



**ASENKRON MOTORLARDA İSTATİSTİKSEL PROSES KONTROL**

**YÖNTEMİ İLE ARIZA TESPİTİ**

**EMRAH ESER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN**

**Mayıs - 2018**

**Her hakkı saklıdır**

**T.C.  
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ASENKRON MOTORLARDA İSTATİSTİKSEL PROSES  
KONTROL YÖNTEMİ İLE ARIZA TESPİTİ**

**Emrah ESER**

**TOKAT  
Mayıs - 2018**

Her hakkı saklıdır



**Bu tez çalışması;**

**Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından  
2017/60 nolu proje ile desteklenmiştir.**

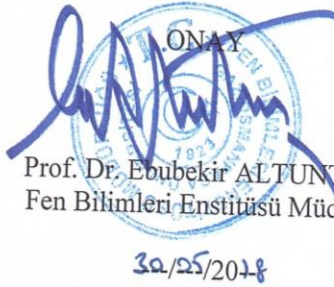
Emrah ESER tarafından hazırlanan “Asenkron Motorlarda İstatistiksel Proses Kontrol Yöntemi İle Arıza Tespiti” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 25 MAYIS 2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN  
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi  
Üye  
Doç. Dr. Mehmet Burak BİLGİN  
Amasya Üniversitesi  
Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Cem EMEKSİZ  
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

  
.....  
  
.....  
  
.....

  
ONAY  
Prof. Dr. Ebubekir ALTUNTAŞ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü  
30/05/2018

## TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdığı yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.



Emrah ESER

25 Mayıs 2018

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### ASENKRON MOTORLARDA İSTATİSTİKSEL PROSES KONTROL YÖNTEMİ İLE ARIZA TESPİTİ

EMRAH ESER

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN)

Asenkron motorlar sağlam ve basit yapıları, maliyetinin düşük olması ve bakım maliyetlerinin az olması nedeni ile sanayinin en çok tercih ettiği motorlardandır. Asenkron motorlarda oluşabilecek arızalar bakım onarım masraflarını artıracaktır. Ayrıca bu motorların arızalanması endüstride üretim maliyetlerini artıracığı gibi zaman kaybına da neden olacaktır. Bu nedenlerden dolayı asenkron motorlarda oluşacak arızaların başlangıç anında, arıza büyümeden tespit edilmesi ve arızanın gelişiminin izlenmesi oldukça önemlidir. Arızaların analizi ve tespiti, durum izleme teknikleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Durum izleme istatistiksel veriler ile yapılabilmektedir. Bu çalışmada endüstride üretim kalitesini artırmak için yaygın olarak kullanılan istatistiksel proses kontrol yöntemi, asenkron motorda arıza tespiti için literatürde ilk defa uygulanmıştır. Motorda eksenden kaçıklık ve stator sargı arızaları suni olarak oluşturulmuştur. Yapılan deneylerde farklı yük ve hız koşulları altında arızalı ve sağlam motor akım sinyalleri toplanmıştır. Toplanan sağlam motor akım verisinden istatistiksel proses kontrol yöntemi kullanılarak kaliteli çalışma aralıkları hesaplanmıştır. Arızalı motor akım verisi elde edilen kaliteli çalışma aralığı üzerinde değerlendirilerek asenkron motorda oluşan arıza durumları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin asenkron motorların hem elektriksel hem de mekaniksel arızalarının tespitinde başarı ile uygulanabileceğini göstermiştir.

2018 , 92 SAYFA

**ANAHTAR KELİMELELER:** Asenkron motor, durum izleme, stator sargı arızası, eksenden kaçıklık arızası, istatistiksel proses kontrol.

## **ABSTRACT**

### **MASTER THESIS**

#### **TITLE OF THE THESIS**

#### **FAULT DETECTION BY STATISTICAL PROCESS CONTROL METHOD IN INDUCTION MOTORS**

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING**

**SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR., ZAFER DOĞAN**

Induction motors are the most preferred engines of the industry due to their robust and simple construction, low cost and low maintenance costs. Failures occurring in induction motors will increase maintenance and repair costs. Moreover, the failure of these engines will increase the production costs of the industry as well as cause a waste of time. For these reasons, it is very important to detect failures at the beginning of failures that occur in asynchronous motors and to monitor the development of failures. Analysis and detection of failures are realized by state monitoring techniques. The condition monitoring statistic can be done with the data. In this study, the commonly used statistical process control method to increase the production quality of the industry was applied for the first time in the literature for asynchronous motor fault diagnosis. The motor's eccentricity and the stator windings faults are artificially created. Under the different load and speed conditions, defective and robust motor current signals are collected in the experiments. Quality operating ranges are calculated using the statistical process control method from the robust motor current data collected. Fault conditions occurring in the asynchronous motor have been determined by evaluating the faulty motor current data obtained over the quality working range. The results obtained show that the proposed method can be applied successfully in detecting both electrical and mechanical failures of asynchronous motors.

2018, 92 Page

**KEYWORDS:** Induction motor, condition monitoring, stator windings fault, eccentricity fault, statistical process control.

## ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında çalışmalarım boyunca her türlü konuda fikir ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarım beni yönlendirip çok büyük katkı sağlayan kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN'a, ayrıca çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve çalışmalarım sabır gösteren eşim Özlem ESER'e ayrıca hayatıma renk katan biricik kızım Amine Nur'a teşekkürlerimi sunarım.



Emrah ESER

25 Mayıs 2018



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1.Üç Fazlı Asenkron Motorlar .....	4
2.1.1.Asenkron motorların yapısı.....	4
2.1.2.Üç fazlı asenkron motorun matematiksel modeli .....	8
2.2.Asenkron Motorlarda Meydana Gelen Arızalar .....	12
2.2.1.Mekaniksel arızalar .....	13
2.2.2.Elektriksel arızalar .....	16
1.2.Asenkron Motor Arıza Tespit Metotları.....	21
2.4. Arıza Tespitinde Kullanılan Sinyal İşleme Yöntemleri.....	25
2.4.1. İstatistiksel proses kontrol.....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	39
3.1. Deneysel Çalışma .....	39
3.1.1. Deney Düzenegi.....	40
3.1.2. Arıza Durumlarının Oluşturulması .....	44
3.2. Akım Sinyal Verisinin Toplanması .....	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	47
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	68
6. KAYNAKLAR.....	72
7. EKLER.....	77
8. ÖZGEÇMİŞ .....	78

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$i_{abcs}$	Stator faz akımları
$i_{abcr}$	Rotor faz akımları
$r_{abcs}$	Stator faz sargıları etkin direnci
$r_{abcr}$	Rotor faz sargıları etkin direnci
$\lambda_{abcs}$	Stator sargıları toplam akısı
$\lambda_{abcr}$	Rotor sargıları toplam akısı
$V_{abcs}$	Stator faz gerilimleri
$V_{abcr}$	Rotor faz gerilimleri
$L_{sm}$	Stator mıknatıslanma endüktansı
$L_{rm}$	Rotor mıknatıslanma endüktansı
$M_{sr}$	Stator ile rotor faz sargıları arası maksimum ortak edüktans
$L_{sr}$	Stator ve rotor arası ortak endüktans
$L_{ss}$	Stator sargısı öz endüktans
$L_{rr}$	Rotor sargısı öz endüktansı
$\theta$	Rotor konumu
$\lambda$	Toplam akı matrisi
$V$	Rotor ve stator gerilimleri matrisi
$R$	Rotor ve stator etkin dirençleri matrisi
$L^{-1}$	Endüktans değişimi matrisinin tersi
$i$	Rotor ve stator akımları matrisi
$L$	Endüktans değişim matrisi
$\omega_r$	Rotor hızı
$P$	Kutup sayısı
$j$	Rotor ataleti
$T_e$	Elekromagnetik moment
$T_L$	Yük momenti
$F$	Sürtünme kuvveti
$f_{eksen}$	EK arıza frekansı
$f_e$	Elektriksel besleme frekansı

$s$	Kayma
$f_{sa}$	SSA frekansı
$x_i$	Sistemden alınan örneklem
$\bar{X}$	Örneklemin Ortalaması
$\bar{\bar{X}}$	Grup ortalamalarının ortalaması
$n$	Bir gruptaki örneklem sayısı
$m$	Örneklem grup(durum izle) sayısı
$A_2$	Değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör
$A_3$	Değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör
$D_3$	Değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör
$D_4$	Değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör
$\sigma$	Standart sapma
$X_{max}$	En büyük ölçülen veri
$X_{min}$	En küçük ölçülen veri
$R$	Ölçülen değerlerin en büyüğü ile en küçüğü arasındaki fark
$\bar{R}$	Her grubun en büyük ve en küçük değer farklarının ortalaması
$S$	Standart Sapma
$\bar{S}$	Standart sapma değerlerinin ortalaması
$B_3$	Değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör
$B_4$	Değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör
$\bar{p}$	Ortalama kusurlu yüzdesi
$P$	Kusurlu ürün sayısı
$k$	Toplam kontrol edilen ürün sayısı
$c$	Toplam hata sayısı
$\bar{c}$	Ortalama kusurlu yüzdesi

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ASM	Asenkron motor
EK	Eksenden kaçıklık
SSA	Stator sargı arızası
SSA <sub>1</sub>	1. Seviye stator sargı arızası
SSA <sub>2</sub>	2. Seviye stator sargı arızası
İPK	İstatistiksel proses kontrol
MÇ	Merkezi çizgi
AKL	Alt kontrol limiti
UKL	Üst kontrol limiti
SD	Süreç değişkeni

## ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motor kesiti .....	5
Şekil 2.2. Asenkron motor statoru ve gövdesi .....	6
Şekil 2.3. Sincap kafesli rotor .....	7
Şekil 2.4. Bilezikli rotor .....	7
Şekil 2.5. Üç faz simetrik ASM'nin manyetik eskende gösterimi.....	9
Şekil 2.6. Sincap kafesli ASM arıza durumu şeması .....	13
Şekil 2.7. Rulman kesiti.....	14
Şekil 2.8. Eksenden Kaçıklık.....	15
Şekil 2.9. Üç fazlı ASM'de stator sargı kısa devreleri.....	19
Şekil 2.10. Üç fazlı ASM'de stator sargı kısa devre arızaları.....	19
Şekil 2.11. Örnek Süreç Kontrol Grafiği.....	29
Şekil 2.12. İPK uygulamaları için blok diyagramı.....	30
Şekil 2.13. Kontrol limitleri dışında nokta bulunma durumu .....	31
Şekil 2.14. Grafikte noktaların merkez çizginin altında olması durumu.....	31
Şekil 2.15. Sürecin artan ya da azalan noktalar ile ilerlemesi .....	32
Şekil 2.16. Sürecin periyodik ilerlemesi.....	32
Şekil 2.17. $3\sigma$ çizgisi yakınındaki her 3 noktadan 2 sinin $2\sigma$ çizgisi dışında olması.....	33
Şekil 3.1. Arıza tespit şeması.....	39
Şekil 3.2. Deney düzeneği .....	40
Şekil 3.3. Hız kontrol cihazı ve 0,75kW'lık ASM.....	41
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan motorlar .....	41
Şekil 3.5. Lazer eksenleme cihazı .....	42
Şekil 3.6. LabVIEW SignalExpress 2010 ekran ara yüzü .....	44
Şekil 3.7. Statik EK'nın oluşturmasında kullanılan rulman şekilleri .....	45
Şekil 4.1. Üç fazlı ASM akım sinyali.....	49
Şekil 4.2. Deney-1 yüksüz durumda $X-S$ kontrol grafikleri .....	49
Şekil 4.3. Deney-1 %50 durumda $X-S$ kontrol grafikleri .....	50
Şekil 4.4. Deney-1 %100 yüklü durumda $X-S$ kontrol grafikleri.....	51
Şekil 4.5. Deney-2 yüksüz durumda $X-S$ kontrol grafikleri .....	49
Şekil 4.6. Deney-2 %50 yüklü durumda $X-S$ kontrol grafikleri .....	54
Şekil 4.7. Deney-2 %100 yüklü durumda $X-S$ kontrol grafikleri.....	55
Şekil 4.8. Deney-3 yüksüz durumda $X-S$ kontrol grafikleri .....	53
Şekil 4.9. Deney-3 %50 yüklü durumda $X-S$ kontrol grafikleri .....	54
Şekil 4.10. Deney-3 %100 yüklü durumda $X-S$ kontrol grafikleri.....	59
Şekil 4.11. Deney-4 1000 d/d hızda $X-S$ kontrol grafikleri .....	61
Şekil 4.12. Deney-4 2000 d/d hızda $X-S$ kontrol grafikleri .....	62
Şekil 4.13. Deney-4 2991 d/d hızda $X-S$ kontrol grafikleri .....	63
Şekil 4.14. Deney-5 1000 d/d hızda $X-S$ kontrol grafikleri .....	64
Şekil 4.15. Deney-5 2000 d/d hızda $X-S$ kontrol grafikleri .....	66
Şekil 4.16. Deney-5 2991 d/d hızda $X-S$ kontrol grafikleri .....	67

## ÇİZELGE LİSTESİ

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. ASM'lerin parametre değerleri.....	40
Çizelge 3.2. Fuko freni parametre değerleri. ....	41
Çizelge 4.1. Deney-1 yüksüz durumda $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri.....	49
Çizelge 4.2. Deney-1 %50 yüklü durumda $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri. ....	51
Çizelge 4.3. Deney-1 %100 yüklü durumda $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri. ..	52
Çizelge 4.4. Deney-4 1000 d/d hızda $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri.....	61
Çizelge 4.5. Deney-4 2000 d/d hızda $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri.....	63
Çizelge 4.6. Deney-4 2991 d/d hızda $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri.....	64

## 1. GİRİŞ

Elektrik motorları sanayinin en önemli tahrik elemanlarından biri olmasının yanında günlük hayatın birçok noktasında da yoğun olarak kullanılmaktadır. Dünya’da tüketilen elektrik enerjisinin %45’ini elektrik motorlu sistemler tüketmektedir. Sanayide ise bu tüketilen elektrik enerjisinin %64’ü elektrik motorlu sistemler tarafından tüketilmektedir. Ülkemize bakıldığında sanayide tüketilen elektrik enerjisinin %70’ini, tüm elektrik enerjisi tüketiminin ise %36’sını üç fazlı Asenkron Motor (ASM) tek başına tüketmektedir(Soy, 2016). Bu motorlar basit yapılı, fiyat olarak ekonomik ve bakım gereksinimlerinin az olması nedenleri ile sanayinin en çok tercih ettiği elektrik motoru tipidir (Akar ve ark, 2011; Ünsal ve Karakaya, 2015).

Sanayide yaygın bir şekilde kullanılan ASM ağır çalışma koşulları ve birçok bozucu etki altında çalışmaktadır. Dengesiz yüklenme, sık dur-kalk ve besleme geriliminin dalgalanması vb. gibi etkiler ile nem, toz ortam sıcaklığı gibi çevresel etkiler motorda elektriksel ve mekaniksel arızaları oluşturmaktadır. Mekaniksel arızalardan rulman arızaları ve Eksenden Kaçıklık (EK) arızası ile Elektriksel arızalardan Stator Sargı Arızası (SSA), rotor çubuk kırığı arızası ve rotor halkası kırığı arızası, sürücü arızası Sincap Kafesli ASM’de görülen arızalardandır (Kumar ve ark, 2010).

Arızalı bir ASM’nin sistemde kalması düşük verimle çalışmaya devam etmesi demektir. Endüstride düşük verimle çalışan motor ise maliyetin artmasına neden olmaktadır. Motor arızalarına vaktinde müdahale edilmez ise istenmeyen bir zamanda sistemin durmasına neden olabilir. Plansız yaşanacak durmalar ise kalite, zaman ve ekonomik kayıpları ortaya çıkaracaktır (Vas, 1993;Eser ve Doğan, 2017).

ASM’de oluşan arızaları boyutları büyümeden belirlemek ve türünü tespit etmek için durum izleme teknikleri kullanılmaktadır. Motor durum izleme ile bakım zamanı, malzemeleri önceden belirlenebilir ve maliyetleri düşürülebilir. Motorun durumu sürekli izlenebildiği gibi periyodik aralıklarla da izlenebilmektedir. ASM’nin durum izlemesinde genellikle titreşim, akustik, kimyasal, manyetik, termal ve elektriksel veriler kullanılmaktadır. Veri toplama işleminin kolaylığı ve ilave malzeme ihtiyacının fazla olmaması nedeniyle akım sinyal verisinin kullanımı yaygın bir durum izleme tekniğidir (Eftekhari ve ark, 2013; Godoy ve ark., 2015).

Durum izleme ile oluşturulan veri sinyalleri zaman, frekans, zaman-frekans vb. gibi yöntemlerle analiz edilerek özellikleri çıkartılabilmekte ve arıza tespiti yapılabilmektedir. Zaman boyutun da analiz işlemi başka matematiksel işlemlere gerek kalmadan ham veri üzerinden arıza tespiti yapılabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı analiz işlemi oldukça hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmalarda zaman boyutunda analiz sıkça kullanılmış ve sinyallerin ortalama, tepe, basıklık gibi istatistiksel verisi ile motorlarda arıza durumu belirlenmiştir (Günel ve Gerek, 2009; Cabal ve ark, 2009). İstatistiksel bir analiz yöntemi olarak endüstri mühendisliği alanında yaygın olarak İstatistiksel Proses Kontrol (İPK) yöntemi kullanılmaktadır. İPK üretim sisteminde kaliteyi artırmak, hataları belirlemek ve sürecin daha verimli ilerlemesini sağlamak için geliştirilmiş istatistiksel bir tekniktir. İPK’da analiz yöntemlerinden kontrol grafikleri en fazla kullanılan yöntemlerinden biridir. X eksenine paralel çizilen alt ve üst limitler ile kaliteli çalışma aralığı oluşturulmaktadır. Süreç kontrol grafikleri ile denetlenmekte ve olumsuz durumlar tespit edilmektedir (Stapenhurst 2013; Birgören 2015).

Bu tez çalışmasının amacı; ASM’nin akım verisine dayalı durum izlemesi yapılarak, zaman boyutunda İPK yöntemi yoluyla arıza başlama anının belirlenmesi ve arıza gelişim sürecinin izlenmesidir. Yapılan çalışma ile endüstride kullanılan ASM’ler için istemsiz durmalar yaşanmadan arızayı önlemek mümkün olacak, böylelikle kısa sürede arıza teşhisi yapılabilecektir. Arızalar nedeniyle ortaya çıkan verimsizliğin azaltılması sağlanacak ve bakım maliyetleri azaltılacaktır.

Bu çalışmada ASM’nin elektriksel ve mekaniksel arızaları İPK yöntemi ile analiz edilerek arıza tespiti gerçekleştirilmiştir. Elektriksel ve mekaniksel arızaların İPK yöntemiyle analizinde iki arıza ele alınmıştır. Bu arızalardan statik EK arızası farklı yük sabit hız ve sabit yük farklı hız koşulları altında olmak üzere iki farklı çalışma durumunda ve iki farklı güç değerlerindeki ASM’lerde incelenmiştir. Sarım-Sarım SSA durumu ise farklı yük sabit hız koşulunda iki kademe incelenmiştir. Bu arıza durumları motorda suni olarak oluşturmuştur. Kurulan deney düzeneklerinden ASM akım sinyal verisi sağlam ve arızalı durumlar için toplanmıştır.

ASM sağlam durum verisi üzerinden İPK yöntemi kullanılarak kaliteli çalışma aralıkları hesaplanmıştır. Arızalı durum motor verisi hesaplanan bu kaliteli çalışma aralıkları



üzerine işlenerek kontrol dışı kalınan noktalarda arızanın varlığı ve zamanı, kontrol grafikleri üzerinden tespit edilmiştir.

Bu çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. Tezin 1. Bölümünde genel olarak giriş yapılmış ve tezin amacı ve önemi açıklanmıştır. Tezin 2. Bölümünde ASM'nin yapısı ve matematiksel modeli, ASM'de oluşan arızalar ve tespit metotları verilmiş ve arıza tespitinde kullanılan İPK açıklanmıştır. Tezin 3. Bölümünde yapılan deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tezin 4. Bölümünde deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmuş ve tartışmaları yapılmıştır. Tezin 5. Bölümünde sonuçlar açıklanmıştır.



## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1. Üç Fazlı Asenkron Motorlar**

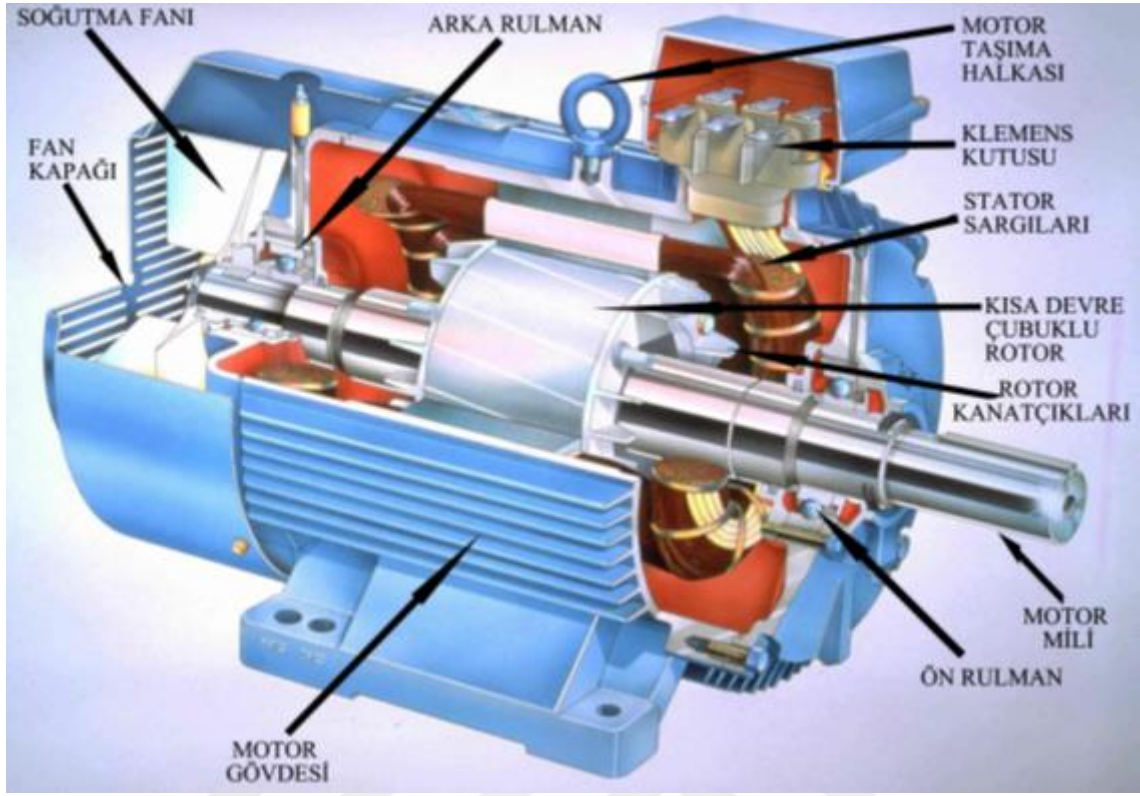
Endüstrideki gelişmeler ve günlük yaşam kolaylıkları açısından mekanik enerji ihtiyacı zaman ilerledikçe artmaktadır. Elektrik enerjisi motorlar ile kolay ve verimli bir şekilde mekanik enerjiye dönüştürüldüğü için elektrik motorları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Birçok elektrik motoru çeşidi bulunmasına rağmen en çok tercih edilen ASM'dir. A.B.D.'li bilim adamı Nikola Tesla alternatif akım makinalarının temelini oluşturan döner manyetik alanı 1888 yılında keşfetmiş ve ilk asenkron makineyi icat etmiştir (Doğruer 2012; Ünsal ve Güçlü 2015).

Asenkron motorlar yapısal olarak basit ve dayanıklı, hacim güç oranında diğer motorlara oranla daha iyi orana sahip olması, alternatif akım ile çalışma özelliğinden dolayı şebeke ile direkt veya sürücü yardımı ile çalışmaları, değişik fazlarda çalışma özelliği ve ucuz olmaları nedeni ile endüstriyel alanlarda ve meskenlerde oldukça tercih edilmektedir (Aydın ve ark 2009 ; Rekha ve Ravi 2017).

#### **2.1.1. Asenkron motorların yapısı**

Stator ve rotor olmak üzere ASM iki temel kısımdan oluşmaktadır. ASM'nin duran kısmı stator, hareket eden yani dönen kısmı ise rotor olarak adlandırılmaktadır. Boşta çalışma akımı küçük olması için stator ile rotor arasındaki hava mümkün olduğu kadar küçük yapılmaktadır. Üç fazlı sincap kafesli ASM yapısı Şekil 2.1' de görülmektedir.



Şekil 2.1. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motor kesiti (Doğan 2012)

### Stator

Gövde üzerine oturtulmuş nüve ve sargılar statoru oluşturmaktadır. Nüve birer yüzeyleri yalıtılmış ve üzerinde sargıların yerleştirilmesi için oluklar bulunan 0,5 mm kalınlığında sacların preslenmesi ile yapılmaktadır. Özel kalıplar kullanılarak, belirli teknikler ile sarılan tellerin nüvede bulunan oluklara yerleştirilmesiyle stator sargıları oluşturulmaktadır. Stator kutup sayısı iki veya ikinin katları şeklinde tasarlanmaktadır. Sargı uçları elektriksel bağlantının yapılabilmesi için klemens kutusunda belirlenen yerlere montajlanmaktadır. Bu bağlantı uçlarına üç fazlı alternatif akım uygulanması ile rotorun dönmesi için gerekli olan döner manyetik alan sağlanmaktadır (Sarioğlu ve ark, 2003; Chapman ve ark 2007). Şekil 2.2’de ASM’nin statoru görülmektedir.



Şekil 2.2. Asenkron motor statoru ve gövdesi

### Rotor

Rotor ASM’de mekaniksel enerjinin oluştuğu bölümdür ve motor mili üzerine sabitlenmektedir. Rotor yapısı itibari ile sincap kafesli (kısa devre çubuklu) ve sargılı (bilezikli) olmak üzere iki çeşittir. Sincap kafesli ASM, yapısının basit ve sağlam olmasından dolayı 5 kW’dan küçük motorlarda çoğunlukla tercih edilmektedir (Sarioğlu ve ark 2003).

Rotor birer yüzeyi yalıtılmış sacların preslenerek silindir şeklinde paketlenmesi, bu kalıpta oluşan kanallar içerisine döküm tekniği ile yerleştirilen alüminyumun her iki taraftaki uçlarından kısa devre edilmesi ile oluşmaktadır. Kanallar motorun ürettiği torkta (momentte) vuruntular oluşmaması için rotor mili ile belli bir eksen yapacak şekilde eğimli olarak yapılmaktadır. Alüminyum döküm ile metal yataklar birbirine temas etmesine rağmen farklı direnç değerlerine sahiptirler bu nedenle rotor çubuklar tek spirli sargı yapısındadır. Kısa devre halkaları üzerindeki çıkıntılar rotoru soğutmak ve balans ayarı için kullanılmaktadır (Çolak, 2017). Şekil 2.3’de sincap kafesli ASM rotor yapısı görülmektedir.



Şekil 2.3. Sincap kafesli rotor

Bilezikli rotor yapısında mil üzerinde rotor ile beraber bileziklerde bulunmaktadır. Sac paketlerin preslenmesi ile yapılan rotorun kanallarına statorda olduğu gibi iletken teller yerleştirilir. Üç fazlı alternatif akım sargılarının birer uçları genelde yıldız bağlanır diğer uçları ise bileziklere monte edilmektedir. Bilezikler üzerine temas eden fırçalara yapılan bağlantı ile sargı uçları klemens kutusuna çıkartılır. Bilezikli rotor yapısına sahip motorlarda en fazla arıza veren kısım bilezik fırça düzeneğidir (Doğruer 2012; Çolak 2017). Bilezikli rotor yapısı Şekil 2.4’de görülmektedir.



Şekil 2.4. Bilezikli rotor

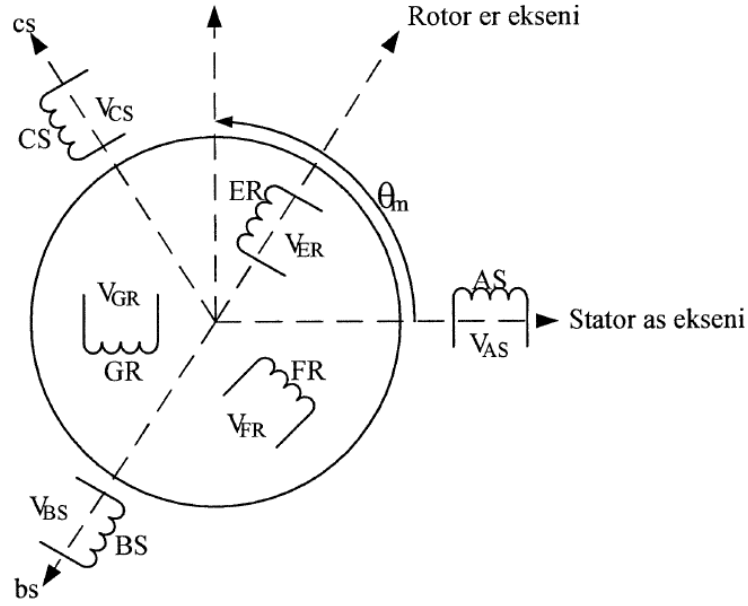
Bilezikli ASM'ler sincap kafesli ASM'lere göre pahalı olmaları ve fırça bilezik düzeneğinden dolayı bakım ihtiyacının fazla olması nedeniyle 5 kW'dan küçük ASM'lerde daha az tercih edilmektedirler.

### **2.1.2. Üç fazlı asenkron motorun matematiksel modeli**

Son zamanlarda gelişen bilgisayar yazılımları ile ASM modeli oluşturmak ve analizini yapmak yaygın olarak kullanılan tekniklerdendir. Model oluşturmak ve analiz yapabilmek için doğru matematiksel ifadeler kullanmak sonuçların gerçeğe yakın olması için oldukça önem arz etmektedir (Demirbaş ve ark., 2006). ASM'nin fiziksel yapısı aşağıdaki kabuller esas alınarak çıkarılmıştır.

- ASM hava aralığı dağılımları düzgündür,
- Manyetik devre ideal kabul edilir ve nüve doyuma ulaşmaz doğrusal bölgede çalıştırılır,
- Hava aralığında akı yoğunluğu, yüzeye  $90^\circ$  ile gelir,
- Fuko ve histeresiz kayıpları ile akım yığılması ihmal edilir,
- Sıcaklık ve frekanstaki değişimler ile oluşacak parametre değişimleri ihmal edilir,
- Üç fazlı stator sargılarının oluklara tam olarak  $120^\circ$  elektriki açı ile yerleştirildiği kabul edilir(Sarioğlu ve ark 2003).

Bir ASM'nin benzetiminde simetrik üç fazlı benzetim ve iki eksene indirgenmiş benzetim olmak üzere iki çeşit model kullanılmaktadır. Stator ve rotorun manyetik eksen düzleminde yerleşimi Şekil 2.5'de görülmektedir.



Şekil 2.5. Üç faz simetrik ASM'nin manyetik ekseninde gösterimi (Demirbaş ve ark., 2006)

Üç fazlı simetrik olan ASM'nin matris formulu gerilim denklemleri aşağıda verildiği gibi yazılır (Demirbaş ve ark., 2006).

$$V_{abcs} = r_{abcs} i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (2.1.2.1)$$

$$V_{abcr} = r_{abcr} i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (2.1.2.2)$$

Eşitliklerdeki  $s$  ve  $r$  indisleri stator ve rotordaki değişkenleri ile parametreleri tanımlamaktadır.  $r_s$  ile  $r_r$  köşegen matrislerdir. Stator ve rotorun dirençlerini tanımlayan matrisler aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir.

$$r_{abcs} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (2.1.2.3)$$

$$r_{abcr} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (2.1.2.4)$$

Stator devresinin gerilim denklemi eşitlik 2.1.2.5' deki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{as} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.1.2.5)$$

Rotor devresinin gerilim denklemi eşitlik 2.1.2.6' deki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & r_{br} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{br} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.1.2.6)$$

Eşitliklere verilen  $V_{abcs}$  stator faz gerilimlerini(V),  $V_{abcr}$  rotor faz gerilimlerini(V),  $r_{abcs}$  stator faz sargıları etkin direncini( $\Omega$ ),  $r_{abcr}$  rotor faz sargıları etkin direncini( $\Omega$ ),  $\lambda_{abcs}$  stator sargıları toplam akısını(Weber) ve  $\lambda_{abcr}$  rotor sargıları toplam akısını(Weber) ifade etmektedir.

Akım ile akı arasındaki bağlantı elektromagnetik sistemde eşitlik 2.1.2.7'de verildiği gibidir.

$$\lambda = L \cdot i \quad (2.1.2.7)$$

Eşitlik 2.1.2.7'de verilen denklem ASM modeline uygulanırsa stator ve rotor eksenlerinin akıları eşitlik 2.1.2.8'deki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.1.2.8)$$

Sargı endüktansları aşağıda verilen eşitliklerdeki gibidir.

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ss} & -\frac{1}{2}L_{sm} & -\frac{1}{2}L_{sm} \\ -\frac{1}{2}L_{sm} & L_{ss} & -\frac{1}{2}L_{sm} \\ -\frac{1}{2}L_{sm} & -\frac{1}{2}L_{sm} & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (2.1.2.9)$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{rr} & -\frac{1}{2}L_{rm} & -\frac{1}{2}L_{rm} \\ -\frac{1}{2}L_{rm} & L_{rr} & -\frac{1}{2}L_{rm} \\ -\frac{1}{2}L_{rm} & -\frac{1}{2}L_{rm} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.1.2.10)$$



$$L_{rr}(\theta) = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.1.2.11)$$

Eşitliklerde verilen  $L_{sm} = L_{rm} = M_{sr}$  ;  $L_{ss} = L_{sl} + L_{sm}$  ;  $L_{rr} = L_{rl} + L_{rm}$ ,  $L_{sm}$  stator mıknatıslanma endüktansını(H),  $L_{rm}$  rotor mıknatıslanma endüktansını(H),  $M_{sr}$  stator faz sargısıyla rotor faz sargısı arası maksimum ortak edüktansı(H),  $L_{sr}$  stator ve rotor arası ortak endüktansı(H),  $L_{ss}$  stator sargısı öz endüktansını(H)  $L_{rr}$  rotor sargısı öz endüktansını(H),  $\theta$  rotor konumunu ifade etmektedir.

Endüktansın rotor konumu ile değişimi eşitlik 2.1.2.12' de verilen matris ile hesaplanır.

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr}(\theta) \\ L_{sr}(\theta)^T & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.1.2.12)$$

Toplam akı değeri eşitlik 2.13'den hesaplanır.

$$\frac{d\lambda}{dt} = V - R \cdot L^{-1} \lambda \quad (2.1.2.13)$$

Burada  $\lambda$  toplam akı matrisini(Weber),  $V$  rotor ve stator gerilimleri matrisini(V),  $R$  rotor ve stator etkin dirençleri matrisini( $\Omega$ ) ve  $L^{-1}$  endüktans değişimi matrisinin tersini(1/H) ifade etmektedir.

Rotor ve stator akım değerleri eşitlik 2.1.2.14'den hesaplanabilir.

$$\frac{di}{dt} = L^{-1}(v - R \cdot i - \omega_r \frac{dL}{d\theta} i) \quad (2.1.2.14)$$

Burada  $i$  rotor ve stator akımları matrisini(A),  $L$  endüktans değişim matrisini(H),  $\omega_r$  rotor hızı(rad/s) ve  $\theta$  rotor ile stator eksenleri arasındaki açıyı ifade etmektedir.

Rotor hızı eşitlik 2.1.2.15'den hesaplanabilir.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2j} ((T_e - T_L) - F \cdot \frac{d\theta}{dt}) \quad (2.1.2.15)$$

Burada  $P$  Kutup sayısını,  $j$  rotor ataletini(kg.m<sup>2</sup>),  $T_e$  elektromagnetik momenti(Nm),  $T_L$  yük momentini(Nm) ve  $F$  sürtünme kuvvetini (kg.m) ifade etmektedir.

Elektromagnetik moment ise eşitlik 2.1.2.16'dan hesaplanabilir.

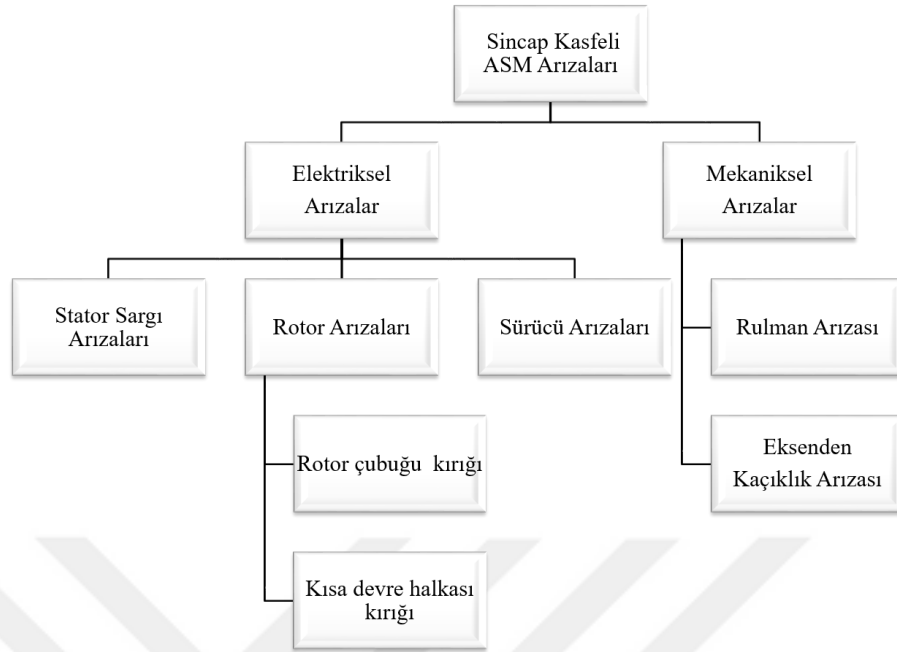
$$T_e = \frac{P}{4} i^T \frac{dL}{d\theta} i \quad (2.1.2.16)$$

## 2.2. Asenkron Motorlarda Meydana Gelen Arızalar

Elektrik motorları endüstride yoğun çalışma şartlarında tozlu, nemli, değişken ısı vb. birçok farklı ortamda çalışmaktadırlar. Bu zorlu çalışma koşullarından başka elektriksel ve mekaniksel zorlanmalar motorlarda arıza oluşumuna sebep olmaktadır. ASM'lerde arızalar elektriksel ve mekaniksel arızalar olmak üzere 2 ana başlık altında incelenmektedir (Doğan, 2012 ; Das, 2017).

ASM'ler tüm elektrik motorları arasında yapısının basit, fiyatının ucuz, bakım ihtiyacının az olması ve kararlı çalışma özelliklerinden dolayı en fazla tercih edilen motorlardır. Endüstride kullanılan motorların %90'ı ASM'dir. ASM'ler sincap kafesli ve rotoru sargılı olarak iki türdür. 5 kW'lık gücün altındaki bu motorlarda daha çok sincap kafesli ASM kullanılır. Sincap kafesli ASM yapısal olarak dayanıklı olmasına rağmen ağır işletme koşullarında elektriksel ve mekaniksel zorlanmalardan dolayı arızalanabilir. Motorların arızalanması endüstride ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Benbouzid, 2000; Akar ve ark, 2011; Ünsal ve Karakaya, 2015).

Sincap kafesli ASM'de oluşan arızalar elektriksel ve mekaniksel arızalar olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır (Gaeid ve Mohamed, 2010 ; Akar ve ark 2011). Arıza şeması Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Sincap kafesli ASM arıza durumu şeması

### 2.2.1. Mekaniksel arızalar

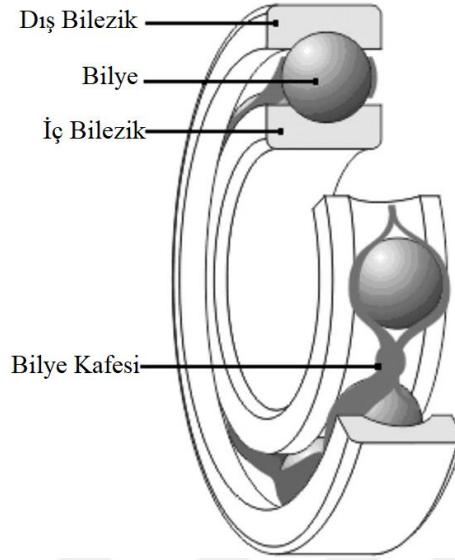
Mekaniksel arızalar rulman ve EK arızaları olarak ikiye ayrılırlar. Mekaniksel arızaların temel nedenleri yük ile motor arasındaki eksen hatası, aşırı ve dengesiz yüklenme, toz, nem, yağlama hatası, üretimden kaynaklanan hatalar vb. gibi etkilere (Kara ve Doğan, 2016).

#### Rulman arızaları

ASM’de en fazla arıza yapan parçaları rulmanlar oluşturmaktadır. Sincap kafesli ASM’nin en çok bakım gerektiren parçası da rulmanlardır. Yağlanma zamanlarının periyodik olarak dikkatli bir şekilde yapılması rulman ömrünü etkilemektedir. Aşırı ısınma, eksensiz yüklenme, yükte dalgalanma ve üretim hataları rulmanların ömrünü tamamlanmadan arızalanmasına etki olarak gösterilmektedir (Nandi ve ark, 2005).

Rulmanlarda arızalar dış bileziklerin, iç bileziklerin, bu bilezikler arasında bulunan bilyelerin veya bilyeleri sabit tutan kafes olarak adlandırılan metal parçaların aşınması ile oluşmaktadır. Bu aşınmalar arızanın oluşma yerine göre titreşimler oluştururlar. Aşınmaya bağlı oluşan çukurlar zamanla düzleşir ve bilezikler arasında kalan bilyeler sallanmaya başlar bunun sonucunda rulman dağılma aşamasına gelmektedir (Doğruer,

2012; Boudinar ve ark., 2016; Song ve ark, 2017). Şekil 2.7’de bir rulman kesiti görülmektedir.



Şekil 2.7. Rulman kesiti (Boudinar ve ark., 2016)

Rulmanlarda oluşan arızalar hava aralığında bozulmaya neden oluşturmaktadır. Hava aralığı akısının bozulması ile stator akımlarının sinyali de değişmektedir. Stator akımlarının frekans spektrumunda, oluşan değişimler incelenerek rulman arızaları tespit edilebilmektedir (Benbouzid, 2000; Song ve ark, 2017).

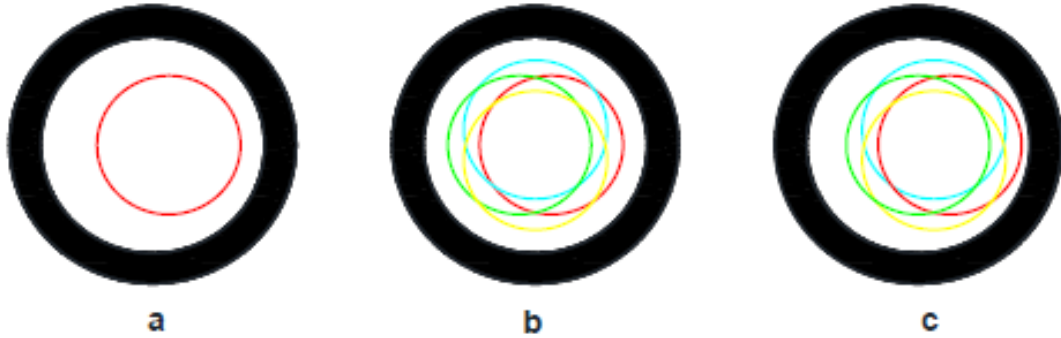
#### Eksenden kaçıklık arızaları

Stator ve rotor arasında bulunan hava aralığı dağılımının eşit olmaması durumunda EK arızası ortaya çıkmaktadır (Vas, 1993; Toliyat ve ark.,2012). ASM’den maksimum verim alabilmek için indüksiyon etkisinin olduğu bölüm olan hava aralığının minimum olması gerekmektedir. Üretim esnasında hava aralığı mesafesi hassas bir şekilde ayarlanmaktadır. Üreticilerin hava aralığı mesafesi için tanımladığı hata oranı %5-%10 aralığındadır (Dorrell ve ark, 1997; Polat, 2013).

Üretimden kaynaklanan hatalar az olmasına rağmen motorda oluşan mekaniksel arızalar içinde EK arızası oldukça fazla görülen bir arıza çeşididir. Motor milindeki eğiklik, motor yük bağlantı kaplinlerinin düzgün yerleştirilememesi ve rulmanlardaki aşınmalar bu arızanın temel nedenlerini oluşturmaktadır.

EK arızası durumunda motor hava aralığında oluşan akının genliğinde artış, stator akımlarında dengesizlik, momentte vuru ve azalma, sıcaklığın artması ve arızanın daha da büyümesi halinde rotorun statora sürtmesi ile sonuçlanmaktadır(Eker, 2013; Salem ve ark, 2016).

EK arızasının üç çeşidi vardır. Bunlar statik, dinamik ve karma (statik+dinamik) EK arızalarıdır. Bu arıza çeşitleri Şekil 2.8’de görülmektedir.



a-) Statik eksenden kaçıklık b-) Dinamik eksenden kaçıklık c-) Karma eksenden kaçıklık  
Şekil 2.8. Eksenden Kaçıklık (Kara ve Doğan, 2016)

#### Statik eksenden kaçıklık :

Stator ve rotor eksenleri arasında sabit bir kayma oluşması durumu statik eksenden kaçıklığı ortaya çıkarmaktadır. Şekil 2.8.a’da bu durum görülmektedir. Bu arıza ile oluşacak dengesiz kuvvetler sabit bir itme kuvveti oluşturacaktır. Stator ve rotordan birinin veya her ikisinin de oval olması, stator eksenini ile rotor ekseninin doğru konumlandırılmaması bu arıza türünü meydana getirmektedir (Nandi ve ark., 2005).

#### Dinamik eksenden kaçıklık :

Stator ile rotor eksenlerindeki kaymanın hareketli olması durumuna dinamik EK denmektedir. Şekil 2.8.b’de bu durum görülmektedir. Rotorun eksenini ile motorun dönüş eksenini aynı konumda olmamaktadır. Bunun sonucunda dengesiz bir itme kuvveti oluşmaktadır. Rotor milinde eğrilik, mekaniki rezonans, rulmanlarda oluşacak aşınmalar vb. gibi etkiler bu arızanın nedenleri arasında gösterilebilir (Nandi ve ark., 2005).

### Karma eksenden kaçıklık :

Gerçek hayatta statik ve dinamik EK genellikle aynı anda görülmektedir. Bu durumda karma EK olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.8.c’de bu durum görülmektedir. Karma EK arızası hava aralığındaki akı dağılımında düzensizlikler meydana getirmektedir. Motorda indüklenen akım bu durumdan etkilenir ve akım sinyalinin dalga şeklinde harmonikler oluşur.

EK arızası akım ve gerilim spektrumunda kendini yan bant olarak göstermektedir. Oluşan yan bantları yeri eşitlik (2.2.1.1) ile hesaplanabilmektedir.

$$f_{eksen} = \left[ 1 \pm \left( \frac{2k-1}{p} \right) \right] f_e \quad (2.2.1.1)$$

Eşitlikte kullanılan  $f_{eksen}$  EK arıza frekansını,  $k = 0,1,\dots,n$  gibi sabit sayıyı,  $p$  motor kutup çifti sayısını ve  $f_e$  ise elektriksel besleme frekansını ifade etmektedir (Eker, 2013).

### **2.2.2. Elektriksel arızalar**

ASM’de elektriksel arızalar stator sargı arızaları, rotor arızaları ve sürücülerden kaynaklanan arızalar olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bu üç arıza türü ASM’deki arızaların yaklaşık olarak %48’ini oluşturmaktadır (Gaeid ve Mohamed, 2010).

#### Stator sargı arızaları

Stator sargı arızaları elektriksel arızalar arasında en önemli olanı ve en çok görülen türüdür. Stator sargı arızalarının görülme oranı % 35-40 aralığındadır. Stator sargı kısa devresi olarak adlandırılan bu arızalar üç fazlı dengeli bir motorda sargılarda oluşacak herhangi bir kısa devre sonucu ortaya çıkmaktadır. Sargılarda oluşacak dengesizlikler yüksek akımların akmasına ve sargıların ısınmasına yol açmaktadır. Sargı sıcaklığı daha fazla artacak olursa sargılarda bulunan izolasyon zarar görür ve motor çalışamaz hale gelebilir. Daha kötüsü motor gövdesinde sargılardan kaynaklı elektrik kaçağı olabileceği gibi bu elektrik kaçağı insan hayatını da tehdit edebilir (Mehala, 2010; Ojaghive ark, 2014). ASM’deki sargı arızalarının nedenleri termal, elektriksel, mekaniksel ve çevresel etkiler olarak sayabiliriz (Siddique ve ark, 2005; Ojaghi ve ark, 2014; Çıra 2018 ).

*Termal zorlanmalar:* Sargı sıcaklık artışı belli bir sınır değerine kadar olması gerekmektedir. Belirlenen değer üzerindeki artışlar sargı izolasyonuna zarar verir ve ömrünü azaltır. Yapılan çalışmalara göre her 10°C'lık artış izolasyon ömrünü yarı yarıya azaltmaktadır (Doğan, 2012; Ojaghive ark, 2014 ). Sargılardaki sıcaklık artış nedenleri;

- Aşırı gerilimler: Motora uygulanan gerilimin genliğinin artması ile akımın genliği artar bunun sonucunda da yüksek çekirdek kayıpları ve sıcaklık artışı ortaya çıkar, buda sargıların aşırı ısınmasına neden olur.
- Üç fazlı gerilim dengesizliği: Üç fazlı gerilimde oluşacak küçük dengesizlikler stator hat akımlarının ve buna bağlı olarak bakır kayıplarının artmasına neden olacaktır. Kayıplar ise daha yüksek bir sargı sıcaklığına neden olmaktadır.
- Sık dur-kalk: ASM ilk kalkınma anında nominal çalışma akımının yaklaşık 5 – 8 katı kadar akım çekmektedir. Sık dur – kalk yapıldığında motorda oluşan kayıplar artmakta ve motor daha çok ısınmaktadır.
- Aşırı yük: Motordaki yük artışı ile sıcaklık artışı oranı yaklaşık olarak karesi şeklinde değişmektedir. Motor nominal yükünün üzerinde çalışır ise ömrü çok hızlı bir şekilde azalmaktadır.

Ortam sıcaklığı: ASM'ler değişik sıcaklıktaki çalışma ortamları için tasarlanmıştır. Fakat çalışma ortam sıcaklığı maksimum 40 °C olacak şekilde tasarım yapılmaktadır. Bu değer üzerinde olan ortam sıcaklıkları motorda termal zorlanmalara yol açmaktadır.

*Mekaniksel zorlanmalar:* Motorun ilk kalkış anındaki titreşimleri ve stator sargılarında oluşan kuvvetler sargı izolasyonunu bir arada tutan verniklerin atmasına dolayısı ile sargı izolasyonunun kısım kısım zayıflamasına neden oluşturmaktadır (Doğan, 2012).

Rulmanlarda ve motor milinde oluşacak arızalar hava arızasının bozulmasına hatta rotor ile statorun birbirine sürtmesine neden olmaktadır. Ayrıca hava aralığına bir parçanın girmesi ve burada çarpması da mekaniksel zorlanma olarak SSA'nın nedenleri arasındadır (Siddique ve ark, 2005; Ojaghive ark, 2014).

*Elektriksel zorlanmalar:* Sargı izolasyonunun bozulmasına veya ömrünün azalmasına neden olmaktadır bunun sonucunda da sargı arızası oluşmaktadır. Elektriksel zorlanmalar 4 gruba ayrılmaktadır. Bunlar dielektrik, izleme, korona ve geçici gerilim değişimi durumudur (Siddique ve ark, 2005; Ojaghive ark, 2014).

Dielektrik, yalıtım malzemesinin ömrü ile elektriksel voltaj değişimi arasındaki doğrusal ilişkidir. İzleme, eğer 600 V üzerindeki motorlarda sargıları ile toprak arasında izolasyon tam anlamı ile sağlanmamış ise sargı iletkeninden gövdeye oradan da toprağa kaçak akımlar akacaktır. Kaçak akımlar sargı izolasyonunda noktasal bozulmalara neden olmaktadır. Korona, sargı izolasyonu için kritik bir gerilim değeri vardır ve bu değer aşıldığında geçici bir gaz iyonizasyonundan kaynaklı deşarjın oluşmasıdır. Özellikle 5kV seviyesi ve üzerinde çalışan motorlar için ciddi bir sorundur. Geçici gerilim değişimi, sargılarda oluşan kısa devre arızalarına anlık gerilim değişimleri neden olabilmektedir. Anlık gerilim değişimlerine şebekedeki ani gerilim artışları, sigorta ve akım sınırlayıcılar ve motor sürücülerini neden oluşturabilmektedir (Siddique ve ark, 2005; Ojaghive ark, 2014).

*Çevresel zorlanmalar:* Çevresel zorlanmalar dış ortam etkilerinden kaynaklanmaktadır. Motor içinde bulunan toz, nem ve yağ gibi kirletici maddeler motorun ısıl dağılımında, stator yalıtımında ve rulmanlarda bozulmalara neden olmaktadır. Buralarda oluşacak bozulmalarda motor sıcaklığını artırmaktadır. Sıcaklıktaki artışı önlemek için motor bu tür maddelerden korunmalıdır. Bunun yanında dış ortam ısıları, manyetik bozucular vb. etkiler motorda dışsal zorlanmalardır (Siddique ve ark, 2005; Ojaghive ark, 2014).

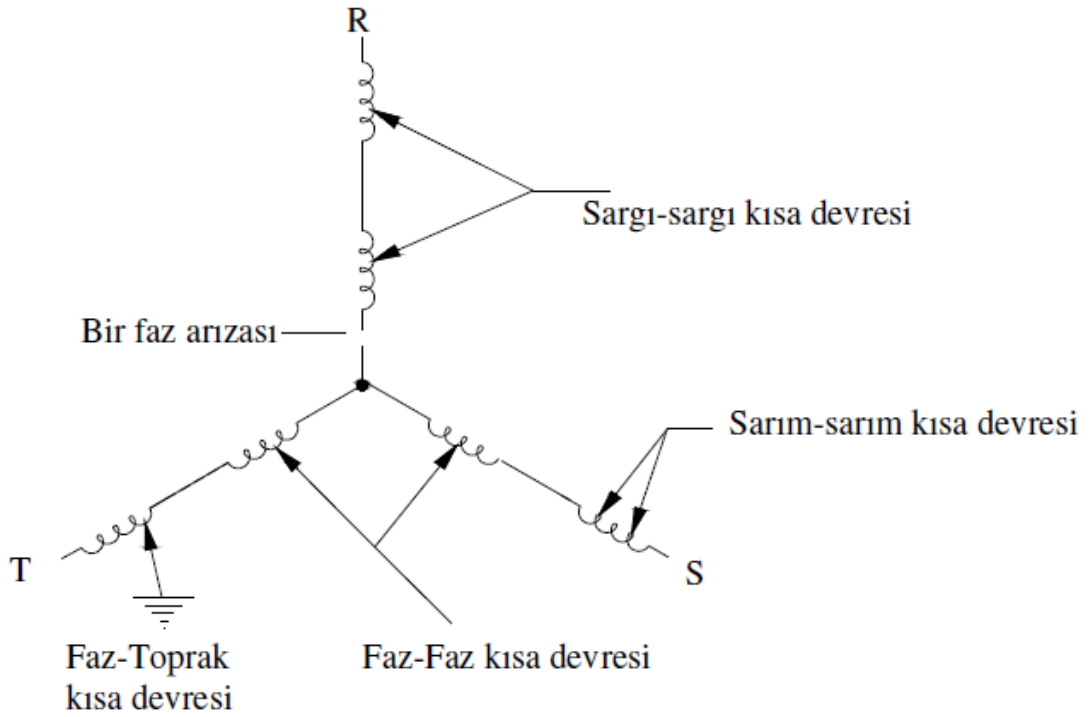
Sağlam bir ASM’de belirli bir seviyede harmonik vardır. Fakat arıza oluşumu ile birlikte motor akımındaki harmonik sayısı artmaktadır. Sargı arızaları hat akımı ve geriliminde belirli harmonik oluşumuna neden olmaktadır. Akım ve gerilim spektrumlarında yan bant olarak görülen bu arızalar tespit edilebilmektedir. Sargı arızası arızasından kaynaklanan yan bantlar aşağıda verilen eşitlik (2.2.2.1) ile hesaplanmaktadır (Gaeid ve Mohamed, 2010; Sharifi ve Ebrahimi, 2011).

$$f_{sa} = \left[ k \pm n \left( \frac{1-s}{p} \right) \right] f_e \quad (2.2.2.1)$$

Burada  $p$  kutup sayısı,  $k = 1, 3$  ve  $n = 1, 2, 3, \dots, (2p - 1)$  ve  $s$  kaymadır.

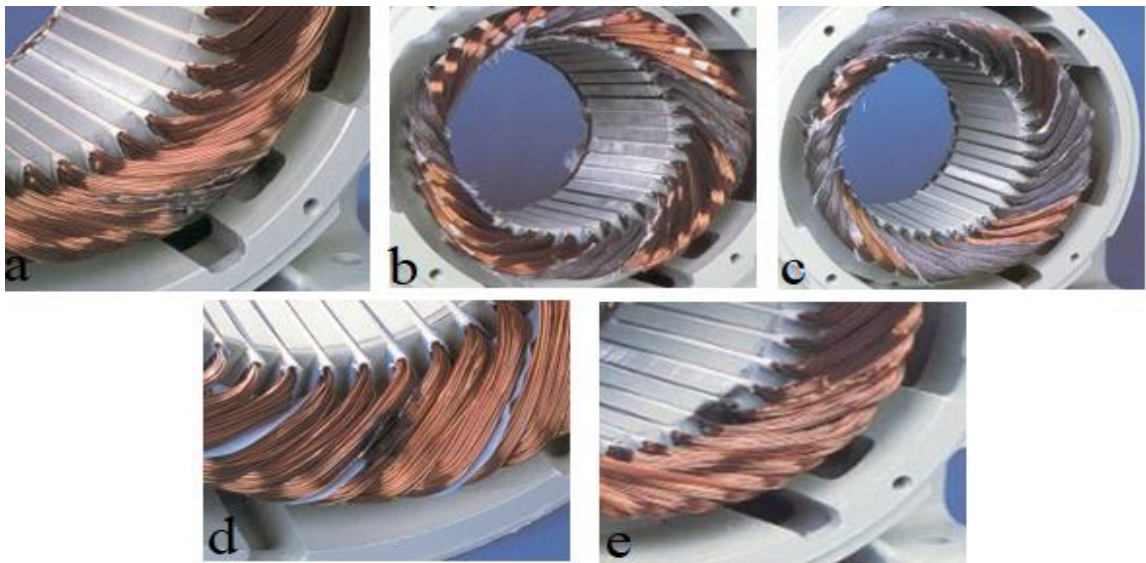
Üç fazlı ASM’lerde stator sargı arızaları sarım-sarım, sargı-sargı, bir faz sargı, faz-faz ve sargı toprak kısa devreleri olmak üzere beş grupta incelenmektedir. Şekil 2.9’da beş arıza grubu da görülmektedir.





Şekil 2.9. Üç fazlı ASM’de stator sargı kısa devreleri (Doğan 2012)

Sargı arızası olmuş motorlar da özellikle bakır iletken üzerindeki izolasyonda zarar oluşmaktadır. Sarımların arası kısa devresi, sargı-sargı kısa devresi, bir faz sargı, faz-faz kısa devresi ve faz-toprak kısa devresi arızalarında oluşan hasarlar Şekil 2.10’da görülmektedir.



Şekil 2.10. Üç fazlı ASM’de stator sargı kısa devre arızaları (Akar, 2009; Çıra, 2018)

Sarım-sarım kısa devresi: Bir fazın bir sargısındaki spirler de oluşan kısa devre hatasıdır. Böyle bir durumda arızanın olduğu sargı komple ısınır. Bu arızayı genellikle aşırı yüklenmelerden kaynaklı ısı artışı, aşınmalar ve titreşimler gibi etkiler oluşturmaktadır (Rodríguez ve Arkkio, 2008). Şekil 2.10.a'da sarım-sarım kısa devresi görülmektedir.

Sargı-sargı kısa devresi: Herhangi bir fazın farklı sargı grupları arasında oluşan kısa devre hatalarıdır. Bu arıza durumunda birçok sargı grubunda hata oluşur ve motor çok yüksek akımlar çekmeye başlar. Sargı telleri yüksek akım kaynaklı aşırı sıcaklıktan zara görülebilir. Şekil 2.10.b'de sarım-sarım kısa devresi görülmektedir.

Bir faz sargı arızası: Fazlardan birinin açık devre olması durumudur. Klemens kutusunda fazlardan birinin bağlantısının kopması, tek faz sigortasının atması veya faz sargısındaki tellerinden birinin kopması bu arızaya neden olmaktadır. Şekil 2.10.c'de da görüldüğü gibi enerjisi kesilen sargı sağlam kalırken diğer iki sargı aşırı akım çektiği için yanar (Rodríguez ve Arkkio, 2008).

Faz-faz kısa devresi: Farklı iki fazın sargı telleri arasında oluşan kısa devre hatasıdır. Oluklara yerleştirilmiş farklı iki faza ait bobinlerde yalıtımın kaybolması sonucu ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.10.d'de faz-faz kısa devre hatası görülmektedir.

Sargı-toprak kısa devresi: Fazlardan herhangi birinin sargısı ile toprak arasında oluşan kısa devre hatasıdır. Gövdesi topraklanmış motorlarda oluklara yerleştirilen sargıların izolasyonunu kaybetmesi sonucu oluşmaktadır. Şekil 2.10.e'de sargı-toprak kısa devre hatası görülmektedir (Akar, 2009).

### Rotor arızaları

Endüstride en çok 5 kW altındaki ASM'ler kullanılmaktadır. Bu motorlar çoğunlukla kısa devre çubukludur. Bu nedenle endüstride kullanılan ASM'ler arasından en çok tercih edileni kısa devre çubuklu olanıdır. Sağlam yapısına rağmen zaman içinde bu motorların rotorunda da arızalar oluşmaktadır. Tüm arızalar içinde rotor arızaları %5-10 olarak yer almaktadır (Akar ve Çankaya, 2009; Nakamura ve ark., 2016).

Rotor arızaları genellikle imalat hatalarından oluşmaktadır. Kısa devre çubuklu rotor yapılırken kalıp döküm tekniği kullanılmaktadır. Rotor çubukları ve kısa devre halkaları

oluşturulurken buralarda oluşacak hava kabarcıkları veya aralara yabancı maddelerin girmesi gibi etkiler rotor arızalarının temel nedenleridir. Bu etkiler oluştuğu zaman rotor direnci artar ve rotordan akan kısa devre akımları değişir bunun sonucunda rotorda indüklenen gerilimde bozulmalar yaşanacaktır. İndüklenen gerilimle beraber manyetik alan bozulur ve motorda titreşim, vuruğu momenti ve stator akımlarında bozulmalar gibi etkiler ortaya çıkmaktadır (Arabacı,2011; Gökteş, 2013).

Rotor arızaları rotor çubuk kırığı ve kısa devre halkası kırığı olarak ikiye ayrılmaktadır.

Rotor çubuk kırığı arızası: Rotor çubuklarının herhangi birinin kırılması ile meydana gelmektedir. Çubukların bir tanesinde oluşan kırık diğer çubuklarda zorlanmalara yol açacak ve onlarında kırılmasına neden oluşturacaktır (Mehrijou ve ark., 2011).

Rotor kısa devre halka kırığı arızası: Rotor çubuklarını uçlarından kısa devre eden halkalarda oluşacak kırılmalarıdır. Rotor direncinin değişmesine ve rotordan geçen akımın artmasına neden olacaktır. Akımların artması ile motor daha fazla ısınacaktır. Rotor çubuk kırığı zamanında tespit edilirse motor daha fazla zarar görmeden önlem alınabilir (Mehrijou ve ark., 2011).

### 3. Sürücülerden kaynaklanan arızalar

ASM'leri değişken hızlarda kullanabilmek için sürücüler kullanılmaktadır. Sürücülerde anahtarlama elemanı olarak son yıllarda IGBT tercih edilmektedir. Sürücüler ile ASM'de değişken hızlarda enerji verimliliği sağlanmaktadır. Fakat IGBT'ler anahtarlama işlemleri esnasında motor akımlarında ve gerilimlerinde harmonikler gibi bozucu etkiler oluşturmaktadır. Harmoniklerin etkileri motorda titreşim, moment ve hızda salınım olarak görülmektedir (Doğan,2012).

#### **1.2. Asenkron Motor Arıza Tespit Metotları**

ASM'ler özellikle sağlam yapısı ile öne çıksa da çalışma koşullarına bağlı olarak arıza yapmaktadırlar. ASM'de oluşan arızalar stator ve rotor arasında oluşan akımın bozulmasına ve statordan geçen akım sinyallerinde asimetrik değişimlere neden olmaktadır. ASM arızalarının etkileri hava aralığındaki akı dağılımında dengesizlik, momentte salınım ve azalma, güç kayıpları ve ısı artışı, verimde azalma ve stator akımlarında harmonik oluşumu şeklinde görülmektedir (Nandi ve ark., 2005).

Endüstride motorların plansız durmaları hem zaman kaybı hem de maddi kayıplar oluşturmaktadır. Motor arızalarının anında belirlenmesi veya arıza gelişmeden önce tahmin edilmesi için durum izleme teknikleri geliştirilmiştir. Durum izleme teknikleri ile gerekli olan bakım malzemelerini belirleme, bakım zamanında kısalma, önceden arıza öngörüsü ile plansız durmaları önleme gibi faydalar sağlanmaktadır (Gaeid ve Mohamed, 2010; Koca ve Ünsal, 2017).

Motorun çeşitli sinyallerine bakılarak durum izleme yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda birçok durum izleme tekniği kullanılmıştır. Bu teknikler aşağıda verilmiştir.

Titreşim izleme: Arızasız motorlar çok az titreşim sinyali üretirler fakat motorda arıza olursa titreşim sinyallerinde arıza ile beraber artmaktadır. Titreşim sinyallerini belirlemek için ivme ölçer sensörler kullanmak gereklidir (Nandi ve ark., 2005; Mehrjou ve ark., 2011). Titreşim izleme en çok rulman arızası tespitinde kullanılmaktadır (Seera ve ark., 2014). İvme ölçer sensörler pahalı olduklarından durum izleme donanım maliyetinde göz önüne alınması gerekmektedir (Doğruer, 2012).

Elektromanyetik alan izleme: Normal çalışmada ASM'nin hava aralığındaki akı zamanla sinüzoidal olarak değişmektedir. Rotorda veya statorda herhangi bir bozulma olması durumunda hava aralığındaki akı sinyali değişmektedir. Hava aralığındaki akıyı izlemek için dahili veya harici olarak akı bobini yerleştirilir. Akı bobini yerleştirme işlemi oldukça zahmetli ve ekonomik olmayan bir yöntemdir. Bu nedenlerden dolayı çok fazla tercih edilen bir yöntem değildir (Mehrjou ve ark., 2011; Seera ve ark., 2014).

İndüklenen gerilimin izlenmesi: ASM'nin güç kaynağı ile bağlantısı kesildiği anda stator akımları hızla azalır. Kısa devre çubuklu rotorda akan akımlar sağlam durumdaki motorda sinüzoidal bir manyeto-motor kuvveti oluşturmaktadır. Motorda bulunan herhangi bir arıza sinüzoidal dalgada bozucu bir etken olarak görülmektedir. Yükteki değişimler, sıcaklık ve atalet bu yöntemin kullanılabilirliğini etkilemektedir. Ayrıca bu yöntem ile çekirdek ve sargı arızalarını tespit etmek için hasar oluşması gerekmektedir (Supangat ve ark., 2007; Mehrjou ve ark., 2011).

Darbe testi: Bu yöntem başta sargı arızasını tespit etmek için kullanılmıştır fakat 2007 yılında Huang ve ark. darbe testi ile EK arızası tespiti de yapmıştır. Yüksek gerilimli ve yüksek frekanslı iki özdeş pals iki sargıya uygulanır kalan sargı ise topraklanır. Sargılara

uygulanan gerilimler izlenir ve iki gerilim karşılaştırılarak arıza tespiti yapılmaktadır (Huang ve ark.,2007; Seera ve ark., 2014).

Akustik ses ölçümü: ASM çalışırken belirli akustik sesler çıkarmaktadır. Gürültü ölçümleri ve bunların spektrum analizi ile motorlarda durum izleme yapılmaktadır. Bu yöntem daha çok rulman ve rotor arızaları için kullanılmaktadır (Doğan,2012; Seera ve ark., 2014).

Hava aralığı momenti izleme: Bir ASM dönmeye başladığında akım ve akılar hava aralığı momentini oluşturmaktadır. Motorlarda oluşacak arızalar hava aralığı moment frekansında özel yan bantlar oluşturmaktadır(Mehrjou ve ark., 2011). Stator sargı devreleri arızaları ve rotor çubuk kırığı arızalarının izlenmesinde hava aralığı momentinin izlenmesi kullanılmaktadır(Hsu ve ark., 1992). Hava aralığı momenti doğrudan ölçülememektedir. Motor miline bağlanan sensörler ile ölçüm gerçekleştirilir fakat bu sensörler bize doğrudan hava aralığı momentini vermez, beraberinde mekanik momentleri de vermektedir. Kullanılan özel teknikler ile hava aralığı momenti elde edilmektedir (Mehrjou ve ark., 2011).

Ani açısal hızın izlenmesi: Bu yöntem ile motorun dinamik bilgilerini değerlendirmek mümkündür. Motor milinin bir dönüşü ile oluşan açısal hızının değişimidir. Ani açısal hızı izleme rotor arızalarının tanısında kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri izlenerek bu yöntem ile arıza tespiti yapılabilmektedir (Mehrjou ve ark., 2011).

Ani elektriksel gücün izlenmesi: Motorun senkron hızından bağımsız olan ani elektriksel güçte arızaya bağlı özel frekanslar gücün spektral bileşenlerinde görülmektedir. Bu özelliği sayesinde arıza tespiti yapılabilmektedir (Afrat ve ark., 2005).

Motor devre analizi: ASM'nin elektromanyetik özellikleri ölçülerek motorda oluşacak değişimler belirlenebilmektedir. Bu teknik ile direnç, empedans, faz açısı ve indüktans büyüklükleri kolayca hesaplanabilmektedir. Bu yöntemde motora küçük bir enerji uygulanır ve devre büyüklükleri ölçülerek durum analizi yapılır (Mehrjou ve ark., 2011).

Termal izlemeler: Elektrik makinalarının belirli bir bölümü veya tamamında ısı izleme ile arıza tespiti yapılabilmektedir. Sıcaklık izleme ile elektrik makinalarında yeni oluşan ve daha önce oluşmuş arızalar tespit edilebilmektedir. Stator sargı arızaları başta olmak

üzere rulman arızaları ve rotor arızaları motorda sıcaklık artışına neden olmaktadır. Isıl sensörler veya tahmin yoluyla sıcaklık değişimi tespit edilerek arıza durumu belirlenmektedir (Bonnet ve Soukup, 1992; Rodriguez ve Arkkio, 2008).

Gaz analizi: Isı etkisi ile bozulan sargı izolasyonları karbondioksit gazı açığa çıkarmaktadır. Açığa çıkan karbondioksit gazı havaya geçerken soğur ve kızıl ötesi soğurma ile tespit edilir. Yüksek frekanslı kıyıcılardan oluşan sürücüler ile sürülen motorlar anlık yüksek gerilimlere maruz kalırlar. Sargılarda anlık yüksek gerilimlerden dolayı ozon gazı açığa çıkar. Ozon gazı tespit yöntemleri ile sargı hataları kolayca belirlenmektedir (Siddique ve ark.,2005).

Motor akımlarının izlenmesi: Sağlam bir ASM'nin stator akım sinyallerinde harmonik oluşması besleme kaynağı veya üretim hatası kaynaklıdır. Motorda her hangi bir arıza durumunda stator akım sinyallerinde arızanın türüne bağlı olarak bozulmalar görülmektedir. Hava aralığını etkileyecek rulman arızaları, rotor arızaları, EK arızaları vb. gibi arızalar hava aralığındaki akı dağılımını bozmaktadır. Akı dağılımının bozulması ile motor endüktansı değişme gösterir ve bunun sonucunda motor akımlarında harmonikler oluşmaktadır. Stator arızaları ve sürücü arızaları direkt akım sinyallerini etkilemektedir (Verucchi ve ark., 2008; Gaeid ve Mohammed, 2010; Mehrjou ve ark., 2011; Kurien ve Srivastava, 2018).

Akım analizi ASM'nin arıza teşhisinde en çok kullanılan durum izleme tekniğidir. Ucuz ve pratik bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Akım sensörlerinin ucuz olması ve montajının kolay olması bu özelliğini sağlamaktadır. Sürücü ile beslenen motorlarda sensöre ihtiyaç duymadan sürücü üzerinden de akım sinyal verisi alınabilmektedir. Ayrıca tehlikeli ve kolay çalışma olanağı olmayan ortamlarda akım analizi oldukça tercih edilmektedir (Kurien ve Srivastava, 2018).

## 2.4. Arıza Tespitinde Kullanılan Sinyal İşleme Yöntemleri

Bir kişi veya malzemeyi tanımlamamız gerektiğinde ona ait olan renk, boy, ağırlık, vb. gibi özellikleri verilmektedir. Bu özellikler kişinin veya malzemenin karakteristik bilgileridir. Belirtilen özel bilgiler ile kişiyi veya malzemeyi tanımlama işlemi özellik çıkarma olarak adlandırılmaktadır (Proakis ve Manolakis, 2007).

Bir sistemin kendi içinde veya başka bir sistem ile etkileşimini sağlayan ve ölçülebilen büyüklüklere sinyal denmektedir. Elektriksel sinyaller akım, akı, gerilim, frekans vb. mekaniksel sinyaller ise titreşim, hız gibi büyüklükler ile sistemde etkileşimi sağlamaktadır. Özellik çıkarma yöntemi ile sistemde oluşacak sinyaller analiz edilmektedir. Bu analiz işlemi gerçekleştirilebilmek için sinyallerde yapılan özellik çıkarma işlemi sinyallerin sayısallaştırılmasıdır. Sinyaller sayısallaştırıldıktan sonra elektronik ortamda rahatça incelenebilir (Proakis ve Manolakis, 2007).

Elektrik makinaların da oluşan arızaları temsil eden özellik elde etmede en çok kullanılan yöntemler frekans boyutunda analiz, zaman-frekans boyutunda analiz, zaman boyutunda analiz, model tabanlı analizler vb. olarak sınıflandırılmaktadır (Boashash, 1990).

Frekans boyutunda analiz: Fourier dönüşümü kullanarak frekans analizi yapmak gerçek zamanda durum izleme tekniklerinden en çok tercih edilen ve kullanım açısından kolay olan yöntemdir. Akım, gerilim, titreşim gibi sensörlerle ölçülen bilgilerin sağlam frekansları ile arızalı frekansları farklılık göstermektedir. Arızalardan kaynaklanan frekanstaki gürültüler belirli değerlerde oluşur ve buna bağlı olarak arıza türü tespit edilmektedir (Nandi ve ark, 2005; Çıra, 2018).

Zaman-frekans boyutunda analiz: Frekans boyutunda analiz işleminde fourier serisi örneklem zamanı süresince değişmemektedir. Bu nedenle frekans analizinde gerçekleşen olayın ne zaman meydana geldiği bilinmemektedir. Zaman-frekans analizinde zamanın kısmen sabit olduğu durumlar fourier serilerine açılarak bu sorun giderilir ve hata tespiti gerçekleştirilir (El ve Benbouzid, 2000). Dalgacık dönüşümü yöntemi genellikle durağan olmayan sinyallerin analizinde kullanılmaktadır. Dalgacık adı verilen küçük zaman pencerelerinde özel salınımsal fonksiyonlar kullanılmaktadır (Debnath, 2001).

Zaman boyutunda analiz: ASM üzerinden sensörler yardımı ile alınacak bütün sinyaller zamanla karşılaştırılarak bir grafik oluşturmaktadır. Bu nedenle zaman boyutundaki sinyaller üzerinde yapılacak analizler en kolay ve en ucuz yöntemdir. Lineer olmayan yöntemlerde bile bu analiz yöntemi kolaylıkla uygulanabilir. Zaman boyutunda analiz işlemi yapılırken verinin karakteristiğine göre istatistiksel analiz yöntemleri kullanarak belirli parametreler oluşturularak sinyal değerlendirilmektir. Bu kapsamda elektrik makinalarının arıza tespiti için literatürde birçok yöntem önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu yöntemlerin en çok kullanılanları çarpıklık, basıklık, etkin değer, varyans, entropi, ortalama ve standart sapma vb. istatistiksel parametreler hesaplanarak sinyallerin analiz edilmesidir(McCormick ve Nandi, 1999; Bellini ve ark, 2008). Bundan başka ayırıklaştırma, sinyallerde sıfır geçiş anının tespiti, sinyal kenar çizgilerinin incelenmesi vb. yöntemlerde zaman boyutunda arıza tespiti için kullanılan diğer yöntemlerdir (Doğan, 2012, Unsal ve Kabul, 2017). Zaman boyutunda veri analizi amacıyla İPK yöntemleri endüstri mühendisliğinde üretim kalitesi izlenmesi ve süreç takibi, makine mühendisliğinde makine parçalarının durum izlenmesi süreçlerinde kullanılmaktadır. Daha önce farklı alanlarda kullanılan İPK yöntemi, bu çalışmada ASM'nin elektriksel ve mekaniksel arızalarının tespiti için ilk defa kullanılmıştır.

#### **2.4.1. İstatistiksel proses kontrol**

İPK üretim sürecinde kaliteyi artırmak, hataları tespit etmek ve sürecin daha verimli ilerlemesini sağlamak için uygulanan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Süreç içerisinde oluşacak veri türlerinden kusur sayısı, uzunluk, titreşim ve akım gibi verilerin analizi ile gerçekleştirilmektedir (Stapenhurst, 2013; Maraş ve Arslan, 2014; Birgören, 2015).

İPK üretim sürecinin sürekli denetlemesinden ziyade belirli aralıklarla ölçümler alınarak örneklem esası ile sürecin tamamı hakkında bilgi vermektedir. Süreç içerisinde oluşan değişimler üretilen ürününde değişmesine neden oluşturmaktadır. Ürün ile süreç arasında bir neden-sonuç ilişkisi bulunmaktadır (Patır, 2009; Yıldırım ve Karaca, 2013).

Üretim sürecinde oluşabilecek problemlerin tespiti, çözülmesi, gerekli verinin kolay bir şekilde ve sistematik olarak oluşturulması temel teknikler ile sağlanmaktadır. Bu teknikler sınıflandırma, çetele, histogram, pareto analizi, neden-sonuç diyagramı ve



kontrol grafikleridir. Kullanılan teknikler Kaoru Ishikawa göre kalite ile ilişkili problemlerin %95'ini çözmektedir (Patır, 2009; Şenol, 2012).

Üretim sürecinden alınan verisin kategorilerine, toplanma şekillerine ve karakteristiklerine göre gruplar halinde kayıt edilmesi sınıflandırma tekniğini oluşturmaktadır. Sınıflandırma tekniği; hesaplama işlemleri olan bir analiz yöntemi değildir. Sınıflandırma ile sistemde oluşan hataların yeri kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

Çetele tekniği; elde edilen verinin düzenli bir şekilde gruplara ayrılarak çeşitli semboller veya isimler ile düzenli bir şekilde tablolar oluşturmaktadır. Çeteleler çeşitli şekil ve özellikler ile oluşturulabilmektedir. Arıza türlerinin yoğunluğu ve konumu hakkında bilgi vermektedir (Yıldırım ve Karaca, 2013; Birgören, 2015).

Histogram tekniği; örneklem gruplarındaki değerlerin olasılık dağılımı hakkında fikir sahibi olmamızı sağlamaktadır. Dağılımı, grafikler ile görsel olarak sunmakta ve dikey sütunlardan oluşmaktadır. Oluşan hataların yada arızaların oluşma sıklığı bu teknik ile tespit edilebilmektedir (Şenol, 2012; Staphenurst, 2013). Süreç içerisinde birden çok bozucu etki oluşabilmektedir.

Pareto analizi tekniği; oluşan hatalar içinden kaliteyi en çok bozan nedeni belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bozucu etkiler arasında bir önem sırası oluşturularak bu sıralamayı grafiksel olarak sunmakta ve en önemli hata unsuru yada konumu üzerine yoğunlaşmayı sağlamaktadır (Özcan, 2001).

Neden-Sonuç diyagramı tekniği; kaliteyi bozan etkilerin arkasında potansiyel bir sebep vardır. Bu sebepler ile oluşan arızalar arasındaki ilişki neden sonuç diyagramı tekniği ile grafiksel olarak belirlenmektedir. Neden sonuç diyagramları görsel olarak balık kılıçığını andırdığı için bu isimle de anılmaktadır. İki değişken arasındaki ilişki serpilme diyagramı ile belirlenmektedir. Örneğin X eksenini bir veri setini Y eksenini ise ona bağlı olan diğer veri setini temsil etmektedir. Bu iki veri arasında bir kesişme olduğu zaman bu nokta grafiğe işlenmekte ve tüm kesişme noktaları işlendikten sonra dağılıma bakılarak karar verilmektedir (Gümüšoğlu, 2000; Montgomery, 2009).

Temel tekniklerden sonuncusu ve en çok tercih edileni kontrol grafikleridir. Bu tez çalışmasında kontrol grafikleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Kontrol grafikleri detaylı olarak açıklanmaktadır.

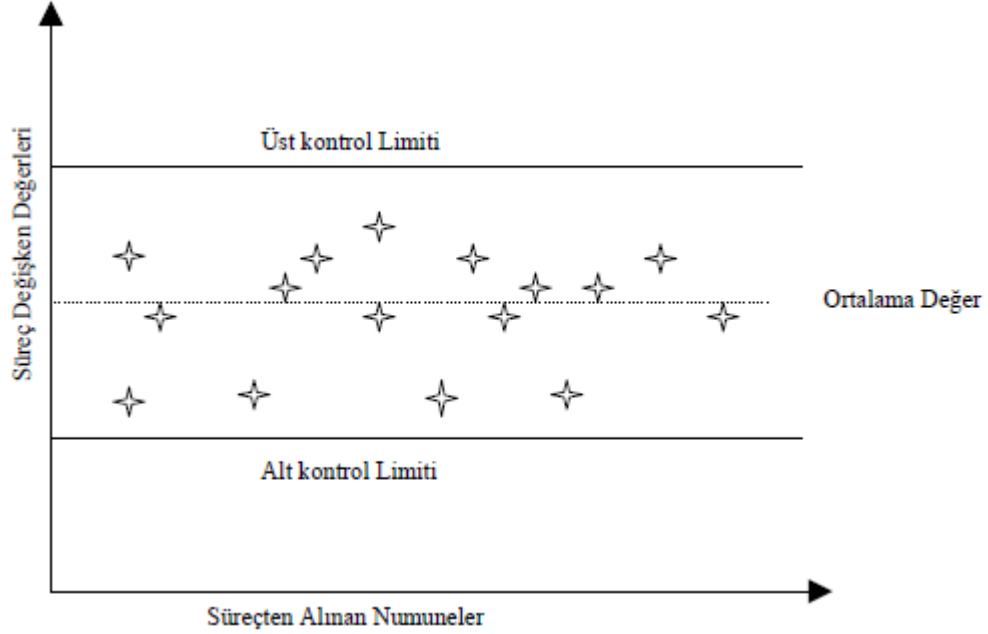
### Kontrol Grafikleri

Doğal nedenlerden kaynaklanan süreç içerisindeki değişimler giderilememekle beraber İPK limitleri arasında kalmaktadır. Özel nedenlerden kaynaklanan değişimler süreci olumsuz etkilemekte ve kontrol limitleri dışına sürecin çıkmasına neden oluşturmaktadırlar. Özel nedenler tespit edilebilmekte ve hatalar giderilebilmektedir (Niezgoda 2017; Şenol, 2012 ).

Walter A. Shewhart tarafından bulunan kontrol grafikleri 1920 yılında kullanıma sunulmuştur(Niezgoda, 2017). Shewhart çizelgelerinin kullanım amacı şunlardan oluşmaktadır.

1. Üretim sürecinin istatistiksel olarak kontrol altına alınıp alınamayacağını gösterir.
2. Sürecin kaliteli çalışma aralığını belirler.
3. Verinin analizini yapar ve değişimleri inceleyerek doğal olmayan durumları belirler.
4. Süreç içerisinde oluşacak hataları önceden belirleyerek önlemler alınmasını sağlar.
5. Kaliteyi artırmaya yardımcı olur.

Bir proses kontrol çizelgesi genel olarak, bir merkezi hat olan proses ortalaması ile bunun altına ve üstüne çizilen alt kontrol ve üst kontrol limitlerinden oluşmaktadır. Merkezi çizgi, karakteristiğin istenen değerini; limitlerle sınırlanmış alan ise müsaade edilen kontrollü çalışma alanını göstermektedir. Süreç devam ettikçe elde edilen değerler çizelgeye işlenir ve sürecin kontrol altında olduğu veya olmadığı durumlara göre kalitesiz çalışma ya da arızalı çalışma belirlenmektedir (Fugate ve ark 2001; Zerbato ve ark, 2017). Örnek süreç kontrol grafiği Şekil 2.11’de görülmektedir.

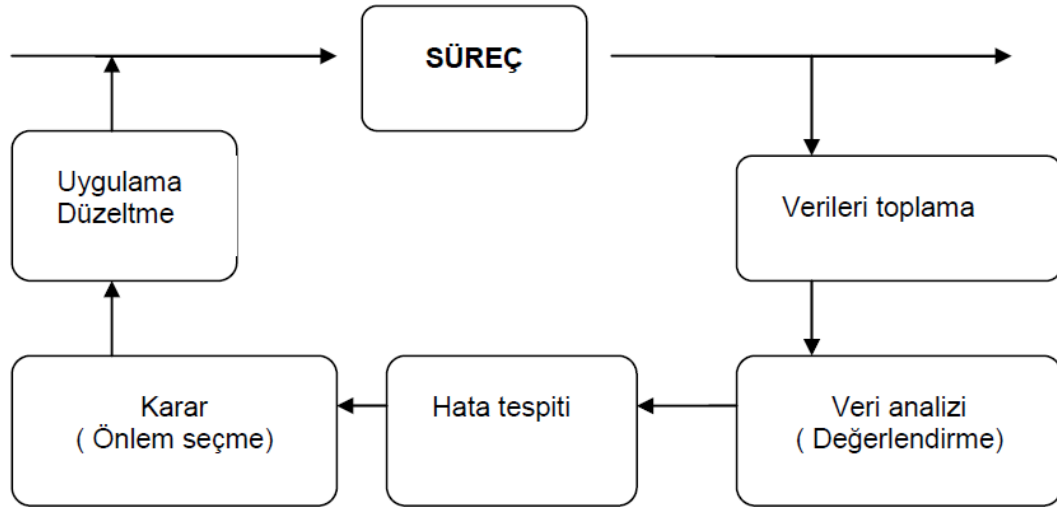


Şekil 2.11. Örnek Süreç Kontrol Grafiği (Maraş, ve Arslan, 2014)

Süreçten alınan veriler ile önce sağlam kaliteli çalışma aralığı oluşturulmuştur. Aralığa daha sonra çalışan sistemden alınan örneklemeler uygulanmakta ve süreç takip edilmektedir. Kontrol limitleri dışında bir sinyal tespit edilir ise sistem ya durdurularak ya da çalışma esnasında, oluşan hata veya arıza belirlenir ve bu olumsuz durumlar ortadan kaldırılabilmektedir (Birgören ve Koçer 2004;Nieżgoda, J. 2017).

İPK grafikleri sistem hakkında görsel olarak bilgi vermektedir. Sistemde oluşacak hatalar ve sistem kalitesinin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Oluşturulan grafiksel analizler ile uzmanlar gerekli müdahaleleri yapar ve sistemin verimli çalışması sağlanmış olur (Maraş ve Arslan, 2014; Nieżgoda, J., 2017).

İPK, verinin toplanması ile başlayan ve verimi artırmak için hataların giderilerek sistemin sürekli denetlendiği bir süreci içermektedir. İPK uygulamalarında kullanılan blok diyagramı Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12. İPK uygulamaları için blok diyagramı (Maraş, 2012)

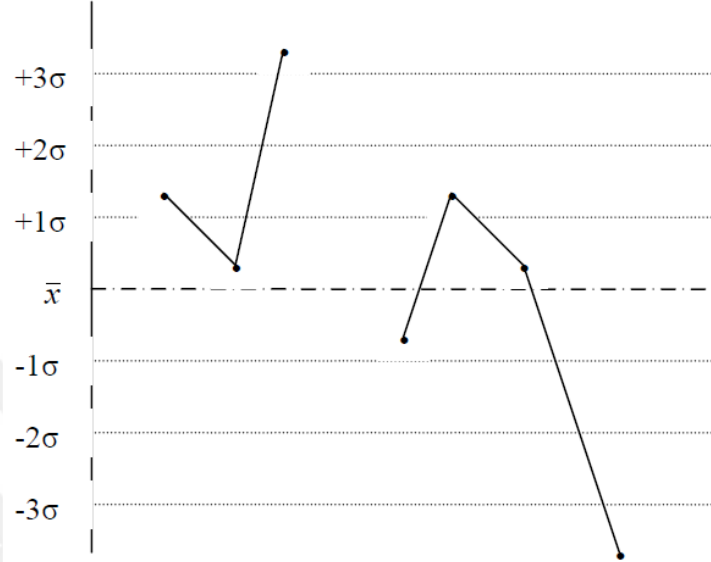
İPK grafiklerinin yorumlanmasında sürecin kontrol altında olup olmama durumları aşağıda belirtilen maddeler ile belirlenmektedir.

Sürecin Kontrol Altında Olduğu Durumlar;

1. Kontrol limitleri dışında nokta olmaması,
2. Prosesin süreç ortalama civarında devam etmesi,
3. Proses ortalama çizgisinin alt ve üstünde eşit sayıda nokta olması,
4. Prosesin çizelgesinin rastgele oluşması sürecin kontrol altında olduğunu göstermektedir.

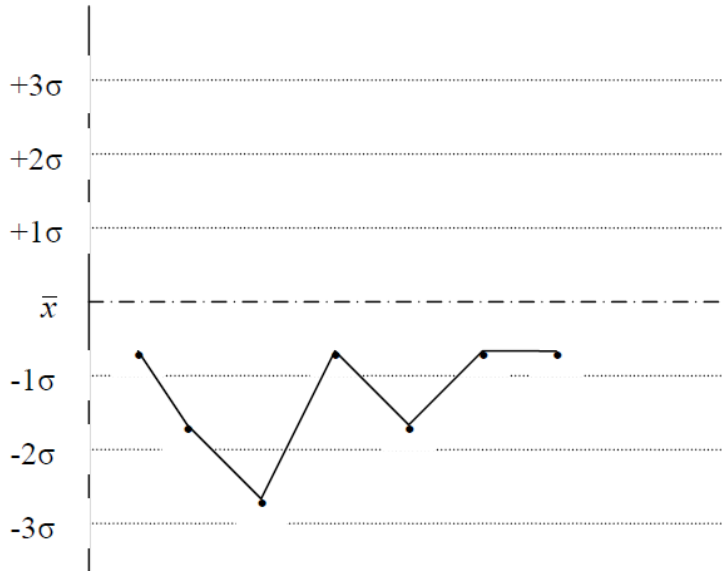
Sürecin Kontrol Dışına Çıktığı Durumlar; bu durumlar 5 madde halinde Şekil 2.13, Şekil 2.14, Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de görülmektedir.

1. Proses çizelgesinin limitler dışına çıkması.



Şekil 2.13. Kontrol limitleri dışında nokta bulunma durumu (Maraş, 2012)

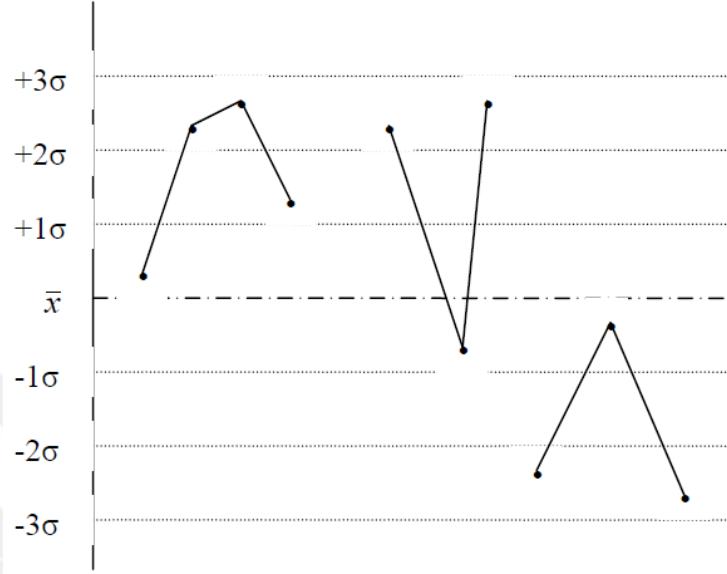
2. Bir birini izleyen 7 noktanın süreç ortalaması çizgisinin altında veya üstünde bulunması.



Şekil 2.14. Grafikte noktaların merkez çizgisinin altında olması durumu (Maraş, 2012)



5.  $3\sigma$  çizgisi yakınındaki her 3 noktadan 2 sinin  $2\sigma$  çizgisi dışına taşması.



Şekil 2.17.  $3\sigma$  çizgisi yakınındaki her 3 noktadan 2 sinin  $2\sigma$  çizgisi dışına olması (Maraş, 2012)

İPK’de verinin türüne göre kontrol grafikleri ölçülebilir ve ölçülemeyen veri türleri olarak iki grup altında incelenmektedir.

*Ölçülebilir Veriler için Kontrol Grafikleri*

Çeşitli ölçü aletleri ve cihazlar ile ölçümleri gerçekleştirilen ve matematiksel olarak sayılar ile ifade edilebilen uzunluk, basınç, ağırlık, titreşim ve akım gibi verilere ölçülebilir veriler denmektedir. (Akkurt, 2002)

Süreçten alınan verilerdeki ortalamaları ölçen  $\bar{X}$ , süreç içerisindeki değişim faktörünü ölçen  $R$  ve alt grup değişimlerini ölçen  $S$  kontrol grafikleri ölçülebilir veriler olarak analiz edilmektedir (Gümüšoğlu, 2000; Maraş, 2012).

*$\bar{X}$  ve  $R$  Kontrol grafikleri*

Sistemden alınan verilerde eğer numune sayısı 10’dan küçük ise ortalama ( $\bar{X}$ ) kontrol grafikleri ile beraber süreçteki farklılıklar ( $R$ ) içinde kontrol grafikleri uygulanmaktadır.

Sürecin içerisinde bir bozulma olmadığını söyleyebilmemiz için her iki kontrol grafiğinde de uygunluk aranmaktadır (Akkurt, 2002; Zeyveli ve Selalmaz, 2008).

$\bar{X}$  Kontrol grafikleri:

Sistem sürecinden alınan verinin ortalama değerleri  $\bar{X}$  kontrol grafikleri ile izlenmektedir. Sistemde sadece doğal nedenlerden kaynaklanan değişimler mevcut ise merkezi çizgi ( $\bar{\bar{X}}$ ) sistemin ana kitle ortalamasını oluşturmaktadır (Gümüšoğlu, 2000; Montgomery, 2009; Cambron ve ark., 2016). Ana kitle ortalaması ve merkezi çizginin bilinmediği durumlarda sistemden yeteri kadar örneklem grupları alınarak bu değerler aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i)}{n} \quad (2.4.1.1)$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=0}^m (\bar{X}_i)}{m} \quad (2.4.1.2)$$

Burada;  $x_i$  sistemden alınan örneklem,  $n$  bir gruptaki örneklem sayısı ve  $m$  örneklem grup(durum izleme) sayısı olarak ifade edilmektedir.

Kontrol limitleri veya tolerans aralığı ana kitle standart sapması ile hesaplanmaktadır. Merkezi Çizginin (MÇ) altına ve üstüne  $\pm 3\sigma_x$  değerleri kadar uzaklıkla çizilen limitler sırası ile Alt Kontrol Limiti (AKL) ve Üst Kontrol Limiti (UKL) olarak adlandırılmaktadır. Elde edilen limitler ile oluşan aralık kontrol limitlerimizi oluşturmaktadır. Kontrol grafikleri için genellikle %99,73 'lük değer ile istenilen standardı sağladığı söylenmektedir (Şenol, 2012; Loureiro ve ark, 2017).

AKL ve UKL değerleri sistemden alınan veriler ile İPK standartlar tablosu üzerinden hesaplanabilmektedir. Fark değerleri üzerinden limit değerlerini hesaplamak için aşağıdaki formüllerden yararlanılmaktadır.

Veri gruplarında en büyük değer ile en küçük değer arasındaki fark  $R$  olarak adlandırılmakta ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Ortalama fark değeri ise  $\bar{R}$  olarak tanımlanmaktadır.



$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (2.4.1.3)$$

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^m (R_i)}{m}} \quad (2.4.1.4)$$

$$3\sigma_x = A_2 \bar{R} \quad (2.4.1.5)$$

$$UKL = \bar{X} + A_2 \bar{R} \quad (2.4.1.6)$$

$$AKL = \bar{X} - A_2 \bar{R} \quad (2.4.1.7)$$

olarak hesaplanmaktadır.

$\bar{X}$  grafikleri sürecin genel ortalama için değerlendirme yapmamıza olanak sağlayacak ve süreç içerisinde özel durumlar oluşmadığı takdirde sınırlar içerisinde seyredecektir.  $A_2$  değeri kontrol grafikleri tablosunda değişik alt grup sayıları için alınan değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktördür.  $\sigma$  standart sapmayı,  $X_{\max}$  ve  $X_{\min}$  bir örneklem grubundaki en büyük ve en küçük ölçülen veriyi ifade etmektedir.

**R Kontrol grafikleri:**

Süreçteki farklılıkları inceleyen  $R$  grafikleri sistemdeki dağılımı incelemek için en yaygın kullanılan kontrol grafiğidir. Belirli periyotlar ile alınan örnek sayısı en az 20-25 arasında olur ve örneklem grup sayısı 4-6 aralığında oluşturulur ise kontrol grafikleri en iyi sonucu vermektedir (Montgomery, 2009).

$R$  kontrol grafikleri için merkezi çizgi  $\bar{R}$  gösterilmektedir. Alt ve üste kontrol limit çizgilerinin merkezi çizgiye ( $\bar{R}$ ) uzaklığı ise  $\pm 3\sigma_R$  değerlerinde çizilmektedir.  $R$  kontrol grafiklerinin  $\bar{X}$  kontrol grafiklerine göre farkı alınan örneklem değerleri küçük sayılar olur ise alt kontrol limit değeri negatif (-) çıkabilir fakat  $R$ 'lerin örnekleme bölünmesi normal olmayıp pozitif asimetriye sahip olmaktadır. Bu nedenle alt kontrol limiti negatif hesaplandığı zaman limit değeri sıfır(0) alınmaktadır (Maraş, 2012 ; Birgören, 2015).

$R$  kontrol grafiklerinde merkezi çizgi  $\bar{R}$  olarak hesaplanmaktadır.

$$UKL = \bar{R} + 3\sigma_R \quad (2.4.1.8)$$

$$AKL = \bar{R} - 3\sigma_R \quad (2.4.1.9)$$

$\sigma_R$  'nin hesaplamasına ihtiyaç duyulmadan doğrudan tablodan hesaplarsak;

$$UKL = D_4 \bar{R} \quad (2.4.1.10)$$

$$AKL = D_3 \bar{R} \quad (2.4.1.11)$$

olarak hesaplanmaktadır.

$R$  kontrol grafikleri dağılımının normal olduğu durumlar da sürecin kalitesi ve hata durumunu gösterilmektedir. Özel durumlar oluşmadığı anlarda süreç sınırlar içerisinde devam ederek limitler arasında kalmaktadır.  $D_4$  ve  $D_3$  değerleri değişik örneklem grup sayıları için Ek-1'de görülmekte ve değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktördür.

#### $\bar{X}$ ve $S$ Kontrol grafikleri

$\bar{X}$  ve  $S$  kontrol grafikleri  $\bar{X}$  ve  $R$  kontrol grafikleri ile benzer özellikler göstermektedir.  $\bar{X}$  ve  $S$  kontrol grafiklerin de sürecin kontrol altında olduğunu söyleyebilmemiz için  $\bar{X}$  ve  $R$  kontrol grafiklerinde olduğu gibi her iki grafikte de uygunluk aranmaktadır. Örnek hacmi fazla olan verilerde daha çok tercih edilmekle beraber numune sayısı 10'un üzerinde olan veri setlerinde kullanılmaktadır.  $\bar{X}$  kontrol grafikleri süreç içerisinde uzun dönemli değişimleri gösterirken,  $S$  kontrol grafikleri kısa dönemli değişimleri göstermektedir (Şenol, 2012; Stapenhurst, 2013).

Alt grup ortalamaları  $\bar{X}$  ile alt grup standart sapması  $S$  kontrol grafikleri ile incelenmektedir. Veri setinin fazla olduğu analizlerde daha verimli ve güvenli sonuçlar vermektedir. Bu özelliğine rağmen hesaplama işlemlerinin  $\bar{X}$  ve  $R$  kontrol grafiklerine oranla daha zor olması nedeni ile endüstride daha az tercih edilmektedirler (Birgören, 2015).

$S$  kontrol grafikleri merkezi çizgi ve limitlerin hesaplanması;

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.4.1.12)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \quad (2.4.1.13)$$

$$UKL = B_4\bar{S} \quad (2.4.1.14)$$

$$MÇ = \bar{S} \quad (2.4.1.15)$$

$$AKL = B_3\bar{S} \quad (2.4.1.16)$$

$S$  örneklem gruplarının her biri için hesaplanan standart sapma değeri  $\bar{S}$  ise tüm verinin standart sapma ortalama değerini göstermektedir.  $B_3$  ve  $B_4$  değerleri kontrol grafikleri tablosunda değişik alt grup sayıları için alınabilmektedir ve değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör olarak ifade edilmektedir.

Sistemde kısa dönemli hatalar veya arızalar oluştuğunda süreç kontrol dışında seyredecek fakat uzun dönemli hatalar ve arızalar durumunda  $S$  kontrol grafikleri sistem olumsuzluklarını göstermeyebilir. Uzun dönemli hatalar ve arızalar  $\bar{X}$  kontrol grafikleri ile tespit edilmektedir.

$\bar{X}$  kontrol grafikleri  $S$  kontrol grafikleri ile beraber kullanılacağı için aşağıdaki gibi hesaplamak daha uygun olacaktır.

$$UKL = \bar{\bar{X}} + A_3\bar{S} \quad (2.4.1.17)$$

$$MÇ = \bar{\bar{X}} \quad (2.4.1.18)$$

$$AKL = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S} \quad (2.4.1.19)$$

Burada  $A_3$  değişken nicelik kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktör olarak ifade edilmektedir.

### *Ölçülemeyen Veriler için Kontrol Grafikleri*

Ölçülemeyen veriler ölçü aletleri ile belirleyemediğimiz, duyu organlarımız ile gözlem yaparak belirlediğimiz kusur durumuna göre oluşturduğumuz nitel verilerden oluşmaktadır. Çatlak, çizik, leke, sızıntı gibi bazı veriler ölçü aletleri ile belirlenemezler ya da ölçü aletlerinin maliyeti yüksek olan durumlarda nitel veriler oluşturmak hem daha pratik hem de maliyet açısından daha uygun olmaktadır. Elde sayısal veri olmaması bir handikaptır fakat oluşturulan nitel veriler ile kusurlu oranını inceleyen  $p$  grafikleri ve

kusurlu sayısını inceleyen  $c$  grafikleri aracılığıyla kalite değerlendirmesi yapılmaktadır (Stapenhurst, 2013; Birgören, 2015).

### $P$ Kontrol grafikleri

$p$  grafikleri belirli bir kategoriye giren öğelerin veya olayların oranını analiz etmek için kullanılmaktadır. Ürünün kusurlu olması veya olmaması analiz için yeterli olmaktadır. Üründeki kusur sayısı ve nedeni bu analiz yöntemi için önem arz etmemektedir (Maraş, 2012 ; Stapenhurst, 2013; Birgören, 2015). Toplam kusurlu ürün sayısı  $p$  toplam kontrol edilen ürün sayısı  $k$  olsun.

$$M\check{C} = \bar{p} = \frac{p}{k} \quad (2.4.1.20)$$

$$UKL = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{k}} \quad (2.4.1.21)$$

$$AKL = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{k}} \quad (2.4.1.22)$$

Örnekleme grupları en az 20-25 gruptan oluşması gerekmekte ve grupların sayısı en az 5 olmaktadır. Grafiklerin kontrol altında olup olmama durumları ölçülebilen kontrol grafiklerindeki aynı koşullar ile değerlendirilmektedir(Birgören, 2015; Akdur, 2016).

### $C$ Kontrol grafikleri

$c$  grafikleri bir olayın oluşma sayısı veya bir ürün üzerindeki aynı ya da benzer kusur sayıları üzerinden kalite analizini gerçekleştirmektedir (Stapenhurst, 2013; Akdur, 2016). Toplam hata sayısı  $c$  örnekleme grup sayısı  $m$  ve bir gruptaki örnekleme sayısı ise  $n$  olsun.

$$M\check{C} = \bar{c} = \frac{\sum c}{mxn} \quad (2.4.1.23)$$

$$UKL = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} \quad (2.4.1.24)$$

$$AKL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} \quad (2.4.1.25)$$

Bir gruptaki örnekleme sayısı  $m$  değerlerinin en az 20-25 olması gerekmektedir. Sürecin kontrol altında olma durumu  $p$  grafiğinde olduğu gibi yine ölçülebilen kontrol grafikleri ile aynı koşulları sağlama durumu ile kontrol edilmektedir(Birgören, 2015).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

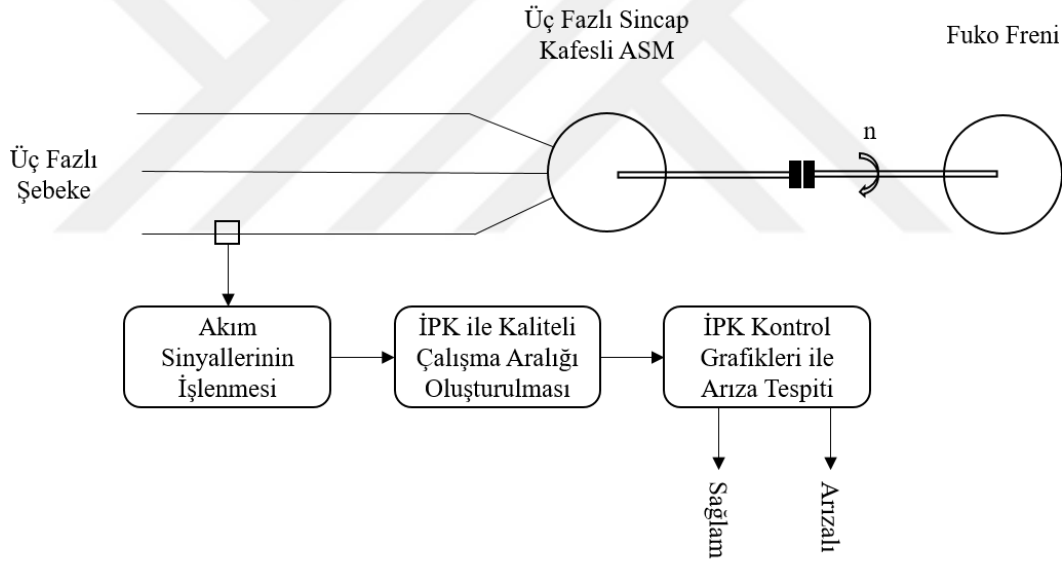
#### 3.1. Deneysel Çalışma

Bu tez çalışmasında İPK yöntemi kullanılarak ASM'nin SSA ve EK arızası tespiti gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de görülen, önerilen arıza tespiti metodolojisi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

Adım 1. Deneysel çalışma için oluşturulan deney düzeneği üzerinden ASM stator akım sinyal verisinin toplanması.

Adım 2. Sağlam ve arızalı durum akım verisinin istatistiksel analizi.

Adım 3. İPK grafiklerinin oluşturulması ve arıza tespiti.

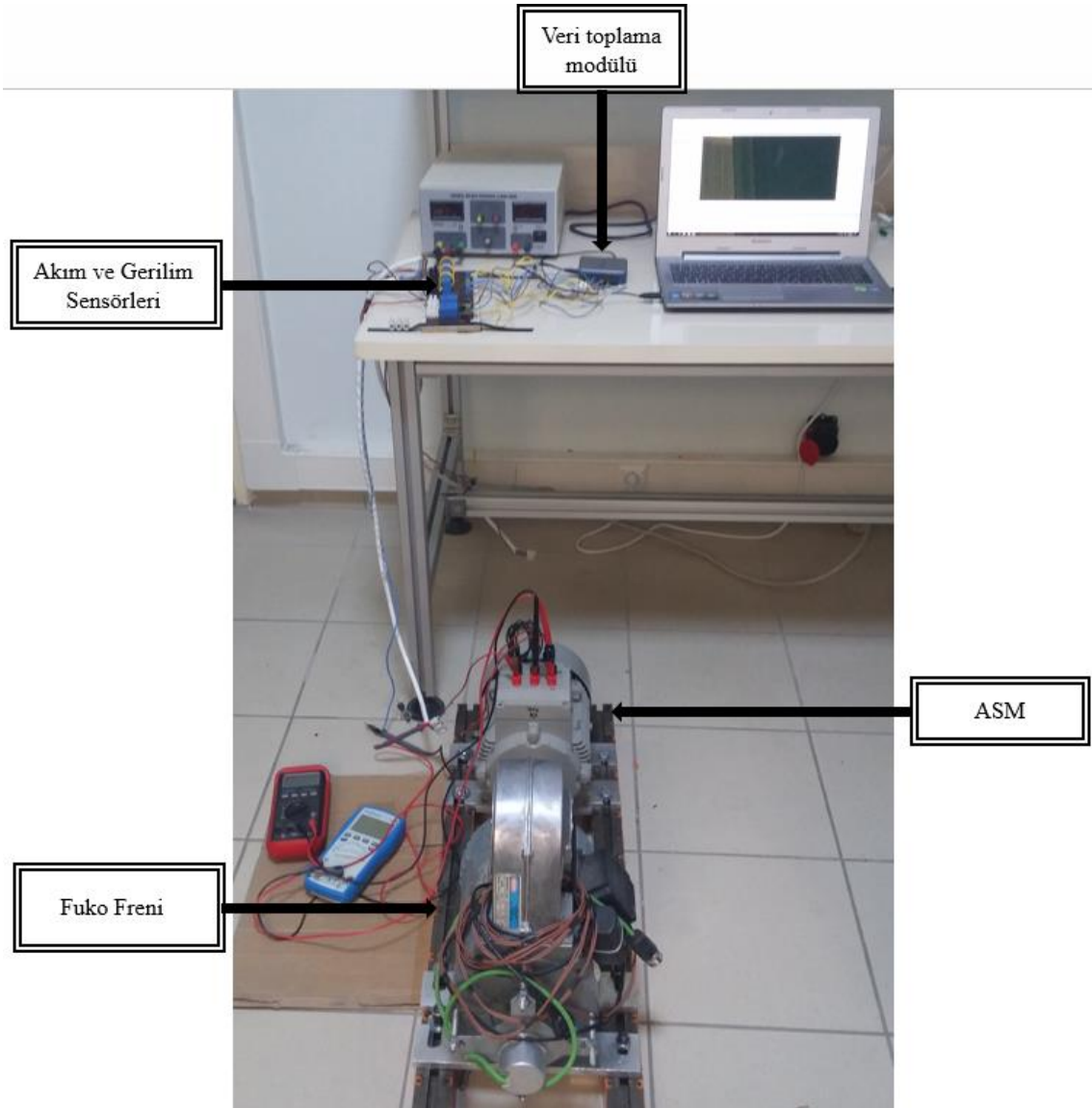


Şekil 3.1. Arıza tespit şeması

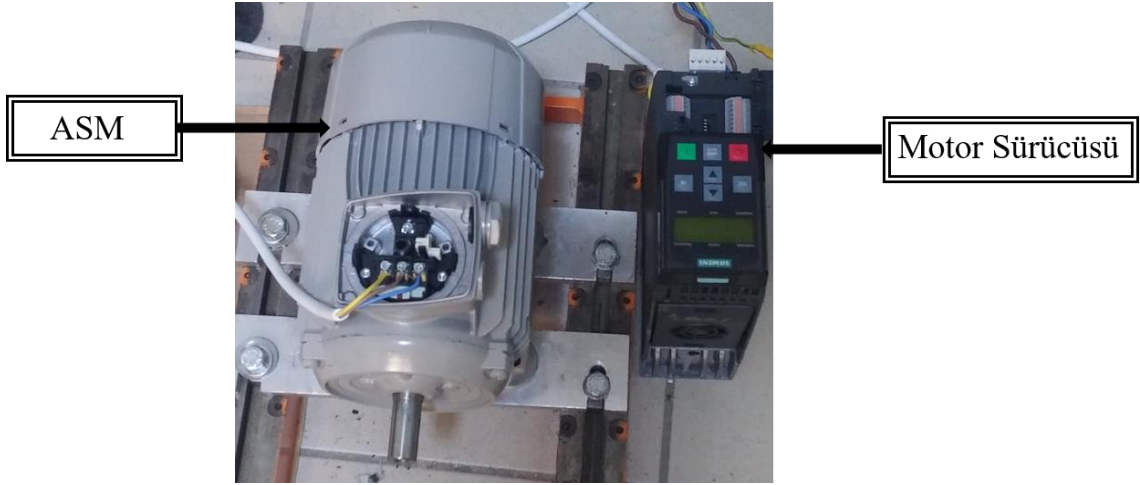
Zaman boyutunda arıza tespitinde sağlam ve arızalı durumlar verisinin kıyaslanması yapılmaktadır. Bu nedenle ASM'de arıza tespitinde başarılı sonuçlar elde edebilmek için gerçek ve güvenli akım sinyal verisi kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada oluşturulan deney düzeneği bu ilkelere uygun şekilde tasarlanmış ve hassas veri toplama sistemi ile akım sinyal verisi toplanmıştır.

### 3.1.1. Deney Düzenegi

Deneyisel çalışmalar için ASM'nin sağlam ve arızalı durumlardaki akım sinyal verisi Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de görölen deney düzenekleri üzerinden toplanmıştır. 1.deney düzenegi Şekil 3.2'de görölmekte olup ASM, Fuko Freni, Veri Toplama modölü, akım ve gerilim sensörlerinden oluşmakta, Şekil 3.3'de görölen 2.deney düzeneginde ise hız kontrol cihazı ve 0,75kW'lık ASM bulunmaktadır.

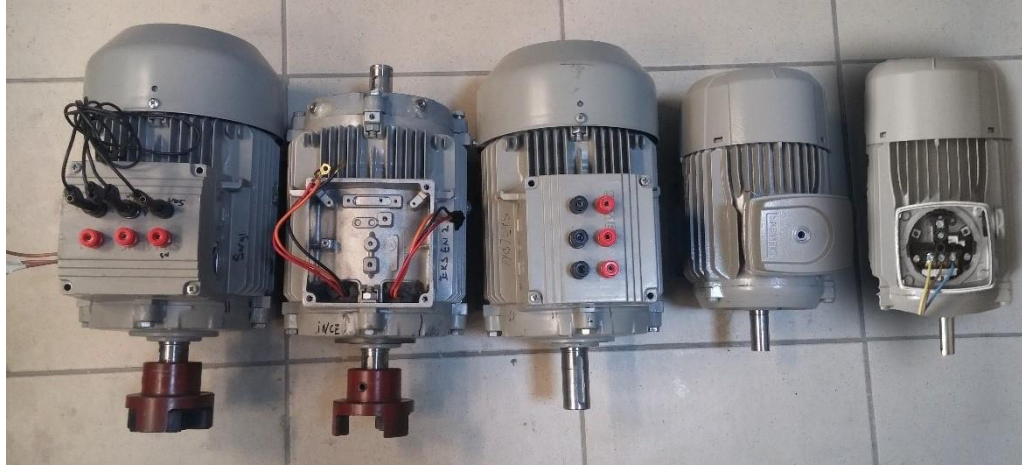


Şekil 3.2. Deney düzenegi



Şekil 3.3. Hız kontrol cihazı ve 0,75kW'lık ASM

1. deney düzeneğinde, veri toplama işlemleri için birbirine özdeş 3 adet 2,2 kW'lık Sincap Kafesli ASM ve 2. Deney düzeneğinde ise 2 adet de 0,75 kW'lık Sincap Kafesli ASM kullanılmıştır. 2,2 kW'lık ASM'lerden 1. motor sağlam durum 2. motor EK arıza ve 3. motor ise SSA durumu için kullanılmıştır. 0,75 kW'lık ASM'lerden 1.motor sağlam durum, 2. motor ise EK arıza durumu için kullanılmıştır. Şekil 3.4'de motorlar görülmektedir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan motorlar

Deneyisel çalışmalarda kullanılan motorların parametre değerleri çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 ASM'lerin parametre değerleri

Güç	2.2	kW	Güç	0.75	kW
Frekans	50	Hz	Frekans	50	Hz
Gerilim ( $\Delta/Y$ )	220/380	V	Gerilim ( $\Delta/Y$ )	220/400	V
Akım ( $\Delta/Y$ )	8.4/4.85	A	Akım ( $\Delta/Y$ )	2.90/1.67	A
Hız	1420	d/d	Hız	2805	d/d
Cos $\phi$	0.83		Cos $\phi$	0.84	
Kutup sayısı	4		Kutup sayısı	2	

ASM'nin yüklü durumlarda analizini yapabilmek için motorlar Fuko freni ile yüklenmiştir. Motor ve Fuko freni birbirine bağlandığında EK oluşmaması için motor montaj işlemlerinde eksen ayarı lazer eksenleme cihazı kullanılarak yapılmıştır. Motor ve Fuko freni millerine braketler montajlanmıştır. Braketlere lazer ve reflektör uygun bir şekilde yerleştirilerek cihaz çalıştırılmıştır. Lazer eksenleme cihazında gerekli ayarlamalar yapılarak motor ile Fuko freni arasındaki eksenlenme hatası belirlenmiştir. Motor ayakları üzerinde gerekli işlemler yapılarak Fuko freni ile yatay ve düşey eksenle aynı düzeleme getirilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.5'de lazer eksenleme cihazı görülmektedir.



Şekil 3.5. Lazer eksenleme cihazı



Kutup sargılarına uygulanan DC gerilim ile doğru orantılı olarak Fuko freni yük momenti oluşturmaktadır. Fuko freni nominal çalışma aralığı 0-48 V gerilim aralığında 0-20 Nm'dir. Fuko freni çalışma parametreleri çizelge 3.2'de verilmiştir.

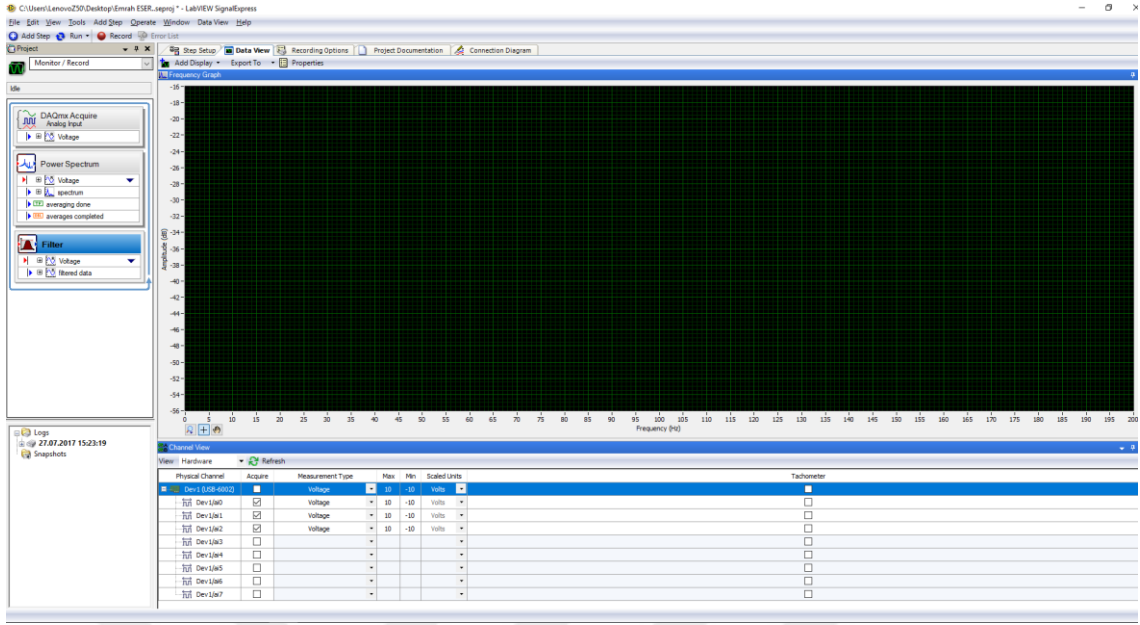
Çizelge 3.2 Fuko freni parametre değerleri

Nominal moment	20 Nm
Devir	4000 rpm(max)
Çalışma Sınıfı	S1
Koruma	IP
Uyartım gerilimi	48 V DC
Uyartım akımı	2.2 A DC

0,75 kW'lık ASM'yi farklı hız kademelerinde çalıştırabilmek için üç fazlı 380 V alternatif akım girişi olan 0,75 kW'lık 2,1 A çıkış akımına ve 380 V 0-550 Hz frekans çıkışına sahip bir hız kontrol cihazı kullanılmıştır.

Deney düzeneklerinde kullanılan veri toplama kartı NI 6002 DAQ , 16\*bit çözünürlüğü sahip olup 50 ks/sn örnekleme hızıyla eşzamanlı veri toplayabilme özellikleri ile sayısal ortamda kayıt yapmaktadır. Veri toplama kartının sinyal izleme aralığı -5 V ile +5 V arasındadır. Bu özelliğinden dolayı motorun nominal akım ve gerilim sinyallerinin toplanmasında akım ve gerilim sensörleri kullanılmıştır. Dönüştürme oranı 1:1000 olan ve  $\pm 50$  A'de çalışabilen akım sensörü ile stator akım sinyalleri veri toplama kartına uygun gerilim değerine dönüştürülmüştür. Olası bir şebeke gerilim düşümü anında motor akım verisinin hatalı olma durumu dikkate alınarak, gerilim sinyalleri, dönüştürme oranı 2500:100 ve çalışma gerilimi 10 V – 500 V aralığında güvenli olarak çalışabilen iki adet gerilim sensörü kullanılarak izlenmiştir.

Veri toplamada kullanılan modüllere uyumlu olarak LabVIEW SignalExpress 2010 programı ile veri kayıt altına alınmıştır. Bu program ile elimizdeki donanımsal malzemenin kapasitesine göre veri toplama işlemi yüksek örnekleme hızı ile yapılabilmektedir. Aynı zamanda birçok filtreleme işlemi ve fourier serisine açma gibi arıza teşhisinde kullanılan işlemleri program yardımı ile kolayca yapılabilmektedir. Şekil 3.6'da LabVIEW Signal Express 2010 ekran ara yüzü görülmektedir.



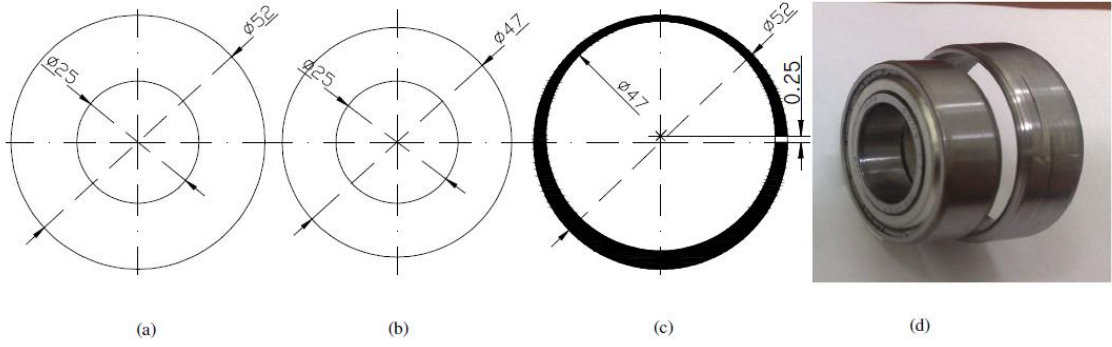
Şekil 3.6. LabVIEW SignalExpress 2010 ekran ara yüzü

### 3.1.2. Arıza Durumlarının Oluşturulması

Bu çalışmada önerilen İPK yönteminin ASM arızalarını tespit etmedeki başarısını görmek açısından hem elektriksel hem de mekaniksel arızalar analiz edilmiştir. Elektriksel arıza olarak sıkça karşılaşılan ve ileri seviyelere ulaşması durumunda motorun tamamen kullanılmaz hale gelmesine sebep olan SSA iki farklı seviyede çalışılmıştır. Mekaniksel arıza olarak ise elektriksel arızalara benzer olumsuz sonuçlar oluşturan statik EK arızası çalışılmıştır. Bu arızalar ASM üzerinde suni olarak oluşturulmuştur.

#### Eksenden kaçıklık arıza durumlarının oluşturulması

EK arızasını oluşturmak için, öncelikle 25x52x15 mm ölçülerinde olan Şekil 3.5.'de görülen 6205-2ZR-C350 kodlu, ASM'nin orijinal rulmanı sökülüştür. Daha sonra sökülen rulmanın yerine, üzerinde EK arızası oluşturulmuş 6005 kodlu yeni bir rulman takılmıştır. Bu yeni rulman oluşturulmasında; dış kısmın merkezi rulman ile aynı olan iç kısmın merkezi ise rulman merkezinden 0,25 mm kaydırılmış 52x47 mm ölçülerinde Şekil 3.7.c'de görülen bir бага (özel halka) kullanılmıştır. Bu бага sıcak geçme tekniği kullanılarak 6005 kodlu rulman üzerine yağda ısıtılarak geçirilmiştir. Yeni oluşturulan rulman rotor miline monte edilmek suretiyle %50 EK arızası gerçekleştirilmiştir.



a)ASM orijinal rulmanı b) 6005 kodlu rulman c) Baga d) Yeni oluşturulan rulman  
Şekil 3.7. Statik EK'nın oluşturulmasında kullanılan rulman şekilleri

0,75 kW güçlü ASM'de yapılan EK arızasında yine özel bir бага kullanılmış ve ilk EK arıza durumundaki aynı yöntem ile %50 EK arızası durumu oluşturulmuştur.

#### Stator sargı arıza durumlarının oluşturulması

Üç fazlı ASM'de SSA bir faz üzerinde sarım-sarım arızası olarak iki farklı seviyede oluşturulmuştur. Motor sargıları üzerinden lehimleme yöntemi ile üç farklı noktadan sargı uçları klemens kutusuna çıkarılmıştır. Çıkarılan bu uçlardan bir tanesi ortak uç olmak üzere sırası ile önce 1. ve 2. uçlar kısa devre edilerek % 50 seviyede 1. SSA ( $SSA_1$ ) ve daha sonra 2. ve 3. uçların kısa devre edilmesi ile % 75 seviyede 2. SSA ( $SSA_2$ ) oluşturulmuştur. Oluşturulan arızalar kademeli olarak incelenmiştir.

### **3.2. Akım Sinyal Verisinin Toplanması**

Motorlar yaklaşık olarak nominal çalışma sıcaklığına gelecek şekilde 20 dakika çalıştırıldıktan sonra motor akım sinyali verisi bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.

Stator akım sinyali verisi 2,2 kW'lık motor da sağlam durum,  $SSA_1$  ve  $SSA_2$  durumları ve EK arıza durumu için 3 farklı yük durumunda (%0, %50, %100) 12 farklı şekilde toplanmıştır. 0,75 kW'lık motor için sağlam durum ve EK arıza durumunda motor yüksüz olarak 3 farklı hızda (1000 d/d, 2000 d/d, 2991 d/d) çalıştırılmış ve toplamda 6 farklı şekilde akım sinyali verisi kaydedilmiştir. Her iki motor için toplamda 18 adet veri seti oluşturularak analiz işlemlerine hazır hale getirilmiştir. ASM stator akım sinyali verisi LabVIEW programının Signal Express Toolbox'ı kullanılarak, 5000 Hz örnekleme frekansında, 14 durum için 5 s, 1000 d/d için 15,5 s, 2000 d/d için 7,75 s sürelerince

bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir durum için 10 adet veri seti oluşturulmuş ve toplamda 5825000 data üzerinden işlem yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında ASM sargı ve EK arızalarının teşhisi için 5 adet deneysel çalışma yapılmıştır.

Bu deneyler;

- Deney-1: farklı yük koşulları altında sabit devirde 2,2 kW'lık ASM'nin sağlam durumu analizi,
- Deney-2 farklı yük koşulları altında sabit devirde 2,2 kW'lık ASM'nin SSA durumu analizi,
- Deney-3 farklı yük koşulları altında sabit devirde 2,2 kW'lık ASM'nin EK arızalı durum analizi,
- Deney-4 sabit yük koşulu altında değişken devirler de 0,75 kW'lık ASM'nin sağlam durum analizi,
- Deney-5 sabit yük koşulu altında değişken devirler de 0,75 kW'lık ASM'nin EK arızalı durum analizi,

olarak gerçekleştirilmiştir.

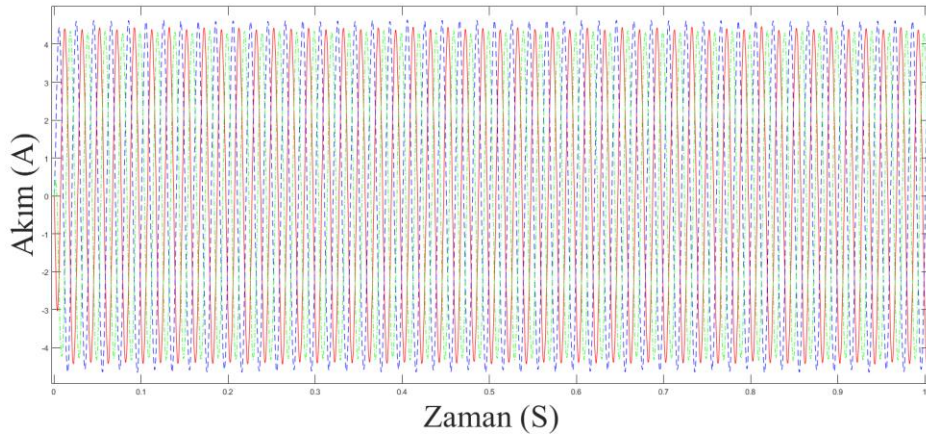
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında önerilen İPK yöntemi ile ASM'nin arızalarının tespiti üzerinde çalışılmıştır. Önerilen yöntemde arıza analizi tespiti sağlam ve arızalı motor akım sinyal veri setlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Sağlam ASM'den alınan akım sinyal verisi ile kaliteli çalışma aralığı oluşturulmakta ve motorun arızalı durumunda alınan veri sürecin devamına işlenerek arızanın varlığı tespit edilmektedir.

Çalışmada önerilen yöntemle ASM'nin SSA ve statik EK arızalarının tespiti için 5 farklı deney ile ASM akım sinyalleri toplanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve bu deneylerde toplanan akım sinyal verisinin zaman boyutunda İPK yöntemi ile değerlendirilmesinden elde edilen kontrol grafikleri aşağıda sunulmuştur:

Deney-1; Bu deney sağlam durumdaki 2,2 kW'lık ASM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında akım sinyallerinin toplanmasıdır. Bu deneyin amacı 2,2 kW'lık ASM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında kaliteli çalışma aralıklarını belirlemek ve çalışma sürecini izlemektir.

Kaliteli çalışma aralığını oluşturabilmek için sağlam motorların akım sinyalleri kullanılmıştır. ASM akım sinyalleri sinüzoidal dalga şeklinde olup ve bu sinyallerin 1 saniyelik periyodun da 50 adet tepe değeri bulunmaktadır. Şekil 4.1'de üç fazlı ASM'nin zaman boyutunda akım sinyali görülmektedir.



Şekil 4.1. Üç fazlı ASM akım sinyali

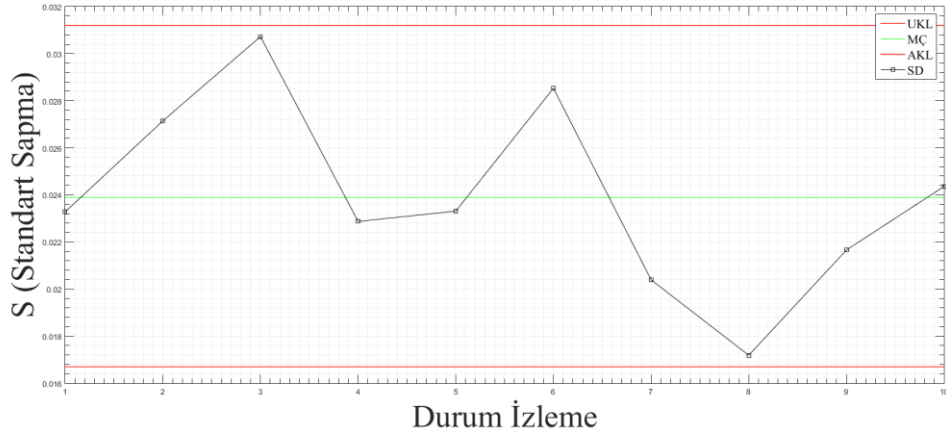
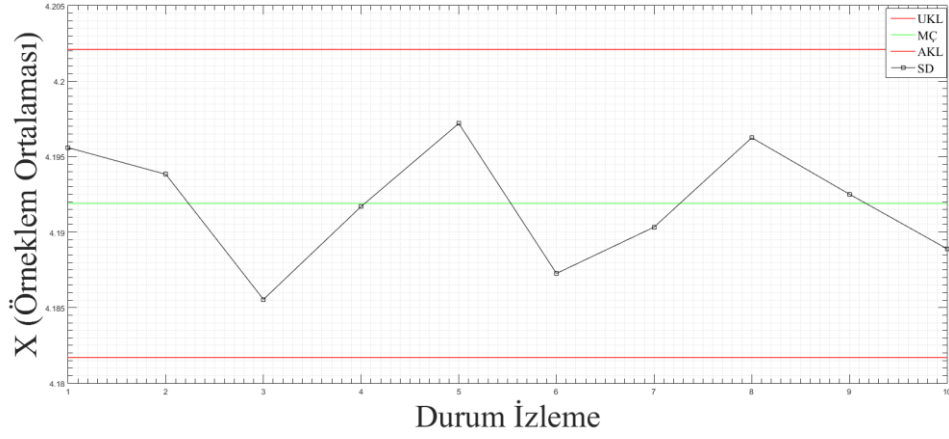
İPK analizi için örneklem oluşturma işlemi tepe değerler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Örneklem grupları 50 adet tepe değerden her bir grafik analizi için 10'ar adet oluşturulmuştur. Sağlam veriden oluşturulan örneklem grupları IBM SPSS statistics 22 yazılımı ile analiz edilerek kaliteli çalışma aralığı için AKL, MÇ ve UKL noktaları hesaplanmıştır.

Motor akımları yüke ve hıza bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla motor akım sinyalleri toplanırken bu durum dikkate alınarak, farklı yük koşulları için veri toplama işlemi ayrı ayrı yapılmıştır.

İlk olarak motorun yüksüz durumu için akım verisi 10 farklı zamanda 5'er saniye olacak şekilde kaydedilmiştir. Yüksüz çalışma koşulu için sağlam motor verisinden 250000 data oluşturulmuştur. Kontrol sınırlarını belirlemek için her bir durum izleme noktasında 250 adet tepe değer verisinden rastgele olarak 50 adet veri seçilmiş ve 1 adet örneklem grubu ele edilmiştir. Sağlam durumlar için 10'ar adet örneklem grupları oluşturulmuştur. Matlab ortamında yüksüz çalışma koşulunda kaliteli çalışma aralığını belirleyebilmek için 500 adetlik bir veri seti hazırlanmıştır. İstatistiksel analiz yolu kullanılarak sağlam motorun sabit hızda ve yüksüz durumu için oluşturulan 10 adet veri seti analiz edilmiştir. Kaliteli çalışma aralığı  $\bar{X}$  ve  $S$  kontrol grafikleri için Çizelge 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.2'de Deney-1'in yüksüz çalışma durumundaki kalite kontrol grafikleri görülmektedir.

Çizelge 4.1 Deney-1 yüksüz durumda  $\bar{X}$ - $S$  kontrol grafikleri limit değerleri

	AKL	MÇ	UKL
$\bar{X}$	4,1817	4,1919	4,2021
$S$	0,0167	0,0239	0,0312



Şekil 4.2. Deney-1 yüksüz durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Bölüm 2.4.1 İstatistiksel proses kontrol de belirtildiği gibi İPK yönteminde toplanan verilere göre sürecin kontrol altında olması;

1. Kontrol limitleri dışında nokta olmaması,
2. Prosesin süreç ortalama civarında devam etmesi,
3. Proses ortalama çizgisinin alt ve üstünde eşit sayıda nokta olması,
4. Prosesin çizelgesinin rastgele oluşması

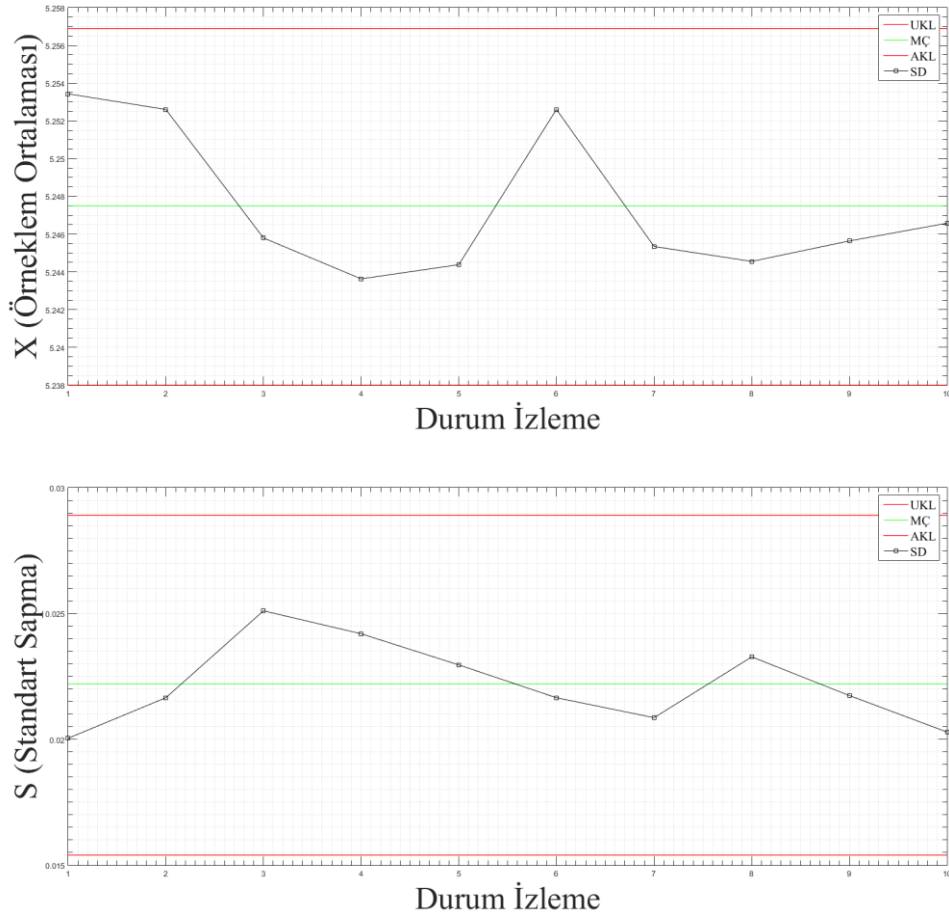
şartlarında mümkündür.

Bu şartlara bakılarak Şekil 4.2'deki grafikler incelendiğinde sürecin kaliteli çalışma aralığının da devam etmekte olduğu, yani sürecin kontrol altında olduğu ve dolayısıyla ASM'nin sağlam çalışma durumunun bozulmadığı görülmektedir.

İkinci olarak %50 yük durumu çalışması yapılmıştır. Burada yüksüz durumdaki işlemler aynı sıra ile gerçekleştirilerek  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri oluşturulmuştur. Kontrol limitleri ve merkezi çizgi %50 yüklü durum için Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.3’de Deney-1’in %50 yük durumundaki kalite kontrol grafikleri görülmektedir.

Çizelge 4.2. Deney-1 %50 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri

	AKL	MÇ	UKL
$\bar{X}$	5,2380	5,2475	5,2569
S	0,0154	0,0222	0,0289



Şekil 4.3. Deney-1 %50 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.3’deki grafikler incelendiğinde ASM’nin yükü %50 yük durumuna getirildiğinde motorun çalışma sürecinin kontrol altında olduğu görülmektedir. Motor yükünün artması

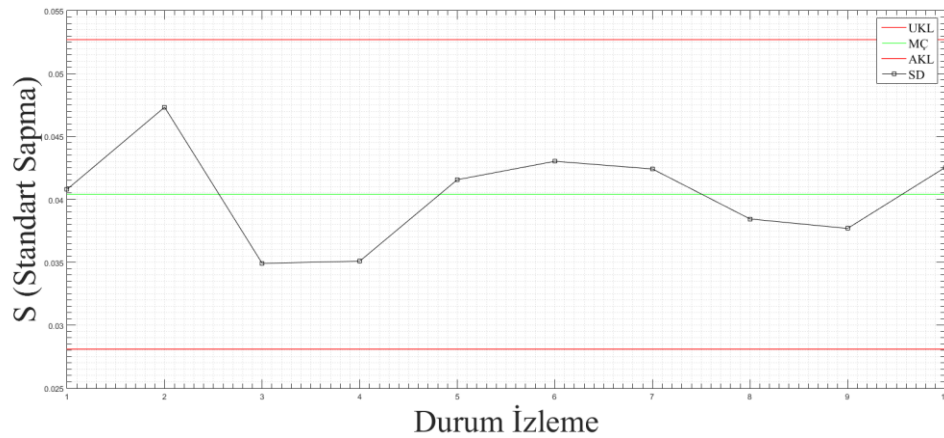
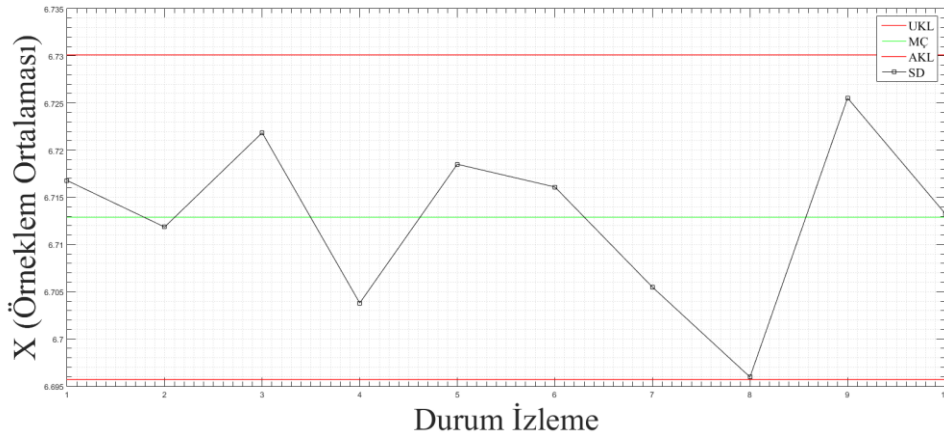


ile süreç sınırları boşa çalışma şartlarına göre değişmiştir, fakat sürecin kontrol altında devam ettiği dolayısıyla motorun sağlam durumunda olduğu görülmektedir.

Son olarak motor %100 yüklenmiş ve  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri yüksüz çalışma koşulundaki aynı işlemler uygulanarak elde edilmiştir. Bu yük durumu için hesaplanan limit değerleri Çizelge 4.3’de verilmektedir. Şekil 4.4’de %100 yüklü durum için  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri görülmektedir.

Çizelge 4.3. Deney-1 %100 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri

	AKL	MÇ	UKL
$\bar{X}$	6,6957	6,7129	6,7301
S	0,0281	0,0404	0,0527



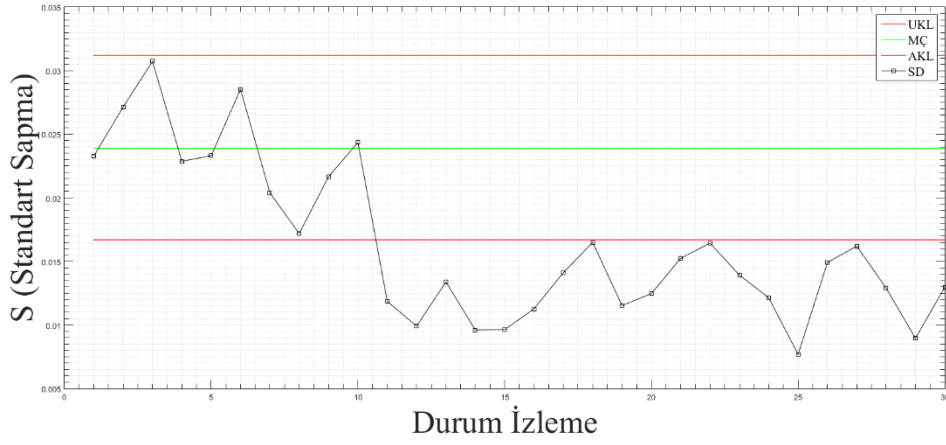
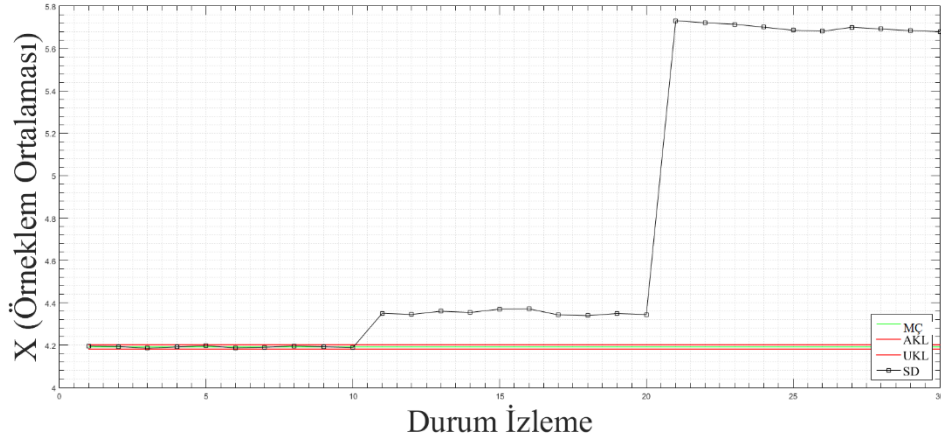
Şekil 4.4. Deney-1 %100 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.4'deki grafikler incelendiğinde motor çalışma sürecinin kontrol altında olduğu  $\bar{X}$ - $S$  kontrol grafiklerinden görülmektedir. Motor yükünün %100 olması ile kontrol limitleri değişmiştir. Motorun sağlam durumu da işleyişine devam ettiği sürecin kontrol altında olmasından görülmektedir.

Deney-2; Bu deney SSA durumundaki 2,2 kW'lık ASM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında akım sinyallerinin toplanmasıdır. Bu deneyin amacı stator sargı arızalı 2,2 kW'lık ASM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında İPK ile izlemek ve arıza durumunu tespit etmektir.

Bölüm 3.2.2'de bahsedildiği gibi üzerinde suni olarak oluşturulmuş SSA'lı ASM den akım sinyal verisi arızalı faz üzerinden toplanarak Deney-1'in yüksüz %50 yüklü ve %100 yüklü durumlarında yapıldığı gibi sinyaller İPK yöntemine göre analiz edilmiştir. Analizler SSA<sub>1</sub> ve SSA<sub>2</sub> durumları için ayrı ayrı yapılmış, elde edilen sonuçlar sağlam sürecinde hesaplanan kaliteli çalışma aralıklarında, motorun sağlam çalışma sürecinin devamı şeklinde grafikleştirilmiştir.

Şekil 4.5'de Deney-2'nin yüksüz çalışma koşulundaki kalite kontrol grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.5. Deney-2 yüksüz durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Bölüm 2.4.1’de belirtildiği gibi İPK yönteminde toplanan verilere göre sürecin kontrol dışı olması;

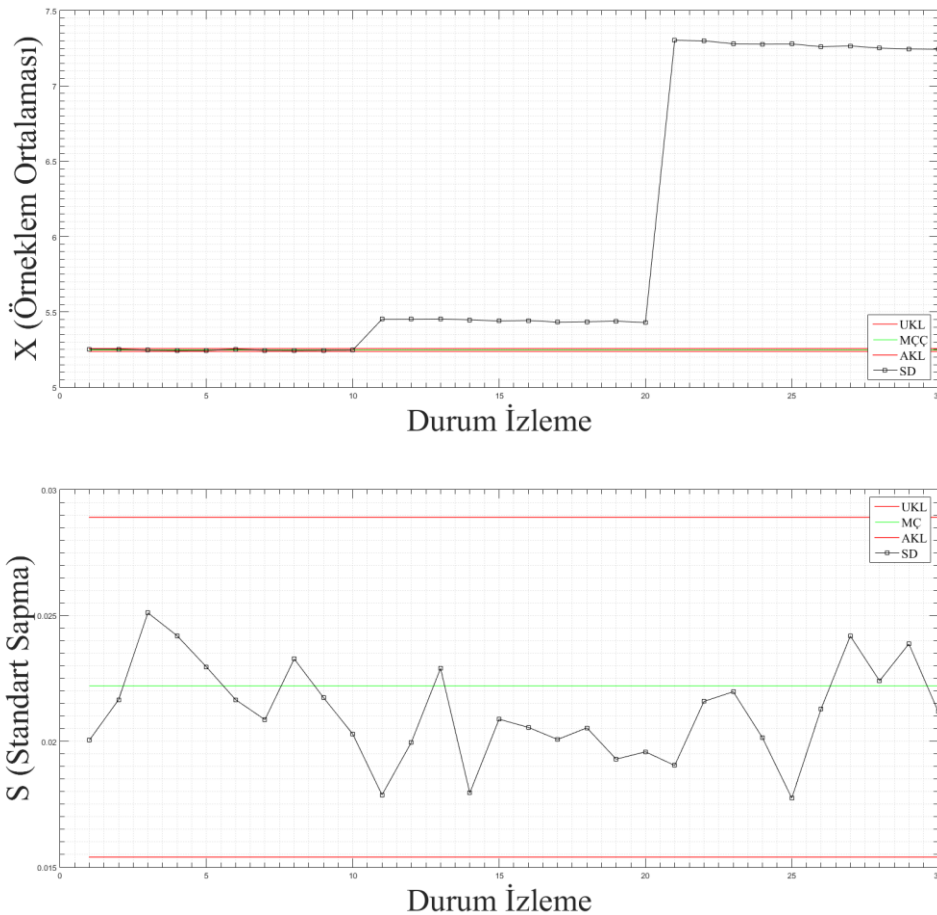
1. Proses çizelgesinin limitler dışına çıkması,
  2. Bir birini izleyen 7 noktanın süreç ortalama çizgisinin altında veya üstünde bulunması,
  3. Bir birini izleyen 7 noktanın artan veya azalan eğilim göstermesi,
  4. Proses çizelgesinin periyodik değişimler göstermesi,
  5.  $3\sigma$  çizgisi yakınındaki her 3 noktadan 2 sinin  $2\sigma$  çizgisi dışına taşması,
- durumlarında ortaya çıkar.

Kontrol grafiklerinin x ekseninde; 1-10 arası motorun sağlam durumunu, 11-20 arası SSA<sub>1</sub> durumunu ve 21-30 arası ise SSA<sub>2</sub>’deki çalışma durumunu göstermektedir. Yukarıda belirtilen sürecin kontrol dışına çıkma şartlarına bakılarak Şekil 4.5

incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde sürecin 10. durum izlemeden sonra UKL'nin üzerine çıktığı ve 20'ye kadar belirli bir düzlemde devam ettiği görülmektedir. Bu durum oluşan arızanın 11-20. durum aralığında sabit bir düzeyde kaldığını göstermektedir. 21. Durum izleme anından itibaren süreç MÇ'den daha da uzaklaşmaktadır. Bu değişim arıza kademesinin arttığını yani SSA<sub>2</sub> durumuna geçildiğini göstermektedir.

S kontrol grafiğinde 10. durum izleme anından sonra sürecin kontrol dışı kalması SSA'nın varlığını göstermektedir. Fakat S kontrol grafikleri daha çok kısa zamanlı değişimleri gösterdiği için SSA<sub>1</sub> durumundan SSA<sub>2</sub> durumuna geçiş kademesi görülememektedir.

Şekil 4.6'da Sargı arızalı motorun %50 yüklü durumlarındaki  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri görülmektedir.



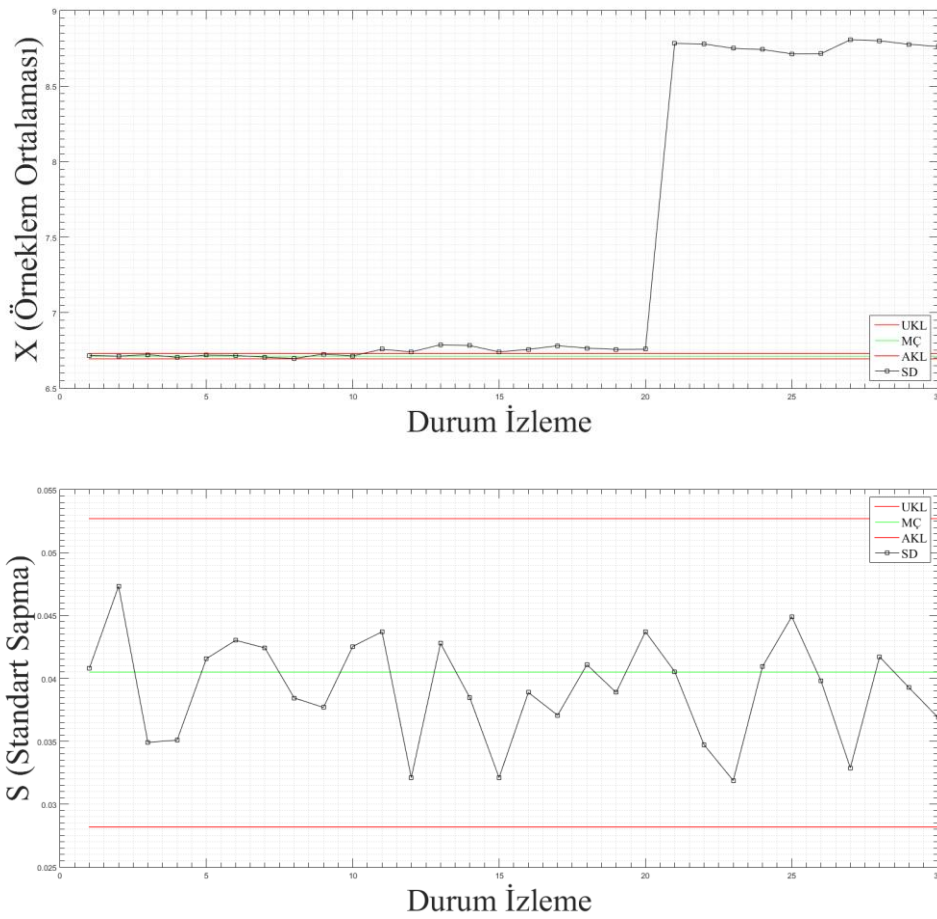
Şekil 4.6. Deney-2 %50 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.6'daki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde 11. durum izlemeden itibaren Süreç Değişkeni(SD) UKL'nin üzerine çıkmakta ve bu durum grafikte görülmektedir.

Sürecin bu noktadan kontrol dışına çıkmasına SSA<sub>1</sub> neden olmaktadır. SD 21. durum izleme itibari ile UKL'den daha da uzaklaşmakta ve arızanın büyüdüğünü ve SSA2 durumunun oluştuğunu göstermektedir.

S kontrol grafiğinde 10.durum izlemeden sonra SD, MÇ ile AKL arasındaki bölgede 26. durum izlemeye kadar sürecini devam ettirmektedir. Kontrol dışı durumların 2. maddesine göre değerlendirildiğinde SD'nin bu şekilde bir değişim izlemesi yine SSA'nın varlığını göstermektedir.

Şekil 4.7'de Deney-2'nin %100 yükteki kontrol grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.7. Deney-2 %100 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.7'deki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde yüksüz ve %50 yüklü durum grafiklerinde olduğu gibi SSA'nın oluşması ve arıza durumunun artışı kademeli olarak görülmektedir. S kontrol grafiğinde incelendiğinde; yüksüz ve %50 yüklü durumdan farklı olarak motor çalışmasının normal olduğu kontrol altında olduğu söylenebilir.

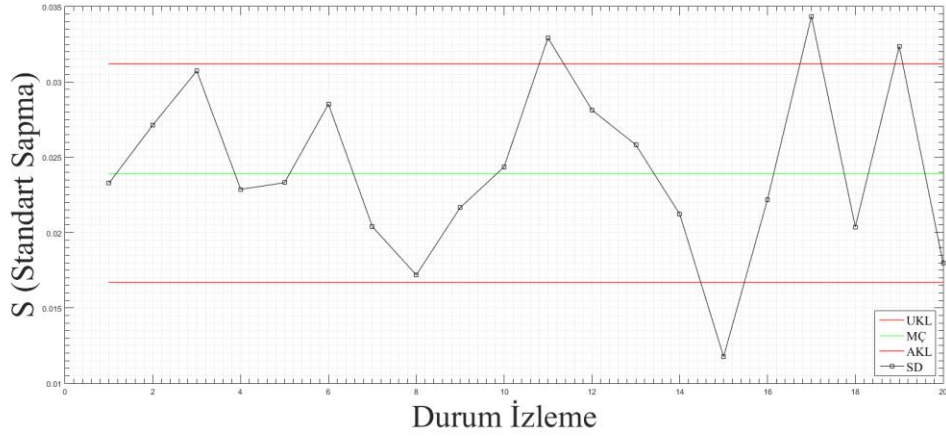
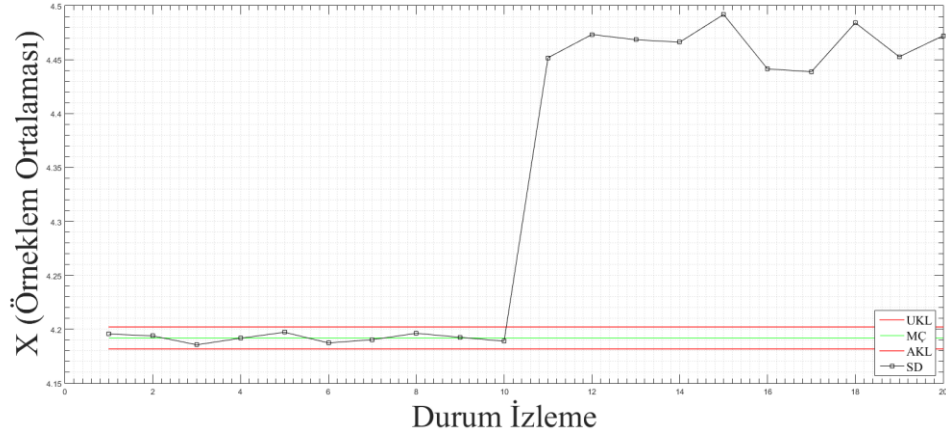
Bunun nedeni daha öncede bahsedildiği gibi  $S$  kontrol grafikleri daha çok anlık değişimleri verdiği için burada arıza tespit edilememiştir.

Motorun arızalı olup olmadığına karar verirken önceki bölümlerde ifade edildiği gibi  $\bar{X}$  ve  $S$  Kontrol grafiklerinin her ikisine de bakılması gerekir. Bu grafiklerden herhangi birinde sürecin kontrol dışına çıktığının görülmesi motorun arıza tespiti için yeterlidir. Burada  $S$  kontrol grafiği kontrol altında olma durumunu göstermesine rağmen,  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde sürecin kontrol dışına çıkması bize arızanın varlığını göstermektedir.

Deney-3; Bu deney EK arızalı durumdaki 2,2 kW'lık ASM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında akım sinyallerinin toplanmasıdır. Bu deneyin amacı EK arızalı 2,2 kW'lık ASM'nin sabit devir ve farklı yük koşulları altında İPK ile izlemek ve arıza durumunu tespit etmektir.

Bölüm 3.2.3'de bahsedildiği gibi üzerinde suni olarak oluşturulmuş EK arızalı ASM'den toplanan akım sinyal verisi, Deney-1'in yüksüz, %50 yüklü ve %100 yüklü durumlarında yapıldığı gibi sinyaller İPK yöntemine göre analiz edilmiştir. EK arızalı durumda elde edilen sonuçlar sağlam sürecinde hesaplanan kaliteli çalışma aralıklarında, motorun sağlam çalışma sürecinin devamı şeklinde grafikleştirilmiştir.

Şekil 4.8'de Deney-3'ün yüksüz çalışma koşulundaki  $\bar{X}$  - $S$  kontrol grafikleri görülmektedir.

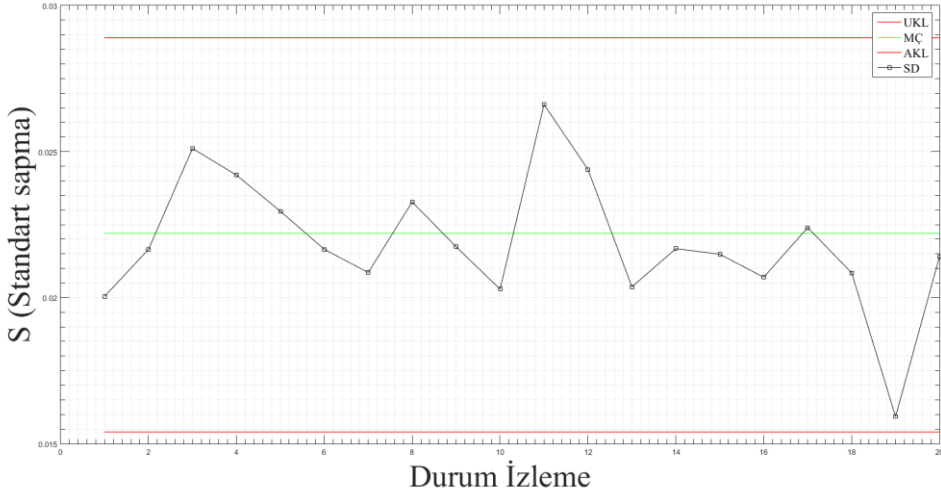
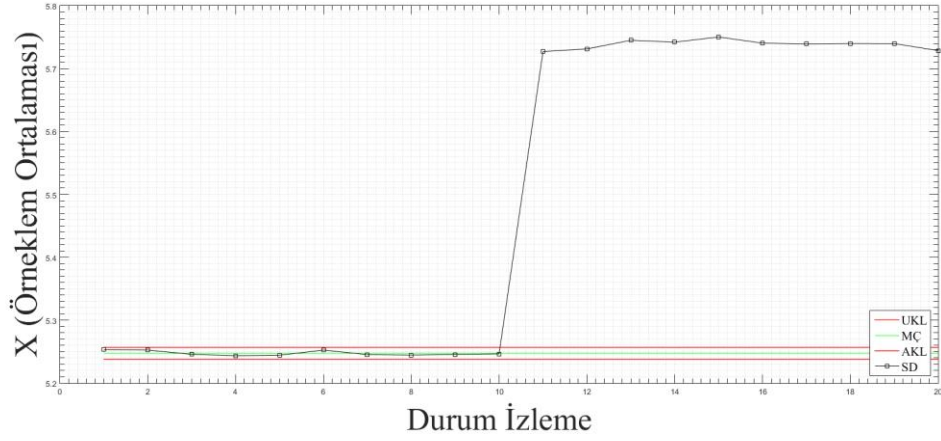


Şekil 4.8. Deney-3 yüksüz durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.8'deki grafikler incelendiğinde 10.durum izlemeye kadar sürecin kontrol altında olduğu görülmektedir. Buraya kadar olan süreç, motorun sağlam durumunu göstermektedir.  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde sürecin 11.durum izlemeden itibaren UKL'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Kontrol dışına çıkma nedeni EK arıza verisinin süreç devamına bu noktadan itibaren işlenmesidir.

S kontrol grafiklerinde 11. durum izleme ile limitler dışına çıkma olsa da devam eden süreçte sürecin limitler içerisine girdiği görülmektedir. S kontrol grafiklerinde SD kontrol dışına 4 nokta da çıkmakta ve arızanın varlığını göstermektedir.

Şekil 4.9'da EK arızalı motorun %50 yüklü durumlarındaki  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri görülmektedir.



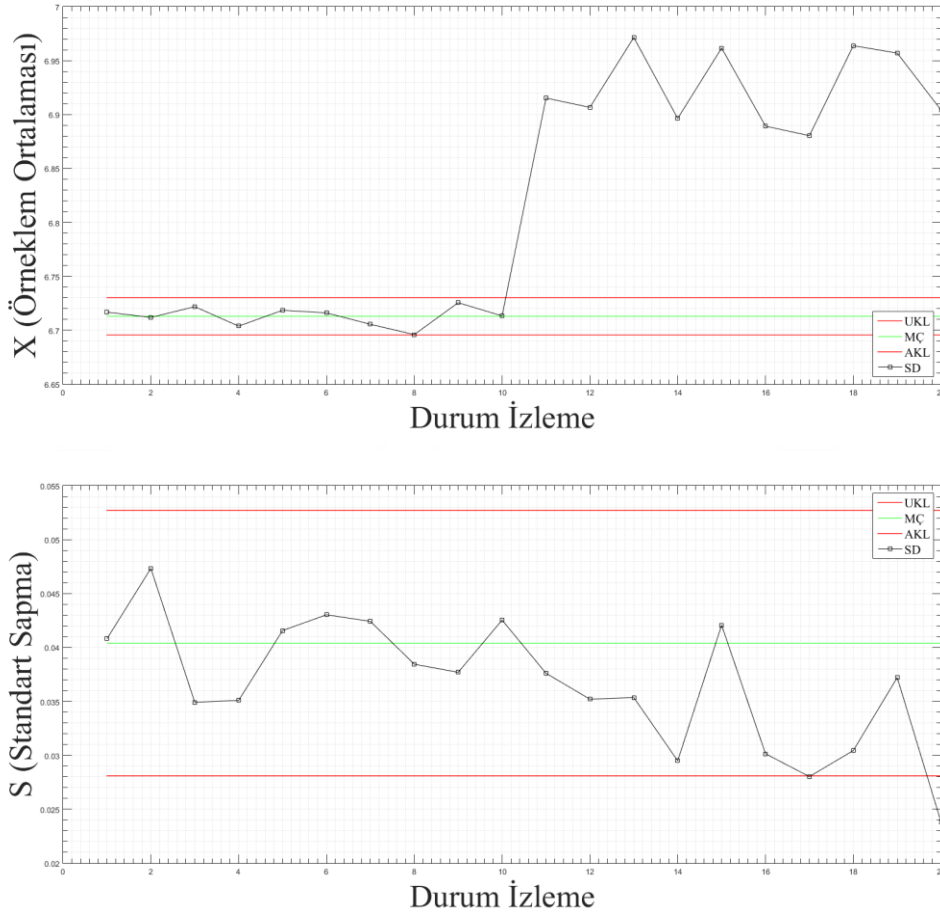
Şekil 4.9. Deneş-3 %50 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.9'daki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiklerinde 11. durum izlemeden itibaren UKL'nin üzerine SD'nin çıktığı görülmektedir. Sürecin bu noktada kontrol dışına çıkmasına EK arızası neden olmaktadır.

S kontrol grafiklerinde kontrol dışı bir durum oluşmamış ve EK arızasının varlığı görülememiştir. Kalite kontrol grafiklerinde sürecin bir veya iki grafikte kontrol dışına çıkması arızanın varlığını göstermektedir. Deneş-3'ün %50 yüklü durumunda arızanın varlığı sadece  $\bar{X}$  kontrol grafiği üzerinden tespit edilmiştir.



Şekil 4.10'da Deney-3'nin %100 yükteki kontrol grafikleri görülmektedir



Şekil 4.10. Deney-3 %100 yüklü durumda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.10'daki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde yüksüz ve %50 yüklü durum grafiklerinde olduğu gibi 11. durum izleme noktasından itibaren sürecin UKL'nin üzerine çıkarak kontrol dışı kaldığı görülmektedir.

S kontrol grafiği incelendiğinde 17. ve 20. durum izleme noktalarında sürecin AKL'nin altına inerek kontrol dışına çıktığı görülmektedir. Kontrol grafiklerinin ikisinde de limitlerin dışına çıkılarak sürecin kontrol dışına çıktığı görülmekte ve EK arızası İPK ile tespit edilmektedir.

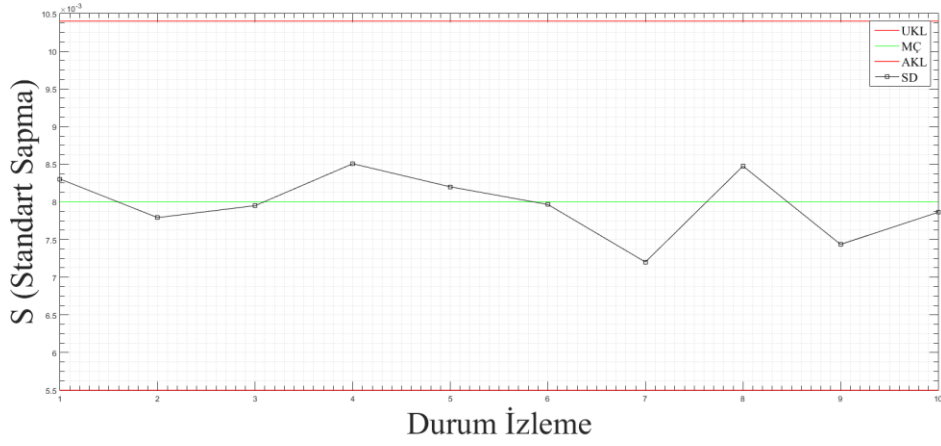
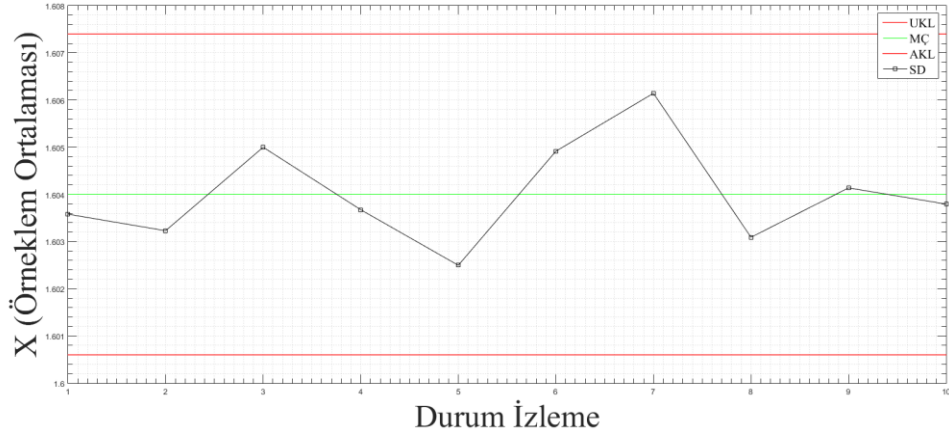
Deney-4; Bu deney sağlam durumdaki 0,75 kW'lık ASM'nin farklı devir ve sabit yük koşulları altında akım sinyallerinin toplanmasıdır. Bu deneyin amacı 0,75 kW'lık ASM'nin farklı devir ve sabit yük koşulları altında kaliteli çalışma aralıklarını belirlemek ve çalışma sürecini izlemektir.

Sürücü ile sürülen 0,75 kW'lık motor 3 farklı hız durumunda yüksüz olarak çalıştırılmıştır. Motorun devir sayısı ayarı sürücü ile yapılmıştır. Sürücü ile hız ayarı gerilim frekans (V/f) kontrolü ile sağlanmaktadır. Hızı ayarlamak için frekans değiştiğinden dolayı sinüzoidal dalganın bir saniyelik periyodundaki tepe değer sayısı da değişmektedir. Motor 1000 d/d ve 2000 d/d hızlarda çalıştırıldığında veri setlerinin 500 adet tepe değerden oluşması için sırası ile 15,5 sn ve 7,75 sn süresince ASM'nin akım sinyal verisi kaydedilmiştir.

Kalite kontrol grafikleri Deney-1'in yüksüz çalışma koşulunda elde edildiği gibi oluşturulmuştur. İlk olarak Deney-4'ün 1000 d/d hız koşulu için  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri oluşturulmuş ve limit noktalarının değerleri hesaplanmıştır. Kontrol grafikleri için hesaplanan limit değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.11'de Deney-4'ün 1000 d/d hızda çalışma durumundaki kalite kontrol grafikleri görülmektedir.

Çizelge 4.4. Deney-4 1000 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri

	AKL	MÇ	UKL
$\bar{X}$	1,6006	1,6040	1,6074
S	0,0055	0,0080	0,0104



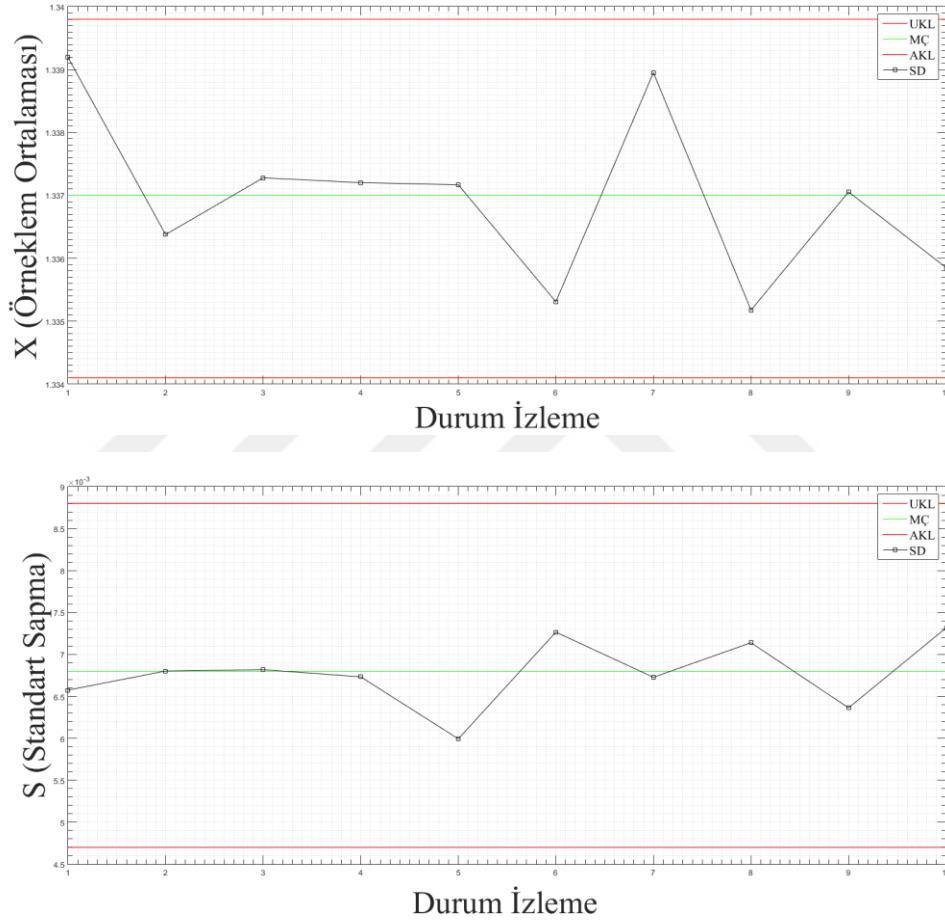
Şekil 4.11. Deney-4 1000 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.11'deki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$ -S kontrol grafiklerinin kontrol altında olduğu görülmektedir. Sürecin kaliteli çalışma aralığında devam ettiği ve sağlam çalışma durumunun bozulmadığı tespit edilmektedir.

İkinci olarak 2000 d/d hız durumu çalışması yapılmıştır. Burada Deney-1'in yüksüz durumundaki işlemler aynı sıra ile gerçekleştirilerek  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri oluşturulmuştur. Kontrol limitleri ve merkezi çizgi 2000 d/d hız durumu için hesaplanarak Çizelge 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.12'de deney-4'ün 2000 d/d hızda çalışma durumunda oluşturulan  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri görülmektedir.

Çizelge 4.5. Deney-4 2000 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri

	AKL	MÇ	UKL
$\bar{X}$	1,3341	1,3370	1,3398
S	0,0047	0,0068	0,0088



Şekil 4.12. Deney-4 2000 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

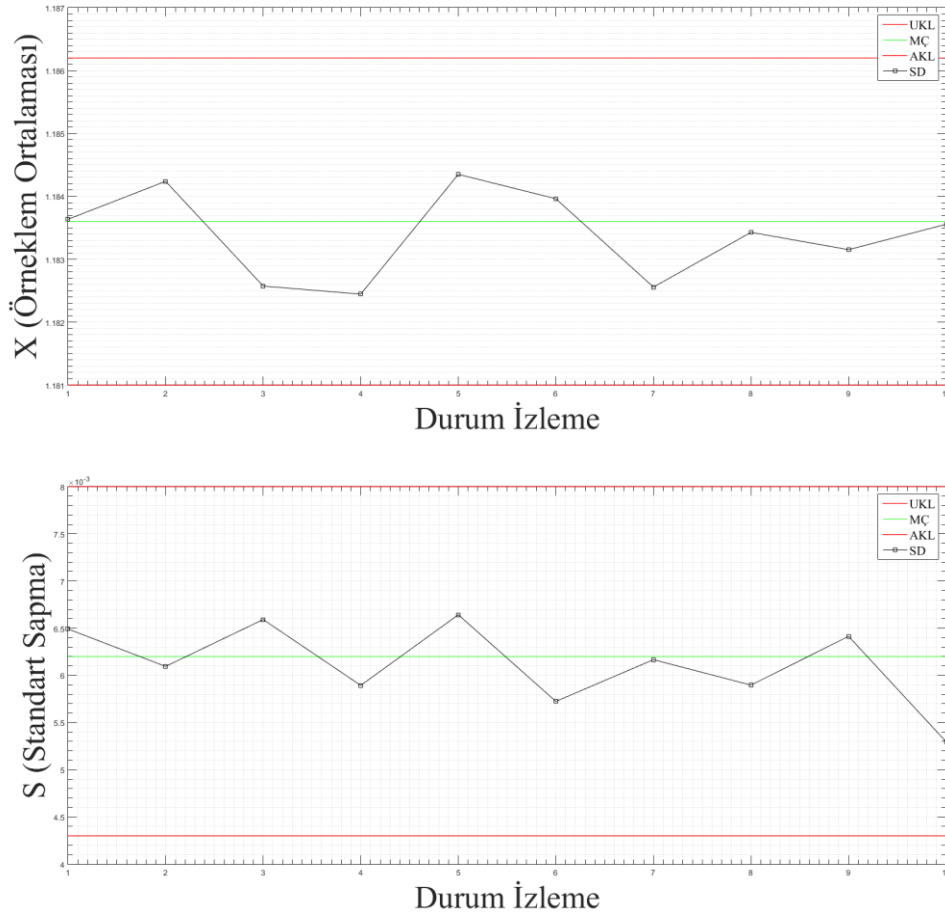
Şekil 4.12'deki grafikler incelendiğinde ASM'nin devir sayısı 2000 d/d olduğu durumda motorun çalışma sürecinin kontrol altında olduğu görülmektedir. Motor devir sayısının değişimi ile birlikte limit noktaları da değişmiştir fakat sürecin kontrol altında devam etmesi motorun sağlam çalışma durumunda olduğunu göstermektedir.

Son olarak motor boşta çalışma hızı olan 2991d/d çalıştırılmış ve  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri Deney-1'in yüksüz çalışma koşulundaki aynı işlemler uygulanarak elde edilmiştir. Bu hız

durumu için  $\bar{X}$  kontrol grafiklerindeki limitler ve merkezi çizgi noktaları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.13'de 2991 d/d hız durum için  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri görülmektedir.

Çizelge 4.6. Deney-4 2991 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri limit değerleri

	AKL	MÇ	UKL
$\bar{X}$	1,1810	1,1836	1,1862
S	0,0043	0,0062	0,0080



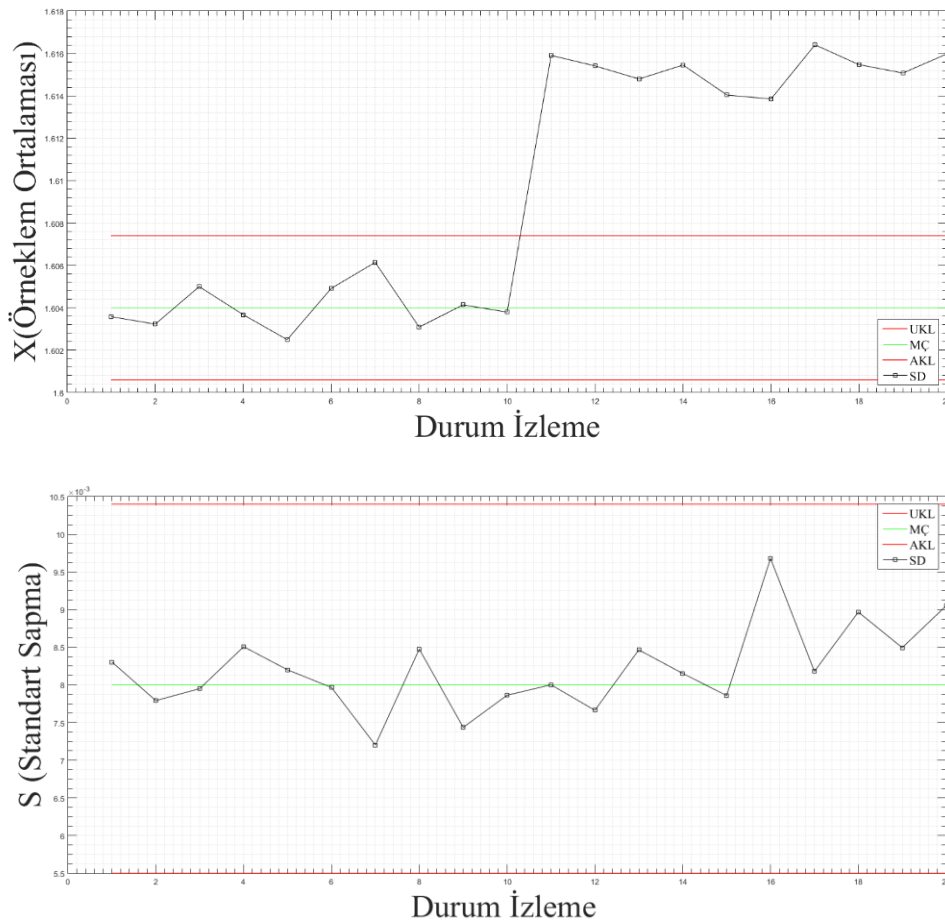
Şekil 4.13. Deney-4 2991 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.13'deki grafikler incelendiğinde motor çalışma sürecinin kontrol altında olduğu  $\bar{X}$ -S kontrol grafiklerinden görülmektedir. Motor hızının 2991 d/d olması ile kontrol limitleri değişmiştir. Motorun sağlam durumun da işleyişine devam ettiği sürecin kontrol altında olmasından görülmektedir.

Deney-5; Bu deney EK arızalı 0,75 kW'lık ASM'nin farklı devir ve sabit yük koşulu altında akım sinyallerinin toplanmasıdır. Bu deneyin amacı EK arızalı 0,75 kW'lık ASM'nin farklı devir ve sabit yük koşulu altında İPK ile izlemek ve arıza durumunu tespit etmektir.

Bölüm 3.2.3'de bahsedildiği gibi üzerinde suni olarak oluşturulmuş EK arızalı ASM'den toplanan akım sinyal verisi, Deney-4'in 1000 d/d, 2000 d/d ve 2991 d/d hız durumlarında yapıldığı gibi sinyaller İPK yöntemine göre analiz edilmiştir. EK arızalı durumunda elde edilen sonuçlar sağlam sürecinde hesaplanan kaliteli çalışma aralıklarında, motorun sağlam çalışma sürecinin devamı şeklinde grafikleştirilmiştir.

Şekil 4.14'de Deney-5'in 1000 d/d hızla çalışma koşulundaki  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri görülmektedir.



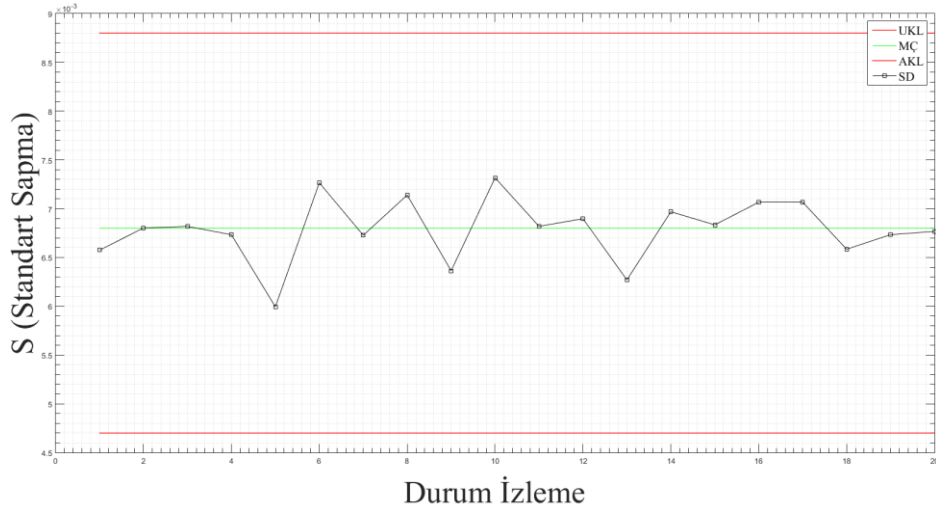
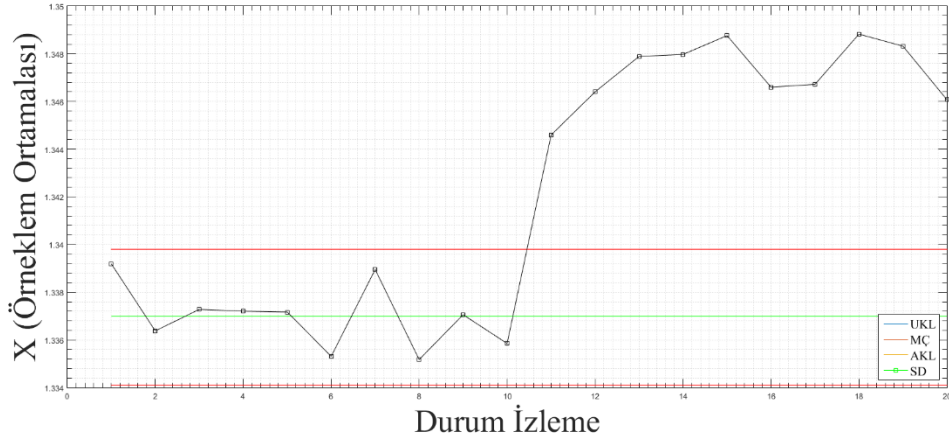
Şekil 4.14. Deney-5 1000 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.14'deki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde sürecin 11. Durum izlemeden itibaren UKL'inin üzerine çıkarak bu düzlemde seyrettiği ve kontrol dışına çıktığı görülmektedir. Bu durum 11. durum izlemeden itibaren EK arızasını göstermektedir.

$S$  kontrol grafiğinde süreç kalite çalışma aralığında devam etmektedir. SD'nin kontrol altında olması motorun sağlam durumunu koruduğunu göstermektedir fakat  $S$  kontrol grafiklerinin kısa zamanlı değişimleri gösterdiği dikkate alınmalıdır.

Deney-2'nin %100 yüklü durumunda da bahsettiğimiz gibi sadece bir kontrol grafiğinde kontrol dışı durumların oluşması süreçte hata olduğunu dolayısıyla EK arızasının olduğunu göstermektedir. Burada arıza  $\bar{X}$  kontrol grafiği üzerinden tespit edilmiştir.

Şekil 4.15'de Deney-5'in 2000 d/d hızla çalışma koşulundaki  $\bar{X}$ - $S$  kontrol grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.15. Deney-5 2000 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

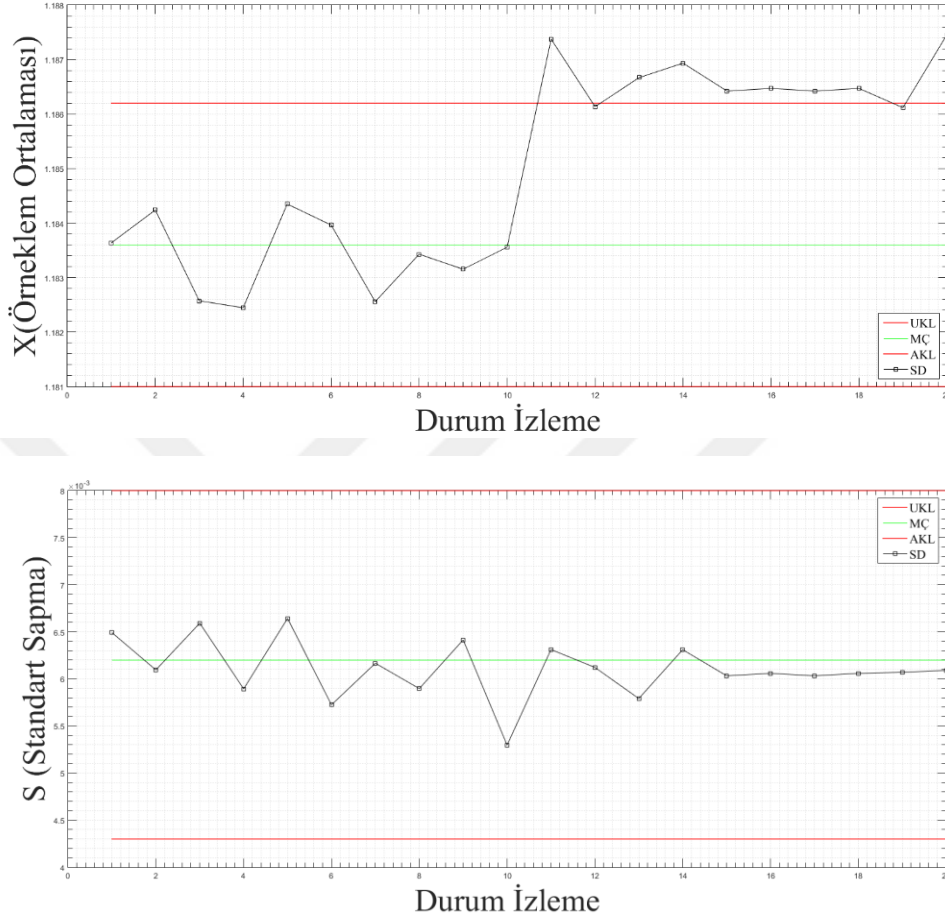
Şekil 4.15'deki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde yine sürecin 1000d/d hız durumunda olduğu gibi 11. Durum izlemeden itibaren UKL'nin üzerine çıkarak kontrol dışına çıktığı görülmektedir.

S kontrol grafiğinde süreç 1000d/d hız durumunda olduğu gibi kaliteli çalışma aralığında normal bir şekilde devam etmektedir. SD'nin kontrol altında olması motorun sağlam durumunu koruduğunu göstermektedir.

Deney-5'nin 1000d/d hız durumunda da bahsettiğimiz gibi sadece bir kontrol grafiğinde kontrol dışı durumların oluşması EK arızanın olduğunu göstermektedir. bu hız koşulunda da EK arızası durumu  $\bar{X}$  kontrol grafiği üzerinden tespit edilmiştir.



Şekil 4.16'da Deney-5'in 2991 d/d hızla çalışma koşulundaki  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.16. Deney-5 2991 d/d hızda  $\bar{X}$ -S kontrol grafikleri

Şekil 4.16'daki grafikler incelendiğinde  $\bar{X}$  kontrol grafiğinde süreç 11. durum izlemeden itibaren UKL sınırının üzerine çıkmakta ve kontrol dışında olduğu görülmektedir. 12. ve 19. durum izleme noktaları limitler arasında bulunsada kontrol dışı olma durumunu değiştirmemektedir.

S kontrol grafiğinde ise 15. durum izleme anından itibaren MÇ'nin altında 6 nokta görülmektedir. Kontrol dışı durumların 2. maddesi dikkate alınarak sürecin işleyişini takip etmek gerekmektedir.

Deney-5'in 2991 d/d hız durumunda da motorun EK arızası diğer iki hız durumunda olduğu gibi  $\bar{X}$  kontrol grafiği üzerinden tespit edilmiştir.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

ASM'ler yapılarının basit, fazla bakım gerektirmemeleri ve uygun fiyatlı olduklarından sanayinin en çok tercih ettiği motorlardandır. Endüstride değişik çalışma koşullarında çalışan ASM'ler aynı zamanda birçok bozucu etkiyle de karşılaşılır. Nem, toz ortam sıcaklığı gibi çevresel etkilerin yanında dengesiz yüklenme, sık dur-kalk ve besleme geriliminin dalgalanması vb. gibi etkiler motorda elektriksel ve mekaniksel arızalara neden olmaktadır. Motor arızalarına vaktinde müdahale edilmez ise istenmeyen bir zamanda sistemin durmasına neden olabilir. Plansız yaşanacak durmalar ise kalite, zaman ve ekonomik kayıpları ortaya çıkaracaktır. Bu kayıpları önlemek ve motor arızaları tespit edebilmek için durum izleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerde motorun akım, akı ve titreşim gibi çeşitli sinyalleri izlenmekte ve arıza durumları belirlenmektedir.

Bu tez çalışmasında ASM'nin elektriksel arızalarından SSA ve mekaniksel arızalarından EK arızası İPK ile tespiti gerçekleştirilmiştir. SSA sarım-sarım kısa devresi şeklinde iki kademe ve EK arızası ise statik EK olarak ele alınmıştır. Arızalar sanayideki oluşumları dikkat alınarak gerçekleştirilmiştir. SSA sargıların farklı spirlerinden çıkarılan uçların kısa devre edilmesi ile EK arızaları ise rulmanlar üzerine бага montajı yapılarak gerçekleştirilmiştir. Sağlam ve arızalı durumların her biri için özdeş birer adet motor kullanılmış toplamda 5 adet motor üzerinde çalışılmıştır. Arızaların tespitinde motorun stator akım sinyal verisi kullanılmıştır.

Motorların sağlam ve arızalı durum verisini toplamak için çalışma şartlarına uygun deney düzeneği oluşturulmuştur. Sağlam verisi 2,2 kW'lık ASM için 3 farklı yük durumunda (%0, %50, %100) ve 0,75 kW'lık motor için ise 3 farklı hız koşullarında (1000 d/d, 2000 d/d, 2991 d/d) olmak üzere 6 şekilde elde edilmiştir. 2,2 kW'lık motorda sargı ve EK arızaları 3 farklı yük durumunda, 0,75 kW'lık motorda ise EK arızası 3 farklı hız koşulunda olmak üzere akım sinyal verisi toplanmıştır. Veri toplama işlemleri NI 6002 DAQ kartı üzerinden Lab VIEW programı Signal Express 2010 Tools ile 5000 Hz örnekleme frekansında yapılmıştır. Toplam data sayısı 18 farklı şekilde olmak üzere 5825000 adettir.

Elde edilen veriler ASM'nin çalışma sürecini izlemek ve arızalarını tespit etmek için istatistiksel bir yöntem olan İPK ile analiz edilmiştir. Veri setleri kullanılarak hesaplanan limitler ile kaliteli çalışma aralığı oluşturulmuştur. Sağlam motorlardan toplanan akım sinyali veri setleri IBM SPSS Statistics 22 programı ile analiz edilerek kaliteli çalışma aralığı limit değerleri hesaplanmıştır. ASM'nin farklı durumları için hesaplanan kaliteli çalışma aralığı limit değerleri kullanılarak arızalı motorlardan toplanan veri setleri MATLAB ortamında sürecin devamına işlenmiş ve arızalar tespit edilmiştir. ASM'nin arıza durumları çalışma sürecinde örneklem ortalamasındaki farklılıkları ölçen  $\bar{X}$  kontrol grafiği ile standart sapmasını ölçen  $S$  kontrol grafiği üzerinden değerlendirilmiştir.

ASM arızalarının tespiti yapılan 5 adet deney üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Deney-1'de farklı yük koşulları altında sabit devirde 2,2 kW'lık ASM'nin sağlam durumu analizi edilmiştir. ASM'nin farklı yük koşullarındaki çalışma süreci izlenmiş ve kaliteli çalışma aralıkları belirlenmiştir. Motor sağlam olarak çalıştırıldığında üç farklı yük durumunda da  $\bar{X}-S$  grafiklerinin kontrol altında olduğu ve süreç değişkenlerinin kaliteli çalışma aralığında devam ettiği görülmüştür.

Deney-2'de farklı yük koşulları altında sabit devirde 2,2 kW'lık ASM'nin SSA durumu analizi edilmiştir. SSA için oluşturulan  $\bar{X}-S$  kontrol grafiklerinde sağlam çalışma sürecinden sonra iki kademede oluşturulan arıza durumu görülmüştür. Özellikle  $\bar{X}$  kontrol grafiklerinde SD'nin UKL'nin üzerine çıkması ile arıza durumu kademeleri ile birlikte görülmektedir.  $S$  kontrol grafiklerinde arızanın varlığı görünmekte fakat kademe geçişleri belirgin değildir.  $S$  kontrol grafiklerinde de ani değişimler görüldüğü için arıza kademeleri tespit edilememiş hatta zaman zaman sürecin normal devam ettiği bile görülmektedir.

Deney-3'de farklı yük koşulları altında sabit devirde 2,2 kW'lık ASM'nin EK arızalı durumu analizi edilmiştir. EK arızası durumu için oluşturulan  $\bar{X}-S$  kontrol grafiklerinde sağlam çalışma sürecinden sonra arıza durumu görülmüştür.  $\bar{X}$  kontrol grafiklerinde EK arızası SD'nin UKL'nin üzerine çıkarak kontrol dışına çıkması ile tespit edilmiştir.  $S$  kontrol grafiklerinde ise boşta ve tam yük koşullarında arıza tespit edilebilmiş fakat yarı yük koşulunda arızalı durum görülmemiştir. Farklı yüklerde çalıştırılan ASM'den elde

edilen  $\bar{X}$  kontrol grafiklerinde arıza net bir şekilde görülürken  $S$  kontrol grafiklerini üzerinden EK arızası tespit edilememiştir.

Deney-4'de sabit yük koşulu altında değişken devirler de 0,75 kW'lık ASM'nin sağlam durumu analizi edilmiştir. ASM'nin farklı hız durumlarındaki çalışma süreci izlenmiş ve kaliteli çalışma aralıkları belirlenmiştir. Farklı yük koşullarında olduğu gibi motor sağlam olarak çalıştırıldığında üç farklı hız durumunda da  $\bar{X}-S$  grafiklerinin kontrol altında çalışma sürecine devam ettiği görülmüştür.

Deney-5'de sabit yük koşulu altında değişken devirler de 0,75 kW'lık ASM'nin EK arızalı durumu analizi edilmiştir. Deney-5'in EK arıza durumu Deney-3 ve Deney-4 'de olduğu gibi sağlam çalışma durumunun devamı olarak sürece işlenmiş ve  $\bar{X}-S$  elde edilmiştir.  $\bar{X}$  kontrol grafiklerinde EK arıza durumu sürecin UKL'nin üzerine çıkarak kontrol dışı kalması ile tespit edilmiştir.  $S$  kontrol grafiklerinde ise EK arıza durumu tespit edilememiş ve  $SD$ 'nin kontrol altında devam ettiği görülmüştür.

Yukarıdaki deney sonuçları özetlenirse Deney-1'de farklı yük koşulları altında sabit devirde 2,2 kW'lık ASM'nin sağlam çalışma durumu izlenmiştir. Deney-2'de SSA aynı şartlardaki motor üzerinden izlenmiş ve kademeli olarak tespit edilmiştir. Deney-3'de yine aynı şartlarda ve özdeş bir ASM'de EK arızası durumu belirlenmiştir. Deney-4'de sabit yük koşulu altında değişken devirler de 0,75 kW'lık ASM'nin sağlam durumu izlenmiştir. Deney-5'te ise Deney-4'tekine özdeş motor ile aynı çalışma koşulunda EK arızası durumu grafikler üzerinden görülmüştür.

Bu tez çalışmasının özgün yanları, ASM arıza literatürüne ve endüstriye yapabileceği katkılar şunlardır:

- ASM'nin arıza tespitinde ilk defa İPK kullanılmıştır.
- ASM arızalarının tespitinde İPK yönteminin genel kullanılabilirliğini görmek açısından, aynı arıza türü farklı güçlerdeki ASM'de analiz edilmiş ve arıza durumu tespiti yapılmıştır.
- Hem farklı yük koşullarında hem de farklı hız durumlarında arıza tespiti gerçekleştirilmiştir.
- Arıza tespiti zaman boyutunda ham sinyaller üzerinden yapıldığı için oldukça pratik ve ucuz olduğu söylenebilir.

- ASM üzerinde gerçekleşen arızalar kısa sürede tespit edilmiştir. Bu sayede zaman kaybı ve bakım onarım maliyetleri azaltılabilmektedir.
- Önerilen yöntem ile gerçekleştirilen arıza tespitinde ASM’de oluşan arızaların başlama zamanı belirlenmekte ve gelişme süreci izlenebilmektedir.
- İPK yönteminde çok yüksek örnekleme frekansına ihtiyaç duyulmadığından daha az veri ile arıza analizi yapılabilmektedir.
- Analiz işlemleri için yüksek örnekleme frekansında data gerekmediğinden SCADA gibi merkezi kontrollü sistemler üzerinden veri kaydı yapılarak online arıza tespiti çalışması ile endüstride verim artışı sağlanabilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda İPK yöntemi ile ASM’nin farklı arızaları incelenebilir ve arıza sınıflandırması yapılabilir. Yöntemin geçerliliği dinamik hız ve yük koşulları için test edilerek bu çalışma şartlarındaki verimliliği araştırabilir. ASM dışında senkron motor, doğru akım motoru vb. gibi diğer motorlarda da bu yöntem uygulanabilir. Elektrik motorlarının arıza tespitinde İPK yöntemi genel bir geçerliliğe sahip olabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Afrat, S.; Yadava, G.; Bhim, S.: “A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 20, 1, (2005) 106-114.
- Akar, M. ve Çankaya, İ., (2009). Evirici ile Sürülen Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Tespiti. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs, 2009, Karabük, Türkiye.
- Akar, M., (2009). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Yapay Zeka Yöntemleri İle Mekanik Arızaların Teşhisi. (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- Akar, M., Fenercioğlu, A., & Soyaslan, M. (2011). Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Elektromanyetik Tork ile Tespiti. İATS, 11, 142-146.
- Akdur, B., “Etial 171 Alüminyum Alaşımli Malzeme Talaşlı İmalatı Yapan Bir İşletmede Hassas Toleranslı Ölçülerde Pcd Ve Karbür Kesici Takım Kullanımının İstatistiksel Proses Kontrol Metoduyla Karşılaştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir Türkiye (2016) 18-20
- Akkurt, M. (2002). Kalite kontrol Excel destekli. Birsen.
- Arabacı, H.: Sincap Kafesli Asenkron Motorlarda Kafes Arızalarının Motor Performansına Etkileri, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye (2011) 14-16
- Aydın, İ., Karaköse, M., & Erhan, Akın, (2009). Kırık Rotor Çubuğu Ve Stator Arızalarının Teşhisinde Yapay Sinir Ağı Yaklaşımı.
- Bellini, A.; Filippetti, F.; Tassoni, C.; Capolino, G-A.: “Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, Dec., (2008) 4109-4126.
- Benbouzid, M. E. H. 2000. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. IEEE transactions on industrial electronics, 47(5), 984-993.
- Birgören, B., & Koçer, B. (2004). İstatistiksel proses kontrol çizelgelerinde hata teşhisine yönelik yaklaşımlar. GÜ Fen Bilimleri Dergisi, 17(4), 59-69.
- Birgören, B. (2015). İstatistiksel kalite kontrolü. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 95-111.
- Boashash, B., (1990). Time-Frequency Signal Analysis. Advances in Spectrum Estimation and Array Processing, edited by S. Haykin. Chapter 9, Prentice- Hall.
- Bonnett, A. H., & Soukup, G. C. (1992). Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 28(4), 921-937.
- Boudinar, A. H., Benouzza, N., & Bendiabdellah, A. (2016). Induction Motor Bearing Fault Analysis Using a Root-MUSIC Method. IEEE Transactions on Industry Applications, 52(5), 3851-3860.
- Cabal-Yepez, E., Osornio-Rios, R. A., Romero-Troncoso, R. J., Razo-Hernandez, J. R., & Lopez-Garcia, R. (2009, December). FPGA-based online induction motor multiple-fault detection with fused FFT and wavelet analysis. In Reconfigurable Computing and FPGAs, 2009. ReConFig'09. International Conference on (pp. 101-106). IEEE.
- Cambron, P., Masson, C., Tahan, A., & Pelletier, F. (2016). Control chart monitoring of wind turbine generators using the statistical inertia of a wind farm average. Renewable Energy.

- Chapman, S. J., Akın, E., & Orhan, A. (2007). Elektrik makinalarının temelleri. Çağlayan Kitabevi.
- Çolak, İ.,(2017) Elektrik Makinaları-2. Seçkin Yayınevi. 25
- Das, B. (2017). Induction Motor Fault Detection Feed by Frequency Converter using Signal Signature Analysis. International Journal of Engineering Science, 4668.
- Debnath, L.: “Wavelet Transforms and Time-Frequency Signal Analysis”, Birkhauser Boston, (2001).
- Demirbaş, Ş., Irmak, E., & Çolak, İ. (2006). Asenkron Motor Benzetimi için Web Tabanlı Bir Eğitim Aracı. Politeknik Dergisi, 9(4).
- Doğan,Z.: “Ayrıklaştırma Yöntemleri ve Yapay Sinir Ağı Kullanarak Asenkron Motorlarda Arıza Teşhisi”, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye (2012) 5-45
- Doğruer, T., “Evirici İle Sürülen Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Tespiti” , Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat Türkiye (2012) 24-36
- Dorrell, D.G.; Thomson, W.T.; Roach, S.: “Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors”, Industry Applications, IEEE Transactions, Vol. 33, Issue1, Jan/Feb., (1997) 24 – 34.
- Eftekhari, M., M. Moallem, S. Sadri, and A. Shojaei. 2013. Review of Induction Motor Testing and Monitoring Methods for Inter-Turn Stator Winding Faults. 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE (2013), 13–18.
- Eker, M., 2013. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Demagnetizasyon Arızasının Tespiti. (Y.Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği ABD, Tokat.
- El, Mohamed, and Hachemi Benbouzid. 2000. “A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection.” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS 47 (5).
- Eser, E., & Doğan, Z. (2017). Asenkron Motorlarda Rotor Çubuk Kırığı Arızasının İstatistiksel Proses Kontrol Metodu İle Tespiti. Presented at the 2. Uluslararası Mühendislikmimarlık Ve Tasarım Kongresi .
- Çıra, F.,(2018). Asenkron Motorlarda Gerçek Zamanlı Durum İzleme ve Arıza Tespiti. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 7(1), 12-24.
- Fugate, M. L., Sohn, H., & Farrar, C. R. (2001). Vibration-based damage detection using statistical process control. Mechanical Systems and Signal Processing, 15(4), 707-721.
- Gaeid, K. S., & Mohamed, H. A. (2010). Diagnosis and fault tolerant control of the induction motors techniques a review. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(2), 227-246.
- Godoy W. F., Da Silva I. N., Goedtel A. and Cunha Palácios R. H., “Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors,” Appl. Soft Comput. J., vol. 32, pp. 420–431, 2015.
- Göktaş, T., 2013. Yük Salınımı Durumunda Asenkron Motorda Rotor Çubuk Arızasının Gerçek Zamanlı Tespiti (Doktora Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD, Malatya, Türkiye.(2015) 4-7
- Gümüšoğlu, Ş. (2000). İstatistiksel kalite kontrolü ve toplam kalite yönetimi araçları. Beta.2.113-134

- Günel, Serkan, and Ömer Nezih Gerek. "Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current." *Mechanical Systems and Signal Processing* 23.8 (2009): 2658-2670.
- Hsu, J. S., Woodson, H. H., & Weldon, W. F. (1992). Possible errors in measurement of air-gap torque pulsations of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(1), 202-208.
- Huang, X., Habetler, T. G., Harley, R. G., & Wiedenbrug, E. J. (2007). Using a surge tester to detect rotor eccentricity faults in induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(5), 1183-1190.
- Kara, B. ve Doğan, Z., 2016. Şebeke Kalkışlı Daimi Mıknatıslı Senkron Motorda Statik Eksenden Kaçıklık Arızasının İncelenmesi. EEB sempozyumu, Tokat.
- Koca, Y. B., & Ünsal, A.(2017) Asenkron Motorların Elektriksel ve Mekaniksel Arızalarının Değerlendirilmesi.
- Kumar, K.V.; Kumar, S.S.; Praveena, B.; Joseph, P.J.; Jubin, E.P.: "Soft Computing Based Fault Diagnosis", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 4, August, (2010) 1793-8163.
- Kurien, C., & Srivastava, A. K. (2018). Condition monitoring of systems in thermal power plant for vibration, motor signature, noise and wear debris analysis. *World Scientific News*, 91, 31-43.
- Loureiro, L. D., Epprecht, E. K., Chakraborti, S., & Jardim, F. S. (2017). In-control performance of the joint Phase II– S control charts when parameters are estimated. *Quality Engineering*, 1-15.
- Maraş, S., & Arslan, H. (2014). Düz Dişli Çark Sistemindeki Aşınma Hatasının İstatistiksel Proses Kontrol Metodu İle Belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(1), 9-14.
- Maraş, S., "Dişli Çark Sistemini Titreşimlerinin İstatistiksel Proses Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Türkiye (2012) 37-42
- McCormick, A.C.; Nandi, A.K.: "Bispectral and trispectral features for machine condition diagnosis", *IEE Proceedings-Vision Image and Signal Processing*, 146(5), (1999) 229–234.
- Mehala, N.: "Condition Monitoring And Fault Diagnosis of Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis", PhD Thesis, Electrical Engineering Department National Institute of Technology, Kurukshetra, India (2010) 10- 96.
- Mehrjou M. R.; Mariun, N.; Marhaban, M. H.; Misron N.; "Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine—A review", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, Issue. 8, (2011) 2827-2848
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons (New York).
- Nakamura, H., Pandarakone, S. E., & Mizuno, Y. (2016). A novel approach for detecting broken rotor bar around rated rotating speed using frequency component and clustering. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 11(S2).
- 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.
- Niezgoda, J. (2017). The Use of Statistical Process Control Tools for Analysing Financial Statements. *Folia Oeconomica Stetinensia*, 17(1), 129-137.



- Ojaghi, M., Sabouri, M., & Faiz, J. (2014). Diagnosis methods for stator winding faults in three-phase squirrel-cage induction motors. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 24(6), 891-912.
- Özcan, S. (2001). İstatistiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi ve çimento sanayiinde bir uygulama. *CÜ İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2(2), 151-174.
- Patır, S. (2009). İstatistiksel Proses Kontrol Teknikleri Ve Kontrol Grafiklerinin Malatyadaki Bir Tekstil (İplik Dokuma) İşletmesinde Bobin Sarım Kontrolüne Uygulanması. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 1(18), 231-250.
- Polat A., 2013. Asenkron Motorda Eksen Kaçıklığının Analizi. (Y.Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Proakis, J. G. and Manolakis, D.: "Digital Signal Processing", Prentice Hall, New Jersey (2007).
- Rekha, V. S. D., & Ravi, K. S. (2017). Induction Motor Condition Monitoring and Controlling Based on IoT.
- Rodriguez, P. V. J., & Arkkio, A. (2008). Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic. *Applied Soft Computing*, 8(2), 1112-1120.
- Salem, S. B., Salah, M., Bacha, K., & Chaari, A. (2016, December). Experimental investigation of the eccentricity impact on the line current spectrum for induction motors fault diagnosis purposes. In *Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2016 17th International Conference on (pp. 205-210). IEEE.
- Sarıoğlu, M. K., Gökaşan, M., & Boğosyan, S. (2003). Asenkron makinalar ve kontrolü. *Birsen Yayınevi*. 8
- Seera, M., Lim, C. P., Nahavandi, S., & Loo, C. K. (2014). Condition monitoring of induction motors: A review and an application of an ensemble of hybrid intelligent models. *Expert Systems with Applications*, 41(10), 4891-4903.
- Sharifi, R., & Ebrahimi, M. (2011). Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring. *ISA transactions*, 50(1), 14-20.
- Siddique, A., Yadava, G. S., & Singh, B. (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE transactions on energy conversion*, 20(1), 106-114.
- Song, X., Hu, J., Zhu, H., & Zhang, J. (2017). Effects of the Slot Harmonics on the Stator Current in an Induction Motor with Bearing Fault. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Soy, O., 2016. Sanayide Kullanılan 7,5 kW ve üzeri AC Motorlara İlişkin Envanter Çalışması. T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Verimlilik Genel Müdürlüğü, *Anahtar Dergisi*, 3, 237.
- Stapenhurst, T. (2013). *Mastering statistical process control*. Routledge.
- Supangat, R., Grieger, J., Ertugrul, N., Soong, W. L., Gray, D. A., & Hansen, C. (2007, May). Detection of broken rotor bar faults and effects of loading in induction motors during rundown. In *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International (Vol. 1, pp. 196-201)*. IEEE.
- Şenol, Ş. (2012). İstatistiksel Kalite Kontrol. *Nobel Akademik Yayıncılık*, 1., 69-176
- Toliyat, H. A., Nandi, S., Choi, S., & Meshgin-Kelk, H. (2012). *Electric machines: modeling, condition monitoring, and fault diagnosis*. CRC press.
- Ünsal, A., & Güçlü, S. (2015). Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırıklarının Mann-Whitney U-Testi İle İncelenmesi. *Journal of the Institute of Science &*

- Technology of Dumlupinar University/Dumlupinar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, (35).
- Ünsal, A., & Kabul, A. (2017). Asenkron Motor Rotor Arızalarının İstatistiksel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi, sayfa: 283-289. Politeknik Dergisi, 20(2), 283-289.
- Ünsal, A., & Karakaya, O. (2015). Asenkron Motor Rotor Arızalarının Analizi. Dumlupinar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 34, 69-86.
- Vas, P., 1993. Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. Oxford, 3-20, Clarendon, U.K.
- Verucchi, C. J., Acosta G. G. ve Bengler, F. A., 2008. A Review on Fault Diagnosis of Induction Machines. Latin American Applied Research, 38. 113- 121, Argentina.
- Yıldırım, H., & Karaca, E. (2013). Üretim Sürecinde İstatistiksel Proses Kontrol (İpk) Uygulamaları Ve Elektronik Sektöründe Bir İnceleme. Öneri Dergisi, 10(39), 77-87.
- Zerbato, C., Furlani, C. E., Silva, R. P. D., Voltarelli, M. A., & Santos, A. F. D. (2017). Statistical control of processes applied for peanut mechanical digging in soil textural classes. Engenharia agrícola, 37(2), 315-322.
- Zeyveli, M., Selalmaz, E., Bölümü-Karabük, M. E., Bakanlığı, M. E., & Lisesi-Kastamonu, T. M. E. M. (2008). İstatistiksel proses kontrol tekniklerinin zincir imalatı yapan bir işletmede uygulanması.

## 7. EKLER

Ek-1 kontrol grafikleri tablosu

n	A2	$\bar{A}2$	d2	D3	D4	A3	c4	B3	B4
2	1,880	1,880	1,128	-	3,267	2,659	0,7979	-	3,267
3	1,023	1,187	1,693	-	2,574	1,954	0,8862	-	2,566
4	0,729	0,796	2,059	-	2,282	1,628	0,9213	-	2,266
5	0,577	0,691	2,326	-	2,114	1,427	0,9400	-	2,089
6	0,483	0,548	2,534	-	2,004	1,287	0,9515	0,030	1,970
7	0,419	0,508	2,704	0,076	1,924	1,182	0,9594	0,118	1,882
8	0,373	0,433	2,847	0,136	1,864	1,099	0,9650	0,185	1,815
9	0,337	0,412	2,970	0,184	1,816	1,032	0,9693	0,239	1,761
10	0,308	0,362	3,078	0,223	1,777	0,975	0,9727	0,284	1,716
11	0,285		3,173	0,256	1,744	0,927	0,9754	0,321	1,679
12	0,266		3,258	0,283	1,717	0,886	0,9776	0,354	1,646
13	0,248		3,336	0,307	1,693	0,850	0,9794	0,382	1,618
14	0,235		3,407	0,328	1,672	0,817	0,9810	0,406	1,594
15	0,223		3,472	0,347	1,653	0,789	0,9823	0,428	1,572
16	0,212		3,532	0,363	1,637	0,763	0,9835	0,448	1,552
17	0,203		3,588	0,378	1,622	0,739	0,9845	0,466	1,534
18	0,194		3,640	0,391	1,608	0,718	0,9854	0,482	1,518
19	0,187		3,689	0,403	1,597	0,696	0,9862	0,497	1,503
20	0,180		3,735	0,415	1,585	0,680	0,9869	0,510	1,490
21	0,173		3,778	0,425	1,575	0,663	0,9876	0,523	1,477
22	0,167		3,819	0,434	1,566	0,647	0,9882	0,534	1,466
23	0,162		3,858	0,443	1,557	0,633	0,9887	0,545	1,455
24	0,157		3,895	0,451	1,548	0,619	0,9892	0,555	1,445
25	0,153		3,931	0,459	1,541	0,606	0,9896	0,565	1,435

## 8. ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Ankara’da doğdu. İlköğretim ve lise eğitimlerini Yozgat’ın Akdağmadeni ilçesinde tamamladıktan sonra 2005 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı. 2011 yılında üniversite eğitimini tamamladı. Sırasıyla, Sivas Uzman Telekomünikasyonda Elektrik-Elektronik Mühendisi, Cumhuriyet Üniversitesi Koyulhisar MYO’da Öğretim Görevlisi olarak çalıştı ve GOP Üniversitesi Niksar Teknik Bilimler MYO Elektrik Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir. 2014 yılında GOP Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı’nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine devam ediyor. Evli ve bir çocuk babasıdır.