

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORLARINDA
YAPAY ZEKA TABANLI ARIZA TEŞHİSİ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet ŞİMŞİR

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU
Ortak Danışman : Prof. Dr. Raif BAYIR

Nisan 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORLARINDA
YAPAY ZEKA TABANLI ARIZA TEŞHİSİ

DOKTORA TEZİ

Mehmet ŞİMŞİR

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU
Ortak Danışman : Prof. Dr. Raif BAYIR

Bu tez 26 / 04 /2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Abdullah FERİKOĞLU
Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Cemil ÖZ
Üye

Prof. Dr.
Raif BAYIR
Üye

Doç. Dr.
Yılmaz UYAROĞLU
Üye

Doç. Dr.
İhsan PEHLİVAN
Üye

Doç. Dr.
Bilal SARAÇOĞLU
Üye

Doç. Dr.
Ali ÖZTÜRK
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mehmet ŞİMŞİR

26.04.2016

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleŐtirilmesinde engin bilgilerinden faydalandığım Hocalarım Prof. Dr. Raif BAYIR'a ve Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU'na, her zaman bana destek olan Annem'e, Babam'a, EŐim'e, KardeŐim'e ve Kızım'a, çalışmada emeği geçen çalışma arkadaŐlarım Yrd. Doç. Dr. Bahadır ACAR'a, Yrd. Doç. Dr. Ali UYSAL'a, ArŐ. Gör. Emel SOYLU'ya, ArŐ. Gör. Batıkan Erdem DEMİR'e, ArŐ. Gör. Tuncay SOYLU'ya ve ArŐ. Gör. Kadriye ÖZ'e teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORLARI	8
2.1. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarının Genel Yapısı	12
2.1.1. Stator	13
2.1.2. Rotor.....	14
2.1.3. Dış fiziksel yapı.....	15
2.1.4. Sürücü devre.....	16
2.2. Tekerler İçi Elektrik Motorlarının Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli	17
2.3. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarının Kullanım Alanı ve Karakteristik Özellikleri	20
2.4. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarında Meydana Gelen Arızalar.....	21
2.4.1. Açık devre arızaları	22
2.4.2. Kısa devre arızaları.....	22

2.4.3. Sensör arızaları	23
2.4.4. Rulman arızaları	24
2.4.5. Motor mili arızaları	25
2.4.6. Sürekli mıknatıs arızaları	25

BÖLÜM 3.

YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ	27
3.1. Bulanık Mantık.....	30
3.1.1. Üyelik fonksiyonları.....	31
3.1.2. Bulanık kurallar.....	33
3.1.3. Bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulaştırma	34
3.2. Yapay Sinir Ağları	35
3.2.1. Yapay sinir ağı hücresi	37
3.2.2. Yapay sinir ağlarının eğitim algoritmaları sınıflandırması.....	38
3.2.3. Yapay sinir ağlarının yapılarına göre sınıflandırılması	39
3.2.4. Geri yayımlı yapay sinir ağlarının eğitim algoritması	39
3.2.5. İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağları	43
3.2.6. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağları	45
3.2.7. Elman yapay sinir ağı.....	47
3.2.8. Katman yinelemeli yapay sinir ağları.....	49

BÖLÜM 4.

TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORU TEST DÜZENEĞİNİN TASARIMI	51
4.1. Test Düzeneğinin Yapısı ve Tasarımı	51
4.1.1. Tekerlek içi elektrik motoru	54
4.1.2. Alternatör	56
4.1.3. Yük hücresi	57
4.1.4. Tako generatör.....	60
4.1.5. Kayış kasnak sistemi	61
4.1.6. Test düzeneği zemini	63
4.1.7. Veri alış kartı	63
4.2. Yapay Zeka Teknikleri İçin Veri Seti Değişkenlerin Belirlenmesi.....	65

4.3. Değişkenlerin Ölçümleri ve Veri Seti.....	66
4.3.1. Kaynak gerilimi.....	66
4.3.2. Kaynak akımı	67
4.3.3. Faz akımları.....	68
4.3.4. Tork	68
4.3.5. Hız	69
4.3.6. Sıcaklık farkı	69
4.3.7. Veri setinin oluşturulması.....	70
4.4. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarında Normal Koşul ve Arızalar	71
4.4.1. Normal durum	72
4.4.2. r sargısı açık devre arızası	73
4.4.3. s sargısı açık devre arızası.....	74
4.4.4. t sargısı açık devre arızası	75
4.4.5. r sargısı kısa devre arızası	77
4.4.6. s sargısı kısa devre arızası	78
4.4.7. t sargısı kısa devre arızası.....	79
4.4.8. r ve s sargıları arası kısa devre arızası.....	80
4.4.9. r ve t sargıları arası kısa devre arızası	82
4.4.10. s ve t sargıları arası kısa devre arızası	83
4.4.11. r sensörü arızası	84
4.4.12. s sensörü arızası.....	85
4.4.13. t sensörü arızası	86
4.4.14. Rulman arızası.....	87

BÖLÜM 5.

TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORLARINDA YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE ARIZA TEŞHİSİ	89
5.1. Yapay Zeka Tekniklerinin Entegrasyonu	89
5.1.1. Bulanık mantık yöntemi ile arıza teşhisi.....	89
5.1.2. İleri beslemeli yapay sinir ağları ile arıza teşhisi	99
5.1.3. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi	106
5.1.4. Elman yapay sinir ağı ile arıza teşhisi.....	109

5.1.5. Katman yinelemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi.....	111
5.2. Gerçek Zamanlı Arıza Teşhisi Sisteminin Oluşturulması	114

BÖLÜM 6.

SONUÇ VE ÖNERİLER	119
-------------------------	-----

KAYNAKLAR.....	122
----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	131
----------------	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AC	: Alternatif akım
BLDC	: Fırçasız doğru akım
cm	: Santimetre
d	: Yapay sinir ağının hedeflenen çıkışı
DC	: Doğru akım
e	: Hata
EMK	: Elektromotor kuvveti
Hz	: Hertz
H	: Hessian matris
H_p	: Beygir gücü
I_n	: n köşegenli birim matris
IGBT	: Isolated gate bipolar transistor
J	: Atalet momenti
J_m	: Jacobian matris
k	: Katman indeksi
kg	: Kilogram
L	: İndüktans
LM	: Levenberg Marquardt eğitim algoritması
M	: Karşılıklı indüktans
M_o	: Çıkış sayısı
MSE	: Mean square error
n	: Nötr noktası
Nm	: Newton metre
o	: Yapay sinir ağının çıkışı
P	: Güç
p	: Laplace operatörü

P_i	: Örnek sayısı
p_i	: Örnek indeksi
PI	: Proportional integral
PID	: Proportional integral derivative
PM	: Sürekli mıknatıslı
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
R	: Direnç
RPM	: Dakikadaki devir sayısı
s	: Saniye
SSE	: Karesel hataların toplamı
T	: Tork
V	: Volt
w	: Ağırlık
W	: Watt
x	: Yapay sinir ağı girişi
YSA	: Yapay sinir ağı
ω_m	: Açısal hız
Ψ	: Akı
Ω	: Ohm
β	: Sürtünme faktörü
η	: Verim

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektrik makinelerinin temel sınıflandırma şeması	8
Şekil 2.2. Tekerlek içi elektrik motoru.....	12
Şekil 2.3. Tekerlek içi elektrik motorunun iç yapısı	13
Şekil 2.4. Motor mili ve kablolar	14
Şekil 2.5. Tekerlek içi elektrik motorunun jant, lastik, kapak ve rulman yapısı.....	15
Şekil 2.6. Tekerlek içi elektrik motoru sürücü devresinin temel yapısı.....	16
Şekil 2.7. Tekerlek içi elektrik motorunun elektriksel eşdeğer devresi	17
Şekil 2.8. Tekerlek içi elektrik motoruna ait devir sayısı-tork karakteristiği.....	21
Şekil 2.9. Hall effect sensör	23
Şekil 3.1. Klasik bir üyelik fonksiyonu örneği	32
Şekil 3.2. Klasik bir bulanık üyelik fonksiyonu örneği	33
Şekil 3.3. Mamdani modeli minimum-maksimum çıkarımı	34
Şekil 3.4. Yapay sinir ağı hücresinin genel yapısı	37
Şekil 3.5. LM ağ eğitimi algoritmasının temel akış diyagramı.....	42
Şekil 3.6. İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağının genel yapısı	44
Şekil 3.7. Bir ağ için katman ve nöronlar arasındaki bağlantılar	45
Şekil 3.8. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağının genel yapısı.....	46
Şekil 3.9. Elman yapay sinir ağının genel yapısı	47
Şekil 3.10. Katman yinelemeli yapay sinir ağının genel yapısı	49
Şekil 4.1. Test düzeneğinin blok şeması	52
Şekil 4.2. Test düzeneğinin mekanik bağlantıları	52
Şekil 4.3. Test düzeneği üzerindeki motor, kayış kasnak sistemi ve tako generatör.....	55
Şekil 4.4. Alternatöre ait akım ve güç karakteristik eğrileri	56
Şekil 4.5. Yük hücresi ile tekerlek içi elektrik motoru arası mekanik bağlantılar	58
Şekil 4.6. Yük hücresi ve alternatörün test düzeneği üzerine sabitlenmiş hali	59

Şekil 4.7. Tako generatör olarak kullanılan DC motorun karakteristik eğrileri	61
Şekil 4.8. Advantech PCI-1716 veri alış kartı ve PCLD-8712	63
Şekil 4.9. Pens ampermetre	64
Şekil 4.10. 48 V DC güç kaynağı	66
Şekil 4.11. Veri alış için tasarlanan Matlab Simulink veri alış modeli	71
Şekil 4.12. Normal durum veri eğrileri grafiği	72
Şekil 4.13. r sargısı açık devre arızası veri eğrileri grafiği	73
Şekil 4.14. s sargısı açık devre arızası veri eğrileri grafiği	75
Şekil 4.15. t sargısı açık devre arızası veri eğrileri grafiği	76
Şekil 4.16. r sargısı kısa devre arızası veri eğrileri grafiği	78
Şekil 4.17. s sargısı kısa devre arızası veri eğrileri grafiği	79
Şekil 4.18. t sargısı kısa devre arızası veri eğrileri grafiği	80
Şekil 4.19. r ve s sargıları arası kısa devre arızası veri eğrileri grafiği	81
Şekil 4.20. r ve t sargıları arası kısa devre arızası veri eğrileri grafiği	82
Şekil 4.21. s ve t sargıları arası kısa devre arızası veri eğrileri grafiği	83
Şekil 4.22. r sensörü arızası veri eğrileri grafiği	84
Şekil 4.23. s sensörü arızası veri eğrileri grafiği	86
Şekil 4.24. t sensörü arızası veri eğrileri grafiği	86
Şekil 4.25. Rulman arızası veri eğrileri grafiği	88
Şekil 5.1. Normal durum için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği	91
Şekil 5.2. Açık devre arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği ..	91
Şekil 5.3. Bir sargı kısa devre arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği	92
Şekil 5.4. Sargılar arası kısa devre arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği	93
Şekil 5.5. Sensör arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği	93
Şekil 5.6. Rulman arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği	94
Şekil 5.7. Besleme akımı için üyelik fonksiyonları	95
Şekil 5.8. Devir sayısı için üyelik fonksiyonları	95
Şekil 5.9. Tork için üyelik fonksiyonları	95
Şekil 5.10. Bulanık mantık sınıflandırıcısının çıkışı için üyelik fonksiyonları	96

Şekil 5.11. Bulanık mantık sınıflandırıcısı içeren gerçek zamanlı arıza teşhisi sistemi.....	97
Şekil 5.12. Bulanık Mantık sınıflandırıcılı arıza teşhisi sisteminin başarı testi için tasarlanmış Matlab Simulink modeli.....	98
Şekil 5.13. Matlab nntool Neural Network Data Manager	100
Şekil 5.14. Problem için tespit edilen en başarılı ileri beslemeli yapay sinir ağının Matlab nntool yapısı.....	101
Şekil 5.15. İleri beslemeli yapay sinir ağı için Matlab neural network training tool eğitim aşaması performansı	102
Şekil 5.16. İleri beslemeli yapay sinir ağı eğitim süreci performansını gösteren Matlab eğitim aşaması eğitim, mu ve onaylama hatası grafikleri.....	102
Şekil 5.17. İleri beslemeli yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğirileri	103
Şekil 5.18. Yapay sinir ağının test edilmesi için tasarlanan Matlab Simulink modeli.....	104
Şekil 5.19. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı için Matlab nntool eğitim aşaması performansı.....	106
Şekil 5.20. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğirileri.....	107
Şekil 5.21. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı eğitim performansını gösteren Matlab eğitim aşaması eğitim, mu ve onaylama hatası grafikleri.....	108
Şekil 5.22. Elman yapay sinir ağı için Matlab nntool eğitim aşaması performansı.	109
Şekil 5.23. Elman yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğirileri	110
Şekil 5.24. Elman yapay sinir ağı eğitim süreci performansını gösteren Matlab eğitim aşaması eğitim, mu ve onaylama hatası grafikleri	110
Şekil 5.25. Katman yinelemeli yapay sinir ağı için Matlab nntool eğitim aşaması performansı.....	112
Şekil 5.26. Katman yinelemeli yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğirileri.....	113
Şekil 5.27. Katman yinelemeli yapay sinir ağı eğitim süreci performansını gösteren Matlab eğitim aşaması eğitim, mu ve onaylama hatası grafikleri.....	113

Şekil 5.28. Yapay sinir ağının gerçek zamanlı testi için tasarlanmış Matlab
Simulink modeli 117



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Çeşitli ağ eğitim algoritmalarının karşılaştırması.....	43
Tablo 4.1. Tez çalışmasında kullanılan tekerlek içi elektrik motorunun temel özellikleri.....	55
Tablo 4.2. Yük hücresi teknik özellikleri.....	59
Tablo 4.3. Yük hücresi sinyal dönüştürücüsü teknik özellikleri.....	60
Tablo 4.4. Veri alış kartı teknik özellikleri	64
Tablo 5.1. Bulanık mantık yöntemi ile arıza teşhisi çalışmasının sonuçları.....	99
Tablo 5.2. İleri beslemeli geri yapay sinir ağı ile arıza teşhisi çalışması verileri	105
Tablo 5.3. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri	108
Tablo 5.4. Elman yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri.....	111
Tablo 5.5. Katman yinelemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri.....	114
Tablo 5.6. Yapay zeka tekniklerinin yanlış teşhislerinin dağılımı.....	115
Tablo 5.7. Yapay zeka tekniklerinin yetkinlik ve başarı düzeyleri.....	116

ÖZET

Anahtar kelimeler: Tekerlek İçi Elektrik Motorları, Arıza Teşhisi, Fırçasız Doğru Akım Motorları, Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık

Elektrik motorları yaygın kullanımıyla insan hayatının vazgeçilmez bir parçasıdır. Tekerlek içi elektrik motorları elektrik enerjisi ile ulaşım sektörünün kesişim noktasında, ulaşım sektöründe gittikçe yaygınlaşacağı ön görülen BLDC (brushless direct current, fırçasız doğru akım) motorlardır. Tekerlek içi elektrik motorları, yapıları itibarıyla elektrikli araçlarda kullanıma uygundur. İnsan hayatı ile doğrudan veya dolaylı yollarla bağlantılı olan ulaşım sektörü büyük öneme sahiptir. Bu sebeple tekerlek içi elektrik motorlarının daha az devre dışı kalan ve güvenli motorlar olması gerekmektedir. Tekerlek içi elektrik motorları için arıza teşhisi çalışmalarının amacı motorun daha güvenilir ve verimli olmasını sağlamaktır. Bunun için, motorların devre dışı sürelerinin hızlı atlatılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, öncelikle arızalı durumlar arasında farklar oluşturabilecek giriş değişkenleri belirlenmiş, yapay zeka tekniklerinin giriş değişkenleri olarak tespit edilmiştir. Tasarlanan ve gerçekleştirilen test ve deney düzeneği sayesinde, tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi için yapay zeka tekniklerinin giriş değişkenleri olarak belirlenen tork, devir sayısı, besleme akımı, faz akımları ve besleme gerilimi gibi değişkenlerin ölçümlerinin yapılabilmesi ve motorun mekanik olarak yüklenebilmesi sağlanmıştır. Arıza teşhisi çalışması için ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı, kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı, Elman yapay sinir ağı, katman yinelemeli yapay sinir ağı ve bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan yapay zeka tekniklerinin başarı düzeyleri, gerçekleştirilen testlerle ölçülülüp karşılaştırılarak, en başarılı sonuçları veren yapay zeka tekniği, gerçek zamanlı arıza teşhisinde de uygulanmıştır. Arıza teşhisi sisteminin çıkışı olarak tespit edilen bulanık mantık için 6 durum ve yapay sinir ağları için 14 durum (13'ü arıza, 1'i normal), yüksek başarı yüzdeleriyle teşhis edilmiştir. İleri beslemeli yapay sinir ağı en başarılı ağ olarak tespit edilmiştir. Daha sonra, tasarlanan gerçek zamanlı arıza teşhisi sistemine dahil edilen ileri beslemeli yapay sinir ağı, 14 ayrı durumun teşhisini başarıyla gerçekleştirmiştir.

Bu çalışma, tekerlek içi elektrik motorlarında oluşabilecek arızaların başlangıç aşamasında teşhisi sayesinde, arızaların genişlemesi engellenerek arıza ve bakım maliyetinin düşürülmesi, verimi düşüren arızaların teşhisi sayesinde verim artışı ve motorların daha güvenli kullanımı konularında katkılar sağlayacaktır.

FAULT DIAGNOSIS OF HUB MOTORS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES

SUMMARY

Keywords: Hub motors, Fault Diagnosis, Brushless Direct Current Motors, Artificial Neural Networks, Fuzzy Logic

Electrical motors are a commonly used indispensable part of human life. Hub motors (in-wheel BLDC motors) are the members of BLDC (Brushless Direct Current) motors family, located at the intersection point of transportation area and electrical energy. They are also used in electrical vehicles and expected to be used more frequently in time. Hub motors are suitable for electrical vehicles structurally. Transportation is very important because of direct and indirect relation with human life. Therefore, hub motors must be more reliable and must be operating with less downtimes. The aim of fault diagnosis studies for hub motors is to make the hub motors more reliable and efficient. Hence, less downtime position for hub motors can be achieved.

In this thesis, input variables of artificial intelligence techniques were determined firstly for detecting the differences of various faults by detecting the differences of input signals. Test set was designed for acquiring the determined data of torque, speed, source current, coil currents and source voltage as input variables for fault diagnosis of hub motor. Loading the hub motor mechanically is also possible with this test set. Feed-forward backpropagation neural network, cascade feed-forward neural network, Elman neural network, layer recurrent neural network and fuzzy logic based systems were designed and used for fault diagnosis of hub motor. Success percentages for fault diagnosis of all artificial intelligence techniques were tested and compared with each other to choose the best performance technique for designing a real-time fault diagnosis system. Feed-forward backpropagation neural network was detected as the most successful artificial intelligence technique and used in the designed real time fault diagnosis system. 14 situations as 13 faults and normal situation, were successfully diagnosed.

This study supports hub motors about safety and efficiency, with diagnosis of faults at beginning phase, with decreasing maintenance-mending costs, and with diagnosis of faults which reduce efficiency.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik motorları, elektrik enerjisini kinetik enerjiye dönüştüren elektrik makineleridir. Endüstriyel alanda ve gündelik hayatta, hayatı kolaylaştıran ve büyük yükler sırtlayan elektrik motorlarının bütünüyle ya da bileşenleriyle, veya kullanım teknikleri ve sürüş yöntemleri ile ilgili tasarım ve verim artışı açısından birçok iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Optimizasyon çalışmaları arttıkça, elektrik motorlarının kullanım alan ve payları da zaman içerisinde artış göstermektedir.

Elektrik motorlarının insan hayatındaki büyük önemi ve kullanım sıklığı, elektrik motorlarının arızaları, performans analizi ve arıza durumlarında devre dışı kalınan sürenin azaltılması konularında çalışmalar yapılmasına sebebiyet vermiştir. Bu yönde yapılan çalışmalar kondisyon izleme, arıza tespiti ve arıza teşhisi çalışmalarıdır. Bu çalışmalar, sistemlerin belirlenen değişkenlerinin analizi ile çalışma durumunu izleyen ya da arızalı durumların tespit ve teşhisi üzerine temellendirilmiş çalışmalardır. Arızalı ve normal durumlarının birbirlerinden ayırt edilmesi amacıyla ölçümleri yapılabilen ve sınıflandırılabilen sistemler, kondisyon izleme ve arıza teşhisi çalışmalarına uygun yapıya sahiptirler. Bir sistemin arızalı ya da normal dışı durumlarının tespit edilebilmesi için normal durumunun uzman görüşü veya öncül ölçümler ile sınırlarının belirlenebilmesi gerekmektedir. Arıza teşhisi için ise sistemin normal durumu ve teşhis edilecek arızalı durumlarına ait verilerin, sistemi tanıyan veya uzman kişilerce önceden ölçülmüş ve sınıflandırılabilir olması gerekir. Arızaların erken veya çabuk teşhis edilmesi, önleyici bir bakım hizmeti olarak motorların beklenmeyen ve uzun süreli devre dışı kalma durumlarını engeller. Uygun seçilmiş kondisyon izleme ve arıza tespiti çalışmaları ile motorların bakım maliyetleri düşer ve güvenilirlikleri gözle görülür şekilde artar (Chow ve ark., 1993).

Deneyimli bir mühendis, bir elektrik motorunun daimi çalışma sürecinin gözlemlenmesi ile motorun arıza teşhisini deneyimleri sayesinde gerçekleştirebilir. Fakat deneyimli mühendisleri arızaların bulunması için görev başında sürekli bulundurmaları maliyeti yüksek bir arıza teşhisi yoludur. Öte yandan otomatik bir arıza teşhisi sistemi kullanımı, birkaç mühendisin devamlı surette makine izlemesine göre daha makul bir yöntem olarak tercih edilir. Zamanla, elektrik motorları için, her biri kendi artı ve eksilerini içeren çeşitli arıza teşhisi yöntemleri geliştirilmiştir. Bazı metodlar pahalı teşhis ekipmanları gerektirir ve/veya motorların durumunun gerçek zamanlı olmayan analizlerle teşhis yapabilirler. Örneğin radyo frekansı izleme metodu ile, stator sargılarına radyo frekansı sinyalleri enjekte edilip sargılardaki sinyal dalga şeklinin değişiminin izlenmesi ile sargı yalıtım arızalarının teşhis edilmesi sağlanır (Timperley, 1983). Bu yöntem pahalı teçhizat gerektirmesinin yanında, sadece büyük çaplı ve pahalı makineler için uygundur. Diğer bir metod olan partikül analizi ile motor yağının laboratuvar analizi yoluyla motorun durumunun tespiti için kullanılması, online kondisyon izleme ve arıza teşhisinden ziyade, rutin bakım ve kontroller için daha uygun bir tekniktir (Frank, 1990; Chow ve Thomas, 1988; Chow ve ark., 1993).

Başka bir arıza teşhisi metodu da parametre tahmini yaklaşımıdır. Bu yöntem motorun fiziksel yapısına müdahale etmeyen bir tarza sahiptir (Sood ve ark., 1985; Keyhani ve Miri, 1986). Kolay uygulanabilir ve pahalı olmayan ölçümlere dayanan bu metodun uygulanışında motorun bütünlüğüne müdahale etmeye gerek duyulmaz. Bu metod, arıza teşhisi ve kondisyon izleme çalışmalarının yapısına uyum sağlamaktadır. Parametre tahmini metodu için motorun parametrelerine dayanan sistem dinamiklerine ait bilgi ve motorun güvenilir bir matematiksel modeline ihtiyaç duyulur (Chow ve ark., 1993).

Elektrik motorlarında arıza teşhisi için kullanılan bir metod da dalgacık dönüşümü metodudur. Sharma ve arkadaşları yenilikçi bir ayrık dalgacık dönüşümü ve ortogonal bulanık komşuluk ayırtımı kullanarak döner eleman rulmanlarının sabit ve değişken yük ve hız koşulları altında korozyon arızalarının teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada stator akımları ve işlenmemiş titreşim sinyalleri test

düzeneginden arıza belirteçleri olarak alınmıştır. Optimizasyonun ardından ayrık dalgacık dönüşümü metodu etkin bir özellik ayırıcı olarak düşünülmüştür. Fakat bu yapının, yalnız başına iyi bir arıza sınıflandırması performansı için uygun olmadığı görülmüştür. Ardından ortogonal bulanık komşuluk ayırtım analizi, daha iyi bir arıza sınıflandırması elde etmek için uygulanmıştır. Sonuçlar, daha yüksek güvenilirlikli bir arıza sınıflandırmasına işaret etmiştir. Elde edilen ölçümler, dinamik yinelemeli yapay sinir ağına tatbik edilmiştir. Uygulanan teknikler sonucunda, gerçek veriler ile değişken koşullarda rulman arızalarının arıza tespit ve sınıflandırması, etkin ve güvenilir olarak gerçekleştirilmiştir (Sharma ve ark., 2015). Lou ve Loparo, rulman arızalarının teşhisi için ayrık dalgacık dönüşümü kullanarak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada ayrık dalgacık dönüşümü ile neuro-fuzzy entegre edilerek durum sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. İvme ölçer sinyallerinin işlenmesi ve karakteristik vektörlerin oluşturulması dalgacık dönüşümü ile yapılırken, adaptif neuro-fuzzy sistem ile sınıflandırma yapılmıştır (Lou ve Loparo, 2004). Türkmenoğlu ve arkadaşları IGBT (insulated gate bipolar transistor-yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör) tabanlı sürücülü DTC (direct torque control- doğrudan tork kontrollü) asenkron motorların açık devre arızalarının tespit ve incelenmesi ile ilgili bir metot ortaya koymuşlardır. Bu metotta stator akımları sistemin bir girişi olarak ele alınmış ve arızanın tespiti için kullanılmıştır. Arızalı anahtarlama elemanı altıncı dereceden dalgacık dönüşümüne soft set teorisi uygulanarak tabi tutulmuştur. Sonuçlar, önerilen arıza tespit ve teşhisi sisteminin başarılı olduğunu göstermiştir (Türkmenoğlu ve ark., 2014).

Yapay zeka teknikleri de motorun fiziksel yapısına müdahaleye gerek duyulmadan uygulanabilir yöntemler olmalarının yanında, parametre tahmini metodunun aksine, matematiksel modele ihtiyaç duymayan yöntemlerdir (Chow ve ark., 1991; Chow ve Yee, 1990) Simoes ve Bose asenkron motorların geri besleme sinyallerinin tahmini için, sayısal işaret işleme yöntemleri ile mukayese edildiğinde belirgin avantajlar sağlayabilen yeni bir teknolojinin uygulanabilirliğini yapay sinir ağları kullanarak göstermişlerdir (Simoes ve Bose, 1995). Sousa ve arkadaşları dolaylı vektör kontrollü asenkron motorların bulanık mantık temelli on-line verimlilik optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada verim optimizasyonu için

sürüşe dayalı giriş gücü tabanlı manyetizasyon akımının adaptif kontrolünün bulanık mantık denetleyici ile ayarlanması sağlanmıştır. Çalışma düşük maliyetle verim artışı sağlamıştır (Sousa ve ark., 1995). Goddu ve arkadaşları rulman titreşim sinyallerinin frekans spektrumunu, bulanık mantık tabanlı arıza teşhisi metoduyla analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda rulman gevşekliği teşhisi %100 ve rulman arızası % 90,63 oranlarında doğru tespit edilmiş ve bulanık mantık yönteminin, giriş sinyalleri uygun şekilde işlenirse, güvenilir bir arıza teşhisi metodu olduğu ifade edilmiştir (Goddu ve ark., 1998).

Li ve arkadaşları rulman titreşim özelliklerini karşılaştırmış, yapay sinir ağları ve zaman/frekans alanı titreşim analizi ile motor rulman arıza teşhisi çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. İlk önce bilgisayarlı simülasyon verileri ile yapay sinir ağı tasarlanmış, ardından gerçek zamanlı olarak, gerçek titreşim verileri, sistemin test edilmesi için uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, titreşim sinyallerinin, yapay sinir ağı kullanarak rulman arızalarının teşhisinde başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlayacağı gösterilmiştir. Gerçekleştirilen yapay sinir ağı arıza teşhisi başarı oranı testlerinde en yüksek başarı seviyesi % 96,25 ile sağlanmıştır. (Li ve ark., 2000). Tallam ve arkadaşları asenkron motorların stator sargıları arızalarının teşhisini yapay sinir ağları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. İleri beslemeli ağlarla öz düzenleyici haritalar kullanarak motorun çalışma kondisyonu izlenmiştir. Çalışmanın dengesiz kaynak gerilimi ile motor ve ekipmandaki asimetri koşullarında fonksiyonel olmadığı belirtilmiştir (Tallam ve ark., 2000).

Zidani ve arkadaşları Concordia kalıplı stator akımlarının bulanık mantık için giriş değişkeni olarak kullanılması esasına dayalı bir stator arızaları teşhisi sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada stator akımları ölçülmüş ve Concordia kalıbı tabanlı olarak değişik yük ve koşullarda kaydedilmiş ve kullanılmıştır. Çalışma sonucunda giriş verileri Concordia kalıbında uygun şekilde işlenirse, bulanık mantık yönteminin stator arızalarının teşhisi için başarılı ve güvenilir bir metot olduğu ifade edilmiştir (Zidani ve ark., 2003). Bayır ve Bay yapay sinir ağları kullanarak seri sargılı marş motorlarının arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı kullanılmıştır. İleri beslemeli yapay sinir ağı, geri yayılım

algoritması ile eğitilmiştir. Kullanılan yapay sinir ağı arıza teşhisi sistemi, altı çeşit marş motoru arızasının teşhisini başarıyla gerçekleştirmiştir. Teşhis edilen bu arızalar marş motorlarında en çok görülen arızalardır (Bayır ve Bay, 2004). Bay ve Bayır marş motorlarının arıza teşhisi ve kondisyon izleme çalışmasını Kohonen yapay sinir ağı yardımıyla gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada arıza teşhisi için Visual Basic 6.0 kullanarak GUI (grafiksel kullanıcı arayüzü) geliştirilmiştir. Geliştirilen arıza teşhisi sistemi ile 6 ayrı marş motoru arızası teşhis edilebilmiştir. GUI sayesinde, daha önceki arıza kayıtlarından faydalanarak, marş motoru arızaları, gerçekleşmeden önce teşhis edilebilmiştir (Bay ve Bayır, 2005).

Martins ve arkadaşları üç fazlı asenkron motorların stator arızalarının on-line teşhisi için denetimsiz yapay sinir ağı tabanlı bir algoritma geliştirmişlerdir. Sistemin testini 1 kW'lık bir asenkron motor kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Motor manyetik bir frenleme sistemi ile yüklenmiş, veriler bir bilgisayar ve veri alış kartı ile alınmıştır. Deneysel çalışmalar tasarlanan sistemin verimli olduğunu göstermiştir (Martins ve ark., 2007). Ghate ve Dudul, radial tabanlı fonksiyonlu çok katmanlı perseptron kaskat bağlantılı yapay sinir ağı ile küçük ve orta boyutlu 3 fazlı asenkron motorlar için arıza tespiti sistemi geliştirmişlerdir. Stator sargılarının faz akımları sistemin giriş değişkenleri olarak belirlenmiştir. Çalışma başarılı bulunmuş ve testler sonunda gerçek uygulamalara uyumlu olduğuna karar verilmiştir (Ghate ve Dudul, 2011). Uysal ve Bayır Kohonen yapay sinir ağı kullanarak anahtarlamalı relüktans motorlarının gerçek zamanlı kondisyon izleme ve arıza teşhisi çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, MATLAB grafiksel kullanıcı arayüzü ile Kohonen yapay sinir ağının gerçek zamanlı performansı test edilmiştir. Anahtarlamalı relüktans motorlarının arıza teşhisi için bir test seti hazırlanarak gerçek zamanlı arıza teşhisi ve ölçümler için kullanılmıştır. Gerçek zamanlı arıza teşhisi çalışmasının başarı oranı %87 olarak tespit edilmiştir (Uysal ve Bayır, 2013).

Kulkami ve arkadaşları genetik algoritmalarla sınıflandırılmış tip-2 bulanık mantık tabanlı sınıflandırıcı kullanarak asenkron motorların stator akımlarının spektral analizi tabanlı arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Matlab Simulink ve GUI tabanlı bir model geliştirilmiş ve bulanık mantık kuralları, üyelik fonksiyonları

ve parametreleri genetik algoritmalar yoluyla optimize edilmiştir (Kulkami ve ark., 2015). Hocine ve Ahmed elektrik motorlarının rulman arızalarının titreşim sinyalleri analizi ve yapay sinir ağları tabanlı teşhisinin genetik algoritmalar ile optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Genetik algoritmalar daha iyi bir ağ performansı sağlamak için yapay sinir ağının parametrelerinin optimizasyonu ve dolayısıyla daha basitleştirilmiş bir ağ yapısı ve daha etkin bir ağ eğitimi için kullanılmıştır (Hocine ve Ahmed, 2016).

Sıkça kullanılan ve örnekleri verilen bu elektrik motoru arıza teşhisi sistemlerinin yanında, elektromanyetik alan izleme, sıcaklık ölçümü, kızıl ötesi tanıma, ses ölçüm ve izlemesi ve akım imza analizi gibi yöntemler de arıza teşhisi, tespiti ve kondisyon izleme çalışmalarında kullanılmaktadır (Vas, 1993; Kliman ve Stein, 1990; Nandi ve ark., 2005).

Tekerlek içi elektrik motorları, DC motorlardan olup, sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları ile temel olarak aynı çalışma prensibine sahiptirler. Her ne kadar çalışma prensibi aynı olsa da, genel yapıdaki PMBLDC (permanent magnet brushless direct current) motorlardan karakteristik özellikler ve fiziksel yapı olarak farklıdırlar. Bunun sebebi tekerlek içi elektrik motorlarının out-runner olarak tabir edilen, rotoru dışta, statoru içte, adım sayıları fazla olan motorlardan olmasıdır. Bu sebeple daha düşük devir fakat daha yüksek tork değeri olarak karakterize olmuş, dışarıdan bakıldığında tekerlek formunda olan yapıdadırlar. Tekerlek içi elektrik motorları, küçük güçlü elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan ve enerji verimliliği, hacimsel ve kütleli ağırlık avantajı ile kullanım kolaylığı açısından ele alındığında, daha çok geliştirilebilecek ve yüksek güçlü elektrikli araçlarda da kullanılabilecek elektrik motorlarıdır.

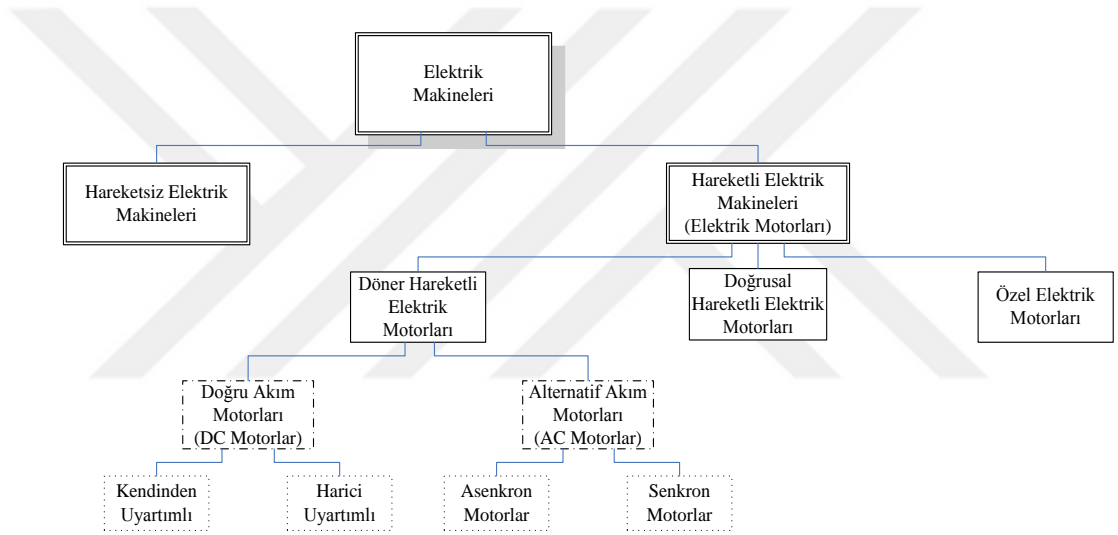
Tekerlek içi elektrik motorlarının, çeşitli yapay zeka teknikleri ile arıza teşhisi çalışması, hangi yöntemin daha iyi sonuçlar vereceği ile ilgili literatüre katkı sağlamanın yanında, tekerlek içi elektrik motorları ile ilgili çok kısıtlı olan arıza teşhisi çalışmalarına da yenilik getirmesi amaçlanmıştır. Ayrıca tekerlek içi elektrik motorlarının, henüz çalışırken devre dışı kalmasına sebebiyet verecek arızalarının

gerçek zamanlı olarak teşhis edilmesiyle, bu motorların daha güvenilir bir konum elde edip, arızalı, yani devre dışı sürelerinin kısılması, bu sayede daha verimli bir motor olarak, kullanıldığı araç çeşitliliği ve yaygınlığının arttırılmasının dolaylı olarak desteklenmesi, bu çalışmanın sağlayacağı yararlardandır.

Bu çalışmada, Bölüm 2’de tekerlek içi elektrik motorlarının yapısı, bileşenleri, elektriksel altyapısı, karakteristik özellikleri ve bu motorlarda rastlanabilecek arızalar anlatılmıştır. Bölüm 3’te yapay zeka teknikleri, bu çalışmada kullanılan teknikler baz alınarak detaylandırılmıştır. 4. Bölüm’de, test düzeneğinin oluşturulması, test düzeneğinde kullanılan teçizat, ölçülecek ve yapay zeka tekniklerinin girişi olarak kullanılacak değişkenlerin belirlenmesi alt başlıklarının ardından, veri alışı, ölçümlerin yapılması ve veri setinin oluşturulması aktarılmıştır. Bölüm 5’te, tekerlek içi elektrik motorlarının, yapay zeka teknikleri ile arıza teşhisinin yapılması ve yapay zeka tekniklerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Ayrıca gerçek zamanlı arıza teşhisinin uygulanışı anlatılmıştır. Bölüm 6’da tez çalışmasının genel değerlendirmesi, elde edilen sonuçlar doğrultusunda çalışmanın sağladığı avantajlardan bahsedilmiş ve daha sonra yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORLARI

Elektrik makineleri temel olarak hareketli ve hareketsiz makineler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir ve genel hatlarıyla Şekil 2.1.'deki gibi sınıflandırılabilirler.



Şekil 2.1. Elektrik makinelerinin temel sınıflandırma şeması

Elektrik makineleri genel bir ifadeyle, elektrik enerjisinin formunu değiştiren, ya da başka bir enerji şekline dönüştüren makinelerdir. Elektrik makinelerini sınıflandırırken, Şekil 2.1.'de de temel olarak ele alınan, elektrik enerjisinin formunu, ya da türünü değiştiren makineler sınıflandırması, hareketli ya da hareketsiz elektrik makineleri tanımlamasıyla ifade edilmektedir. Hareketsiz elektrik makinelerinin temel örneği olan transformatörler, mekanik bir enerji elde etmediğimiz, yalnızca elektrik enerjisinin formunu değiştiren, primer uçları arasına uygulanan gerilimin genliğini arttıran ya da azaltan elektrik makineleridir. Bütün makinelerde meydana gelen enerji kayıpları, elektrik enerjisinin formunu ya da türünü değiştiren elektrik makinelerinde de meydana gelmektedir. $P_{\text{kayıp}}$ (güç kaybı) azaldıkça, makinelerin

verimleri de artmaktadır. Elektrik makineleri için η (verim) diğer makinelere göre yüksek değerlerdedir.

Hareketli elektrik makinelerine elektrik motorları denir. Elektrik motorları elektrik enerjisi ile kinetik enerji arasında dönüşüm yaparlar. Hareketli elektrik motorları, döner hareketli elektrik motorları, doğrusal hareketli elektrik motorları ve özel elektrik motorları başlıkları altında incelenebilir. Özel elektrik motorları, temel işleyiş biçimi olarak diğer motorlardan farklı bazı özelliklere sahip motorlardır. Doğrusal hareketli elektrik motorları, doğrusal bir eksen üzerinde döner bir yapıya sahip olmayan stator ve rotor yapısına sahip, tek eksenli hareket eden elektrik motorlarıdır.

Elektrik motorları içerisinde en yaygın kullanılan döner hareketli elektrik motorlardır. Alternatif akım motorları ve doğru akım motorları olarak iki ana kola ayırabileceğimiz elektrik motorları endüstrinin ve gündelik hayatın büyük yükünü çeken ve kullanılan elektrik enerjisinin büyük miktarını sarf eden, aynı zamanda yerel ve genel düzeyde de generatör olarak elektrik enerji üretiminde kullanılan motorlardır. Alternatif akım elektrik motorları asenkron ve senkron motorlar olarak sınıflandırılırken, bu motorlar aynı zamanda çok fazlı veya tek fazlı olabilirler. Döner manyetik alan prensibine göre çalışan alternatif akım motorlarından asenkron motorlar bir kayma değeri miktarınca döner manyetik alanın referansı olan şebeke frekansı senkronizasyonundan uzaktadır. Senkron motorlar ise döner manyetik alana senkronize bir frekansa sahiptirler. Bir diğer döner elektrik motorları genel başlığı olarak değerlendirilen doğru akım motorları ise sabit bir manyetik alanın itme ve çekmesiyle dönüş hareketlerini gerçekleştirirler. Tek fazlı veya çok fazlı olabilen doğru akım motorları manyetik alanın oluşması için uyarıtma ihtiyacı duyarlar. Bu uyarıtma sürekli mıknatıslar vasıtasıyla kendinden olabileceği gibi harici uyarıtma amacıyla uyarıtma sargıları yardımıyla da oluşturulabilir. Çok fazlı doğru akım motorları bir sürücü devre yardımıyla dönüş yönüne göre sırasıyla uygulanan DC gerilim komütasyonu ile sabit manyetik alandan, döner manyetik alanmış gibi faydalanırlar. Alternatif akım ve doğru akım motorları, stator sargılarına göre fırçalı veya fırçasız olarak üretilebilirler.

Tekerlek içi elektrik motorları elektrik makineleri içerisinde, kendinden uyarımlı, döner hareketli doğru akım motorları başlıkları altında incelenirler. Bu motorlar sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları ile temel olarak aynı çalışma prensibine sahiptirler. Çalışma prensipleri aynı olmasının yanında, genel yapıdaki PMBLDC motorlardan karakteristik özellikler ve fiziksel yapı olarak farklıdırlar. Tekerlek içi elektrik motorlarının rotorlarının dışta, statorlarının içte ve adım sayılarının fazla olması, daha düşük devir sayılarına ve daha yüksek tork değerlerine sahip olmalarını sağlar. Dış görünüş olarak taşıt tekerleğine benzeyen tekerlek içi elektrik motorları, alçak güçlü elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji verimliliği, hacimsel ve kütsel ağırlık avantajı ile kullanım kolaylığı göz önünde bulundurulduğunda, gelişime ve yaygın kullanıma açık elektrik motorlarıdır.

Tekerlek içi elektrik motorları yaygınlaştıkça, tekerlek içi elektrik motoru ve tekerlek içi elektrik motoru kullanan araçlarla ilgili yapılan bilimsel çalışmaların sayısı da artmaktadır. Patterson ve Spee, güneş enerjili araçlar için bir elektrik motoru tasarlamış ve geliştirmişlerdir. Tekerlek içi elektrik motoru olarak tasarlanan motorun tasarım hedefi yüksek performans ve düşük güç tüketimi için dengeli bir ağırlık-güç oranını yakalamaktır. Tasarım sonucu olarak tekerlek içi motorun veriminin %94 olduğu sonucuna varılmıştır (Patterson ve Spee, 1995). Simões ve Vieira elektrikli araçlar için yüksek torklu düşük hızlı çok fazlı BLDC bir tekerlek içi elektrik motorunun tasarımını, analizini, simülasyonunu ve modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Dinamik modellemenin Matlab Simulink aracılığıyla yapıldığı çalışmada, deneysel sonuçlar, çalışmanın amacına ulaştığını doğrulayıcı nitelikte bulunmuştur (Simões ve Vieira, 2002). Tahami ve arkadaşları 4 adet tekerlek içi elektrik motoru kullanan bir elektrikli aracın stabilite arttırımı için bulanık mantık tabanlı bir sistem geliştirmişlerdir. Simülasyon sonuçları ile sistemin etkinliği ölçülmüş ve kaygan yollarda yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir (Tahami ve ark., 2002). Yang ve arkadaşları tekerlek içi elektrik motoru tasarım optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan eksensel akımlı sürekli mıknatıslı tekerlek içi elektrik motoru, ağırlığına göre yüksek torka ve verime sahip olmasının yanında, elektrikli araçlar için doğrudan sürülebilir bir yapıya sahiptir. Motor, besleme gerilimi, akı

doyumunu, akım yoğunluğu ve düşük hacim açısından optimizasyon yapılmış ve manyetik eşdeğer devre bazında modellenmiştir (Yang ve ark., 2004).

Van Schalkwyk ve Kamper tekerlek içi elektrik motorlarının, kullanıldığı elektrikli araçlarda stabilite ve konfora olan etkisini araştırmışlardır. Tekerlek içi elektrik motoru kullanmayan bir araç ile tekerlek içi elektrik motoru kullanan bir araç karşılaştırılmış ve kabul edilen konfor seviyeleri içerisinde tekerlek içi elektrik motorunun etkin bir dezavantajının bulunmadığı kanısına varılmıştır (Van Schalkwyk ve Kamper, 2006). Wu ve arkadaşları elektrikli araç uygulamaları için sürekli mıknatıslı tekerlek içi elektrik motorunun performans artışı konusunda bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada kutup sayısı ve manyetizasyon yönü karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve tork performansı geliştirilmiştir. Stator ve rotor arası hava boşluğu optimizasyonu ile yüksüz koşulda akı yoğunluğu artırılmıştır. 3. harmonik büyük ölçüde azaltılıp, besleme gerilimi temel bileşeni genliği artırılmıştır. Stator akımları ve motorun ısınması makul bir seviyeye kadar düşürülmüştür. Sürekli mıknatısların etkinliğinin artırılması ve kaçak akının azaltılması için akı yalıtımı sağlanmıştır (Wu ve ark., 2007).

Wang ve arkadaşları 4 tekerleği bağımsız olarak sürülen tekerlek içi motora sahip bir elektrikli aracın geliştirme ve deneysel karakterizasyon çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Rejeneratif özelliği ve sürüş esnasında tork cevabı ve güç verimi değerlerinin incelendiği çalışmada tekerleklerin esnek sürüş çalışması ile tork ve güç optimizasyonu sağlanmıştır (Wang ve ark., 2011). He ve arkadaşları 4 tekerlekten çekişli bir elektrikli araç için rejeneratif tekerlek içi elektrik motoru kullanarak bütün tekerleklerin bağımsız olarak yönetildiği yenilikçi bir sistem tasarlamışlardır. Çok tekerlekten çekişli elektrikli araçların diferansiyel problemi için ortaya konan metotta, motor sürüşü ve rejeneratif fren baz alınarak tasarlanan sistemin uygulanabilirliği testlerle doğrulanmıştır (He ve ark., 2012). Luo ve Tan tekerlek içi motorların yapısında yenilikçi bir topoloji oluşturmuşlardır. Yaylanmadan yoksun tekerlek içi motorunun manyetik hava boşluğunun yollardaki istenmeyen etkilerden gördüğü zararların ortadan kaldırılması için lastik burçlar kullanılmıştır. Lastik burçlar ile burçların bulunmadığı motor mukayese edildiğinde

manyetik hava boşluğu deformasyonunda %90 üzerinde iyileşme gözlemlenmiştir (Luo ve Tan, 2012). Freitag ve arkadaşları iki adet tekerlek içi elektrik motoru sistemi geliştirmiş ve bunları teorilerce öngörülen sonuçların yanı sıra uygulamaya tabi tutmuşlardır. Testler sonucunda, öngörüldüğü gibi %97'lik bir verim düzeyine ulaşılmıştır (Freitag ve ark., 2013). Tashakori ve Ektesabi tekerlek içi elektrik motoru sürücü devrelerinin arıza teşhisi çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Arızalar motorun hat geriliminin ayrık Fourier dönüşümü ile ele alınması yoluyla teşhis edilmiştir. Motor sürücüsü ve önerilen arıza teşhisi metodunun simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının normal durumdaki motor ile tutarlı olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar tekerlek içi elektrik motoru sürücüsünün arıza tespit ve teşhisi çalışmasının başarıya ulaştığını göstermiştir (Tashakori ve Ektsabi, 2013).

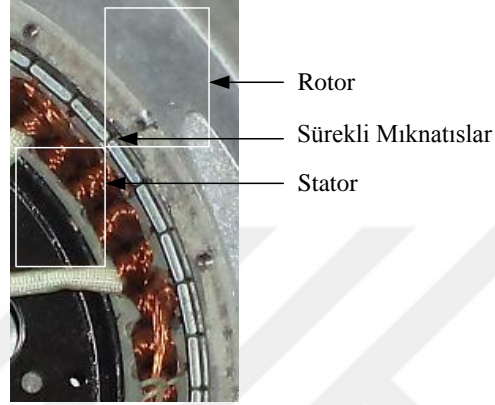
2.1. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarının Genel Yapısı

Şekil 2.2.'de görüldüğü üzere, tekerlek içi elektrik motorlarının dış görünüşü, amacına uygun olarak araç tekerleği formundadır. Bu yapı tekerlek içi elektrik motorlarının elektrikli ve güneş enerjili araçlar için kullanım ve verim açısından uygunluğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.2. Tekerlek içi elektrik motoru (Şimşir ve ark., 2016a)

Tekerlek içi elektrik motorları, fırçasız doğru akım motorlarının genel formunun dışında, rotor ile statorun ters konumlanmış yapısıyla ön plana çıkmaktadırlar. Şekil 2.3.'de tekerlek içi elektrik motorunun rotor, stator ve sürekli mıknatısları görülmektedir. Motorun her iki yanında bulunan kapaklar söküldüğünde, jant kısmının içindeki stator ve rotor konumları net bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 2.3. Tekerlek içi elektrik motorunun iç yapısı

Çalışmada kullanılan tekerlek içi elektrik motoru 250 W nominal güce sahip, 3 fazlı yıldız bağlı sargıları olan, ST-MAX marka bir motordur. Kullanılan sürücü devrenin markası da ST-MAX'tır ve 250 W gücündeki motorlar için uygundur. 250 W gücündeki tekerlek içi elektrik motorları, günümüzde yaygın olarak elektrikli bisikletlerde kullanılmaktadırlar. Motorun tasarımında henüz dişli ile ya da kutup sayısı değişimi ile hız ayarı sistemleri yaygın olarak kullanılmamakla beraber, etkin hız aralığı düşük olan, elektrikli bisikletler gibi, küçük güçlü elektrikli araçlar, hız aralığı sınırlı olan vitessiz yapıdaki tekerlek içi elektrik motorları ile mevcut şartlarda uyum sağlamaktadır.

2.1.1. Stator

Tekerlek içi elektrik motorlarının statorları genellikle 3 fazlı sargılara sahiptir. Motorun kullanıldığı aracın gövdesine, ya da şasisine sabitlendiği nokta olan motor mili statorun merkezinden geçmektedir ve stator, motor mili ile eş merkezli olarak araç şasisine bağlanmıştır. Statorun rotora yakın bölgesinde, mıknatıslar ile

etkileşmek için uygun mesafede konumlanmış Hall effect sensörler vasıtasıyla sürücü devre tetikleme zamanlaması için sinyalleri almaktadır. Statordan çıkıp motor milinin içine giren ve mil merkezinden dışarı çıkan faz kabloları üç adet ve Hall effect sensörler için üç adet veri ile bu sensörlerin uyarımı için 2 adet faz ve nötr olmak üzere 8 adet kablo bulunmaktadır. Şekil 2.4.'te motor milinden dışarı çıkan, statora bağlı faz ve sensör kabloları görülmektedir.



Şekil 2.4. Motor mili ve kablolar

Şekil 2.4.'te motor milinin, hem motoru merkezleyen ve araca sabitleyen bir referans, hem de motor kablolarını koruyan bir muhafaza olduğu görülmektedir.

2.1.2. Rotor

Rotor, yapısal olarak stator etrafında konumlanmış ve motorun miline her iki yandan rulmanlarla bağlanmıştır. Rulmanların sağlıklı olması, mekanik verimi artırıcı niteliktedir. Rotor, yapısı itibariyle motorların dönen kısmı olduğu için, elektrik motorlarında dönmeyi engelleyecek kablolama ve sargılar, sürücü devreye veya motor dışına komütatör ve bilezikler ile fırçalar yardımıyla aktarılırlar. Ya da rotorlarda kablo veya sargı bulunmayabilir. Tekerlek içi elektrik motorları da fırçasız doğru akım motorları olduklarından, rotorda sargılar bulunmaz ve dolayısıyla

kablolama için bilezikler ve fırçalar da bulunmaz. Manyetik alan oluşturma görevini sargılar yerine rotora yerleştirilmiş sürekli mıknatıslar yerine getirirler. Motorun sürekli mıknatısları, Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi, rotorun statora bakan iç yüzeyi boyunca, rotor ile stator arasındaki hava boşluğuna komşu olarak yerleştirilmişlerdir. Bu mıknatısların sayısının artışı ve sıklığı, bir tur boyunca adım sayısını artırmakta dolayısıyla devir sayısını düşürmekte fakat tork değerini de yükseltmektedir.

2.1.3. Dış fiziksel yapı

Motor milinin statoru merkezleyen orta noktasının her iki yanında, jant kapakları yardımıyla rotora bağlanan ve rotorun dönmesini sağlayan rulmanlar bulunmaktadır. Şekil 2.5.'te tekerlek için elektrik motorunun jant, lastik, kapak ve rulman yapısı görülmektedir.



Şekil 2.5. Tekerlek içi elektrik motorunun jant, lastik, kapak ve rulman yapısı

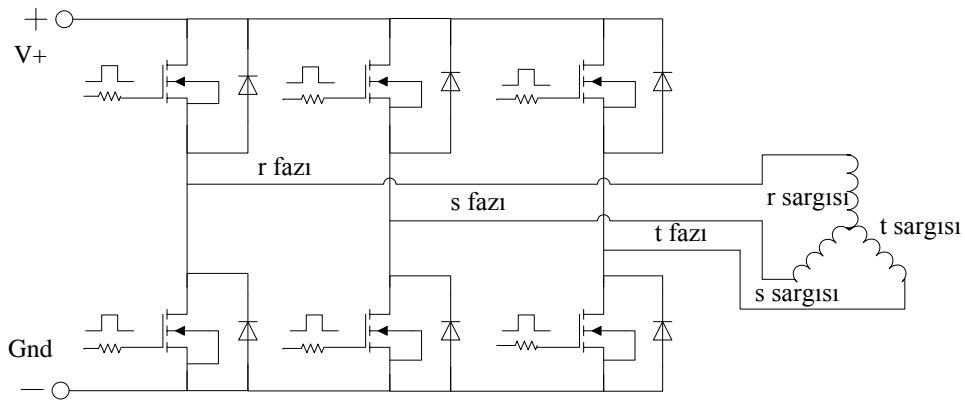
Şekil 2.5.'te de görülen dış fiziksel yapıda, rulman motor miline sabitlenmiş ve motor kapağı da rulman ile merkezlenmiştir. Jant kapağı, kapak olmanın yanında rotor ile stator arasındaki hava boşluğunu da rulmanlar ve vidalar yardımıyla sabitleyen önemli bir elemandır. Kapak stator ile rotor arasındaki hava boşluğu kapanmakta ve motor dönemez konuma gelmektedir. Jant kapakları rulmana sıkı geçme ile yerleşmekte, dış çevreleri boyunca ebatlarına göre belirlenmiş sayıda vidalarla rotor gövdesine bağlanmaktadır. Bu sayede rotor ile stator arasında bulunan

hava boşluğu stator ve rotor yüzeyleri boyunca sabit kalmaktadır. Dış görünüş ve mekanik yapı ele alındığında, stator dış gövdesi, rotor dış gövdesi ve rotor ile statoru bağlayan kapak bir arada bir tekerlek jantı formunda ve görevindedir. Rotor gövdesinin en dış yüzeyi, ya da jantın dış yüzeyi ise lastik tekerlekle kaplıdır ve tekerlek içi elektrik motorunun dış yapısı bu hali ile tam bir araç tekerleği görünüş ve görevindedir.

Şekil 2.5.'te de görülen, motorun bu jant ve lastik yapısı, diğer taşıtların, hatta tekerlek içi elektrik motoru olmayan elektrikli araçların mahkum oldukları bazı mekanik kayıpların önüne geçmektedir. Taşıtlardaki mekanik şanzıman yapısı içindeki dişliler ile diferansiyel ve bunun gibi aktarma organları sebebiyle oluşan mekanik kayıplar, tekerlek içi elektrik motorlarında yer almamaktadır. Tekerlek içi elektrik motorları, aracın herhangi bir mekanik aktarma organı ya da dişli sistemi barındırmadan doğrudan sürüşünü gerçekleştirdiği için daha yüksek verime sahiptirler.

2.1.4. Sürücü devre

Tekerlek içi elektrik motorunun sürücü devresinde, her bir faz için iki adet ve motorun gücüne göre değişen kapasiteye sahip MOSFET'ler bulunmaktadır. Şekil 2.6.'da motorun temel sürücü devresi görülmektedir.

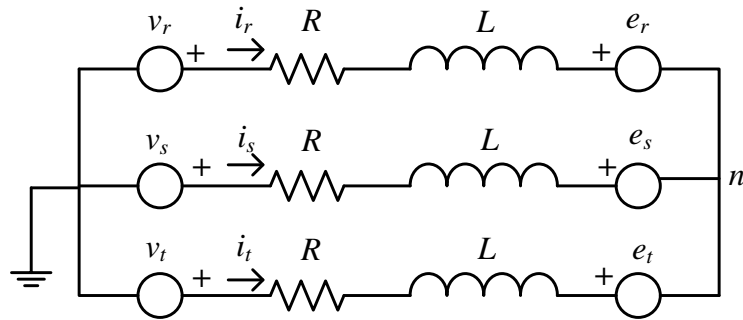


Şekil 2.6. Tekerlek içi elektrik motoru sürücü devresinin temel yapısı

Şekil 2.6.'da görülen sürücü devrede de tetikleme elemanı olarak MOSFET'ler kullanılmıştır. Sürücü devre tekerlek içi elektrik motorunun üzerinde bulunan ve motorun dönüş hızına göre sırasıyla sinyal gönderen Hall effect sensörlerden aldığı ve sayesinde dönüş yön ve hız tespitini de yaptığı değişken frekanstaki tetikleme sinyalleri doğrultusunda dönüş yönüne göre değişebilir ve ardışıl şekilde r sargısı ile s sargısını, sonra s sargısı ile t sargısını ve ardından t sargısı ile r sargısını ya da r sargısı ile t sargısını, sonra t sargısı ile s sargısını ve ardından s sargısı ile r sargısını seri bağlar. Bağlı olduğu güç kaynağı üzerindeki gerilimi, yine bağlı olduğu, gaz pedalı olarak çalışan ve potansiyometre kontrollü yapı ile, seri bağlı sargılar üzerine uygular ve seri bağlanma sırası ile motorun dönüş yönünü ve gerilimin efektif değeri ile şiddetini belirler.

2.2. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarının Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli

Tekerlek içi elektrik motorları, yaygın olarak 3 fazlı ve yıldız bağlı stator sargılarına sahiptirler. Üç fazlı bir tekerlek içi elektrik motorunun birbirleri ile özdeş 3 stator sargısı ve bir faz sargısına ait direnç değeri R ve yine her bir faz sargısının indüktans değeri L olmak üzere, elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Tekerlek içi elektrik motorunun elektriksel eşdeğer devresi (Şimşir ve ark., 2016a)

Şekil 2.7.'de verilen elektriksel eşdeğer devre çalışmada da kullanılan, 3 fazlı bir tekerlek içi elektrik motoruna aittir. Tekerlek içi elektrik motorları Şekil 2.7.'de ve (Denklem 2.1-2.17)'de motorun karakteristiğini ifade eden temel matematiksel

eşitliklerde de görüldüğü gibi, BLDC motorlara benzer fakat karakteristik ve performansı etkileyen bazı temel fiziksel farklar içerir. Burada n, nötr noktası, v_r , v_s ve v_t sırasıyla r, s ve t fazlarına uygulanan gerilim ifadesidir. e_r , e_s ve e_t ise motorda oluşan zıt EMK (elektromotor kuvveti) ifadeleridir. Tekerlek içi elektrik motorunun temel karakteristiği (Denklem 2.1-2.17) ile ifade edilebilir (Şimşir ve ark., 2016a):

$$v_{rn} = R i_r + p \Psi_r + e_r \quad (2.1)$$

$$v_{sn} = R i_s + p \Psi_s + e_s \quad (2.2)$$

$$v_{tn} = R i_t + p \Psi_t + e_t \quad (2.3)$$

ve,

$$v_{rn} = v_r - v_n \quad (2.4)$$

$$v_{sn} = v_s - v_n \quad (2.5)$$

$$v_{tn} = v_t - v_n \quad (2.6)$$

Burada R , statordaki her bir sargıya ait direnç değeridir, i_r , i_s , i_t ve Ψ_r , Ψ_s , Ψ_t ise sırasıyla r, s, t fazlarına ait akım ve akıdır. p Laplace operatörü v_{rn} , v_{sn} , v_{tn} de sırasıyla r, s, t sargılarının nötre göre gerilim değerleridir. Akı değerleri (Denklem 2.7-2.9)'da ifade edilmişlerdir.

$$\Psi_r = L i_r - M(i_s + i_t) \quad (2.7)$$

$$\Psi_s = L i_s - M(i_r + i_t) \quad (2.8)$$

$$\Psi_t = L i_t - M(i_r + i_s) \quad (2.9)$$

Burada L öz indüktans ve M ise karşılıklı indüktanstır.

$$i_r + i_s + i_t = 0 \quad (2.10)$$

(Denklem 2.10)'daki ifade (Denklem 2.7-2.9)'da kullanılarak (Denklem 2.11-2.13) elde edilir.

$$\Psi_r = i_r (L + M) \quad (2.11)$$

$$\Psi_s = i_s (L + M) \quad (2.12)$$

$$\Psi_t = i_t (L + M) \quad (2.13)$$

$$L_{eq} = L + M \quad (2.14)$$

L_{eq} ifadesi, eşdeğer indüktans anlamına gelmektedir. Tekerlek içi elektrik motorunun matematiksel modeli matrisel formda (Denklem 2.15)'teki şekilde elde edilir.

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{I} + pL_{eq}\mathbf{I} + \mathbf{E} \quad (2.15)$$

Burada \mathbf{I}_n , \mathbf{E} ve \mathbf{V} ifadeleri (Denklem 2.16)'daki formda ifade edilir.

$$\mathbf{I}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I} = \mathbf{I}_3 \begin{bmatrix} i_r \\ i_s \\ i_t \end{bmatrix}; \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{rn} \\ v_{sn} \\ v_{tn} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_r \\ e_s \\ e_t \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Her bir faz için, elde akım ve gerilim ifadeleri (Denklem 2.20)'de verilmektedir.

$$p(\mathbf{I} / \mathbf{I}_3) = (1 / L_{eq}) \mathbf{I}_3 [\mathbf{V} - \mathbf{R}\mathbf{I}_3 - \mathbf{E}] \quad (2.17)$$

Motorun her bir sargısının indüktans ve direnç değerleri özdeşdir. Motorun matematiksel modelini ele aldığımızda, tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi çalışması için, matematiksel modelin temel bileşenlerinden olan her faza ait indüktans, direnç gibi değerler, dolayısıyla faz akımları, besleme akımı ve gerilimi değişkenleri, arıza durumları arasında oluşacak farkların ölçümlerle ortaya çıkarılmasını sağlar. Bu durum, bahsedilen değişkenlerin, arıza teşhisin gerçekleştirilebilmesi için önemli olduklarını göstermektedir.

2.3. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarının Kullanım Alanı ve Karakteristik Özellikleri

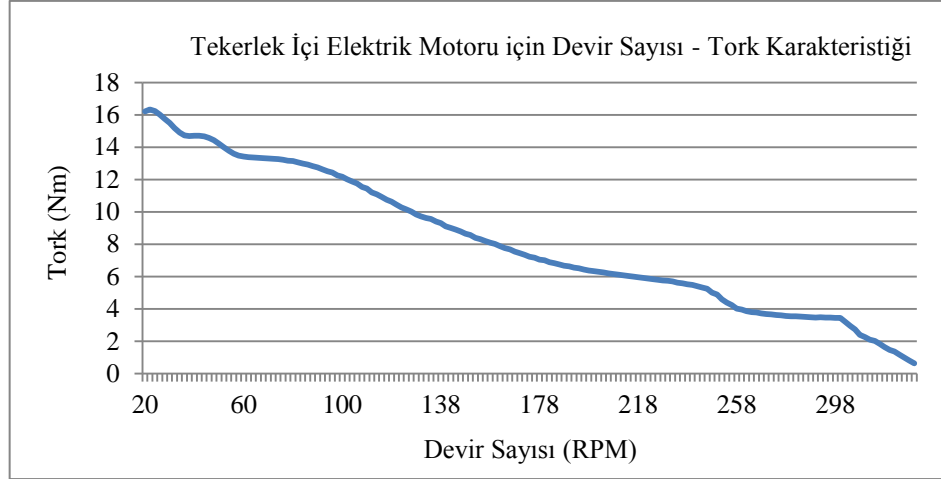
Tekerlek içi elektrik motorları, rotor iç yüzeyinde geniş rotor çapı sayesinde sıralanmış sürekli mıknatısların arttırdığı kutup sayısı nedeniyle yüksek kalkış torkuna sahiptirler. Bu durum taşıtların kalkışları esnasında ihtiyaç duyulan yüksek tork seviyesine büyük uyum sağlamaktadır. Tekerlek içi elektrik motorları için büyük önem arz eden tork ile devir sayısı arasındaki ilişkiler (Denklem 2.18) ve (Denklem 2.19)'da ifade edilmiştir.

$$T_e = \frac{e_r i_r + e_s i_s + e_t i_t}{\omega_m} \quad (2.18)$$

$$T_m = T_e - J \frac{d \omega_m}{d t} - \beta \omega_m \quad (2.19)$$

(Denklem 2.18-2.19)'da, ω_m rotorun açısal hızı (rad/s), T_e elektromanyetik tork (Nm), T_m mekanik tork (Nm), β sürtünme faktörü (Nm s/rad) ve J ise atalet momentidir (kg m²). (Denklem 2.18-2.19), hız değerinin torka, tork değerinin ise motorun faz akımlarına bağlı olduğunu ifade etmektedir. Bu sebepten, arızaların akım, tork ve devir sayısı değerleri motordaki durumların değişimi ve arıza teşhisi konularında etkin ve önemli yere sahiptirler.

Şekil 2.8.'de çalışmada kullanılan motora ait devir sayısı-tork karakteristiği verilmiştir. Tekerlek içi elektrik motoru, düşük devirlerde yüksek tork değerlerine ulaşabilmektedir. Düşük devirlerde gerçekleşen harekete geçme, yani kalkış devirlerinde aracın ihtiyaç duyduğu ivme bu sayede sağlanabilmektedir. Tekerlek içi elektrik motorlarının doğrudan sürüş imkanı sağlayan yapısı elektronik diferansiyel sistemi ile desteklendiğinde, içten yanmalı motorlar ve diğer elektrikli motorları kullanan araçların ihtiyaç duydukları aktarma organlarına, şafta veya diferansiyel elemana ihtiyaç duymadan yönlenme ve aktarma işlemlerini yerine getirmektedirler.



Şekil 2.8. Tekerlek içi elektrik motoruna ait devir sayısı-tork karakteristiği (Şimşir ve ark., 2016a)

Kayıplara yol açan mekanik sistemleri kullanmayan tekerlek içi elektrik motorları bu sayede diğer sistemlere oranla daha az kayıplara sahiptirler. Bu durum güneş enerjili veya elektrikli araçlara menzil artışı, enerji verimliliği ve daha az sayıda mekanik arızalar şeklinde olumlu olarak yansımaktadır.

2.4. Tekerlek İçi Elektrik Motorlarında Meydana Gelen Arızalar

Elektrik motorları ile ilgili başarılı geliştirme ve iyileştirme çalışmalarına rağmen, termal, elektriksel ve mekanik zorlanmalar sebebiyle arızalar kaçınılmazdır. Arızalar uygun şekilde tespit edilip ele alınmazlarsa, çeşitli performans düşüşleri ve nihayetinde büyük sistem arızaları ile sonuçlanabilirler (Gao ve Ovaska, 2001). Tekerlek içi elektrik motorları da diğer elektrik motorları gibi belli bir arıza karakterizasyonuna sahiptirler. Bu arızaların bir kısmında tekerlek içi elektrik motorlarının hassas noktaları ortaya çıkmaktadır. Bazı arızaların da tekerlek içi elektrik motorlarında arıza teşhisi için, çalışmada kullanılan yöntemle teşhis edilmesi imkansızdır ve bu arızaların gerçekleşme ihtimali diğer arızalara göre çok azdır. Bahsedilen, teşhisi gözle görülür ve motorun çalışır durumda kalmasını engelleyici arızaların gerçekleşmesi, çoğunlukla tekerlek içi elektrik motorlarının kaza gibi şiddetli bir travma ile karşılaştığında mümkün olabilir. Bu tür durumlarda motor büyük ölçüde deforme olur ve arıza teşhisine imkan vermeyecek bir pozisyona geçer. Bu sebeple bu arızalara ait teşhis çalışmalarının yapılması mümkün değildir.

Örneğin açık devre arızaları, kısa devre arızaları, sensor arızaları elektriksel ve gerçekleşmesi olası arızalardan ve rulman arızası da yine gerçekleşmesi muhtemel ve mekanik arızalardandır. Fakat motor milindeki eğilme, kırılma, ya da eksen kaçıklığı arızaları mekanik, fakat büyük travmalar ve motorun bariz deformasyonu ile gözle görülür şekilde kullanılamaz hale gelmeden gerçekleşmesi mümkün olmayan arızalardır. Sürekli mıknatıs arızaları manyetik olarak da ele alınabilir yönü de bulunan bir arıza olabileceği gibi, mıknatısların kopması ya da düşmesi gibi bazı durumlarda, motorun sıkışması, sargıların deforme olması gibi dolaylı olarak mekanik arızalara da sebebiyet verebilecek, motorun çalışır durumda kalmasını ve arıza teşhisini engelleyici arızalar olarak ele alınmıştır.

2.1.5. Açık devre arızaları

Açık devre arızaları genel olarak iletimsizlik arızası olarak nitelendirilebilir. İletken ve düşük direnç değerlerine sahip olması gereken sargılar, temel olarak motorun faz başına sargıları, sargıları besleyen, sürücü devreden gelen faz kabloları ve motor iç yapısında sargıların yıldız noktası, elektriksel veya mekanik sebeplerden kaynaklı elektriksel iletkenliği ortadan kaldıracak fiziksel deformasyona uğrayabilirler. Bu durum motorun sargılarında açık devreye sebep olabilir.

Açık devre arızalarında motorun açık devre olan sargısından akım geçmez. 3 fazlı olan motor 2 faza düşer ve sarsıntı, güç kaybı, devir sayısı düşmesi gibi problemler ortaya çıkabilir. Açık devre arızaları en çok faz iletim hattı boyunca iletken kopması, sargıların çeşitli nedenlerle deformasyonu ve bağlantı gevşemeleri sebebiyle ortaya çıkarlar ve motorun normal dışı da olsa çalışmaya devam etmesi ve çıkış karakteristiğindeki değişimler sayesinde teşhis edilebilmeleri mümkündür.

2.1.6. Kısa devre arızaları

Elektrik motorlarında kısa devre arızaları bir faz iletkeninin ya da sargının, yabancı bir madde, yüksek ısı ya da herhangi bir sebeple başka bir sargı ile, ya da sargının kendi içerisinde kısa devre yapması ile oluşabilir.

Tek faz iletkeninin yalıtım arızaları sebebiyle ya da yabancı bir madde ile kendi içerisinde kısa devre yapması mümkün olabileceği gibi, yine yalıtım arızaları ya da yabancı iletken malzeme sebebiyle sargılar arası kısa devre durumu da muhtemeldir. Sargılar arası kısa devrenin doğurduğu sonuçlar diğerlerine göre daha ağır da olsalar, kısa devre arızalarının genel karakteristiğinde mekanik güç kaybı, yüksek kısa devre faz akımları, besleme akımı ve elektromotor kuvveti kaybı sebebiyle düşük tork bulunmaktadır. Kısa devre arızaları çabuk teşhis edilmez ve motor bu durumda kullanılmaya devam edilirse, iletken deformasyonu, sargının yanması gibi daha büyük arızalara yol açabilirler.

2.1.7. Sensör arızaları

Tekerlek içi elektrik motorlarında tetikleme zamanını, sürücü devreye bir tetikleme sinyali ile ileten ve statorda uygun aralıklarla sabitlenmiş, sürekli mıknatısların manyetik etkisiyle çalışan sensörler bulunmaktadır. Hall effect sensörler tekerlek içi elektrik motorlarının dönüş hızına göre tetikleme sinyallerini düzenlerler. Sürücü devre içerisindeki her fazın giriş ve çıkış uçlarında birer adet olmak üzere faz başına iki adet bulunan transistörlerin tetiklenmesini sağlayarak, motorun dönüş yönüne göre hangi iki sensörün seri bağlanıp enerjilendirileceğini belirleyen sinyaller gönderirler. Şekil 2.9.'da tipik bir Hall effect sensör gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Hall effect sensör

Şekil 2.9.'da da görüldüğü gibi bir Hall effect sensörün 3 adet bacağı vardır. Bunlardan ikisi sensörün enerjilendirildiği faz ve nötr bacaklarıdır. Diğerisi ise

sensörün çıkış sinyalinin alındığı bacadır. Hall effect sensörler, çoğunluğu ekonomik ömrü dışarısında olmak üzere, bazı arızalar oluşturabilirler. Fakat bu sensörlerin sıklıkla rastlanan arızaları, narin bacak yapılarının ve uyartım veya sinyal bağlantı noktalarının tekerlek içi elektrik motorunun kullanımı esnasında sıcaklık ve sarsıntıyla ya da ani bir darbeye kopmaları ve sinyal verememeye başlamaları şeklinde oluşur. Sensör arızaları sonucu motor sürücüsü tetikleme sinyali alamamaya ve kopan sensöre ait faz için motora enerji iletmemeye başlar. Bu durum, sürücünün motoru istenildiği gibi sürememesine yol açar. Bu arıza her bir sargıyı daima iletsiz yapmaz, sağlam sensörlü sargı, diğer sağlam sensörlü sargı ile iletimine devam eder. Fakat arızalı sensörlü sargı için doğru tetikleme yapılamaz. Bunun sonucu olarak sarsıntı, tork düşüşü ve devir sayısı düşüşü meydana gelir.

2.1.8. Rulman arızaları

Tekerlek içi elektrik motorları da döner mekanik sisteme sahip diğer motorlar gibi rulmanlara sahiptirler. 2 adet rulman, out-runner olarak tabir edilen, statoru iç kısımda sabit ve rotoru dış kısımda döner yapıdaki tekerlek içi motorların, araç şasisine sabitlenmiş, hareketsiz, fakat rotorun referansı olan motor milinin her iki yanında olmak üzere motorun dönüşünü kolaylaştırma görevini yerine getirirler. Klasik yapıdaki motorlarda sabit olan dış kısımdaki stator ile iç kısımda dönen rotorun uzantısı olan motor milinin döner hareketinde, ağırlığı döner eksen olarak ikincil derecede yüklenen rulmanlar, tekerlek içi elektrik motorlarında, motor milinin yüklendiği araç ağırlığını dikey ekseninde, birincil olarak yüklenmekte, daha çok zorlanmakta ve daha yüksek bir önem arz etmektedir. Bu durum, rulmandaki arızaların da tekerlek içi elektrik motorları için daha önemli olması sonucunu doğurmaktadır.

Rulmanlar, zaman içerisinde kullanım şartları ve aldığı darbeler neticesinde, korozyon ve bilya yapısında oluşan asimetri, yağlanma kaybı gibi etkiler, ya da ekonomik ömrünün tamamlanması ile çeşitli mertebelerde halinde daha yüksek sürtünmeye sahip olabilirler. Bu durum, motorun dönüşünü zorlaştıran, daha fazla enerji sarfiyatına yol açan bir arıza karakteristiği ile rulman arızalarını oluşturur.

Rulman arızalarının önemli boyutlara ulaşmadan, arıza teşhisi sistemleri ile teşhis edilmesi, ileride arıza boyutu arttığında doğabilecek daha büyük arızaları, ani devre dışı kalmaları ve yüksek enerji sarfiyatını engelleyecek öneme sahiptir.

2.1.9. Motor mili arızaları

Motor mili arızaları elektrik motorlarında görülmesi muhtemel mekanik arızalardandır. Bazen üretim hataları, bazen zorlu şartlar altında kullanım ya da zaman içerisinde ekonomik ömrünü tamamlayan malzeme ve metal yorgunluğu sebebiyle oluşabilecek motor mili arızaları genelde motor milinin eğilmesi ve sonucunda eksen kaçıklığı şeklinde kendini gösterir.

Tekerlek içi elektrik motorlarının motor milleri, taşıdıkları ağırlık ve tasarım özellikleri sayesinde çok kısa ve kalındır. Bu yüzden tekerlek içi elektrik motorlarında motor mili eğikliği gibi bir durum diğer arızalara göre çok nadir görülebilir. Tekerlek içi elektrik motorlarının motor mili arızalanacak kadar yüklendiğinde ya da darbe aldığı anda, sargılara çok yakın olan mıknatısların birbirine sürtmesi veya birbirine geçmesi, ya da rulman arızası sebebiyle motor daha büyük bir sorunla karşılaşacak ve işlevini yitirecek duruma gelecektir. Çünkü motorun ağırlığını birlikte taşıyan çelik, kalın, kısa ve dayanıklı motor mili, mile göre hassas yapıdaki rulmana, yine mile göre çok daha hassas yapıda olan ve alüminyum malzemeden imal edilmiş, jant yapısındaki rotor ve statora göre çok daha geç hasar alacak ve hasar aldığı anda sürtünme ve hatta sargılara uygulanan basınç nedeniyle muhtemel kısa devre veya açık devre arızalarıyla beraber motorun dönemez hale gelmesiyle birlikte motor mili arızaları, teşhisi mümkün olmayan bir şekilde ortaya çıkabilecektir.

2.1.10. Sürekli mıknatıs arızaları

Tekerlek içi elektrik motorları da sürekli mıknatıslı motorlardır. Düşük devir ve yüksek tork değerlerini, sık dizilmiş mıknatıslar ve dolayısıyla çok kutuplu olmaları sayesinde sağlarlar.

Tekerlek içi elektrik motorlarının statorlarının dış yüzeyinde bulunan Hall effect sensörler, rotorun iç yüzeyinde bulunan sürekli mıknatıslar sayesinde tetikleme yaparlar. Aynı zamanda sürekli mıknatıslar motorun kutuplarını ve kendinden uyarımı, dolayısıyla döner manyetik alanı komütasyon ile oluşturacak manyetik alanı, komütasyon öncesi statik olarak sağlayan elemanlardır. Sürekli mıknatıslar ile stator arasındaki hava boşluğu çok küçüktür. Bu sebeple, sürekli mıknatıslar yerlerinden oynadığında aradaki boşluk motorun dönmesine doğrudan ve aniden engel olacaktır. Bu durum göz ardı edilebilecek kadar seyrek gerçekleşebilecek bir arızadır. Fakat gerçekleştiği takdirde, motorun dönüşü aniden duracağı ve arıza teşhisine imkan vermeyeceği için muhtemel arızalar arasında gösterilmemiştir. Bu ani duruş gerçekleşse bile, aniden duruş esnasında motorun ataleti ile oluşan büyük kuvvet, sürekli mıknatısın sargı içi ya da sargılar arası kısa devre ya da açık devre arızasına sebep olacak ve yine arıza tek başına teşhis edilemeyecektir. Sürekli mıknatısların, oluşturdukları manyetik alanın zaman içerisinde etkinliğini yitirmesi durumu, bütün mıknatıslar için homojen bir şekilde gerçekleşecek, motorda dengeli ve simetrik bir güç düşüşüne sebep olabilecektir. Fakat bu durum, motor ekonomik ömrünü tamamladıktan sonra gerçekleşebilecektir. Bu sebeplerden dolayı sürekli mıknatıs arızaları, çalışmada kullanılan yöntemlerle teşhisi mümkün olmayan arızalar sınıfına girmektedir.

BÖLÜM 3. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ

Yapay zeka; öğrenme, sebep sonuç ilişkisi oluşturma ve kendini düzeltme, iyileştirme gibi insana yakın düşünme işlemi gerçekleştiren bilgisayarların geliştirilmesi ile ilgili çalışmalarda elde edilen sonuçlar olarak tanımlanabilir. Yapay Zeka (Artificial Intelligence) kavramını 1956 yılında ilk kez kullanan John McCarthy, yapay zekayı "Makineleri zeki yapan mühendislik ve bilim dalı" olarak tanımlamıştır. Fakat "zeki insan davranışlarını taklit eden sistemler" tanımı daha sade ve güncel, daha kapsayıcı bir tanım olarak görülmektedir. Yapay zeka tekniklerinin genel hatları, insanlar gibi düşünen ve hareket eden, rasyonel düşünceler ve hareketler sergileyebilen sistemler olarak ortaya konulabilir (Kok ve ark., 2009; Koçak 2010; Russel ve Norvig, 1995). Yapay zeka çalışmaları ilk kez ortaya konduğu günden bu yana yoğun ilgi görmüş ve sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Konusu yapay zeka olan araştırmalar sonucu ortaya çıkan sistemler, zeki sistemler olarak anılmaktadır (Öztemel, 2003).

Yapay zeka tabanlı sistemler, genel çalışma prensibi olarak sabit ve belli bir algoritma değil, sembolik ve sezgisel kuralları kullanırlar. Genellikle, tam olarak ve matematiksel olarak formülize edilemeyen problemlerin çözülmesinde kullanılırlar. Olaylarla ilgili tecrübe kazanıp öğrenme özelliğini de barındıran yapay zeka sistemlerinin diğer programlardan farkı, bu sistemlerin yanlış yapabilme olasılığıdır. Sağlanan referans bilgi ya da veri seti yanlış ise, ya da yanlış yorumlanırsa, yapay zeka sistemleri yanlış çözümler de üretebilirler (Vas, 1993). Fakat kapsamlı veri seti, uygun ağ yapısı ve uygun sınıflandırılmış değişkenler ile, geçmiş çalışmalarda görüldüğü üzere %95 ve üzerinde doğru teşhislere ulaşabilen çok başarılı sonuçlar elde edilebilir (Aminian ve ark. 2002; Ghate ve Dudul, 2009).

Yapay zeka teknikleri, özellikle yapay sinir ağı ve bulanık mantık, geniş kullanım alanına sahip yöntemlerdir (Karakuzu, 2011). Muhtelif alanlarda ve çeşitli elektrik motorları ile ilgili istifade edilen yapay zeka teknikleri, tekerlek içi elektrik motorları ve tekerlek içi elektrik motoru kullanan araçlar, veya BLDC motorlarla ilgili arıza tespiti ve teşhisi çalışmalarının da temelini oluşturmuştur.

Şimşir ve arkadaşları tekerlek içi elektrik motorlarının gerçek zamanlı arıza teşhisi çalışmasını ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapay sinir ağının giriş verisi olarak faz akımları, besleme gerilimi ve akımı, tork ve devir sayısı verilerinin kullanıldığı çalışmada, normal durum, her fazın kendine ait fazlar arası kısa devre, tek faz kısa devre, açık devre, sensör arızaları ile rulman arızası teşhis edilebilmiştir (Şimşir ve ark., 2016a). Şimşir ve arkadaşları bulanık mantık yöntemini kullanılarak çalışmada tekerlek içi elektrik motorunun açık devre, kısa devre, fazlar arası kısa devre sensör ve rulman arızaları ile normal durumunun teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Motorun besleme akımı, tork ve devir sayılarının bulanık mantığın giriş değişkenleri olarak kullanıldığı çalışma, yapılan testler sonucunda %99,12'lik başarıya ulaşmıştır (Şimşir ve ark., 2016b). Wang ve Wang 4 ayrı sürülen tekerlek içi motoru bulunan elektrikli araç için aktif arıza teşhisi ile arıza telafi kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, aracın tekerlek içi elektrik motorlarından birinin arıza yapması durumunda aracın stabilitesinin korunması adına adaptif kontrol tabanlı pasif arıza telafi kontrolörü geliştirilmiştir. Bu amaçla arızalı bir motor olduğunda motorların tork dağılımının arıza durumuna göre tekrar düzenlenmesi sağlanmıştır (Wang ve Wang, 2011). Ifedi ve arkadaşları tekerlek içi elektrik motorları için arıza telafi sistemi çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, arıza sonrası performans düzeyini yeterli seviyede tutmak ve yüksek tork yoğunluğunu sağlamak hedeflerine odaklanmıştır. Sonuçların mukayesesi için bir dizi arıza, önce simüle edilmiş, sonra örnek motorda deneysel testlere tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler ile aynı sistemde çalışan bir motordaki arızanın, çalışan diğerleri üzerinde anlamlı bir etkiye sebebiyet vermediği görülmüştür (Ifedi ve ark., 2011).

Abed ve arkadaşları sabit olmayan kullanım koşulları altındaki BLDC motorların rulman arızalarının teşhis edilmesiyle ilgili yenilikçi bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrık dalgacık dönüşümünün kullanıldığı sistemde, teşhis için durumlar arası ayırt edici özelliklerin ortaya çıkabilmesi amacıyla giriş değişkenleri olarak stator akımı ve yanal titreşimler seçilmiştir. Fark oluşturan bu özellikler daha sonra ortogonal bulanık komşuluk ayırt etme analizi ile daraltılmıştır. Rulman arızalarının belirlenmesi ve tespit edilmesi için yinelemeli yapay sinir ağı kullanılmıştır. Çalışma %97'lik bir doğru teşhis başarısına ulaşmıştır (Abed ve ark., 2015). Eissa ve arkadaşları BLDC motorların arıza tespiti çalışması için Luenberger gözlemcisi metodunu bulanık mantık yöntemiyle geliştirmişlerdir. Önerilen metodun başarısının test edilmesi için kapsamlı testler gerçekleştirilmiştir. Basit arızalardan karmaşık arızalara kadar geniş bir yelpazede yapılan testler sonucunda, bulanık Luenberger metodunun, klasik Luenberger metodundan daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır (Eissa ve ark., 2015).

Liu ve arkadaşları sürekli mıknatıslı doğru akım motorlarının arıza tespit ve teşhisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Parametre değişim örnekleri tabanlı olarak çok katmanlı perseptron yapay sinir ağı kullanarak arızaların ayırt edilmesi sağlanmıştır (Liu ve ark., 2000). Awadallah ve Morcos sürekli mıknatıslı BLDC motor sürücüsünün adaptif neuro-fuzzy yöntemleriyle anahtarlama arızalarının teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Eğitim verilerini içermeyen değişik koşullarda testler gerçekleştirildiğinde, önerilen metodun başarısı görülmüştür (Awadallah ve Morcos, 2004). Awadallah ve arkadaşları akım kaynağı invertör ile beslenen sürekli mıknatıslı BLDC motorun stator sargıları arızası teşhisi için bir neuro-fuzzy sistem geliştirmişlerdir. Motorun normal ve kısa devre durumu verileri toplu parametre ağ modeli ile elde edilmiştir. İki bağımsız arıza teşhisi modelinin elde edilmesi için elektromanyetik tork ve faz gerilimi verileri izlenmiştir. Karakteristik dalga şekillerinde ayrık Fourier dönüşümü ile elde edilen arıza işaretleri, kısa devre sayısının belirlenmesi için kullanılır. Arıza konumu, hızlı Fourier dönüşümü ile genişletilen farklı bir arıza belirtisi seti ile belirlenir. Arıza teşhisi sisteminin otomatikleşmesi için simülasyon sonuçları baz alınarak eğitilen bir neuro-fuzzy sistem oluşturulmuştur. Testler ve deneyler sonucunda önerilen sistemin başarılı

olduğu görülmüştür (Awadallah ve ark., 2005). Rajagopalan ve arkadaşları değişken koşullar altında çalışan BLDC motorun rotor arızalarının tespitini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma değişken durumlarda kompleks veriler ile gerçekleştirilmiş ve iki yenilikçi model, pencereli Fourier dizisi ve Wigner-Ville tabanlı dağılımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Rajagopalan ve ark., 2006). Bae ve arkadaşları BLDC motorların sargı kısa devre arızalarının tespit ve teşhisini bulanık benzerlik yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Belirli koşullar altında gerçekleştirilen testler sonucunda arızaların tespit edilip izole edilebildiği görülmüştür (Bae ve ark., 2009). BLDC motorların rulman arızalarının teşhisi için dinamik yapay sinir ağları ve ortogonal bulanık komşuluk diskriminant analizi yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen metodun değişik arızaları sınıflandırmada güvenilirliği ve hızı, gerçek zamanlı simülasyonla test edilmiştir (Abed ve ark., 2014).

Tekerlek içi elektrik motorlarının yapay zeka tabanlı arıza teşhisinin amaçlandığı bu çalışma için, çeşitli yapay zeka teknikleri tekerlek içi elektrik motorlarının arıza teşhisi için denenmiş, içlerinde anlamlı bir başarı seviyesine ulaşan bulanık mantık, ileri beslemeli yapay sinir ağı, kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı, Elman yapay sinir ağı ve katman yinelemeli yapay sinir ağı uygun görülmüştür.

3.1. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, insan düşünme ve algılamasını modellemek için kullanılan güçlü bir araçtır (Yumuşak ve ark., 1997). Boolean mantığının bir uzantısı olarak 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından klasik bulanık kümeler teorisinin genelleştirilmiş yapısı olarak, bulanık kümeler matematiksel teorisi temelleri üzerinde ortaya atılmıştır. Bulanık mantık bir koşul ya da durumun derecelendirilmesi ya da aşamalandırılması konusunda, o kavramı yanlış ya da doğru olarak ayırmak yerine yanlış ya da belirsiz durumları da göz önüne alarak, bunların arasında bazı değerler oluşturulması ile, muhakeme konusunda oldukça değerli bir esneklik elde edilmesini sağlar (Dernoncourt, 2013).

Bulanık mantık sistemlerinin tasarımı, problemin çözümünün ortaya konulmasıyla başlar. Bu aşamaya veri alış işlemi adı verilir. İkinci aşamada çözümün bulanık mantık metoduna dönüştürülmesi işlemi, bulanık mantık kurallarının oluşturulması ve bulanık mantık değişkenlerinin tasarımı aşaması vardır. Daha sonra bulanık mantık sonuç çıkarımı elemanlarının tasarımı gerçekleştirilir. Bu aşamada temel bulanık çıkarım algoritması şekillendirilir. Uygun çıkış seçimleri arasındaki boşluklar doldurulur ve sezgisel bileşenler tasarlanır. İkinci ve üçüncü aşamalar bazen kendi aralarında yer değiştirebilir. Bu üç aşama gerçekleştirildikten sonra test ve gerekiyorsa simülasyon aşamalarına geçilir.

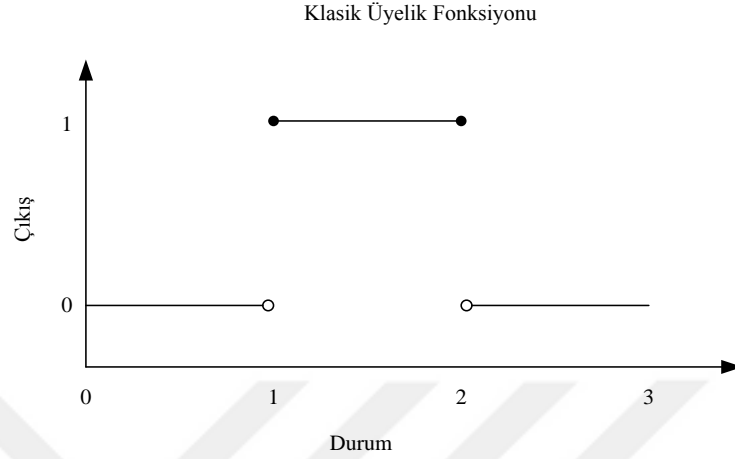
Bulanık mantık sistemleri ilk önce bir bilgisayar yardımıyla uygulamaya alınır. Sistem geliştirildikten sonra muhtelif programlama dillerinden biri ile kodlanmış bir bilgisayar programı haline dönüştürülüp değişik kontrolcü devrelere gömülebilir. Eğer sayısal bir donanım kullanılıyorsa bulanık algoritmanın kaynak kodları sisteme yüklenir veya analog bir donanım kullanılıyor ise de sistem için bir devre oluşturulur (Berkan ve Trubatch, 1997).

Bulanık mantık, temel olarak iki bileşenden oluşur. Bunlar; üyelik fonksiyonları ve kurallardır. Bu bileşenleri kullanarak insanların deneyim, tecrübe ve tercihlerini nitel bir tanımlamadan, mikroişlemci uygulamaları ve otomasyon için uygun ve nicel bir tanımlamaya dönüştürmek mümkündür. Bulanık üyelik fonksiyonları, kullanıcının tercih ve tecrübelerine bağlı olarak değişik şekil ve formlarda olabilir. Bulanık kurallar, if-then önermeleri yapısında, sebep sonuç ilişkilerine bağlı ve çizelgeler halinde oluşturulmuş bir yapıya sahiptirler. Bulanık kuralların çıkarılabileceği dört temel yol vardır. Bunlar; uzman görüşü ile mühendislik bilgisi, insan davranışları, bir sistem ya da işlemin bulanık modeline dayanan çıkarımlar ve öğrenmeye dayanan çıkarımlardır (Chow ve Menozzi, 1993; Chow, 1997).

3.1.1. Üyelik fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları temel olarak klasik kümeler veya bulanık kümeler olarak ele alınabilir. Klasik kümelerin temel prensibi, bir elemanın bir kümenin elemanı olması

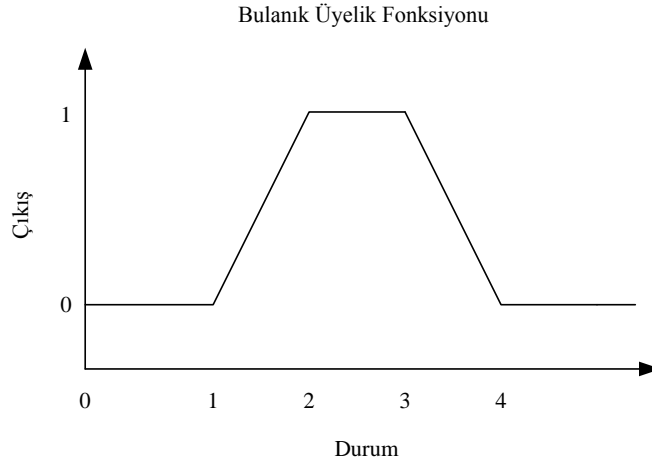
ya da elemanı olmaması olarak dijital bir anlayışla ele alınmasıdır. Şekil 3.1.'de klasik bir üyelik fonksiyonu örneği görülmektedir.



Şekil 3.1. Klasik bir üyelik fonksiyonu örneği

Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi, çıkış ifade eden bütün durumlar için çıkış ifadesi 0 ya da 1 değerini almaktadır. Bulanık üyelik fonksiyonları ise üyelik kümesi içerisinde değişken üyelik derecelerine sahip elemanlar içerirler. Doğal veya yapay olarak tanımlanan miktarları tarif eden, değerleri nitel olan fakat nicel olmayan dilsel değişkenleri ifade etmek için, bu durum büyük önem arz eder (Zadeh, 1975). Bu yapı sayesinde soğuk veya sıcak gibi iki seviyeli bir çıkış yapısı yerine, dilsel olarak ifade edilebilen, ılık, az sıcak, az soğuk çok soğuk gibi, istenilen birçok çıkış seviyesi elde edilebilir.

Bulanık mantık kesin ve tam sayısal kurallardan ziyade, dilsel kuralları içine alır (Odabaş ve ark., 2009). Giriş ve çıkışların dilsel olarak ifade edilebilmesi bulanık mantık yönteminin önemli bir avantajıdır (Genç ve Yanıkoğlu, 2016). Şekil 3.2.'de görülen örnek bulanık üyelik fonksiyonu yamuk formundadır. Bulanık üyelik fonksiyonları tasarlayan uzmanın tercihinin ya da tasarlandığı sistemin gereksinimlerine göre üçgen ya da sinüsoidal gibi formlarda da olabilirler.



Şekil 3.2. Klasik bir bulanık üyelik fonksiyonu örneği

0 ile 1 arasındaki çıkış değerleri bulanık üyelik fonksiyonu sayesinde elde edilip, dilsel olarak ifade edilebilen çok daha fazla sayıda çıkışın temsili yapılabilmektedir.

3.1.2. Bulanık kurallar

Bulanık mantık, birçok uygulamada başarı ile kullanılabilmektedir. Sezgisel bilgilerin, uzman görüşü ve tecrübesi ile sağlanan dilsel kurallar ile ifade edilebilmesi, bu bilgilerin etkin karar veya hareketlere dönüşümünü sağlar (Chow, 1997). Bulanık kuralların genel ifadesi aşağıdaki gibidir (Yardımcı ve ark., 2001):

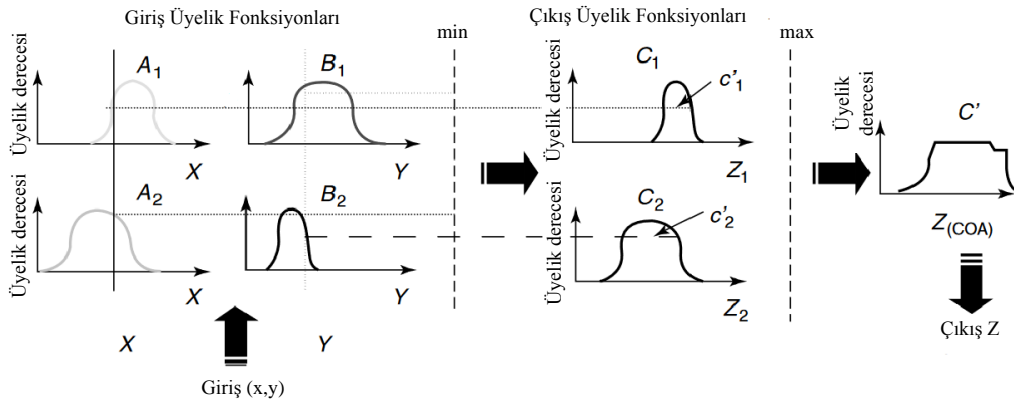
IF (durum) THEN (bu duruma uygun karar);

Bu yapı, durumlar ve çıkış için belirlenen üyelik fonksiyonlarını baz alarak, muhtemel şartlar için bir kural yazarak genişletilebilir. If-then yapısı ard arda yazıldığında bütün durumları içeren cümlelerden oluşan bir paragraf karakteristiği gösterir. Örneğin; “Eğer DC motorun çektiği akım 3 A’dan fazla ve gerilim 12 V’un altında ise kısa devre arızası vardır. Eğer gerilim 12 V ve üzerinde, akım 0 A ile 1 A arasında ise kontaklarda iletim arızası vardır. Eğer gerilim 11 V ile 12 V arasında ve akım 1A ile 3 A arasında ise motor normal çalışıyordur.” şeklindeki bir ifade bulanık kurallar ile tanımlanabilir.

3.1.3. Bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulaştırma

Fiziksel dünyada, bir işlemin ya da sistemin durumu, dilsel ifadelerden çok nümerik değerler ile ifade edilir. Örnek olarak bir otomobilin hızının, yavaş, hızlı gibi ifadelerden çok 100 km/saat şeklinde ifade edilmesi tercih edilir. Bulanık sonuç çıkarma yöntemini uygulamaya geçirmek için, nümerik değerleri kendileriyle ilgili bulanık üyelik değerlerine dönüştürmenin bir yolunun bulunması gerekir. Bu işleme bulanıklaştırma denir.

Bulanıklaştırma işleminin ardından, sistemler üyelik fonksiyonları ve bulanık kurallar ile dilsel terimlerle ifade edilebilir (Chow, 1997). Bu şekilde bulanık mantık işlemleri, hesaplama ve sonuç çıkarım fonksiyonlarını elde edebilir. Bulanık sonuç çıkarım aşamasında bulanık kurallar yardımıyla bulanık veriler işlenir ve bulanık bir çıkış üretilir. Bu çalışmada, bulanık mantık yönteminin bulanık çıkarım metodu olarak, Mamdani tipi bulanık çıkarım metodu (Mamdani, 1974; Mamdani ve Assilian, 1975) kullanılmıştır. Bulanık mantık tabanlı arıza teşhisi sisteminin oluşturulması aşamasında Matlab FIS'de (Fuzzy Inference System) bulanık çıkarım metodu olarak, uzman görüşünü ön plana çıkaran ve daha şeffaf (Akgün ve ark., 2012), aynı zamanda daha net ve güvenilirlik-anlaşılabilirlik, yorumlanabilirlik dengesinde tercih edilen bir metod olarak (Cordón, 2011), Mamdani yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 3.3.'te Mamdani minimum ve maksimum çıkarımı görülmektedir.



Şekil 3.3. Mamdani modeli minimum-maksimum çıkarımı (Abraham , 2005)

Mamdani modeli çıkarım işlemleri için geleneksel olarak kullanılan anlamsal kuralla maksimum-minimum çıkarımı adı verilir. Minimum-maksimum çıkarımlar için minimum matematiksel operatörü, ve mantıksal operatörü ile, maksimum ise veya ile ifade edilir.

Bulanık sonuç çıkarım işlemi tamamlandıktan sonra, sonuçlar üyelik fonksiyonunun değerleri ile ifade edilebilir hale ulaşır. Bulanık çıkarım aşamasının ardından elde edilen çıkışların gerçek dünyada kullanılabilir hale gelmesi gerekir. Başka bir deyişle bulanık mantık işleminin, bulanık kümenin aksine skaler bir nicelik şeklinde ifade edilmesi gerekebilir. Örneğin bulanık bir çıkarım, bir otomobilin hızı, üyelik fonksiyonu değerleri olarak 0.7 hızlı, 0.5 normal ve 0.2 yavaş şeklinde sonuçlanmış olsa da, bizim otomobilin hızı için, yavaş, normal veya hızlı gibi bir değere ihtiyacımız vardır. Bu şekilde çıkış netleştirilmiş olur.

Netleştirilmiş çıkışın elde edilmesi aşamasına durulaştırma denir (Chow, 1997). Durulaştırma ile, elde edilen bulanık değerler, net bir son karar veya duruma dönüştürülür. Bulanık mantık sistemleri, durulaştırma aşamasında sonra bizim için uygun ve işe yarar çıkışlar elde edilen sistemler haline gelirler.

3.2. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA) (McCulloch ve Pitts, 1943), nöronlar adı verilen, kendi yerel verileri üzerinde çalışan ve diğer elemanlarla iletişim kuran, basit işlemsel elemanlar içeren ağlardır. Yapay sinir ağlarının tasarım aşaması, gerçek beyin yapısından esinlenerek temellendirilmiştir. Temel yapısı insan beyninin işleyişine benzer (Köker ve ark., 2004). Fakat yapay sinir ağlarında kullanılan işlemsel elemanlar ve ağın mimarisi beynin biyolojik yapısından şekilsel olarak uzaktadır.

Değişik tiplerde yapay sinir ağları mevcuttur (Haykin, 1994). Fakat temel prensip birbirine çok yakındır. Ağdaki bütün nöronlar giriş sinyali alıp, bunu işleyip çıkış sinyali gönderme yeteneğine sahiptir. Bütün nöronlar en az bir adet diğer nörona

bağlıdır ve her bağlantı, ağırlık sabiti (w) adı verilen ve ağın geneli içerisinde bağlantının önem derecesini yansıtan bir sayı ile ifade edilir (Svozil ve ark., 1997).

Yapay sinir ağlarının eğitim süreci için daha önceden elde edilmiş, çıkışlarla girişleri içeren veri setleri kullanılır. Eğitim sürecinde kullanılan veri setleri, mümkün olduğunda bütün giriş çıkış kombinasyonlarını içeren genişlikte olmalıdır. Eğitilmiş olan yapay sinir ağları, daha önce karşılaşmadıkları giriş durumlarıyla karşılaştıklarında dahi, genelleştirme yetenekleri sayesinde çıkış verisi üretebilmektedirler. Yapay sinir ağlarının eğitim aşamasında, tespit edilen hedefe ulaşmak amacıyla ağların ağırlıklarının kombinasyonlarının oluşmasına yarayan ağ eğitim algoritmalarından faydalanılır.

Yapay sinir ağlarının genelleme özeliği, ağın daha önce karşılaşmadığı giriş değişkenleri için de YSA'nın uygun tepkileri üretmesi olarak tanımlanır. Bu sayede yapay sinir ağları kompleks problemlerle ilgili de çıkışlar sunabilirler. Yapay sinir ağları aşağıda bahsedilen özellikler sayesinde nesne tanıma, sinyal işleme, sistem veya durum tanıma, sistem kontrolü ve bunun gibi birçok alanda başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamışlardır (Patterson, 1996). Karakteristik özellikler açısından yapay sinir ağları, ağ modeline göre farklılıklar gösterebilirler. Yapay sinir ağlarının genel olarak bütün ağ modellerinde bulunan temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır (Bayır, 2005).

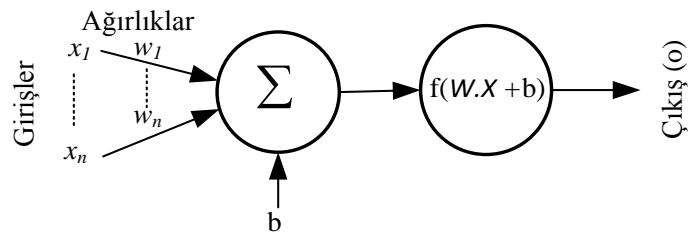
- i. Yapay sinir ağları makine öğrenmesi gerçekleştirirler.
- ii. Yapay sinir ağı programları, genele hitap eden çalışma tarzına sahiptirler.
- iii. Yapay sinir ağlarının verileri, ağın bağlantılarının değerleri ile ölçülüp, bu bağlantılarda saklanmaktadır.
- iv. Ağ eğitimi, daha önce elde edilen veri setlerinden faydalanılarak gerçekleştirilir.
- v. Yapay sinir ağlarının sistemlerde uygulanmadan önce eğitilmeleri ve başarı düzeylerinin teste tabi tutulması gerekir.
- vi. Daha önce karşılaşılmamış giriş verileri için çıkış üretebilirler.
- vii. Algılama gerektiren durumlarda kullanılabilirler.

- viii. Örüntü tanıma gerçekleştirebilirler.
- ix. Örüntü tamamlama için kullanılabilirler.
- x. Kendini organize etme ve eğitebilme yeteneğine sahiptirler.
- xi. Eksik bilgi olması durumunda da işlem yapabilirler.
- xii. Kendilerine has hata toleransları vardır.
- xiii. Net olmayan verilerle işlem yapabilirler.
- xiv. Kademeli bozulma gösterirler.
- xv. Nöron yapısı sayesinde dağılmış bellek yapıları vardır.
- xvi. Sayısal verilerle işlem yapabilmektedirler.

3.2.1. Yapay sinir ağı hücresi

Yapay sinir ağlarında yapısal olarak ağırlıklar, girişler, aktivasyon ve toplama fonksiyonları ile çıkışlar bulunmaktadır. Giriş verileri yapay sinir ağı hücresine girişin etkisini de belirleyen ağırlıklar yardımıyla bağlanmışlardır. Aktivasyon fonksiyonu genel olarak doğrusal olmayan bir fonksiyondur ve net çıkış ile aynı zamanda ağ hücresi (nöron) çıkışını verir.

Şekil 3.4.'te bir yapay sinir ağı hücresinin genel yapısı görülmektedir. Burada b sabit bir değerdir ve aktivasyon fonksiyonunun ($f(W.X+b)$) eşik değeridir (Bayır, 2005; Jacobs, 1988).



Şekil 3.4. Yapay sinir ağı hücresinin genel yapısı

Çıkış ifadesi (nöron çıkışı) (Denklem 3.1)'deki gibidir.

$$o = f(W.X + b) \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de W ağırlıklar matrisi, X ise girişler matrisidir. Şekil 3.4.'te görülen toplama noktası ifadesi ve çıkış ifadesi (Denklem 3.2 - 3.3)'teki şekilde de yazılabilir (Bayır, 2005).

$$\text{toplama} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + b \quad (3.2)$$

$$o = f\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + b\right) \quad (3.3)$$

3.2.2. Yapay sinir ağlarının eğitim algoritmaları sınıflandırması

Yapay sinir ağları eğitim algoritmalarına göre sınıflandırılabilirler. Ağların eğitimi için genel anlamda üç öğrenme metodu kullanılır. Bunlar danışmalı öğrenme, danışmasız öğrenme ve takviyeli öğrenmedir.

Danışmalı öğrenmede yapay sinir ağına hedef olarak verilen doğru çıkışlar ve ağı eğitimi aşamasında elde edilen çıkışlar arasındaki farklar hata olarak ele alınır. Eğitim algoritması boyunca hata miktarı, belirlenen amacın daha altına indirilmeye çalışılır. Bunun için ağırlıklar her iterasyonda güncellenir. Bu sebeple, danışmalı öğrenmede bir danışmana ihtiyaç duyulur.

Danışmasız öğrenmede ağa eğitim aşamasında hedef verilmez. Sadece girişler verilir. Bu durumda ağ girişte verilen örneği temel olarak ele alıp, sınıflandırmayı kendisi oluşturur. Ağırlıklar bu sınıflandırma baz alınarak ağ tarafından ayarlanır. Ağ hedefler yerine, ağın verdiği sonuçların doğruluğunu ölçütleyen doğruluk dereceleri bildirilir.

Takviyeli öğrenmede de hedef çıkışlara ihtiyaç yoktur. Ağ doğru çıkışlar hedef olarak verilmez. Bunun yerine ağın çıkışlarının doğruluğunu derecelendiren bilgiler verilir.

3.2.3. Yapay sinir ağlarının yapılarına göre sınıflandırılması

Yapay sinir ağları yapılarına göre ileri ve geri beslemeli ağlar olarak sınıflandırılır. İleri beslemeli ağlarda nöronlardan oluşan katmanlar arasında giriş verileri çıkışa doğru tek yönlü olan bağlantılarla ulaşır. Katmanlar şeklinde düzenlenmiş nöronların çıkışları, bir sonraki katmandaki nöronlara ağırlıklar ile düzenlenerek giriş olarak iletilir. Dış ortamdaki giriş katmanına alınan veriler orta ve çıkış katmanlarında işlenerek çıkış elde edilir. İleri beslemeli ağlar, kontrol ve sınıflandırma gerektiren sistemlerde daha çok ön plana çıkarlar.

Geri beslemeli yapay sinir ağlarında orta ve çıkış katmanlarından daha önceki katmanlara geri besleme bağlantıları bulunur. Bu durumda, bağlantılar sadece ileri yönde değil geri beslemeler sebebiyle ileri ve geri yönde oluşabilirler. Çıkışlar hem o anki çıkışı hem de bir sonraki çıkışı etkilerler. Geri beslemeli ağlar yapıları itibariyle kestirim ve tahmin gerektiren sistemler için daha çok ön plandadırlar.

3.2.4. Geri yayımlı yapay sinir ağlarının eğitim algoritması

Yapay sinir ağları öğrenme yeteneği ile karmaşık sistemlerin modellenmesinde kullanılırlar. Sistem dinamiğinin bir kısmının bilinebildiği veya sistemin matematiksel modelinin çıkarılmasının oldukça zor veya tamamiyle imkansız olduğu durumlarda yapay sinir ağları, sistem verileri ile eğitilerek sistemin modellenmesini sağlamaktadır (Lin ve Lee, 1996; Karadeniz ve ark., 2001). Geri yayımlı ağ eğitim algoritmaları temel olarak gerçek çıkış ile istenen çıkış arasındaki ortalama karesel hatayı minimize etmek için tasarlanmış bir tekrarlamalı eğitim algoritmasıdır (Lippmann, 1987). Geri yayılım algoritmaları basitliği ve pratikteki uygun görüş açısı gibi başarılarından dolayı ağ eğitimi için en popüler algoritmalarından biridir (Aktaş ve Okumuş, 2003). Çıkıştan girişe doğru azalmayı amaçlamasından dolayı geri yayılım ismini almıştır. Geri yayılım algoritması, ağ çıkışındaki mevcut hataya göre her bir tabakadaki ağırlıkların yeniden hesaplanması için kullanılmaktadır (Keleşoğlu ve Fırat, 2006).

Geri yayılım algoritmaları başlığı altında incelenen muhtelif algoritmalar vardır. Kenneth Levenberg ve Donald Marquardt non-linear bir fonksiyonu minimize etme problemine sayısal bir çözüm sağlayan LM (Levenberg-Marquardt) algoritmasını (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) geliştirmişlerdir (Yu ve Wilamowski, 2011). Geri yayılım algoritmaları birbirleriyle mukayese edildiklerinde LM ağ eğitim algoritmasının diğer algoritmalarından (CGF (Conjugate Gradient with Fletcher-Reeves) ve RB (Resilient Backproagation)) daha hızlı ve yüksek performanslı olduğu belirtilmiştir (Kişi ve Uncuoğlu, 2005). Bu avantajlar göz önünde bulundurularak, Levenberg-Marquardt yapay sinir ağı eğitim algoritmasının daha uygun bir ağ eğitim algoritması olduğuna karar verilmiştir (Şimşir ve ark., 2016a). Bu şartlar altında, LM algoritmasının bütün yapay sinir ağı eğitimlerinde kullanılması düşünülmüştür. Toplam karesel hata (Sum Square Error-SSE), $E(x,w)$ ağın eğitim aşamasını değerlendirmek için kullanılır ve ağın çıkış değeri için (Denklem 3.4)'teki gibi hesaplanır.

$$E(x,w) = \frac{1}{2} \sum_{p_i=1}^{P_i} \sum_{m_o=1}^{M_o} e_{p_i,m_o}^2 \quad (3.4)$$

(Denklem 3.4)'te, x giriş vektörü, w ağırlık vektörü, p_i örneklerin indeksi, P_i örnek sayısı, m_o çıkışların indeksi, M_o çıkışların sayısı, i ve j ağırlıkların indisi, $e(p_i,m_o)$ ise p_i örneğinin uygulandığı sırasındaki m_o çıkışında oluşan eğitim hatasıdır ve (Denklem 3.5)'deki gibi tanımlanır.

$$e(p_i,m_o) = d_{p_i,m_o} - o_{p_i,m_o} \quad (3.5)$$

(Denklem 3.5)'te, d hedeflenen çıkış vektörü, o ise var olan çıkış vektörüdür.

Jm , Jacobian matris ve H , Hessian matris ise, yaklaşık Hessian matrisi ($Jm^T Jm$) tersi alınabilir ise Levenberg-Marquardt algoritması Hessian matrisine (Denklem 3.6)'daki gibi yeni bir yaklaşım getirir.

$$H \approx Jm^T Jm + \mu I_x \quad (3.6)$$

(Denklem 3.6)'da, μ daima pozitif olan bileşen sabiti, I_x ise x köşegenli birim matristir.

(Denklem 3.6)'da yaklaşık Hessian matrisinin temel köşegeninin bütün elemanlarının pozitif olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumda H matrisi daima tersi alınabilir. Gauss-Newton algoritmasının güncelleme kuralı (Denklem 3.7)'deki gibi ortaya konulmuştur.

$$w_{k+1} = w_k - (Jm_k^T Jm_k)^{-1} Jm_k e_k \quad (3.7)$$

(Denklem 3.6) ve (Denklem 3.7)'den faydalanarak Levenberg-Marquardt algoritmasının güncelleme kuralı (Denklem 3.8)'deki şekilde ifade edilebilir (Yu ve Wilamowski, 2011).

$$w_{k+1} = w_k - (Jm_k^T Jm_k + \mu I)^{-1} Jm_k e_k \quad (3.8)$$

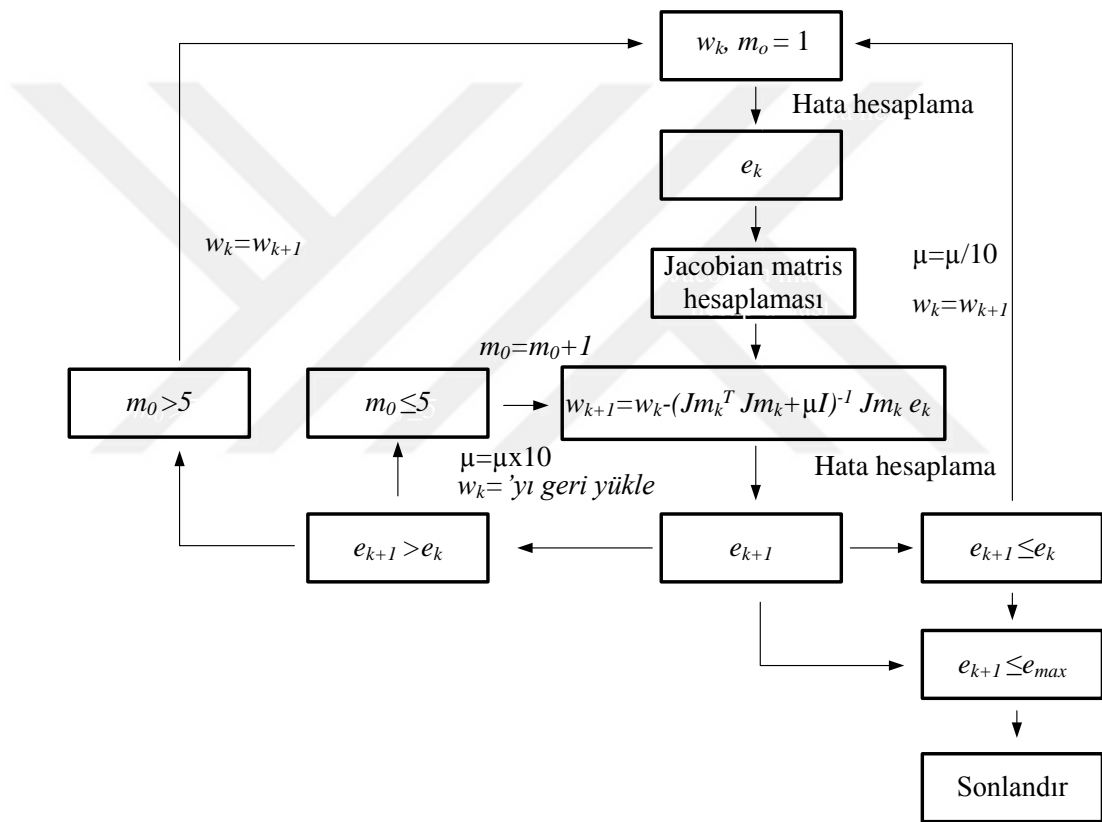
LM ağ eğitimi algoritması aşağıda basamaklar halinde ifade edilmiştir (Yu ve Wilamowski, 2011):

- i. Rastgele üretilmiş başlangıç ağırlıklarıyla toplam hata hesaplanır.
- ii. Ağırlıkları ayarlamak için, Denklem 3.8'e göre bir ağırlık güncellemesi yapılır.
- iii. Yeni ağırlıklarla toplam hata hesaplanır.
- iv. Güncelleme neticesinde toplam hata artmış ise bu basamak geri çekilir (ağırlık vektörünü bir önceki değere tekrar ayarlamak gibi) ve bileşen sabiti μ 10 veya tercih edilen başka bir çarpanla ile arttırılır. İkinci basamağa geri dönülür ve ağırlık güncellemesi tekrar denir.

v. Güncelleme sonunda toplam hata düşmüş ise bu basamak geçerli kabul edilir (yeni ağırlık vektörü, şu anki vektör olarak kabul edilir). Bileşen sabiti μ 10 veya tercih edilen ve 4. basamakta kullanılan çarpanla azaltılır.

vi. Şu anki toplam hata, gerekli veya istenen değerden daha az olana dek yeni ağırlıklar ile 2. basamağa geri dönülür.

Yukarıda basamaklar halinde verilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. LM ağ eğitimi algoritmasının temel akış diyagramı (Yu ve Wilamowski, 2011)

Burada w_k şu anki ağırlık, w_{k+1} bir sonraki ağırlık, e_{k+1} şu anki toplam hata, e_k son toplam hata'dır.

Tablo 3.1.'de çeşitli ağ eğitim algoritmalarının özellikleri verilmiştir (Yu ve Wilamowski, 2011).

Tablo 3.1. Çeşitli ağ eğitim algoritmalarının karşılaştırması

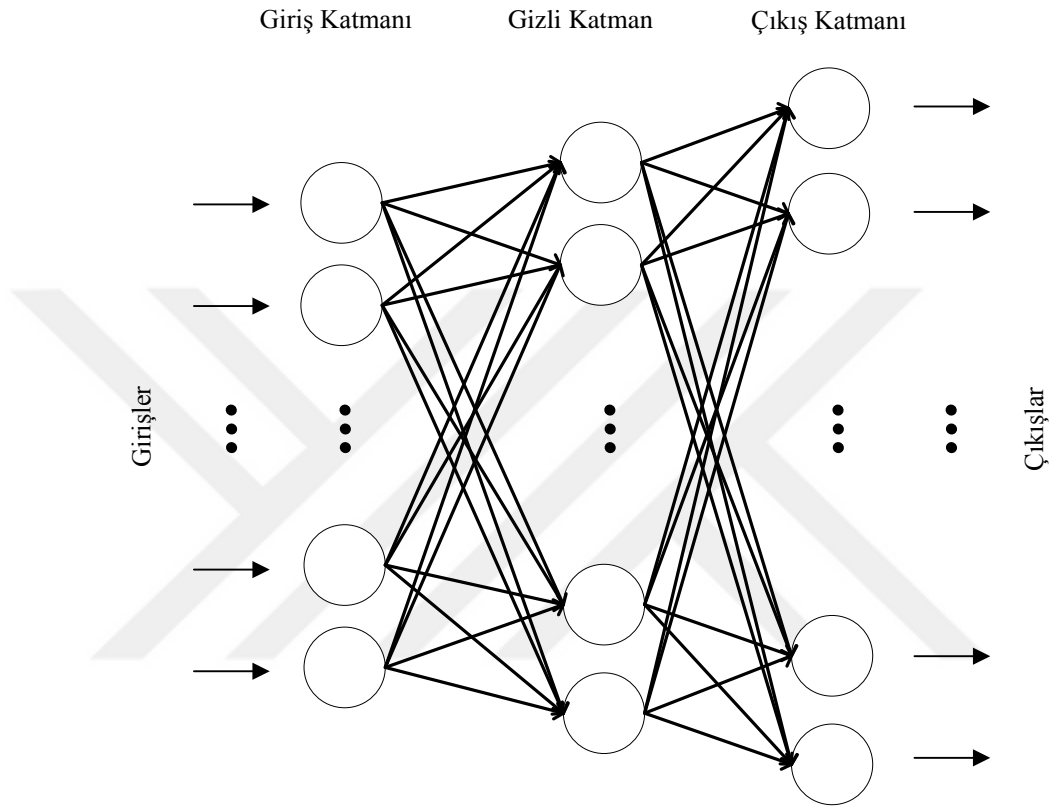
Algoritmalar	Güncelleme Kuralları	Yakınsama	Hesaplama
Hata Geri Yayılım Algoritması	$w_{k+1} = w_k - \frac{1}{\mu} g_k$	Kararlı, yavaş	Eğim
Newton Algoritması	$w_{k+1} = w_k - H_k^{-1} g_k$	Kararsız, hızlı	Eğim ve Hessian
Gauss-Newton Algoritması	$w_{k+1} = w_k - (Jm_k^T Jm_k)^{-1} Jm_k e_k$	Kararsız, hızlı	Jacobian
Levenberg-Marquardt Algoritması	$w_{k+1} = w_k - (Jm_k^T Jm_k + \mu I)^{-1} Jm_k e_k$	Kararlı, hızlı	Jacobian

Burada g eğimi, toplam hata fonksiyonunun w 'ye göre birinci dereceden türevi olarak tanımlanır. Tablo 3.1.'de görüldüğü gibi LM algoritması diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında da kararlı ve hızlı bir algoritma olarak dikkat çekmekte ve ağ eğitimi için uygun görülmektedir.

3.2.5. İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağları

İleri beslemeli yapay sinir ağları için geri yayılım algoritması tercih edilir. Geri yayımlı eğitim algoritması ile eğitilmiş çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağları en popüler yapay sinir ağlarıdır (Svozil ve ark., 1997). İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağları, ağın tasarımına göre değişen sayıda nöronlar içeren katmanlardan oluşurlar. İlk katmana giriş katmanı adı verilir. Giriş verilerini gizli katmana dağıtan ve ulaştıran katmanın nöron sayısı, sistemin giriş sayısı ile ilgilidir. Çıkış katmanı, yapay sinir ağının çıkışlarını elde edebildiğimiz nöronlar grubudur. Giriş katmanı ile çıkış katmanı arasında bulunan nöron grubuna veya gruplarına ise gizli katman veya gizli katmanlar adı verilir. Yapay sinir ağlarında katman sayısı veya nöron sayısını, hesaplamalar yoluyla tam olarak tespit edebilmek mümkün değildir. Bu çalışma bazı öngörüler ve tasarlayıcının geçmiş tecrübelerinin öngördüğü ölçüde kolaylaşsa da, temel olarak deneme yanılma yoluyla gerçekleştirilir (Denton, 2000). Şekil 3.6.'da ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağlarının nöron ve katman yerleşimi gösterilmiştir.

Geri yayılım eğitim algoritmasına göre, çıkış ile giriş arasındaki hata sinyali bulunur ve ağırlıklar, tespit edilen hata sinyali ile tekrar şekillenir. $e(k)$ hatayı, sinir ağının çıkışı $o(k)$ 'yi ve yapay sinir ağının istenilen çıkışı $y(k)$ ifade eder. $e(k)$, yani hata, istenilen çıkış ile çıkış arasındaki farktır.



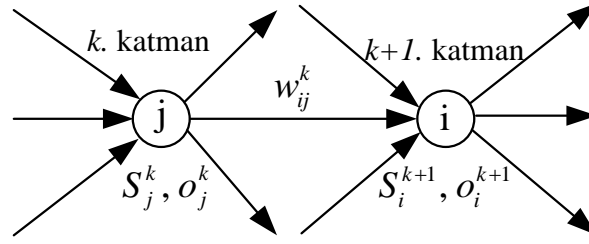
Şekil 3.6. İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağının genel yapısı

Nöronların net toplamı ve hata eşitlikleri (Denklem 3.9 - 3.10)'te ifade edilmiştir.

$$e(k) = y(k) - o(k) \quad (3.9)$$

$$S_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{n_k} w_{ij}^k o_j^k \quad (3.10)$$

Şekil 3.7.'de bir ağ için katman ve nöron sıralaması görülmektedir (Bayır, 2005).



Şekil 3.7. Bir ağ için katman ve nöronlar arasındaki bağlantılar

Bir ağ üzerindeki katmanlar k ile sıralanmış olsun. Şekil 3.7.'deki ifadelerde alt indis kaçınıcı nöron olduğunu, üst indis ise kaçınıcı katman olduğunu gösterir. Nöronların net toplamları S ile ve k . katman ile $k+1$. katman arasındaki, i . nöron ile j . nöron arasındaki bağlantının ağırlığı w_{ij}^k ile gösterilmektedir.

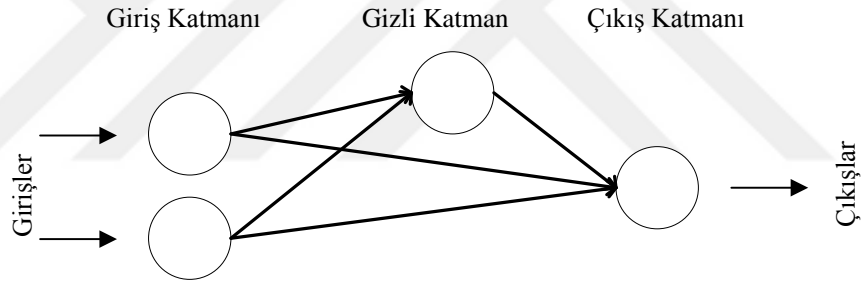
Ağın eğitimi ile ilgili aşağıdaki algoritma uygulanır.

- i. Rastgele üretilmiş başlangıç ağırlıklarıyla toplam hata hesaplanır.
- ii. Ağırlıkları ayarlamak için ağırlık güncellemesi yapılır.
- iii. Giriş katmanından itibaren, ağın yapısı sebebiyle her katmandan, ardışıl katmana kurulmuş bağlantılar, yeni ağırlıklar ile gerçekleştirilir.
- iv. Ağ sürülerek toplam hata hesaplanır.
- v. Güncelleme neticesinde toplam hata artmış ise bu basamak geri çekilir (ağırlık vektörünü bir önceki değere tekrar ayarlamak gibi). İkinci basamağa geri dönülür ve ağırlıkların bir katsayı ile arttırılarak güncellenmesi tekrar denir.
- vi. Güncelleme sonunda toplam hata düşmüş ise bu basamak geçerli kabul edilir (yeni ağırlık vektörü, şu anki vektör olarak kabul edilir). Ağırlıklar 4. basamakta kullanılan çarpanla azaltılır.
- vii. Şu anki toplam hata, gerekli veya istenen değerden daha az olana dek yeni ağırlıklar ile 2. basamağa geri dönülür.

3.2.6. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağları

Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağları, ileri beslemeli ağlarla genel olarak benzerlik arz ederler. Çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağları, iki katmanlı ileri

beslemeli ağların eğitildikleri ve hakim oldukları giriş çıkış ilişkilerinden daha karmaşık ilişkileri ve problemleri daha hızlı bir şekilde öğrenebilirler (Goyal ve Goyal, 2011). Örneğin üç katmanlı bir ağın normalde içerdiği birinci katmandan ikinciye, ikinciden de üçüncüye ağırlık bağlantılarına ilaveten kaskat ileri beslemeli ağlar, birinci katmandan direkt üçüncüye de ağırlık bağlantıları içerir. Bu ilave bağlantılar istenilen giriş çıkış ilişkilerinin öğrenilmesi hızının geliştirilmesi konusunda avantaj sağlayabilir (Demuth ve ark., 2009). Kaskat ileri beslemeli ağlar ile ileri beslemeli ağlar, ağırlık güncellemeleri için geri yayılım algoritmalarını kullanmaları konusunda benzerlik gösterirler. Fakat temel fark, kaskat ağların her katmanının nöronlarının, daha önceki bütün katmanların nöronları ile ağırlık bağlantıları ve dolayısıyla güncellemeleri olarak doğrudan bağlantılar da içermesidir (Chayjan, 2010). Şekil 3.8.'de kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağının genel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.8. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağının genel yapısı

Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi, temel yapı ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı ile aynı olmakla beraber, kaskat ileri beslemeli ağda nöronlar arası bağlantılar, sadece ardışıl katmanlar arası olmakla kalmayıp, her katmandaki nöron, sonraki bütün katmanlardaki nöronlarla bağlantı içerir.

Ağın eğitimi ile ilgili aşağıdaki algoritma uygulanır.

- i. Rastgele üretilmiş başlangıç ağırlıklarıyla toplam hata hesaplanır.
- ii. Ağırlıkları ayarlamak için ağırlık güncellemesi yapılır.

iii. Giriş katmanından itibaren, ağıın yapısı sebebiyle her katmandan, sonraki bütün katmanlara kurulan bağlantılar, yeni ağırlıklar ile gerçekleştirilir.

iv. Ağ sürülerek toplam hata hesaplanır.

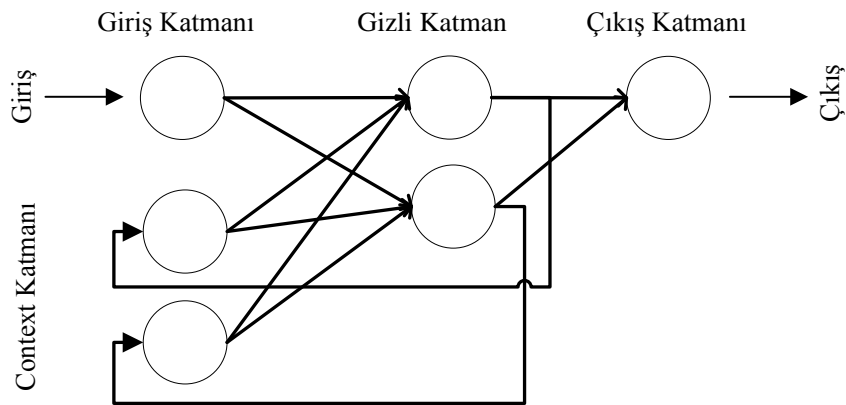
v. Güncelleme neticesinde toplam hata artmış ise bu basamak geri çekilir (ağırlık vektörünü bir önceki değere tekrar ayarlamak gibi).İkinci basamağa geri dönülür ve ağırlıkların bir katsayı ile artırılarak güncellenmesi tekrar denenir.

vi. Güncelleme sonunda toplam hata düşmüş ise bu basamak geçerli kabul edilir (yeni ağırlık vektörü, şu anki vektör olarak kabul edilir). Ağırlıklar 4. basamakta kullanılan çarpanla azaltılır.

vii. Şu anki toplam hata, gerekli veya istenen değerden daha az olana dek yeni ağırlıklar ile 2. basamağa geri dönülür.

3.2.7. Elman yapay sinir ağı

Elman yapay sinir ağı (Elman, 1990), ilaveten gizli katmandan geri beslemeler (context (kaynak) katman) içeren bir ileri beslemeli yapay sinir ağı modeli olarak düşünülebilir (Song, 2010). Elman ağı, yinelemeli ağılar içerisinde, standart geri yayımlı ağ eğitimi algoritmasını kullanan en basit yapay sinir ağı modellerindedir (Shi ve ark., 2004). Şekil 3.9.'da Elman yapay sinir ağının genel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.9. Elman yapay sinir ağının genel yapısı

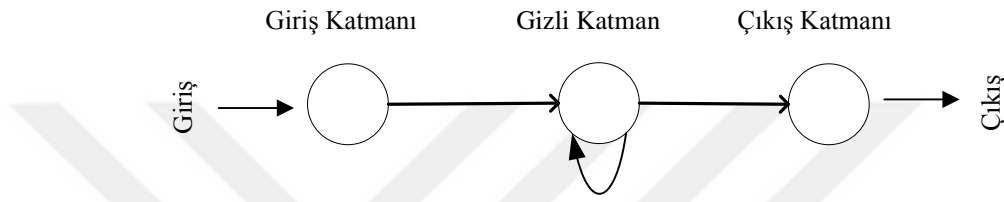
Şekil 3.9.'da görülen Elman yapay sinir ağı 2 nöronlu bir gizli katmana sahip, bir nöronlu girişli ve bir çıkışlı bir yapay sinir ağıdır. Elman ağına karakteristik farkı olan kaynak katmanı, gizli katmandaki nöron sayısı gibi iki elemanıdır. Hafıza yapısını oluşturmak için, Elman yapay sinir ağına kaynak katmanına pozitif geri beslemeler kullanılmıştır. Kaynak katmanı adı verilen bu özel katman, gizli katman nöronlarının önceki çıkış değerlerini kaydeder. Kaynak katman değerleri, daha sonra gizli katman nöronlarına geri besleme yaparlar ve bu yapı, yapay sinir ağına ilave girişler oluşturur. Ağı çıkış katmanından, diğer hiçbir katmana geri besleme uygulanmaz. Kaynak katmanı, gizli katman nöronlarının çıkış verilerinin eksponansiyel olarak azalan sinyal izini korur ve Elman yapay sinir ağı yüksek derinlikli ve düşük çözünürlüklü bir hafıza yapısına sahiptir (Koskela ve ark., 1996).

Ağın eğitimi ile ilgili aşağıdaki algoritma uygulanır.

- i. Rastgele üretilmiş başlangıç ağırlıklarıyla toplam hata hesaplanır.
- ii. Ağırlıkları ayarlamak için ağırlık güncellemesi yapılır.
- iii. Giriş katmanından itibaren, ağın yapısı sebebiyle ardışıl katmana kurulan bağlantılar, yeni ağırlıklar ile gerçekleştirilir.
- iv. Gizli katman, şu anki çıkışını çıkış katmanına aktarır.
- v. Gizli katman şu anki çıkışı kaynak katmanına kaydeder.
- vi. Kaynak katmanı bir önceki çıkış ile gizli katmana giriş uygular.
- vii. Ağ sürülerek toplam hata hesaplanır.
- viii. Güncelleme neticesinde toplam hata artmış ise bu basamak geri çekilir (ağırlık vektörünü bir önceki değere tekrar ayarlamak gibi). İkinci basamağa geri dönülür ve ağırlıkların bir katsayı ile arttırılarak güncellenmesi tekrar denir.
- ix. Güncelleme sonunda toplam hata düşmüş ise bu basamak geçerli kabul edilir (yeni ağırlık vektörü, şu anki vektör olarak kabul edilir). Ağırlıklar 4. basamakta kullanılan çarpanla azaltılır.
- x. Şu anki toplam hata, gerekli veya istenen değerden daha az olana dek yeni ağırlıklar ile 2. basamağa geri dönülür.

3.2.8. Katman yinelemeli yapay sinir ağıları

Katman yinelemeli yapay sinir ağıları, gizli katman veya katmanların kendi içerisinde geri besleme döngüleri içerdiği ve bu yüzden geriye doğru bağlantılar içeren ağlardır. Katman yinelemeli ağların bu geri besleme döngüleri, önceki bilgileri hatırlamayı sağlar (Juang, 2004). Şekil 3.10.'da bir gizli katmanlı katman yinelemeli yapay sinir ağının genel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.10. Katman yinelemeli yapay sinir ağının genel yapısı

Şekil 3.10.'daki katman yinelemeli yapay sinir ağı örneğinin giriş, çıkış ve gizli katmanlarında birer nöron vardır. Katman yinelemeli yapay sinir ağlarının, ileri beslemeli yapay sinir ağının genel yapısına ilave olarak, gizli katman veya katmanlarının kendi içerisinde geri besleme bağlantıları mevcuttur.

Ağın eğitimi ile ilgili aşağıdaki algoritma uygulanır.

- i. Rastgele üretilmiş başlangıç ağırlıklarıyla toplam hata hesaplanır.
- ii. Ağırlıkları ayarlamak için ağırlık güncellemesi yapılır.
- iii. Giriş katmanından itibaren, ağın yapısı sebebiyle her katmandan ardışıl katmana ve ayrıca gizli katmandan kendi girişine geri besleme ile kurulan bağlantılar güncel ağırlıklar ile gerçekleştirilir.
- iv. Ağ sürülerek toplam hata hesaplanır.
- v. Güncelleme neticesinde toplam hata artmış ise bu basamak geri çekilir (ağırlık vektörünü bir önceki değere tekrar ayarlamak gibi).İkinci basamağa geri dönülür ve ağırlıkların bir katsayı ile arttırılarak güncellenmesi tekrar denenir.

BÖLÜM 4. TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORU TEST DÜZENEĞİNİN TASARIMI

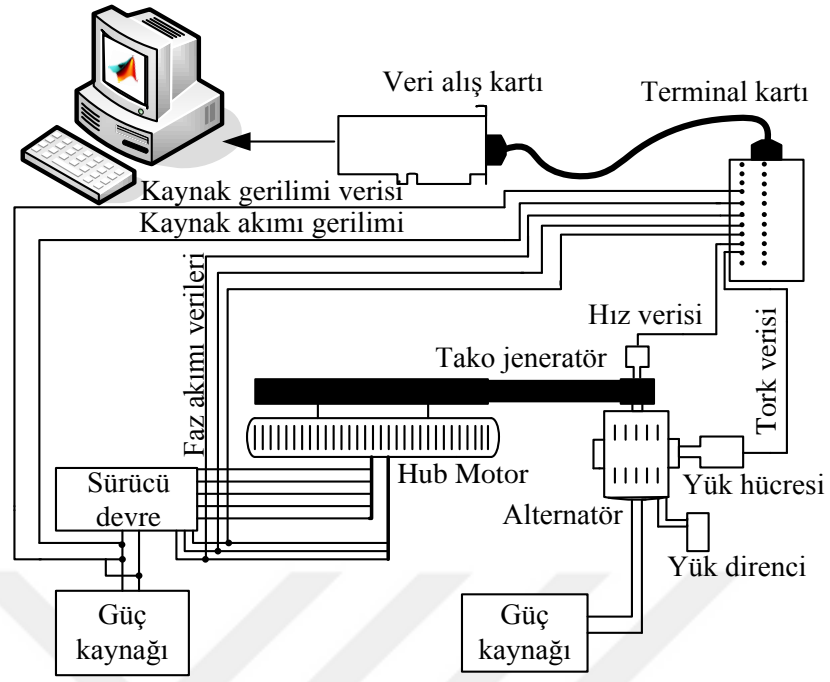
Tekerlek içi elektrik motorlarında başarılı bir arıza teşhisi çalışmasını gerçekleştirebilmek için arızaların ölçümlerinin yapılabildiği bir deney düzeneğine ve deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu tez çalışması için de, öncelikle tekerlek içi elektrik motorunun arızalarının teşhisinde kullanılmak üzere ölçülmesi gereken değişkenleri tespit edilmiştir. Ardından tekerlek içi elektrik motorunun bu değişkenlerini ölçmek için test düzeneği kurulmuştur. Bu ölçümlerden elde edilen veriler ile yapay zeka teknikleri için gerekli veri seti oluşturulmuştur.

4.1. Test Düzeneğinin Yapısı ve Tasarımı

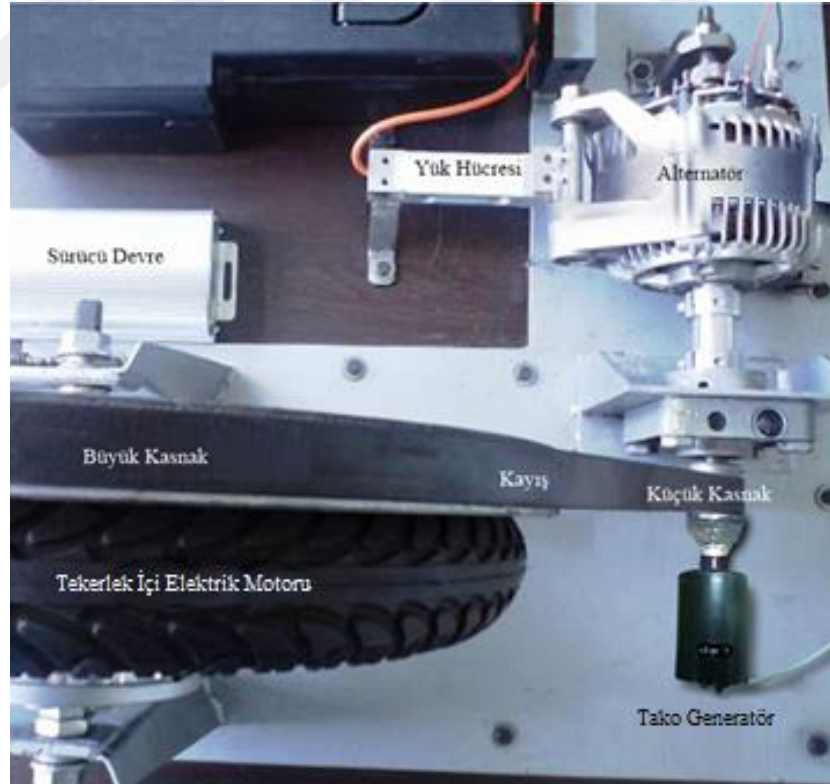
Tasarlanan test düzeneği tekerlek içi elektrik motorunun değişik yük ve hız koşullarında çalıştırılması, gerekli değişkenlerin ölçülebilmesi ve ölçülen değişkenlerin işlenebilmesi amaçlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4. 1.'de tekerlek içi elektrik motoru test düzeneği blok şeması görülmektedir. Blok şema üzerinde, yapay zeka teknikleri giriş değişkenleri olarak tespit edilen verilerin ölçümlerine dair veri alış bağlantıları görülmektedir.

Şekil 4.2.'de ise tasarlanan tekerlek içi elektrik motoru test düzeneğinin fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil 4.1. ve 4.2.'de görüldüğü gibi, motor bir kayış-kasnak sistemi ile yüke bağlanmıştır.



Şekil 4.1. Test düzeneğinin blok şeması



Şekil 4.2. Test düzeneğinin mekanik bağlantıları

Tekerlek içi elektrik motorlarının arıza teşhisi çalışması için gerçekleştirilecek uygulama ve deneysel çalışmalar için uygun bir test düzeneği hazırlanmıştır. Bu test düzeneği tasarlanırken öncelikli olarak evvelce tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi için durumlar arası değişiklik oluşturabilecek, ölçüm değişkenleri olarak belirlenen giriş ve çıkış verileri göz önünde bulundurulmuştur. Fakat öncelikle test düzeneğinin gövdesi olarak bütün ağırlığı taşıyacak ve mukavemeti sağlayacak ahşap malzemedan test düzeneği kaidesi oluşturulmuştur. Bu kaidenin üzerine malzeme montajının stabil olarak yapılabileceği çelik sac sabitlenmiştir. Bu kaide ve çelik sacın alanları imal edilirken test düzeneğindeki malzemelerin rahatlıkla yerleşebileceği alan bırakılmıştır.

Test düzeneği hazırlanırken öncelikli problem olarak, alternatör ve motorun rotor pozisyonlarının ters oluşu görülmüştür. Motorun mekanik olarak alternatörle yüklenebilmesi için ikisi arasında mekanik bir bağlantı yapılmıştır. Alternatörün rotoru iç kısımda mili döndürüyorken tekerlek içi elektrik motorunun rotoru dışta ve motor mili merkezde sabit olarak durmaktadır. Bu durum alternatör ile motorun senkronizasyonunun doğrudan mümkün olmaması sonucunu doğurmuştur. Bu sorunun çözümü için, biri alternatörün rotoru ile eş merkezli olarak mile sabitlenmiş ve diğeri motorun rotoru ile eş merkezli olarak sabitlenmiş iki adet kasnak ve onları birbirine bağlayan bir kayış kullanılmıştır. Kasnaklar ve kayış, senkronizasyonun sabit olması amacıyla, kaymayı önlemek, ya da ihmal edilebilir kadar düşük mertebelere indirebilmek için çok kanallı V tipinde düşünülmüştür. Ayrıca alternatörün lineer çalışma aralığına ulaşılması amacıyla devir sayısını arttırmak için farklı çaplarda tasarlanmıştır. Motorla eş merkezli olarak dönen ve motora sabitlenmiş büyük kasnağın çapı ile alternatörün rotoru ile eş merkezli ve senkronize dönen küçük kasnağın çapları arasında 16,5 kat fark vardır. Boştaiken 350 RPM civarı hızlara ulaşabilen motorun, alternatörü, 5775 RPM civarı hızlara çıkarabilmesi hedeflenmiştir. Poliamid malzemedan imal edilmiş olan kasnaklardan büyük olanı tekerlek içi motora ve motorun her iki tarafında bulunan kapaklarından birinin sökülmesiyle aynı vida yuvalarına vidalanmak suretiyle, küçük olan kasnak ise alternatörün miline vida ile sıkıştırılarak sabitlenmiştir.

Şekil 4.2.'de de görüldüğü gibi, tekerlek içi elektrik motoru, araçlardaki montaj yapısına uygun olarak motorun her iki yanından motor milinin sabit olacağı şekilde sabitlenmiş, serbestçe dönebilmesi sağlanmıştır. Motor milinin yatay ekseninde ileri geri oynayıp uygun konumda sabitlenmesini sağlayan vidalı sistem ile kayış kasnaklara takılmış ve gerginliği ayarlanmıştır.

Tork verisini ölçmek ve motoru mekanik olarak yüklemek için kullanılan alternatörün, test düzeneğine yerleştirilmesi için alternatör motor milinin çıkık kısmından rulman yardımıyla yataklanmıştır. Motor milinin çıkık olmayan kısmı ise alternatörün milinin uzantısı merkezlenip sıkıştırılarak sabitlenmiştir. Bu sayede alternatörün gövdesi havada kalmış ve dönebilir şekilde serbest bırakılmıştır. Tekerlek içi elektrik motorunun alternatörün rotorunu dönmeye zorladığı yönde, alternatörün uyarıldığında dönmeyi zorlaştırmak için referans nokta olarak destek alacağı, yani dönmek için mesnetleneceği ve frenleme yükünün tamamını yükleyeceği kısımda sabit bir levha yardımıyla yük hücrelerine yüklenmiştir.

Test düzeneğinde devir sayısı ölçümü için tako generatör olarak kullanılmak üzere bir DC motor kullanılmıştır. Rotorundan küçük kasnağa eş merkezli olarak sabitlenmiş olan DC motorun gövdesinin dönmemesi sağlanmıştır. Hazırlanan test düzeneği istenilen tüm verileri eksiksiz ve başarılı olarak alabilecek şekilde tasarlanmış ve devreye alınmıştır.

4.1.1. Tekerlek içi elektrik motoru

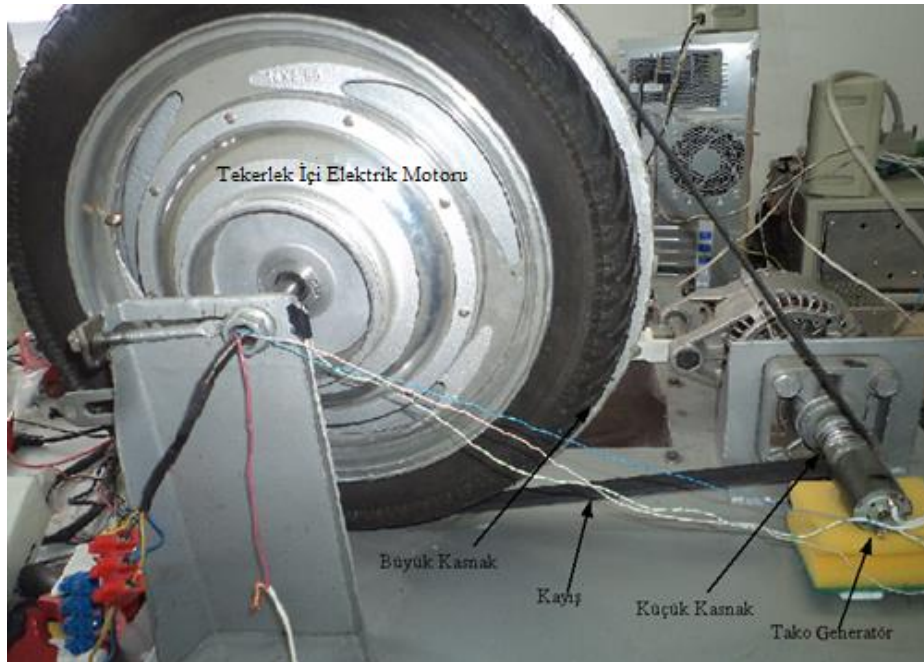
Çalışmada kullanılan tekerlek içi elektrik motoru STMAX marka, 250 W nominal güce sahip bir motordur. Yıldız bağlı ve 3 fazlı olan motorun nominal gerilimi 48 V'tur. Motor jantının dıştan dışa çapı 32cm ve lastiğin dıştan dışa çapı 43 cm'dir. Her faz için bir tane olmak üzere 3 adet Hall effect sensörden aldığı tetikleme verileri yardımıyla, STMAX marka motor sürücü ile sürülmektedir. Sürücü devre, motorun Hall effect sensörlerinin, sürekli mıknatıslar ile uyarılıp, çıkış olarak motorun hızına göre değişen frekansta, dönüş yönüne göre belirlenen sırayla verdiği tetikleme sinyallerini referans alarak, sırasıyla 3 fazı dönüş yönüne göre ikişerli gruplar halinde

seri bağlayarak enerjilendirmektedir. Tablo 4.1.'de tez çalışmasında kullanılan tekerlek içi elektrik motorunun karakteristik özellikleri genel hatlarıyla görülmektedir.

Tablo 4.1. Tez çalışmasında kullanılan tekerlek içi elektrik motorunun temel özellikleri

Faz sayısı	Nominal güç	Nominal gerilim	Maksimum devir sayısı	Maksimum Tork	Sargı bağlantı şekli	Motor dış çapı	Motor jant çapı
3	250 W	48 V	350 RPM	16 Nm	Yıldız	43 cm	32 cm

Tablo 4.1.'de karakteristik özellikleri verilen, deneysel çalışmalarda kullanılan motor, elektrikli bisikletlerde kullanılabilecek bir güç sınıfına dahildir. Uygulanan gerilimin efektif değeri gaz pedalı ya da potansiyometre referansıyla sürücü devre tarafından artırılıp azaltılabilmektedir. Uygulanan gerilim, motorun EMK'sini artırarak bir aktif faz çiftinden diğerine gidiş süresini azaltır. Bu sayede tetikleme frekansı artırılır ve dönüş hızı bu şekilde ayarlanır. Fren sistemi olarak tel gergili kampana tertibatı kullanılmıştır. Şekil 4.3.'te motor, kayış kasnak sistemi ve tako generatör görülmektedir.

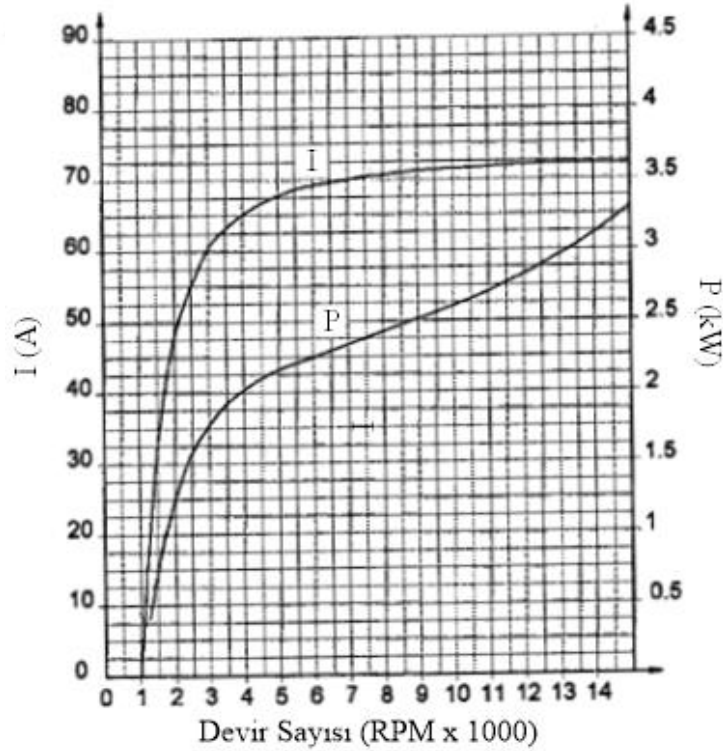


Şekil 4.3. Test düzeneği üzerindeki motor, kayış kasnak sistemi ve tako generatör

4.1.2. Alternatör

Tekerlek içi elektrik motorunun dönüşünün mekanik olarak zorlanması ve fiziksel olarak yüklenmesi için ayarlanabilir bir yükleme sistemine ihtiyaç vardır. Bu sistem motorun fren sistemi ile yapıldığında motorun aynı koşullarda özdeş olarak yüklenebilmesi, kampana sisteminin aşınması ve hassas yüklemenin yapılamaması gibi sebeplerle fren sistemi kullanılmamıştır.

Test düzeneğinde kullanılan alternatör ile tekerlek içi elektrik motorunun mekanik olarak yüklenmiştir. Alternatörün uyarılıp elektriksel olarak yüklenmesi ile aynı devir sayısı, uyarım gerilimi ve elektriksel yük koşullarında özdeş mekanik yüklenmeyi sağlayabileceği için tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan Mako-Magnetti Marelli marka alternatör 14 V, 65 A çıkışa sahiptir. Şekil 4.4.'te alternatörün akım, güç, devir sayısı karakteristik eğrileri görülmektedir.



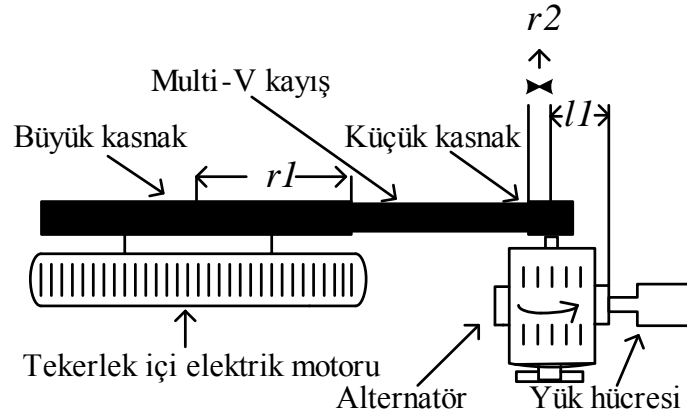
Şekil 4.4. Alternatöre ait akım ve güç karakteristik eğrileri (www.mako.com.tr, 2014)

Şekil 4.4.'te görülen alternatör karakteristik eğrisinde, ölçümler boyunca 1700 rpm ile 3300 rpm arasında değişen devir sayıları için alternatör akım ve güç karakteristik eğrilerinin lineere çok yakın bir özellik sergilediği görülmektedir. Alternatör, daima aynı devir sayısında aynı karakteristiği gösterdiği için, yapılan arıza teşhislerinde aynı durumlar için daima özdeş yükleme yapılabilir ve lineer bir karakteristik elde edilemese bile, alternatörün kararlı karakteristiği, arıza teşhisinin başarılı olması konusunda sürekli olarak yeterli olabilecek bir konumdadır.

Tam yük ve yarım yük durumları için, uyarılmış alternatöre yük olarak bir ayarlı direnç kullanılmıştır. Bu sayede alternatör ile senkronize şekilde dönen motorun yüklenmesi sağlanmıştır. Çalışmada izafi bir yüklenme metodu kullanılmış, herhangi bir kapalı döngü kontrol kullanılmamış, yani tekerlek içi elektrik motorunun aynı devirlerde aynı tork çıkışını vermesi için bir denetleyici kullanılmamıştır. Çalışmada alternatörün aynı uyarım gerilimi ve devir sayısı için aynı elektriksel çıkışı vermesi, neticesinde aynı fiziksel mukavemeti göstermesi yeterli olmuştur. Şekil 4.6.'da alternatörün test düzeneği üzerindeki hali görülmektedir.

4.1.3. Yük hücresi

Yük hücresi (load cell) tekerlek içi elektrik motorunun torkunu ölçmek için kullanılmıştır. Motoru mekanik olarak yüklemeye kullanılan alternatörün fiziksel olarak üzerine yüklendirildiği yük hücresi, bu yüklenme miktarını ölçmek için kullanılmıştır. Ölçülen çıkış, hesaplanan katsayılar ile çarpılmış, yük hücresi ile tekerlek içi elektrik motorunun tork verisi gerçek zamanlı olarak Nm cinsinden elde edilmiştir. Bu hesaplama yapılırken yük hücresinin alternatör miline göre momenti alınmış ve çıkışta ölçülen değer, arıza teşhis sisteminde moment hesabıyla elde edilen sabit katsayıyla çarpılmış ve motorun gerçek tork değeri elde edilmiştir. Gerçek tork verisinin elde edilebilmesi için, ölçümlere başlanmadan yük hücresinin kalibrasyonu, ağırlığı bilinen bir cisim kullanılarak kontrol edilmiş ve hassas olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.5.'te yük hücresi ile tekerlek içi elektrik motoru arasında tork verisinin nasıl aktarıldığını ve dönüştürüldüğünü gösteren, yük hücresi ile tekerlek içi elektrik motoru arası mekanik bağlantılar görülmektedir.



Şekil 4.5. Yük hücresi ile tekerlek içi elektrik motoru arası mekanik bağlantılar

Şekil 4.5.'te r_1 ve r_2 sırasıyla büyük kasnak ve küçük kasnak yarıçaplarını ifade etmektedir. l yük hücresinin alternatör tarafından bindirilen yükü karşıladığı noktanın alternatör mil merkezi ya da küçük kasnağın merkezine uzaklığıdır. (Denklem 4.1-4.3)'te yük hücresi ile tekerlek içi elektrik motoru arasındaki moment hesabı görülmektedir.

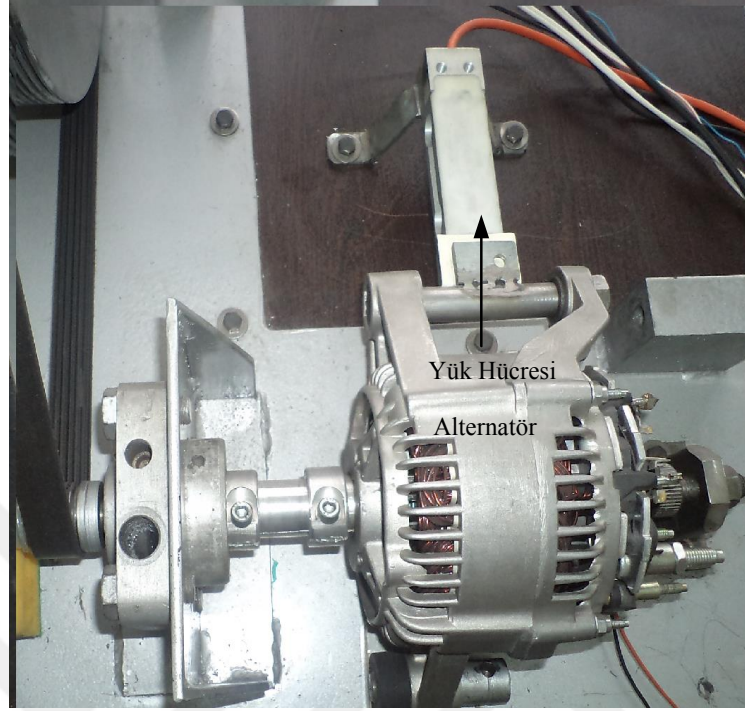
$$F = m \cdot g \quad (4.1)$$

$$T_2 = F \cdot l_1 \quad (4.2)$$

$$T_1 = \frac{T_2 \cdot r_1}{r_2} \quad (4.3)$$

Burada F , Newton cinsinden kuvvet; m , kg olarak kütle; g ise yerçekimi ivmesi olarak, (Denklem 4.1)'de T_1 tekerlek içi elektrik motorunun torkunu, T_2 ise yük hücresinin ölçüm noktasında ölçülen torku ifade etmektedir. Veri alışı esnasında tork verisi, yük hücresinden okunduktan sonra, (Denklem 4.3)'teki, tork dönüşümü için moment hesabı dikkate alınarak veri setine eklenmiştir.

Şekil 4.6.'da yük hücresi ve alternatörün deney seti üzerindeki bağlantı şekli görülmektedir. Test düzeneğinde kullanılan Puls Elektronik marka yük hücresi 2 mV/V çıkış sinyali hassasiyetine sahiptir ve aynı marka bir yük hücresi sinyal dönüştürücüsü yardımıyla test düzeneğinde yerini almıştır.



Şekil 4.6. Yük hücresi ve alternatörün test düzeneği üzerine sabitlenmiş hali

Tablo 4.2.'de yük hücresinin teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Yük hücresi teknik özellikleri

Toplam hata	Kapasite	Çıkış sinyali	En yüksek bölünütü sayısı	En küçük ölçüm sayısı	Sıfır değerine dönüş hatası	Çalışma sıcaklığı	Besleme gerilimi	Giriş-çıkış dirençleri
0,030	10 kg	2 mV/V	1000	$E_{max}/4000$	$<0,500$	$-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$	5 V	$395 \pm 20\ \Omega$ - $350 \pm 3\ \Omega$

Tablo 4.2.'de verilen yük hücresi teknik özellikleri, test düzeneği için ve yapılacak ölçümler için uygun aralıklardadır.

Tablo 4.3.'te kullanılan sinyal dönüştürücüsünün teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3. Yük hücresi sinyal dönüştürücüsü teknik zellikleri

Analog sinyal girişi (yk hücresi)	Besleme gerilimi	çalışma sıcaklığı	Analog ıkı	Bağlanabilen yk Hücresi adedi
2 mV/V	24 V DC	-10 °C-+40 °C	0-10 V	4 yük hücresi

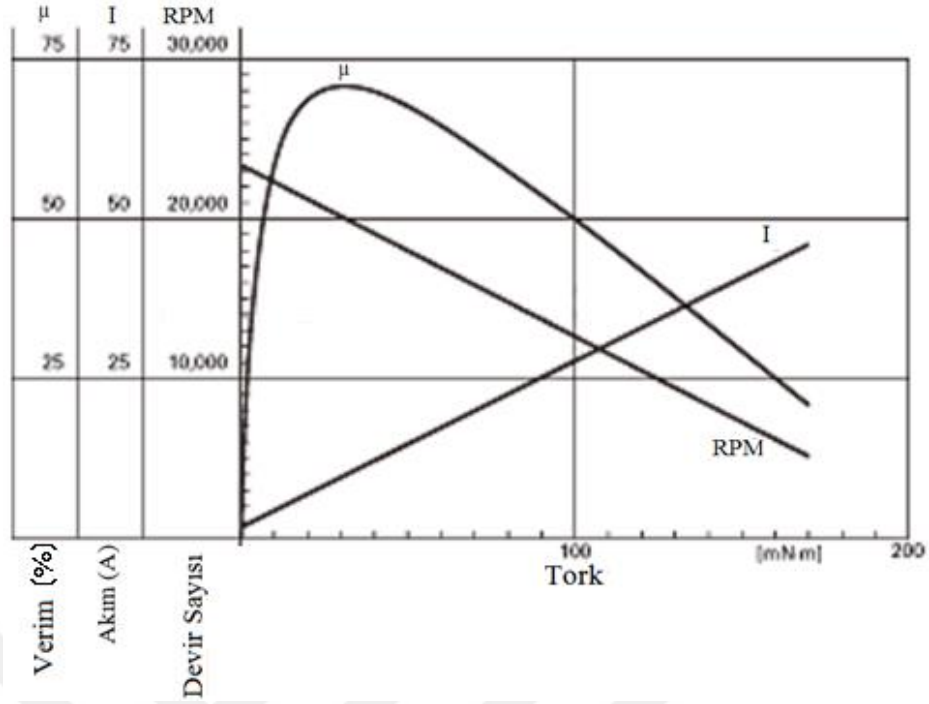
Tablo 4.3.'te teknik özellikleri verilen sinyal dönüştürücüsü de yk hücresi ile birlikte kullanılacağı için, seçimi yapılırken yk hücresinin teknik özellikleri ile uyumlu olmasına dikkat edilmiştir.

4.1.4. Tako generatör

Tekerlek içi elektrik motorunun devir sayısını ölçmek için iki yöntem dnlmtir. Bunlardan biri sensör çıkışlarının palslerini ölçmek, bir diğeri de bir doğru akım motorunu tako generatör olarak kullanarak devir sayısını ölçmektir. Sensör tetikleme sinyali olarak palsleri ölçmek sensör arızası durumunda doğru olmayan verilerle karılamamıza, motor hızını yanlış ölçmemize neden olacağı için tako generatör kullanılmıştır. Kullanılan motor Mabuchi marka, RS-540 SH-6527 model bir DC motordur. DC motorun sisteme entegre edildiği noktadaki minimum ve maksimum devir sayıları arasında lineer ıkılar elde ediyor olmasına dikkat edilmiştir. Elde edilen DC gerilim seviyesi ile motorun devir sayısı analog bir gerilim seviyesi olarak llmtir. Bu ölçümlerde yüksek hassasiyet ve güvenilirlik seviyesi ile devir sayısı verisine ulaşılmıştır.

Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi tako generatör küçük kasnağa aynı merkezli olarak bağlanmıştır. Küçük kasnakla aynı devir sayısında dönen tako generatörün, yapılan ölçümler sonucunda çıkış olarak bütün devir sayıları için lineer bir çıkış gerilimi seviyesi verdiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.7.'de tako generatör olarak kullanılan DC motorun tork-verim, akım, devir satısı karakteristiği görülmektedir.



Şekil 4.7. Tako generatör olarak kullanılan DC motorun karakteristik eğrileri (www.mabuchi-motor.co.jp, 2016)

Şekil 4.7.'de Mabuchi marka DC motorun katalog verilerindeki karakteristik eğrilerinde de görüldüğü gibi, kullanılan DC motorun ölçümler boyunca görülen minimum devir sayısı olan 1700 RPM ile maksimum devir sayısı olan 3300 RPM arasında da devir sayısı ve akım karakteristiği lineerdir. Dolayısıyla tako generatör olarak kullanılırken, devir sayısı başına lineer bir gerilim seviye artışı göstereceği, Şekil 4.7.'de gösterilen karakteristik eğrilerden de anlaşılmaktadır.

4.1.5. Kayış kasnak sistemi

Alternatör ile tekerlek içi elektrik motorunun mekanik bağlantılarının gerçekleştirilebilmesi için ve alternatörün devir sayısını artırıp etkin olarak kullanıldığı ve daha lineer bir karakteristik sergilediği devir sayısı sınırlarına ulaştırmak için kayış kasnak sistemi tercih edilmiştir. Kasnaklar poliamid malzemedен imal edilmiştir ve kayış ile kasnak arasında kaymayı önlemek ve devir sayısı farkının sadece yarıçaplarla ters orantılı olmasını sağlamak için çok kanallı v tipinde kullanılan otomobil vantilatör kayışının yapısına uygun olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.3.'te büyük ve küçük kasnaklar ve kayışın test düzeneğine entegre edilmiş

hali görülebilmektedir. Kayış ve kasnak sistemlerinde primer ve sekonder kasnaklar arası dönüş oranları hesabında yarıçapların ters oranı dışında bir miktar da kayma meydana gelebilmektedir. Kayma miktarları hesaplanırken kasnak ve kayış malzemelerinin sürtünme katsayıları, kasnakların bağlantı açıları kayışın yüklü ve yüksüz kolları arasındaki kuvvetler oranı, kayış ve kasnakların tipi, ortam sıcaklığı ve nemi gibi birçok etken devreye girmektedir. Ortam sıcaklığı ve nem çok uç noktalarda olmadığı durumlar için, bu hesaplamaların genelinde ihmal edilebilir değişkenler olarak kabul edilir.

Çalışmada kayış gerginliği bütün ölçüm durumlarında çok dikkatli ve özdeş biçimde ayarlanmıştır. Çok kanallı v tipi kayışın son derece azalttığı kayma miktarı, kayış yapısına tam uygun hazırlanmış kasnaklarla birlikte sürtünmeyi arttırıcı bir kayış kasnak yüzeyi oluşturulmuştur.

Deneysel çalışmaların yapıldığı tekerlek içi elektrik motorunun yarım yüklü olduğu koşullarda tekerlek içi elektrik motorunun minimum ve maksimum devir sayıları arasında muhtelif küçük ve büyük kasnak devir sayıları ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde devir sayıları arasındaki oran, büyük ve küçük kasnak arasındaki yarıçap uzunluğu oranı ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Bütün ölçümlerde görülen, ihmal edilebilir mertebedeki devir sayısı farkı, temassız devir ölçer cihazın %0,5'lik hassasiyet sınırları mertebesinde öteye geçmemiş, anlamlı farklılıklar gözlemlenmemiştir. Bu durum, isabetli bir kayış kasnak tasarımı, malzeme seçimi ve başarılı bir montaja işaret etmektedir.

Tekerlek içi elektrik motorunun çeşitli yüklenme düzeylerinde düşük bir ihtimal ve oranla tespit edilebilecek kayma miktarının, orta yükleme seviyesinde, yapılan ölçümler sonrasında ihmal edilebilecek kadar küçük miktardaki anlamsız devir sayısı farkı, hesaplamalarda sadece kasnak yarıçapları oranı olan 16,5 olarak işleme alınmıştır. Öte yandan aynı kayış ve kasnak sisteminde, aynı gerginlik oranı ile özdeş ölçüm şartları altında, aynı motor ve yük ile aynı tork miktarında özdeş malzemeler sayesinde tutarlı olarak daima aynı kayma miktarı, elde edilir. Bu sebeple, küçük miktarlarda oluşan kayma, bu çalışmada daima ihmal edilebilirdir. İzafi, özdeş,

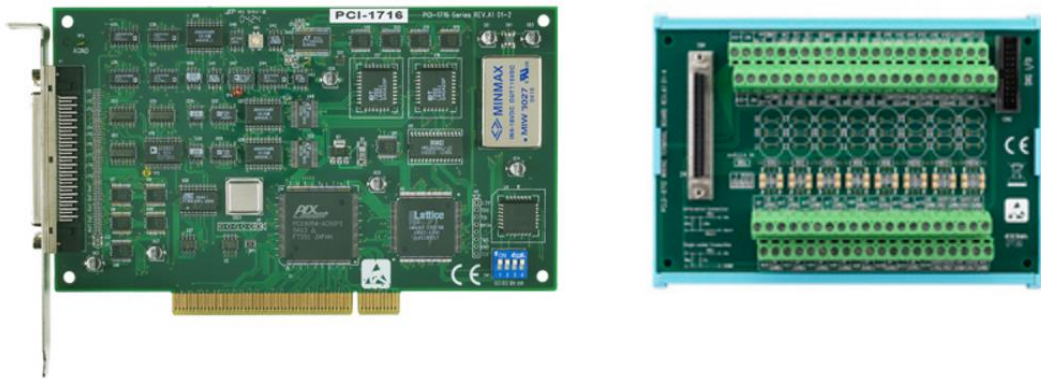
karşılaştırılabilir ve aynı koşullarda aynı miktarlarda tutarlı olarak ölçülen devir sayısı verisi ve yapay zeka teknikleri ile arıza teşhisi veri seti için tutarlı ve kabul edilebilir bir değişken olarak ele alınmıştır.

4.1.6. Test düzeneği zemini

Test düzeneği gövdesi 8 cm yükseklikte, 65 cm eninde ve 65 cm boyunda bir kaide üzerinde, 3 cm kalınlığında ahşap malzemeden ve üzerinde mukavemetini arttırmak için çelik sac kaplanarak imal edilmiştir. Deney seti üzerinde bulunacak malzemeleri taşıyacak dayanıklılığa sahip olması gerekliliği dikkate alınmıştır.

4.1.7. Veri alışı kartı

Çalışmada ölçülen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için Advantech PCI-1716 serisi veri alışı kartı kullanılmıştır. Kartın örnekleme oranı 250 kS/s'dir ve 1 Kb belleğe sahiptir. İki adet 16 bit sayısal/analog çıkış kanalı ve 10 MHz 16 bit sayıcı kanalına sahiptir. Verilerin dış ortamdan alınıp verilmesi ve kartla iletişim için PCLD 8712 terminal kartı kullanılmıştır. Şekil 4.8.'de Advantech PCI 1716 veri alışı kartı ve PCLD-8712 terminal kartı resimleri görülmektedir.



Şekil 4.8. Advantech PCI-1716 veri alışı kartı ve PCLD-8712 terminal kartı

Tablo 4.4.'te Advantech veri alışı kartının temel teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.4. Veri alış kartı teknik özellikleri

Çözünürlük	Örnekleme hızı	Veri giriş gerilim sınırları	Analog giriş sayısı	Analog çıkış sayısı	Sayısal giriş sayısı	Sayısal çıkış sayısı	Sayısal kanal sayısı	Besleme gerilimi
16 bit	250 kHz	-5V-+5 V veya 0-10 V	16	2	16	16	1	5V DC - 12V DC

Tablo 4.4.'te verilen teknik özellikler, yapılacak arıza teşhisi çalışması ve gerçekleştirilecek ölçümler için uygun aralıklara sahiptir. Ayrıca Advantech PCI-1716'nın MATLAB® Simulink tarafından tanınması, Matlab'da hazır blok elemanı olarak bulunması, giriş sayılarının yeterli olması ve analog çıkışından motor sürüş referans sinyalinin uygulanabilmesi, tercih edilmesinin nedenidir. Kullanılan veri girişlerinden gerilim verisi, veri alış kartı Advantech PCI-1716'nın veri giriş gerilim sınırları içerisinde kalması amacıyla güç kaynağının çıkışından 1/20 oranında bir zayıflatma ile düşürülüp, kartın veri giriş ve çıkışı olarak kullanılan terminal kartına bağlanmıştır. Tork verisi için yük hücresi ve devir sayısı tespiti için tako generatör kullanılmıştır. Akım verilerini ölçmek için pens ampermetreler kullanılmıştır. Ölçülen bütün değerler, hesaplanan veya analog olarak katsayıları girişe uyumlu hale getirilen değişkenleri tekrar olması gereken seviyelere dönüştüren katsayılar ile çarpılmıştır. Şekil 4.9.'da kullanılan CIE marka pens ampermetrenin resmi görülmektedir.



Şekil 4.9 Pens ampermetre

Şekil 4.9.'da görülen pens ampermetre hem AC ve DC akım ölçümü yapabilmektedir ve dönüştürme oranları 1 mV/100mA ve 1 mV/10 mA'dir. Ölçümlerde pens ampermetre dönüştürme oranı olarak 1 mV/10 mA seçeneği kullanılmıştır. Gerçek veri değerinin elde edilmesi için Matlab içerisinde dönüştürme oranının tersini içeren bir katsayı ile çarpılmıştır. Kullanılan yapay zeka tekniklerinin girişleri olarak gerçek veriler kullanılmıştır.

4.2.Yapay Zeka Teknikleri İçin Veri Seti Değişkenlerin Belirlenmesi

Tekerlek içi elektrik motorlarının arıza teşhisi çalışması için ölçülecek değişkenlerin belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Motorun muhtemel arızalarının sonucunda gerçekleşecek giriş ve çıkış veri değişimlerinin karakteristiği, arızaları değişkenler yoluyla teşhis etmemizi yani varlığını anlamamızı sağlar. Her bir arızanın kendine has karakteristik verilerini oluşturması ve arızaların tespit edilerek birbirinden ayırt edilebilmesi, görülen normal dışı durumun değişkenlerdeki genelleştirilebilir değişimler yardımıyla hangi arızadan kaynaklandığının belirlenmesinin, yani arıza teşhisininin temelini oluşturur. Bu sebeple, motorun ölçülecek değişkenleri, elektrik motorları ve tekerlek içi elektrik motorlarıyla ilgili geçmiş tecrübeler yardımıyla öngörülen durum değişikliklerini içeren ve muhtemel arızaların teşhis edilmesini sağlayacak kapsamda olması sağlanmıştır.

Arızalar ilk önce temel sınıflara ayrılmıştır. Tek faz sargısı kısa devre arızaları, faz sargıları arası kısa devre arızaları, açık devre arızaları, sensör arızaları, rulman arızası ve normal durumun teşhis edilebilmesi için besleme (kaynak) gerilimi, besleme akımı, tork ve devir sayısı verilerinin izlenmesi yeterli olmuştur. Fakat bu arızalardan; tek faz sargısı kısa devre arızaları grubunun r sargısı kısa devresi, s sargısı kısa devresi ve t sargısı kısa devresi arızaları; sargılar arası kısa devre arızaları grubundan, r ve s sargıları arası kısa devre arızası, r ve t sargıları arası kısa devre arızası, s ve t sargıları arası kısa devre arızası; açık devre arızaları grubundan r sargısı açık devre arızası, s sargısı açık devre arızası ve t sargısı açık devre arızası; sensör arızaları grubundan r sensörü açık devre arızası, s sensörü açık devre arızası ve t

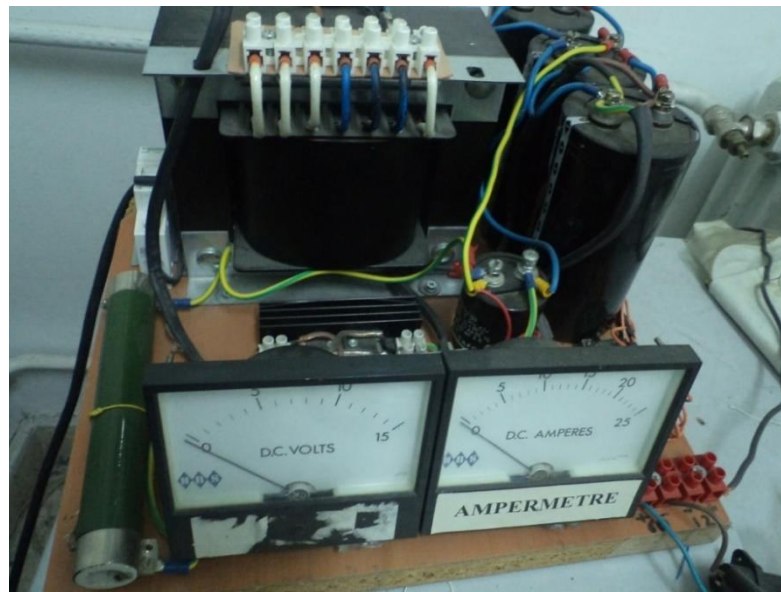
sensörü açık devre arızalarının kendi arasında ayrılabilmesi ve ayrı ayrı teşhis edilebilmesi için ise: r fazı akımı, s fazı akımı ve t fazı akımı verileri büyük önem arz etmektedir.

4.3. Değişkenlerin Ölçümleri ve Veri Seti

Yapay zeka teknikleri, temel olarak ölçülen değişkenlerin durumlara göre kurallar veya ağ eğitimi vasıtasıyla sınıflandırması esasına dayandığı için, belirlenen değişkenlerin hassas ve doğru olarak ölçülmesi büyük önem arz etmektedir. Ölçümler test düzeneği yardımıyla belirlenen değişkenlerin ölçümleri hassas bir şekilde özdeş durumlarda yapılmıştır. Doğru ölçümlerle elde edilen veri setinin kaydedilmesi, arızaların ve motorun karakteristiğinin doğru yorumlanmasını sağlayacağı unutulmamalıdır.

4.3.1. Kaynak gerilimi

Yapılan deneysel çalışmalarda tekerlek içi elektrik motoru 220 V AC gerilimi 48 V DC'ye çeviren konvansiyonel bir güç kaynağıyla beslenmiştir. Şekil 4.10.'da çalışmada kullanılan güç kaynağı görülmektedir.



Şekil 4.10 48 V DC güç kaynağı

Şekil 4.10.'da görülen 48 V DC güç kaynağı 1 kW gücündedir ve motorun bütün durumları için kapasitesini aşmadan motoru beslemiştir. Kaynak gerilimi ile motor sürücüsü ve tekerlek içi elektrik motoru bütünüyle sürücü devre üzerinden beslenmiştir.

Kaynak gerilimi verisi, tekerlek içi elektrik motorunun normalin üzerinde akım çekmeye başladığı arıza durumlarında, gerilim düşümü belirtisiyle kendini gösterebilecek olan arızaların teşhisi için önemli bir parametre olarak ölçülen veriler arasında yer almıştır. Sistemin enerjilendirilmesi için kullanılan güç kaynağının çıkışından besleme gerilimi ve besleme akımı verileri elde edilmiştir. Besleme gerilimi için veri alış kartının giriş gerilim seviyesine uyumu açısından hazır bir gerilim bölücü kullanılmıştır. Gerilim bölücü devresi ile 20 kat düşürülen besleme gerilimi sinyalinin genliği, hazırlanan MATLAB® Simulink modellerinde tekrar sabit katsayı ile 20 kat arttırılmış ve gerçek verinin okunması sağlanmıştır.

4.3.2. Kaynak akımı

Tekerlek içi elektrik motorunun arıza grupları arasında fark oluşturulabilmesi, örneğin kısa devre arızalarının açık devre arızaları ile ayırt edilmesi gibi, genel kapsamlı arıza sınıflandırması için büyük önem arz eden kaynak akımı değişkeni, grup içi arızaların teşhisinde etkin bir değişken değildir. Örneğin r sargısı kısa devre arızası ile s sargısı kısa devresi arızası durumlarında kaynak akımı verisi tamamen aynı karakteristiği gösterecek ve ayırt edici bir özellik ortaya koyamayacaktır.

Kısa devre arızaları gibi, kaynaktan çekilen akımın yükseldiği durumlarda teşhis için karakteristik bir veri değişimi ortaya koyabilecek kaynak akımı verisi, motor ve sürücüsünün beslendiği güç kaynağının çıkışında, pens ampermetre bağlanarak ölçülmüştür. Pens ampermetrenin ölçüm kademesindeki katsayı değeri, veri alış kartında okunup Matlab Simulink'e aktarıldıktan sonra, bahsedilen oranın tersi ile çarpılıp gerçek kaynak akımı verileri olarak ölçülmüştür.

4.3.3. Faz akımları

Faz akımı parametreleri, tekerlek içi elektrik motorunun kısa devre arızaları, açık devre arızaları gibi arıza gruplarının teşhisi için pay sahibi olsa da, özellikle arıza grubu içerisinde, örneğin r-s sargıları arası kısa devre arızası ile r-t sargıları arası kısa devre arızası durumları arası farkların tespitinde etkin rol oynar. Bunun sebebi, faz akımlarının arasında oluşabilecek farklılıkların ve asimetrinin, bu değişkenlerin birbiriyle karşılaştırarak teşhis edilebilmesine olanak sağlamasıdır.

Faz akımları da motorun girişindeki faz kabloların her birine birer pens ampermetre bağlayarak ölçülmüş ve doğru değerler pens ampermetrenin ölçüm katsayısının tersinin sabit bir katsayı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Tekerlek içi elektrik motorlarında hat akımları ile faz akımları, sargılar yıldız bağlı yapıya sahip olduğu için eşittir.

4.3.4. Tork

Tekerlek içi elektrik motorlarının durumlar arası fark belirleyici çıkışlarından biri de tork verisidir. Motorların ve özellikle taşıtlar için kullanılan tekerlek içi elektrik motorlarının tork verisi, motorun taşıma veya kalkınma karakteristik değişkenlerinden biridir. Tekerlek içi elektrik motorunun tork verisini ölçmek için, hazırlanan test düzeneğinde yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinin çıkışında bulunan yük hücresi yükselticisinin çıkışının veri alış kartına giriş olarak uyguladığı gerilim seviyesi için, alternatörün yük hücresine yükleneceği kısmın, yatay ekseninde motor milinden uzaklığı hesaplanmıştır. Ölçülen değer, hesaplanan değer ve küçük ile büyük kasnakların çapları ile ters orantılı bir katsayı da hesaba katılarak elde edilen katsayı ile çarpılıp, gerekli moment hesabı yapıldığında motorun tork verisi elde edilmiş olur. Alternatörün tekerlek içi elektrik motoruna uyguladığı mekanik yüklenmenin arıza teşhisini daha sağlıklı kılabilmesi için, alternatör bütün ölçümler için aynı elektriksel yükü beslemiştir. Yük Hücresi (bkz. Şekil 4.6.), referans noktasından test düzeneğine metal destek ayakları ile sabitlenmiştir. Yüklenme noktasına ise alternatörün dönüş yönüne uygun ve dikey olarak yüklenmesi ve bu

durumda yük hücresi çıkışının bahsedilen katsayılarla çarpılınca tekerlek içi elektrik motorunun tork verisinin elde edilmesi sağlanmıştır.

4.3.5. Hız

Tekerlek içi elektrik motorları için bir diğer önemli çıkış değişkeni de motorun RPM (dakikadaki devir sayısı, devir/dakika) cinsinden hızıdır. Arıza durumlarında motorun performansı değiştiğinde doğrudan etkilenebilecek bir değişken olarak hızın ölçülmesi için, bir doğru akım motoru tako generatör olarak kullanılmıştır. Şekil 4.6.'da tako generatörün test düzeneği üzerine montajlanmış hali görülmektedir. Tako generatör, tekerlek içi elektrik motorunun devir sayısını ölçmek için, motor milinden sekonder kasnağa sabitlenmiştir. Gövdesi de dönmeyecek olarak sabitlenen tako generatörün daha hassas veriler elde edilebilmesi için, daha yüksek devir sayısına sahip olan alternatör ile senkronizasyonu sağlanmıştır. Devir sayısı başına referans çıkış gerilim seviyesinin elde edilmesi ve motorun lineer karakteristiğinin tespiti için, çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek hızlarda tekerlek içi elektrik motoru döndürülmüş, tako generatörün çıkışında elde edilen gerilim seviyeleri kaydedilmiştir. Tekerlek içi elektrik motorunun devir sayısı harici takometre ile ölçülmüş, devir sayısı sonuçları, tako generatörün çıkış gerilimi seviyeleri ile orantılanmış ve tekerlek içi elektrik motorunun minimum ve maksimum devir sayıları arasındaki tüm değerlerde tako generatör gerilim seviyesinin tutarlı, lineer ve doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra motorun devir sayısı başına düşen tako generatör gerilim seviyesi hesaplanmış ve devir sayısını bulmak için çarpılacağı sabit katsayı bulunmuştur. Elde edilen analog gerilim seviyesi bu katsayıyla, tasarlanan Matlab Simulink modelinde çarpılınca, çıkış olarak motorun devir sayısı elde edilmiştir.

4.3.6. Sıcaklık farkı

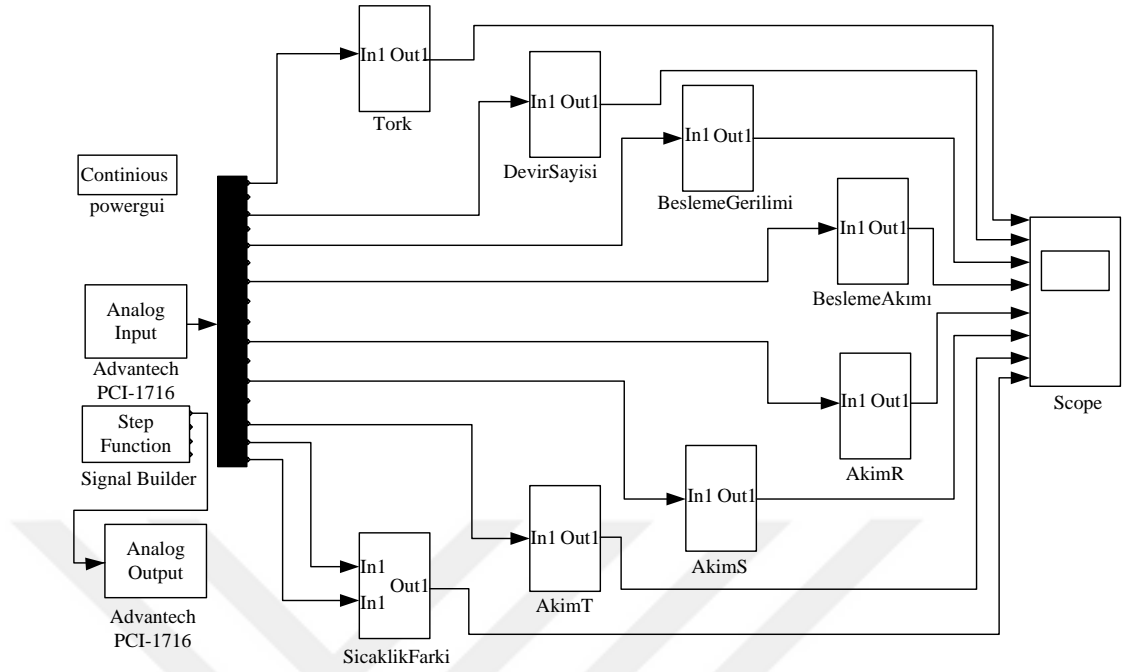
Tekerlek içi elektrik motorunun statorunda sargılara yakın bir noktaya termokupl yerleştirilmiş ve termokupl kablosu motor milinden dışarı çıkarılmıştır. Dış ortam için de başka bir termokupl ile ortam sıcaklığı ölçülmüştür. Matlab Simulink'te

ortam sıcaklığı ile motor içi sıcaklığı karşılaştırılıp, sıcaklık farkı verisinin de ayırt edici bir değişken olarak değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Ölçülen değerler; sıcaklık verisi için uygun katsayıyla çarpılıp gerçek sıcaklık verisinin ölçülmesi sağlanmıştır. Sıcaklık farkı verisi, değişik ortam sıcaklıklarına ve motor çalışma süresine göre özdeş olmayan veriler içerdiği için, ayrıca arıza durumlarında, örneğin bir kısa devre durumunda tepki süresinin çok uzun olması sebebiyle teşhisin gecikmesine sebep olacağı düşünülmüştür. Bu sebeple, sıcaklık farkı değişkeninin arıza teşhisi için uygun olmadığına karar verilmiştir. Sistemde hazır bulunan motor içi sıcaklık, ortam sıcaklığı ve sıcaklık farkı değişkenleri, yine de motorun uzun süreli çalışmasında kullanılabileceği düşünülmüştür ve hazırlanan test düzeneği ile sıcaklık farkı verisi de ölçülmüştür.

4.3.7. Veri setinin oluşturulması

Ölçülen değerler, anlık veri alışı ya da daha geniş olarak, ağın eğitim ve test aşamalarında kullanılmak üzere saklanmış, geniş kapsamlı bir veri seti oluşturmak için kullanılmıştır. Bu veri setinin oluşturulması için motor bütün durumlarda ayrı ayrı çalıştırılmış ve ölçülen bütün değişkenlere ait veriler kaydedilmiştir.

Şekil 4.11.'de veri alışı ve veri setinin oluşturulması amacıyla Matlab Simulink yardımıyla tasarlanmış veri alışı modeli görülmektedir. Veri alışı modeli, "Signal Builder" (sinyal üretici) ile üretilen referans gerilim sinyali, ya da gaz pedalı eğrisi ile "Analog Output" ve ardından bir (buffer) tampon devre yardımıyla motorun sürüşünün kontrol edilmesini sağlamıştır. Aynı zamanda, tasarlanan test düzeneğinden kullanılan ölçüm yöntemleri ile elde edilen verilerin, "Analog Input" ile alınmasını, bu verilerin gerekli filtreleme, katsayı çarpımı, rms (root mean square) değerlerinin elde edilmesi, ortalama değerlerin elde edilmesi ya da referans değerlerin eklenmesi ya da çıkarılması gibi işlemleri barındıran, "Tork", "DevirSayisi", "BeslemeGerilimi", "BeslemeAkimi", "AkimR", "AkimS", "AkimT" ve "SicaklikFarki", Subsystem blokları ardından izlenebilmesi için "Scope" bloğuna ve yine her "Subsystem" içindeki "Workspace" blokları ile kaydedilebilmesi için Matlab Workspace'e gönderilebilmesini sağlamıştır.



Şekil 4.11. Veri alış için tasarlanan Matlab Simulink veri alış modeli

Advantech veri alış kartının Matlab Simulink'te bulunan modeli ile veri alış kartı sinyalleri doğrudan Matlab ortamına aktarılabilmiş, Matlab ile kolaylıkla kontrol edilebilmiş ve analog çıkışından motorun kontrolü için referans bir sinyal oluşturulabilmiştir. Testlerde analog çıkış, "Signal Builder"a bağlanmış, motor sürüş referans sinyali, gaz pedalının yerini alacak şekilde step fonksiyonunun başlangıç anında gaza aniden sonuna kadar basılmış gibi motora aktarmıştır.

Arıza durumlarına ait verilerin ölçülebilmesi için bahsedilen muhtemel arızalar, motora suni olarak yaptırılmıştır. Hazırlanan kapsamlı veri seti ile kullanılan yapay zeka tekniklerinin eğitimleri ve testleri gerçekleştirilmiştir.

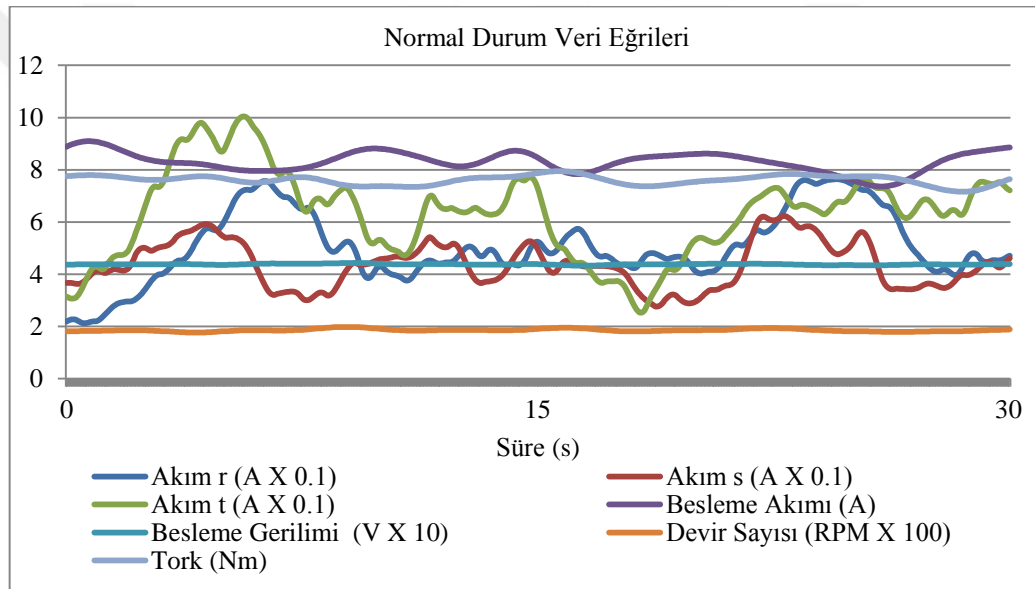
4.4. Tekerlek İçi Elektrik Motorunda Normal Koşul ve Arızalar

Tekerlek içi elektrik motorlarıyla ilgili muhtemel arızaların ve normal koşulun teşhis edilebilmesi amacıyla parametre limitlerinin belirlenebilmesi için muhtemel arıza ve durumları kapsayan veri setinin ayrıntılı biçimde oluşturulması gerekmektedir. Veri

setinin oluşturulması için yapılacak ölçümler, bu durumlara ait ölçümler için, arızaların hepsi suni olarak gerçekleştirilmiş ve motorun normal durum ve arızalar esnasındaki değişkenleri ölçülüp kaydedilmiştir.

4.4.1. Normal durum

Normal durum verilerinin elde edilebilmesi için motorun arızalı olmadığı normal koşullarda elde edilen veriler kaydedilmiş ve veri setine eklenmiştir. Şekil 4.12.'de motorun normal durumda elde edilen verilerinin eğrileri görülmektedir.



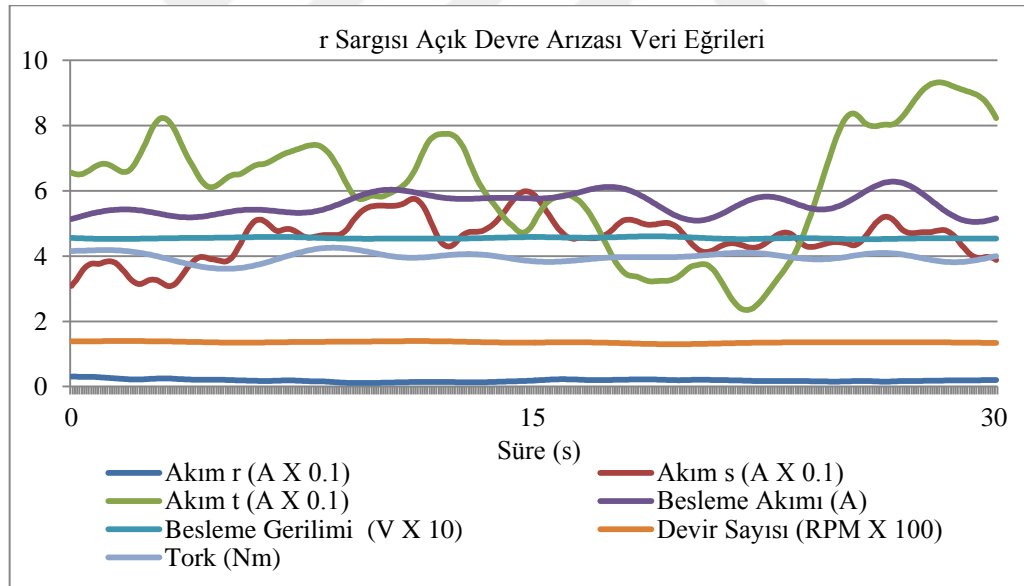
Şekil 4.12. Normal durum veri eğrileri grafiği

Şekil 4.12.'de de görüldüğü gibi, motorun normal durum eğrileri, verilerin sınıflandırılması ve birbirinden ayrılmasının sağlanacağı netlik ve uygunluğa sahiptir. Motorun ölçüm grafikleri elde edilirken, bütün değerlerin bir ekranda birbirlerine yakın olması ve mukayese edilebilmesi için elde edilen veri gruplarından bazıları bir takım katsayılarla çarpılmışlardır. Motorun normal durumuna ait veri eğrilerinden de anlaşılacağı üzere motor normal durumdayken dengeli ve kararlı bir veri akışına sahiptir. r, s ve t faz akımları kendi aralarında simetrik ve dengelidir. Devir sayısı küçük değişimler dışında 200 RPM civarında kararlı ve aynı seviyededir. Besleme akımı 8 A – 9 A aralığındadır. Besleme gerilimi kararlı ve düz

bir seviyede ilerlemiş, tork verisi de kendi içlerinde tutarlı ve 7,5 Nm – 8 Nm arasındaki değerler ile stabil bir genel profile sahiptir.

4.4.2. r sargısı açık devre arızası

Tekerlek içi elektrik motorunun yıldız bağlantı şekli ile birbirine bağlı 3 sargısından biri olan r sargısında, bağlantılarda bir kopma, temassızlık ya da sargıda açık devre olması durumunda oluşan arızadır. Bu durumda motor sürücüsünden her üç faz için tetikleme sinyali doğru zamanlarda gelebilmekte ve s ile t sargıları arasındaki seri bağlı iletim sağlıklı olabilmektedir. r sargısı açık devre olduğundan r sargısı ile kurulmuş hiçbir tetikleme bağlantısı sağlıklı sonuçlanamamaktadır. Şekil 4.13.'te motorun r sargısı açık devre arızası durumunda ölçülmüş veri eğrileri grafiği verilmiştir.



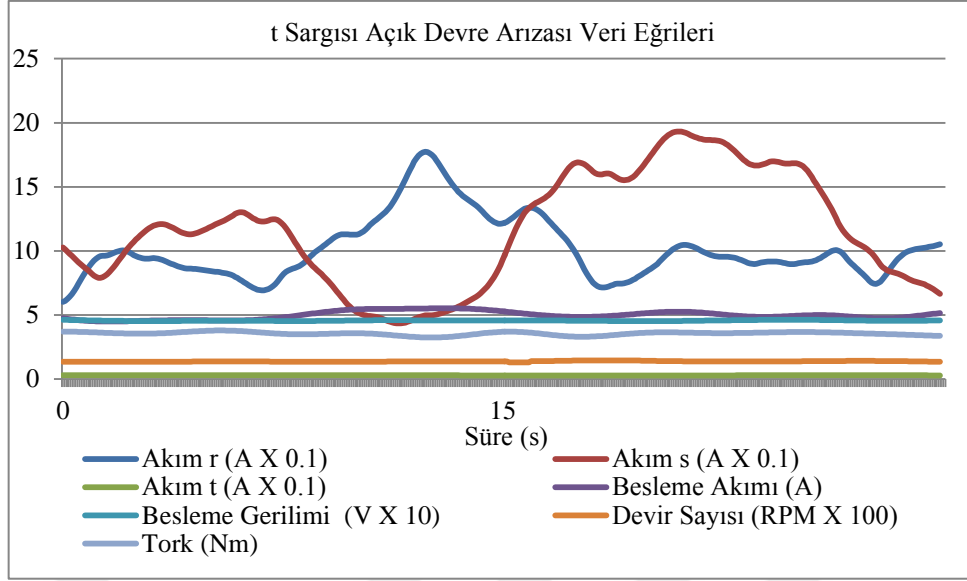
Şekil 4.13. r sargısı açık devre arızası veri eğrileri grafiği

Motorun r sargısı açık devre arızası verilerinin elde edilebilmesi için motora suni olarak r sargısı açık devre arızası yaptırılmış ve arızalı durumdayken ölçümler depolanıp grafikler elde edilmiştir. Bu arızanın suni olarak gerçekleştirilebilmesi için sürücüdendir motora giden r fazı kablosu bağlantısı çıkarılmıştır. Bu durumda r sargısında oluşan açık devre, r sargısında herhangi bir sebepten oluşan açık devre

karakteristiği ile örtüşmektedir. r sargısı sensöründen doğru zamanda tetikleme gelmekte fakat r sargısı üzerinden faz akımı geçirilememektedir. Şekil 4.13.'te de görüldüğü üzere r sargısı açık devre arızası sebebiyle, r fazı akımı sıfır değerini almıştır. Besleme geriliminde az miktarda bir artış görülmüştür. Normal durumda 8 Nm civarında seyreden tork değeri, motorda beklenen döner manyetik alan düşüşü ve dengesizliği sebebiyle bir düzensizlik ve bariz bir düşüş ile 4 Nm'ye kadar gerilemiştir. Normal koşullarda 8 A civarında olan besleme akımında 5 A ile gözle görülür bir düşme görülmüştür. Besleme gerilimi seviyesindeki az miktarda yükseliş de besleme akımındaki düşüş sebebiyle gerçekleşmiştir. Çünkü güç kaynağına daha az akım çekerek daha az yüklenen motor, daha az bir gerilim düşümüne sebep olmuştur. Tüm bu gelişmelerin ışığında beklendiği üzere motorun devir sayısında azalma görülmüştür. Normal durumda 190 – 200 RPM civarında dönüş hızına sahip motorun r sargısı açık devre arızasında devir sayısı 140 RPM civarı değerlere kadar düşmüştür.

4.4.3. s sargısı açık devre arızası

Motorun s sargısı açık devre arızası verilerini elde etmek için s sargısı bağlantısı açık devre yapılmıştır. Bu durumda motor, s sargısında bir kopma ya da açık devre arızası karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 4.14.'te s sargısı açık devre arızası veri eğrileri grafiği görülmektedir. s sargısı açık devre olduğunda s fazı akımı sıfır seviyesine düşmüştür. Besleme akımı s sargısının diğer sargılarla olan bağlantılarında tetikleme sinyali gelmesine rağmen açık devre olması durumu ve diğer sargılarla bağlantı kuramaması nedeniyle daha düşük bir seviyede seyretmiştir. Bu durum besleme gerilimi genliğinde de güç kaynağına daha az yüklenilmesi sebebiyle gerilim düşümü normal duruma göre az miktarda gerçekleşmiştir. Bu durumdaki besleme akımı karakteristiği r sargısı açık devre durumu ile benzer şekilde 5 A civarında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.14. s sargısı açık devre arızası veri eğrileri grafiği

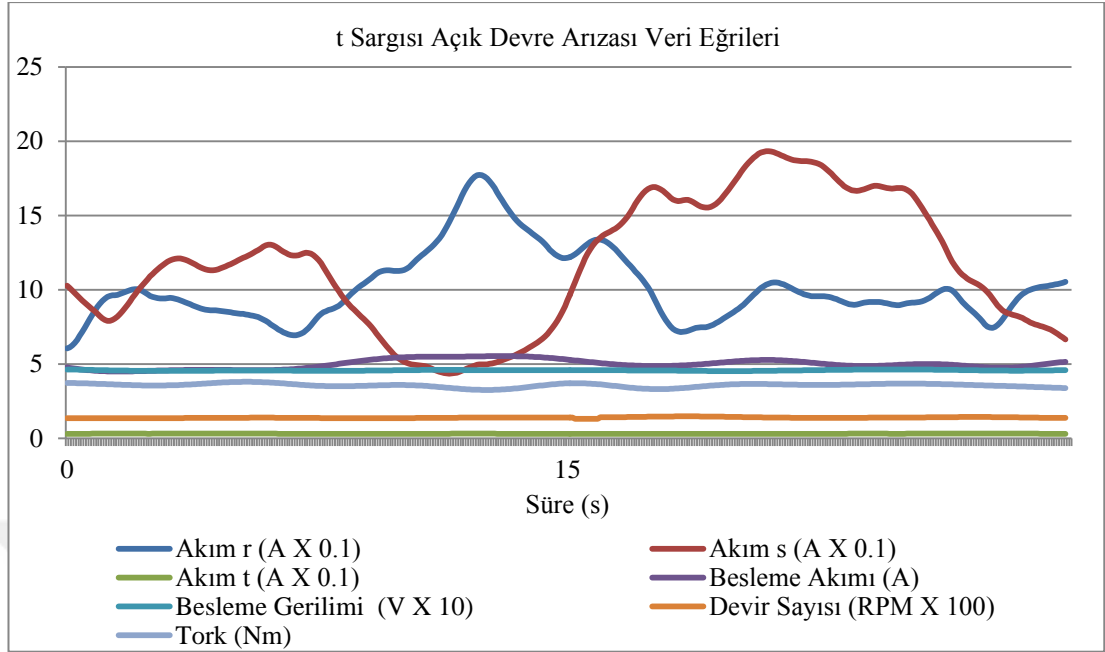
Tekerlek içi elektrik motorunun torku bu durumda da yine Şekil 4. 13.'te r sargısı açık devre durumuna benzer şekilde, 4 Nm ile çok net bir düşüş gösterirken, devir sayısı da gözle görülür şekilde azalarak 140 RPM civarında seyretmiştir.

4.4.4. t sargısı açık devre arızası

t sargısının açık devre olması durumu arızası için de, motorun bu duruma ait verilerinin elde edilmesi için, t bobininin sürücü ile motor arasındaki bağlantısı açık devre edilmiş, bu durumda motorun t sargısının açık devre karakteristiği göstermesi sağlanmıştır.

Şekil 4.15.'te tekerlek içi elektrik motorunun t sargısı açık devre arızası veri eğrilerinin grafiği görülmektedir. Şekil 4.15.'te de görüldüğü gibi, t fazı akımı, t sargısı diğer sargılarla seri bağlandığı durumlarda üzerinden akım geçiremeyeceği için sıfır değerine kadar düşmüştür.

Besleme akımı değeri t sargısı açık devre olduğu için 5 A civarı değerlere kadar düşmüştür. Bu sebeple güç kaynağına daha az yüklenildiği için besleme geriliminde düşüşün normal duruma nisbeten daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. t sargısı açık devre arızası veri eğrileri grafiği

Tork ve devir sayısı değerlerinde de sırasıyla 4 Nm ve 140 RPM civarı değerlerle normal durum göz önünde bulundurulduğunda, r sargısı ve s sargısı açık devre arızalarında da olduğu gibi bariz bir düşüş tespit edilmiştir. r, s ve t sargılarına ait açık devre arızası durumları bir arada ele alındığında, tork, devir sayısı, besleme gerilimi ve besleme akımı değerleri, aynı karakteristik özellikleri göstermiştir. Bu durum, açık devre arızalarının bütünüdür diğer tür arızalarla arasındaki farkın bu verilerle elde edilebilip bir arada gruplanabilmesine imkan sağlamıştır.

Açık devre arızalarının kendi aralarında r, s ve t sargılarının açık devre arızaları olarak sınıflandırılabilmesi için ise r fazı akımı, s fazı akım ve t fazı akımı değerleri arasındaki farklılıklar ön plana çıkmaktadır. Her bir fazın akım değeri, kendine ait açık devre durumunda sıfır seviyesine düşmekte ve diğer akım değerleri birbirlerine yakın seviyelerde seyretmiştir. Bu gelişmeler doğrultusunda açık devre arızalarının gerek diğer arızalarla, gerekse açık devre arızaları grubu içerisinde kendine has bir karakteristiğe sahip olduğu ve arıza teşhisi için ayırt edilebilir özellikler bulundurduğu görülmüştür.

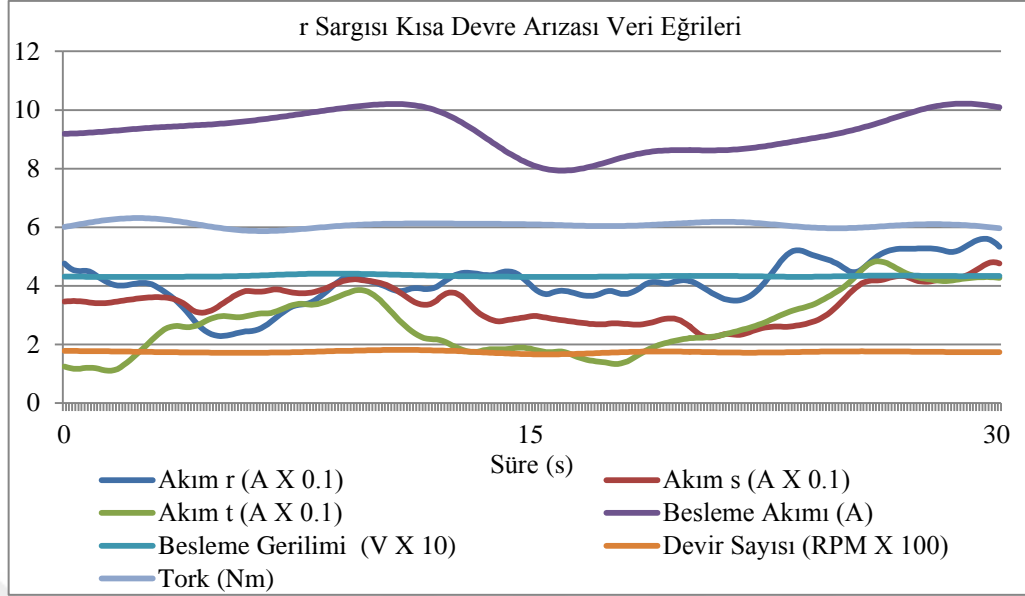
4.4.5. r sargısı kısa devre arızası

Sargı kısa devre arızaları tekerlek içi elektrik motorlarının muhtemel arızalarından biridir. Bu arızaya çeşitli sebeplerden dolayı oluşabilecek, yüksek akımlar ya da yalıtım malzemesi zaafiyeti sebebiyle oluşabilecek izolasyon problemleri, ya da motor içine yabancı bir malzeme girişi sebebiyle oluşabilecek sargı içi kısa devre durumları sebep olabilir.

r sargısı kısa devre arızasının verilerinin alınabilmesi için bu arızanın motora suni olarak yaptırılması gerekmiştir. Bu amaçla motorun yıldız noktası bulunmuş ve 2 Ω 'luk bir direnç üzerinden r sargısı kendi içinde kısa devre yaptırılmıştır. 2 Ω 'dan daha düşük kısa devre dirençleri için belirtiler daha net ve teşhis daha kolay olacağı gibi, bu değer altındaki direnç değerleri daha yüksek akımlara sebep olacağı için motorun gündelik kullanımda etkin olacak sigortanın atması ve motorun arıza teşhisi yapılamadan durmasına sebep olacaktır.

Bu çalışmanın amacı arızaların başlama seviyesinde iken bile teşhis edilebilmesini sağlamak olduğu için, 2 Ω gibi, kısa devre için çok da küçük olmayan bir kısa devre direnç değeri seçilmiştir. 2 Ω 'luk direnç değeri ile gerçekleştirilen kısa devre arızasının akım değerleri henüz herhangi bir sigorta atışına ve devre dışı kalma durumuna gerek duyulmayacak bir değerde olmasına rağmen, arıza teşhisinin başarıyla mümkün olabileceği bir seviye olarak uygun görülmüştür.

r sargısı kısa devre durumuna ilişkin veri eğrileri Şekil 4.16.'da görülmektedir. Şekil 4.16.'da görüldüğü gibi, r sargısı kısa devre arızası durumunda r fazı akımı, s ve t fazı akımları ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir değere ulaşmaktadır. s ve t fazı akımları birbirine yakın seviyelerde ilerlemektedir. Kaynak akımında 8 A ila 10 A arasındaki değerler ile artış görülmekte iken, bu durum besleme geriliminde az miktarda bir düşüşe sebep olmuştur.



Şekil 4.16. r sargısı kısa devre arızası veri eğrileri grafiği

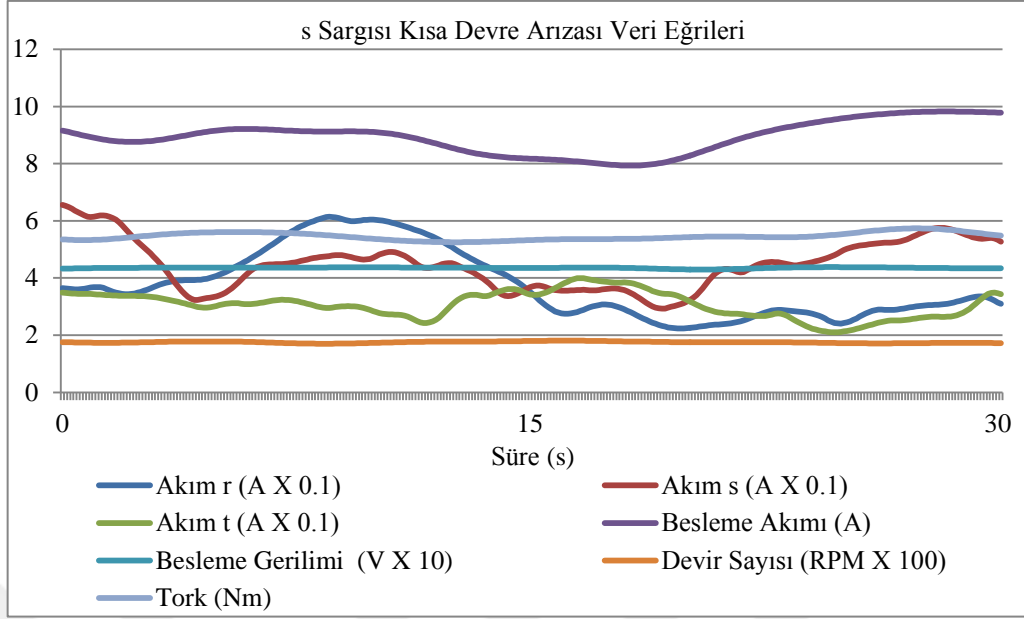
Döner manyetik alanda oluşan dengesizlik ve zayıflama nedeniyle beklendiği üzere motorun torku düşüş göstererek 6 Nm değerine gerilemiştir. Motorun devir sayısındaki azalış 180 RPM seviyelerinde kendini göstermiştir.

4.4.6. s sargısı kısa devre arızası

s sargısı kısa devre arızasını gerçekleştirmek için de 2 Ω 'luk bir direnç s sargısını kısa devre yapmak için kullanılmıştır.

Kısa devre karakteristiğine ait veri eğrileri Şekil 4.17.'de sunulmuştur. s sargısı kısa devre arızası için de, 8 A ila 10 A arasında değerlere kadar yükselen besleme akımında normal duruma göre nisbi bir yükseliş, besleme geriliminde az miktarda bir düşüşe sebep olmuştur.

s fazı akımı genel olarak diğer iki faz akımından yüksek olsa da diğer akımlar da s faz akımına yakın ama nisbeten daha küçük değerlerde kalmışlardır.



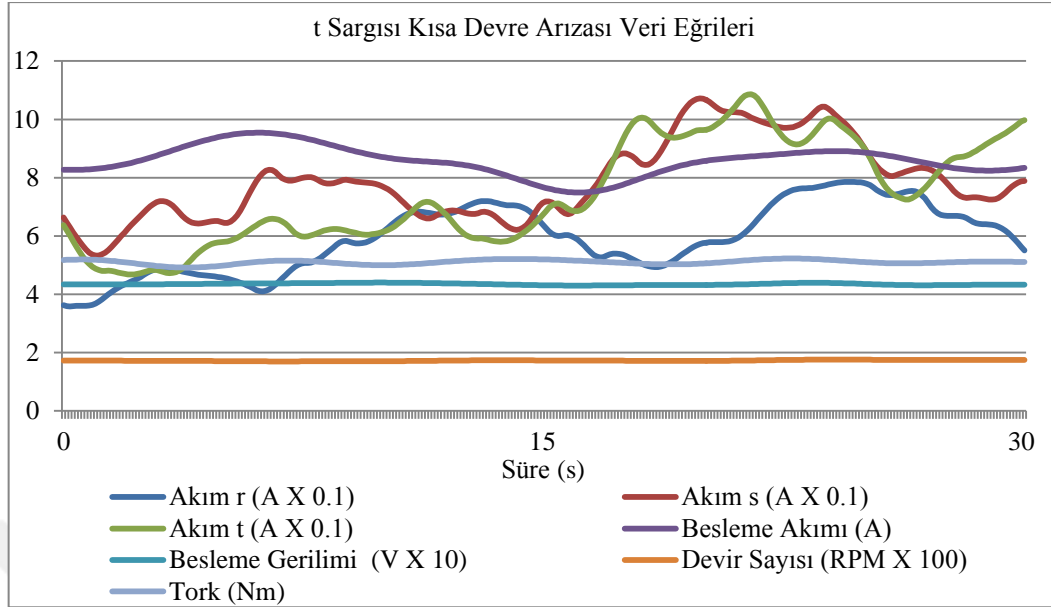
Şekil 4.17. s sargısı kısa devre arızası veri eğrileri grafiği

Motorun torkunda 5,5 Nm civarı değerlere kadar düşüş meydana gelirken, bu durum devir sayısında da 180 RPM seviyelerine kadar düşüşe sebep olmuştur.

4.4.7. t sargısı kısa devre arızası

t sargısının kısa devre arızasını gerçekleştirmek için de, 2 Ω 'luk direnç ile t sargısı kısa devre edilerek Şekil 4.18.'deki t sargısı kısa devre arızası verileri eğrileri grafiği elde edilmiştir. t sargısı kısa devre arızası veri eğrileri grafiğinden de görüldüğü gibi, t fazı akımının, diğer faz akımlarına göre bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi kaynak akımında 8A – 10 A civarında dalgalanan bir değer ile bir miktar artış ve kaynak geriliminde az miktarda bir düşüşün yanında, tork ve devir sayısı verileri de sırasıyla 5,5 Nm ve 180 RPM seviyelerine düşmüştür.

Tek sargı kısa devre arızalarının diğer arıza gruplarından ayırt edilmesini sağlayacak kendine has bir karakteristiği bulunmaktadır. r sargısı, s sargısı ve t sargısı kısa devre arızalarının hepsinde, kaynak akımı normal duruma kıyasla aynı seviyede bir yükselme ve kaynak gerilimi de bu duruma isnaden düşük miktarda bir azalma göstermiştir.



Şekil 4.18. t sargısı kısa devre arızası veri eğrileri grafiği

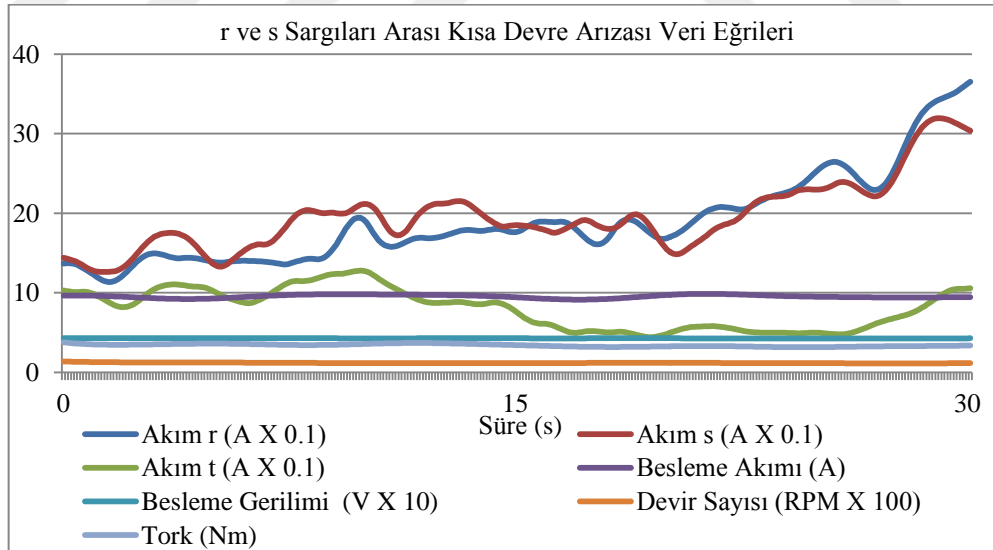
Tork ve devir sayısı değerlerinde de bütün arızalarda özdeş miktarlarda düşüş görülmüştür. Bu veriler, tek sargı kısa devre arızaları grubunun diğer arıza tür veya gruplarında kolaylıkla ayırt edilebilmesini teşhisini sağlamaktadır.

Tek sargı kısa devre arızalarının kendi arasındaki farklılıklar ise r faz akımı, s faz akımı ve t faz akımı değerlerinde görülmektedir. Kısa devre yapan sargıya ait faz akımı değeri diğer iki faz akımı değerine göre nisbi bir artış göstermiştir. Bu durum bu arızanın hangi sargıdaki kısa devre durumundan kaynaklandığının teşhisinin mümkün olabilmesini sağlamıştır.

4.4.8. r ve s sargıları arası kısa devre arızası

Genellikle 3 fazlı olan tekerlek içi elektrik motorlarının, normal dışı bir durum sebebiyle yüksek akım çekme veya sürtünme kaynaklı ısınmasından dolayı, malzeme zaafiyeti veya üretim hatası sebebiyle yalıtım hatalarından kaynaklı oluşabilecek sargılar arası kısa devre arızası, yabancı bir maddenin motora girişi ya da motorun aldığı bir darbe sonucu da gerçekleşebilir.

Tekerlek içi elektrik motorunun gerçekleşmesi muhtemel bu arızasının verilerinin ölçülmesi için bu arıza motorda suni olarak gerçekleştirilmiştir. Bu suni arıza sargılar arasında 4 Ω 'luk bir direnç ile kısa devre yaptırılması ile sağlanmıştır. 4 Ω değerinden daha düşük bir direnç değeri, daha belirgin arıza verilerinin sağlanması ve daha yüksek bir başarı anlamına gelir. Fakat çalışır durumda bu mertebede arıza yapan bir motorun kısa devre akımının miktarı, motorun sigortasını attırıp devreyi açabilir ve arıza teşhisi yapılamamış olabilir. Üstelik arızaların henüz başlangıç seviyelerinde iken, daha az belirtilere sahipken teşhisi, hem kullanıcı açısından, hem ekonomik açıdan, devre dışı kalmaları önlemek için ve motorun sağlığı açısından büyük öneme sahiptir. Bu sebeplerden dolayı 4 Ω 'luk direnç ile suni olarak gerçekleştirilen sargılar arası kısa devre arızasının oluşturduğu akım değerleri, henüz motor için koruma sigortasını attıracak boyutlara gelmemiş, fakat teşhis edilebilir bir seviyeye ulaştığı görülmüş ve bu direnç değeri sargılar arası kısa devre arızası için uygun görülmüştür. Şekil 4.19'da r-s sargıları arası kısa devre arızası veri eğrileri grafiği sunulmuştur.



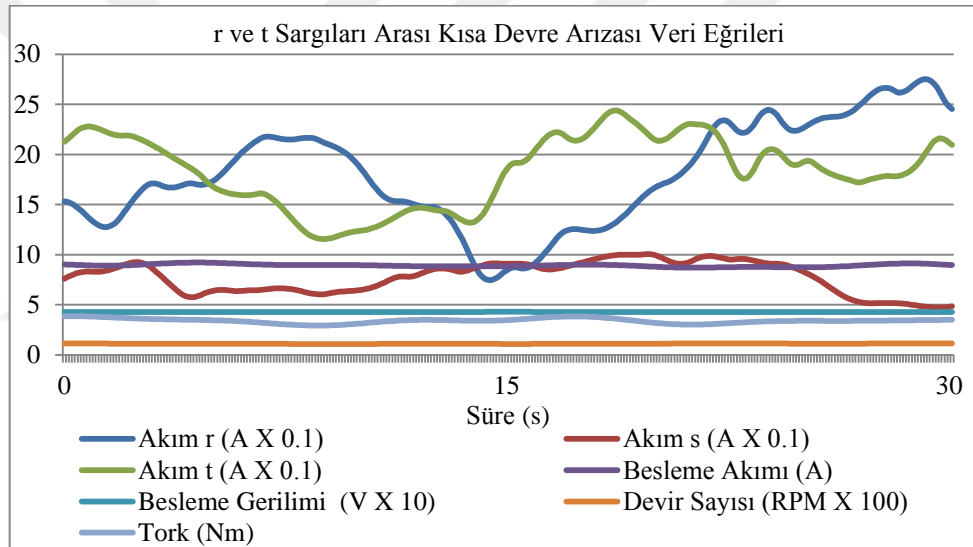
Şekil 4.19. r ve s sargıları arası kısa devre arızası veri eğrileri grafiği

Şekil 4.19.'da görüldüğü üzere, kısa devre durumunda olan r ve s sargılarına ait faz akımları t fazı akımına göre oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. Besleme akımı değerinde, çekilen kısa devre akımının sebep olduğu, 10 A değerine kadar bir

yükseliş gözlemlenirken, buna bağlı olarak besleme gerilimi değerinde az miktarda bir düşüş gözlemlenmiştir. Tork değeri 3 Nm ile oldukça düşük seyrederken, devir sayısı da 110 - 120 RPM ile çok düşük değerlere kadar gerilemiştir.

4.4.9. r ve t sargıları arası kısa devre arızası

r ve t sargıları arasında oluşturulacak kısa devre arızası için de 4 Ω 'luk bir direnç bu iki sargıyı kısa devre edecek şekilde yerleştirilmiştir. Kısa devre durumu sağlandıktan sonra elde edilen ölçümler ışığında Şekil 4.20.'de görülen r ve t sargıları arası kısa devre arızası veri eğrilerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.20. r ve t sargıları arası kısa devre arızası veri eğrileri grafiği

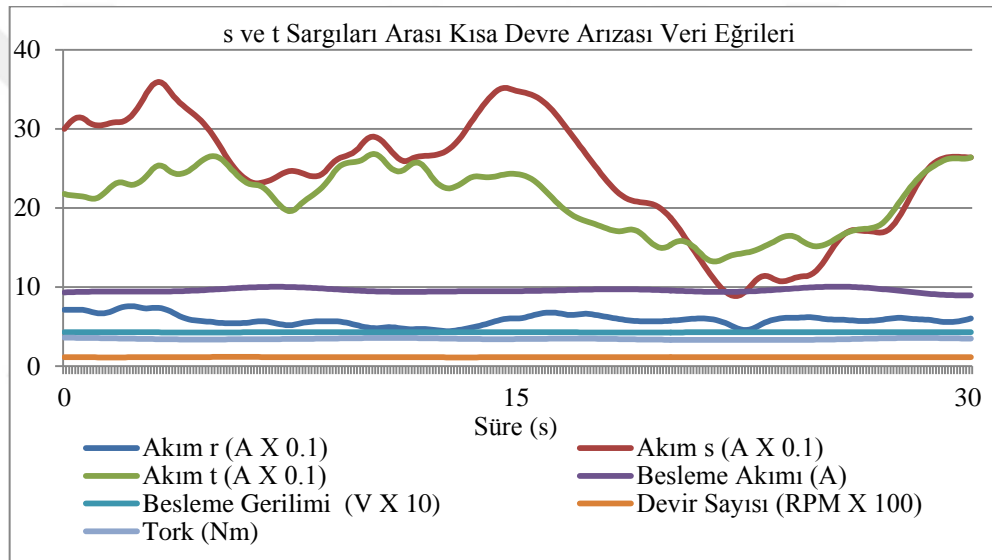
Şekil 4.20.'yi r ve t sargıları arası kısa devre arızası için yorumlayacak olursak. Bu arıza durumu için de kısa devre durumunda olan r ve t sargılarına ait r fazı ve t fazı akımları, s sargısı akımı olan s fazı akımından daha büyük ve birbirine çok yakın değerlerdedir.

Besleme akımında 9 A – 10 A civarı değerler ile gözle görülür miktarda gözlemlenen artış, besleme geriliminde nisbi bir düşüşe neden olmuştur. Tork verisinde 3 Nm ile

net miktarda oluşan düşüş, devir sayısının da 110 – 120 RPM değerlerine kadar bir gerileme gözlemlenmiştir.

4.4.10. s ve t sargıları arası kısa devre arızası

s ve t sargıları arası kısa devre arızasını suni olarak oluşturmak için, diğer sargılar arası kısa devre arızası durumlarında olduğu gibi, 4 Ω 'luk bir kısa devre direnci ile, r ve t sargıları kısa devre edilmiştir. s ve t sargıları arası kısa devre arızasına ait veriler Şekil 4.21.'de görülmektedir.



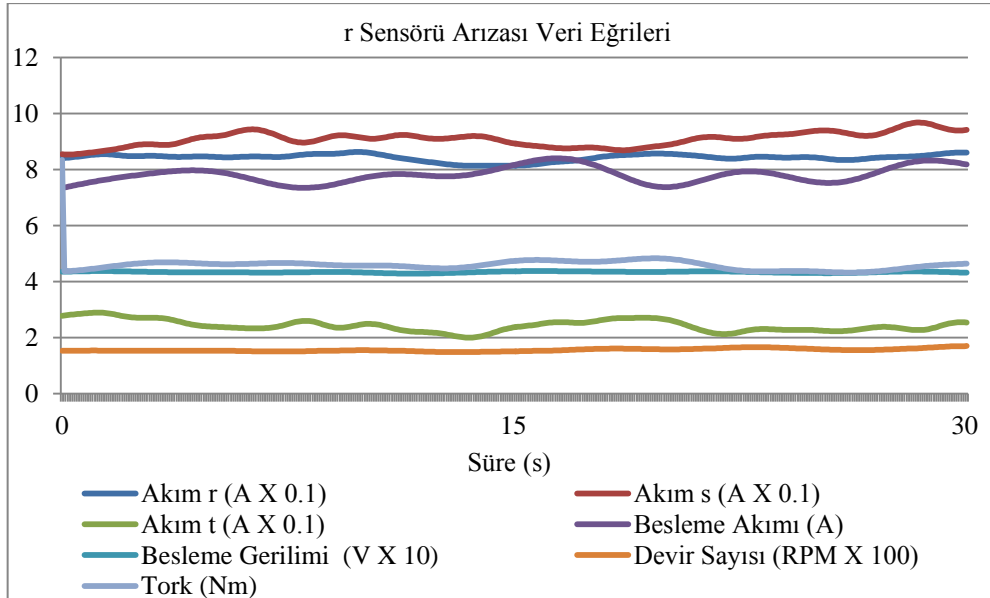
Şekil 4.21. s ve t sargıları arası kısa devre arızası veri eğrileri grafiği

Şekil 4.21.'de de görüldüğü gibi, s ve t sargıları akımları olan r faz akımı ve s faz akımı değerleri, r fazı akımı değerine göre bakıldığında, birbirlerine çok yakın ve yüksek değerlere ulaşmıştır. Beklendiği üzere, besleme akımı miktarında 10 A ile net bir artış ve buna karşılık, besleme gerilimi seviyesinde, güç kaynağına, çekilen kısa devre akımı sebebiyle yüklenilmesinden dolayı bir gerilim düşüşü gözlemlenmiştir. Dengesiz ve güçsüz döner manyetik alan sebebiyle motorun torku 3 Nm değerine kadar düşmüş ve bu da 110 – 120 RPM arası değerler ile düşük seviyede bir devir sayısı verisi elde edilmesine sebebiyet vermiştir.

İki sargı arası kısa devre grubu arızaları, diğer arızalarla besleme akımı, besleme gerilimi, devir sayısı ve tork verileri sayesinde ayırt edilebilirler. Grubun kendi içinde, yani r ve s sargıları arası kısa devre, r ve t sargıları arası kısa devre ve s ve t sargıları arasında kısa devre arızalarının hangisinin oluştuğunun teşhisi ise r fazı, s fazı ve t fazı akımlarının değerlerinin analizi ile gerçekleştirilir. Hangi iki faz arasında kısa devre arızası var ise, bu iki fazın akımı diğer faza göre yüksek ve birbirine çok yakın değerlerde seyreder.

4.4.11. r sensörü arızası

Tekerlek içi elektrik motorunun içinde tetiklemenin sağlanması ve zamanlaması için tetikleme referans sinyallerini gönderen, her bir faz için birer adet bulunan Hall effect sensörlerden birinin arızalanması, o faz için tetiklemenin oluşmamasına ve seri bağlanan sargıların arızalı sensöre ait olanının sürücüde gerçekleşen seri bağlantı durumunun gerçekleşmemesine yol açar. Bu durum tekerlek içi elektrik motorları için muhtemel ve büyük bir arızaya işaret eder. Şekil 4.22.'de görülen r sensörü arızası veri eğrileri grafiği elde edilmiştir.



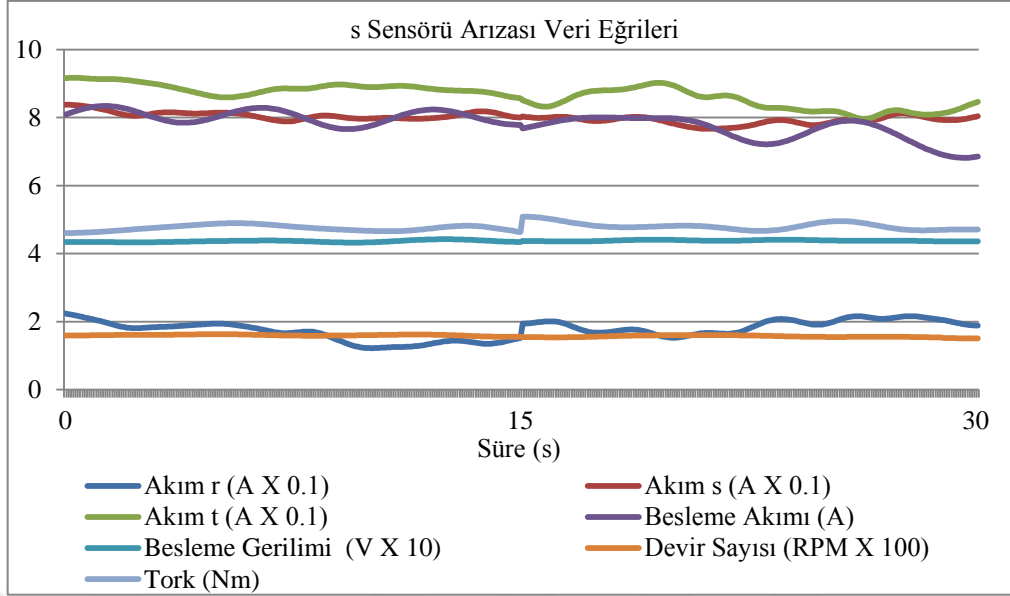
Şekil 4.22. r sensörü arızası veri eğrileri grafiği

r sensörü arızasının verilerinin alınabilmesi, depolanması, veri seti için ve arıza teşhisi için kullanılabilmesi amacıyla r sensörü arızasının motora suni olarak yaptırılması gerekmiştir. Bu arızanın suni olarak gerçekleştirilebilmesi için r sensörünün çalışmaz hale getirilmesi gerekmektedir. Sensöre ait 3 kablodan biri olan sensor veri çıkış kablosu açık devre pozisyonuna getirilmiş ve sensörden veri alışı sağlanamaz hale getirilmiştir. Ardından bu arıza durumuna ait veriler alınmıştır. Şekil 4.22.'de görüldüğü üzere, r sensörü arızası esnasında, r faz akımı ve s faz akımı değerleri gayet yüksek değerlere çıkarken, t fazı akımı değerinde düşüş gözlemlenmektedir. Besleme akımı değerinde 8 A seviyesinde değerler ile bir miktar düşüş görülmekte iken, besleme gerilimi değerinde kayda değer bir değişim meydana gelmemiştir. Bu arıza motorun torkunda 4,5 Nm civarı değerler ile bariz bir düşüşe sebep olmuştur. Devir sayısında da 150 RPM seviyelerine kadar gerileme gözlemlenmiştir.

4.4.12. s sensörü arızası

Tekerlek içi elektrik motorunun s sensörü arızası veri alışının gerçekleştirilebilmesi için, s sensörü arızasının suni olarak gerçekleştirilmesi amacıyla, s sensörünün veri çıkış kablosu açık devre yapılarak sensörün çıkışının sürücüye ulaşmaması sağlanmış ve Şekil 4.23.'te görülen s sensörü arızası veri eğrileri grafiği elde edilmiştir.

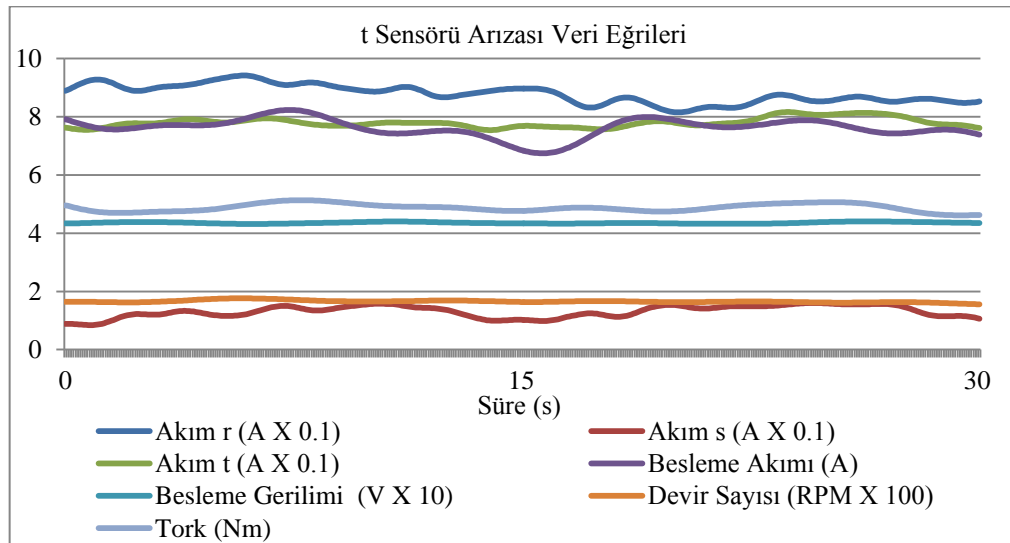
s sensörü arızalarına ilişkin verilerin görülebildiği Şekil 4.23.'ten de anlaşılacağı üzere, s fazı akımı ve t fazı akımı değerlerinde yüksek miktarda artış meydana gelmekte iken, r fazı akımı değerinde düşüş görülmektedir. Besleme akımı değerinde 8 A civarına kadar, az miktarda düşüş gözlemlenirken, besleme gerilimi değerinde anlamlı bir değişime rastlanmamıştır. Motorun torkundaki 4,5 Nm seviyelerinde değerler ile azalma, beklendiği üzere devir sayısının da 150 RPM değerlerine kadar bir düşüşü beraberinde getirmiştir.



Şekil 4.23. s sensörü arızası veri eğrileri grafiği

4.4.13. t sensörü arızası

r ve s sensörü arızası veri eğrilerinin elde edilmesi için tekerlek içi elektrik motorunda gerçekleştirilen suni arıza durumu t sensörü arızası için de aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. t sensörünün veri çıkış kablosu açık devre edilmiş ve t sensörünün çıkışının alınamaması sağlanmıştır. Bu arızaya ait veriler Şekil 4.24.'te verilmiştir.



Şekil 4.24. t sensörü arızası veri eğrileri grafiği

Şekil 4.24.'te görüldüğü üzere, r fazı ve t fazı akım değerleri oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. s fazı akımında bir miktar düşüş kaydedilirken, besleme akımı değerinde 7,5 A ila 8 A arası değerler ile az miktarda düşüş gözlemlenmiştir. Besleme gerilimi değerindeki değişim ihmal edilebilecek miktardadır. Motorun torkunda 5 Nm ile bariz bir düşüş gözlemlenirken, devir sayısı da bir miktar azalmıştır.

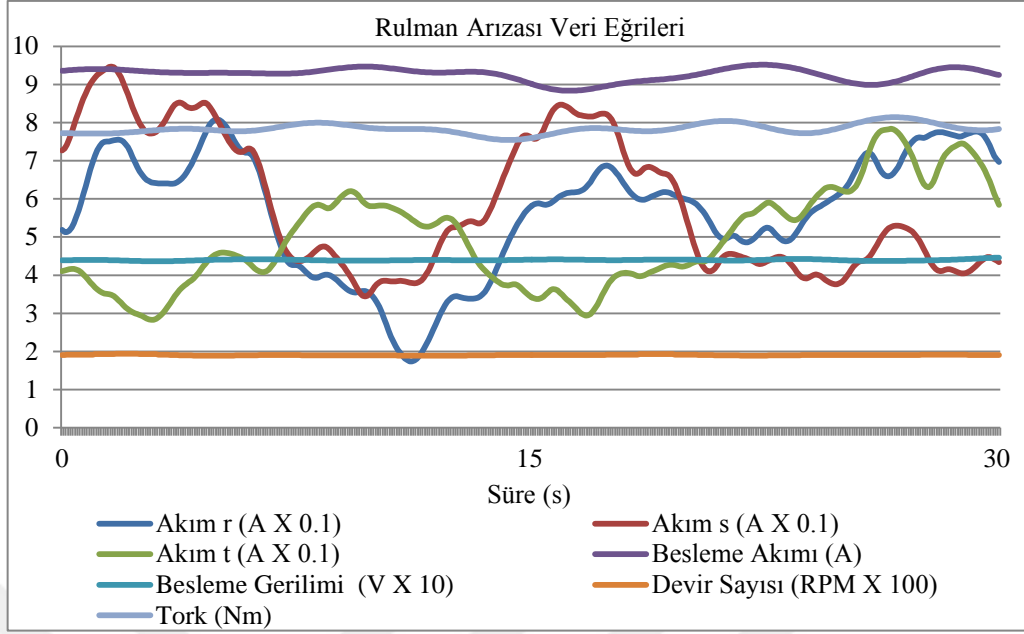
Sensör arızaları grubunun, diğer arızalarla aralarındaki ölçülen değerlerdeki farklılıkların teşhisi aşamasında ön planda olan besleme akımındaki bir miktar düşüş, tork verisindeki düşüş ve devir sayısında azalma olarak kendini göstermektedir. Bu veriler sensör arıza grubu içerisindeki tüm arızalarda farklılık göstermeden aynı değerlerde seyretmektedir.

Sensör arızası grubunun kendi içlerinde hangi sensörün arızalı olduğunun teşhisi için, faz akımları değerlerinde görünen karakteristik ve her üç sensör için de farklı gruplar halinde değişen faz akımı değerleri ön plana çıkmaktadır. Bu sayede sensör arızalarının arıza teşhisi çalışması, arıza teşhisine elverişli verilerin tespine imkan sağlamış ve başarıya ulaşmıştır.

4.4.14. Rulman arızası

Tekerlek içi elektrik motorunun rulman arızası verilerinin elde edilmesi için motorun rulman arızası suni olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için motorun çalışır ve sağlam durumdaki rulmanı sökölüp, yerine yıpranmış ve arızalı bir rulman takılmıştır.

Elde edilen veri eğrisi grafiği Şekil 4.25.'te görülmektedir. Şekil 4.25.'te de görüldüğü gibi, besleme akımı değerinde 9 A – 10 A arası değerler ile bir miktar artış gözlemlenmiştir. Besleme gerilimi değerinde net bir değişim görülmezken, tork değerinde de 7,5 Nm ila 8 Nm değerleri arasına gerileme görülmüştür.



Şekil 4.25. Rulman arızası veri eğrileri grafiği

r fazı, s fazı ve t fazı akımlarının nisbeten yüksek ve dalgalı bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. Rulman arızası, beklenen karakteristiğine uygun olarak, motorun dönüşünde düzensizlik ve zorlanma gözlemlenirken, devir sayısında 190 – 195 RPM ile bir miktar düşüş ile kendini göstermiştir. Elde edilen kendine has karakteristiği ile rulman arızalarının teşhisinin de mümkün olduğu görülmüştür.

BÖLÜM 5. TEKERLEK İÇİ ELEKTRİK MOTORLARINDA YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE ARIZA TEŞHİSİ

Tekerlek içi elektrik motorlarının yapay zeka teknikleri ile arıza teşhisi için öncelikle muhtemel arızalarının tespiti yapılmıştır. Tespit edilen arızalarla ilgili veri seti oluşturulmuştur. Arıza teşhisi ile ilgili ön analiz yapıldıktan sonra, çalışmada bu arızaların başarılı bir şekilde teşhis edilebilmesi için yapay zeka teknikleri ile veri setlerinin entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi için farklı yapay zeka teknikleri kullanılarak, yapay zeka tekniklerinin hangisinin tekerlek içi elektrik motorlarının arıza teşhisine uygun olduğuna karar verebilmek için başarı oranları karşılaştırılmıştır.

5.1. Yapay Zeka Tekniklerinin Entegrasyonu

Farklı yapay zeka tekniklerinin, aynı sisteme ait aynı veri seti için başarımları farklı olabilir. Bütün yapay zeka teknikleri, aynı format veya aynı değişken sayısı ile en iyi performansı göstermezler. Uygulanan yapay zeka tekniklerinin tümü, Matlab programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

5.1.1. Bulanık mantık yöntemi ile arıza teşhisi

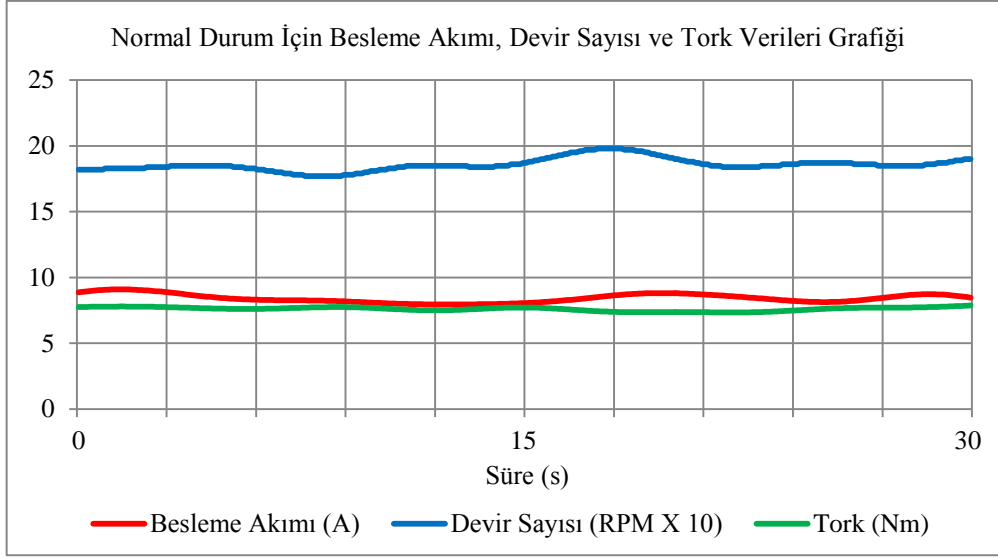
Bulanık mantık yöntemi ile arıza teşhisi sisteminin tasarımı esnasında performansı doğrudan etkileyen, üyelik fonksiyonlarının ve değişkenlerin belirlenmesi işlemleri için motorla ve arızalarla ilgili tecrübelerin ve önceden gerçekleştirilmiş ölçümlerin önemi büyüktür. Motordan besleme gerilimi, besleme akımı, r fazı akımı, s fazı akımı, t fazı akımı, tork, devir sayısı ve sıcaklık farkı olmak üzere 8 adet veri alınmıştır. Motorun dış ve iç sıcaklıklarının ölçülerek farkının kaydedildiği sıcaklık farkı verisi hızlı ve anlamlı sonuç alınamayan, kısa zaman içinde tutarlı olamayan bir

veri olarak gözlemlendiği için sıcaklık farkı verisi kullanılmamış ve 7 adet veri ile çalışılma gerçekleştirilmiştir.

7 ayrı veri ile motorun 13'ü arıza ve 1'i normal durum olmak üzere 14 ayrı durumunu teşhis edebilmek mümkündür. Fakat daha az sayıda veriyi yorumlayan ve sonuca ulaşan bir arıza teşhisi sistemi için uygun yöntemin bulanık mantık yöntemi olduğuna karar verilmiştir. Bulanık mantık yönteminin bulanık çıkarım metodu olarak, Mamdani tipi bulanık çıkarım metodu seçilmiştir.

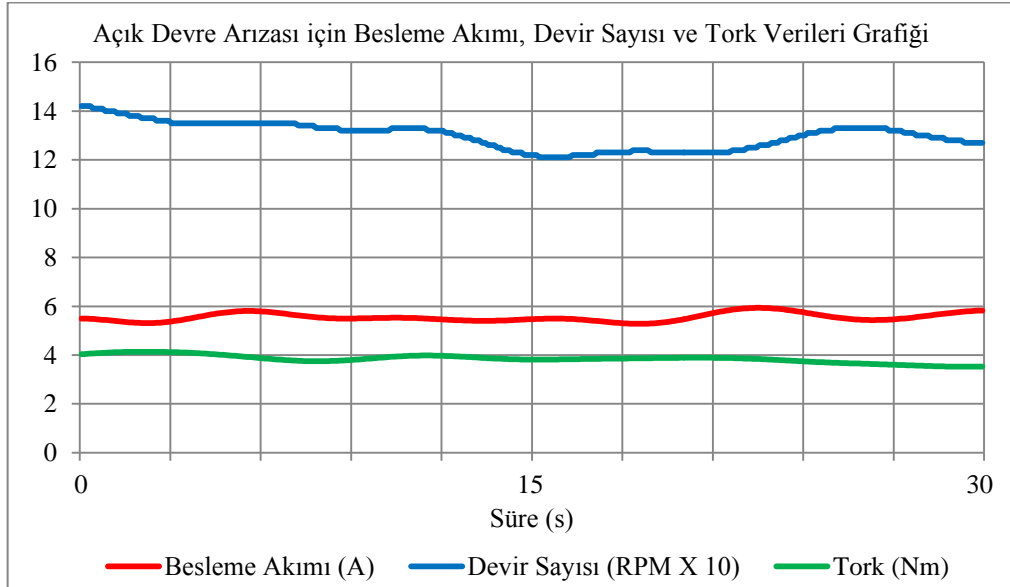
Motorun r sargısı açık devre arızası, s sargısı açık devre arızası ve t sargısı açık devre arızası durumları bir arada “açık devre arızası” olarak, r sargısı kısa devre arızası, s sargısı kısa devre arızası ve t sargısı kısa devre arızası durumları bir arada “bir sargı kısa devre arızası” olarak, r-s sargıları arası kısa devre arızası, r-t sargıları arası kısa devre arızası ve s-t sargıları arası kısa devre arızası durumları bir arada “sargılar arası kısa devre arızası” olarak, r sensörü arızası, s sensörü arızası ve t sensörü arızası durumları bir arada “sensör arızası” olarak ele alınmıştır. Bahsedilen muhtemel durumlardan olan, rulman arızası ve normal durum da istenilen çıkışlara dahil edildiğinde, tekerlek içi elektrik motorları ve elektrik makineleri ile ilgili tecrübeler ve ölçümlerden de faydalanarak arızaların genel teşhisinde ön planda olan besleme akımı, devir sayısı ve tork verilerinin bulanık mantık ile arıza teşhisi için uygun ve başarılı olacağına karar verilmiştir. Bu amaçla, bulanık mantık için muhtemel durumlara ait veri setleri hazırlanmıştır.

Şekil 5.1.'de bulanık mantık yöntemi için kullanılmak üzere, besleme akımı, tork ve devir sayısı verilerini içeren, motorun normal durumuna ait veri eğrileri grafiği görülmektedir. Şekil 5.1.'de görülen veri grafikleri, tez çalışmasındaki diğer veriler gibi, motorun yarım yüklü durumunda elde edilmiştir. Devir sayısının 190-200 RPM civarında olduğu görülmüştür.



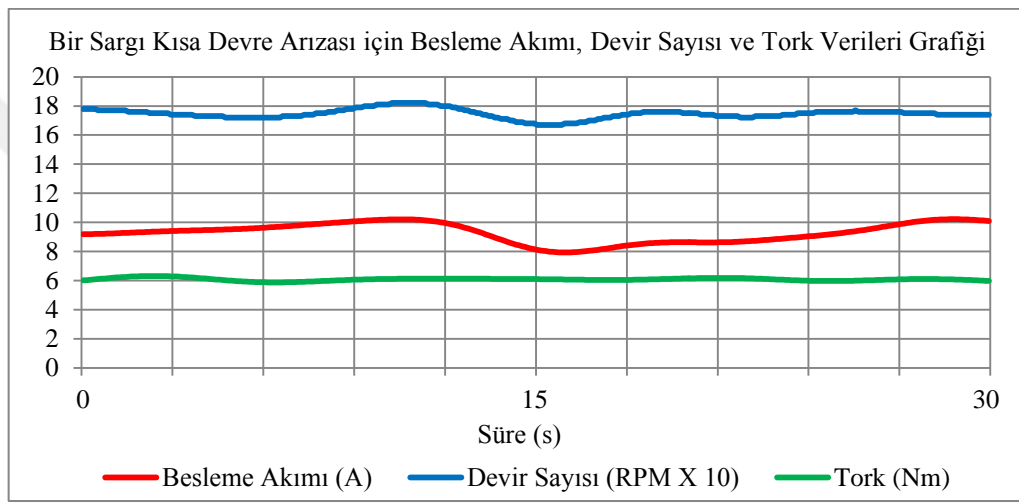
Şekil 5.1. Normal durum için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği (Şimşir ve ark., 2016b)

Besleme akımının 8 A – 9 A aralığında, tork verisinin de kendi içinde tutarlı ve 7,5 Nm – 8 Nm arasındaki değerler ile stabil bir genel profile sahip olduğu görülmüştür. Şekil 5.2.'de açık devre arızası için besleme akımı, devir sayısı ve tork verileri grafiği yer almaktadır.



Şekil 5.2. Açık devre arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği (Şimşir ve ark., 2016b)

Şekil 5.2.'de görüldüğü üzere, açık devre arızası durumunda, normal duruma kıyasla devir sayısı, tork ve besleme akımı değerlerinde bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Normal durumda 8 Nm civarında olan tork değeri, motorda beklenen döner manyetik alan düşüşü ve dengesizliği sebebiyle bir düzensizlik ve bariz bir düşüş ile 4 Nm'ye kadar gerilemiştir. Normal koşulda 8 A civarında olan besleme akımında 5 A - 6 A'ye kadar, gözle görülür bir düşme görülmüştür. Normal durumda 190 – 200 RPM arasında dönüş hızına sahip motorun r sargısı açık devre arızasında devir sayısı 130-140 RPM civarı değerlere kadar gerilemiştir.

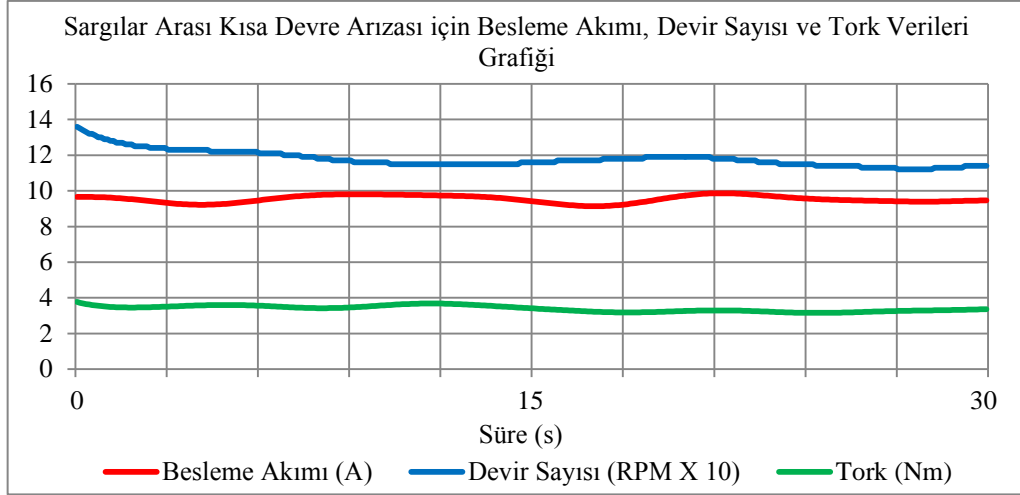


Şekil 5.3. Bir sargı kısa devre arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği (Şimşir ve ark., 2016b)

Şekil 5.3.'te görülen bir sargı kısa devre arızası karakteristiği için besleme akımı ve devir sayısı değerlerindeki değişimlerin en net olanı tork verisindeki düşüş olarak tespit edilmiştir. Kaynak akımında 8 A ila 10 A arasındaki değerlere kadar artış görülmüştür.

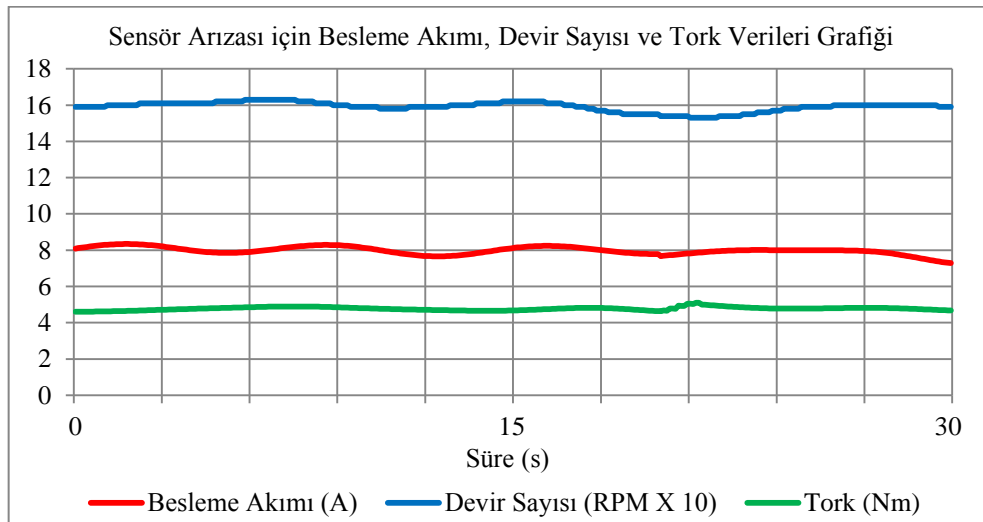
Döner manyetik alanda oluşan dengesizlik ve zayıflama nedeniyle beklendiği üzere motorun torku düşüş göstererek 6 Nm değerine gerilemiştir. Motorun devir sayısı bir miktar azalış ile 180 RPM seviyelerinde kendini göstermiştir.

Şekil 5.4.'te sargılar arası kısa devre arızası verileri grafiği görülmektedir.



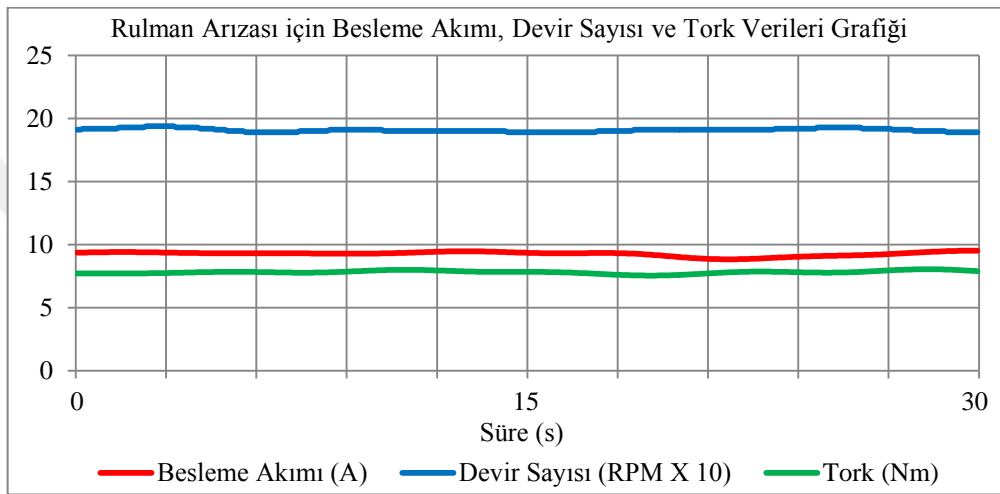
Şekil 5.4. Sargılar arası kısa devre arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği (Şimşir ve ark., 2016b)

Şekil 5.4.'te görülen sargılar arası kısa devre arızasında ise besleme akımındaki artışın yanında, devir sayısı ve tork verilerinde, düzensiz manyetik alan sebebiyle düşüş gerçekleşmiştir. Besleme akımı değerinde, çekilen kısa devre akımının sebep olduğu, 10 A değerine kadar bir yükseliş gözlemlenmiştir. Tork değeri 3 Nm civarında, oldukça düşük seyrederken, devir sayısı da 120 RPM ile çok düşük değerlere kadar gerilemiştir. Şekil 5.5.'te sensör arızası için besleme akımı, devir sayısı ve tork verileri grafiği görülmektedir.



Şekil 5.5. Sensör arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği (Şimşir ve ark., 2016b)

Şekil 5.5.'te görülen sensör arızası için besleme akımı, devir sayısı ve tork verileri grafiğinde görüldüğü gibi, besleme akımı, dolayısıyla devir sayısı ve tork verisinde düşüş meydana gelmiştir. Besleme akımı değerinde 8 A seviyesinde değerler ile bir miktar düşüş görülmekte iken, bu arıza motorun torkunda 4,5 Nm civarı değerlere kadar tork düşüşüne sebep olmuştur. Devir sayısında da 160 RPM seviyelerine kadar gerileme gözlemlenmiştir. Şekil 5.6.'da rulman arızası için besleme akımı devir sayısı ve tork verileri grafiği görülmektedir.

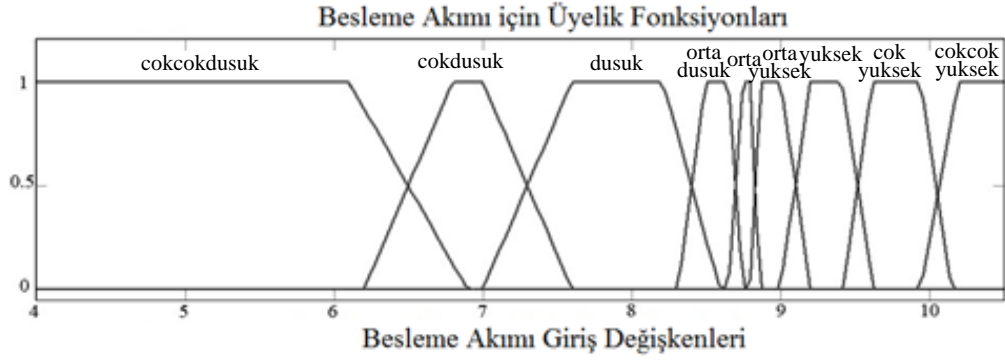


Şekil 5.6. Rulman arızası için besleme akımı, devir sayısı, tork verileri grafiği (Şimşir ve ark., 2016b)

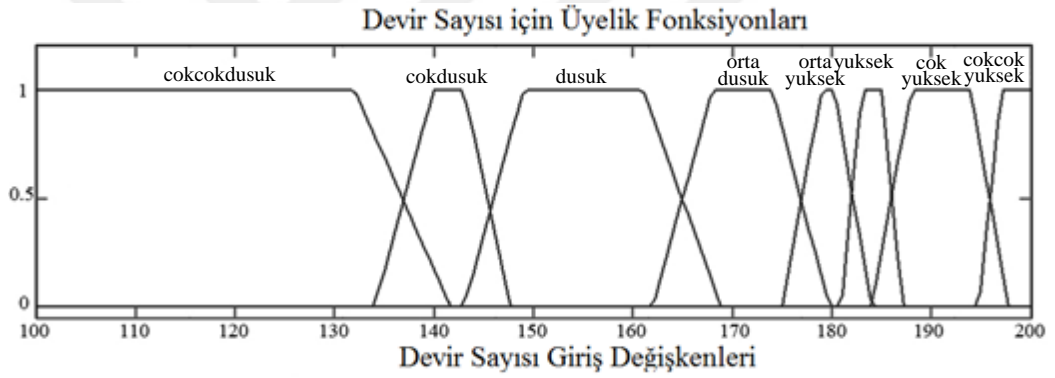
Şekil 5.6.'da görülen rulman arızaları için besleme akımı, devir sayısı ve tork verileri grafiğinde besleme akımında bir miktar yükseliş ve tork ile devir sayısı verilerinde ise az miktarda düşüş gözlemlenmiştir. Besleme akımı değerinde 9 A – 10 A arası değerlere kadar artış gözlemlenmiştir. Tork değerinde 7,5 Nm ila 8 Nm değerleri arasına gerileme görülmüştür. Rulman arızasında, beklenen karakteristiğine uygun olarak, motorun dönüşünde düzensizlik ve zorlanma gözlemlenirken, devir sayısında 190 RPM civarı değerlere kadar düşme olmuştur.

Elektrik motorları ve özellikle tekerlek içi elektrik motorları ve bulanık mantık ile ilgili tecrübeler, motorun muhtemel arızaları ve normal durumuna ait kullanılacak veriler ile harmanlanıp analiz edilerek, giriş değişkenleri ve çıkışlarla ilgili üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Şekil 5.7.-5.10.'da arıza teşhisi için bulanık mantık

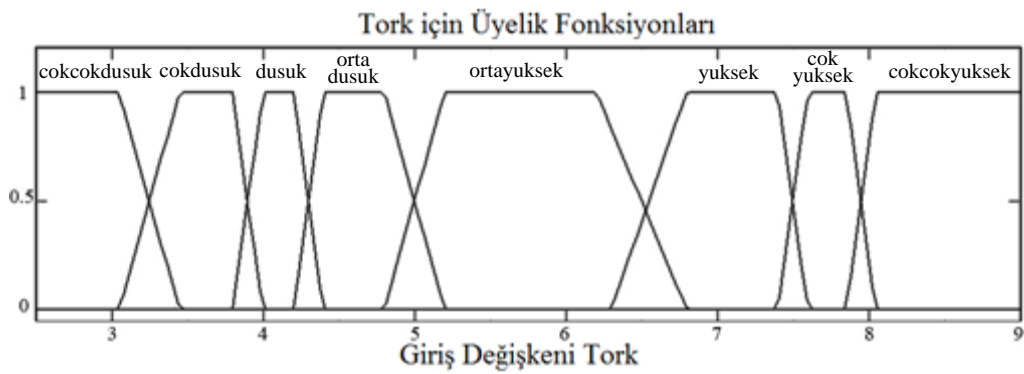
denetleyicisine ait, besleme akımı, devir sayısı ve tork olarak giriş değişkenleri ve çıkışlara ait üyelik fonksiyonları görülmektedir.



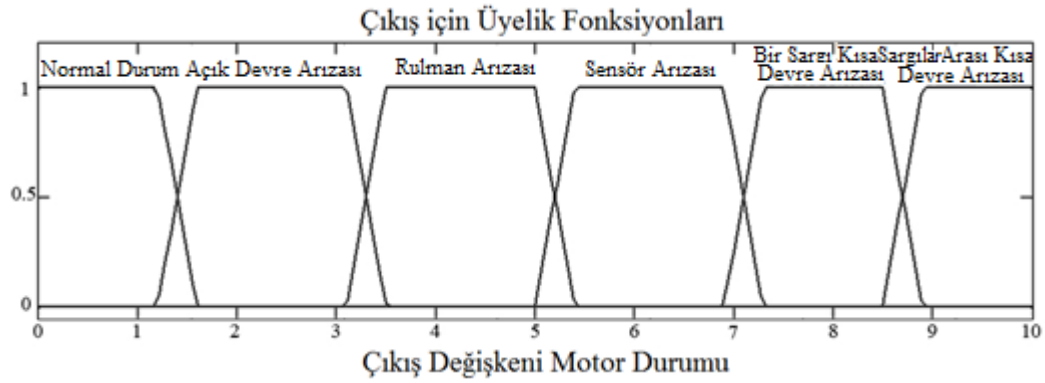
Şekil 5.7. Besleme akımı için üyelik fonksiyonları (Şimşir ve ark., 2016b)



Şekil 5.8. Devir sayısı için üyelik fonksiyonları (Şimşir ve ark., 2016b)



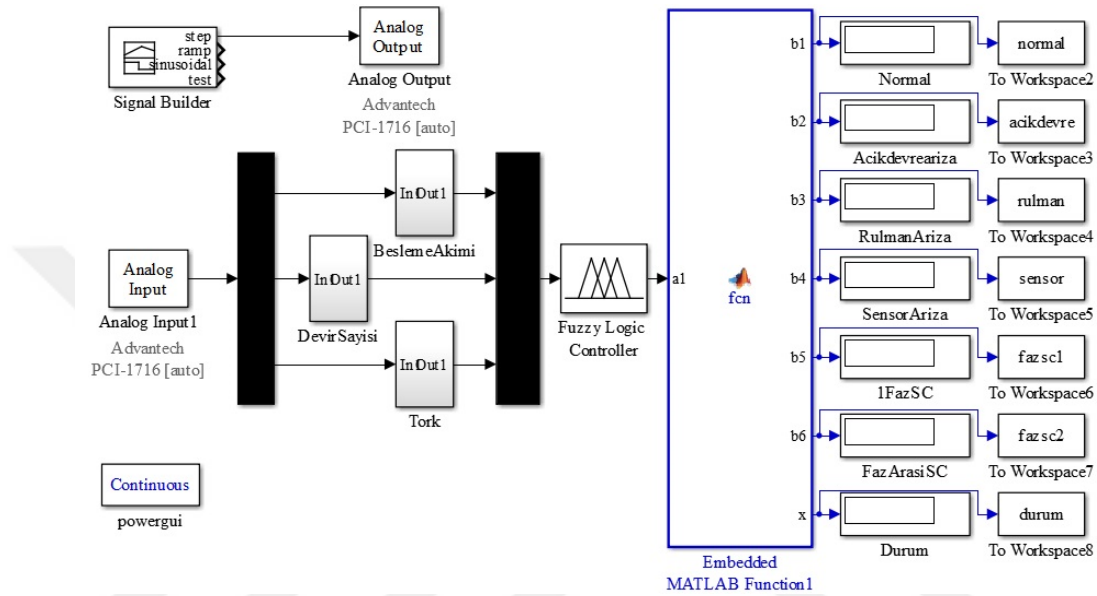
Şekil 5.9. Tork için üyelik fonksiyonları (Şimşir ve ark., 2016b)



Şekil 5.10. Bulanık mantık sınıflandırıcısının çıkışı için üyelik fonksiyonları (Şimşir ve ark., 2016b)

Şekil 5.7.- 5.10.'da görüldüğü gibi, üyelik fonksiyonu yapısı için yamuk fonksiyon şekli kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonları hazırlanırken, giriş değişkeni parametreleri, değer mertebeleri ve çıkış değerleri göz önünde bulundurularak, bir sınır sınıflandırması yapılmıştır. Üyelik fonksiyonları sayısı, değişken ve ezber olmayan, fonksiyonel ve her değişken için kendine has yapıda oluşturulmuştur. Çıkış değerleri için üyelik fonksiyonları sayısı ve sınırları ise teşhis edilecek arızalar ve normal durum değerleri sayısınca ve sınırları içerisinde belirlenmiştir. Giriş değişkenlerinin ve çıkışın üyelik fonksiyonlarının birbiri ile ilişkilendirilmesi, bütün girişler ile, teşhis edilebilecek bütün çıkışların üyelik fonksiyonları için 66 adet kural yazılarak sağlanmıştır. Ölçülen giriş değişkenleri ve çıkışlar için, var olan 6 ayrı durum ve giriş kademeleri, kendi aralarında durumlar halinde gruplanmış, birbirleri ile kopuk ve mesafeli bir yapıya sahiptirler. Bu durum üyelik fonksiyonlarının kolay gruplanıp birbirleri ile ayrıştırılarak oluşturulabilmesini sağlamıştır. Giriş değişkenlerine ve çıkışa ait üyelik fonksiyonları arasındaki kesişim bölgeleri, bahsedilen arada kalan ve 6 ayrı durum içerisinde değişkenlerin konfigürasyonları ve çıkış durumları ile eşleşmeyen kesimlere rastlanmaktadır. Ölçümler sırasında bu kesişim bölgelerine rastlanmamıştır. Kesişim bölgeleri, durumlar arasında birden çok arızanın aynı anda gerçekleşmesi gibi düşük ihtimale sahip durumlar dahilinde rastlanabilir bölgelerdir. Eğer daha önce karşılaşılmayan şekilde bu kesişim bölgelerinde bir sonuç oluşursa, çıkış kararlı olarak bir üyelik fonksiyonuna işaret edemeyecek ve kararsız olarak adlandırılacaktır. Şekil 5.11.'de Matlab Simulink'te oluşturulmuş, gerçek zamanlı arıza teşhisi yapan, bulanık mantık sınıflandırıcılı bir sistem görülmektedir.

Bulanık mantık sınıflandırıcı içeren gerçek zamanlı arıza teşhisi sisteminde Advantech veri alış kartının analog çıkışı, sinyal üretici tarafından üretilen referans sinyali takip ederek motora sürüş için bir gerilim seviyesi uygulamaktadır. Bu referans sinyal bir tampon devre ile motorun potansiyometresi yerine bağlanmış ve motora bu gerilimin etkin değeri uygulanmıştır.

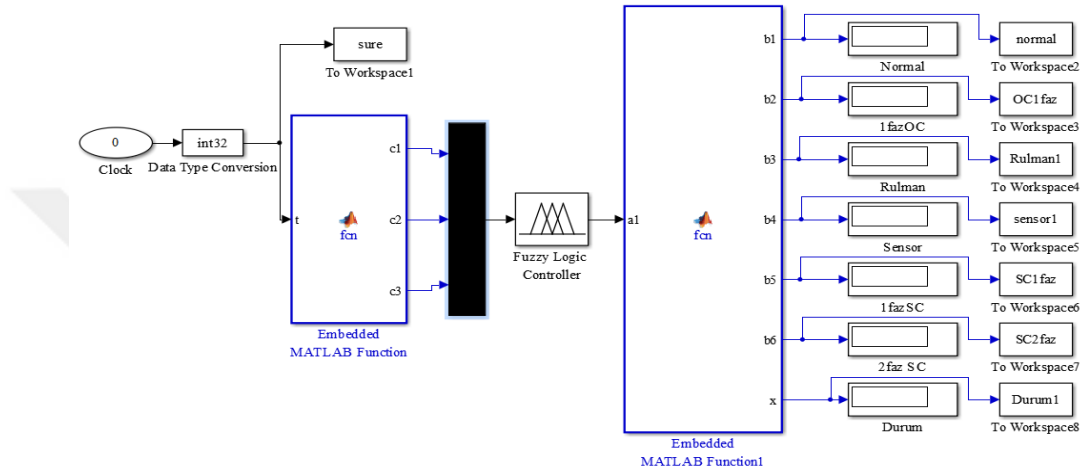


Şekil 5.11. Bulanık mantık sınıflandırıcısı içeren gerçek zamanlı arıza teşhisi sistemi

Motordan veriler gerçek zamanlı olarak Advantech veri alış kartı ile okunup, uygun değerler haline getirilerek tasarlanan bulanık mantık sınıflandırıcıya gönderilmektedir. Analog giriş ile bulanık mantık denetleyici arasında bulunan “BeslemeAkimi”, “DevirSayisi” ve “Tork” blokları birer üst sistem başlığıdır. Alt sistemlerde, veri alış kartı ile okunan analog gerilim seviyeleri, gerçek veriler referans alınarak optimize edilmiş hesaplanan katsayılarla çarpılıp, ortalama değerleri alınmış, alçak geçiren filtrelerle gürültüleri azaltılmıştır. Ayrıca devir sayısı ve tork verilerine, osilasyon ve bazı anlık değerlerle gerçekte var olmayan negatif bir değere gitmesinler diye gömülü bir Matlab fonksiyonu yazılmıştır. Devir sayısı verisi sadece tam sayıların görülmesi için tam sayıya yuvarlanmıştır. Alt sistemlerle uygun hale getirilmiş veriler tasarlanan bulanık mantık denetleyiciye uygulanmıştır. Çıkışta gömülü bir Matlab fonksiyonu ile, bulanık mantık sınıflandırıcının, çıkış üyelik

fonksiyonları yardımıyla tespit ettiği değer aralığına uygun çıkış ifadesi 1 olarak atanmış ve Matlab Workspace'e gönderilmiştir.

Şekil 5.12.'de bulanık mantık sınıflandırıcı içeren arıza teşhisi sisteminin önceden elde edilmiş veri setleri ile test edilip daha güvenilir bir başarı yüzdesi elde edebilmek için tasarlanmış bir sistem görülmektedir.



Şekil 5.12. Bulanık Mantık sınıflandırıcı arıza teşhisi sisteminin başarı testi için tasarlanmış Matlab Simulink modeli

Şekil 5.12.'de görülen Matlab Simulink model, tekerlek içi elektrik motorundan alınan ve kaydedilen çok sayıda verinin arıza teşhisi için tasarlanan bulanık mantık sınıflandırıcı test sistemi, Matlab workspace'e giriş ve çıkış olarak tanımlanan verilerden giriş olanları, sisteme uygular.

Elde edilen sistem çıkışlarını, tanımlanmış sistem çıkışları ile karşılaştırıp, başarı yüzdesini çıkış olarak verir. Sol taraftaki "Embedded Matlab Function" (gömülü Matlab fonksiyonu) ile 5000 adet test verisi sırasıyla bulanık mantık Denetleyicisine uygulanmıştır. Sağ taraftaki gömülü Matlab fonksiyonu da elde edilen en muhtemel sonucu çıkışa tek çıkış olarak aktaran bir fonksiyondur. Bu sayede anlık olarak çıkışlar görülmekte ve elde edilen çıkışlar sıra ile Matlab workspace'e kaydedilmiştir. Tablo 5.1.'de bulanık mantık ile arıza teşhisi çalışmasının sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Bulanık mantık yöntemi ile arıza teşhisi çalışmasının sonuçları

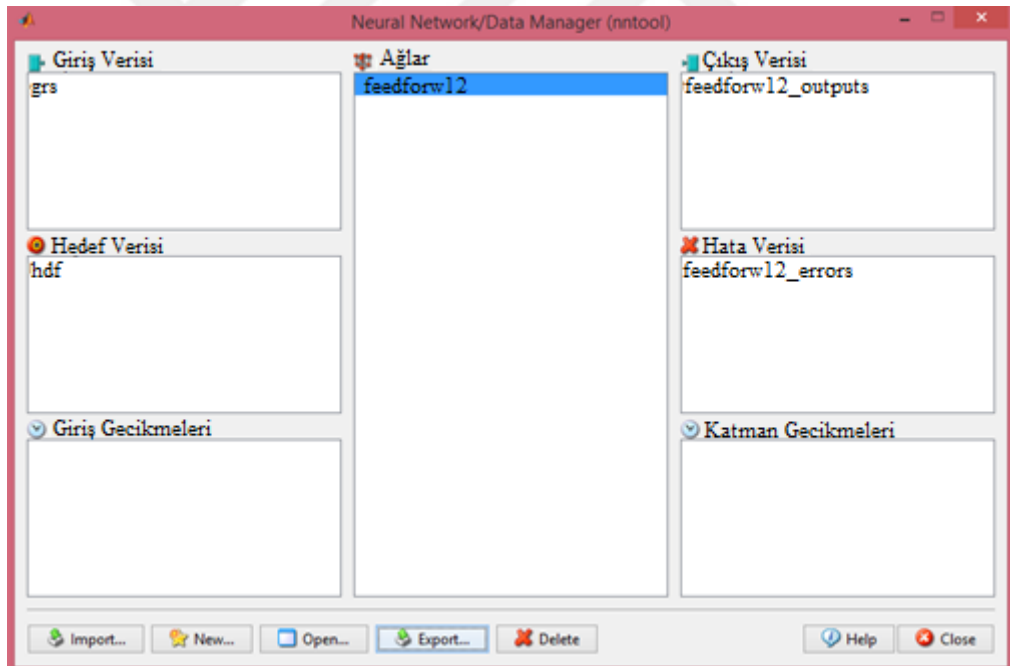
Yöntem	Test Sayısı	Başarılı Sonuç	Başarısız Sonuç	Başarı Yüzdesi
Bulanık Mantık	5000	4956	44	%99,12

Sistem bütün girişlere ait çıkışları kaydettikten sonra, Matlab’da kodlanmış bir karşılaştırma algoritması içeren bir m-file ile, olması gereken çıkışlar ile test sırasında elde edilen çıkışlar, 1000 adet normal durum, 800 adet açık devre, 800 adet 1 sargı kısa devre, 800 adet sargılar arası kısa devre, 800 adet sensör arızası, 800 adet rulman arızası olmak üzere 5000 adet test verisi ile karşılaştırılmış ve çıkış olarak doğru ve yanlış sayıları ile yüzdelik başarı elde edilmiştir. Testte yanlış teşhisler normal durum, açık devre ve sensör arızası durumlarında gerçekleşmiştir. Normal durumun, motor henüz yüklenmişken kararlı hale geçme esnasında alınan verilerin rulman arızaları verileri ile benzerliği sebebi ile rulman arızası şeklinde ve rulman arızası durumlarının küçük bir kısmında, kullanılan rulmanın hasar durumunun çok yüksek olmaması sebebi ile anlık olarak normal durum şeklinde nadiren yanlış teşhisler oluşabildiği gözlemlenmiştir. Açık devre arızası ile sensör arızası durumları arası az miktarda görülebilen veri benzerliği sebebi ile nadiren karşılıklı yanlış teşhisler oluşabildiği kararına varılmıştır. Test sonucunda bulanık mantık denetleyici gömülü arıza teşhisi sistemi, 4956 doğru sonuç ile % 99,12 başarı elde edilmiştir (Şimşir ve ark., 2016b).

5.1.2. İleri beslemeli yapay sinir ağları ile arıza teşhisi

Tekerlek içi elektrik motorlarının gerçek zamanlı arıza teşhisi çalışması için en uygun yapay zeka tekniğinin tespit edilmesi amacıyla ileri beslemeli yapay sinir ağları da denenmiştir. İleri beslemeli yapay sinir ağları, motor verilerinin örnek teşkil eden bir veri seti yardımıyla uzman bilgilerinin öğrenilmesi ile motor arıza teşhisini gerçekleştirmek amacıyla eğitilebilirler (Chow, 1997). Bu durum göz önünde bulundurulduğunda ileri beslemeli yapay sinir ağları motor arıza teşhisi çalışması için tercih edilmiştir (Şimşir ve ark., 2016a).

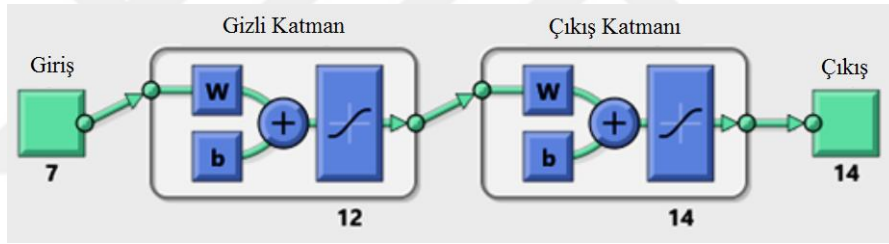
Kullanılan yapay sinir ağı modeli, Matlab Neural Network Toolbox'ta modellenmiş İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağıdır. Yapay sinir ağlarının eğitim ve başarımlarını testi için kullanılan, tekerlek içi elektrik motorunun arızaları ve normal durumu verilerini içeren 5200 örnek setli veri seti kullanılmıştır. Bu veri setinin %80'i veri setinin eğitimi için kullanılmıştır. Kullanılan 5200 örneklili veri setinin yapay sinir ağının eğitimi için ayrılan % 80'ini oluşturan 4160 örneklili veri seti "giriş" olarak, ve doğru çıkışları içeren "hedef" verileri birer m-file olarak Matlab workspace'e tanımlanmıştır. Bahsedilen 4160 örneklili veri seti, 5200 örneklili bütün verilerden homojen olarak ayrılmış, bütün durumlar için özdeş yüzdelikler ve özdeş aralıklarla rastgele seçilip ağın eğitimi için eğitim veri seti oluşturulmuştur. Şekil 5.13.'te yapay sinir ağının oluşturulması için kullanılan Matlab nntool data manager görülmektedir.



Şekil 5.13. Matlab nntool Neural Network Data Manager

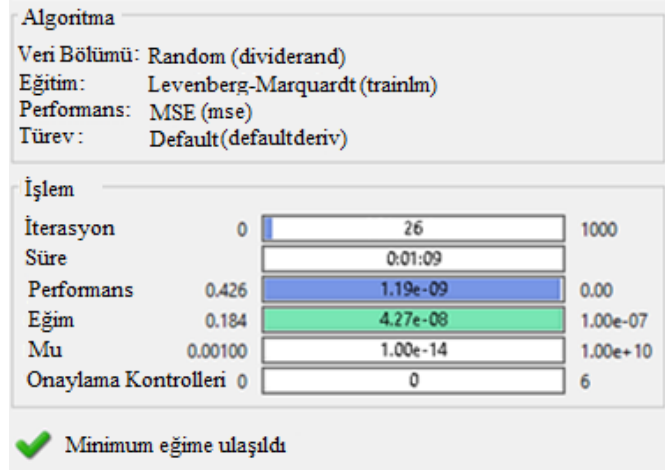
Matlab nntool açıldığında giriş verileri olarak workspace'e tanımlanmış "grs" verileri ve hedef verileri olarak da yine workspace'den "hdf" verileri seçilmiştir. Data Manager ile ağın oluşturulması sağlanmıştır.

Yapay sinir ağının eğitimi için, ağ eğitim algoritmaları arasında kararlı ve hızlı olmasıyla ön plana çıkan Levenberg-Marquardt ağ eğitim algoritması seçilmiştir. Makul ve değişik nöron sayıları seçilerek bu nöron sayıları ile oluşturulmuş ağların eğitim verileri testinin sonuçlarının değerlendirilmesi ile, gizli katman'da (hidden layer) 12 nöronu bulunan ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağının en yüksek performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Muhtemel daha başarılı ağ oluşumları ihtimali göz ardı edilmemiştir. 12 nörona yakın alt ve üst sayıda ağlar da test edilmiş, 12 nöron sayısının çok daha üst ve çok daha alt nöron sayısı grupları da ele alınarak çok detaylı ve ayrıntılı denemeler sonucu elde edilen en iyi eğitim verileri testi performansı sergileyen 12 nöronlu ağ ile eğitim verileri içinde bulunmayan test verileri testleri de yapılmıştır. Şekil 5.14.'te oluşturulan en başarılı nöron sayısı kombinasyonuna sahip ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağının Matlab nntool yapısı görülmektedir.



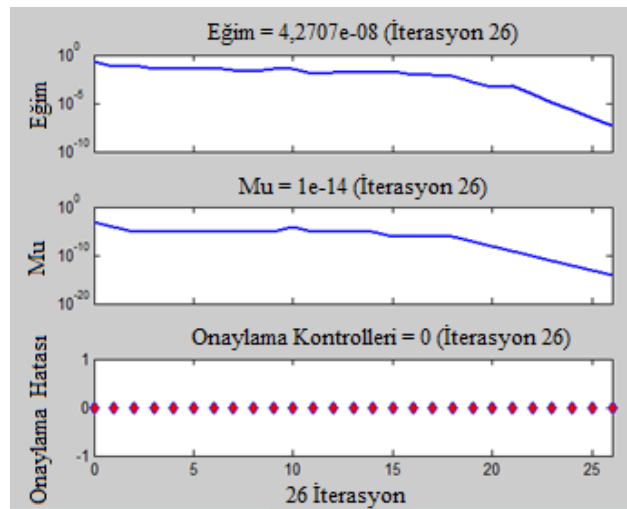
Şekil 5.14. Problem için tespit edilen en başarılı ileri beslemeli yapay sinir ağının Matlab nntool yapısı

Şekil 5.14.'te görüldüğü üzere, 7 adet giriş parametresi içeren ağın gizli katmanında en başarılı gizli katman nöron sayısı olarak tespit edildiğinden 12 nöron bulunmaktadır. 7 giriş parametresi besleme gerilimi, besleme akımı, r, s ve t fazı akımları, devir sayısı ve torktur. Çıkış katmanı motorun muhtemel 14 çıkış durumunu temsil eden 14 nöronlu ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı, Matlab nntool'un varsayılan bir adet gizli katmanlı yapısına sahiptir. Çıkışlar olarak belirtilen 14 durum ise, r, s ve t fazları için ayrı ayrı kısa devre, açık devre ve sensor arızaları arızaları, fazların ikili gruplar arası, toplam 3 adet fazlar arası kısa devre arızaları ve rulman arızası'dır. Şekil 5.15.'te Matlab nntoolbox, nntraintool vasıtasıyla ağın eğitim aşamasının ekran görüntüsü sunulmuştur.



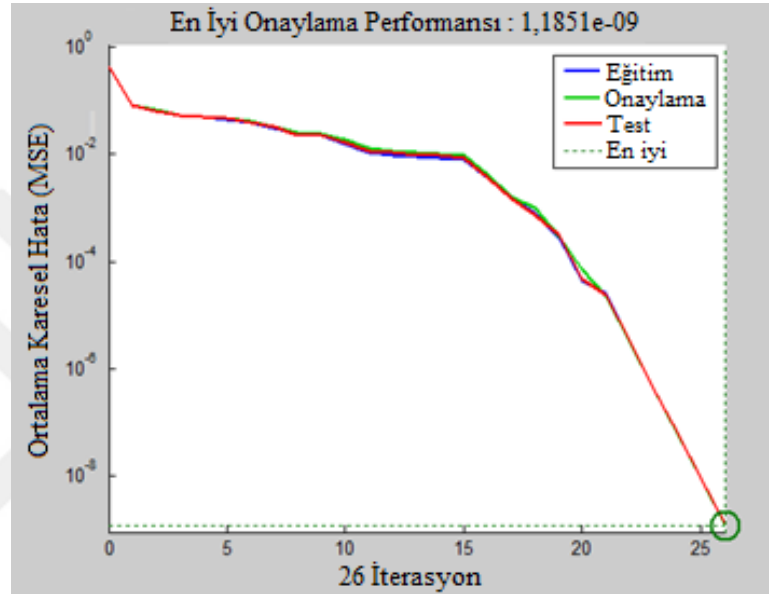
Şekil 5.15. İleri beslemeli yapay sinir ağı için Matlab neural network training tool eğitim aşaması performansı

Giriş ve çıkış verileri Matlab nntool data manager'a tanımlanıp ağ oluşturulduktan sonra Şekil 5.15.'te ekran görüntüsü verilen Matlab nntool trainingtool'da eğitilmiş ve ağın gayet başarılı eğitim parametrelerine sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada bütün yapay zeka teknikleri aynı bilgisayar ile oluşturulmuş ve eğitilmişlerdir. İleri beslemeli yapay sinir ağının eğitim süreci de Şekil 5.15.'te ağ eğitim süresi olarak işaret edildiği üzere, 1 dakika 9 saniye ile gayet kısa ve başarılı görünmektedir. Ağın eğitimi aşamasında Matlab nntool tarafından varsayılan amaçlar olarak belirlenen hedefe 26 iterasyonda başarılı olarak ulaşılmıştır. Şekil 5.16'da 26 iterasyon boyunca yapay sinir ağı eğitimi performansı görülmektedir.



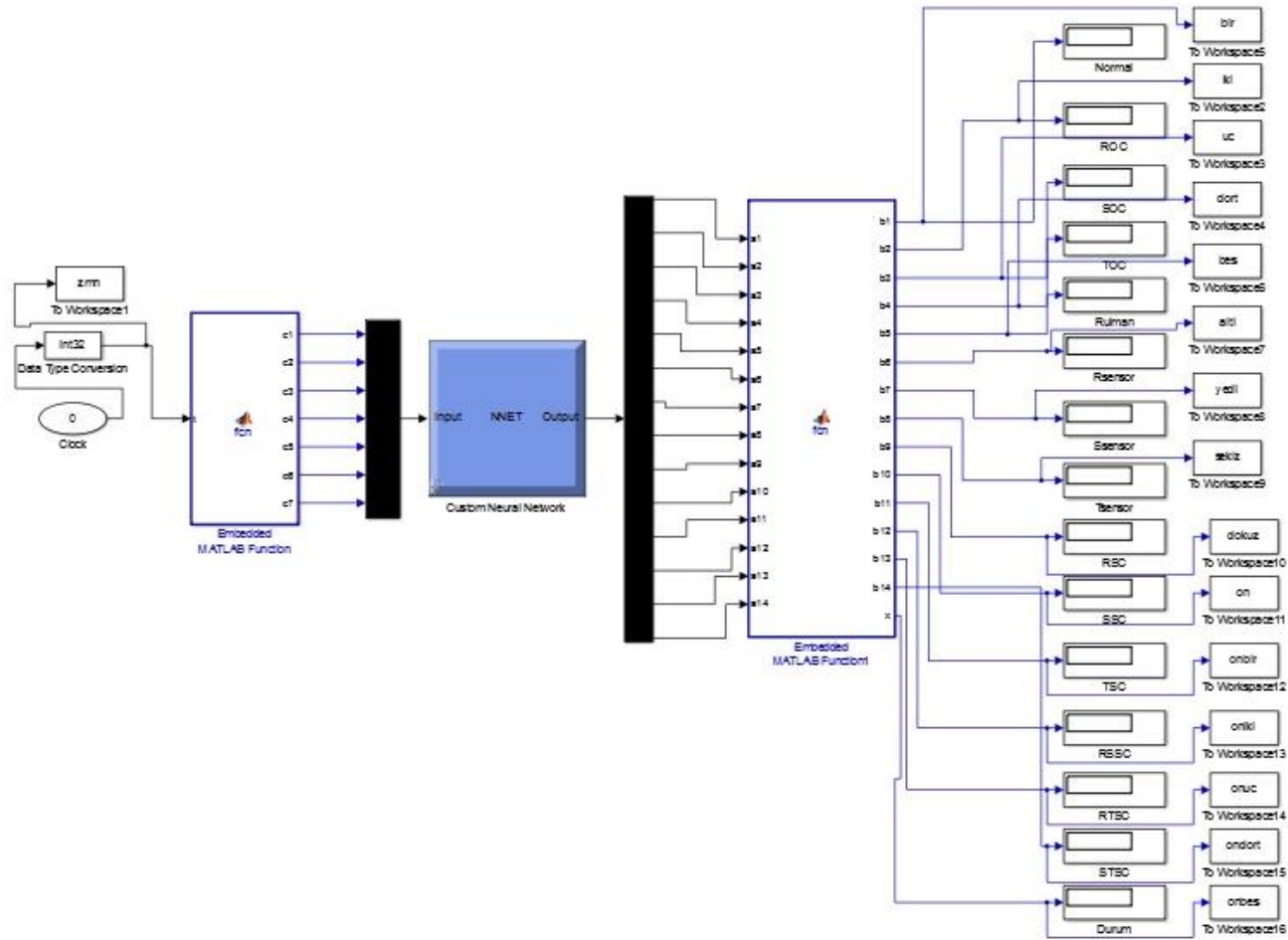
Şekil 5.16. İleri beslemeli yapay sinir ağı eğitim süreci performansını gösteren Matlab eğitim aşaması eğim, mu ve onaylama hatası grafikleri

Şekil 5.16.'da ileri beslemeli yapay sinir ağının 26 iterasyonda tamamlanan eğitim aşaması sürecinde eğitim (gradient), mu (yapay sinir ağının ağırlık değişimleri) ve onaylama hataları (validation fail) grafiği görülmektedir. Şekil 5.17.'de 26 iterasyon süren yapay sinir ağı eğitimi boyunca, ağı eğitim, onaylama ve test süreçlerine ait mean squared error (ortalama karesel hata) değerleri sunulmuştur.



Şekil 5.17. İleri beslemeli yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğrileri

Şekil 5.17.'de görüldüğü üzere, 26. İterasyonda $1,1851 \times 10^{-9}$ değeri ile en iyi onaylama (validation) performansına ulaşılmıştır. Gizli katmanında 12 nöron bulunan ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağının test edilmesi için, giriş verilerini yapay sinir ağına sırasıyla uygulayan ve sonuçları sırasıyla kaydeden bir Matlab Simulink model tasarlanmıştır. Şekil 5.18.'de test aşaması için tasarlanmış Matlab Simulink Model görülmektedir.



Şekil 5.18. Yapay sinir ağının test edilmesi için tasarlanan Matlab Simulink modeli

Şekil 5.18.'de görüldüğü üzere, oluşturulan ve eğitilen yapay sinir ağının başarı düzeyini ölçmek için bir Matlab Simulink modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan bu modelde, yapay sinir ağı modelinin sol tarafında yer alan “Embedded MATLAB Function” olarak görünen, modele gömülü olarak kodlanmış program, aldığı clock (tetikleme) darbelerince, test edilecek eğitim verilerini tek tek yapay sinir ağına uygulamakta, yapay sinir ağı modelinin sağ tarafında yer alan “Embedded MATLAB Function1” tarafından çıkışlardan en yüksek değerli olan seçilip çıkışa aktarılmaktadır. Çıkıştaki veriler aynı sırayla workspace’e kaydedilmektedir. Bunun ardından, m-file olarak kodlanmış bir program çalıştırılmakta, olması gereken doğru sonuçlar ile yapay sinir ağının cevaplarını karşılaştırmakta, doğru sonuçları ve doğru sonuçların yüzdesini Matlab komut ekranına sonuç olarak yazmaktadır. Tablo 5.2.’de ileri beslemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi çalışmasının test sonuçları görülmektedir.

Tablo 5.2. İleri beslemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi çalışması verileri

Yöntem	Eğitim seti veri sayısı	Eğitim seti verileri ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti verileri başarı yüzdesi	Eğitim seti dışındaki veriler ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti dışı veriler testi başarı yüzdesi
İleri beslemeli yapay sinir ağı	4160	4160/4160	%100	1040/1040	%100

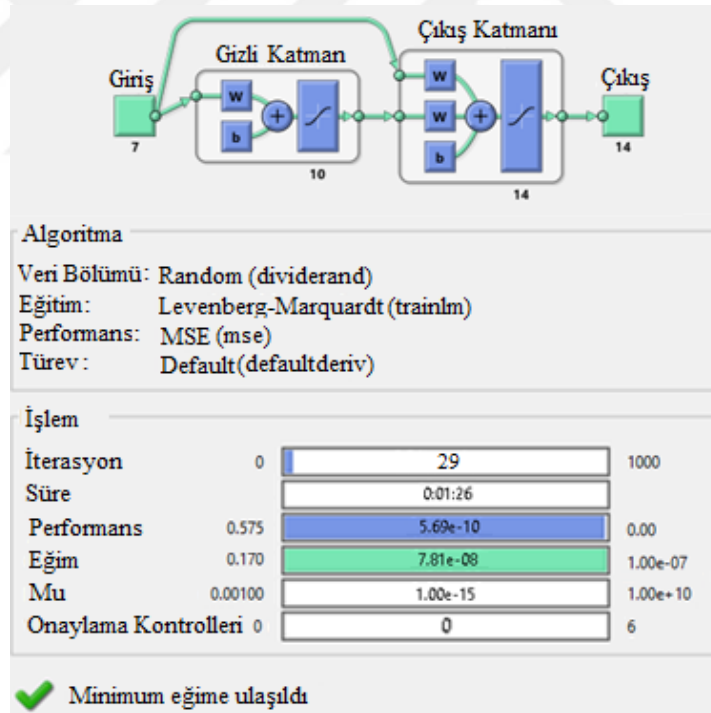
Tablo 5.2.’de gösterildiği gibi, gerçekleştirilen test sonucunda, ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı eğitim verilerinde 4160 testte 4160 doğru sonuçla %100’lük bir başarı yakalamıştır.

Bu işlemin ardından yapay sinir ağı eğitim aşamasında kullanılmamış, ağın daha önce hiç karşılaşmadığı ve veri setinin tümünün %20’si kadar olan 1040 adet veri ile aynı prosedürler uygulanarak test edilmiş, sonuç olarak yapay sinir ağı 1040 doğru sonuçla % 100’lük başarıya ulaşmıştır.

5.1.3. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi

Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağının kapsamlı ele alınmış farklı nöron sayıları ile oluşturulan çeşitli versiyonları eğitim performanslarına göre test edilmiştir. Yapay sinir ağının eğitimi için, ağ eğitim algoritmaları arasından, kararlı ve hızlı olma özellikleri sebebiyle, Levenberg-Marquardt ağ eğitim algoritması seçilmiştir.

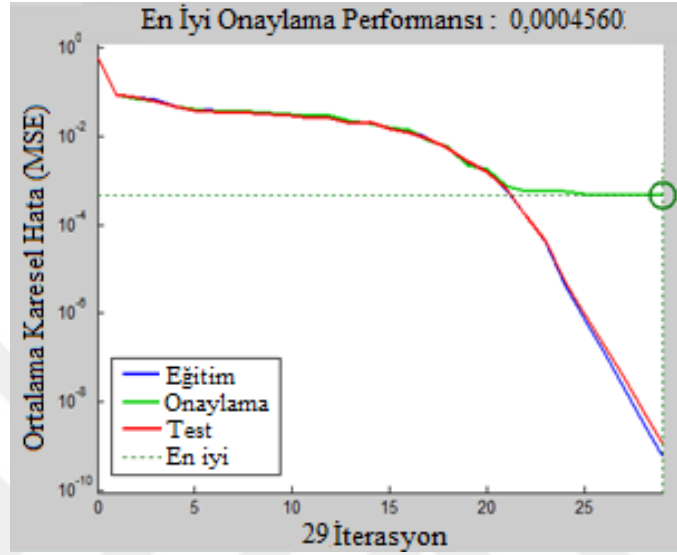
Çeşitli nöron sayıları ile oluşturulan kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağları, kendi aralarında nöron sayılarına göre eğitim verileri testi başarı karşılaştırmasına tabi tutulmuş ve gizli katmanında 10 nöron bulunan yapay sinir ağı en başarılı olarak belirlenmiştir. Şekil 5.19.'da Matlab nntool training tool ekran görüntüsü ve genel ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 5.19. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı için Matlab nntool eğitim aşaması performansı

Şekil 5.19.'daki training tool görüntüsünde görülen 10 nöronlu kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağının eğitim aşaması verilerine bakıldığında 29 iterasyonla tamamlanmıştır. 29 iterasyonun tamamlanması 1 dakika 26 saniye sürmüştür. Eğitim

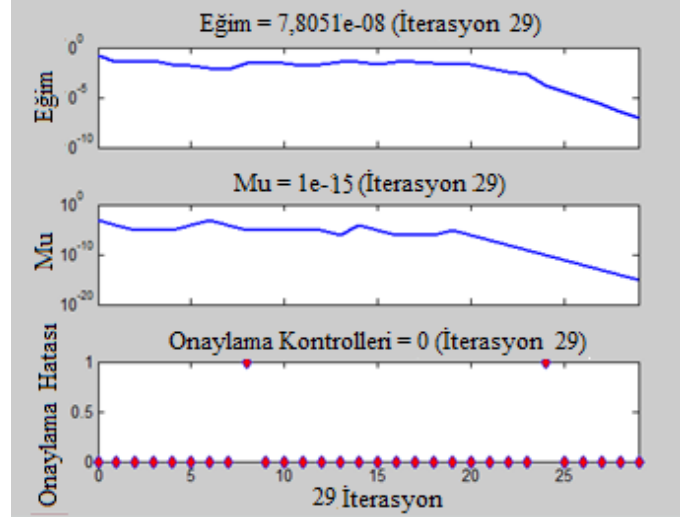
aşaması sonlandırma kriterleri, bütün ağların özdeş ve eşit olarak kıyaslanabilmesi amacıyla, bütün yapay sinir ağı eğitimlerinde olduğu gibi Matlab nntool ve training tool'a ait varsayılan değerler olarak bırakılmıştır. Şekil 5.20.'de kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağına ait eğitim performansı verileri grafiği görülmektedir.



Şekil 5.20. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğrileri

Şekil 5.20.'de görüldüğü üzere, ağın en iyi onaylama performansı, hedefe ulaşılan 29 iterasyon sonunda 0,00045602 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.21.'de ağın eğitimi boyunca elde edilen eğitim, mu ve onaylama hatası değerleri görülmektedir.

Şekil 5.21.'de kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağının 29 iterasyonluk eğitim aşaması eğitim, mu ve onaylama hatası verileri görülmektedir. Kaskat ileri beslemeli ağın eğitim aşaması tamamlandıktan sonra tasarlanan ve eğitilen ağ Şekil 5.18.'de yapay sinir ağının test edilmesi için tasarlanan Matlab Simulink modeline yerleştirilmiş ve daha önce tespit edilen 4160 set veriden oluşan eğitim verileri ile teste tabi tutulmuştur.



Şekil 5.21. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı eğitim performansını gösteren Matlab eğitim aşaması eğim, mu ve onaylama hatası grafikleri

Tablo 5.3.'te kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri görülmektedir.

Tablo 5.3. Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri

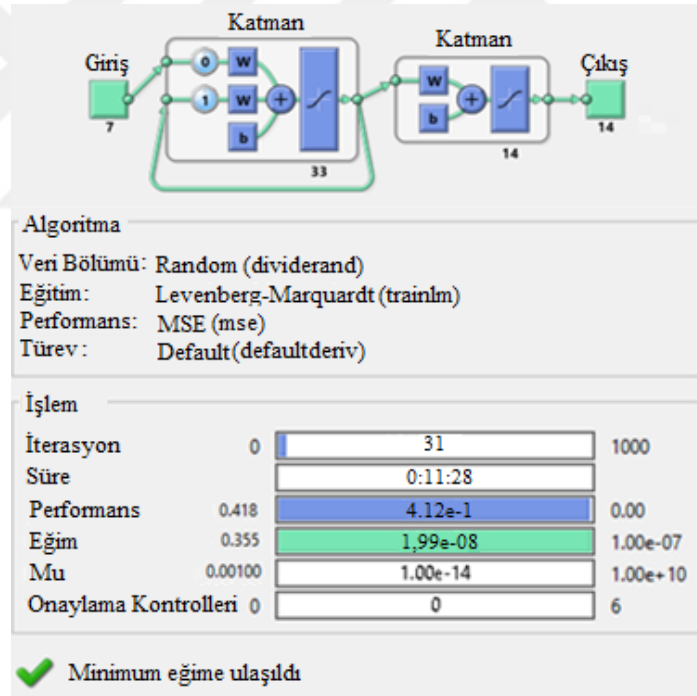
Yöntem	Eğitim seti veri sayısı	Eğitim seti verileri ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti verileri başarı yüzdesi	Eğitim seti dışındaki veriler ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti dışı veriler testi başarı yüzdesi
Kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı	4160	4103/4160	%98,630	1021/1040	%98,173

Tablo 5.3.'te görüldüğü gibi 4160 adet veriden 4103 doğru sonuç ile eğitim seti verileri ile %98,630'luk bir başarı seviyesine ulaşmıştır. Daha sonra eğitim aşamasında kullanılmamış, ağın hiç karşılaşmadığı ve gerçek zamanlı olarak motordan daha önce elde edilmiş veri setinin %20'sini oluşturan 1040 adet veri ile test edilmiştir. Bu testin sonucunda kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı 1021 adet doğru sonuç elde edilmiştir. Testte görülen yanlış teşhisler açık devre ve sensör arızası verileri arasında karşılıklı olarak bazı verilerin eser miktarda benzerlikleri sebebiyle ve rulman arızası durumunda normal durum ile yer yer benzerlik

göstermesi ile nadiren gerçekleşmiştir. Test sonucu %98,173'lük bir doğru teşhis başarısı elde edilmiştir.

5.1.4. Elman yapay sinir ağı ile arıza teşhisi

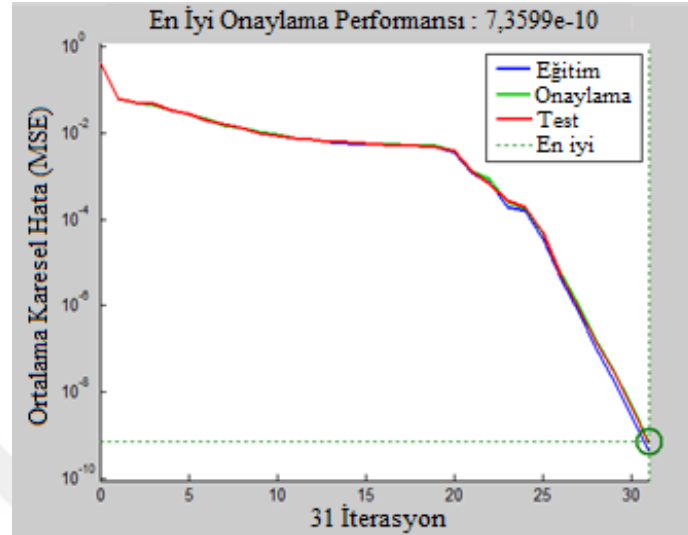
Elman yapay sinir ağı modeli için en uygun gizli katman nöron sayısı belirlenmesi için yapılan kapsamlı denemeler sonucunda en yüksek performansın, gizli katmanda 33 nöronu bulunan elman yapay sinir ağı olduğu tespit edilmiştir. Yapay sinir ağının eğitimi için, Levenberg-Marquardt ağ eğitim algoritması, kararlı ve hızlı bir eğitim algoritması olması sebebiyle tercih edilmiştir. 33 nöronlu gizli katmanı bulunan Elman yapay sinir ağı için Matlab nntool training tool ekran görüntüsü ve ağın genel yapısı Şekil 5.22.'de sunulmuştur.



Şekil 5.22. Elman yapay sinir ağı için Matlab nntool eğitim aşaması performansı

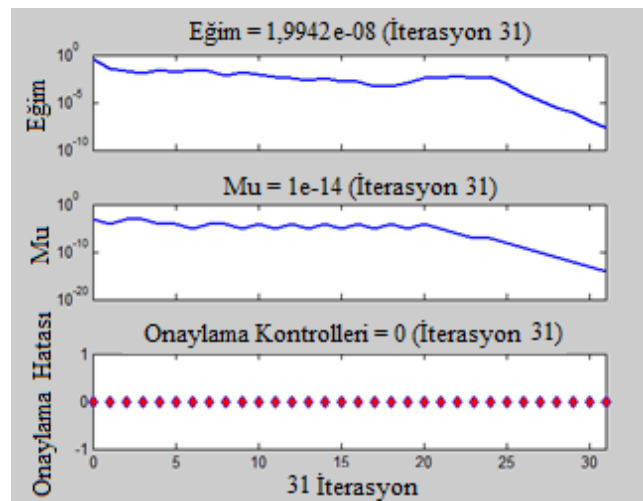
Şekil 5.22.'de görüldüğü gibi, 33 gizli katman nöron sayısına sahip Elman yapay sinir ağının eğitim aşaması 31 iterasyonda tamamlanmıştır. 31 iterasyondan oluşan ağ eğitim süreci 11 dakika 28 saniye sürmüştür. Diğer ağ eğitimlerinde olduğu gibi LM ağ eğitim algoritması kullanılmış ve varsayılan eğitim hedefleri, özdeş ve eşit bir

karşılaştırma için değiştirilmemiştir. Şekil 5.23.'te Elman ağı'nın eğitim performansı eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.23. Elman yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğrileri

Şekil 5.23.'te görüldüğü üzere, Elman ağı'nın en iyi onaylama performansı olarak $7,3599 \times 10^{-10}$ değerine 31 iterasyon sonucunda ulaşılmıştır. Ağı'nın Matlab nntool tarafından varsayılan eğitim hedef değerleri özdeş ve eşit şartlar oluşturmak adına herhangi bir değişime uğratılmamıştır. Şekil 5.24.'te eğitim sürecince gerçekleşen 31 iterasyon için eğitim, mu ve onaylama hatası değerleri görülmektedir.



Şekil 5.24. Elman yapay sinir ağı eğitim süreci performansını gösteren Matlab eğitim aşaması eğitim, mu ve onaylama hatası grafikleri

Şekil 5.24.'te görüldüğü gibi, 31 iterasyon boyunca onaylama hatası değeri hep “0” değerinde kalmıştır. Elman ağının eğitim aşaması tamamlandıktan sonra eğitim verileri olarak, tasarlanan diğer yapay sinir ağlarında da kullanılan 4160 adet veri ile Şekil 5.18.'de görülen devreye yerleştirilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Tablo 5.4.'te Elman yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri görülmektedir.

Tablo 5.4. Elman yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri

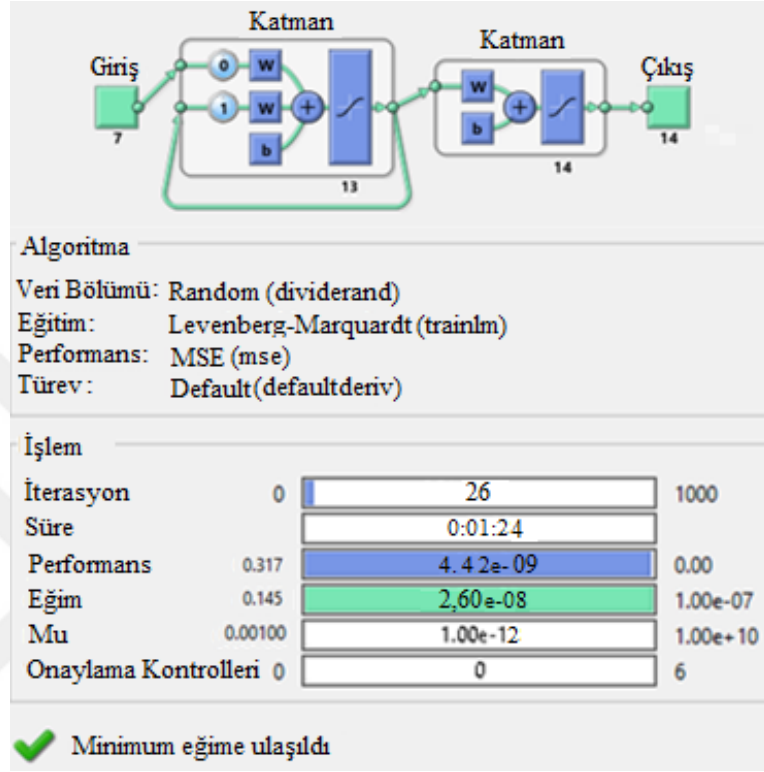
Yöntem	Eğitim seti veri sayısı	Eğitim seti verileri ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti verileri başarı yüzdesi	Eğitim seti dışındaki veriler ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti dışı veriler testi başarı yüzdesi
Elman yapay sinir ağı	4160	4018/4160	%96,587	1001/1040	%96,250

Tablo 5.4.'te ifade edildiği gibi, 4160 adet veriden 4018 doğru sonuç ve 142 yanlış sonuçla eğitim seti verileri ile % 96,587'lik bir başarı seviyesine ulaşmıştır. Bu testin ardından eğitim aşamasında kullanılmamış, ağın hiç karşılaşmadığı ve gerçek zamanlı olarak motordan daha önce elde edilmiş, veri setinin %20'sini oluşturan 1040 set veri ile yine bir teste tabi tutulmuştur. Bu testin sonucunda oluşturulan Elman yapay sinir ağın 1001 adet doğru teşhis ve 39 yanlış teşhis gerçekleştirmiştir. Yanlış teşhisler incelendiğinde verilerin bazı benzerlikleri sebebi ile nadiren sensör arızası ile açık devre arızası arasında karşılıklı olduğu ve rulman arızası ile normal durum arızası arasında, kullanılan hasarlı rulmanın kısmen normal verilere yakın karakteristik sergilemesi sebebiyle nadiren ve karşılıklı yanlış teşhisler olduğu görülmüştür. Test sonucu %96,250'lik bir doğru teşhis yüzdesi elde edilmiştir.

5.1.5. Katman yinelemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi

Katman Yinelemeli (Layer Recurrent) yapay sinir ağının nöron sayısına göre yapılan kapsamlı ve ayrıntısal, en iyi performans denemeleri sonucunda eğitim seti verilerinin başarı yüzdesine göre en yüksek başarı düzeyine ulaşan gizli katman nöron sayısı 13 nöron olarak tespit edilmiştir. Levenberg-Marquardt ağ eğitim algoritması, kararlı ve hızlı bir eğitim algoritması olması nedeniyle, yapay sinir

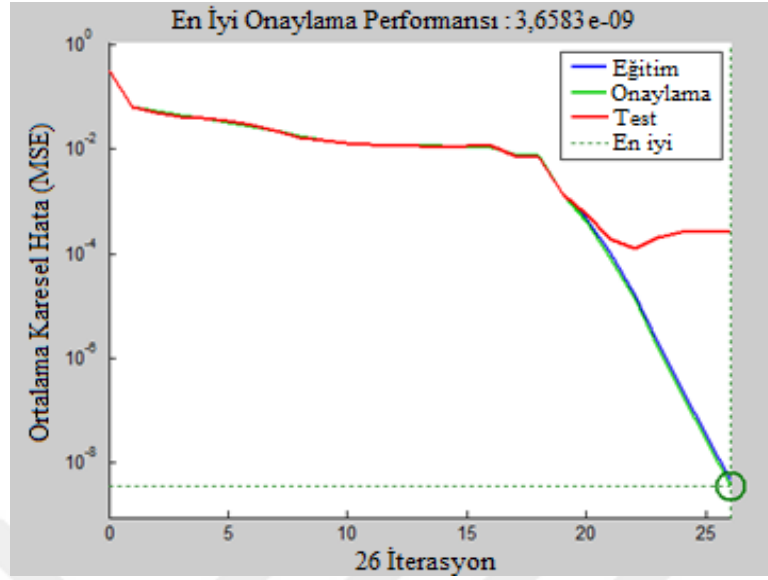
ağının eğitimi için, tercih edilmiştir. Gizli katmanında 13 nöron bulunan katman yinelemeli yapay sinir ağının training tool ekran görüntüsü ve genel yapısı Şekil 5.25.'te görülmektedir.



Şekil 5.25. Katman yinelemeli yapay sinir ağı için Matlab nntool eğitim aşaması performansı

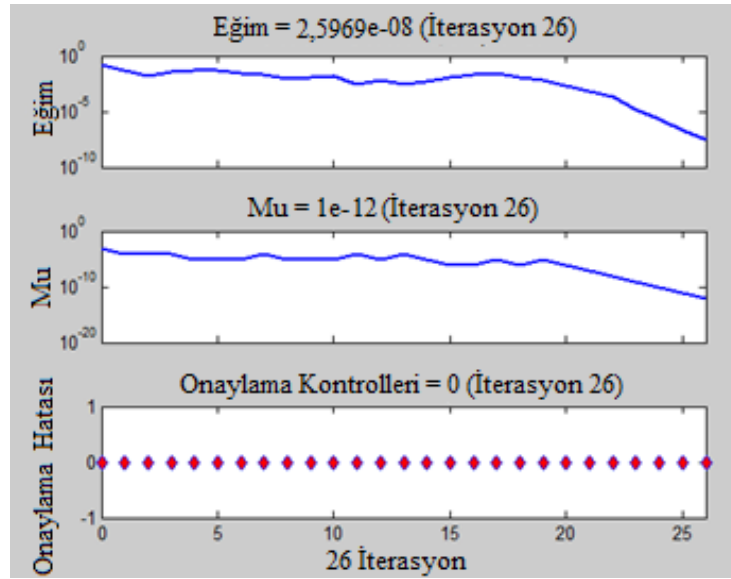
Şekil 5.25.'te görüldüğü üzere, gizli katman nöron sayısı 13 olan katman yinelemeli yapay sinir ağının eğitim aşaması minimum eğime ulaşılan 26 iterasyon ile sonuçlanmıştır. Nöron yapısına ve ağın hedeflerine göre değişim gösteren eğitim süresi, 1 dakika 24 saniye sürmüştür. Eğitim aşamasında, eğitimin sonuçlanması için gerekli kriterler, diğer ağlarda da olduğu gibi, Matlab neural network training tool'un varsayılan eğitim kriterleri olarak belirlenmiştir. Bu sayede bütün ağlar için özdeş ve eşit bir platform oluşturulmuştur.

Şekil 5.26.'da katman yinelemeli yapay sinir ağının eğitim performansı eğrileri verilmiştir. Tespit edilen en başarılı ve 13 gizli katman nöronuna sahip katman yinelemeli yapay sinir ağının en iyi onaylama performansı olarak, $3,6583 \times 10^{-9}$ değerine 26. iterasyonda ulaşılmıştır.



Şekil 5.26. Katman yinelemeli yapay sinir ağı eğitim aşamasında, eğitim, onaylama ve test süreçleri için ortalama karesel hata eğrileri

Şekil 5.27.'de eğitim aşaması; eğitim, mu ve onaylama hatası değerleri eğitim sürecince gerçekleşen 26 iterasyon için görülmektedir. Eğitim aşaması süresince, 26 iterasyon boyunca onaylama hatası değeri, Şekil 5.27.'de görüldüğü üzere, daima "0" değerinde kalmıştır.



Şekil 5.27. Katman yinelemeli yapay sinir ağı eğitim süreci performansını için Matlab eğitim aşaması eğitim, mu ve onaylama hatası grafikleri

Katman yinelemeli yapay sinir ağının eğitim aşaması tamamlandıktan sonra eğitim verileri olarak, tasarlanan diğer yapay sinir ağlarında da kullanılan 4160 adet veri ile Şekil 5.18.'de görülen devreye uygulanmış ve teste alınmıştır.

Tablo 5.5.'te katman yinelemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri görülmektedir.

Tablo 5.5. Katman yinelemeli yapay sinir ağı ile arıza teşhisi verileri

Yöntem	Eğitim seti veri sayısı	Eğitim seti verileri ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti verileri başarı yüzdesi	Eğitim seti dışındaki veriler ile test (başarılı/toplam)	Eğitim seti dışı veriler testi başarı yüzdesi
Katman yinelemeli yapay sinir ağı	4160	3956/4160	%95,096	985/1040	%94,711

Tablo 5.5.'te görüldüğü gibi, 4160 adet veriden 3956 doğru sonuç ve 204 yanlış sonuçla eğitim seti verileri ile % 95,096'lık bir başarı düzeyi elde edilmiştir. Bu testin ardından eğitim aşamasında kullanılmamış, ağın daha önce hiç karşılaşmadığı ve gerçek zamanlı olarak motordan daha önce elde edilmiş, veri setinin %20'sini oluşturan 1040 set veri ile yine bir teste sokulmuştur. Bu testin sonucunda, oluşturulan katman yinelemeli yapay sinir ağı 985 adet doğru teşhis ve 55 yanlış teşhis gerçekleştirmiştir. Tespit edilen yanlış teşhislerin, bazı benzer karakteristiğe sahip veriler sebebi ile açık devre ile sensör arızası arasında karşılıklı ve rulmanın az hasarlı olması ve nadiren normal duruma yakın karakteristik özellik gösteren veriler sebebi ile normal durum ile rulman arızası arasında karşılıklı olduğu görülmüştür. Test sonucunda %94,711'lik bir doğru teşhis başarısına ulaşılmıştır.

5.2. Gerçek Zamanlı Arıza Teşhisi Sisteminin Oluşturulması

Farklı yapay zeka teknikleri kullanarak tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık, ileri beslemeli geri yayımlı yapay

sinir ağı, kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı ve katman yinelemeli yapay sinir ağı ile başarı ölçümü için yapılan test ölçümlerinden elde edilen verilerle, yanlış teşhisler analiz edilmek istenmiş ve Tablo 5.6. elde edilmiştir. Tablo 5.6.'da yapay zeka tekniklerinin yanlış teşhislerinin dağılımı görülmektedir.

Tablo 5.6. Yapay zeka tekniklerinin yanlış teşhislerinin dağılımı

Yapay Zeka Tekniği ve test verisi sayısı	Yanlış teşhis edilen durumlar					
	Normal durum	Açık devre arızası	Bir sargı kısa devre arızası	Sargılar arası kısa devre arızası	Sensör arızası	Rulman arızası
Bulanık Mantık (5000)	4	6	0	0	12	22
İleri Beslemeli YSA (1040)	0	0	0	0	0	0
Kaskat İl. Besl. YSA (1040)	0	3	0	0	6	10
Elman YSA (1040)	2	7	0	0	12	18
Katm. Yinel. YSA (1040)	4	11	0	0	12	28

Tablo 5.6.'da verilen yanlış teşhisler listesi hazırlanırken bulanık mantık için 400'er adet normal durum, r, s ve t sargıları açık devre arızaları, r, s ve t sensörleri arızaları ve rulman arızası, 300'er adet r, s ve t sargıları kısa devre arızaları ve r-s, r-t ve s-t sargıları arası kısa devre arızaları olmak üzere 5000 adet veri kullanılmıştır. Yapay sinir ağları için ise, 600 adet normal durum, 400'er adet r, s ve t sargıları açık devre arızaları, r, s ve t sensörleri arızaları ve rulman arızası, 300'er adet r, s ve t sargıları kısa devre arızaları ve r-s, r-t ve s-t sargıları arası kısa devre arızaları olmak üzere eğitim ve test verileri toplamı olan 5200 adet veriden homojen olarak ayrılan ve toplam veri setinin %20'si olan, yapay sinir ağlarının eğitim aşamasında karşılaşmadıkları 1040 test verisi kullanılmıştır. Tablo 5.6.'daki yanlış teşhis dağılımları yorumlandığında, yanlış teşhisler alt gruplar içinde simetrik bir dağılıma sahip olduğundan, fazlara ait arızalar alt gruplara ayrılmadan, üst arıza grubu olarak ele alınmıştır. Kısa devre arızalarında yanlış teşhislere rastlanmaması, kısa devre arızaları verilerinin diğer arızalara ait verilere göre daha ayırt edici olduğunu göstermektedir. Diğer arızaların da, başarı düzeyleri ve toplam yanlış teşhis sayıları dağılımı göz önünde bulundurulduğunda, orantılı bir dağılım sergilemesi ise veri setinin ve yapay zeka tekniklerinin tutarlı olduğunu ve kullanılan yapay zeka

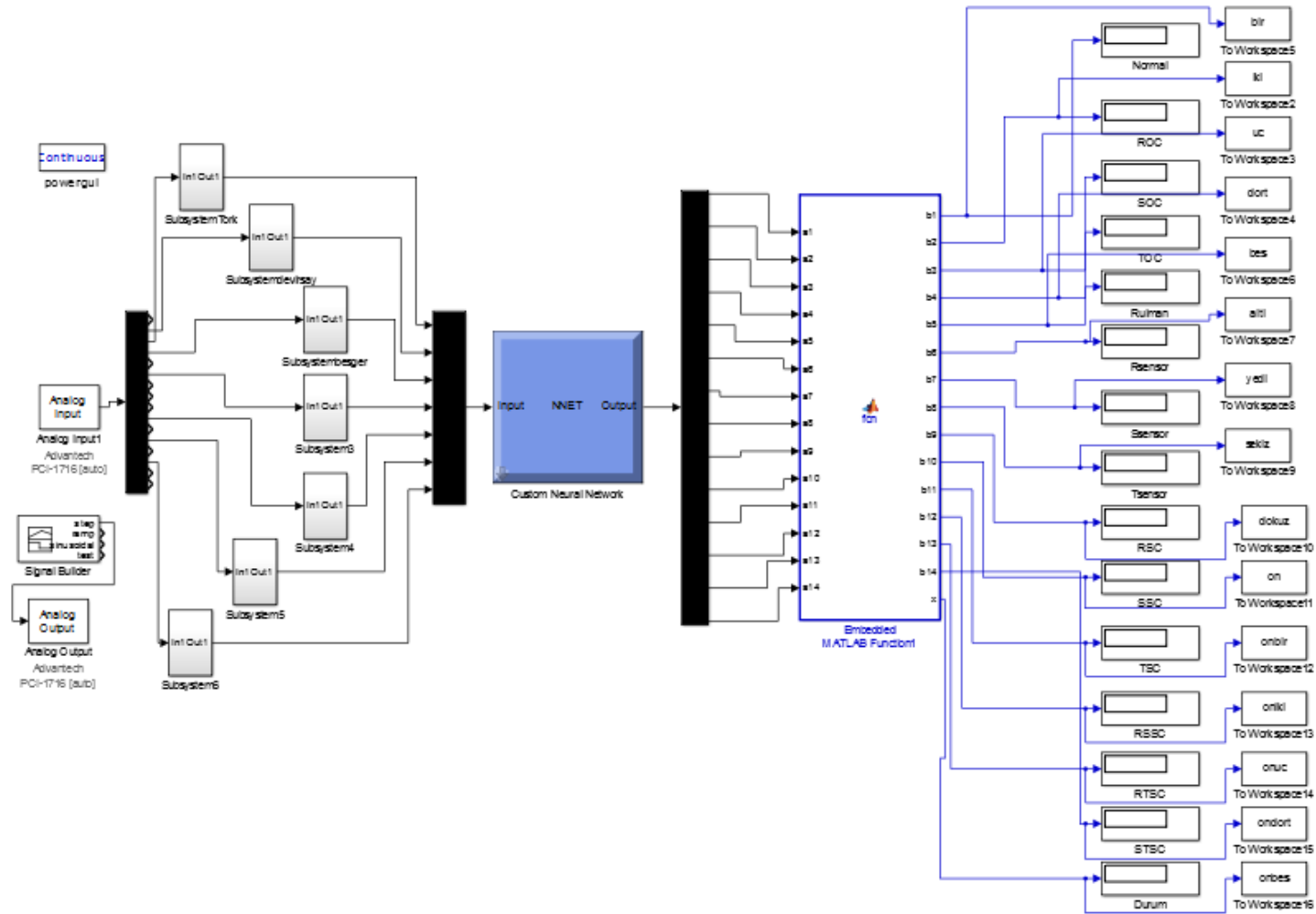
tekniklerinin birbirlerini doğruladıklarını göstermektedir. En çok yanlış teşhisin görüldüğü rulman arızası durumu ve yanlış teşhislerin hepsinin normal durumu işaret etmesi, çalışmada kullanılan hasarlı rulmanın hasar durumunun gözle görülemeyecek kadar az olması sebebiyledir. Kullanılan hasarlı rulman daha hasarlı olduğunda normal durum ile benzer verilerin azalacağı ve teşhis başarı yüzdesinin artacağı ortadadır. Tablo 5.7.'de kullanılan yapay zeka tekniklerinin yetkinlik ve başarı düzeylerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

Tablo 5.7. Yapay zeka tekniklerinin yetkinlik ve başarı düzeyleri

Yapay Zeka Tekniği	Teşhis edilen durum	Eğitim seti verileri testi	Eğitim seti dışı veriler testi
	sayısı	başarı yüzdesi	başarı yüzdesi
Bulanık Mantık	6	-	%99,120
İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı	14	%100	%100
Kaskat İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı	14	%98,630	%98,173
Elman Yapay Sinir Ağı	14	%96,587	%96,250
Katman Yinelemeli Yapay Sinir Ağı	14	%95,096	%94,711

Tablo 5.7.'de genel hatlarıyla verilen yapay zeka tekniklerinin başarı oranlarında görüldüğü gibi, oluşturulan bulanık mantık ve yapay sinir ağı modelleri ve elde edilen eğitim seti ve test seti başarı testlerinde %100'lük test başarısına ulaşmıştır. Bu sebeple ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağının gerçek zamanlı arıza teşhisi modeline tatbik edilmesine karar verilmiştir. İleri beslemeli yapay sinir ağı hem 14 ayrı durumun teşhisini gerçekleştirmiş, hem de sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek başarı düzeyini elde edebilmiştir.

Gerçek zamanlı arıza teşhisi modeline tatbik etmek için, verilerin gerçek zamanlı olarak alınabilmesi, yapay sinir ağına gerçek zamanlı olarak uygulanabilmesi ve sonuçların gözlemlenmesi gerekmiştir. Bu amaçla Matlab Simulink'te bir model tasarlanmıştır. Şekil 5.28.'de yapay sinir ağının, motor çalışırken gerçek zamanlı verilerle test edilmesi için geliştirilen Matlab Simulink modeli görülmektedir.



Şekil 5.28. Yapay sinir ağının gerçek zamanlı testi için tasarlanmış Matlab Simulink modeli

Şekil 5.28.'de görüldüğü gibi, veriler motordan veri alış modeli ile özdeş olarak alınmakta, daha sonra yapay sinir ağına giriş olarak uygulanıp çıkışlar elde edilmektedir. Bu çıkışlar “Embedded MATLAB Function” ‘a uygulanıp, çıkışlardan en yüksek değer doğru olarak seçilmekte ve çıkış olarak sunulmaktadır. Elde edilen bu model, gerçek zamanlı olarak tekerlek içi elektrik motoruna arızalar yaptırılarak ve normal durum da dahil olarak homojen bir dağılımla manuel olarak test edilmiştir. Motor değişik durumlarda 100 kere çalıştırılmış, 99 adet doğru sonuç tespit edilirken, rulman arızası testlerinden birinde yapay sinir ağı rulman arızası ve normal durum arasında gidip gelmiş, kararlı olamamıştır. Bu yüzden bu durum yanlış kabul edilmiş ve 99 doğru sonuçla gerçek zamanlı olarak % 99'luk bir başarı yüzdesine ulaşılmıştır.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında tekerlek içi elektrik motoru için arıza teşhisi çalışması gerçekleştirilmiştir. Arıza teşhisi çalışmaları, kullanılan sistemlerin daha güvenilir hale getirilmesini ve bu sayede daha yaygın kullanımının desteklenmesini sağlar. Bu çalışmada, tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi için farklı yapay zeka teknikleri derlenmiştir. Bunlar, bulanık mantık, ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı, kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı, Elman yapay sinir ağı ve katman yinelemeli yapay sinir ağıdır. Tez çalışması kapsamındaki testler ve tasarımlar, Matlab yazılımı kullanılarak gerçek verilerle ve gerçek motor ile gerçekleştirilmiştir. Yapay sinir ağları ile kaynak akımı, kaynak gerilimi, r fazı akımı, s fazı akımı, t fazı akımı, tork ve devir sayılarından oluşan 7 adet parametre ile veri alışı yapılmış ve normal durum ile birlikte, r sargısı açık devre arızası, s sargısı açık devre arızası, t sargısı açık devre arızası, r sargısı kısa devre arızası, s sargısı kısa devre arızası, t sargısı kısa devre arızası, r-s sargıları arası kısa devre arızası, r-t sargıları arası kısa devre arızası, s-t sargıları arası kısa devre arızası, rulman arızası, r sensörü arızası, s sensörü arızası ve t sensörü arızasından oluşan, 13 arıza ve 1 normal durum olmak üzere toplam 14 ayrı durumun teşhisi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması esnasında, üzerinde çalışılan yapay sinir ağlarının tümünün, eğitim verileri başarı düzeylerine göre yapılan denemelere göre, en uygun nöron sayıları tespit edilmiştir. Yapay sinir ağlarından tespit edilen en başarılı olanlarının yer aldığı çalışmada, ağ eğitiminde kullanılmayan, veri setinin %20'si miktarınca ve ağın ilk defa karşılaştığı verilerden oluşan test veri seti ile testler gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda, katman yinelemeli yapay sinir ağı, % 94,711, Elman yapay sinir ağı %96,250, kaskat ileri beslemeli yapay sinir ağı %98,173 ve ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı %100'lük bir doğru teşhis başarısına ulaşılmıştır. Bu

karşılaştırmalar sonucunda, ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı'nın tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi konusunda daha başarılı olduğu görülmüştür.

En yüksek başarımın elde edildiği ileri beslemeli yapay sinir ağı, gerçek zamanlı olarak motordan alınan verilerle test edildiğinde, her biri yüzlerce anlık sonuç içeren ve 13 arıza ve 1 normal durum olarak toplam 14 ayrı durumun homojen bir dağılımla test edildiği 100 tekil ve gerçek zamanlı test sonucunda ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı 99 adet doğru teşhis gerçekleştirmiştir. Başarısız olarak sayılan 1 teşhiste de değişken bir şekilde, kararsız doğru ve yanlış çıkışlar vermiştir. Bu durum dikkate alındığında, ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı, gerçek zamanlı testler sonucunda da %99 oranında doğru teşhis oranı elde edilerek gerçek zamanlı arıza teşhisi çalışması başarılı bir sonuca ulaşmıştır.

Tekerlek içi elektrik motorunun arıza teşhisi çalışması bulanık mantık yöntemiyle de gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık yöntemi ile oluşturulan sistemde, yapay sinir ağları ile yapılan arıza teşhisi çalışmasının, daha az veri ile gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Kaynak akımı, tork ve devir sayısı verilerinin, diğer verilere göre genel anlamda daha belirleyicidir. Arıza karakteristiğini daha çok ön plana çıkaran 3 adet değişken, giriş verisi olarak bulanık mantık yöntemi için kullanılmıştır. Bu durum, sistemin çıkışı olarak teşhis edilen normal durum ve rulman arızası çıkışlarının yanında, arızaların her bir sargı için dağıtılması yerine, bir sargı kısa devre arızası, sargılar arası kısa devre arızası, açık devre arızası ve sensör arızası olarak üst gruplar halinde ele alınmıştır. Bütün arızaların teşhis edilebildiği, fakat faz akımı ölçümleri sisteme giriş verisi olarak dahil edilmediği için üst gruplar halinde teşhisin yapıldığı, 6 adet çıkışın elde edildiği bir sistem tasarlanmıştır. Bulanık mantık yöntemi ile oluşturulan sistem, homojen dağıtılmış ve çıkışları bilinen 5000 adet giriş verisi ile test edildiğinde 4956 adet doğru teşhis ile %99,12'lik bir başarı seviyesiyle başarılı bir sonuca ulaşmıştır. Buna rağmen, hem ayrıntılı teşhisler, hem de arıza teşhisinin başarı yüzdesi dikkate alındığında, ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı modelinin daha başarılı olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, değişik yapay zeka teknikleri kullanılarak başarı yüzdeleri karşılaştırıldığında ileri beslemeli yapay sinir ağı, arıza teşhisi çalışması için en başarılı yapay zeka tekniği olarak tespit edilmiştir. Tekerlek içi elektrik motorunun gerçek zamanlı arıza teşhisi çalışması %99'luk doğru teşhis yüzdesi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması ışığında tekerlek içi elektrik motorlarının arıza teşhisi için, elde edilen başarı düzeyinin, diğer yapay zeka teknikleri ile de yakalanabilmesi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilebilir. Gerçekleştirilen çalışmanın geçerli olduğu koşullar, daha büyük veri setleri ile genişletilip sınıflandırılarak ve tasarlanan sistem, bilgisayardan bağımsızlaştırılıp mikroişlemcili devrelere gömülüp mobil hale getirilip yine gerçek zamanlı olarak tekerlek içi elektrik motoru kullanan taşıtlarda yaygın olarak kullanılabilir.

Tekerlek içi elektrik motorların nominal çalışma aralığı, dişli sistemleri veya kutup sayısı değişimi ile genişletilip, daha büyük, daha yüklü ve daha hızlı taşıtlar için uygun hale getirilebilir. Dişli sistemleri içermediği için de verim avantajı taşıyan tekerlek içi elektrik motorlarının, dar bir aralığa sahip devir sayısı dışında yaşadığı veya fazla yüklerde yaşadığı verim düşüşleri, dişli sistemleri ile ortadan kaldırılıp, tekerlek içi elektrik motorları daima uygun ve verimli devirlerde kullanılabilir. Bu sayede, dişli sistemlerinin getireceği ekstra mekanik kayıplar telafi edilebilecektir. Hazırlanan tez çalışması ile tekerlek içi elektrik motorları ile ilgili literatürde daha önce kapsamlı olarak ele alınmamış bir konu incelenmiş ve tekerlek içi elektrik motorlarının arıza teşhisi, yapay zeka teknikleri kullanarak başarıyla gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abed, W., Sharma, S., Sutton, R. 2014. Diagnosis of bearing fault of brushless DC motor based on dynamic neural network and orthogonal fuzzy neighborhood discriminant analysis. UKACC International Conference on Control, 378-383.
- Abed, W., Sharma, S., Sutton, R., Motwani, A. 2015. A robust bearing fault detection and diagnosis technique for brushless DC motors under non-stationary operating conditions. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 26(3): 241-254.
- Abraham, A. 2005. Rule Based Expert Systems. Handbook of measuring system design.
- Akgün, A., Sezer, E. A., Nefeslioğlu, H. A., Gökçeoğlu, C., Pradhan, B. 2012. An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. Computers & Geosciences, 38(1): 23-34.
- Aktaş, M., Okumuş, H. İ. 2003. Doğrudan Moment Kontrollü Asenkron Motorun Stator Direncinin Yapay Sinir Ağı ile Kestirimi, International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks.
- Aminian, F., Aminian, M., Collins Jr., H. W. 2002. Analog fault diagnosis of actual circuits. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 51(3): 544-550.
- Awadallah, M. A., Morcos, M. M. 2004. Switch fault diagnosis of PM brushless DC motor drive using adaptive fuzzy techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, 19(1): 226-227.
- Awadallah, M. A., Morcos, M. M., Gopalakrishnan, S., Nehl, T. W. 2005. A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in CSI-fed PM brushless DC motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(2): 253-259.
- Bae, H., Kim, S. S., Vachtsevanos, G. 2009. Fault detection and diagnosis of winding short in BLDC motors based on fuzzy similarity. International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, 9(2): 99-104.

- Bay, Ö. F., Bayır, R. 2005. Kohonen network based fault diagnosis and condition monitoring of pre-engaged starter motors. *International Journal of Automotive Technology*, 6(4): 341-350.
- Bayır, R., ve Bay, Ö. F. 2004. Serial wound starter motor faults diagnosis using artificial neural network. ICM'04. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 194-199.
- Bayır, R., 2005. Yapay zeka teknikleri kullanılarak marş motorlarında hata teşhisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Berkan R.C., Trubatch, S. L. 1997. Fuzzy system design principles, Building Fuzzy If-Then Rule Bases. IEEE Press.
- Chayjan, R. A. 2010. Modeling of sesame seed dehydration energy requirements by a soft-computing, *Australian Journal of Crop Science*, 4(3): 180-184.
- Chow, M. Y., Thomas, R. J. 1988. Detection of damper winding currents and the damping coefficient of a synchronous machine using a predictor corrector estimator, IEEE.
- Chow, M. Y., Yee, S. O. 1990. Application of neural networks to incipient fault detection in induction motors. *J. Neural Network Computing*, 2(3): 26-32.
- Chow, M. Y., Mangum, P. M., Yee, S. O. 1991. A neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 38(6): 448-453.
- Chow, M. Y., Menozzi A., 1993. Design methodology of an intelligent controller using artificial neural networks. IECON'93.
- Chow, M. Y., Sharpe, R. N., Hung, J. C. 1993. On the application and design of artificial neural networks for motor fault detection—Part I. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 40(2): 181-188.
- Chow, M. Y. 1997. Methodologies of using neural network and fuzzy logic technologies for motor incipient fault detection. World Scientific.
- Cordón, O. 2011. A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems. *International Journal of Approximate Reasoning*, 52(6): 894-913.
- Dernoncourt, F. 2013. Introduction to Fuzzy Logic, Course Notes, Massachusetts Institute of Technology.

- Demuth, H., Beale, M., Hagan, M. 2009. Neural Network Toolbox User's Guide, The MathWorks Inc., Natick, USA.
- Denton, T. 2000. Advanced Automotive Fault Diagnosis, Butterworth-Heinemann Publication, Great Britain, 6-21, 113-126.
- Eissa, M. A., Ahmed, M. S., Darwish, R. R., Bassiuny, A. M. 2015. Improved fuzzy Luenberger observer-based fault detection for BLDC motor. IEEE. 2015 Tenth International Conference on Computer Engineering & Systems , 167-174.
- Elman, J. L. 1990. Finding structure in time. Cognitive Science, 14(2): 179-211.
- Frank, P. M. 1990. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results. Automatica, 26(3): 459-474.
- Freitag, G., Klopzig, M., Schleicher, K., Wilke, M., Schramm, M. 2013. High-performance and highly efficient electric wheel hub drive in automotive design. 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), 1-7.
- Gao, X. Z., Ovaska, S. J. 2001. Soft computing methods in motor fault diagnosis, Applied Soft Computing, (1): 73-81.
- Genç, Y., Yanıkoğlu, E. 2016. Statik senkron kompanzatorün bulanık mantık temelli kontrolör ile tasarımı ve analizi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(1): 7-12.
- Ghate, V. N., Dudul, S. V. 2009. Induction machine fault detection using generalized feed forward neural network, Journal of Electrical Engineering & Technology, 4(3): 389-395.
- Ghate, V. N., Dudul, S. V. 2011. Cascade neural-network-based fault classifier for three-phase induction motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(5): 1555-1563.
- Goddu, G., Li, B., Chow, M. Y., Hung, J. C. 1998. Motor bearing fault diagnosis by a fundamental frequency amplitude based fuzzy decision system. Industrial Electronics Society IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998(4): 1961-1965.
- Goyal, S., Goyal, G. K. 2011. Cascade and feedforward backpropagation artificial neural networks models for prediction of sensory quality of instant coffee flavoured sterilized drink. Canadian Journal on Artificial Intelligence, Machine Learning and Pattern Recognition, 2(6): 78-82.
- Haykin, S. 1994. Neural Networks - A Comprehensive Foundation, Macmillan.

- He, P., Dong, Z., Liang, S., Qi, Z., Qiu, H. 2012. A novel design of all-wheel independent steering using regenerative in-wheel motors for a four in-wheel-motor drive electric vehicle. 2012 19th International Conference In Mechatronics and Machine Vision in Practice (2012): 51-55
- Hocine, F., Ahmed, F. 2016. Electric Motor Bearing Diagnosis Based on Vibration Signal Analysis and Artificial Neural Networks Optimized by the Genetic Algorithm. *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations* Springer International Publishing, 277-289.
- Ifedi, C. J., Mecrow, B. C., Brockway, S. T., Boast, G. S., Atkinson, G. J., Kostic-Perovic, D. 2011. Fault-tolerant in-wheel motor topologies for high-performance electric vehicles. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 1310-1315.
- Jacobs, R. A. 1988. Increased Rates of Convergence through Learning Rate Adoption, *Neural Networks*, 1(4): 295-307.
- Juang, C. F. 2004. A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for recurrent network design. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 34(2): 997-1006.
- Karadeniz, M., Yüncü, S., Aydemir, M. T. 2001. Asenkron motorlarda stator direncinin yapay sinir ağları ile tahmini.
- Karakuzu, C. 2011. Nöral ve bulanık sistem hücre aktivasyon yaklaşımları ve FPGA'da donanımsal gerçekleştirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1): 8-16.
- Keleşoğlu, Ö., Fırat, A. 2006. Tuğla duvardaki ve Tesisattaki ısı kaybının yapay sinir ağları ile belirlenmesi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bilimleri. Dergisi*, 18(1): 133-141.
- Keyhani, A., Miri, S. M. 1986. Observers for tracking of synchronous machine parameters and detection of incipient faults. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1986(2), 184-192.
- Kişi Ö., Uncuoğlu, E. 2005. Comparison of three back-propagation training algorithms for two case studies, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 12,(5): 434-442.
- Kliman, G. B., Stein, J. 1990. Induction motor fault detection via passive current monitoring. *International Conference in Electrical Machines*, Cambridge, MA 13-17.

- Koçak, E. 2010. Alternatörlerde Arıza Teşhisinin Gerçek Zamanlı Olarak Gerçekleştirilmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Kok, J. N., Boers, E. J., Kusters, W. A., Van der Putten, P., Poel, M. 2009. Artificial intelligence: definition, trends, techniques, and cases. *Artificial intelligence*, 1-20.
- Köker, R., Öz, C., Çakar, T., Ekiz, H. 2004. A study of neural network based inverse kinematics solution for a three-joint robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 49(3): 227-234.
- Koskela, T., Lehtokangas, M., Saarinen, J., Kaski, K. 1996. Time series prediction with multilayer perceptron, FIR and Elman neural networks. In *Proceedings of the World Congress on Neural Networks*, INNS Press San Diego, USA, 491-496.
- Kulkarni, A. G., Qureshi, M. F., Jha, M., Jogi, V. 2015. Design and development of GUI based model for fault diagnosis of induction motors using interval type-2 fuzzy and genetically tuned interval type-2 fuzzy classifier. *IEEE 10th International Conference on Industrial and Information Systems*, (2015): 88-93
- Levenberg, K. 1944. A method for the solution of certain problems in least squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, (5): 164-168.
- Li, B., Chow, M. Y., Tipsuwan, Y., Hung, J. C. 2000. Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5): 1060-1069.
- Lin, C. T., Lee, C. G. 1996. *Neural fuzzy systems*. Prentice Hall.
- Lippmann, R. P. 1987. An introduction to computing with neural nets. *ASSP Magazine*, IEEE, 4(2): 4-22.
- Liu, X. Q., Zhang, H. Y., Liu, J., Yang, J. 2000. Fault detection and diagnosis of permanent-magnet DC motor based on parameter estimation and neural network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5): 1021-1030.
- Lou, X., Loparo, K. A. 2004. Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference. *Mechanical systems and signal processing*, 18(5): 1077-1095.
- Luo, Y., Tan, D. 2012. Study on the dynamics of the in-wheel motor system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8): 3510-3518.
- Mamdani, E. H. 1974. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 121(12): 1585-1588.

- Mamdani, E. H., Assilian, S. 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1): 1-13.
- Martins, J. F., Pires, V. F., Pires, A. J. 2007. Unsupervised neural-network-based algorithm for an on-line diagnosis of three-phase induction motor stator fault, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1): 259-264.
- Marquardt, D. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11(2): 431-441.
- McCulloch, W.S., Pitts, W. 1943, A logical calculus of ideas immanent in nervous activity, *Bull. Math. Biophys.* (5): 115-133.
- Nandi, S., Toliyat, H. A., Li, X. 2005. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4): 719-729.
- Odabaş, C., Pehlivan, İ., Cinal, D. M. 2009. Bulanık mantık ile güneş enerjisi uygulaması. 5th International Advanced Technologies Symposium, 56-60.
- Öztemel E. 2003. *Yapay Sinir Ağları*, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Patterson, D., Spee, R. 1995. The design and development of an axial flux permanent magnet brushless DC motor for wheel drive in a solar powered vehicle. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(5): 1054-1061.
- Patterson, D. W., 1996. *Artificial neural networks theory and applications*, Prentice Hall, Singapore, 20-36, 56-71, 141-243, 367-404
- Rajagopalan, S., Aller, J. M., Restrepo, J. A., Habetler, T. G., Harley, R. G. 2006. Detection of rotor faults in brushless DC motors operating under nonstationary conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(6): 1464-1477.
- Russel S.J., Norvig P. 1995. *Artificial Intelligence, A Modern Approach*, Prentice Hall.
- Sharma, S., Abed, W., Sutton, R., Subudhi, B. 2015. Corrosion fault diagnosis of rolling element bearing under constant and variable load and speed conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 48(30): 49-54.
- Shi, X. H., Liang, Y. C., Lee, H. P., Lin, W. Z., Xu, X., Lim, S. P. 2004. Improved Elman networks and applications for controlling ultrasonic motors. *Applied Artificial Intelligence*, 18(7): 603-629.
- Simoes, M. G., Bose, B. K. 1995. Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(3): 620-629.

- Simões, M. G., Vieira Jr, P. 2002. A high-torque low-speed multiphase brushless machine-a perspective application for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(5): 1154-1164.
- Song, Q. 2010. On the weight convergence of Elman networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 21(3): 463-480.
- Sood, A. K., Fahs, A. A., Henein, N. A. 1985. Engine fault analysis: Part II--- parameter estimation approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1985(4): 301-307.
- Sousa, G. C., Bose, B. K. Cleland, J. G. 1995. Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 42(2): 192-198.
- Svozil, D., Kvasnicka, V., Pospichal, J. 1997. Introduction to multi-layer feed-forward neural networks, *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 39(1): 43-62.
- Şimşir, M., Bayır R., Uyaroğlu, Y. 2016a. Real-time monitoring and fault diagnosis of a low power hub motor using feed forward neural network, *Computational Intelligence and Neuroscience*, (2016): 1-13.
- Şimşir, M., Bayır R., Uyaroğlu, Y. 2016b Real-time fault diagnosis of hub motors using a fuzzy-logic controller, *Electronics World*, 2016(3):18-20.
- Tahami, F., Kazemi, R., Farhanghi, S., Samadi, B. 2002. Fuzzy based stability enhancement system for a four-motor-wheel electric vehicle. *SAE Conference Proceedings*, 259-268.
- Tallam, R. M., Habetler, T. G., Harley, R. G., Gritter, D. J., Burton, B. H. 2000. Neural network based on-line stator winding turn fault detection for induction motors. *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference*, 2000(1):. 375-380.
- Tashakori, A., Ektesabi, M. 2013. Fault diagnosis of in-wheel BLDC motor drive for electric vehicle application. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*,. 925-930. IEEE.
- Timperley, J. 1983. Incipient fault identification through neutral RF monitoring of large rotating machines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 3(102): 693-698.
- Türkmenoğlu, V., Aktaş, M., Karataş, S., Okumuş, H. İ. 2014. Soft-set based switching faults decision making in DTC induction motor drives. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 24(2): 1-14.

- Uysal, A., Bayir, R. 2013. Real-time condition monitoring and fault diagnosis in switched reluctance motors with Kohonen neural network. *Journal of Zhejiang University Science C*, 14(12), 941-952.
- Van Schalkwyk, D. J., Kamper, M. J. 2006. Effect of hub motor mass on stability and comfort of electric vehicles. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'06*, 1-6.
- Vas P. 1993. *Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines*, Clarendon Press, Oxford.
- Wang, R., Wang, J. 2011. Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(9): 4276-4287.
- Wang, R., Chen, Y., Feng, D., Huang, X., Wang, J. 2011. Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors. *Journal of Power Sources*, 196(8): 3962-3971.
- Wu, S., Song, L., Cui, S. 2007. Study on improving the performance of permanent magnet wheel motor for the electric vehicle application. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(1): 438-442.
- www.mabuchi-motor.co.jp, Erişim Tarihi: 15.03.2016.
- www.mako.com.tr, Erişim Tarihi: 15.05.2014.
- Yang, Y. P., Luh, Y. P., Cheung, C. H. 2004. Design and control of axial-flux brushless DC wheel motors for electric vehicles-part I: Multiobjective optimal design and analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(4): 1873-1882.
- Yardımcı, A., Ferikoğlu, A., Hadimioğlu, N. 2001. Depth control of sevofluorane anesthesia with microcontroller based fuzzy logic system. In *Engineering in Medicine and Biology Society, Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE (2)*: 1649-1652.
- Yu H. Wilamowski B. M., 2011. Levenberg–Marquardt Training, *Industrial Electronics Handbook 2nd Edition*, CRC Press, 5(12):12.1- 12.15.
- Yumuşak, N., Temurtaş, F., Çerezci, O., Öztürk. Z. Z. 1997. Yapay sinir ağı çıkışında oluşturulan bulanık kümelerin ‘back propagation’ algoritması ile ayrıklaştırılması ,*EMO Elektrik - Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi*, 47-50.
- Zadeh, L. A. 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3): 199-249.

Zidani, F., Benbouzid, M. E. H., Diallo, D., Nait-Said, M. S. 2003. Induction motor stator faults diagnosis by a current Concordia pattern-based fuzzy decision system. IEEE Transactions on Energy Conversion, 18(4): 469-475.



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet ŞİMŞİR 30.07.1982'de Gerede'de doğdu. İlkokulu Gerede'de Halil Nom İlkokulu'nda, ortaokul ve liseyi ise Bolu İzzet Baysal Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden Elektrik-Elektronik Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 2007 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimini tamamlayan Mehmet ŞİMŞİR, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programı öğrencisidir.