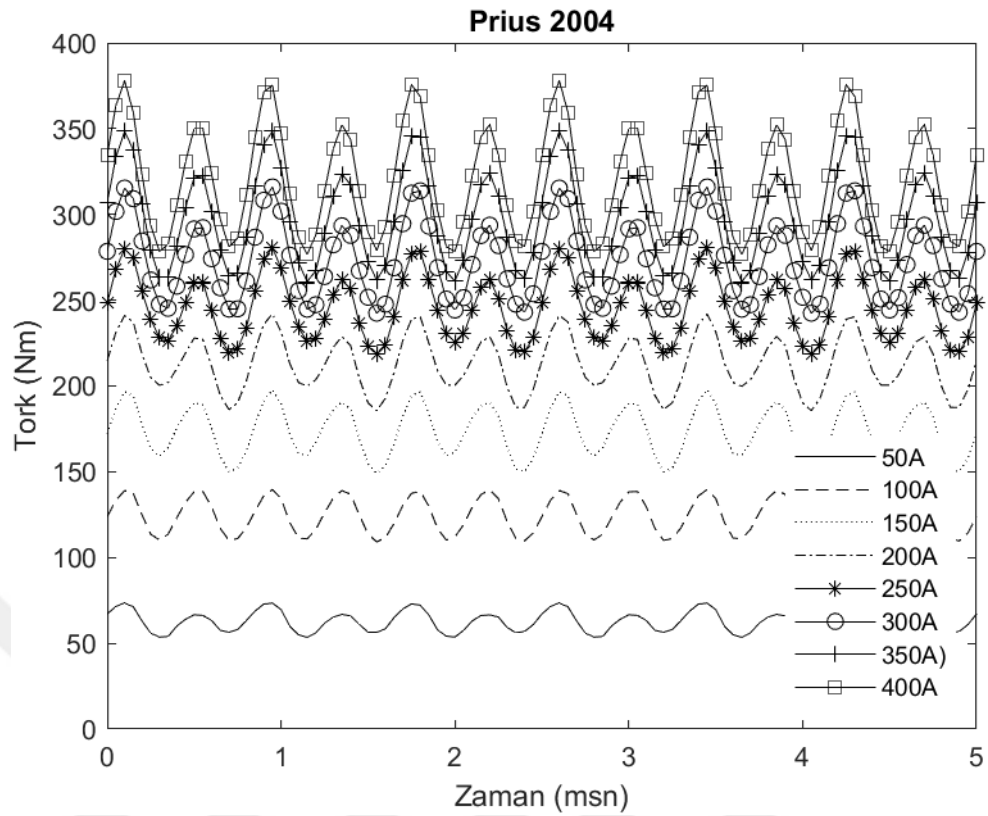
Tasarımı yapılmış bir motor geometrisi ile referans alınmış prius 2004 IPM motor geometrisinin temel parametrelerinin karşılaştırılması Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Tasarlanan IPM motorlar ile Prius 2004 IPM motorunun temel tasarım parametrelerinin karşılaştırılması

Parametreler	Mıknatıs Çeşidi	Sabit Mıknatısların Sınırlı Çapı (mm)	Kanal Kalınlığı (mm)	Mıknatıslar Arasındaki Minimum Mesafe (mm)	Kanal Tabanından ğaft Yüzeyine Olan Mesafe (mm)
Modeller					
Prius 2004	V Tipi 2 Mıknatıs	157.44	4.7	4.5	7.28
Model-1	Tek Mıknatıs	159	4	3	17
Model-2	Tek Mıknatıs	159.5	4	3	18
Model-3	Tek Mıknatıs	157.8	4	4	16.9
Model-4	Tek Mıknatıs	158.9	4.2	4.5	16.8
Model-5	Tek Mıknatıs	159.6	4.4	4.5	17.4
Model-6	Tek Mıknatıs	160	4.5	4.5	17.8
Model-7	Tek Mıknatıs	158.5	5	10.3	19.6
Model-8	Tek Mıknatıs	155.9	5	3.8	22.6
Model-9	Tek Mıknatıs	157.5	5	12.4	24.4
Model-10	Tek Mıknatıs	156.3	5	6	18.9
Model-11	V Tipi 2 Mıknatıs	159.5	4.7	4.5	8.5

Tablo 4.2'den görüldüğü gibi referans alınmış motor yapısında, mıknatıslar arasındaki minimum mesafe, kanal kalınlığı ve sabit mıknatısların sınırlı çapı gibi parametreler değiştirilerek daha optimum motor geometrileri elde edilmeye çalışılmıştır. Referans alınmış motor yapısında bu parametrelerin değiştirilerek farklı geometrili motorların tasarımının yapılmasında, tork dalgalılık oranı ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Öncelikle referans alınmış olan 2004 model Prius aracında kullanılan motor için ANSYS Maxwell programı kullanılarak yapılmış simülasyonlara göre elde edilen tork grafikleri şekil 4.2'de ve bu değerlerin karşılaştırılması ise Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2. Prius 2004 IPM motora ait tork grafiği

Tablo 4.3. Prius 2004 modeli için simülasyon sonuçları

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			Tork Dalgallılık-Prius (%)
	T_{Min}	T_{Maks}	T_{Ort}	
50	53.5	73.6	62.7	15.79
100	109.1	139.7	124.3	12.26
150	149.0	197.8	173.7	14.07
200	185.6	242.1	213.0	13.19
250	218.6	280.7	245.4	12.41
300	242.5	316.1	273.2	13.18
350	260.8	348.5	298.0	14.39
400	276.7	377.9	320.5	15.46

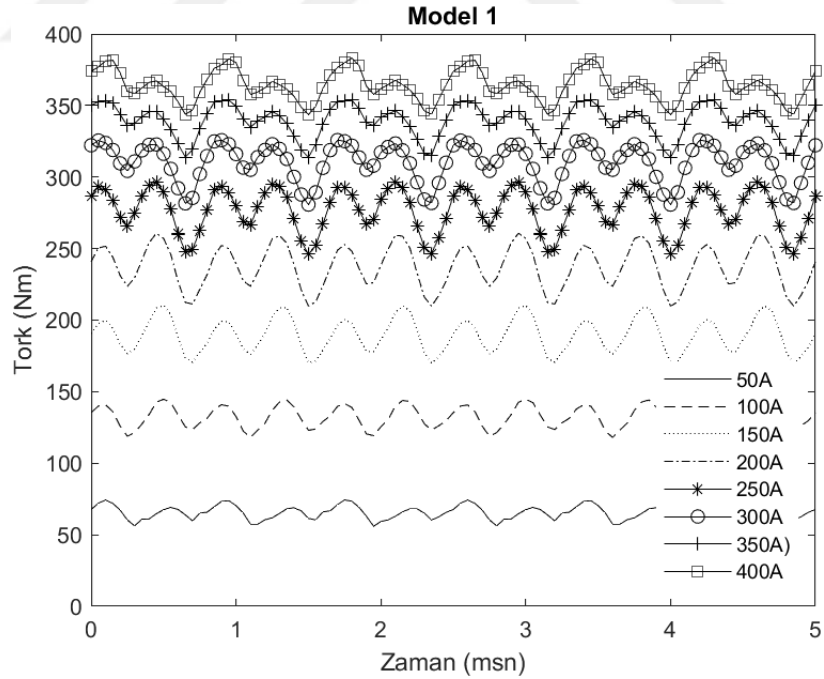
Tablo 4.3'te verilmiş değerlerde tork dalgalanma değeri (% r) Eşlik 4.1 ile verilen matematiksel ifade vasıtasıyla hesaplanmaktadır.

$$\% \text{ Tork Dalgallılık } (\% r) = \frac{T_{Max} - T_{Min}}{T_{Max} + T_{Min}} \times 100 \quad (4.1)$$

Referans motor baz alınarak tasarlanamıģ olan üç temel yapı ve bu üç yapıya bağılı türetilmiģ çok sayıda motor yapısında, mıknatıs hacmi aynı kalmakla birlikte rotor geometrilerinin ve mıknatısların yerleşim Ğekilleri deęiřtirilmiģtir. Maxwell üzerinde tasarlanmıģ MSM'ler arasında en iyi 11 tanesi seçilerek 50-400 A arasındaki akım değerleri için yapılmıģ simülasyon sonuçları her bir motor için Ğekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13'te gösterilmiģtir. Elde edilen değerler ile referans motora ait sonuçların karşılaştırılması ise Tablo 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 ve 4.14'de verilmiģtir.

Referans alınmıģ Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmıģ olan Model - 1 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürölmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiģtir.

Model - 1 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmıģ simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği Ğekil 4.3'te verilmiģtir.



Şekil 4.3. Model-1 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmıģ Model - 1 motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmıģ simülasyon sonuçları ile,

referans alınmış Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalanma değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.4'te verilmiştir.

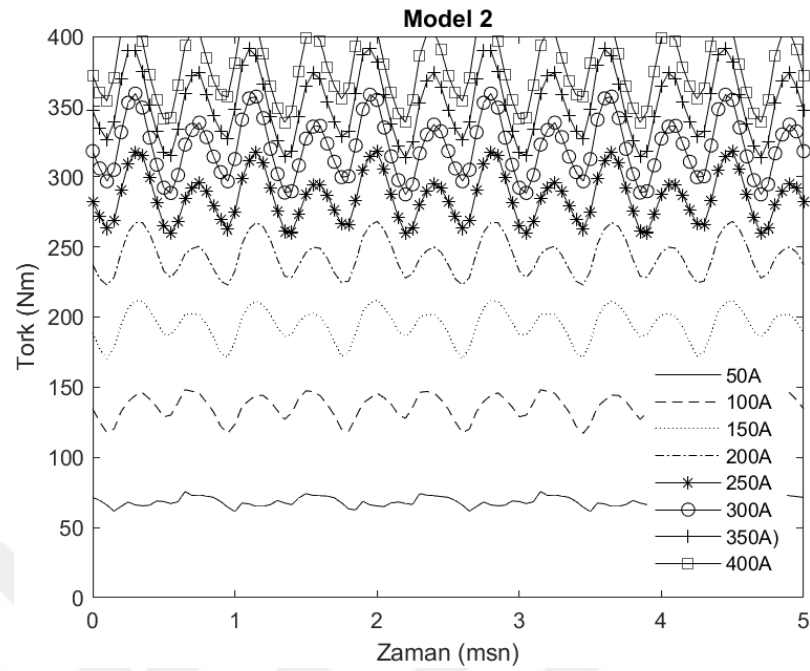
Tablo 4.4. Model-1 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-1			Tork Dalgallık- Prius (%)	Tork Dalgallık Model-1 (%)	Tork Dalgallık ÇiileÇme Oranı (%)	Torkta ÇiileÇme Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	56.0	74.4	65.5	15.79	14.14	10.44	4.50
100	109.1	139.7	124.3	118.1	144.8	132.3	12.26	10.16	17.11	6.43
150	149.0	197.8	173.7	169.9	210.3	189.7	14.07	10.63	24.43	9.19
200	185.6	242.1	213.0	209.8	260.8	237.3	13.19	10.82	17.96	11.43
250	218.6	280.7	245.4	246.1	296.4	276.9	12.41	9.27	25.33	12.86
300	242.5	316.1	273.2	280.8	325.8	310.3	13.18	7.42	43.68	13.57
350	260.8	348.5	298.0	313.8	353.7	339.0	14.39	5.98	58.43	13.77
400	276.7	377.9	320.5	343.6	383.2	364.2	15.46	5.45	64.72	13.65

Tablo 4.4'te verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde Model-1 IPM için tork dalgalılık iyileÇme oranının % 64.72 civarında ve tork iyileÇme oranının % 13.77 civarında olduğu görölmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 2 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düğütürölmesi ve tork değerinin iyileÇtirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 2 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği ġekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Model-2 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmıştır. Model - 2 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmıştır. Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalanma değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.5'te verilmiştir.

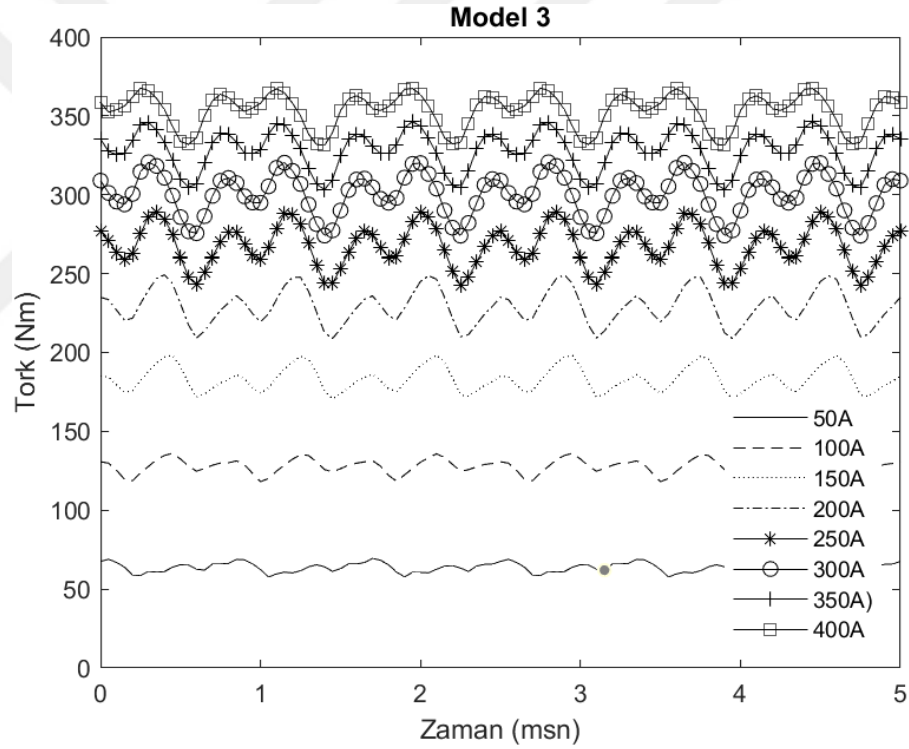
Tablo 4.5. Model-2 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-2			Tork Dalgalılık- Prius (%)	Tork Dalgalılık Model-2 (%)	Tork Dalgalılık ÇiileÇiine Oranı (%)	Torkta ÇiileÇiine Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	61.3	75.7	68.5	15.79	9.1	42.3	9.25
100	109.1	139.7	124.3	117.2	148.2	132.7	12.26	12.1	1.3	6.7
150	149.0	197.8	173.7	170.3	211.9	191.1	14.07	10.8	23.24	10.01
200	185.6	242.1	213.0	222.7	268.2	245.4	13.19	9.2	30.25	15.23
250	218.6	280.7	245.4	259.7	317.9	288.8	12.41	10	19.41	17.68
300	242.5	316.1	273.2	287.4	359.2	323.3	13.18	11.1	15.78	18.33
350	260.8	348.5	298.0	313.5	391.3	352.4	14.39	11	23.55	18.25
400	276.7	377.9	320.5	338.6	418.5	378.5	15.46	10.5	32.08	18.09

Tablo 4.5'te verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-2 IPM için tork dalgalılık iyileştirme oranının % 42.3 civarında ve tork iyileştirme oranının % 18.33 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 3 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 3 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Model-3 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmış Model - 3 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmış Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalanma değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.6'da verilmiştir.

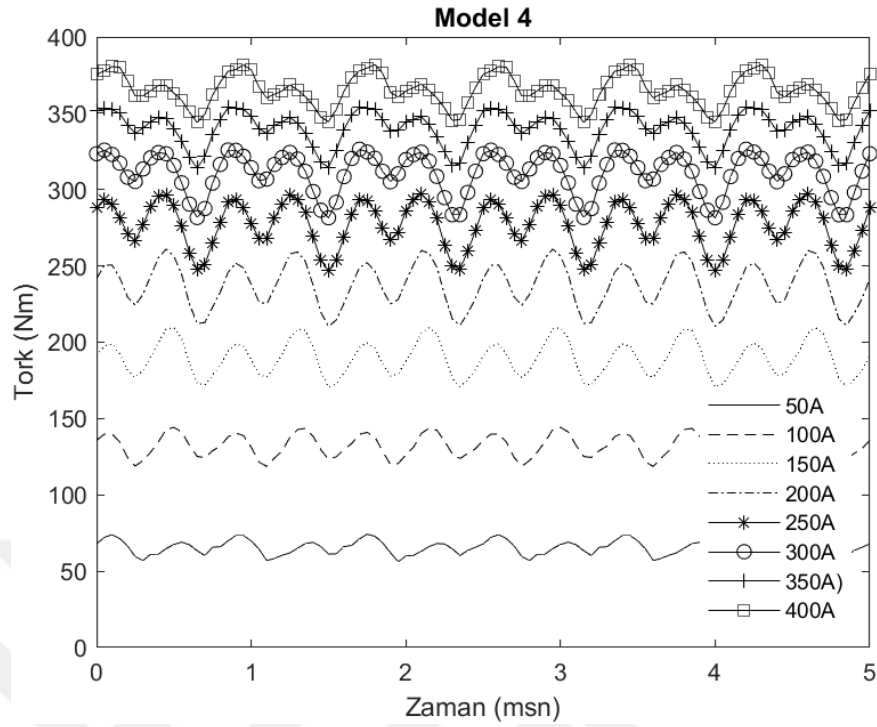
Tablo 4.6. Model-3 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-3			Tork Dalgallık- Prius (%)	Tork Dalgallık Model-3 (%)	Tork Dalgallık İyileşme Oranı (%)	Torkta İyileşme Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	57.7	69.5	63.6	15.79	9.27	41.29	1.43
100	109.1	139.7	124.3	118.1	136.1	127.1	12.26	7.08	42.25	2.25
150	149.0	197.8	173.7	170.7	198.3	184.5	14.07	7.47	46.93	6.21
200	185.6	242.1	213.0	209.2	249.2	229.2	13.19	8.72	33.88	7.6
250	218.6	280.7	245.4	242.6	289.2	265.9	12.41	8.76	29.41	8.35
300	242.5	316.1	273.2	274.1	320.6	297.4	13.18	7.8	40.81	8.83
350	260.8	348.5	298.0	304.4	346.4	325.4	14.39	6.45	55.17	9.19
400	276.7	377.9	320.5	331.3	367.4	349.4	15.46	5.16	66.62	9

Tablo 4.6'da verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-3 IPM için tork dalgallık iyileşme oranının % 66.62 civarında ve tork iyileşme oranının % 9.19 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 4 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 4 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Model-4 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmıştır. Model - 4 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmıştır. Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşili yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.7’de verilmiştir.

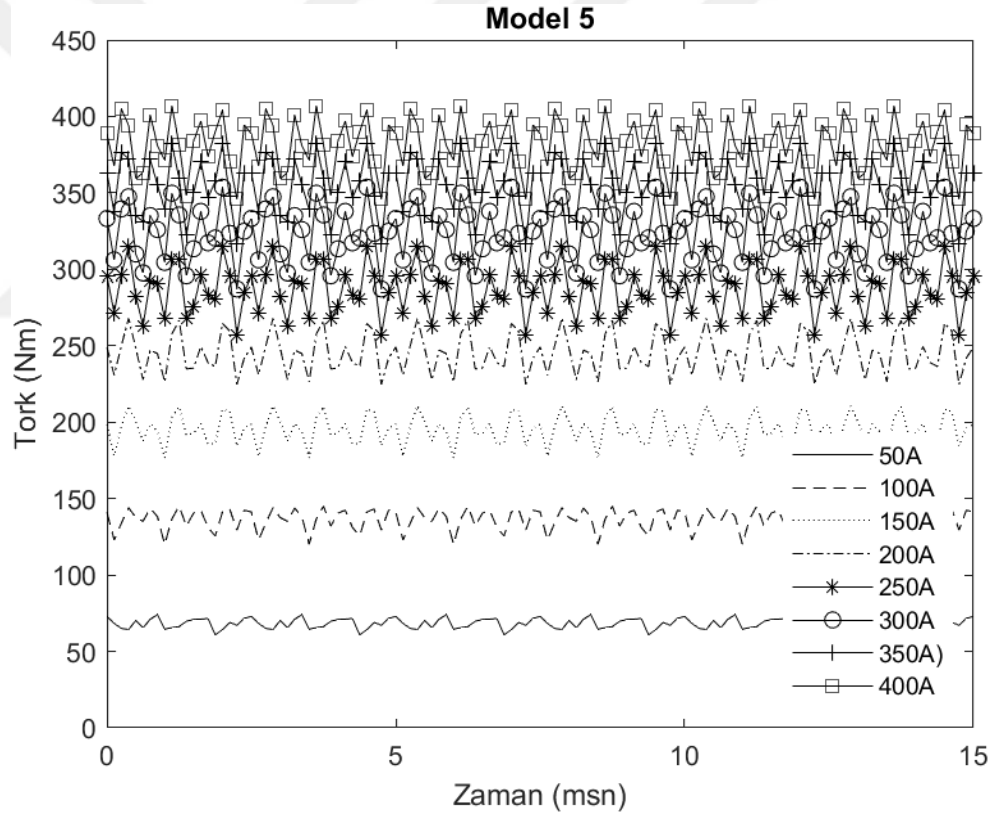
Tablo 4.7. Model-4 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-4			Tork Dalgalılık- Prius (%)	Tork Dalgalılık Model-4 (%)	Tork Dalgalılık ÇileÇne Oranı (%)	Torkta ÇileÇne Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	56.2	74.2	65.2	15.79	13.8	12.6	3.98
100	109.1	139.7	124.3	118.7	143.6	131.1	12.26	9.49	22.59	5.47
150	149.0	197.8	173.7	170.6	209.6	190.1	14.07	10.25	27.14	9.44
200	185.6	242.1	213.0	210.3	261	235.6	13.19	10.75	18.49	10.61
250	218.6	280.7	245.4	246.8	297.2	272	12.41	9.26	25.4	10.83
300	242.5	316.1	273.2	281.5	326.4	303.9	13.18	7.38	44	11.23
350	260.8	348.5	298.0	314	353.8	333.9	14.39	5.95	58.65	12.04
400	276.7	377.9	320.5	344	381.9	362.9	15.46	5.22	66.23	13.22

Tablo 4.7'de verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-4 IPM için tork dalgalılık iyileştirme oranının % 66.23 civarında ve tork iyileştirme oranının % 13.22 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 5 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 5 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Model-5 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmış Model - 5 motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmış Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşili yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.8'de verilmiştir.

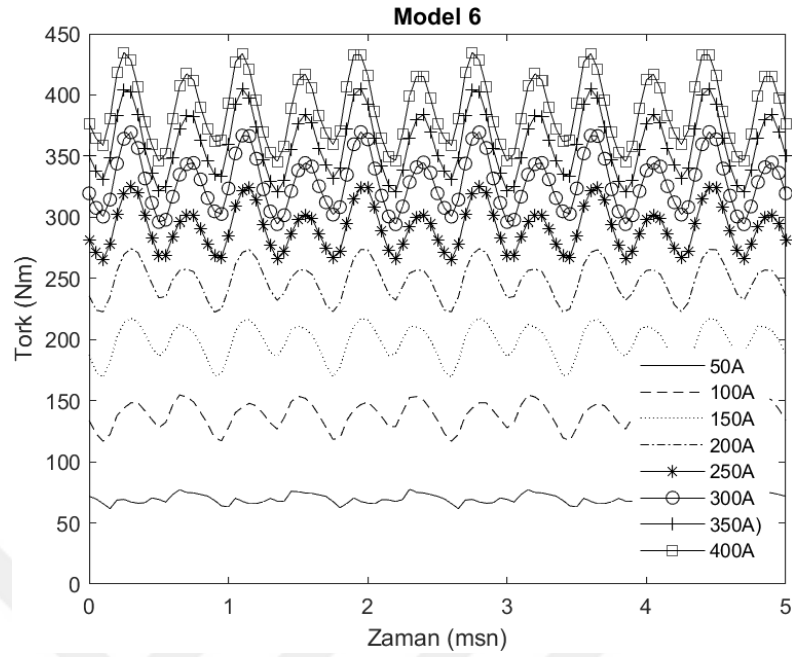
Tablo 4.8. Model-5 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-5			Tork Dalgallık- Prius (%)	Tork Dalgallık Model-5 (%)	Tork Dalgallık İyileşme Oranı (%)	Torkta İyileşme Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	60.8	74	67.4	15.79	9.79	37.99	7.49
100	109.1	139.7	124.3	120	145.1	132.6	12.26	9.46	22.83	6.63
150	149.0	197.8	173.7	176.6	210.6	193.6	14.07	8.78	37.59	11.45
200	185.6	242.1	213.0	224.6	268	246.3	13.19	8.81	33.2	15.63
250	218.6	280.7	245.4	257.1	315	286.1	12.41	10.12	18.45	16.56
300	242.5	316.1	273.2	287.1	353.7	320.4	13.18	10.39	21.16	17.27
350	260.8	348.5	298.0	316.8	382	349.4	14.39	9.33	35.16	17.24
400	276.7	377.9	320.5	345.9	406.9	376.4	15.46	8.1	47.6	17.44

Tablo 4.8'de verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-5 IPM için tork dalgallık iyileşme oranının % 47.6 civarında ve tork iyileşme oranının % 17.44 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 6 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 6 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Model-6 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmıştır Model - 6 motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmıştır Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.9’da verilmiştir.

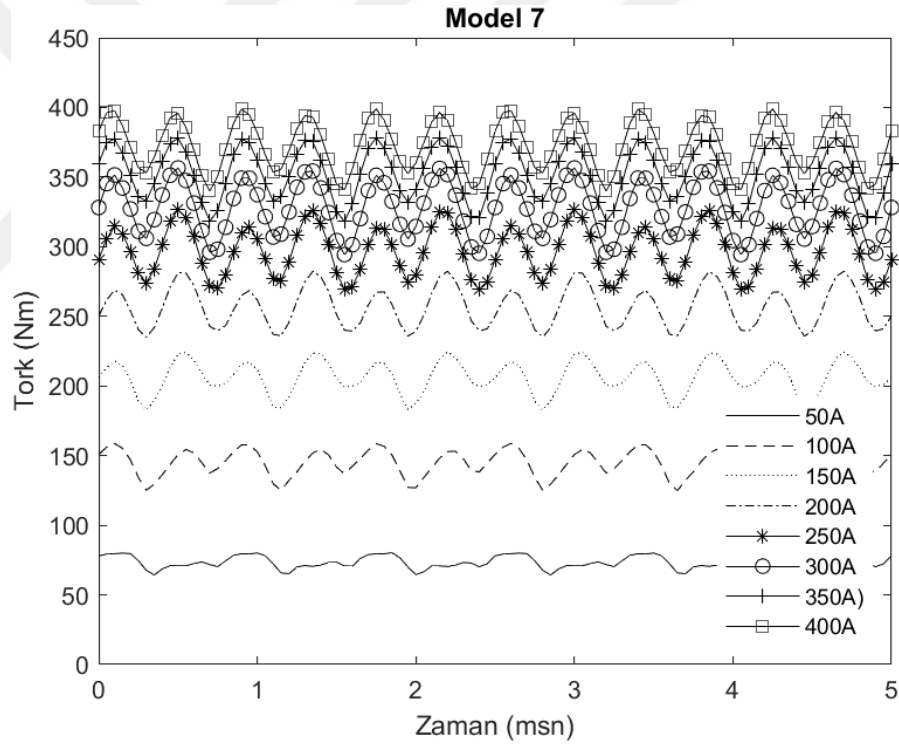
Tablo 4.9 Model-6 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-6			Tork Dalgalılık- Prius (%)	Tork Dalgalılık Model-6 (%)	Tork Dalgalılık ÇiyleÇiğne Oranı (%)	Torkta ÇiyleÇiğne Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	61.7	77.7	69.7	15.79	11.47	27.35	11.16
100	109.1	139.7	124.3	116.8	154.7	135.7	12.26	13.96	13.86	9.17
150	149.0	197.8	173.7	169.2	217.5	193.3	14.07	12.49	11.22	11.28
200	185.6	242.1	213.0	222.3	274.3	248.3	13.19	10.47	20.62	16.57
250	218.6	280.7	245.4	265.5	325	295.2	12.41	10.07	18.85	20.31
300	242.5	316.1	273.2	294.2	369.6	331.9	13.18	11.35	13.88	21.48
350	260.8	348.5	298.0	320.5	405.3	362.9	14.39	11.68	18.83	21.77
400	276.7	377.9	320.5	345.4	434.8	390.1	15.46	11.45	25.93	21.71

Tablo 4.9'da verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-6 IPM için tork dalgalılık iyileştirme oranının % 27.5 civarında ve tork iyileştirme oranının % 21.77 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 7 ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 7 motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği şekil 4.9'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Model-7 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmış Model - 7 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmış Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.10'da verilmiştir.

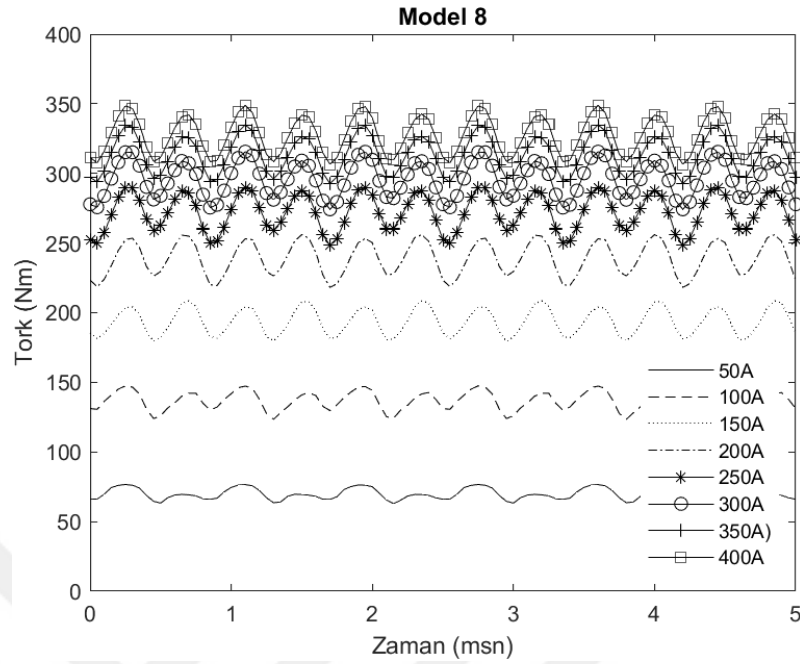
Tablo 4.10. Model-7 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-7			Tork Dalgallık- Prius (%)	Tork Dalgallık Model-7 (%)	Tork Dalgallık İyileşme Oranı (%)	Torkta İyileşme Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	64.3	80.3	72.3	15.79	11.06	29.95	15.31
100	109.1	139.7	124.3	124.9	158.7	141.8	12.26	11.91	2.85	14.07
150	149.0	197.8	173.7	182.6	224.3	203.4	14.07	10.24	27.22	17.12
200	185.6	242.1	213.0	235	282.4	258.7	13.19	9.16	30.55	21.45
250	218.6	280.7	245.4	269.1	326.7	297.9	12.41	9.66	22.15	21.39
300	242.5	316.1	273.2	294.4	356.5	325.4	13.18	9.54	27.61	19.12
350	260.8	348.5	298.0	317.9	378.3	348.1	14.39	8.67	39.74	16.81
400	276.7	377.9	320.5	339.8	399	369.4	15.46	8.01	48.18	15.25

Tablo 4.10'da verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-7 IPM için tork dalgallık iyileşme oranının % 48.18 civarında ve tork iyileşme oranının % 21.45 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 8 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 8 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Model-8 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmıştır. Model - 8 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmıştır. Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.11’de verilmiştir.

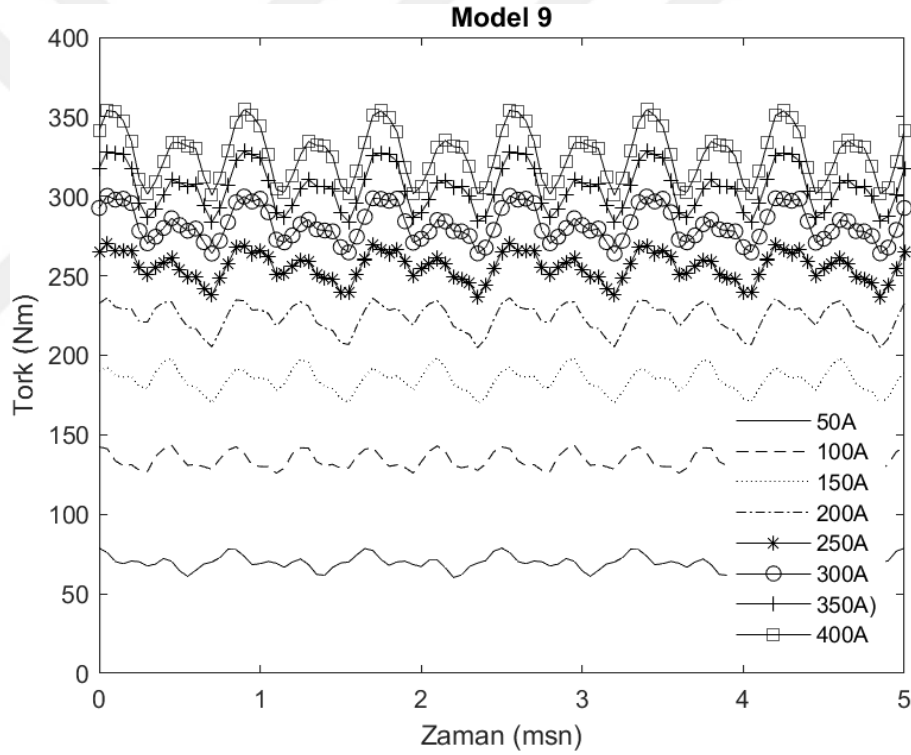
Tablo 4.11. Model-8 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-8			Tork Dalgalılık- Prius (%)	Tork Dalgalılık Model-8 (%)	Tork Dalgalılık ÇiileÇiine Oranı (%)	Torkta ÇiileÇiine Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	62.9	76.6	69.75	15.79	9.82	37.8	11.24
100	109.1	139.7	124.3	123.4	147.4	135.4	12.26	8.86	27.73	8.93
150	149.0	197.8	173.7	179.4	208.6	194	14.07	7.52	46.55	11.68
200	185.6	242.1	213.0	218.1	256.1	237.1	13.19	8.01	39.27	11.31
250	218.6	280.7	245.4	248.4	289.9	269.2	12.41	7.7	37.95	9.67
300	242.5	316.1	273.2	274.2	315.6	294.9	13.18	7.01	46.81	7.94
350	260.8	348.5	298.0	292.6	334.9	313.8	14.39	6.66	53.71	5.28
400	276.7	377.9	320.5	306.5	348.8	327.6	15.46	6.45	58.27	2.23

Tablo 4.11'de verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-8 IPM için tork dalgalılık iyileştirme oranının % 58.27 civarında ve tork iyileştirme oranının % 11.68 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 9 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 9 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Model-9 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmış Model - 9 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmış Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.12'de verilmiştir.

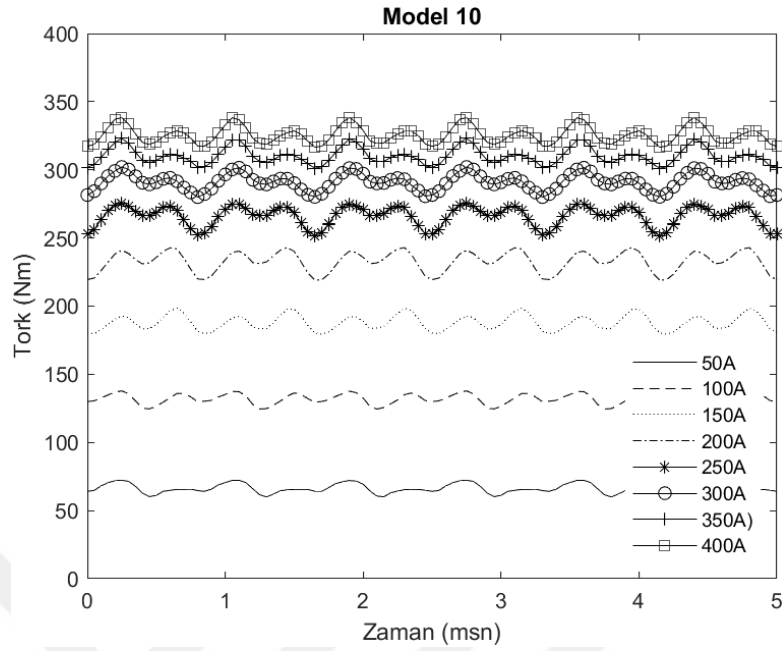
Tablo 4.12. Model-9 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-9			Tork Dalgallık- Prius (%)	Tork Dalgallık Model-9 (%)	Tork Dalgallık İyileşme Oranı (%)	Torkta İyileşme Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	60.3	78.8	69.55	15.79	13.29	15.83	10.92
100	109.1	139.7	124.3	125.9	143.5	134.7	12.26	6.53	46.73	8.36
150	149.0	197.8	173.7	170	198.5	184.2	14.07	7.73	45.06	6.07
200	185.6	242.1	213.0	204.8	236.2	220.5	13.19	7.12	46.01	3.52
250	218.6	280.7	245.4	236.8	270.2	253.5	12.41	6.58	46.97	3.3
300	242.5	316.1	273.2	264	300.3	282.2	13.18	6.43	51.21	3.27
350	260.8	348.5	298.0	283.7	328.3	306	14.39	7.28	49.4	2.68
400	276.7	377.9	320.5	300.8	354.6	327.7	15.46	8.2	46.95	2.24

Tablo 4.12'de verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model - 9 IPM için tork dalgallık iyileşme oranının % 51.21 civarında ve tork iyileşme oranının % 10.92 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 10 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 10 IPM motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Model-10 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmıştır. Model - 10 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmış Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.13'te verilmiştir.

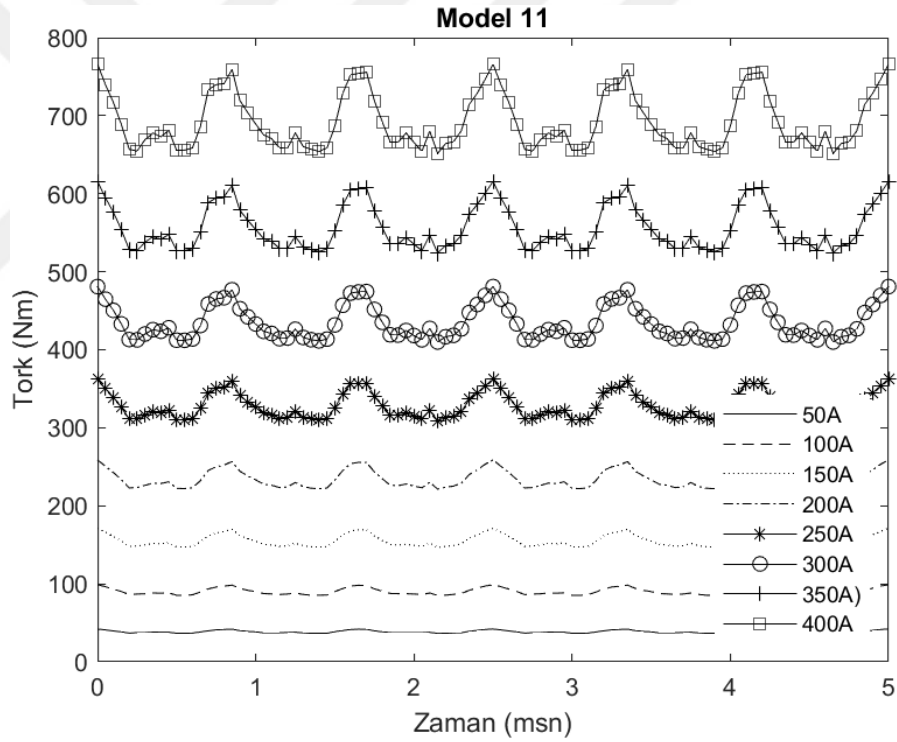
Tablo 4.13. Model-10 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-10			Tork Dalgalılık- Prius (%)	Tork Dalgalılık Model-10 (%)	Tork Dalgalılık ÇiileÇiine Oranı (%)	Torkta ÇiileÇiine Oranı (%)
	T_{Min}	T_{Maks}	T_{Ort}	T_{Min}	T_{Maks}	T_{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	59.9	72.3	66.1	15.79	9.37	40.65	5.42
100	109.1	139.7	124.3	124.5	137.8	131.2	12.26	5.07	58.64	5.51
150	149.0	197.8	173.7	179.8	198.6	189.2	14.07	4.96	64.74	8.92
200	185.6	242.1	213.0	219	243	231	13.19	5.19	60.65	8.45
250	218.6	280.7	245.4	251.7	275.4	263.6	12.41	4.49	63.81	7.39
300	242.5	316.1	273.2	280	302.1	291.1	13.18	3.79	71.24	6.53
350	260.8	348.5	298.0	301.2	323	312.1	14.39	3.49	75.74	4.73
400	276.7	377.9	320.5	316.7	338.4	327.6	15.46	3.31	78.58	2.19

Tablo 4.13'te verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model - 10 IPM için tork dalgalılık iyileştirme oranının % 78.58 civarında ve tork iyileştirme oranının % 8.92 civarında olduğu görülmektedir.

Referans alınmış Prius 2004 motoru üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak tasarlanmış olan Model - 11 IPM ismi verilen motor yapısı için tork dalgalanma değerinin düşürülmesi ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Model - 11 motor tasarımında tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçlarından elde edilen değerleri yansıtan tork grafiği şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Model-11 IPM motora ait tork grafiği

Tek mıknatıslı rotor geometrisi kullanılarak tasarlanmış Model - 11 IPM motoru için tepe değeri 50 - 400 A arasında olan akım değerleri için yapılmış simülasyon sonuçları ile, referans alınmış Prius 2004 IPM motorunun simülasyon sonuçlarının tork değerlerinin iyileştirilmesi ve tork dalgalılık değerinin çeşitli yönlerden karşılaştırılması Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14. Model-11 IPM motor ile Prius 2004 IPM motorun karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	Toyota Prius 2004 IPM Motor			IPM Model-11			Tork Dalgallık- Prius (%)	Tork Dalgallık Model-11 (%)	Tork Dalgallık İyileşme Oranı (%)	Torkta İyileşme Oranı (%)
	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}	T _{Min}	T _{Maks}	T _{Ort}				
50	53.5	73.6	62.7	36.5	42.1	39.3	15.79	7.12	54.9	-
100	109.1	139.7	124.3	85	99	92	12.26	7.6	38	-
150	149.0	197.8	173.7	146.6	171.2	158.9	14.07	7.74	44.98	-
200	185.6	242.1	213.0	221.3	258.8	240.1	13.19	7.81	40.78	12.69
250	218.6	280.7	245.4	309	362	335.5	12.41	7.89	36.42	36.83
300	242.5	316.1	273.2	409.9	481	445.4	13.18	7.98	39.45	63.04
350	260.8	348.5	298.0	524.1	615.8	569.9	14.39	8.04	44.12	91.25
400	276.7	377.9	320.5	651.6	766.3	708.9	15.46	8.08	47.73	121.2

Tablo 4.14' te verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, Model-11 IPM için tork dalgallık iyileşme oranının % 54.9 civarında olduğu görülmektedir.

Tablolarda verilmideğerlerde, tork dalgallık iyileşme oranı % ve tork iyileşme oranı Eşitlik 4.2 ve 4.3'te verilen matematiksel ifadeler vasıtasıyla hesaplanmaktadır.

$$\% \text{ Tork Dalgallık İyileşme Oranı} = \frac{T_{Prius} - T_{Model}}{T_{Prius}} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\% \text{ Tork İyileşme Oranı} = \frac{T_{Prius} - T_{Model}}{T_{Prius}} \times (-100) \quad (4.3)$$

Tork iyileşme oranının hesaplanmasında bulunan T_{Prius} değerinde ortalama tork değerleri kullanılmıştır.

Motorlar arasında daha rahat bir şekilde karşılaştırma yapılabilmesi adına tüm motorların 250A'lık akım değeri için elde edilen benzetim sonuçları Tablo 4.15'te sunulmuştur.

Tablo 4.15. 250A'lık akımın tepe değeri için Prius 2004 model ile diğer on bir motor modelinin karşılaştırılması

Akım Tepe Değeri (A)	T_{Min}	T_{Maks}	T_{Ort}	TorkDalgallık- Prius (%)	TorkDalgallık İyileğme Oranı (%)	Torkta İyileğme Oranı (%)
Toyota Prius 2004 IPM Motor	218.6	280.7	245.4	12.41	-	-
Model-1 IPM	246.1	296.4	276.9	9.27	25.33	12.86
Model-2 IPM	259.7	317.9	288.8	10	19.41	17.68
Model-3 IPM	242.6	289.2	265.9	8.76	29.41	8.35
Model-4 IPM	246.8	297.2	272	9.26	25.4	10.83
Model-5 IPM	257.1	315	286.05	10.12	18.45	16.56
Model-6 IPM	265.5	325	295.25	10.07	18.85	20.31
Model-7 IPM	269.1	326.7	297.9	9.66	22.15	21.39
Model-8 IPM	248.4	289.9	269.15	7.7	37.95	9.67
Model-9 IPM	236.8	270.2	253.5	6.58	46.97	3.3
Model-10 IPM	251.7	275.4	263.55	4.49	63.81	7.39
Model-11 IPM	309	362	335.5	7.89	36.42	36.83

Tablo 4.15'te verilen değler bakıldığında, referans alınmış Prius 2004 İPM motoru üzerinde yapılmış optimizasyon çalışmaları sonucunda tasarlanmış bir motor yapısı içerisinde 250 A'lık akımın tepe değeri için elde edilmiş olan tork dalgalanmasındaki ve ortalama tork değlerindeki en iyi iyileğmenin sırasıyla % 63.81 ve % 36.83 civarında olduğu görölmektedir.

5. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrikli araçlarla ilgili literatür incelenip EA sektöründe yer alan gelişmeler ve gelecek beklentileri değerlendirildiğinde günümüzde ulaşım teknolojisinde yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motora sahip araçların, çevre dostu araçlar olmaması, gürültülü çalışması, petrol rezervlerinin azalması ve verimliliğinin EA'lara göre düşük olması gibi dezavantajlarının olması, günümüzde EA'ların tercih edilmesini ve geliştirilmesini yeniden gündeme getirmiştir. Bu doğrultuda Üretici firmalar elektrikli araç üretimi üzerinde uzun zamandan beri çalışmaktadır. Elektrikli araç teknolojisinde kullanılan elektrik motor çeşitlerinin, her birinin kendine özgün özelliklerinden dolayı birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. EA üretici firmaları kendi elektrikli araç modellerinde bu elektrik motor çeşitlerinden biri üzerinde farklı gelişmeler yaparak daha performanslı elektrikli araç üretmeyi amaçlamaktadırlar. Günümüze kadar üretilmiş elektrikli araçlara bakıldığında, EA sektöründe üretici firmaların genellikle asenkron motor ve sürekli mıknatıslı senkron motor kullandıkları görülmektedir. Asenkron motorlarla sürekli mıknatıslı senkron motorları karşılaştırılmasına bakıldığında, düşük devirlerde SMSM'ların performansı asenkron motorlara göre daha iyi olmasına karşın yüksek devirlerde asenkron motorların daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, sürekli mıknatıslı senkron motor seçilmiş ve tasarımı yapılmıştır. Sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımında Toyota firmasının ürettiği 2004 model Prius elektrikli aracının motor yapısı referans alınarak, bu motor üzerinde tork dalgalanmasının ve tork değerinin iyileştirilmesi yönünde çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş ve 50 - 400 A akım değerleri için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışmaları gömülü mıknatıslı senkron motor tasarımı temel alınmıştır.

Tasarım optimizasyonunda referans alınmış Toyota Prius 2004 modelinin rotor yapısından temel parametreler olan rotor dış çapı, rotor iç çapı, kutup sayısı ve mıknatıs hacmi sabit bırakılıp sürekli mıknatısların sınırlı çap, kanal kalınlığı, mıknatıslar arasındaki minimum mesafe gibi parametrelerinin değişimine bağlı olarak farklı rotor geometrileri çizilmiş ve SMSM performansı değerlendirilmiştir. Tasarım optimizasyonu gerçekleştirilen motorda, referans alınmış motor tasarımında verilmiş tork dalgalanması oranı ve tork değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Karşılaştırma sonucu 250 A tepe akım değeri için referans alınmış motor için tork dalgalanma değeri % 12.41 iken optimizasyon işlemi sonrasında yapılmış motor tasarımı için, tork dalgalanma değerinde maksimum % 63.81'lere varan bir iyileşme elde edilmiştir. Referans alınmış motor üzerinde yapılmış optimizasyon çalışmaları sonrasında tork değerinin de iyileştirmesi hedeflenmiş ve 250 A tepe akım değeri için, tork değerinde % 36.42'lere ulaşan iyileşme elde edilmiştir.

Örleyen zamanlarda bu konuyla ilgili yapılacak çalışmada; tasarımı yapılan sürekli mıknatıslı senkron motorun prototipi yapılarak elde edilen test, simülasyon sonuçlarının deneysel olarak yapılması hedeflenmektedir. Bu motor yapısında tork dalgalanmasının daha da iyileştirilmesi için farklı rotor geometrileri geliştirilerek, daha iyi sonuçların elde edilmesi beklenebilir.

Motor tasarımı yapıldığında motorun verimi, moment dalgalanması ve tork değeri önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte daha optimum bir motor tasarımı yapmak için motorun termal analiz değerleri, manyetik malzemelerin seçimi, akı dağılımları, fiyat/performans oranı ile pazar payı vb. parametrelerinde dikkate alınması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

1. Gürbüz, Y., Kulaksız, A., 2016. Elektrikli araçlar ile klasik içten yanmalı motorlu araçların çeşitli yönlerden karşılaştırılması. **Dergi Park**, 6 (2): 117-125
2. Cihangir, S., 2019. Dünya’da Ve Türkiye’de Elektrikli Araçlar Ve Şarj İstasyonları Üzerine Son Gelişmeler. Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitirme Tezi, Gümüşhane, 61 s.
3. Beyazıt, M., 2018. Elektrikli araçlarda kullanılan motorlar ve özellikleri. (Web sayfası: <https://www.elektrikport.com/>), (Erişim tarihi: Ocak 2021)
4. Kurnaz, H., 2018. Elektrikli Araçlar İçin Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor Tasarım Metodolojisi Ve Gerçeklenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 143 s.
5. Kerem, A., 2014. Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri. **Dergi Park**, 5 (1): 1-13
6. Sezen, B., Çeliker, A., 2017. Elektrikli araçların mevcut durumu, tercih edilme ve edilmeme sebepleri. **Turkish Journal of Marketing**, 2(2): 82-103
7. Anonim., 2021. Elektrikli araç tarihçesi. (Web sayfası: <https://ev.hedef filo.com>), (Erişim tarihi: şubat 2021)
8. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2018. Elektrikli Araçlar. (Web sayfası: <https://www.dunyaenerji.org.tr/elektrikli-araclar>), (Erişim tarihi: Ekim 2020)
9. Widmer J. D., Martin R., Kimiabeigi M. 2015. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. **Sustainable Material and Technologies**, 3 7-13 doi: 10.1016/j.susmat.
10. Çarkıt, S., 2020. Elektrik Araç Tahrik Sistemleri İçin Akı Anahtarlama Motor Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 68 s.
11. Cankı, B., 2020. Dünya genelinde elektrikli araç sayısı 7 milyonu aştı (Web sayfası : <https://www.donanimhaber.com/dunya-genelinde-elektrikli-arac-sayisi-7-milyonu-asti--122696>), (Erişim tarihi : şubat 2021)
12. Anonim., 2019. Dünyada elektrikli araç satışı hız kazandı. (Web sayfası: <https://otomobil.haber7.com/otomobil/haber/3066674-dunyada-elektrikli-arac-satisi-hiz-kazandi>), (Erişim tarihi: Ocak 2021)

13. Aras, M., Hızal, G., 2010. Elektrikli Otomobil. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitirme Tezi, Erzurum, 53 s.
14. Muratoğlu, Y., Alkaya, A., 2016. Elektrikli araç teknolojisi ve pil yönetim sistemi-inceleme. **Elektrik Mühendisliği**, 1(458) : 9-14
15. Ünlü, N, Karahan, ğ, Özsu, E, Yazar, A, Turhan, L, Akgün, F, Tırıs, M, 2003. Elektrikli Araçlar. TÜBİTAK – Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gabze - Kocaeli, 157 s.
16. Çahami, H., Çavuşoğlu, A., 2006. Yakıt Pilleri Ve Kullanım Alanları. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 131 s.
17. Anonim., 2020. Elektrikli araçlarda bilmek istediğiniz her Şey. (Web sayfası: <https://www.myenerjisolar.com/elektrikli-araclarda-bilmek-istediginiz-her-sey/>), (Erişim tarihi : Mart 2021)
18. Anonim., 2019. TOGG yerli elektrikli araba özellikleri. (Web sayfası: <https://www.powerenerji.com/togg-yerli-elektrikli-arabafiyati.ozellikleri.>), (Erişim tarihi : Ocak 2020)
19. Anonim., 2010. История создания электродвигателя , Первые эксперименты с электромагнитными устройствами. (Web sayfası: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/history>), (Erişim tarihi : Mart 2021)
20. Anonim., 2019. Elektrik Motoru Nedir. (Web sayfası: <https://www.muhendisbeyinler.net/elektrik-motoru-nedir/>), (Erişim tarihi : Aralık 2019).
21. Tarlak, H., 2018. Elektrikli araçlar ve akü Şarj sistemleri. **Kırklareli University Journal of Engineering and Science**, 4(1) : 124 - 141
22. Mergen, F, Zorlu, S, 2010. Elektrik Makineleri III / Senkron Makineler. Birsen Yayınevi, 259 s.
23. Osmanov, S., 2013. Elektrik Mağınlar. Azərbaycan Dövlət Neft Akademiyası Matbaası, Bakü, 73s.
24. Finken, T., Felden, M., Hameyer, K., 2008. Comparison And Design Of Different Electrical Machine Types Regarding Their Applicability İn Hybrid Electrical Vehicles. (Websayfası: https://www.researchgate.net/publication/224394078_Comparison_and_design_of_different_electrical_machine_types_regarding_their_applicability_in_hybrid_electrical_vehicles), (Erişim tarihi: Ekim 2020)

25. Ekrem, B, 2016. Elektrikli Araçlarda Yol Koşullarına Uygun Motor Seçimi Algoritması Geliştirme. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Düzce, 77 s.
26. Sakarya, H., 2009. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar İçin Alan Yönlendirmeli Sürücü Düzeneci Tasarımı Ve Uygulaması. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 118 s.
27. Kartal, M., 2018. 3 Faz Asenkron Motor Verimlilik Ve Yenileme Karlılık Analizi. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Muğla, 107 s.
28. Kaya, Y., Coşkun, A., 2019. 3 Fazlı 600 kW Gücünde Kısa Devre Kafesli Rotorlu Asenkron Motorun Tasarımı: Fiziksel Boyutlandırılması ve Elektriksel Hesaplamaları. **Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 12(3): 1651-1665
29. Karakaş, G Pekcan, M., 2014. Elektrikli taşıt tasarımı. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Lisans Tezi, Ankara, 133 s.
30. Yılmaz, 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**, Volume 52 : 80 -99
31. Bhatt, P, Mehar, H, Sahajwani, M., 2019. Electrical motors for electric vehicle a comparative study. **Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA)** : 1-10
32. Ahmet Hakan, O, 2018. Elektrikli Araçlar İçin Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Makine Tasarımının En Uygunlaştırılmasına Katkıları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 95 s.
33. Hirosawa, S., 2015. Permanent magnet beyond Nd-Dy-Fe-B, **The Minerals, Metals & Materials Society**, 67(6) : 1304-1305.
34. Oğuzhan, O., 2012. 1.3 Kw Gücünde Dahili Mıknatıslı Bir Senkron Motorun Analizi, Tasarımı Ve Gerçeklenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri, Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 94 s.
35. Aladağ, G, 2017. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Genetik Algoritma ile Verim Ve Ağırlık Amaç Fonksiyonlarının Optimize Edilmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 86 s.

36. Demir, Y., 2013. 1,5 kW'lık Dengesiz Sargı Yapılı Sürekli Mıknatıslı Bir AC Servomotor Tasarımı, Üretimi ve Gerçeklenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
37. Anonim., 2019. Tesla Model 3's IPM-SynRM Electric Motor Explained, (Web sayfası: <https://insideevs.com/news/461811/video-tesla-model-3-electric-motor-explained/>), (Erişim tarihi: Kasım 2020)
38. Tesla motor designer explains Model 3's transition to permanent magnet motor. (Web sayfası : <https://electrek.co/2018/02/27/tesla-model-3-motor-designer-permanent-magnet-motor/>), (Erişim tarihi: Kasım 2020)
39. Kaynak, ğ, 2018. Elektrikli Araçlarda Enerji Kayıpları Ve Regeneratif Frenleme Analizi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Lisans Tezi, Kocaeli, 69s.
40. Frost, S., 2018. Global Electric Vehicle Market Outlook. (Web sayfası: <https://store.frost.com/global-electric-vehicle-market-outlook-2018.html>), (Erişim tarihi: Aralık 2020).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Alim MUSAYEV

Uyruğu: Azerbaycan (AZE)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum: 

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh	Devam ediyor
Lisans	Azerbaycan Devlet Petrol Ve Sanayi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Müh	Haziran 2018
Lise	Nazım Gəyev Okulu, Haçmaz	Mayıs 2014

İŞ DENEYİMLERİ

YABANCI DİL

İngilizce