

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ASENKRON VE
KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN
KARŞILAŞTIRILMASI, ANALİZİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI
İLE MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur DEMİR

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli) Yüksek Lisans Programı

**TEMMUZ 2025
İSTANBUL**

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ASENKRON VE
KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN
KARŞILAŞTIRILMASI, ANALİZİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI
İLE MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Onur DEMİR
(231280001)
(0009-0004-1064-9206)**

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli) Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

İstanbul 2025



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Jüri Tez Onay Formu

07.07.2025

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Bu çalışma 07.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet Derya KOCABAŞ

Üye (İmza)

İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Kubilay

ATALAY

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Elektrikli Araçlarda Kullanılan Asenkron ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Karşılaştırılması, Analizi ve Yapay Sinir Ağları ile Modellemesi” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullandıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım. (06/07/2025)

Onur DEMİR

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince, değerli fikirleri ile bana yol gösteren, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli danışman hocam, sayın Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU'ya katkılarından dolayı teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Hep yanımda olan değerli eşim Bahar Demir'e sevgili kızım Duru Demir'e ve sevgili anne ve babama desteklerinden ötürü sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2025

Onur DEMİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
SEMBOLLER	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	3
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILABİLECEK MOTOR TİPLERİ 5	
2.1 Asenkron Motorlar	5
2.1.1 Küçük Güçte Bir ASM İçin Deney Düzeneği	7
2.2 Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar	11
2.2.1 Kalıcı mıknatıslı senkron motorların sınıflandırılması.....	11
2.2.1.1 Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motor.....	11
2.2.1.2 Rotoru içine yerleştirilen kalıcı mıknatıslı senkron motor	12
2.2.2 Kalıcı mıknatısların yapısı.....	12
2.2.3 Kalıcı mıknatıslı senkron motorun eşdeğer devresi ve eşitlikleri	13
2.3 Asenkron ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Deneysel Olarak Kıyaslanması	15
2.3.1 KMSM test motoru	16
2.3.2 ASM test motoru	18
2.3.2.1 ASM redüktörü özellikleri	19
2.3.3 KMSM ve ASM performanslarına ilişkin deney sonuçlarının incelenmesi	19
2.3.4 KMSM ve ASM için kontrol yöntemleri.....	23

2.3.4.1 V/f skaler kontrol	24
2.3.4.2 Alan yönlendirmeli kontrol.....	24
2.3.4.3 Kayma frekansı kontrolü	25
2.3.4.4 Yapay sinir ağıları destekli kontrol.....	26
2.3.4.5 Doğrudan moment kontrolü.....	26
3. ORTA GÜÇTE BİR KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN	
DENEYSEL PERFORMANSININ İNCELENMESİ.....	28
3.1 Motor Parametreleri	28
3.2 Motor Test Düzenegi.....	30
3.3 49 kW gücündeki KMSM'nin test sonucu elde edilen değerleri	33
3.4 Yapay Sinir Ağları ile Performans Tahmini	36
3.4.1 Yapay sinir ağıları.....	37
3.4.2 Yapay sinir ağı modelleri.....	38
3.4.2.1 Tek katmanlı algılayıcılar	38
3.4.2.2 Çok katmanlı algılayıcılar.....	39
3.4.2.3 İleri beslemeli yapay sinir ağıları.....	40
3.4.2.4 Geri beslemeli yapay sinir ağıları	40
3.4.3 Test motoru parametreleri ile yapay sinir ağı modelinin tasarımı.....	41
3.4.3.1 Test motoru için veri seti ve veri paylaşımı.....	41
3.4.4 Yapay sinir ağı modeli uygulaması	42
4. SONUÇLAR	48
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ.....	52

KISALTMALAR

AA, AC	: Alternatif Akım
ASM	: Asenkron Motorlar
d/dk	: Devir/Dakika
EMK	: Elektromotor Kuvvet
Hz	: Hertz
In	: Nominal Akım
Jm	: Atalet Momenti
KMSM	: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor
kW	: Kilo Watt
Nm	: Newton Metre
Rpm	: Dakikada Tekrar Sayısı (repeat Per Minute)
Vn	: Nominal Gerilim
YSA	: Yapay Sinir Ağları

SEMBOLLER

Φ	: Manyetik Alan Akısı (Weber)
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
F, f	: Frekans (Hz)
I	: Akım (Amper)
J	: Atalet Momenti
La, Lb, Lc	: Faz İndüktansları
Ra, Rb, Rc	: Faz Dirençleri
Va, Vb, Vc	: Faz Gerilimleri
Vd	: D Ekseni Gerilimi (V)
Vq	: Q Ekseni Gerilimi (V)
W	: Güç (Watt)
η	: Verim
Ω	: Açısal Hız
Ω	: Ohm
Ld, Lq	: d-q eksen indüktansları
Rs	: Stator Sargı Direnci
Ψ_d, Ψ_q	: d-q eksen akıları
ω_e	: Açısal Hız

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No.
Çizelge 1.1: Bazı Elektrikli Araçlar İçin Teknik Veriler	2
Çizelge 2.1: Sincap Kafesli Rotor ve Bilezikli Rotor Karşılaştırması	7
Çizelge 2.2: Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Kıyaslanması	13
Çizelge 2.3: KMSM Test Motoru Etiket Bilgisi	16
Çizelge 2.4: ASM Test Motoru etiket bilgisi	18
Çizelge 2.5: Redüktör Etiket değerleri	19
Çizelge 2.6: KMSM ve ASM Kontrol Yöntemlerinin Kıyaslanması	24
Çizelge 3.1: Motor Parametreleri	28
Çizelge 3.2: ASM Etiket Değeri	30
Çizelge 3.3: KMSM'nin Performans Değerleri	33
Çizelge 3.4: YSA'da Kullanılan Giriş ve Çıkış Verileri	42
Çizelge 3.5: YSA Ortalama ve Standart Sapma Değerleri	43

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1: Asenkron Motor Yapısı	6
Şekil 2.2: (a) Sincap Kafesli Rotor Yapısı (b) Bilezikli Rotor Yapısı	6
Şekil 2.3: 1.1 kW'lık Bir ASM'nin Elektrikli Araç Tahriği Deneyi.....	7
Şekil 2.4: Kullanılan ASM'nin Etiket Bilgileri.....	8
Şekil 2.5: Test Motorunun Nominal Akım ve Moment-Hız Değişimi	9
Şekil 2.6: Değişken Değerlerde Güç, Hız ve Moment Değerleri.....	10
Şekil 2.7: Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Yapısı	11
Şekil 2.8: Rotoru içine yerleştiren Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Yapısı	12
Şekil 2.9: SMSM'nin d-q Eşdeğer Devreleri	14
Şekil 2.10: ASM ve KMSM Deney Düzenegi	16
Şekil 2.11: Test Panosu.....	17
Şekil 2.12: Deney Düzenegi ve Redüktörün Yerleşimi	19
Şekil 2.13: KMSM Ölçüm Sonuçları (a) ve ASM Ölçüm Sonuçları (b)	20
Şekil 2.14: KMSM ve ASM Performans Karşılaştırılması.....	20
Şekil 2.15: KMSM Akım, Gerilim ve Güç Değerleri	21
Şekil 2.16: ASM'nin Akım, Gerilim ve Güç Değerleri	22
Şekil 2.17: KMSM Alan Yönlendirmeli Kontrolü	25
Şekil 2.18: YSA Destekli Kontrol Genel Şeması	26
Şekil 3.1: KMSM Test Düzenegi Blok Şeması.....	30
Şekil 3.2: KMSM Deneysel Test Düzenegi	31
Şekil 3.3: Motor Ölçüm Bağlantıları.....	32
Şekil 3.4: Motor Test Parametre Ekranı.....	32
Şekil 3.5: Örnek Ölçüm Ekranı Görüntüsü.....	33
Şekil 3.6: KMSM Moment Akım Karakteristiği.....	34
Şekil 3.7: KMSM Verim, Moment ve Devir Sayısı Grafiği	34
Şekil 3.8: Test Motorunun Gerilim ve Güç Grafiği	35
Şekil 3.9: Biyolojik Sinir Hücresi ve Yapay Sinir Ağı	37

Şekil 3.10: Yapay Sinir Ağı Örneği	38
Şekil 3.11: Tek Katmanlı Algılayıcı Modeli	39
Şekil 3.12: Çok Katmanlı Algılayıcı Modeli	39
Şekil 3.13: İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağ Modeli	40
Şekil 3.14: Geri Beslemeli Ağ Yapısı	40
Şekil 3.15: Yapay Sinir Ağı'nın Eğitim Sonrası Yapısı.....	42
Şekil 3.16: Yapay Sinir Ağı Eğitim Sonuçları	44
Şekil 3.17: Ortalama Karesel Hata Değerinin Değişimi	45
Şekil 3.18: Regresyon Değerleri	45
Şekil 3.19: Gerçek Verim ile Tahmini Verim Uyum Grafiği	46



ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ASENKRON VE KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN KARŞILAŞTIRILMASI, ANALİZİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLEMESİ

ÖZET

Elektrikli araç teknolojilerinde motor seçimi, araç performansını, enerji verimliliğini ve maliyet etkinliğini doğrudan etkileyen en kritik unsurların başında gelir. Bu kapsamda, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan Asenkron Motorlar (ASM) ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (KMSM), teknolojik özellikleri, kontrol yöntemleri ve ekonomik yönleriyle ele alınarak kapsamlı bir analiz yapmak elektrikli araç motor seçimi için çok önemlidir. Tahrik motorunun moment-hız karakteristikleri, verimlilik, menzil, performans ve maliyet gibi kriterler, motor seçiminde önemli rol oynar. Bunlar üzerinde incelemeler yapmak ve optimum motor seçimi için performans karakteristiklerini kıyaslamak önemlidir.

Elektrikli araç motorlarının performansını modellemek için yapay sinir ağlarının kullanılması, bu araştırmanın en yenilikçi yönlerinden biridir. Geleneksel modelleme yöntemlerine kıyasla, YSA'ların kullanımı, daha yüksek doğruluk ve genelleme yeteneği sağlar. Bu, motor performansının daha doğru tahmin edilmesini ve optimize edilmesini mümkün kılar. Elektrikli araçlarda kullanılan motorların detaylı bir şekilde analiz edilmesi ve karşılaştırılması, mevcut literatürdeki bilgi boşluklarını doldurarak yeni ve kapsamlı bir bakış açısı sunar. Elektrikli araçların enerji verimliliğini artırmaya yönelik araştırmalar, sürdürülebilir ulaşım çözümlerine önemli katkılar sağlar. Bu çalışma, motor performansının optimize edilmesi yoluyla enerji tüketimini azaltmayı hedefler ve bu da çevresel sürdürülebilirlik için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada öncelikle amaç, elektrikli araç motor seçiminde kullanılacak bu iki motorun deneysel ortamda gerekli tüm parametrelerinin alınarak, MATLAB'da simüle edilmesi, performans karakteristiklerinin çıkarılması ve seçim kriterleri açısından kıyaslanarak, YSA ile öngörü tahminlemesi ve modellemesi yaparak kapsamlı bir inceleme sürecini içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç motor incelemesi, Yapay sinir ağları, Asenkron Motor, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor, Elektrikli araç motor kıyaslaması

COMPARISON ANALYSIS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELING OF INDUCTION AND PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS USED IN ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

In electric vehicle technology, motor selection is one of the most critical factors directly affecting vehicle performance, energy efficiency, and cost-effectiveness. In this context, conducting a comprehensive analysis of Induction Motors (IM) and Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM), which are widely used in electric vehicles, in terms of their technological features, control methods, and economic aspects is crucial for making the right motor choice. Criteria such as the torque-speed characteristics, efficiency, range, performance, and cost of the traction motor play a significant role in motor selection. Examining these factors and making comparisons to achieve an optimal choice is of great importance.

The use of artificial neural networks to model the performance of electric vehicle engines is one of the most innovative aspects of this research. Compared to traditional modeling methods, the use of ANN's provides higher accuracy and generalization ability. This enables more accurate prediction and optimization of engine performance. Detailed analysis and comparison of engines used in electric vehicles provides a new and comprehensive perspective by filling the knowledge gaps in the existing literature. Research on increasing the energy efficiency of electric vehicles makes significant contributions to sustainable transportation solutions. This study aims to reduce energy consumption by optimizing engine performance, which is critical for environmental sustainability.

The primary purpose of this study is to obtain all the necessary parameters of these two engines that can be used in electric vehicle engine selection in an experimental environment, simulate them in MATLAB, extract their performance characteristics and compare them in terms of selection criteria, and perform a comprehensive examination process by making prediction and modeling with ANN.

Keywords: *Electric vehicle motor analysis, Artificial neural networks, Induction Motors, Permanent Magnet Synchronous Motor, Electric vehicle motor compariso.*

1. GİRİŞ

Son yıllarda hem dünyada hem de ülkemizde Elektrik Araç kullanımı oldukça yaygın hale gelmiştir. Çevre dostu olmaları, yakıt verimleri ve enerji tasarrufuna sağladıkları katkılar ile ilerleyen zamanlarda yollarda daha sık görülmesi beklenen Elektrikli Araçlar için uygun elektrik motorunun seçimi son derece önemlidir. Elektrikli araç teknolojileri için en uygun elektrik motor tipinin hangisi olduğu noktasında literatürde çeşitli çalışmalar vardır. Uygunluk kriteri için üretici talebi, kullanıcı beklentisi, motor seçim kriterleri ve hangi motorun hangi aracın tahrikinde daha iyi olacağını belirlemek oldukça önemlidir. Geleneksel içten yanmalı motorlar ekonomik ve çevreci olmamaları sebebiyle yerlerini elektrik motorlarına bırakmaya başlamıştır. Batarya teknolojisindeki gelişmelerin artmasına bağlı olarak elektrik motoru ve elektrikli araç kullanımı giderek artacak ve yollardaki yerlerini alacaklardır. Elektrikli araçlar için kullanılacak motor tipleri firmalar tarafında sürekli denenmektedir. Uygun motor seçiminde verimlilik, maliyet, boyut, kontrol kolaylığı, moment gibi birçok etken birlikte değerlendirilmekte ve buna göre en uygun motor seçimi yapılmaktadır.

Bu çalışmada en çok kullanıma sahip olan Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor (KMSM) ile Asenkron Motor (ASM) ele alınacaktır. Bazı araçlar tek motor tahriği ile yol alırken bazı araçlarda ise, her iki motor da kullanılabilir. Yüksek verimlilik, yüksek moment ihtiyacı kompakt ve hafif yapıda olmaları sebebiyle KMSM'lerin Elektrikli Araç üreticileri tarafından tercih edildiği görülmektedir. Daha ucuz olması, sağlamlık ve güvenilirlik gibi üstünlükleri ile ASM'lerde yine etkin tercih sebebi olarak görülmektedir.

Yapay Sinir Ağlarının kullanımı son dönemde karmaşık problemlerin çözümünde son derece önemli bir hal almış ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada motor test verilerinden elde edilen parametre değerleri YSA modelinde eğitilerek ölçümü alınan değerlerin neticesinde verim tahmini yapılarak etkili bir biçimde kullanımı sağlanmıştır. YSA'lar ile performans tahmini yapılmış ve önemli

ölçüde yüksek regresyon oranlarında ilişkiler gözlenerek, etkili bir ağ eğitimi ve başarılı bir tahmin yürütülerek, motor seçiminde bu yönteminin önemi vurgulanmıştır.

Aşağıdaki çizelgede özellikle son yıllarda üretilen Elektrikli araçlar için bazı teknik bilgiler verilerek hangi firmanın hangi elektrik motorunu tercih ettiği ekte verilmiştir.

Çizelge 1.1: Bazı Elektrikli Araçlar İçin Teknik Veriler [1]

Araç Modeli	Motor Türü	Motor Sayısı	Motor Gücü	Menzil	0-100 km/s	Batarya	Tüketim
2024 Jaguar I-Pace	Permanent Magnet	Çift Motor	400HP(294KW)	470 KM	4.8 sn	90 kWh	22.5 kWh/100km
2023 Audi Q4	Ön ASM Arka PSM	Çift Motor	295HP(216KW)	380 KM	5.8 sn	77 kWh	22.5 kWh/100km
2024 Tesla Model 3	Permanent Magnet	Tek Motor	264HP(194KW)	554 KM	6.1 sn	66 kWh	13.2 kWh/100km
Togg T10x	Permanent Magnet	Tek Motor	218HP(160KW)	523 KM	7.8 sn	88.5 kWh	16.9 kWh/100km
2024 Opel Corsa E.	Permanent Magnet	Tek Motor	156HP(114KW)	402 KM	7 sn	54 kWh	13.4 kWh/100km
Ford Mustang	Permanent Magnet	Çift Motor	487HP(358KW)	500 KM	3.7 sn	98.8 kWh	23.2 kWh/100km
Tesla Model S Plaid	AC Permanent Magnet	Tek Motor	1020HP(750KW)	637 KM	2.1 sn	100 kWh	18.7 kWh/100km
Volvo EX30 Twin Motor	Permanent Magnet	Çift Motor	428HP(314KW)	426 KM	3.6 sn	69 kWh	16.2 kWh/100km

Batarya gücü, menzil ve 0-100 km/s hıza ne kadar sürede ulaşıldığı gibi birçok konu elektrikli araç pazarı için araştırma konusu olmaktadır. Teknik veri incelemesi bize değişken parametrelerin etkilerini göstererek elektrik tahrikinde motor seçiminin sürekli olarak değişebileceğini göstermektedir.

Motor performans ölçümleri için test verileri, anlık ölçümler ve tüm parametrelerin MATLAB'da incelenmesi modelleme ve simülasyon, verimlilik analizi ve performans değerlendirmesi ile hangi motorun neden kullanılması gerektiği sorularına cevap aramak literatüre katkı anlamında önem arz etmektedir. Motor performanları test veri sonuçları ile çıkarılarak gerekli hız moment, verimlilik ve güç tüketimi gibi önemli kriterlerinin çıkarılması motor seçimini kolaylaştırabilir.

Elektrikli araç motor seçiminde Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanmak motor seçim sürecini optimize ederek tercih edilecek motor için önemli kestirimlerde

bulunabilir. YSA veri setlerini eğitilmek üzere işlendiğinde hızlı bir sürede öngörü tahmini ile seçim süreci ve olası senaryolarını incelemede katkıda bulunur. YSA'lar Elektrikli araç motor seçiminde veri tabanlı tahminler yaparak uygun tasarım modelleri oluşturulmasını sağlar. Tüm bu sebeplerle hızlı öngörü ve tercih gereksinimi hem MATLAB ile yapılacak test verisi incelemeleri hem de YSA'da bu veriler ile veri tabanı oluşturarak yapılacak çalışmalar birbirini tamamlayıcı nitelikte olup iyi seçim noktasında yardımcı olacaktır.

1.1 Literatür Özeti

Elektrik araç tahriki ve uygun motor seçimi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların önemi ile geleceğe yansımaları üzerine araştırmalar yapılmıştır. Elektrik motorlarını tarihçesi 19.yüzyılın başlarından itibaren çeşitli çalışmalar ile başlamıştır. 1828 yılında Anyos Jedlik manyetik alan yardımıyla çalışan basit yapılı bir elektrik motoru üretmiştir. 1834 yılında Thomas Davenport patenti alınan ve pratik olarak çalışan ilk elektrik motorunu üretmiştir. Bu dönemlerde elektrikli araç tahriği için doğru akım motorları ile başlanmıştır. 1888 yılında ise Nikola Tesla asimetrik alternatif akım motorunun çalışmalarına başlamıştır. Bu çalışmadan sonra elektrikli araç tahriğinde alternatif akım önemli yer tutmaktadır.

20.yüzyılın başlarında elektrikli araçlara olan ilgi oldukça artmış ancak fosil yakıtlara erişimin halen daha rahat olması ve içten yanmalı motor teknolojisindeki gelişmeler ile elektrikli araçlar bir süreliğine askıya alınmıştır. 1970 lerden itibaren ise yine ilgi artarak çeşitli araştırmalara yönelilmiştir. 1985 yılında Kenjo ve Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors" adlı çalışmalarıyla sabit mıknatıslı ve fırçasız doğru akım motorlarının avantajlarını ele aldıkları ve bu çalışma, elektrikli araçlarda fırçasız DC motorların kullanımına yönelik önemli bir referans niteliğindedir [2].

Ranaei, Karvonen, Suomien ve Kassi, 1990-2010 yılları arasındaki patent verilerini analiz ederek elektrikli ve yakıt hücreli araçlarla ilgili bir değerlendirme yapmıştır. Çalışmaları sonucunda, elektrikli araçların Ar-Ge yatırımlarında daha büyük bir paya sahip olduğu ve bu avantajın, hidrojen bazlı araçlara kıyasla gelişmelerini daha kolay hale getirdiği ortaya konulmaktadır [3].

Farklı bir çalışmada bazı elektrik motorları için üstünlük ve dezavantaj durumlarına göre uygun motor belirlenmesi yapılmaya çalışılmıştır [4]. Kaymaz, H., & Ark. "Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi. "Bu çalışmada, elektrikli araçların sürüş sistemi tasarımında çekiş motoru ve sürücü seçiminin önemi vurgulanmış; güç yoğunluğu, güvenilirlik, verim ve maliyet gibi temel parametreler üzerinden farklı motor tipleri karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında Elektrikli araçlarda kullanılan KMSM ve ASM'ler deneysel ortamda incelenerek avantaj dezavantaj durumları tespit edilmeye çalışılmış deneysel veriler MATLAB'da kıyaslama için gerekli parametreler doğrultusunda karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu motorlar için hangi kontrol yöntemlerinin hangi durumda tercih edilebileceği ortaya konularak, kontrol yöntemi ile motor performanslarının etkileri üzerinde durulmuştur.

Sonuç olarak tüm deneysel verilerin değerleri analiz edilerek YSA ile veri tabanı oluşturulmuş ve analiz, kıyaslama durumları YSA'nın öngörü tahmin gücü ile de desteklenerek sonuçlar anlamlandırılmıştır. Gelecek yıllarda kullanımının daha da yaygınlaşacağını düşündüğümüz Elektrikli Araçlar için en önemli unsurlarından olan motor tarafının incelenmesi önem arz etmektedir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILABİLECEK MOTOR TİPLERİ

Elektrikli araç tahrikinde bazı motorlar çeşitli kriter sebepleriyle ön plana çıkmaktadır. Yüksek verimlilik ve güçlü moment üretme yetenekleri ile seçilecek motorun maliyeti en kritik seçim unsurlarındandır. Özellikle elektrikli araç tahrikinde seçilecek motorun araç tipi ve tasarımı da yine bu motorların tercih sebeplerindedir.

Ağırlıklı olarak Asenkron Motorlar, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar, Fırçalı ve Fırçasız Doğru Akım Motorları ve Anahtarlamalı Relüktans Motorları gibi motorların kullanım yaygınlığı görülmektedir. Her bir uygulamada farklı bir motor değişik sebeplerle ve kriterlerle ön plana çıkmaktadır.

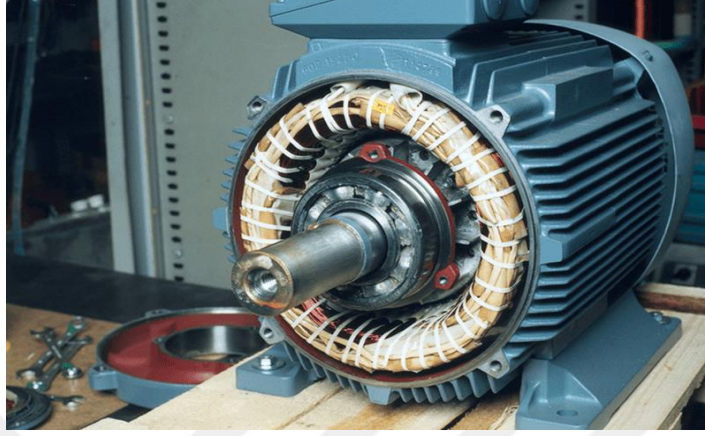
Ancak üretilen araç tipleri incelendiğinde özellikle Asenkron ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron motorlarının diğer motor tiplerine göre daha sık tercih edildiği görülmektedir. Gerek literatür incelemesi gerekse araç teknik bilgilerinden anlaşılacağı üzere her iki motor tipi içinde ortak üstünlükler mevcuttur. Yüksek verimlilik ve güçlü moment üretme yetenekleri, dayanıklı ve uzun ömürlü olmaları, hafif ve verimli bir elektrik araç tasarımına sağladığı faydalar ile bu iki motor sıklıkla kullanımda tercih edildikleri görülmektedir. İki motor türü de özellikle kontrol yöntemlerinin gelişmesi ile hızlı tepkimeler verebilmekte, elektrikli araçlar için hassas ve verimli sürüşe imkan vermektedir.

Ortak üstünlüklerinin yanında iki motor arasındaki farklar, bu motorların geniş analizi ve birçok açıdan deneysel kıyaslaması seçim kriteri açısından bizlere yol göstererek, hangi öncelik sırasında hangi motorun tercih edileceği noktasında büyük fayda sağlamaktadır.

2.1 Asenkron Motorlar

Asenkron Motorlar (ASM) yapılarının basit olması, hız kontrol yöntemlerine uygunluğu ve maliyet açısından tercih sebebi olan klasik elektrik makinalarıdır. Bu motorun çalışma prensibi Faraday yasasına göre değişken manyetik alandaki iletken elektromotor kuvvet (EMK) endüklenmesi ve elektromanyetik endüksiyon

prensibine dayanmaktadır. Motorun duran kısmını oluşturan statorunda değişken manyetik döner alan oluşumu kısa devre olan rotor sargılarında gerilim endüklenir ve bu sayede iletkenlerden akım akması ve rotorun hareket etmesi sağlanır.



Şekil 2.1: Asenkron Motor Yapısı

Asenkron motor yapısı incelendiğinde sabit kısım (stator) ve döner kısım (rotor) olmak üzere 2 ana kısımdan oluştuğu görülmektedir. Stator kısmı yüksek oranda alaşımli demir veya sac malzemelerden üretilmekte ve manyetik akıyı yönlendiren ve silisli saclardan oluşmaktadır. Rotor kısmı ise sincap kafesli ve sargılı üretilen motorun dönme hareketinin gözlemlendiği kısımdır. Şekil 2.2’de kısa devreli rotor (sincap kafesli) ve sargılı rotor (bilezikli) görselleri sunulmaktadır.



Şekil 2.2: (a) Sincap Kafesli Rotor Yapısı (b) Bilezikli Rotor Yapısı [5]

Sincap kafesli ASM’lerde gerilim kaynağına bağlanırken, rotor çubukları doğrudan bu kaynağın etkisinde bırakılmazlar. Burada stator sargılarında oluşan değişken manyetik alan rotor çubuklarında elektromanyetik indüksiyon yoluyla gerilim oluşturulmaktadır. Bilezikli ASM’lerde ise durum statora uygulanan gerilim ile bilezikler vasıtasıyla rotora da gerilim uygulanabilir. Bu sayede gerilim seviyesi kontrol altına alınabilir.

Elektrikli araçlar özelinde ASM rotor tipleri incelendiğinde Çizelge 2.1’de bazı parametrelere göre kıyaslanmıştır.

Çizelge 2.1: Sıncap Kafesli Rotor ve Bilezikli Rotor Karşılaştırması

KRİTER	SİNCAP KAFESLİ ROTOR	BİLEZİKLİ ROTOR
Kalkış Momenti	Düşüktür.Doğrudan çalıştırmada zorlanabilir.	Yüksektir.Harici direnç ile arttırılabilir.
Bakım Gereksinimi	Düşüktür.Bilezik ve fırça içermez.	Yüksektir.Aşınmalar olabilir.
Verimlilik	Daha yüksektir.Mekanik kayıpları azdır.	Düşüktür.Fırça ve Bilezik kayıpları vardır.
Ağırlık	Daha hafif ve kompakt yapıdadır.	Daha ağırdır.
Kullanım Alanı	Elektrikli araçlarda tercih edilebilir.	Elektrikli araçlarda nadiren tercih edilir.

Elektrikli araçlar için kullanılabilir motor tipinden olan ASM’lerin rotor yapıları incelendiğinde sıncap kafesli rotor tercih edilmesi daha uygun olacaktır. Zorlu sürüş koşulları, geniş hız aralığı, verim gibi unsurlar araç tahriğinde oldukça önemlidir.

2.1.1 Küçük Güçte Bir ASM İçin Deney Düzeneği



Şekil 2.3: 1.1 kW’lık Bir ASM’nin Elektrikli Araç Tahriği Deneyi

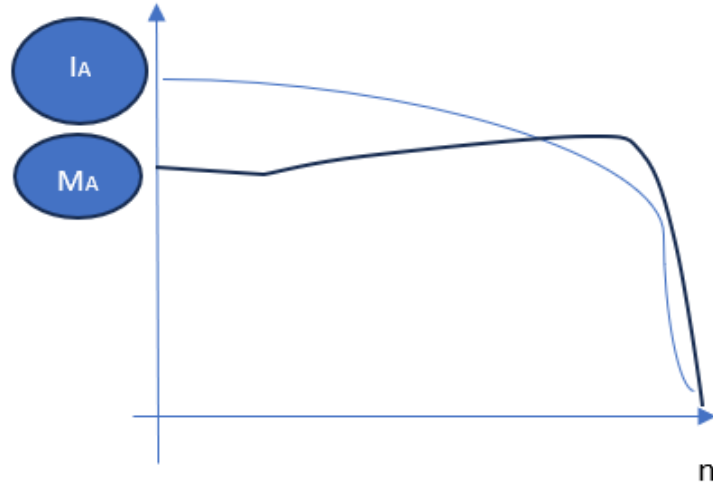


Şekil 2.4: Kullanılan ASM'nin Etiket Bilgileri

Deney düzeneği ve etiket değeri verilen ASM'nin elektrikli araç entegre sistemini anlamak ve bazı parametreleri elde etmek üzere kurulan deney düzeneğinde kullanılan ASM küçük elektrikli araçlar için kullanımı uygun olabilir. Örneğin golf arabaları, otonom lojistik araçları, küçük servis araçları gibi uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca bazı elektrikli araçların iki motor ile tahrik edildiği durumlarda yine böyle bir ASM yardımcı sistemlerde kullanılabilir.

Şekil 2.3 ile verilen düzenekte bağlı bulunan ASM'nin farklı hız ve moment koşullarında nasıl çalıştığı analiz edilerek, akım gerilim ve frekans analizleri, verimlilik ve güç ölçümleri gibi durumlar gözlenerek motor performansı ve seçim uygunluğu gibi koşullar değerlendirilebilir.

Motor mili ile yük arasında bağlantıyı sağlayan kaplin elemanı bulunmaktadır. Buradaki kaplinin amacı motorun ürettiği momenti mekanik sisteme aktarmaktır. Tekerlek sistemi üzerinde bulunan hız ölçüm cihazı (takometre) ile devir sayısı anlık olarak ölçülmektedir.

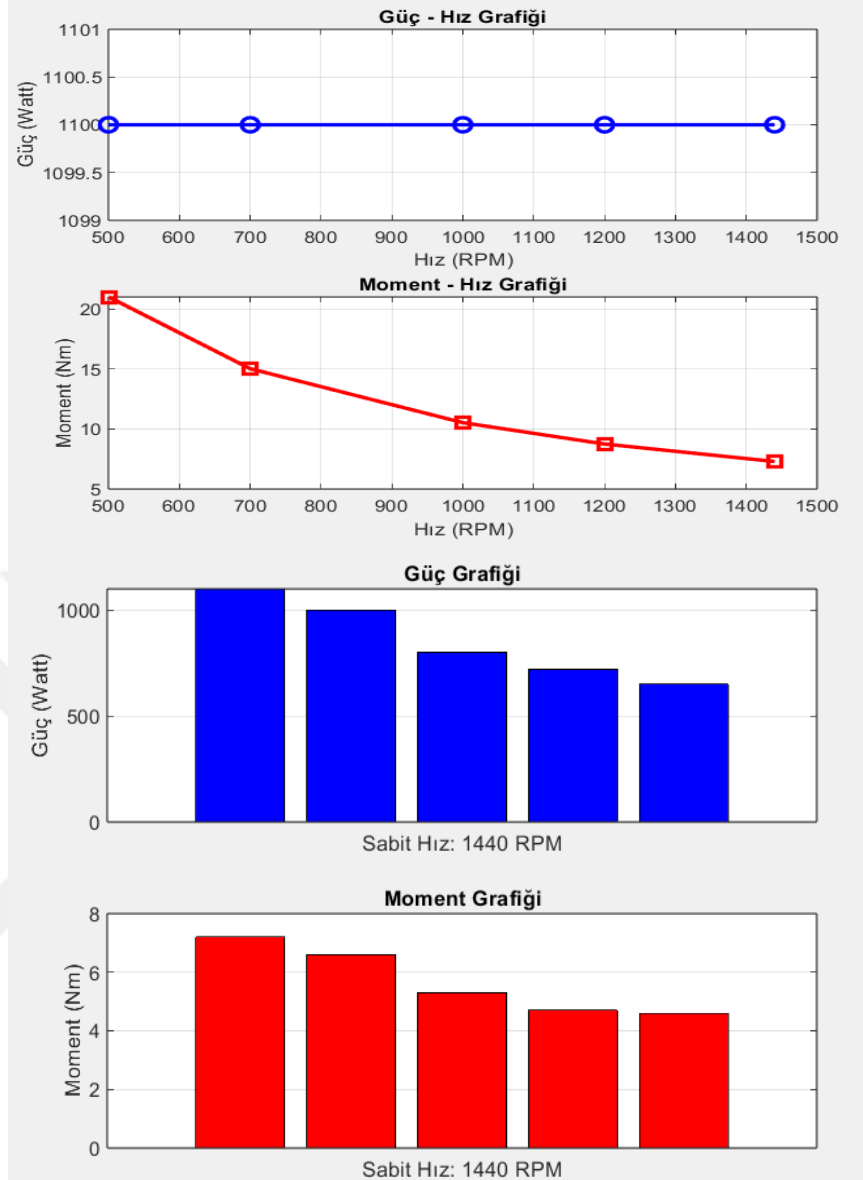


Şekil 2.5: Test Motorunun Nominal Akım ve Moment-Hız Değişimi

Şekil 2.5’de verilen test motoru karakteristiğinde I_A , anma akımını, M_A kalkış momentini ifade etmektedir. Motor karakteristiğinde ilk kalkınma anında fazla akım çekildiği ve ASM’ler için bu durumun beklendiği bilinmektedir. ASM’lerde yol verme yöntemleri ile kalkış akımlarının azaltılabildiği bilinmektedir. Yumuşak yol vericiler, akım sınırlama devreleri bu süreyi minimize etmektedir. Motor hızlandıkça anma akımının azaldığı görülmektedir. Anma akımının çok yüksek olduğu durumlarda motor sargıları ve diğer unsurları zarar görebileceğinden motor kontrol sistemleri bilhassa kalkış akımının sınırlandırılmasında büyük önem taşımaktadır.

Moment-Hız grafiği incelendiğinde, ASM’ler kalkış anında yüksek moment gereksinimi duymaktadırlar. Motoru harekete geçirmek için gerekli olan yüksek moment talebi yine kalkış akımının yüksek olmasına sebebiyet vermektedir. Yüksek moment yine motor hızlandıkça nominal çalışma momentine yaklaşmaktadır. Kalkış momenti, motorun yükü hareket ettirme kapasitesi için çok önemlidir.

Elektrikli araçlarda bilindiği üzere kalkış momenti performansı önem arz etmektedir. Ayrıca elektrikli araçlar için uygulamada bazı kontrol yöntemleri ile kalkış momentlerinin arttırılabildiği bilinmektedir. ASM’lerin fazla akım çekmesi batarya kapasitesini de olumsuz yönde etkileyeceğinden uygun motor ile uygun kontrol yöntemi kullanarak sistem bütünlüğünün sağlanması elektrikli araç için uygun koşulları oluşturacaktır. Güç ve moment değerlerinin hıza bağlı değişimlerinin deneysel olarak çıkartıldığı grafikler aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Değişken Değerlerde Güç, Hız ve Moment Değerleri

Şekil 2.6'dan anlaşılacağı üzere test motoru olarak kullanılan ASM'de motor gücü sabit değerlerde iken devir sayısı düştükçe moment değerleri arttığı gözlenmektedir. Devir sayısı sabit tutulduğunda ise güç değerleri azaldığında moment değerlerinin düştüğü görülmektedir. Elektrikli araçlarda bu durum aracın daha yüksek çekiş gücü ile kalkış yapmasını sağlar. İncelenen motorda devrilme momenti 21.9 Nm, anma (nominal) momenti ise 7.3 Nm'dir. Devrilme momenti değeri ile ilk kalkış anında iyi bir çekiş performansı sağlanmaktadır. Küçük ve hafif güçlü araçlarda bu güç ve moment değerlerindeki bir ASM kullanımı daha uygun olabilir.

2.2 Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar

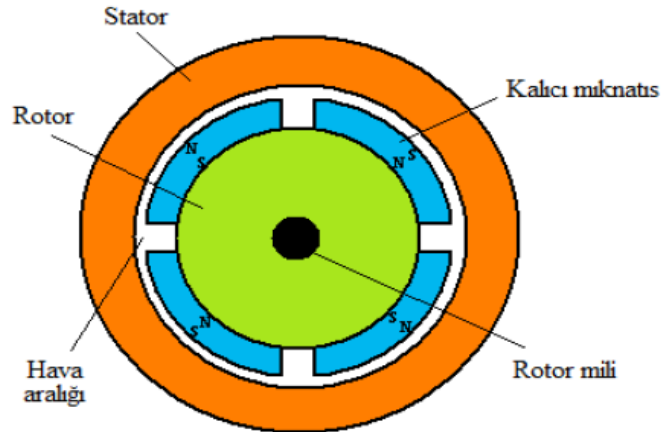
Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (KMSM) son dönemde özellikle elektrikli araç üreten firmalar tarafından, yüksek güç yoğunluğu, verim ve istenilen düzeyde sağladığı momentler ile tercih sebebi oldukları görülmektedir. Son yirmi yılda, gelişen teknoloji ile birlikte motor yapısına ilave edilen güç elektroniği tarafında gerçekleşen iyileştirmeler ile bazı alanlarda sıklıkla tercih sebebi olmaktadır. Kalıcı mıknatıs malzeme teknolojisindeki gelişmeler, mıknatıslı elektrikli motorlarının yaygınlaşması için önemli bir fırsat oluşturmaktadır.

Yapı itibariyle stator ve rotor kısımlarından oluşan KMSM'lerde stator manyetik alanı oluşturan kuvvet sargılarını barındırırken, rotoru ise yapısına göre üzerinde veya içinde kalıcı mıknatıslar bulundurarak dönen kısmı oluştururlar. Rotor kısmı manyetik alanla etkileşime girdiğinden, mıknatısların yüksek enerji yoğunluğuna sahip özellikte olması gereklidir. Kullanılan mıknatıslar genellikle nadir toprak elementinden oluşmaktadır. Bu nedenle mıknatıs içeren motorlar verimli ve yüksek manyetik performansa sahiptirler.

2.2.1 Kalıcı mıknatıslı senkron motorların sınıflandırılması

KMSM'lerde uygulama alanlarına göre tasarım şekilleri değişmektedir. KMSM rotorlarında sargı yerine mıknatıs kullanıldığı için mıknatısın yerleşim şekli ve yapısı motorun verimliliği için önem arz etmektedir. KMSM'ler mıknatısların rotorun içine veya yüzeyine yerleştirilmesine göre sınıflandırılmaktadırlar.

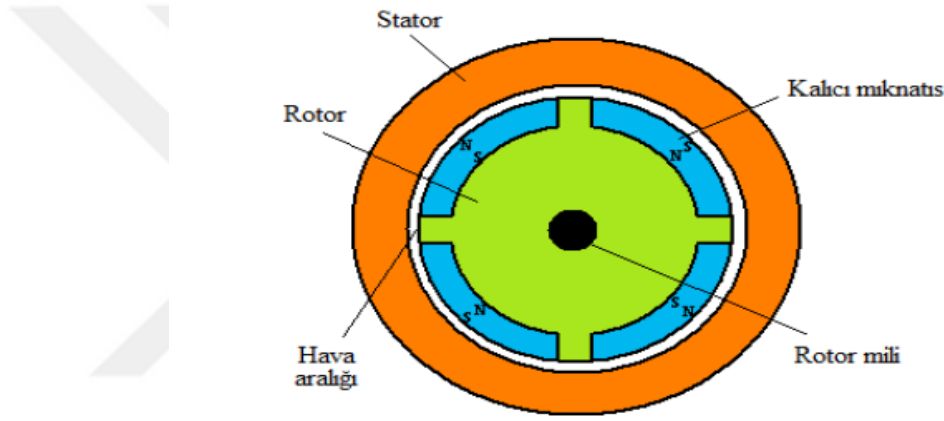
2.2.1.1 Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motor



Şekil 2.7: Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Yapısı [6]

Bu motor yapısında mıknatıslar rotor yüzeyine epoksi reçine kullanılarak yapıştırılmaktadır. Bu tasarım ile simetrik bir rotor yapısına sahiptirler. Dolayısıyla, d ekseni ve q ekseni indüktans değerleri birbirine yaklaşık olarak eşittir. Bu durum relüktans momentinin oluşmamasına yol açmaktadır. Bu yapıda imalat kolaylığı mümkündür. Yapıştırıcılar kullanılarak yapılan bu uygulama sayesinde yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetine karşı düşük mukavemet ve yapısal bütünlük sağlanarak yüksek momenti ile tercih sebebi olmaktadır [7].

2.2.1.2 Rotoru içine yerleştirilen kalıcı mıknatıslı senkron motor



Şekil 2.8: Rotoru içine yerleştirilen Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Yapısı [6]

Kalıcı mıknatısların rotorun içine yerleştirildiği bu yapıda, hava aralığı etkilidir. Mıknatısların bulunmadığı ve çelik nüve yapısına sahip bölgelerde hava aralığı etkisi azdır. Yüzey montajlı KMSM'ye göre aynı mıknatıs boyutlarında daha yüksek moment değerleri verebilmeleri nedeniyle de küçük boyutlarda daha yüksek hızlarda çalışabilirler.

Bu motor yapısı düşük bakım gereksinimi, yüksek verim, küçük boyutları ile elektrikli araçlarda ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir.

2.2.2 Kalıcı mıknatısların yapısı

Kalıcı Mıknatıslar, harici bir kaynağa ihtiyaç duymadan manyetik alan oluşturabilen alaşım malzemelerdir. İlk nesil mıknatıslar başlangıçta düşük güçte motorlar için kullanılırken günümüzde yüksek enerji yoğunlukları ile nadir toprak mıknatısları yüksek güçlü motorlarda daha etkili kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2: Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Kıyaslanması

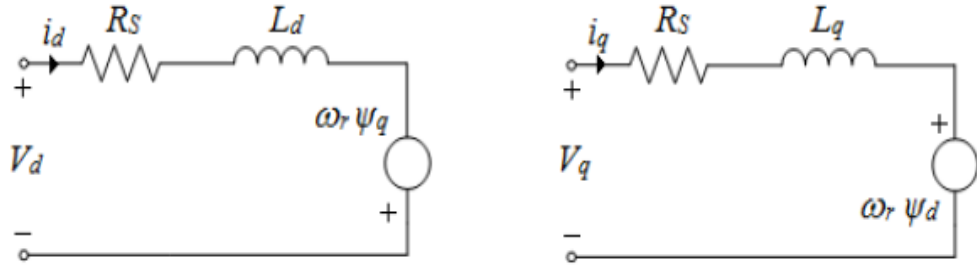
MIKNATIS TÜRÜ	MALİYET	DEMANYETİZASYON	ENERJİ ÜRETİMİ	MEKANİK MUKAVEMET
Ferrit	EN DÜŞÜK	DÜŞÜK	EN DÜŞÜK	EN DÜŞÜK
Alnico	DÜŞÜK	EN DÜŞÜK	DÜŞÜK	EN YÜKSEK
Nd ₂ Fe ₁₄ B	YÜKSEK	YÜKSEK	EN YÜKSEK	YÜKSEK
Samaryum-Kobalt (SmCo)	EN YÜKSEK	EN YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK

Çizelge 2.2’de verilen mıknatıslar içerisinde Ferrit, seramik mıknatıs olarak ta bilinmekte ve düşük maliyeti ile ön plana çıkmaktadır. Alnico yüksek sıcaklığa dayanıklı olup Alüminyum (Al), Nikel (Ni) ve Kobalt (Co) içeren bir alaşımdır. Nd₂Fe₁₄B ise Neodimyum (Nd), Demir (Fe) ve Bor (B) içeren nadir toprak elementi malzemeler olup yüksek enerji üretimi ile ön plana çıkmaktadır. SmCo, Samaryum (Sm) ve Kobalt (Co) malzemeleri içeren mıknatıslar, mekanik dayanımı düşük ve maliyetinin fazla olması gibi durumlarına karşı yüksek enerji üretimi ile ön plana çıkmaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik motorlarında mıknatıs seçimi, motorun dayanıklılığı, gücü ve maliyetini etkileyen önemli unsurlardandır. Elektrikli araç motorları için genellikle Nd₂Fe₁₄B (Neodimyum) ve SmCo (Samaryum-Kobalt) mıknatıs türlerinin Çizelge 2.2’de verilen kriterler nedeniyle tercih önceliklerinin olduğu görülmektedir.

2.2.3 Kalıcı mıknatıslı senkron motorun eşdeğer devresi ve eşitlikleri

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun (KMSM) matematiksel modeli d-q eksenlerinde ele alınmaktadır. Şekil 2.9’da KMSM’nin d-q elektrik eşdeğer devreleri verilmektedir. Bu sayede iki bileşenin analizi ve matematiksel hesaplaması kolaylaşır. d-q eksenlerinde ki matematiksel model, motorun dinamik davranışını incelemek ve performans analizini yapılmasına olanak tanır. Özellikle motorun geçici rejimdeki tepkisi, hızlanma ve yavaşlama süreçleri, bu model ile incelenebilir. KMSM’nin nominal hızda çalışırken gösterdiği davranış bu model yardımıyla analiz edilebilir [8,9].



Şekil 2.9: SMSM'nin d-q Eşdeğer Devreleri

Yukarıdaki eşdeğer devrelerden aşağıdaki eşitlikler yazılabilir;

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \quad (2.1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_r \psi_d \quad (2.2)$$

Burada; V_d ve V_q d-q eksen gerilimlerini, ψ_d ve ψ_q d-q eksen akılarını ifade etmektedir.

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + \psi_m \quad (2.3)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikler yukarıdaki denklemlerde yerine yazılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir; burada L_d ve L_q ; d-q eksen indüktanslarını, R_s ; stator sargı direncini (Ω), ω_r ; rotor hızını tanımlar.

$$V_d = R_s i_d + \frac{L_d di}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \quad (2.5)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_M \quad (2.6)$$

Bu eşitliklerden elde edilen akım bileşenleri aşağıdaki gibidir, I_d ve I_q ; d-q eksen akımlarını ifade eder.

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} [V_d - R_s i_d + \omega_r L_q \dot{i}_q] \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} [V_q - R_s i_q - \omega_r L_q \dot{i}_q - \omega_r \psi_M] \quad (2.8)$$

Ψ_d ve Ψ_q akıları, p ; kutup çifti sayısını tanımlar ve moment denklemi aşağıdaki gibidir.

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_M i_q + (L_d - L_q)i_q i_d) \quad (2.9)$$

Bu denklemde, birinci terim mıknatıs tarafından üretilen momenti ikinci terim ise relüktans momentini temsil eder. Yüzey mıknatıslı KMSM'lerde L_d ve L_q indüktansları birbirine eşit olduğundan, relüktans momenti sıfırdır. Bu durumda moment denklemi aşağıdaki gibidir.

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi_M i_q] \quad (2.10)$$

hareket denklemi ise,

$$T_e - T_y = J \left(\frac{1}{p}\right) \frac{d\omega_e}{dt} + B \left(\frac{1}{p}\right) \omega_e \quad (2.11)$$

Şeklinde yazılır ve eşitlikte kullanılan parametreler J ; atalet momenti, B ; sürtünme katsayısı, ω_e ; elektriksel hız şeklinde açıklanabilir [10].

2.3 Asenkron ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Deneysel Olarak Kıyaslanması

Elektrikli araç tahrikinde motor seçimi yapabilmek oldukça önemlidir. Geliştirilen elektrikli araçların elektrik tahrik motorları incelediğinde KMSM ve ASM'lerin sık tercih edildiği görülmektedir. Benzer etiket değerlerine sahip bu iki motor türünün deneysel olarak kıyaslanması son derece önemli ve seçim kriterleri açısından kritik öneme sahiptir.



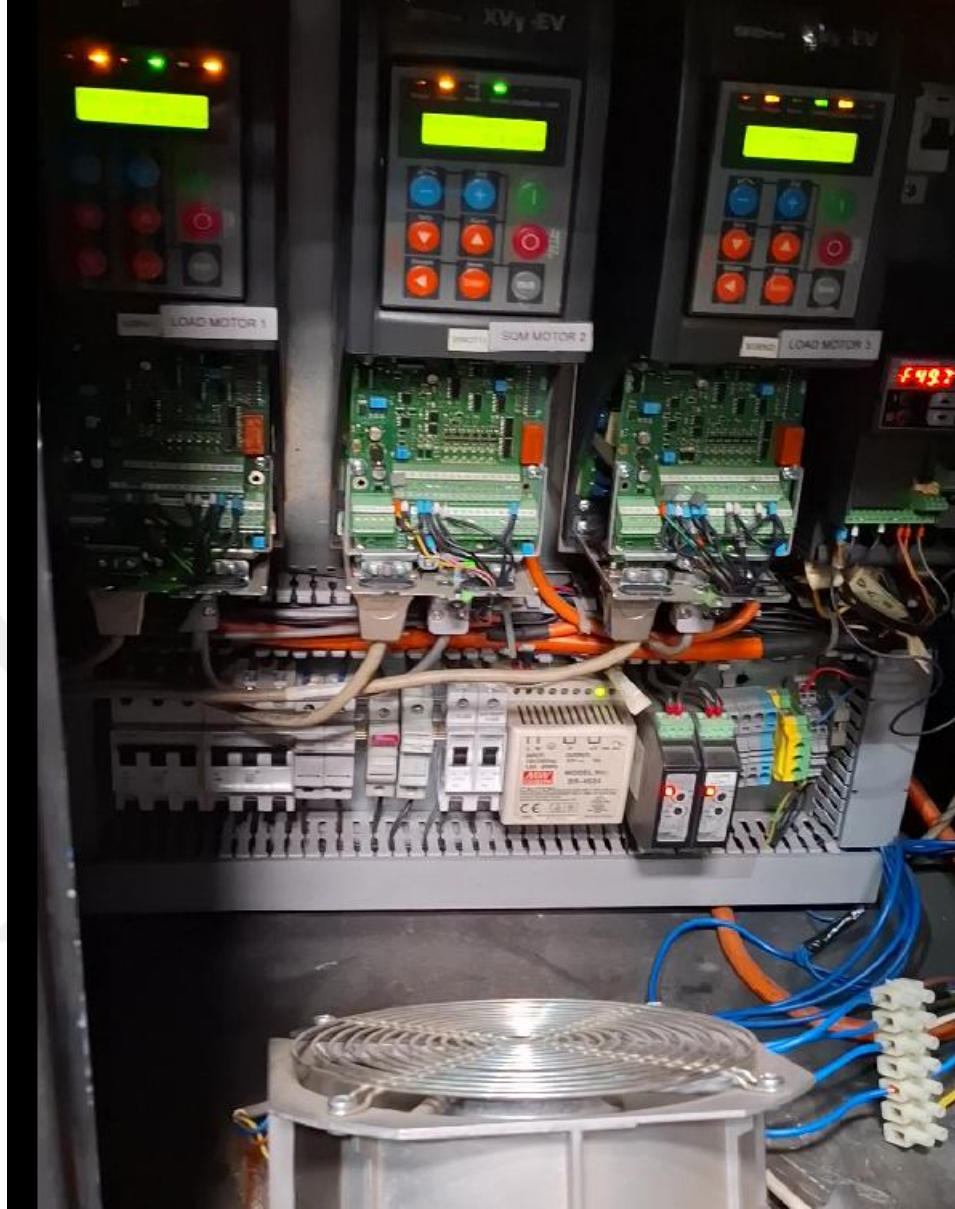
Şekil 2.10: ASM ve KMSM Deney Düzeneği

2.3.1 KMSM test motoru

Çizelge 2.3: KMSM Test Motoru Etiket Bilgisi

ÖZELLİK	DEĞER
Güç (Pn)	2.09 kW
Nominal Gerilim (Vn)	375 V
Nominal Akım (In)	6 A
Atalet Momenti (Jm)	0.087 kgm ²
Nominal Moment (Mn)	100 Nm
Nominal Hız (n)	200 rpm
Frekans (f)	113.3 Hz
Ağırlık	68 kg

Çizelge 2.3’de etiket bilgisi verilen KMSM düşük hızda yüksek moment verebilen özelliği ile böyle bir özellik gereksinimi olan küçük güçte elektrikli araçlarda kullanılabilir.



Şekil 2.11: Test Panosu

Eşdeğer parametre değerlerine sahip iki karşı yük motoru ve KMSM ile ASM'nin performanslarının incelendiği bu deney düzeneğinde kullanılan test panosu Şekil 2.11' de gösterilmektedir. Burada KMSM, Encoderli Servo Sürücü sistemi ile çalıştırılmıştır. Hassas hız ve konum kontrolü ,düşük hızlarda kararlı çalışma, yüksek moment hassasiyeti gibi özellikleri ile öne çıkan bu kontrol yöntemi KMSM için etkili ve verimli bir tekniktir.

Motorun 200 dev/dk değerinde düşük devir sayısında çalıştığı bu deney düzeneğinde servo sürücü ile hassas ve stabil hız kontrol sağlanabilir. Her biri farklı motoru kontrol eden servo sürücüler ile çalışma düzenekleri kontrol altına

alınabilmektedir. Her sürücünün altında bulunan ara yüzey kartları ile motor-sürücü arasındaki güç ve sinyal iletişimi sağlamaktadır. Sigorta ve röleler, sistemin güvenli çalışmasını sağlamakta olup, arıza durumları için gerekli güvenlik tedbirleri bu deneyde alınmıştır.

2.3.2 ASM test motoru

Çizelge 2.4: ASM Test Motoru etiket bilgisi

ÖZELLİK	DEĞER
Nominal Güç	2.20 kW (50 Hz)
Nominal Hız	1445 rpm
Gerilim	230/400V (50 Hz)
Akım	4.75 A
Cos ϕ (Güç Faktörü)	0.79
Verimlilik (%)	86.7

Çizelge 2.4’de verilen ASM’nin etiket değerinde görüldüğü üzere nominal hız ve moment istenilen aynı değerde değildir. Hızı düşürmek ve momenti yükseltmek için Redüktör kullanımı gerekmektedir. Redüktör genellikle bir motordan gelen yüksek hızdaki devir sayısı değerlerini düşürerek redüksiyon oranı doğrultusunda moment değerini yükseltir. Elektrikli araçlarda ASM’ler redüktör ile birlikte kullanıldığında, motorun yüksek hız ile hareket eden mili, istenilen hızlarda ve momentlerde kullanımı mümkün kılar. Elektrikli araçların özellikle ilk kalkış anında yüksek moment gereksinimleri düşünüldüğünde, redüktör gerekli olan momenti uygun hızda araç tekerleklerine iletmektedir. Bu sayede elektrikli araç motorları daha verimli çalışacağından bataryanın kullanım ömrü artacak ve araç menzili daha iyi duruma gelebilecektir.

2.3.2.1 ASM redüktörü özellikleri



Şekil 2.12: Deney Düzeneği ve Redüktörün Yerleşimi

Çizelge 2.5: Redüktör Etiket değerleri

Power: 2,2 kW	Ratio: 7,60
Speed: 184 dev/dk	M.Pos.: M1

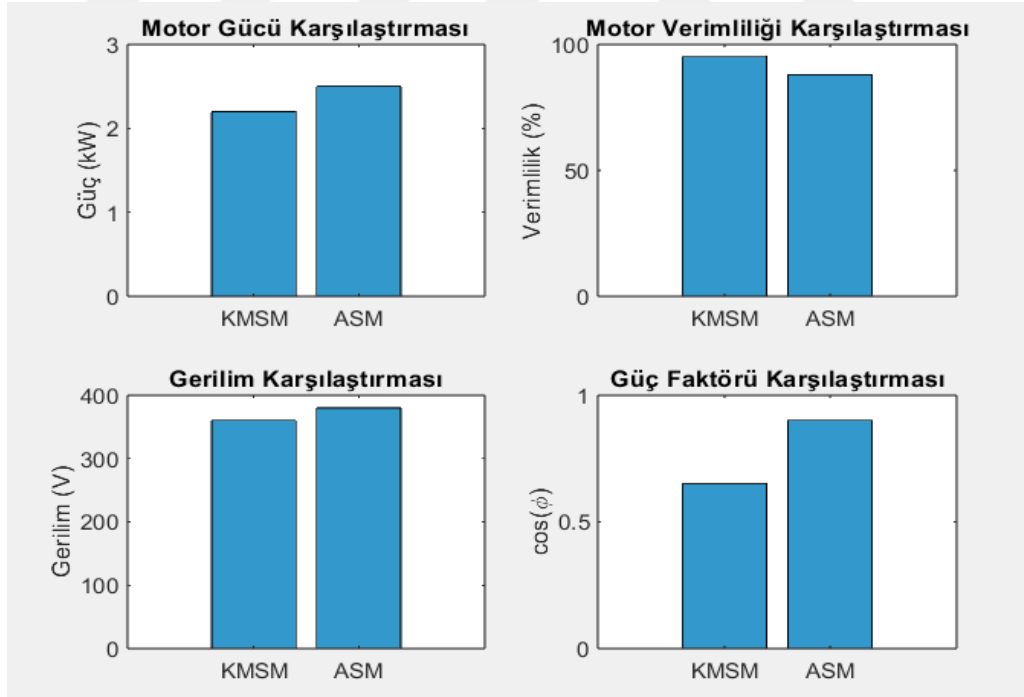
Deney düzeneğinde kullanılan ASM'nin miline bağlı redüktörün etiket bilgisi Çizelge 2.5'de verilmektedir. Redüktörün bağlı olduğu motorun gücü 2.2 kW ve çıkış devir sayısı 184 dev/dk olup, reduksiyon oranı 7.60 olarak yukarıda gösterilmektedir. Bu oran giriş miline verilen hızın 7.6 kat azaltılarak çıkış miline verilmesini sağlamaktadır. Bu orandaki azalma ile benzer parametreler üzerinde iki tür olan test motorunu kıyaslamak seçim kriteri konusunda yol gösterici olacaktır.

2.3.3 KMSM ve ASM performanslarına ilişkin deney sonuçlarının incelenmesi

Yapılan deneyde 100 Nm ve 200 d/dk ile karşı yük motorları aynı özelliğe sahip KMSM ve ASM motoru kıyaslanarak, verimlilik ve performans açısından yorumlanmış ve ölçüm sonuçları paylaşılmıştır.



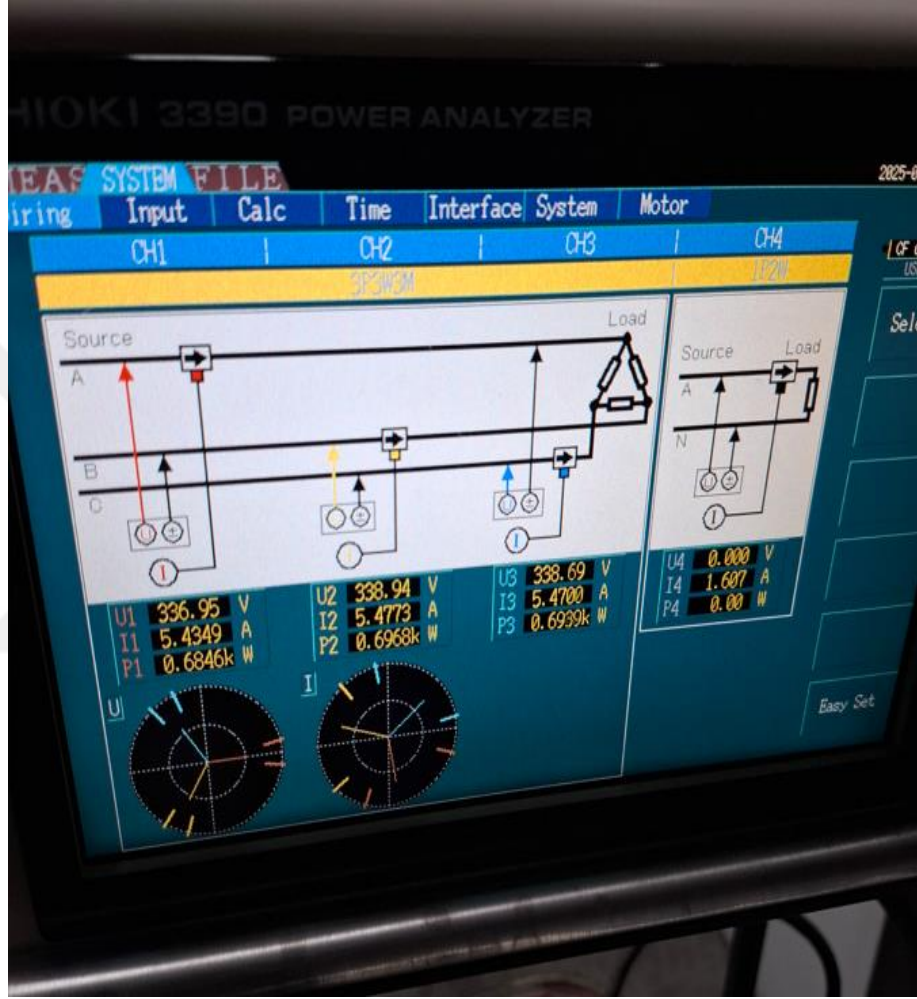
Şekil 2.13: KMSM Ölçüm Sonuçları (a) ve ASM Ölçüm Sonuçları (b)



Şekil 2.14: KMSM ve ASM Performans Karşılaştırılması

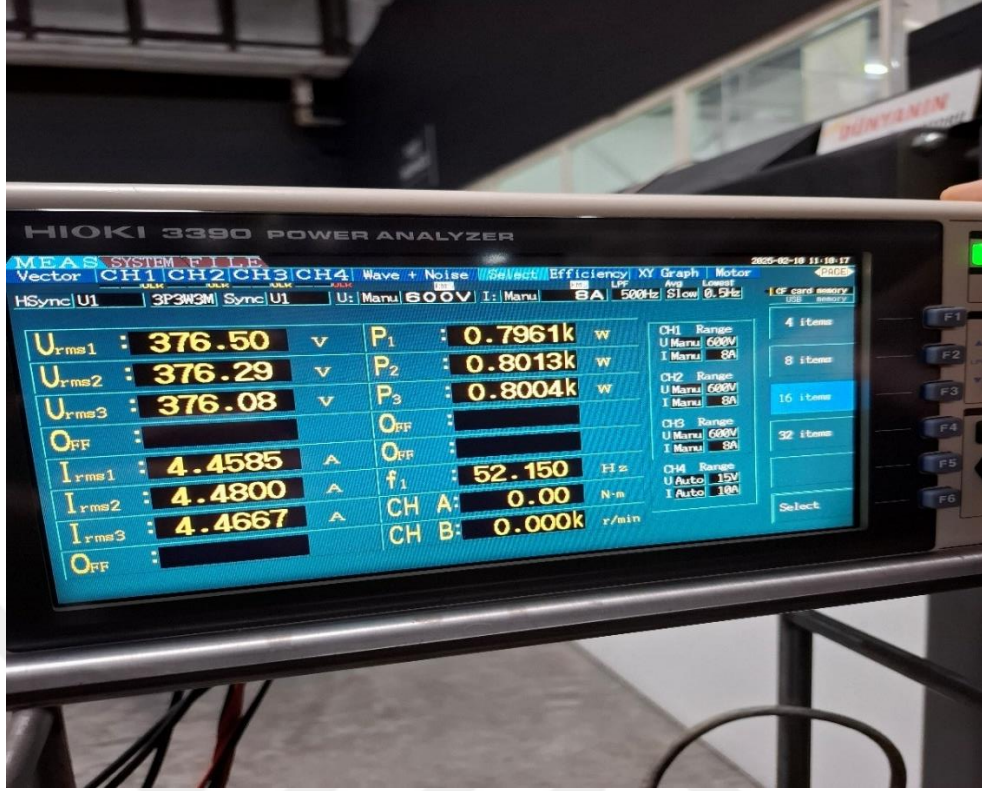
Elde edilen veriler sonucunda KMSM'nin daha düşük bir giriş gücüyle aynı çıkış mekanik gücü ürettiği görülmektedir. ASM'nin güç faktörü daha iyi olmasına rağmen verimi daha düşüktür. KMSM daha yüksek verim değeri ile ön plana

çıkılmaktadır. Yüksek frekanslarda olması sebebiyle daha yüksek hızlara KMSM ile ulaşılabilir bu da, elektrikli araç tahrikinde bu motorun kullanılması daha avantajlı bir seçenektir. ASM maliyet açısından düşüktür, ancak test verilerine göre KMSM'nin elektrikli araç tahrikinde kullanılması daha uygun olacağı değerlendirilebilir.



Şekil 2.15: KMSM Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

Şekil 2.15 incelendiğinde, faz gerilimleri, faz akımları ve güç dağılımının oldukça dengeli olduğu görülmektedir. Bu durum kullanılan kontrol yönteminin etkili sonuçlar verdiğini ve test sisteminde yükün dengeli, giriş ve çıkış güçlerinin uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.16: ASM'nin Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

Şekil 2.16'da verilen enerji analizöründeki görüntüden anlaşılacağı üzere ASM'nin stator akımı içinde akım, gerilimi ve güç değerleri yaklaşık değerlerde elde edilmiştir. Güç faktörünün uygun görülen değerlerinde yaklaşık eşitliklerde olması yine bu motor için de sağlıklı bir kontrol yöntemi ve doğru bağlantıları yapıldığını göstermektedir.

Elektrikli araçlar için motor seçimi, uygulamanın gereksinimine bağlı olup, her iki motorun da avantaj ve dezavantaj vardır. Yapılan deneylerden görüldüğü üzere daha yüksek verim, hassas hız kontrolü, yüksek güç yoğunluğu, daha az ısınma ile daha iyi moment gibi unsurlarından dolayı KMSM'ler elektrikli araç tahrikinde daha çok tercih edilmektedirler. Maliyet, mıknatıs temini, üretim ve bakım gereksinimleri motorun dezavantajları arasında sayılabilir.

ASM'ler de elektrikli araç tahrikinde etkin olarak kullanılmaktadırlar. Daha düşük maliyeti olan ASM'ler sağlam ve dayanıklı yapıda olup, bakım gereksinimlerinin düşük olması bu motorlar için önemli seçim kriteridir. Ancak verimleri ve hızlanma performansları KMSM'ler kadar iyi değildir.

Genellikle binek elektrikli araçlar, spor elektrikli araçlar ve uzun menzilli elektrikli araç kullanıcılarına hitap etmek üzere tasarlanan KMSM, daha ucuz maliyet beklentisi olan, kamyon, otobüs ve endüstriyel elektrikli araçlarda ise ASM kullanılmaktadır.

2.3.4 KMSM ve ASM için kontrol yöntemleri

Motor verimleri ve uygulamalardaki başarıları için en önemli etkenlerden biri olan motor kontrol yöntemlerinin seçimi kritik öneme sahiptir. ASM ve KMSM'ler yapısal olarak farklı olduklarından sürüş ve kontrol tekniklerinin de buna uygun bir şekilde seçilmesi gereklidir.

ASM'ler için genellikle V/f kontrolü, alan yönlendirmeli kontrol, doğrudan moment kontrolü, kayma kontrollü skaler sürüş gibi kontrol yöntemleri genellikle tercih edilmektedir. Özellikle son dönemde önem arz eden ve geleceğin kontrol yöntemi olarak görünen Yapay Sinir Ağları destekli kontrol yöntemi de yine bu motorlar için tercih edilebilir bir yöntemdir.

KMSM'ler için alan yönlendirmeli kontrol, doğrudan moment kontrolü, doğrudan akım kontrolü, alan zayıflatmalı sürüş, en yüksek moment üzerinden akım kontrolü gibi birçok yöntem tercih edilebilir. Yine bu motor için de YSA kontrolü önemli ölçüde iyi bir kontrol yöntemi olacaktır.

ASM'lerde V/f kontrolü gerilim / frekans oranıyla basit ve düşük maliyetli bir kontrol yöntemi sağlar, ancak bu yöntem düşük hassasiyetlidir. Alan yönlendirmeli kontrol motor manyetik alanını referans alarak moment ve akıyı yüksek hassasiyet ile kontrol eder. Doğrudan moment kontrolü ise akıyı ve momenti düzenleyerek kontrol sağlar. Yüksek moment üzerinden akım kontrolü en düşük akımla en yüksek momenti hedeflerken, alan zayıflatma motorun nominal hızının üzerine çıkmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada kıyaslanan her iki motor için en çok tercih edilen kontrol yöntemleri Çizelge 2.6'da kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 2.6: KMSM ve ASM Kontrol Yöntemlerinin Kıyaslanması

Kontrol Yöntemi	Açıklama	KMSM	ASM
V/f Skaler Kontrol	Basit ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Gerilim ve frekans değiştirilerek, hız kontrol edilir.	Çok uygun değildir.	Uygundur.
Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC)	Hassas kontrol ve yüksek verimliliği önemlidir. Akı ve moment bileşenleri ayrı ayrı kontrol edilir.	En uygun yöntemdir. Hassas kontrol sağlar.	Uygundur. Stabil bir test sağlar.
Kayma Frekansı Kontrolü	Rotor kaymasının tespiti ile hız kontrolü yapılır.	Uygun değildir.	Uygundur.
Yapay Sinir Ağları Destekli Kontrol	Motor karakteristiği yapay zeka algoritmaları ile değerlendirilir.	Uygundur. Geleceğin en iyi kontrol yöntemi olarak değerlendirilebilir.	Uygundur.
Doğrudan Moment Kontrolü	Moment ve manyetik akı doğrudan kontrol edilir. Hızlı ve dinamik tepki sağlar.	Uygundur. Hızlı cevap verir. Zorlu uygulamalarda tercih edilebilir.	Uygundur.

2.3.4.1 V/f skaler kontrol

Özellikle ASM kontrol yöntemi olarak kullanılan V/f skaler kontrol metodu, motorun hızı, frekans ve gerilimini doğru orantılı bir şekilde ayarlanarak kullanılan bir yöntemdir. Genellikle yüksek performans gerektirmeyen basit ve düşük maliyetli uygulamalarda tercih edilmektedir. Motorun besleme gerilimini ve frekansını sabit oranda azaltıp, arttırarak manyetik akıyı sabit tutmayı hedefler. Bu sabit oran ile istenilen akı seviyesini koruyarak, motorun manyetik devresinin doyuma girmesini önler. Frekans arttıkça besleme gerilimi de manyetik akının değişmesini önlemiş olur. Bu kontrol yöntemi, rotor konumu veya motor parametreleri üzerine geri besleme bilgisi olmadan, açık çevrim kontrol yaklaşımı kullanmış olur.

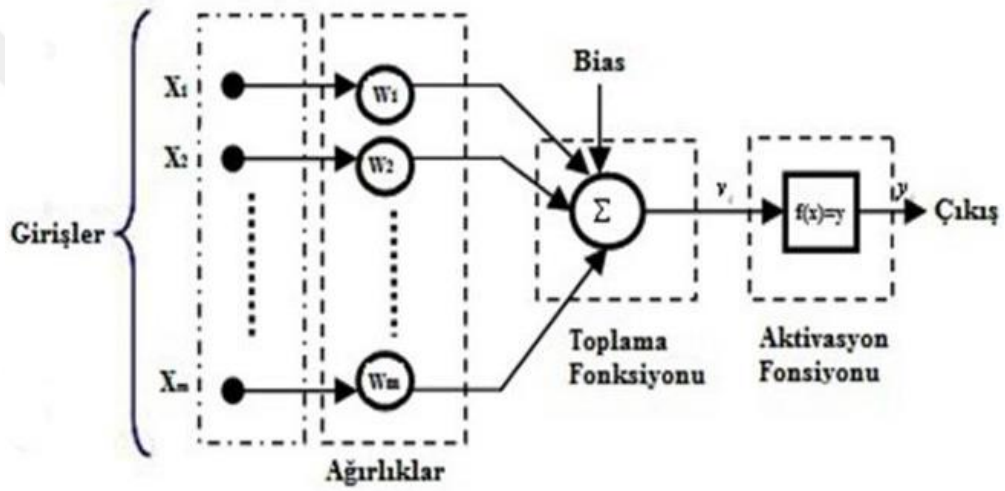
2.3.4.2 Alan yönlendirmeli kontrol

Alan yönlendirmeli kontrol (Field-Oriented Kontrol-FOC), sabit mıknatıslı senkron motorlar için hassas kontrol sağlayan ve en çok kullanılan kontrol yöntemidir. Bu teknik, manyetik alanı ve üretilen momenti düzenleyerek motor

uygulamalarda tercih edilebilir. Karmaşık bir yapı içermesi ve yüksek maliyetinden dolayı kullanım alanı biraz sınırlı kalmaktadır.

2.3.4.4 Yapay sinir ağları destekli kontrol

Yapay Sinir Ağları (YSA) destekli kontrol geleneksel yöntemlerin ötesinde geleceğin kontrol yöntemi olarak değerlendirilmekte ve öngörü tahmini ile birçok parametrenin dinamik bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Klasik yöntemlerle ve karmaşık durumlarda çözilemeyen problemleri makine öğrenmesi yöntemiyle değişken parametrelerden veri setlerinin oluşturulması ve öngörü tahmini ile motor kıyasında çok etkili bir yöntemdir.



Şekil 2.18: YSA Destekli Kontrol Genel Şeması [12]

YSA'lar motorun davranışını öğrenerek moment, hız gibi birçok parametreyi dinamik bir şekilde kontrol edebilirler. Örnek test verileri girdi, elde edilecek değerler de çıktı katmanında yer alarak etkili ve verimli bir kontrol yöntemi olarak kullanılırlar.

2.3.4.5 Doğrudan moment kontrolü

Motorların yüksek dinamik performansla kontrolünü sağlamak amacıyla geliştirilen bir yöntem olup, motor momentini ve stator manyetik akısı gibi büyüklükleri doğrudan kontrol eden bir tekniktir. Bu yöntemde, motorun stator akım ve gerilim verileri kullanılarak moment ve akı büyüklükleri tahmin edilir; bu tahminler, histerezis kontrolcülerini aracılığıyla referans değerlerle karşılaştırılır ve

oluşan hatalara göre en uygun inverter anahtarlama durumu, önceden tanımlı bir karar tablosu yardımıyla seçilir.



3. ORTA GÜÇTE BİR KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN DENEYSEL PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Elektrikli araç teknolojisinde aranan verimlilik, kompakt tasarım ve maliyet gibi kavramlar kritik öneme sahiptir. Bu bölümde, 49 kW gücünde bir KMSM'nin çalışma koşulları ve performans analizleri yapılarak elektrikli araç tahrikinde bu motorların daha fazla tercih edilmesinin deneysel olarak incelenmesi sağlanacaktır. Bu güçteki bir motor küçük ve orta sınıflı elektrikli araçlar için yeterli bir sürüş performansı sağlamaktadır. Yüksek verimliliği sayesinde araç teknolojisinde sık kullanılan bu motorlar enerji tasarrufu ve uzun menzil gibi önemli bir unsur için etkili çözümler sunabilmektedirler. KMSM'ler için yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu, moment gibi etkenler sebebiyle seçim açısından bir adım önde oldukları görülmektedir.

3.1 Motor Parametreleri

Çizelge 3.1: Motor Parametreleri

ÖZELLİK	DEĞER
In	135 A
Vn	370 V
Mn	3120 Nm
Pn	49.01 kW
f	110 Hz
n	150 d/dk
Emk	215 V
IP	54
Duty	S1

Test motorunun parametreleri incelendiğinde, güç değeri olarak test motoru hafif ticari araçlar ve kompakt otomobiller için yeterlidir. Elektrikli araç batarya sistemleri incelendiğinde 300-800V aralığında çalışma gerilimleri olduklarını bilinmektedir. Test motoru araçlarda kullanılan batarya sistemi ile uyumludur. Yüksek moment seviyesi ve düşük devir sayısı ile güçlü bir redüktör yardımıyla düşük hızlı yüksek moment gereksinimi gerektiren ağır elektrikli araçlar için uygun bir motordur. Ağır hizmet araçlarından forklift ve çekici için uygun parametre değerlerine sahiptir.

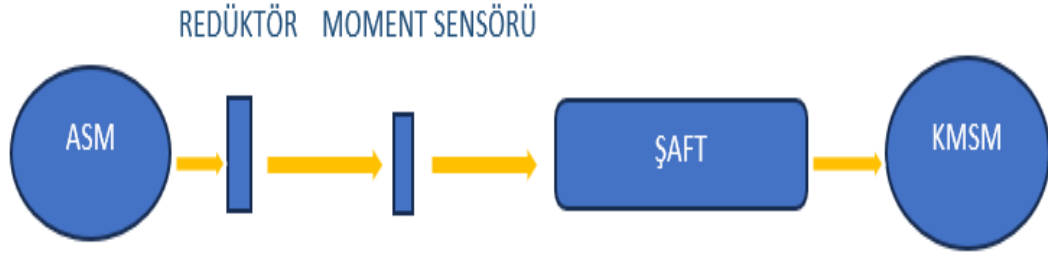
Test motorunun yüksek moment üretme yeteneği ve düşük devirde çalışma özelliği ile yüksek moment gerektiren elektrikli araçlar için bilhassa, yokuş çıkma, ağır yük taşıma ve zorlu arazi koşullarında ilerleme durumlarında uygun olduğu gözlenmektedir.

Elektrikli araçlarda ihtiyaç olması halinde redüktör ve şanzıman kullanılarak geniş hız aralıkları elde edilebilir. Elektrikli araçlar incelendiğinde çoğu elektrikli araçta tek vitesli şanzıman kullanıldığı görülmektedir. Elektrik motorları geniş devir aralığında verimli çalışabildiklerinden tek vitesli şanzıman kullanımı enerji kayıplarını azaltarak, karmaşıklığı önlemektedir. Elektrikli araçlarda redüktör kullanımı da yaygın şekilde görülmektedir. Redüktörler araç motorunun sağladığı düşük veya yüksek devirleri araç tekerleklerine istenen değerlerde gerekli devirleri iletmek amacıyla kullanılır.

Elektrikli araçlarda tek bir motor seçimi tek bir sistem varlığı söz konusu değildir. Yüksek performanslı araç modellerinden, Porsche Taycan, Rimac C_Two gibi araçlar şanzıman kullanımı ile yüksek hız ve verimlilik gereksinimi karşılamak amacıyla üretilmektedir. Redüktör kullanımı da araç tekerlerine uygun ve istenen değerlerde aktarım için kullanılabilir. Tesla Model S, Rivian R1T, Ford Mustang Mach-E gibi araçlar yüksek moment üretimi ile düşük hızda verimli çalışma gereksinimi için redüktör kullanabilmektedirler.

Özetle her iki uygulamada amaç, elektrikli araç tahrikini en iyi şekilde gerçekleştirme çabasıdır. Arge süreçleri çeşitli beklentilere göre uygunluk arayışını sürdürmektedir.

3.2 Motor Test Düzenegi



Şekil 3.1: KMSM Test Düzenegi Blok Şeması

KMSM'nin performansını ve verimliliğini çeşitli değer aralıklarında test etmek için kurulan test düzenegi Şekil 3.1'deki gibi oluşturulmuştur. KMSM'nin yüklenebilmesi için kullanılan 129 kW gücündeki ASM çalıştırılarak, üretilen enerji redüktör aracılığıyla mile iletilir ve mil dönmeye başlar. Mil üzerindeki moment, sensör ile ölçülerek motor ve redüktörün verimi incelenir. Mil redüktörden gelen momentini KMSM'ye iletmektedir. Bu düzenek ile motor performansı detaylı analiz edilmektedir. KMSM testi için kullanılan ASM'nin etiket değerleri Çizelge 3.2'de sunulmuştur. Test için kullanılan kontrol yöntemi Enkoderli Sürücülü Kontrol yöntemidir.

Çizelge 3.2: ASM Etiket Değeri

ÖZELLİK	DEĞER
P_n	129 kW
n	1000 d/dk
M_n	1232 Nm
f	33.9 Hz
n_{max}	3400 d/dk
η	92.8
Duty	S1

Enkoderli sürücülü kontrol yöntemi, elektrikli araç tahrik motorlarında konum, yön kontrolü ve hassas değerleri elde etmek amacıyla tercih edilen bir

yöntemdir. Bu kontrol yönteminde sistemin geri bildirimini enkoder sensörleri aracılığıyla yapılmaktadır. Elektrikli araç motor seçimlerinde de sıklıkla tercih edilen bu kontrol yöntemi hassas moment kontrolü, faydalı (rejeneratif) frenleme gibi çalışma modalarında etkili olmaktadır.



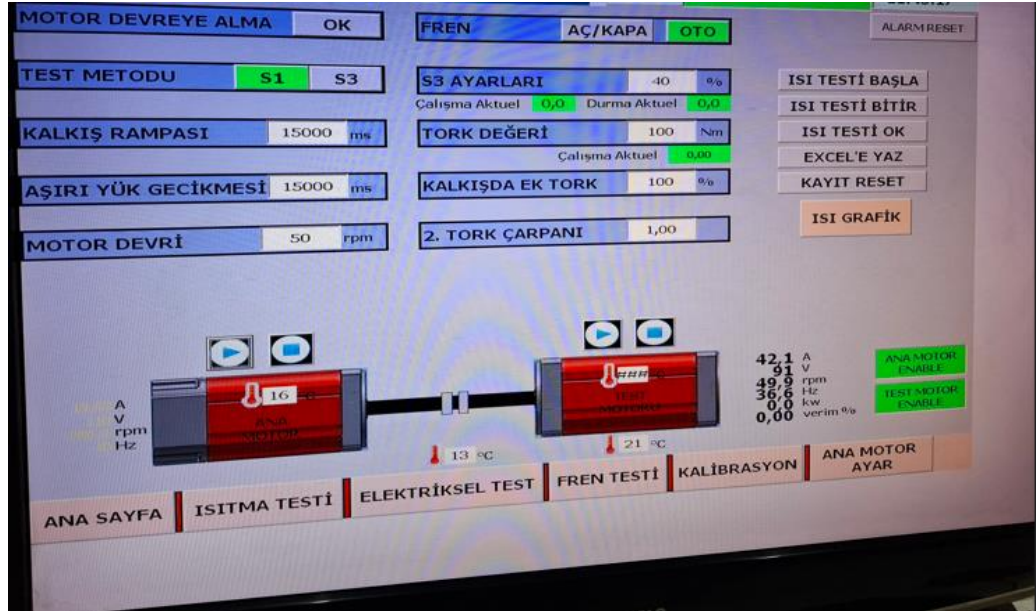
Şekil 3.2: KMSM Deneysel Test Düzenegi

Şekil 3.2’de KMSM test ünitesi ve güç analizörü bağlantısı görülmektedir. Güç analizörü ile motorun bazı değerleri değişken parametrelerde alınarak, ölçüm sonuçları incelenmiştir. Buralardan alınan ölçümler sürekli olarak kaydedilerek, motor performansı test edilmiştir.



Şekil 3.3: Motor Ölçüm Bağlantıları

Motorun bağlantıları motor performansını ölçecek şekilde yapılarak, motorun çalışma akımı için akım pensleri, motorun mil konumu ve hızını ölçmek için enkoder bağlantısı yapılmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra test motoru ve karşı yük motoru çalıştırılarak bilgisayar üzerinden ve güç analizörü üzerinden gerekli ölçümler yapılarak motor detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 3.4: Motor Test Parametre Ekranı

3.3 49 kW gücündeki KMSM'nin test sonucu elde edilen değerleri

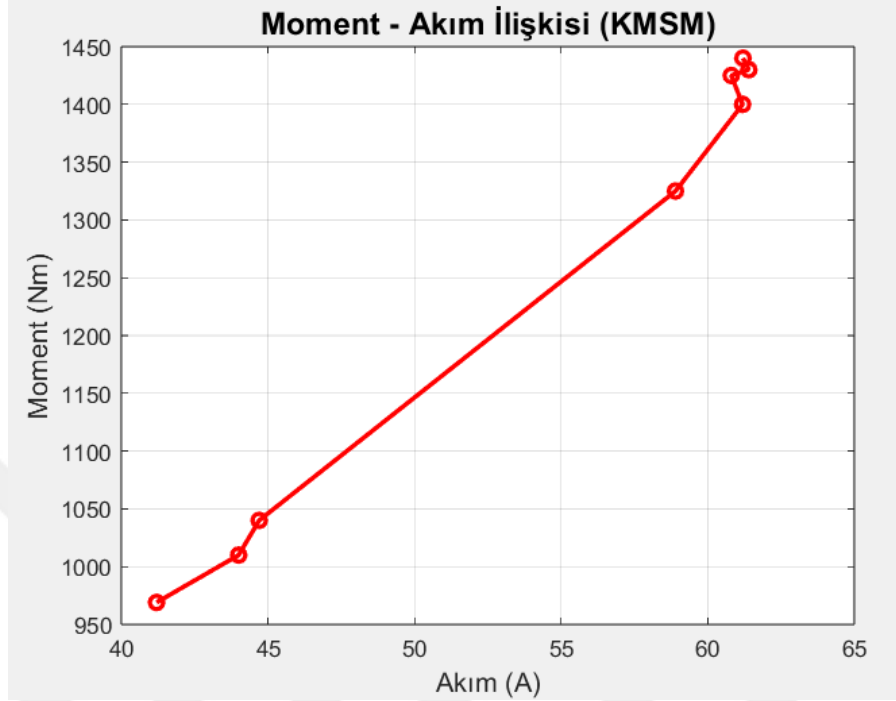


Şekil 3.5: Örnek Ölçüm Ekranı Görüntüsü

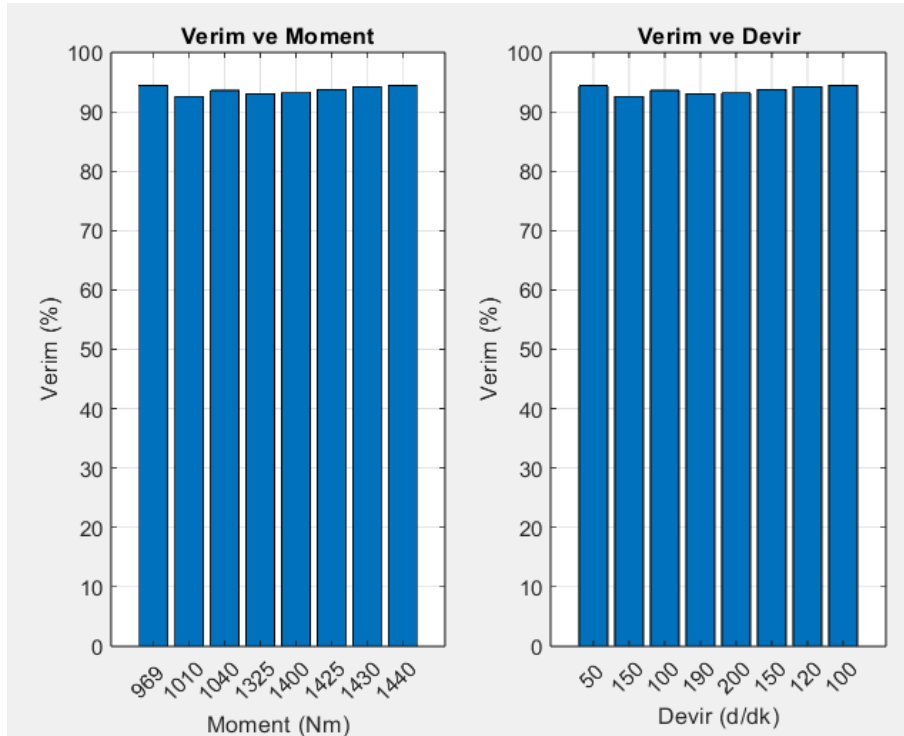
Çizelge 3.3: KMSM'nin Performans Değerleri

MOMENT	D/DK	AKIM	GERİLİM	GÜÇ	COS ϕ	FREKANS	VERİM
969 Nm	50 d/dk	41,2 A	91 V	5,3 kW	0,82	36,66 Hz	94,4
1010 Nm	150 d/dk	44 A	258 V	16,9 kW	0,86	110 Hz	92,6
1040 Nm	100 d/dk	44,7 A	176 V	11,5 kW	0,84	73,33 Hz	93,6
1325 Nm	190 d/dk	58,9 A	342 V	28,4 kW	0,82	139,34 Hz	93,05
1400 Nm	200 d/dk	61,19 A	367 V	31,56 kW	0,81	146,09 Hz	93,17
1425 Nm	150 d/dk	60,8 A	275 V	23,5 kW	0,82	110 Hz	93,74
1430 Nm	120 d/dk	61,4 A	225 V	19,1 kW	0,80	88 Hz	94,23
1440 Nm	100 d/dk	61,2 A	190 V	15,8 kW	0,78	74 Hz	94,43

KMSM Ölçüm değerlerindeki verilerin ilişkilerini anlamak ve yorumlamak için MATLAB programında eğrilerin elde edilmesi ölçülen ve Elektrikli araç tahrikinde bu motorun ASM'ye kıyasla uygunluğunun incelenmesi önemlidir.



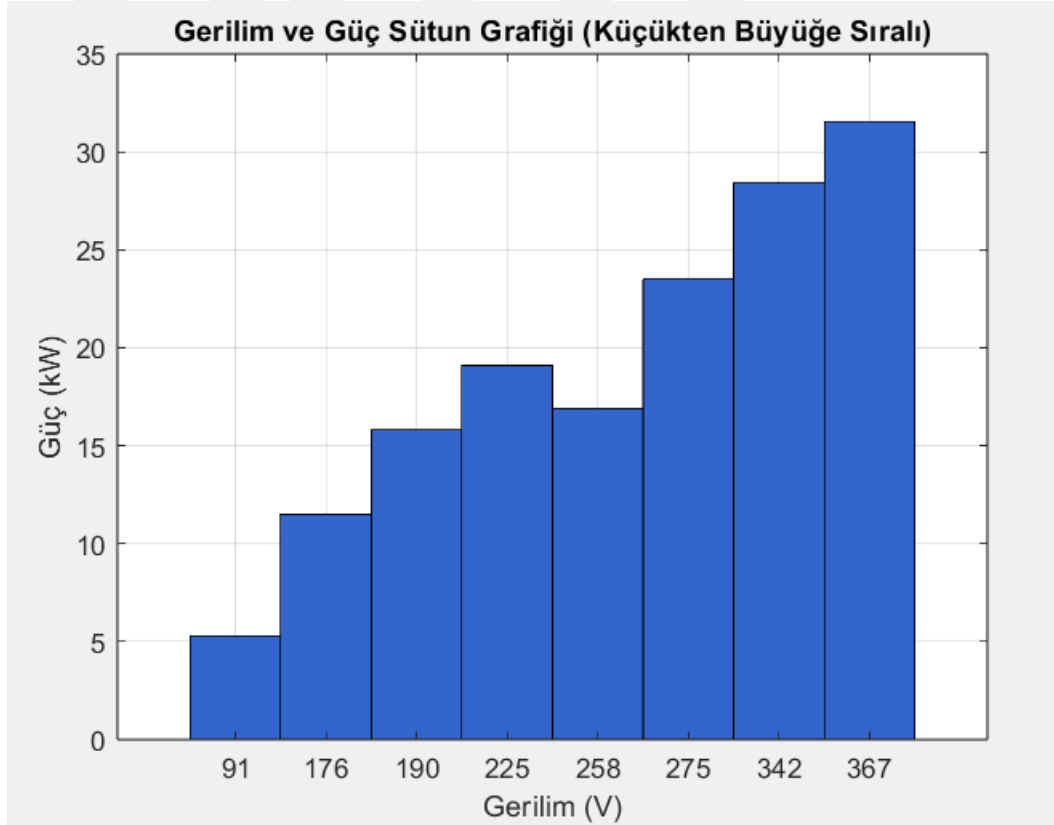
Şekil 3.6: KMSM Moment Akım Karakteristiği



Şekil 3.7: KMSM Verim, Moment ve Devir Sayısı Grafiği

KMSM'lerde moment üretimi motorun, stator sargılarına uygulanan akımla ilişkilidir. Test motorunda akım ve moment karakteristiğinden görüldüğü üzere, akım miktarı arttıkça moment artışı gözlenmektedir. Ancak, yüksek moment beklentilerinde akım artışı motoru aşırı ısıtabilir ve bu durum termal sınırlamalara yol açabilir. Bu sebeple ideal akım artışı ve moment dengesinin sağlanması önemlidir.

Test motorunun verimi genel olarak %93-94 aralığındadır ve yüksek verimli bir motordur. Bu verimlilik değeri elektrikli araçlar için oldukça önemlidir. Motorun veriminin yüksek olması, bataryanın da etkin ve verimli kullanılmasını sağlar. Ayrıca, yüksek verimli motorlar faydalı (rejeneratif) frenleme sırasında enerji dönüşüm kayıplarını da olumlu yönde etkileyecektir. Bu sebeplerle KMSM elektrikli araç tahrikinde yoğun bir kullanıma sahiptir.



Şekil 3.8: Test Motorunun Gerilim ve Güç Grafiği

Yapılan deney sonuçları ve grafikler incelendiğinde test faaliyeti gerçekleştirilen KMSM'nin performansı farklı yük koşullarında gözlenmiştir. Motorun momenti 969 Nm'den başlayıp 1440 Nm'ye kadar çıkmaktadır. Elektrikli araç tahrikinde böyle bir motor kullanılması çalışma verimini artırması

beklenmektedir. Şekil 3.8’de sunulan grafikler incelendiğinde gerilim arttıkça güç miktarının da arttığı görülmektedir. Akım ve güç ilişkisi incelendiğinde ise, yüksek hızlarda daha fazla akım gereksinimi motorun daha yüksek güç seviyelerinde çalıştığını ve daha fazla akıma ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Motor verimi incelendiğinde verimliliğin en yüksek %94,4 değerine ulaştığı görülmektedir. Motor geniş bir hız aralığında yüksek verimlilikte çalışmakta ve bu durum, hem düşük hızda hem de yüksek hızda güç üretme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Elektrikli araçlarda özellikle istenen bu durum, KMSM tercihini bir adım öteye taşımaktadır.

Elektrikli araçlar için uygun motor seçimi değerlendirildiğinde KMSM’ler verimlilik, esnek moment ve hız özellikleri açısından değerlendirildiğinde, yüksek performanslı olarak tercih edilmektedir. Özellikle elektrikli araç teknolojisinde beklenen yüksek hızlanma düzeyi sebebiyle KMSM’lerin daha çok tercih edildiği görülmektedir.

ASM’ler ise daha basit yapıda olmaları, düşük maliyetli ve dayanıklı olması sebebiyle elektrikli araç tahrikinde tercih edilen bir motor türüdür. Ancak KMSM’ler kadar yüksek moment yoğunluklarına ve verimliliğe sahip değildirler. ASM’ler özellikle değişken yükler altında verimlilik kayıpları yaşayabilmektedirler. Ancak maliyet ve basitlik ön planda olduğunda ASM’ler tercih edilebilir.

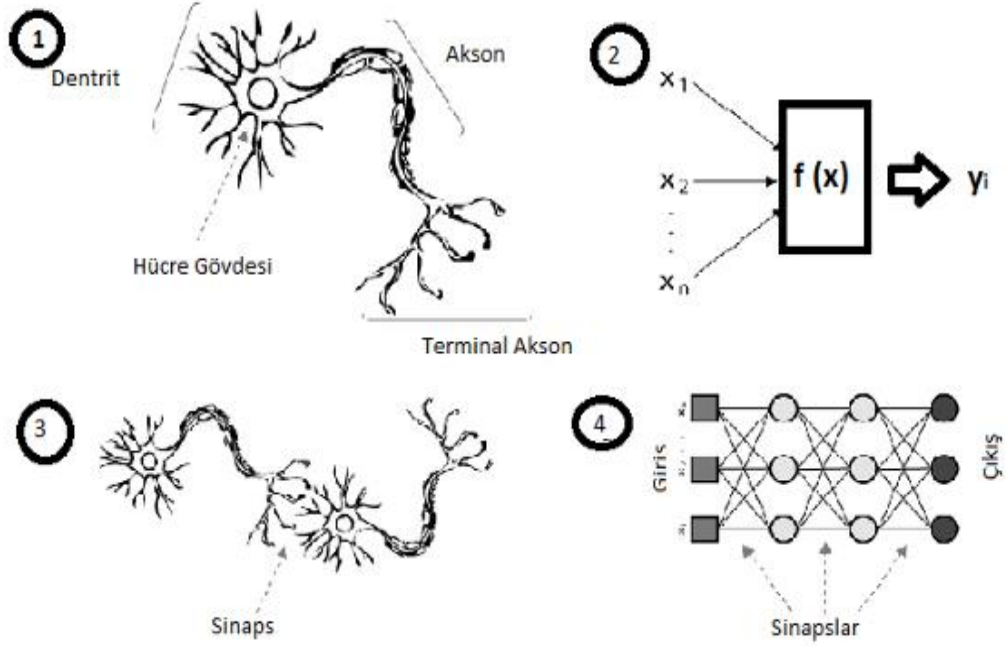
Sonuç olarak, her iki motor tipi de farklı ihtiyaçlar ve şartlara göre avantajlar sunmakta olup, hangi motorun tercih edileceği bu iki motorun avantaj ve dezavantaj durumlarına göre değerlendirilmelidir. Bu süreçte motor kontrol yöntemleri ve sistem bütünlüğünün de önemi unutulmamalıdır. Motor, batarya ve termal yönetim sistemi gibi unsurların birbirleri ile uyumlu olması, elektrikli araçların verimli, güçlü ve uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır.

3.4 Yapay Sinir Ağları ile Performans Tahmini

Yapay Sinir Ağları Modeli özellikle enerji üretimi, motor performansı, sistem verimliliği gibi konularda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu bölümde YSA’nın genel özellikleri ve test faaliyeti gerçekleştirilen KMSM’nin YSA ile performans tahmini yapılarak elektrikli araçlardaki önemi ele alınacaktır.

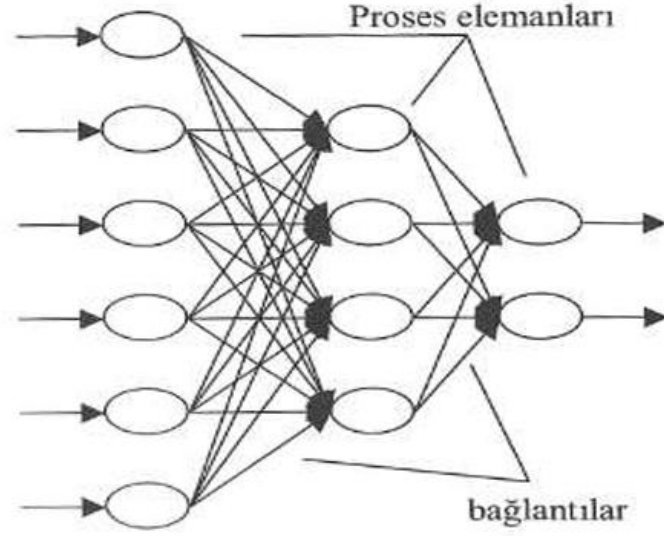
3.4.1 Yapay sinir ağı

İnsan beyninin bilgi işleme süreçlerinden esinlenerek tasarlanmış matematiksel modelleridir. Karmaşık veri ilişkilerini modelleme, desen tanıma, sınıflandırma, regresyon ve diğer görevler için kullanılabilirler [13].



Şekil 3.9: Biyolojik Sinir Hücresi ve Yapay Sinir Ağı [14]

Biyolojik sinir sistemleri, insan beyninin bilgi alma, işleme ve tepki verme süreçlerini başarıyla yöneten doğal yapılarıyla, yapay sinir ağı sistemlerinin gelişmesinde etkin rol oynamıştır. Şekil 3.9'da görseli verilen Biyolojik Sinir Hücresi ve Yapay Sinir Ağı incelendiğinde bu iki yapı arasındaki benzerlik, doğadan esinlenerek geliştirilen YSA modelinin ne kadar güçlü ve etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.10: Yapay Sinir Ağı Örneği [15]

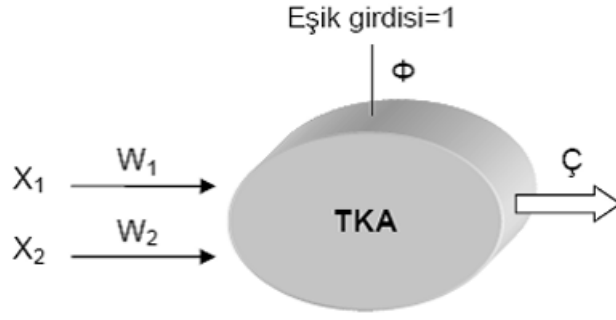
YSA'lar paralel çalışan ve hiyerarşik olarak birbirine bağlanmış hücrelerden bir araya gelmektedir. Bu yapı, çeşitli problemler için çözüm üretmede etkili bir yoldur. Hücreler arasındaki bağlantı ile bilgi aktarımı gerçekleşir ve her bağlantı, kendine özgü bir değere sahiptir. Bu bağlantı ağırlıklarının güncellenmesi ile öğrenme süreci gerçekleşir. Sistemden elde edilen bilgiler bağlantıların oluşturduğu hafızada depolanırlar. Bu hafıza yapay sinir ağının bilgiyi işleme ve karar verme mekanizmalarını oluşturmaktadır.

3.4.2 Yapay sinir ağ modelleri

YSA'lar yapılarına göre tek katmanlı algılayıcılar, çok katmanlı algılayıcılar, ileri beslemeli ve geri beslemeli yapay sinir ağları olmak üzere dört ana başlıkla incelenecektir.

3.4.2.1 Tek katmanlı algılayıcılar

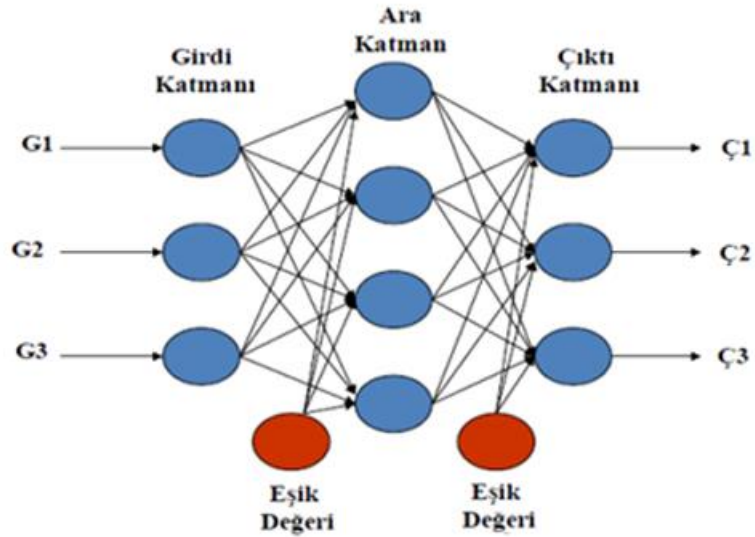
Tek katmanlı algılayıcılar sadece girdi ve çıktıdan oluşmaktadır. Tek katmanlı algılayıcılarda çıktı fonksiyonu doğrusaldır ve 1 veya -1 değerini almaktadır. Eğer çıktı 1 ise birinci sınıfa -1 ise ikinci sınıfa kabul edilmektedir [16].



Şekil 3.11: Tek Katmanlı Algılayıcı Modeli [16]

3.4.2.2 Çok katmanlı algılayıcılar

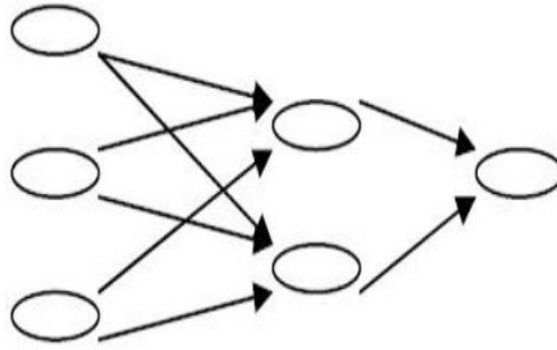
YSA ile olan çalışmalarda en çok kullanılan yöntemlerden birisi olan çok katmanlı algılayıcılarda üç temel yapı bulunmaktadır. Bu yapılar girdi katmanı, ara (gizli) katman ve çıktı katmanlarıdır. Girdi katmanında dış ortamdan alınan veriler sinir ağına iletilmektedir. Sonrasında ara katmana iletilen veriler ara katmanda yer alan yapay nöronlar tarafından aktivasyon fonksiyonları ile işlenerek, çıkış katmanına aktarılır. Çıktı katmanında problemle ilgili nihai karar ya da tahmin yürütülür. Bu yöntem ile doğrusal olmayan ve karmaşık problemler etkili bir şekilde çözüme ulaştırılabilir.



Şekil 3.12: Çok Katmanlı Algılayıcı Modeli [17]

3.4.2.3 İleri beslemeli yapay sinir ağı

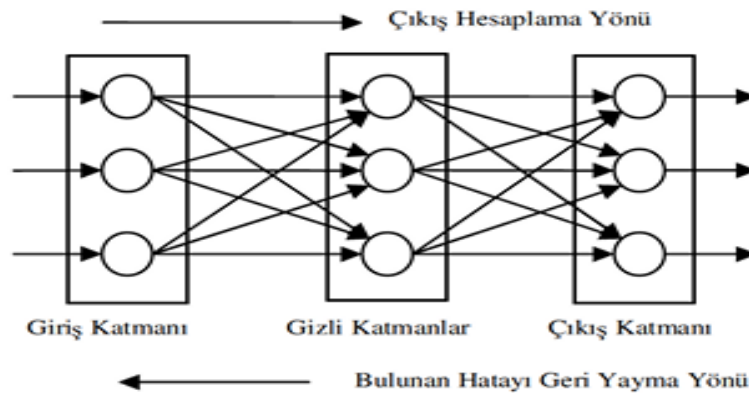
Bu modelde nöronlar, giriş katmanından başlayarak, çıkış katmanına doğru ilerlemektedir. Her bir katmandaki hücreler sadece kendinden sonrasına bağlıdır. Geri yönde ilerleme söz konusu değildir. Giriş katmanına gelen bilgiler, işlemden geçirilmeden gizli katmana aktarılmaktadır. Burada elde edilen veriler, çıkış katmanına geçerek son halini almakta ve dış ortama iletilmektedir.



Şekil 3.13: İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağ Modeli [18]

3.4.2.4 Geri beslemeli yapay sinir ağı

Bu modelde bir nöronun çıktısı yalnızca sonraki katmana değil, önceki veya aynı katmandaki nöronlara da giriş verisi olarak iletilebilir. Geri besleme aynı ya da farklı katmanlarda bulunan nöronlar arasında olabilir. Bu yapısı sebebiyle ağıın parametre değerlerinin güncellenmesini sağlayan dinamik süreçler içermektedir [19-20].



Şekil 3.14: Geri Beslemeli Ağ Yapısı

3.4.3 Test motoru parametreleri ile yapay sinir ağı modelinin tasarımı

Test faaliyeti gerçekleştirilen KMSM'nin verileri ile Yapay Sinir Ağı modeli kullanılarak yapılacak olan çalışma, YSA'nın öngörü ve problem çözme becerisi açısından oldukça önemlidir. Böyle bir çalışma gerçek değer verileri ile ara değerler çıkarma, farklı senaryolarda gerekli değerleri öğrenme ve motorun kullanımı, seçimi gibi önemli tercihlerde yol gösterici olacaktır.

KMSM parametre değerlerinden motorun dinamik performansı görülmektedir. Bu veriler genellikle zamana bağlı ve doğrusal olmayan yapılar içerdiğinden, klasik analiz yöntemleriyle motor performansı ve elde edilmeyen değerlerin öngörülmesi zor olacaktır. Bu noktada YSA önemli bir fırsat sunmaktadıysa modelleri motorun, akım, gerilim, moment, hız ve verim gibi önemli çıktıları yüksek doğruluk oranı ile tahmin edebilmektedir. Ayrıca YSA modelleri eğitilebildiğinden motor tasarım ve seçim süreçlerinde hızlı bir şekilde yol gösterici olabilir.

Deneyde kullanılan motorun test faaliyeti sonucunda elde edilen verilerden akım, gerilim, dönüş hızı, güç, $\cos\phi$, frekans verileri giriş (input), verim ise çıktı (output) olarak kullanılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen her bir sayısal veri MATLAB R2024a paket programındaki YSA arayüzleri kullanılarak tahmin algoritması oluşturulmuştur.

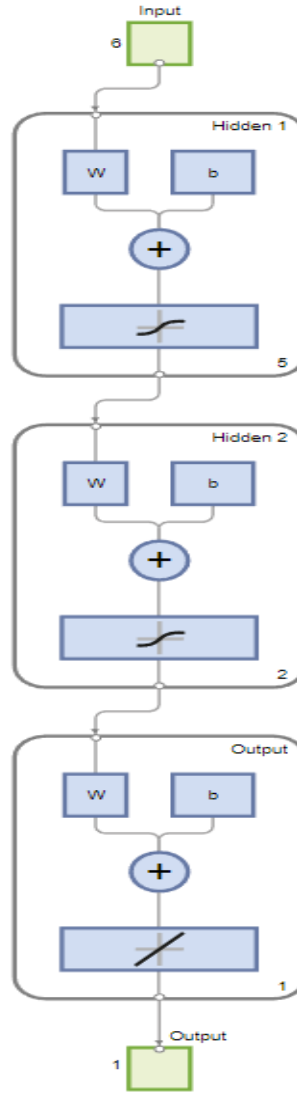
3.4.3.1 Test motoru için veri seti ve veri paylaşımı

Modelin eğitimi için kullanılan veri seti, sekiz farklı ölçüm örneğinden oluşmaktadır. Her bir örnekte motorun; akımı, gerilimi, aktif gücü, moment, güç faktörü ve çıkış gücü gibi altı farklı girdi parametresi ile bu değerlere karşılık gelen verim çıktısı yer almaktadır. Veriler gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Ölçümler sistemin farklı yük ve çalışma koşullarındaki davranışlarını temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Çizelge 3.4: YSA'da Kullanılan Giriş ve Çıkış Verileri

Örnek No	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Tork (Nm)	Güç Faktörü ($\cos\phi$)	Çıkış Gücü (W)	Verim (%)
1	50	41.2	91	5.3	0.82	36.66	94.4
2	150	44.0	258	16.9	0.86	110.0	92.6
3	100	44.7	176	11.5	0.84	73.33	93.6
4	190	58.9	342	28.4	0.82	139.34	93.05
5	200	61.19	367	31.56	0.81	146.09	93.17
6	150	60.8	275	23.5	0.82	110.0	93.74
7	120	61.4	225	19.1	0.8	88.0	94.23
8	100	61.2	190	15.8	0.78	74.0	94.43

3.4.4 Yapay sinir ağı modeli uygulaması



Şekil 3.15: Yapay Sinir Ağının Eğitim Sonrası Yapısı

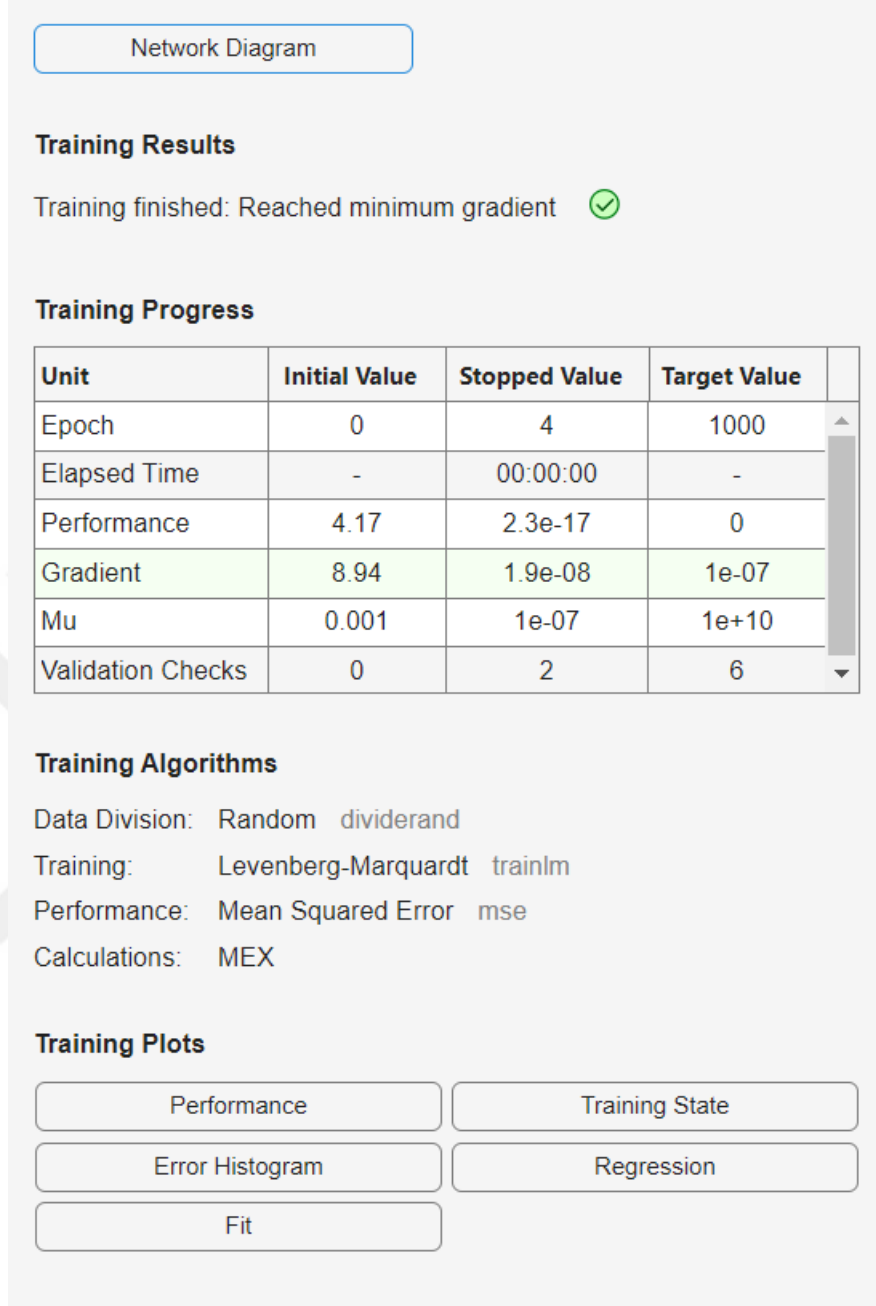
Ağ yapısı incelendiğinde, giriş katmanı altı parametreden çıkış katmanı ise bir parametre değerinden oluşmaktadır. 1. gizli katmanda beş nöron 2. gizli katmanda iki nöron ve çıkış katmanında bir nöron kullanılmıştır. Böyle bir yapı orta güçlükteki karmaşık problemleri çözmek için uygundur. Eğitim performans durumuna göre nöron sayısı değiştirilebilir. Bu çalışmada ağ yapıları farklı olarak denenmiş ancak veri setinin küçük olması nedeniyle ağın ezberleme riski göz önüne alınmıştır.

Çizelge 3.5: YSA Ortalama ve Standart Sapma Değerleri

Tekrar Sayısı	Ortalama MSE (Test)	Standart Sapma
100 tekrar	0.0186	0.0243
200 tekrar	0.0169	0.0194
500 tekrar	0.0155	0.0162

Yapay Sinir Ağı modelinde veri setinin az olduğu durumlarda ve eğitim düzeyinin gerçekleşme durumlarında ağın çok kez çalıştırılması önem arz etmektedir. Bu modelde ağ 100-200 ve 500 kez çalıştırılarak elde edilen performansın ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 3.5’ de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere tekrar sayısının artırılmasıyla ortalama MSE değeri ve standart sapma değerinde düşüş gözlenmiştir. Bu durum modelin performansının daha kararlı hale geldiğini göstermiştir. Ayrıca seçilen ağ mimarisi veri setine uygun şekilde belirlenmiş ve aşırı öğrenme riski en aza indirilmiştir.

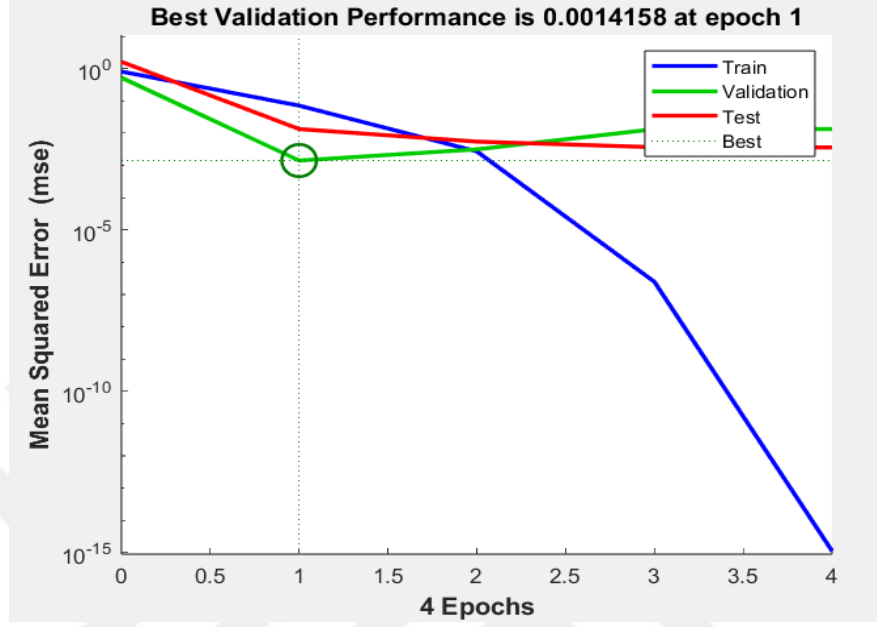
Sonuç olarak YSA modelinde uygulanan iyileştirme çalışmaları ve artırılmış tekrar sayısı modelin genel doğruluğunu ve güvenilirliğini arttırmış, tahmin sonuçlarının daha gerçekçi hale gelmesini sağlamıştır. Tüm denemeler sonrasında ağ için en iyi regresyon değerleri için işlemler gerçekleştirilmiş ve buna göre gerekli işlemler yapılmıştır.



Şekil 3.16: Yapay Sinir Ağı Eğitim Sonuçları

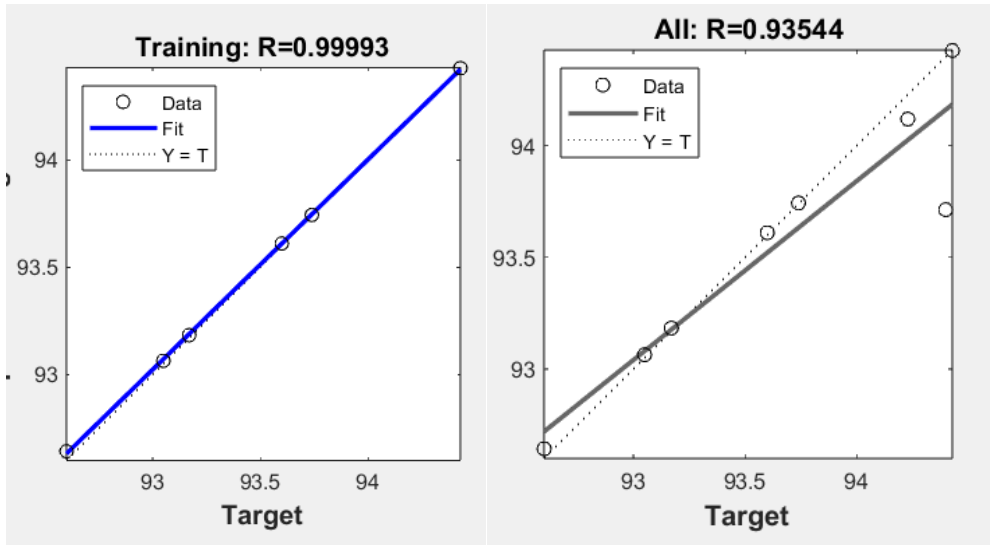
Eğitim sonuçları incelendiğinde, minimum gradyan değerine ulaştığı ve daha fazla iyileşme olmadığı için eğitim sonlanmıştır. Kullanılan algoritma Levenberg-Marquardt yöntemidir ve orta düzeyde veri seti olan işlemler için en uygun yöntemdir. Hızlı ve etkili bir sonuç vermek için ideal bir kullanıma sahiptir. Doğruluk ve eğitim hızı açısından etkili olan bu yöntem, kararlı ve hızlı sonuçlar sunmaktadır. Performans ölçütü olarak ortalama karesel hata yöntemi olan Mean Squared Error kullanılmıştır.

Bu yöntem özellikle YSA’larda modelin tahmini değeri ile gerçek değeri arasındaki ölçüm ile olan çalışmalarda oldukça başarılı sonuçlar sunmaktadır. Hesaplamalar MATLAB MEX komutuyla yapılmıştır.



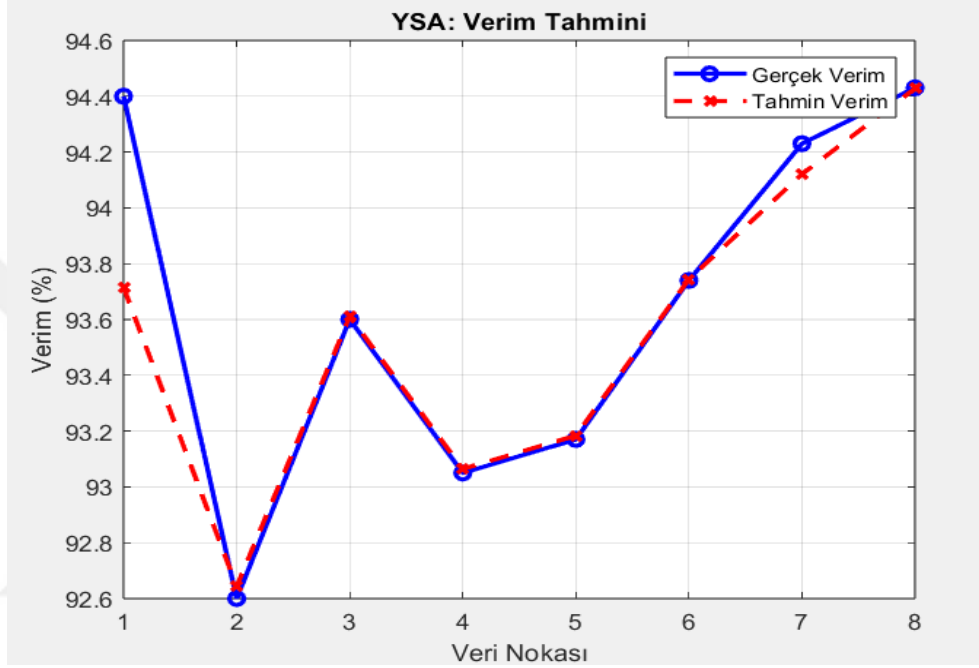
Şekil 3.17: Ortalama Karesel Hata Değerinin Değişimi

Şekil 3.17’de verilen grafik incelendiğinde en iyi doğrulama hatasının epoch 1’de alındığı görülmektedir. Eğitim verisindeki hata sürekli azalmıştır. Bu durum modelin öğrenmeye devam ettiğini göstermektedir. Test ve doğrulama çıktılarının da uyumlu olması bu modelin iyi eğitildiğini göstermektedir. Eğitim kısa sürede tamamlanmış ve hızlı öğrenme gerçekleşmiştir.



Şekil 3.18: Regresyon Değerleri

Regresyon değerlerinin bire çok yakın değerlerde olması başarılı, dengeli ve genellenebilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Train ağ eğitim verisi çok yüksek oranda öğrenilmiş olduğunu göstermektedir. Regresyonda All kısmı da yine bire yakın değerde olup, ağın genellemedeki başarısını göstermektedir. Bu verilerin değerleri tasarlanan YSA modelinin tahmin gücü ve gerçeğe yakınlığı noktasında oldukça önemlidir.



Şekil 3.19: Gerçek Verim ile Tahmini Verim Uyum Grafiği

Gerçekleştirilen YSA modellemesi sonucunda motor test faaliyetinde alınan verim değerleri ile ağın eğitilmesi sonucu alınan verim değerleri Şekil 3.19'da görüldüğü üzere uyum içerisindedir. Oluşturulan sistem yüksek doğrulukta çalışmış ve elde edilen model çıktıları gerçek verilerle örtüşmektedir. Bu durum YSA modelinin başarılı tahminler içereceğini göstermektedir. Bu bağlamda geliştirilen YSA modeli ilgili probleme yönelik geçerli ve güvenilir sonuçlar sunduğu gözlenmektedir. Bu sayede istenilen verim için gerekli parametre değerleri veya değişken parametre değerlerinde güçlü oranda doğru sonuçlar ile seçim kriterlerini oluşturmada büyük fayda sağlamaktadır.

YSA'nın talep tahminindeki başarısı ile popülerliği her geçen gün artmaktadır. YSA'lar geniş bir uygulama alanına sahip ve birçok alanda kullanımı ile etkili sonuçlar elde etmekte son derece önemlidir. YSA'lar sınıflandırma, tahmin,

veri süzme ve veri yorumlama gibi çeşitli karmaşık problemlerin çözümünde uygulanabilirler [22].

YSA'lar tanımlanan veri setlerine göre eğitilerek sorunları tanımlamakta ve matematiksel algoritmalar oluşturarak gelecekle ilgili tahminde bulunabilmektedirler [23].

Bu tez çalışmasında YSA'nın bütün güçlü yönleri kullanılarak test faaliyeti sonucu elde edilen gerçek değerlerle sistem eğitilmiş ve YSA'nın öngörü ve tahmin gücü doğrulanmıştır. Bu çalışma ile YSA'da istenilen senaryolarda hangi sonuçların elde edileceği ve nasıl yorumlandığı vurgulanmıştır.



4. SONUÇLAR

Elektrikli araçların tahrikinde kullanılacak motor seçimi için hazırlanan bu çalışmada, en yaygın kullanılabilecek motorlardan ASM ve KMSM'lerin ön plana çıktığı anlaşılmaktadır. Küçük güçteki ASM test düzeneğinde bu motorun elektrikli araç tahrikinde kullanıldığında farklı hız ve momentlerde nasıl çalıştığı analiz edilmiş ve motor performansı ile seçim uygunluğu gibi durumlar değerlendirilerek bazı durumlarda tercih sebebi olabileceği belirtilmiştir.

KMSM için özellikleri detaylı bir şekilde açıklanarak, elektrikli araç motorlarında tercih sebebi olmasının nedenleri açıklanmıştır. Moment değeri 100 Nm ve devir sayısı 200 d/dk olan aynı parametre değerlerine sahip ASM ve KMSM deneysel olarak verim ve performans değerleri açısından kıyaslanmıştır.

Deneyde kullanılan ASM için redüktör elemanı kullanılmış ve motor güçleri 2.2 kW olacak şekilde iki motor eşdeğer değerlerde kıyaslanmıştır. Bu şekilde iki aynı değerdeki farklı motor karşılaştırması, hangi motorun neden tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Eğer moment, verim ve yüksek hızlanma gibi beklentiler var ise KMSM seçiminin yerinde olacağı vurgulanmıştır. Ancak maliyet avantajı ve dayanıklılığı nedeniyle bazı elektrikli araç tahrik uygulamalarında ASM'nin de tercih sebebi olacağı anlaşılmaktadır.

Motor kontrol yöntemlerinin de karşılaştırıldığı bu tezde motor seçimi kadar kontrol yöntemi seçiminin de önemi vurgulanmış ve uygulama özelliği ile seçilen motor tipine göre hangi kontrol yönteminin daha uygun olacağı ve yüksek performanslar sunacağı belirtilmiştir. Özellikle kıyaslanan her iki motor türü için, V/f skaler kontrol, alan yönlendirmeli kontrol, kayma frekansı kontrolü ve yapay sinir ağları destekli kontrol yöntemleri açıklanmıştır. Genel değerlendirme ile çoğunlukla ASM'ler için V/f skaler kontrol yönteminin basit ve düşük maliyeti ile tercih sebebi olduğu belirtilmiştir. KMSM'ler için de alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yönteminin hassas kontrol ve yüksek verimliliği ile tercih sebebi olduğu vurgulanmıştır.

49 kW gücündeki bir KMSM'nin deneysel olarak performans incelemesi yapılmış, elektrikli araçlarda bu güç ve özelliklerdeki motorların nasıl kullanıldığı açıklanmaktadır. Bu güçteki bir motorun elektrikli araçlarda önemli ölçüde tahrik için yeterlilik sağladığı ve yüksek verimlilikleri ile tercih sebebi oldukları belirtilmiştir. KMSM ölçüm değerleri paylaşılan bu motorun moment, hız, akım, güç ve verim gibi önemli değerleri sayısal olarak ortaya çıkarılmıştır. Moment-akım, verim, moment ve devir sayısı gibi karakteristikleri MATLAB programı ile çizdirilen motorun eğrileri bu çalışmada yorumlanmıştır. Motorun yüksek verimli bir motor olduğu (%93-94) aralığında yüksek verimli olduğu deneysel olarak elde edilmiştir.

YSA ile YSA Ağ modelleri açıklanarak, bu modellerin tercih edilebileceği durumlar belirtilmiştir. Test motoru parametreleri veri seti olarak MATLAB programında işlenmiş ve YSA modeli eğitime tabi tutularak yüksek öğrenme ile başarılı sonuçlara ulaşmıştır. YSA'da çıkış olarak verim kullanılmış ve giriş parametrelerine göre çıkış verimi gözlenmiştir. Yüksek regresyon oranları ile YSA'nın tahmin ve öngörü gücü ortaya konulmuştur. Elektrikli araçlar için motor seçimi yapılırken YSA kullanımı zaman ve maliyet açısından avantaj sağlayan etkili bir yöntemdir.

Bu çalışmada oluşturulan YSA modeli, elektrik motorunun değişken değerlerinde ki performans tahmininde başarılı sonuçlar elde etmiştir. Bu sonuçlar YSA eğitimi sonucunda verim çıktılarının yaklaşık aynı değerler elde edilmesiyle güvenilir sonuçlar öngördüğünü ortaya çıkarmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Dolubatarya. (2025). Elektrikli araç teknolojileri ve batarya sistemleri. Erişim adresi: <https://dolubatarya.com/> (erişim tarihi: 24.01.2025).
- [2] Kenjo, T. ve Nagamori, S. (1985). Permanent magnet and brushless DC motors. Oxford: Oxford University Press.
- [3] Ranaei S, Karvonen M, Suominen A, Kässi T. Patent-based technology forecasting: case of electric and hydrogen vehicle. Int J Energy Technol Policy. 2016;12(1):20-40.
- [4] Patil, M., Dhamal, S. (2019) A Detailed Motor Selection for Electric Vehicle Traction System. 3th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC 2019) 12-14 December 2019, Palladam, India.
- [5] Elektrikport.Teknik Kütüphane.Erişim adresi: <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/asenkron-motorlar-1-bolum/12177#ad-image-0> (erişim tarihi: 28.01.2025).
- [6] Krishnan, R. (2010). Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. CRC Press.
- [7] Miller, T. J. E. (1989). Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives. Oxford: Oxford University Press.
- [8] Çelik, H. ve Kürüm, H. (2013). Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü. Engineering Sciences, 8(1), 67-85.
- [9] Göl, Ö., Bijan, S. ve Erfan, F. (2001, June 27–29). Time domain analysis of permanent magnet generators. International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (pp. 192-197). Kuşadası.
- [10] Hughes, A. (2006). Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications (3rd ed.). Nenes: Elsevier.
- [11] Çelik, H., & Kürüm, H. (2013). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü. Engineering Sciences, 8(1), 67-85.
- [12] Şahin, M., Büyüktümtürk, F. ve Oğuz, Y. (2013). Yapay sinir ağları ile aydınlık kalitesi kontrolü. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(2), 1-10.
- [13] Bengio, Y., Goodfellow, I. J. ve Courville, A. (2015). Deep learning. Cambridge: MIT Press.
- [14] Maltarollo, V. G., Honório, K. M., & Da Silva, A. B. F. (2013). Applications of Artificial Neural Networks in Chemical Problems. London: Intechopen.

- [15] Öztemel, E. (2003). Yapay Sinir Ağları. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- [16] Öztemel, E. (2006). Yapay Sinir Ağları. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- [17] Kabalcı, E. (2014). Yapay sinir ağları [Ders notları]. Erişim adresi: <https://ekblc.files.wordpress.com/2013/09/ysa.pdf>
- [18] Veri Bilimci. (t.y.). Yapay Sinir Ağları (YSA) Nedir? – Bölüm 2. Erişim adresi: <http://veribilimci.org/yapay-sinir-aglari-ysa-nedir-bolum-2/>
- [19] Aydemir, E. (2019). Weka ile yapay zekâ. Seçkin Yayıncılık.
- [20] Asilkan, Ö., ve Irmak, A. G. S. (2009). İkinci el otomobillerin gelecekteki fiyatlarının yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(2), 375-391.
- [21] Yılmaz, A. (2019). Yapay zekâ. İstanbul: KODLAB Yayın Dağıtım.
- [22] Hu, C. (2002). Advanced tourism demand forecasting: ANN and Box-Jenkins modelling (Doktora tezi). Purdue University, MI, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Onur DEMİR

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** : (2013) Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Öğretmenliği
- **Lisans** : (2020) Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : (2016) İstanbul Gedik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği (YL)
- **Yüksek Lisans** : (2025) İstanbul Gedik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- Türk Deniz Kuvvetleri, İstanbul Tersanesi Komutanlığı, Milli Gemi Projeleri (2011-2016)
- Milli Eğitim Bakanlığı, Mesleki ve Teknik Anadolu Liseleri, Elektrik-Elektronik Teknolojileri Alanı Öğretmeni (2016,.....)
- Milli Eğitim Bakanlığı, Hezarfen Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Atölye Şefliği (2023,...)
- İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik Meslek Yüksekokulu, Öğretim Görevlisi (2024,...)

Katıldığı Proje ve Ödüller:

- Milli Eğitim Bakanlığı Başarı Belgesi (2022)
- Milli Eğitim Bakanlığı Başarı Belgesi (2022)
- Milli Eğitim Bakanlığı, Öğretmeniz dergisi, 'Çevre Dostu Elektrikli Araçlara Teknik Bir Bakış 'konu başlıklı dergi yazısı (2024)

• TÜBİTAK 4006 Bilim Fuarı ‘Afet Bilgilendirme Eğitim Kiti’ projesi Danışmanlığı (2024)

Ulusal konferans tam metin bildiri sunumu:

1-Demir, O., Kuyumcu, F. E. ve Kep, Y. (2024, 28–30 Kasım). Orta güçte bir kalıcı mıknatıslı senkron motorun performans karakteristiklerinin deneysel olarak elde edilmesi. ELECO 2024 Elektrik – Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı, Bursa.

Ulusal konferans tam metin bildirisi:

2-Kep, Y., Kuyumcu, F. E. ve Demir, O. (2025, 9–10 Ocak). İstanbul ilinde güneş enerjisinin sürdürülebilirliğe katkıları ve verimliliğin öngörülebilirliği. I. Ulusal Enerji Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik Konferansı, İstanbul Gedik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.