

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ASENKRON MOTOR ROTOR ARIZLARININ MODELLENMESİ,
SİMULASYONU VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İmran EKİNCİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

OCAK 2022

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ASENKRON MOTOR ROTOR ARIZLARININ MODELLENMESİ,
SİMULASYONU VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İmran EKİNCİ
(36173615042)**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

OCAK 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedен beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Müslüm ARKAN'a, Dr. Öğretim Üyesi Taner GÖKTAŞ'a, ve Elektrik Yüksek Mühendisi Hicret YETİŐ'e,

Çalışmalarımда ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince debenden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

Yüksek Lisans çalışmalarının gerçekleştirilmesi için TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında PROJE NO: 117E766'dan destek alınmıştır. Finansal destek sağlayan TÜBİTAK'a,

Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine

Teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “ASENKRON MOTOR ROTOR ARIZALARININ MODELLENMESİ, SİMULASYONU VE ANALİZİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

İmran EKİNCİ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. ROTOR ARIZALARI ve TESPİT YÖNTEMLERİ.....	3
2.1 Kırık Rotor Çubuk Arızası	3
2.2 Kırık Rotor Çubuk Arızası Tespit Çalışmaları.....	4
3. KIRIK ÇUBUK ARIZASININ MODELLENMESİ ve SİMÜLASYONU	9
3.1 ANSYS@Maxwell'de Motor Modellenmesi.....	9
3.2 Kırık Rotor Çubuğu Simülasyonu.....	17
3.3 Kırık Rotor Çubuğu Arızasının ANSYS@Maxwell'de Analizi	18
4. KIRIK ÇUBUK ARIZASININ SİMÜLASYONU	23
4.1 Bir Rotor Çubuğunun Kırılmasının Simülasyonu	23
4.2 Bitişik İki Çubuğun Kırılması Simülasyonu.....	25
4.3 Yarım Kutup Aralıklı İki Çubuğun Kırılması.....	27
4.4 Tam Kutup Aralıklı İki Çubuğun Kırılması.....	29
5. ARIZA ANALİZ SONUÇLARI	32
5.1 Bir Kırık Rotor Çubuğu Arızasının Analizi	32
5.2 Bitişik İki Kırık Rotor Çubuğun Analizi.....	36
5.2.1 Stator akım sonuçları	37
5.2.2 Sensör konumu $\alpha=0^0$ olan kaçak akı sensör sonuçları	39
5.2.3 Sensör konumu $\alpha=45^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	41
5.2.4 Sensör konumu $\alpha=90^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	43
5.2.5 Sensör konumu $\alpha=180^0$ olan kaçak akı sonuçlar	45
5.3 Yarım Kutup Aralığında Kırılmış Rotor Çubuk Arızasının Analizi	47
5.3.1 Stator akım sonuçları	48
5.3.2 Sensör konumu $\alpha=0^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	50
5.3.3 Sensör konumu $\alpha=45^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	52
5.3.4 Sensör konumu $\alpha=90^0$ olan kaçak akı sonuçlar	54
5.3.5 Sensör konumu $\alpha=180^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	56
5.4 Tam Kutup Aralığında Kırılmış Rotor Çubuk Arızasının Analizi	58
5.4.1 Stator akım sonuçları	58
5.4.2 Sensör konumu $\alpha=0^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	60
5.4.3 Sensör konumu $\alpha=45^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	62
5.4.4 Sensör konumu $\alpha=90^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	63
5.4.5 Sensör konumu $\alpha=180^0$ olan kaçak akı sonuçları.....	64
5.5 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	66
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 : ANSYS@Maxwell'de kullanılan motor parametreler	10
Çizelge 5.1 :Bir kırık rotor çubuğu arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi.....	36
Çizelge 5.2 :Bitişik iki kırık rotor çubuğu arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi.....	47
Çizelge 5.3 : Yarım kutup aralığındaki iki kırık rotor çubuğu arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi	56
Çizelge 5.4 : Tam kutup aralığındaki iki kırık rotor çubuğu arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi.....	66



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Bir kırık rotor çubuğu arızasının görünümü.....	4
Şekil 3.1: Motor modelinin belirlenmesi.....	11
Şekil 3.2: Motor değerlerinin girilmesi.....	11
Şekil 3.3: Motorun RMXprt'da görünümü.....	11
Şekil 3.5: Motor sargı düzeni.....	13
Şekil 3.4: Motor performans özellikleri.....	13
Şekil 3.6: Motor veriminin hıza göre durumu.....	13
Şekil 3.7: Asenkron Motorun 2D boyutlu görüntüsü.....	14
Şekil 3.8: Motor durumuna göre $\alpha=0^0$ konumunda sensör.....	15
Şekil 3.9: Bx ve By denkleminin calculate kısmında oluşturulması.....	16
Şekil 3.10: Bx ve By grafik oluşturulması.....	16
Şekil 3.11: Rotorun yapısını oluşturan maddenin iletkenlik katsayısı.....	17
Şekil 3.12: 1000 kat değeri düşürülmüş cast_aluminum_75C iletkeni.....	18
Şekil 3.13: Zaman aralığının belirlenmesi.....	19
Şekil 3.14: Alanların kaydedildiği zaman dilimi.....	20
Şekil 3.15: ANSYS@Maxwell programında akım sonuçları.....	21
Şekil 3.16: ANSYS@Maxwell programında kaçak akı sonuçları.....	22
Şekil 4.1: Seçilen bir rotor çubuğunun konumu.....	23
Şekil 4.2: Bir kırık rotor çubuğunun $\alpha=0^0$ göre sensör konumu.....	24
Şekil 4.3: Bir kırık rotor çubuğu.....	24
Şekil 4.4: İki rotor çubuğunun bitişik şekilde kırılması.....	25
Şekil 4.5: Bitişik kırık rotor çubukları ve sensör konumları.....	26
Şekil 4.6: İki bitişik(komşu) rotor çubuk.....	26
Şekil 4.7: Yarım kutup aralıklı iki kırık rotor çubuğu.....	28
Şekil 4.8: Yarım kutup aralıklı kırılmış rotor çubukları.....	28
Şekil 4.9: Yarım kutup aralıklı rotor çubukları ve sensör konumları.....	29
Şekil 4.10: Tam kutup aralıklı rotor çubukları.....	30
Şekil 4.11: Tam kutup aralıklı kırık iki rotor çubuğu.....	301
Şekil 5.1: Tam yükte bir kırık rotor çubuğu arızasının akım sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	33
Şekil 5.2: Tam yükte bir kırık rotor çubuğu arızasının kaçak akı sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	34
Şekil 5.3: Tam yükte bitişik iki kırık rotor çubuğu arızasının akım sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	38
Şekil 5.4: Tam yükte bitişik iki kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=0^0$ için kaçak akı sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	40
Şekil 5.5: Tam yükte bitişik kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=45^0$ için kaçak akı sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	42
Şekil 5.6: Tam yükte yarım kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=90^0$ için kaçak akı sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	44

Şekil 5.7: Tam yükte yarım kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=180^0$ için kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	46
Şekil 5.8: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının akım sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	49
Şekil 5.9: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=0^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	531
Şekil 5.10: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=45^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	53
Şekil 5.11: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=90^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	535
Şekil 5.12: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=180^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	57
Şekil 5.13: Tam yükte tam kutup aralığındaki kırık rotor çubuk arızasının akım sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	59
Şekil 5.14: Tam yükte tam kutup aralığındaki kırık rotor çubuk arızasının $\alpha=0^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	61
Şekil 5.15: Tam yükte tam kutup aralığındaki kırık rotor çubuk arızasının $\alpha=45^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	62
Şekil 5.16: Tam tam kutup aralığındaki kırık rotor çubuk arızasının $\alpha=90^0$ yükte kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları	63
Şekil 5.17: Tam yükte tam kutup aralığındaki kırık rotor çubuk arızasının $\alpha=180^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları.....	65

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

2D	: İki boyutlu
FFT	: Hızlı Fourier Transformu
MAİA	: Motor Akım İmza Analizi
YSA	: Yapay Sinir Ağları
AYD	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
STFT	: Kısa Zamanlı Fourier Transformu
B_x,B_y	: Kaçak Akı Bileşenleri
α	: Sensör Konum Açısı
f_{brb}	: Kırık Çubuk Arıza Frekansı
f_s	: Temel Frekans (50 Hz)
Hz	: Frekans Birimi Hertz
k	: Zaman Sabit Değerleri (k=1,2,3...)
s	: Motor Kayması
RSH	: Rotor Slot Harmonikleri
X	: Pole Pitch Konumu
R	: Motor Rotor Çubuk Sayısı
f_{RSH_fault}	: Rotor Slot Harmonikleri Yan Band Arıza Sinyalleri
P	: Kutup Sayısı
p	: Çift Kutup Sayısı
v	: Zaman Harmonik Seviyesi(v=1,3,5,7...)
n_d	: Dış Kaynaklık seviyesi(n _d =1,2,3...)
i_a	: Stator Faz Akımı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ASENKRON MOTOR ROTOR ARIZALARININ MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU
ve ANALİZİ

İmran EKİNCİ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

74+IX sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Prof. Dr. Müslüm ARKAN

Asenkron motorlar sağlamlığı, güvenilirliği ve kolay kontrolü gibi özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Geniş ve yoğun kullanım alanına sahip olmaları motor üzerinde çeşitli arızaların oluşumunu da beraberinde getirmiştir. Meydana gelebilecek olası arızaların erken tespiti, işletmelerin üretim sürekliliğinin devamı ve mali kayıpların önüne geçilebilmesinde oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında asenkron motor kullanımının yoğun olduğu işletmelerde motorların çalışması sırasında oluşan arızaları simülasyonlar yardımı ile erken tespit etmek hedeflenmiştir. Öncelikle asenkron motorlarda karşılaşılan arızaların neler olduğuna değinilmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemini kullanan *ANSYS@Maxwell* paket programında asenkron motorda çeşitli kırık rotor çubuğu arızaları oluşturulmuştur. Kaçak akı sinyallerini elde etmek için simülasyon modellerine akı sensörleri yerleştirilmiştir.

Tez kapsamında yapılan simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların *Matlab* programında Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform FFT) alınarak sağlıklı ve arızalı verilerin karşılaştırılması yapıp değerlendirilmiştir. Arızalı motor analizi yapılırken stator akımı ve kaçak akı sinyallerine bakılmıştır. Kaçak akı inceleme yöntemi ile motor arızalarında klasik olarak kullanılan Motor Akım İmza Analizi (MAİA) arasındaki farklılıklara değinilmiştir. İncelemeler neticesinde arıza analiz yöntemlerinde kaçak akı incelemesi yönteminin üstünlüğüne vurgu yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motor, Fourier dönüşümü, kaçak akı, kırık rotor çubuğu, stator akımı.

ABSTRACT

Master Thesis

MODELING, SIMULATION AND ANALYSIS OF INDUCTION MOTOR ROTOR FAULTS

İmran EKİNCİ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering

74+IX pages

2022

Supervisor: Prof. Dr. Müslüm ARKAN

Induction motors are used extensively in industrial applications due to their features such as robustness, reliability and easy control. Its wide and intensive usage area has brought the formation of various faults on the motor. Early detection of faults is very important for industry to maintain production continuity and prevent financial losses.

In this study, it is aimed to detect the faults early that occur during the operation of the motors in the applications where the use of induction motors is intense, with the help of simulations. First of all, the faults encountered in induction motors were mentioned. Then, the broken rotor bar failure encountered in induction motors was created in the ANSYS @ Maxwell simulation program using the 2D Finite Elements method, and the results were obtained. Fluxgate sensors are placed in these models to obtain leakage flux results.

The results obtained from the simulation studies carried out within the scope of the thesis were compared and evaluated by taking Fast Fourier Transform (FFT) in Matlab program. To analyze the motor condition, the stator current and leakage flux signals were taken into consideration. Differences between the leakage flux analysis method and the Motor Current Signature Analysis (MCSA), which is traditionally used for motor faults, are mentioned. As a result of the investigations, the superiority of leakage flux in fault analysis methods was emphasized.

Keywords: Induction motor, Fourier transform, leakage flux, broken rotor bar, stator current.

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar sanayiden tarıma ve ev aletlerine kadar oldukça geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Sağlam yapısı, güvenilirliği, ucuz maliyeti ve yüksek verime sahip olmaları bu motorların tercih edilme sebeplerini arttırmıştır. Geniş güç aralığında çalışabildiklerinden dolayı farklı yüklerde etkin olarak kullanılabilirler. Geniş çalışma alanına sahip olmaları ve yoğun kullanımları bu motorlarda istenmeyen bazı mekaniksel ve elektriksel arızaların oluşmasına neden olmaktadır. Bu arızalar maddi kayıplara neden olurken aynı zamanda güvenlik ve sağlık açısından istenmeyen bazı tehlikeler oluşturabilmektedir. Bu nedenle oluşan arızaların erken tespiti ve kısa sürede müdahale edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Asenkron motorların gelişimine bağlı olarak arıza inceleme yöntemleri ve yaklaşımları da artmıştır. Bu bağlamda motorların gelişmesine paralel olarak arızaların tespitinin zorluğu ve seviyesi artmıştır. Bu nedenle son dönemlerde asenkron motor arızalarının hızlı tespiti ve arızaya erken müdahale önem kazanmıştır. Yapılan çalışmalarda motor arızaları; mekaniksel ve elektriksel arızalar olarak iki ana başlık altında toplanmıştır [1]. Bu arızaların yaklaşık olarak %40'ını rulman arızaları, %26-36'sını stator sargı arızaları ve %5-10'u ise rotor arızaları oluşturmaktadır [2]. Rulman arızaları elektrik motorlarında milin dönme hareketinden kaynaklanan arızalardır. Statorda meydana gelen arızalar, sargılar arasında herhangi bir nedenden dolayı oluşan arızalardır. Asenkron motorların rotor çubuğunda herhangi bir nedenden dolayı gelişen kırılmalar kırık rotor çubuk arızasını oluşturmaktadır. Rotor arızalarında üretim hatasından kaynaklı olarak rotorun dönme durumunda meydana gelen arızalar ise eksantriklik arızasını oluşturmaktadır.

Motor arızalarını tespit etmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde motorun akım, gerilim, moment ve diğer birçok parametresi araştırılmıştır. Bahsedilen yöntemler arasında en çok stator akım incelemesi yöntemine ağırlık verilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalara bakıldığında kaçak akı inceleme yöntemlerinin de ön plana çıktığı görülmüştür. Arızalar incelenirken aşağıda verilen analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır;

- Zaman ve frekans analizi
- Elektromanyetik moment analizi
- Sıcaklık analizi
- Motor akım sinyalleri incelenmesi

- Yapay zekâ ve yapay sinir ağları tabanlı yöntemler.

Bu tez çalışmasında ise motor arıza analiz yöntemlerinden biri olan kaçak akı incelemesi yapılmıştır. Kaçak akı incelemesi motorun nüvesinden etrafındaki havaya geçen akı sinyallerinin incelenmesine dayanmaktadır. Böylece motorda oluşan kaçak akılar incelenerek stator akım değerlerine göre daha doğru ve net sonuçlara ulaşmak mümkün olmuştur. Motor arızalarından olan kırık rotor çubuğu arızası detaylı olarak kaçak akı incelemesi yöntemiyle analiz edilmiştir. Motor modellemesi *ANSYS@Maxwell* paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sağlıklı motor modellemesinden sonra bu motorda farklı rotor çubuk arızaların modellemesi yapılmıştır. Daha sonra farklı yük durumlarında arıza sonuçları alınmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen bulgular sağlıklı ve arızalı motor sonuçları olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen bilgilerin *Matlab* programında FFT'si (Fast Fourier Transform) alınarak detaylı analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kaçak akı temelli arıza tespit yönteminin literatürde kullanılan akım temelli yöntemlerden daha iyi, güvenilir, doğru ve net sonuçlar verdiği görülmüştür.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında asenkron motorların çalışması sırasında elektriksel olarak karşılaşılan arızalardan biri olan kırık rotor çubuğu arızasını kaçak akı ve akım karşılaştırılması yapılarak değerlendirilmiştir. Kırık rotor çubuğu arızasını erken tespit edebilmek için; klasik arıza tespit yöntemlerine alternatif olarak kaçak akı izleme yöntemi önerilmiştir. Asenkron motor çevresine yerleştirilen sensörler yardımı ile kaçak akı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kırık rotor çubuğu arızasının motor üzerindeki etkisini ayrıntılı olarak inceleyebilmek için; 4 farklı arıza durumunun benzetim çalışması yapılmış ve motor farklı seviyelerde yüklenerek sonuçlar analiz edilmiştir. Bir kırık rotor çubuğu, iki bitişik kırık rotor çubuğu ile yarım ve tam kutup aralığında bulunan kırık rotor çubuk arızaların sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarının *Matlab* programında FFT'si alınarak sağlıklı ve arızalı verilerin karşılaştırılması yapıp değerlendirilmiştir. Kaçak akı inceleme yöntemi ile motor arızalarında klasik olarak kullanılan Motor Akım İmza Analizi (MAİA) yöntemi karşılaştırılarak, iki yöntem ile elde edilen arıza sinyalleri arasındaki farklılıklara değinilmiştir. Yapılan ayrıntılı analizler ile kırık rotor çubuk arızası tespit etmede kaçak akı incelemesi yönteminin MAİA yöntemine kıyasla daha net ve güvenilir sonuçlar verdiği ulaşılmıştır.

2. ROTOR ARIZALARI ve TESPİT YÖNTEMLERİ

Asenkron motorlarda arıza tespit yöntemleri son zamanlarda önemli hale gelmiştir. Arızaların incelenmesi ve erken teşhisi motor arızaları sonucu oluşabilecek herhangi bir zararın önüne geçmekte önemli bir rol oynar. Bu bağlamda literatürdeki kırık çubuk arızası çalışmalarına kısaca bakılmıştır.

2.1 Kırık Rotor Çubuk Arızası

Asenkron motorlarda arızalar temelde iki şekilde ayrıştırılmıştır. Bunlar elektriksel arızalar ve mekaniksel arızalardır. Elektriksel arızalardan olan rotor arızaları asenkron motorların rotorlarında rotor çubukların kırılması veya rotor halkalarında meydana gelen arızalardan oluşmaktadır. Asenkron motorlarda rotor yapıları sincap kafesli ve sargılı olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Sincap kafesli rotor yapısı kafes tarzı rotor çubuklarından oluşmaktadır. Rotor çubuk arızaları motor çalışma durumunda aşırı ısı, aşırı yüklenme, üretim hataları ve mil yatağı gibi nedenler sonucunda rotorda meydana gelen arızalardır. Rotor çubukları bu gibi sebeplerden dolayı kırılabilir veya çatlayabilir. Bu durum literatürde kırık rotor çubuğu olarak adlandırılmıştır.

Rotor arızaları Şekil 2.1’de görüldüğü üzere herhangi bir yerden rotor çubuklarında bir veya birkaçında kırıklar/çatlaklar sebebiyle oluşmaktadır. Rotor çubuğundaki kırıklar aşırı akımda çalışma, aşırı yük dalgalanması, malzeme deformasyonu, sıcaklık mekanik zorlanmalar gibi sonuçlardan oluşmaktadır. Kırık rotor çubuk arızasında sağlıklı çalışan bir motordan farklı olarak motor performansında bozulmalar meydana gelmektedir. Arızadan kaynaklı oluşan bozulmalar motor harmoniklerinde dalgalanmalara yol açmaktadır. Sağlıklı motor harmonikleri ile karşılaştırıldığında arıza harmoniklerinin değerinin oldukça yüksek seviyelere çıktığı görülmektedir.



Şekil 2.1 : Bir kırık rotor çubuğu arızasının görünümü.

2.2 Kırık Rotor Çubuk Arızası Tespit Çalışmaları

Kırık çubuk arızası, asenkron motorlarda görülen bir arıza türüdür. Elektrik makinalarında anlık durum izleme yöntemleri kullanılarak arıza tespiti yapılırken maliyeti en aza indirecek yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Kaçak akı inceleme yöntemi de bunlardan biridir. Arıza durum izleme yöntemleri motorun performansını, verimliliğini ve güvenilirliğini sürdürmek için yapılmıştır. Bellini, F. Filippetti et al. çalışmalarında arıza teşhis yöntemlerinin arızaların bulunmasında yeterli olmadığını belirtmişlerdir [3]. Kırık rotor çubuğu arızası rotor çubuklarında ısınma, aşırı yük, üretim hatası ve aşırı hız gibi nedenlerden dolayı oluşmaktadır. Bu durumlar oluşurken meydana gelen harmonikler motorun yük akı dağılımı simetrisinde bozulmalara sebep olmaktadır. Bu bozulmaları incelerken en çok kullanılan Motor Akım İmza Analizi (MAİA) yöntemidir [4]. S. Nandi et al. yazmış oldukları bildiride stator akım analizinin en çok kullanılan yöntem olduğundan bahsetmişlerdir [1]. K. N. Gyftakis et al. MAİA yöntemini rotor arızalarında en çok başvurulan yöntem olarak göstermişlerdir [5]. Rotor arızasının neden olduğu sinyaller;

$$f_{brb} = f_s(1 \pm 2ks) \quad (2.1)$$

2.1 denklemindeki harmonikler arıza sinyalleri olarak belirtilmiştir. Burada f_s temel frekansı, s motor kaymasını ve $k=1,2,3...$ zaman sabiti değerlerini belirtmektedir [1, 6]. C. Yehet et al. çalışmalarında kısa devre arızası ve kırık rotor çubuğu arızası üzerine yoğunlaşmışlardır [2]. Çalışmalarında hata tespitleri sonucunda seçilen malzemelerin sağlam ve laminasyonlar

açısından güvenilir yapılardan oluşmasına gerektiği kararına varmışlardır. K. Saad ve G. Mirzaeva çalışmalarında kaçak akının önemine vurgu yapmış ve bununla ilgili yayın yapmışlardır [7]. [5, 8] çalışmalarında bahsedildiği üzere rotor arızaları asenkron motordaki arızalar içerisinde % 5-10 oranındadır. [7]'deki çalışmada kaçak akı incelemesinde kırık rotor çubuğu arızasının meydana gelmesinin incelemesi yapılmıştır. Kırık çubukların olması motorun yük akışı, akım gibi dağılımlarda simetrisini bozmaktadır ve bu nedenle manyetik dağılım asimetrik bir hal almaktadır. Arızanın meydana gelmesi titreşimlere, frekans bileşenlerinde değişime, hız dalgalanmalarına ve elektromanyetik tork darbelerine neden olmaktadır. Sapena-Banoet, et al. kırık rotor çubuğu hatasını tespit etmek için hata imza frekansının harmonik sırasını izlemek için Fourier ve Hilbert Dönüşüm tabanlı bir analiz yapmıştır [9]. G. Dias ve F. H. Pereira çalışmalarında kırık rotor çubuğu arızasının Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi ile tespiti için bir yaklaşım sunmuşlardır [10]. Burada amaç kırık çubuk arızası incelenirken farklı yöntemlerden yararlanmak olarak gösterilmektedir. YSA modellemesi yapılarak farklı durumlarda yapay öğrenme sağlanarak kırık çubuk arızası olması durumunda hangi arıza sinyallerine bakılması gerektiği önerilmiştir. J. A. Ramirez-Nunez et, al. kırık çubuk arızasının nasıl sonuçlar doğurabileceğini göstermek amacıyla çalışmalarında FFT ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (AYD) kullanarak akım ve kaçak akıda meydana gelen değişiklikleri gözlemlemişlerdir[11].

Çalışmalar neticesinde temel frekansın yan bantlarında oluşan arıza sinyallerine ek olarak f_s+f_r , sf_s ve $3sf_s$ genlikli arıza sinyalleri değerlerine ulaşılmıştır. [12] numaralı çalışmada; son zamanlarda arıza tespitinde simülasyon yöntemi olarak etkili bir şekilde kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Kaçak akının ölçülmesinde farklı sensörler kullanılabilir. Bu sensörlerden biri Fluxgate sensörüdür. Bu sensör; motorun etrafını saran hava da bulunan kaçak akı sinyallerinin hareketini gözlemlemektedir. T. Göktaş et, al. çalışmalarında; kırık rotor çubuğu arızası durumunda kaçak akı sinyallerinde meydana gelen değişimleri Fluxgate sensörü yardımı ile incelemiştir [13]. Kaçak akı incelenirken sensör kullanmanın avantajlarını; kolay kurulum, uzaktan algılamada belli mesafeye kadar tolerans sağlaması, yüksek çözünürlük sağlaması ve kaçak akı incelemesi yapılırken zaman domaininde incelemeye yatkınlık göstermesi olarak sıralamışlardır. Aynı çalışmada SEY kullanılarak temel frekansın yan bantlarında oluşan arıza sinyallerine ek olarak sf_s ve $3sf_s$ gibi sinyallerin oluştuğunu göstermişlerdir. Bu durum kaçak akı incelemesi yönteminin klasik olarak bakılan akım incelemesi yönteminden daha üstün olduğunu göstermiştir. P. J. Tavner et, al. çalışmalarında; Hall etkili sensör yardımıyla iki farklı arıza durumu için kaçak akıda meydana

gelen değişimleri incelemişlerdir [14]. Burada; kırık rotor çubuğunun arızasının meydana geldiği çubukların bitişiklik ve bitişik olmama durumu motor çevresine yerleştirilmiş sensörler yardımı ile bulunmaktadır. Sensörler motor üzerinde iki farklı konuma yerleştirilmiş ve sensörlerden alınan sonuçlara göre değerlendirme yapılmıştır. Alınan sonuçlara göre kaçak akı inceleme yönteminin arıza tespitinde daha net sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. [15] numaralı çalışmada ise hall etkili sensörlerin yardımı ile kaçak akı incelerken kırık rotor çubuğu arızasının daha net bir şekilde tespit edildiği belirtilmiştir

C. G. Dias ve C. M. de Sousa çalışmalarında kırık rotor çubuğunun olması çubukların bitişiklik durumuna göre incelemişlerdir [16]. İncelemede daha önce olmayan bir durumun yani hem bitişiklik durumu hem de bitişik olmayan durumun olmasına bakılmıştır. Arıza tespitinde bulunurken düşük yük durumuna ve yüksüz olma durumuna göre sonuçlarda incelemelerde bulunmuşlardır. Arıza harmonikleri olan 1. ve 3. harmoniklerin göz önüne alınması gerektiği vurgulanmıştır [16]. P. A. Panagiotou et al. alışmalarında SEY kullanarak kaçak akı için kırık çubuk arızasını incelemişlerdir [17]. Aynı alışmada Kısa Fourier Transform (SFT) alınarak bitişik, bitişik olmayan ve tek bir rotor çubuğu kırılması durumunda oluşan arıza sinyallerine bakılmıştır. Bu durumda 5. ve 7. harmonikler üzerinde belli sinyaller elde etmişlerdir. [18] çalışmasında kırık rotor çubuk arızasına bakarken kaçak akıdan faydalanmışlardır. Aynı zamanda arıza harmonikleri incelenirken 5. ve 7. arıza harmoniklerine dikkat çekmişlerdir. I. Chernyavska ve O. Vitek, manyetik analiz yaparak kırık çubuk arızasında kaçak akı ve akım incelemesinde bulunmuşlardır [19]. Bu bağlamda manyetik akı dağılımının arıza tespiti açısından oldukça önem arz ettiği sonucuna varılmıştır. Kaçak akı incelemesi yapılan bu çalışmada Rotor Slot Harmonikleri (RSH) olarak bilinen klasik rotor üzerinde olan arızaların harmoniklerini gösteren sinyaller incelenmiştir. Burada amaç, motor arızası olduğunda hangi harmoniklerin ne derece etkilenebileceğini görmektir [19]. Bu nedenle çalışmalarında RSH değerlerine bakılarak arızaların farklı harmonikler üzerindeki davranışına bakmışlardır. A. Yazidi et, al. alışmalarında hem stator hem de rotorda akı izlemesi yapılarak arıza tespitinde bulunmuşlardır [20]. K. Saad ve G. Mirzaeva çalışmalarında; rotor arızasına bakılırken uzay harmonikleri olarak ifade edilen rotor slot harmoniklerini incelemişlerdir [21]. Burada amaç farklı sinyalleri inceleyerek arızaları tespit edebilmektir. Eksantriklik arızası ve kırık rotor çubuğu arızası oluşması durumunda kaçak akı, akım ve torkta meydana gelen değişimler incelenmiş ve motorun arıza meydana gelmeden önceki sağlıklı çalışması durumu ile karşılaştırması yapılmıştır. Denklem 2.2'de RSH yan bantların arıza durumunda daha çok nerelerde bulunduğunu ifade etmektedir.

$$f_{RSH_fault} = \left[\frac{R(1-s)}{p} \pm v \pm 2ks \right] f_s \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de belirtilen R motor rotor çubuk sayısını, s motor kaymasını, p çift kutup sayısını, v zaman harmonik seviyesini ($v=1,3,5\dots$), k zaman sabit değerini ($k=1,2,3\dots$), f_s temel frekansı ifade etmektedir. Rotor slot harmonikleri yan bantları arıza durumunda farklı değerde görülen sinyalleri ifade etmektedir. E. Maloma, et, al. çalışmalarında 2D SEY ile kırık çubuk arızasında motorun geçici ve sabit durum davranışlarını hem sağlıklı hem de arızalı koşullar için incelemiştir. Farklı rotor çubuk tipleri için her iki koşulda elektromanyetik moment dalgalanması, hava aralığı akısı yoğunluğu, verimlilik ve güç faktörü incelenmiştir. Kırık rotor çubuğu arızasının makinenin genel performansı üzerinde farklı durumlara sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Kararlı durum torku sağlıklı koşullar altında sabit kalırken, arızalı çubuklarının varlığında yoğun bir dalgalanma vardır [22]. R. Romary et, al. çalışmalarında kısa devre arızası ve kırık çubuk arızasının motor performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir[23]. Ayrıca her iki arızanın olması durumunda kaçak akıda arıza sinyallerin neler olabileceğine bakılmıştır. N. Praveen Kumar ve T. B. Isha çalışmalarında bir tane rotor çubuğun kırılması sonucu oluşan arızanın manyetik dağılım üzerindeki etkisini inceleyerek hata tespiti yapmaya çalışmışlardır [24]. Yapılan çalışmada arızanın oluşmasından sonra tork ve motor hızında salınımlar meydana geldiği belirtilmiştir. Kırık rotor arızasında kaçak akıya bakılarak farklı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır [25]. Bazı çalışmalarda kaçak akı incelemesi yapılırken elektromotor kuvvetlerine ve manyetik alan dağılımına dikkat çekilmiştir [26,27]. Burada amaç kaçak akı incelemesi yöntemine farklı yaklaşımlar sunarak arıza tespitinde hızlı ve güvenilir sonuçlar elde etmeye çalışmaktır.

K. Saad ve G. Mirzaeva çalışmalarında kırık çubuk arızası ve eksantriklik arızasına hall etkili sensörler yardımı ile arıza durumunda kaçak akıda ve akımda meydana gelen değişiklikleri incelemiştir [28]. K. Saad ve G. Mirzaev yaptıkları çalışmada arıza tespitinde, kaçak akı incelemesi yönteminin stator akım analizi yöntemine göre daha üstün olduğunu belirtmişlerdir [15]. Bu çalışmada; kısa devre arızası ve kırık çubuk arızasının motor performansının üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. C. G. Dias ve I. E. Chabu farklı sayıda kırık çubukların bulunduğu arızaları incelemiştir. Akı incelemesi yapılarak farklı kırılmalarda oluşabilecek sonuçlar değerlendirilmiştir [29].

A. Bellini et, al. çalışmalarında stator akım analizi, kaçak akı analizi, radyal titreşim analizi ve aksiyal titreşim analizi yöntemlerini kullanarak arıza tespitinde bulunmuşlar ve elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır [30]. [31-33] referanslarında rotor arızalarında kırılan çubukların konumuna göre arızanın durumunun değişebileceğine işaret etmişlerdir. Farklı bölgelerde kırılan çubukların arıza harmonikleri üzerindeki durumuna bakılmıştır. Aynı zamanda bazı çalışmalarda arızalar farklı kutup durumuna göre adlandırılmıştır. Yapılan çalışmalarda; kırık rotor çubuğu arızasının meydana geldiği konum; iki kutup arası mesafe 90° olursa yarım kutup ve mesafe 180° olursa bu durumda tam kutup aralığı olarak ifade edilir [17,25,34-36]. Kırık çubuk arızasının olduğu kutup aralığı mesafeleri; akım ve kaçak akı incelenirken arıza harmoniklerini farklı derecelerde etkilediği için arıza tespiti açısından oldukça önem arz etmektedir [37].

3. KIRIK ÇUBUK ARIZASININ MODELLENMESİ ve SİMÜLASYONU

Kırık rotor çubuğu arıza analizlerinin yapılması için bu çalışmada ANSYS@Maxwell paket programı kullanılarak asenkron motor modellenmiş ve simüle edilmiştir. Simülasyonda kaçak akı bilgisini elde etmek için model içerisine fluxgate sensörünü temsilen noktalar yerleştirilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen kaçak akı, akım, gerilim, tork ve hız gibi bilgilere Matlab programında FFT uygulanarak detaylı analizler yapılmıştır.

Bu doğrultuda öncelikle analiz edilecek motoru ANSYS@Maxwell programında modellemesi ve farklı çalışma koşullarında simülasyonun nasıl yapıldığı anlatılacaktır. Farklı yükler altında sağlıklı ve arızalı durumlar için analiz edilen motora ait simülasyon sonuçları Matlab ortamına aktarılıp FFT uygulanarak akım ve kaçak akı sinyallerinin içeriğindeki harmonik bileşenlerin değişimi incelenip karşılaştırılacaktır.

3.1 ANSYS@Maxwell'de Motor Modellemesi

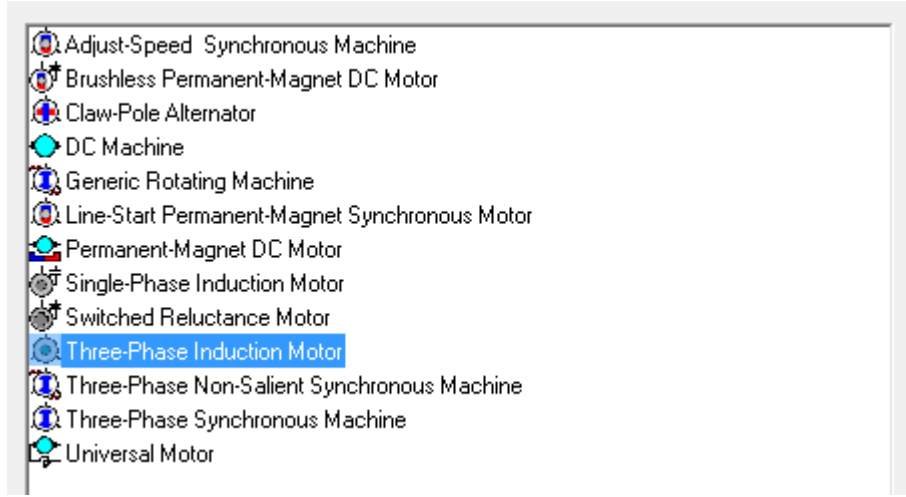
Bu bölümde öncelikle modellemesi yapılacak motor parametreleri belirlenecektir. Motora ait temel tasarım parametreleri belirlendikten sonra ANSYS@Maxwell programının RMxpert bölümünde motor modeli oluşturulup analiz edilecektir. Analiz sonuçları incelendikten sonra kırık rotor çubuğu arızasını modellemek ve daha ayrıntılı simülasyonlar yapabilmek için motora ait veriler programın ANSYS@Maxwell-2D bölümüne aktarılır. Maxwell-2D bölümünde farklı türde kırık rotor çubuğu arızaları oluşturulup motorun çevresine yerleştirilecek kaçak akı sensörleri ile kaçak akı ve akımda meydana gelen değişimler incelenecektir.

Bu çalışma kapsamında analiz edilecek motor modeli endüstriyel uygulamalarda kullanılan yüksek verimliliğe sahip sincap kafesli bir asenkron motor referans alınarak oluşturulmuştur. Gerçek hayatta sanayi uygulamalarında aktif olarak kullanılan motor üzerinde gerekli ölçümler yapılarak simülasyon ortamında motor modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan motora ait parametreler Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de verilen parametrelere göre ANSYS@Maxwell programının RMxpert bölümünde motor modelini oluşturmak için aşağıda verilen adımlar takip edilmiştir:

- İlk olarak programın **Insert** sekmesine tıklanılarak motorun türü Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi; 3 fazlı asenkron motor (*Three Phase Induction Motor*) olarak seçilir.
- Daha sonra motor geometrisi oluşturmak için stator ve rotor sekmeleri altında bulunan; stator/rotor çapı, stator sargı düzeni, oluk/bar geometrisi gibi parametrelere ait ölçüler girilir. (Bkz. Şekil 3.2)
- Motora ait veriler girildikten sonra RMXprt’de oluşturulan motor modeli Şekil 3.3’de gösterilmiştir.
- Motor ait sargı düzeninin nasıl olduğuna bakmak için stator sekmesi altında bulunan “**winding**” kısmına girilerek sargılara ait özellikler ve bağlantı şekilleri incelenebilir. Modellenen motora ait sargı düzeni Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 ANSYS@Maxwell'de modellenen motora ait parametreler

Test Motor Parametreleri	
Kutup Sayısı	4
Stator Slot Sayısı	36
Rotor Bar Sayısı	28
Anma Gerilimi, V	400
Anma Frekansı, Hz	50
Anma Gücü, kW	2.2
Anma Akımı, A	4.7

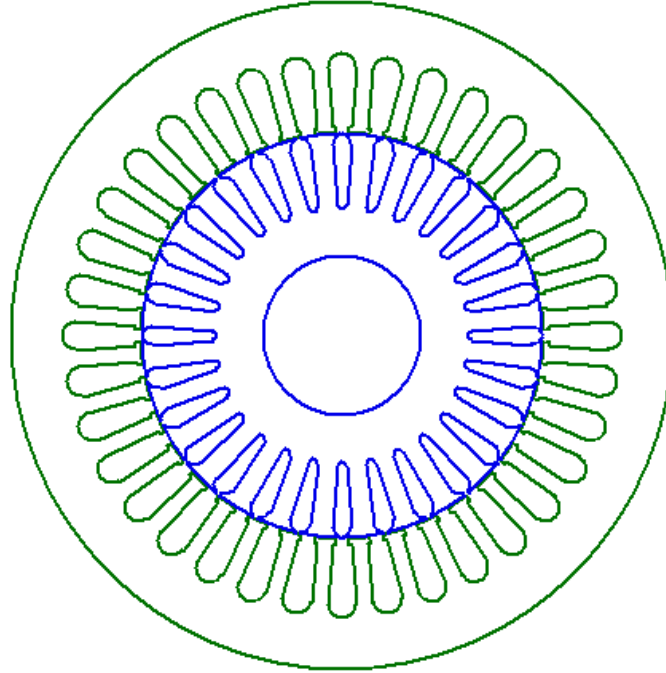


Şekil 3.1: Motor modelinin belirlenmesi

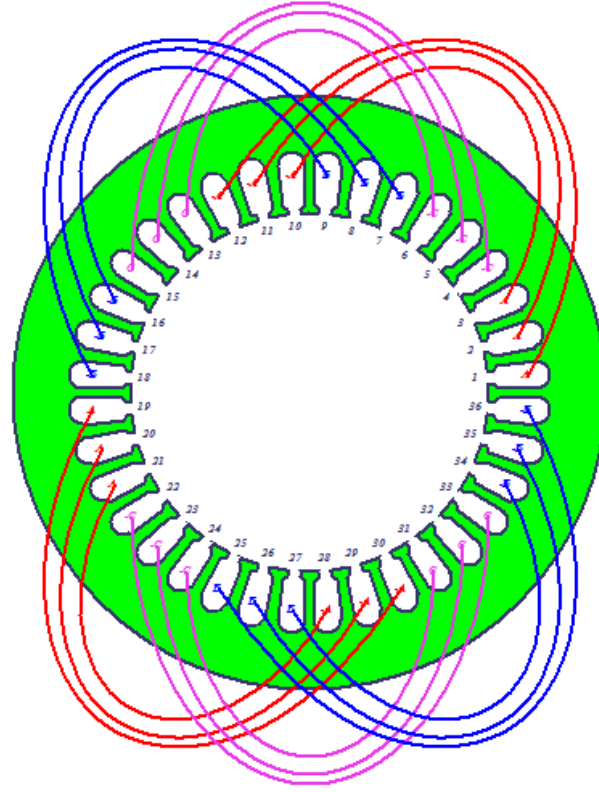
Machine

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Machine Type	Three Phase Induction Motor				<input checked="" type="checkbox"/>
Number of Poles	4			Number of poles of the ...	<input type="checkbox"/>
Stray Loss Fac...	0		0	Stray Loss Factor	<input type="checkbox"/>
Frictional Loss	0	W	0W	The frictional loss meas...	<input type="checkbox"/>
Windage Loss	0	W	0W	The windage loss meas...	<input type="checkbox"/>
Reference Sp...	1500	rpm		The reference speed at...	<input type="checkbox"/>

Şekil 3.2: Motor değerlerinin girilmesi



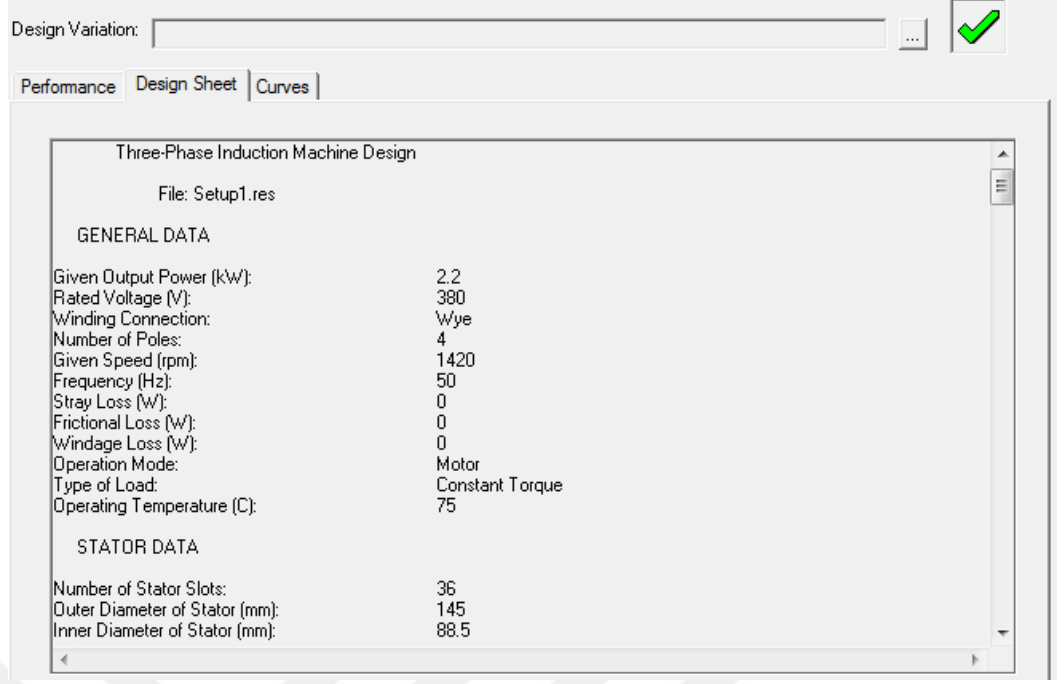
Şekil 3.3: Motorun RMXprt'da görünümü



Şekil 3.4: Stator sargı düzeni

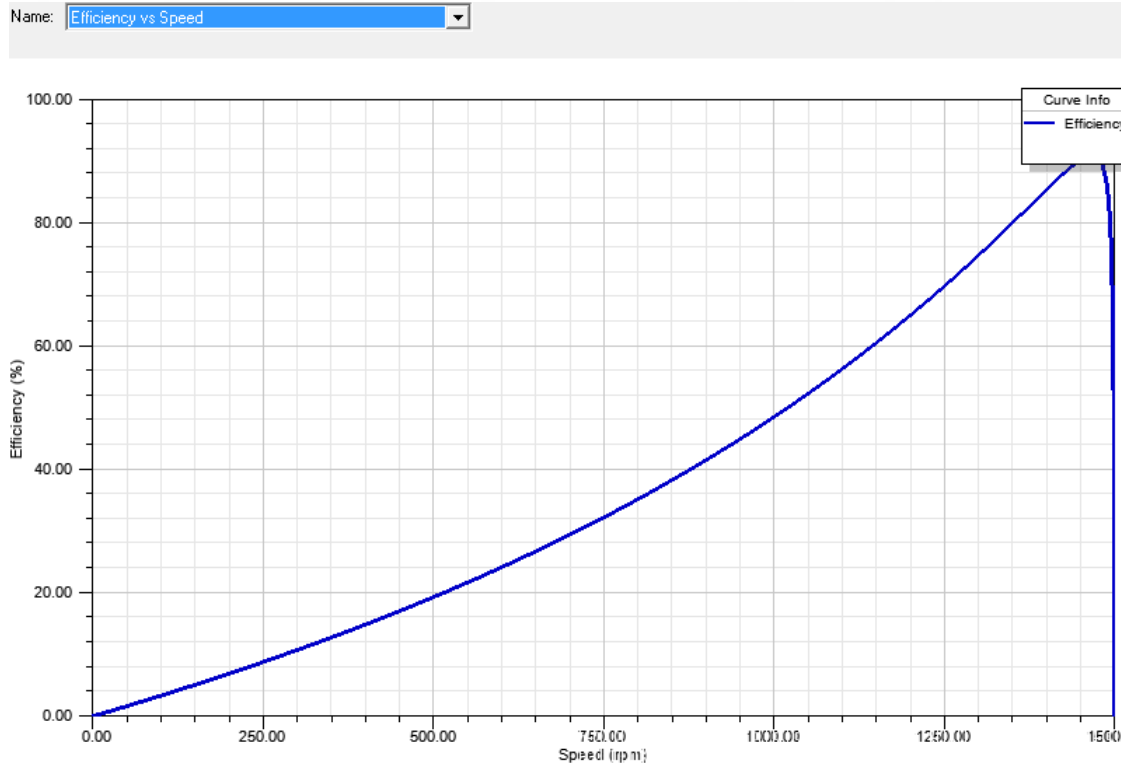
RMxprt kısmında modelleme yapıldıktan sonra kısa bir analiz ile motor performansının nasıl olduğunu görme fırsatımız bulunmaktadır. *ANSYS@Maxwell* programında yer alan RMxprt bölümü, motor tasarımı ve motor analiz işlemleri için profesyonel olarak kullanılan bölümdür. RMxprt eş değer devre ve matematiksel hesaplama tabanlı bir analiz programıdır. Motor analiz edilirken; analitik motor teorisi ve eşdeğer manyetik devre yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

Motor performansını değerlendirmek için *Analysis* kısmına gelerek sağ tıklayıp *Add Solution Setup* dedikten sonra *Setup* oluşturup buradan tekrar sağ tıklayarak *Analysis* tuşuna basılarak motor analiz edilir. Analiz işlemi bittikten sonra motor performans özelliklerini görmek için *Setup* sekmesi altında bulunan *Performance* tuşuna basılır. Buradan motor performans sonuçlarına ulaşılmaktadır. Motora ait performans özellikleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5: Motor performans özellikleri

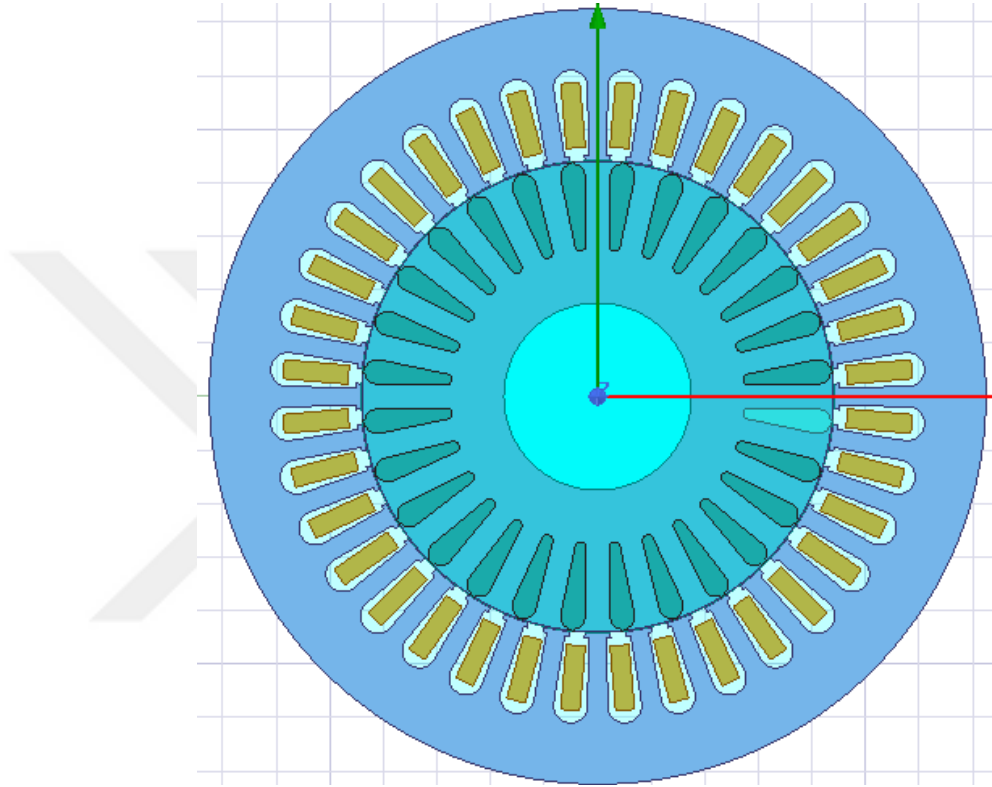
➤ Motor performans özelliklerine ek olarak motora ait verim-hız, akım-hız ve farklı durumların grafiklerine ulaşılabilmektedir. Şekil 3.6’da Motorun verim-hız grafiği verilmiştir. Görüldüğü gibi tam yük çalışmada 1420 rpm’de motor %87 verimde çalışmaktadır.



Şekil 3.6: Motor veriminin hıza göre değişimi

RMxpirt'de modelleme ve analiz işlemleri yapıldıktan sonra ANSYS@Maxwell programında iki boyutlu (2D) işlemlere geçerek analiz işlemlerine devam edilir. Bunun için; RMxpirt'de *Analysis* sekmesi altında *Create Maxwell Design*'a tıklanarak modellenen motorun Maxwell-2D modeli otomatik olarak oluşturulur.

- Motorun 2D boyutlu görüntüsü Şekil 3.7'de verilmiştir.

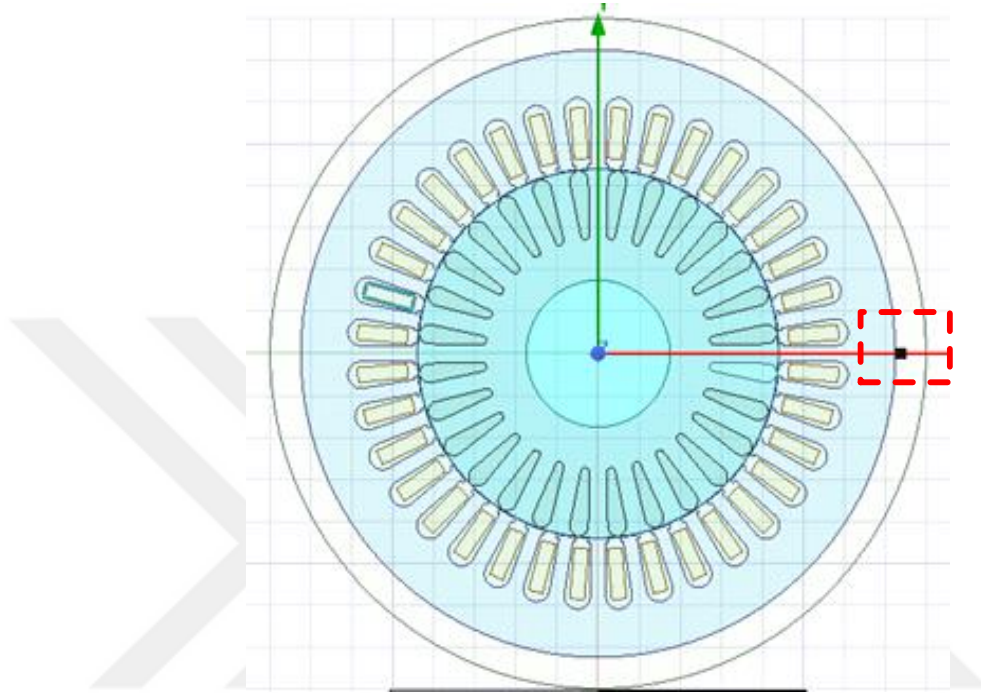


Şekil 3.7: Asenkron motorun 2D boyutlu görüntüsü

- Motor modeli 2D'de oluşturulduktan sonra sağlıklı ve arızalı durumlarda kaçak akı değişimlerini inceleyebilmek için fluxgate sensörünün modellenmesi gerekmektedir. Motorun çevresinde oluşan manyetik akı dağılımının değişimi motorun hemen dışına yerleştirilecek kaçak akı sensörü yardımı ile analiz edilecektir.

- İlk olarak modellenecek sensörün konumu belirlenir. Sensör modellenirken gerçek hayatta kullanılan fluxgate sensörü düşünülerek işlemler yapılmıştır. Şekil 3.8'de belli bir açı değerine göre yerleştirilen sensörün konumu gösterilmektedir. Sensör konumu belirlenirken açı baz alınarak $\alpha=0^0$ olacak şekilde ayarlanmıştır.

➤ Sensör yerleştirildikten sonra bu noktadan geçen kaçak akı miktarını bulmak için bazı matematiksel işlemler yapmak gereklidir. Sensörler yerleştirildikleri noktadan geçen manyetik alan yoğunluğunun x ve y koordinat düzlemindeki değerlerini B_x ve B_y olarak ayrı ayrı ölçebilirler.



Şekil 3.8: Motor durumuna göre $\alpha=0^\circ$ konumunda sensör

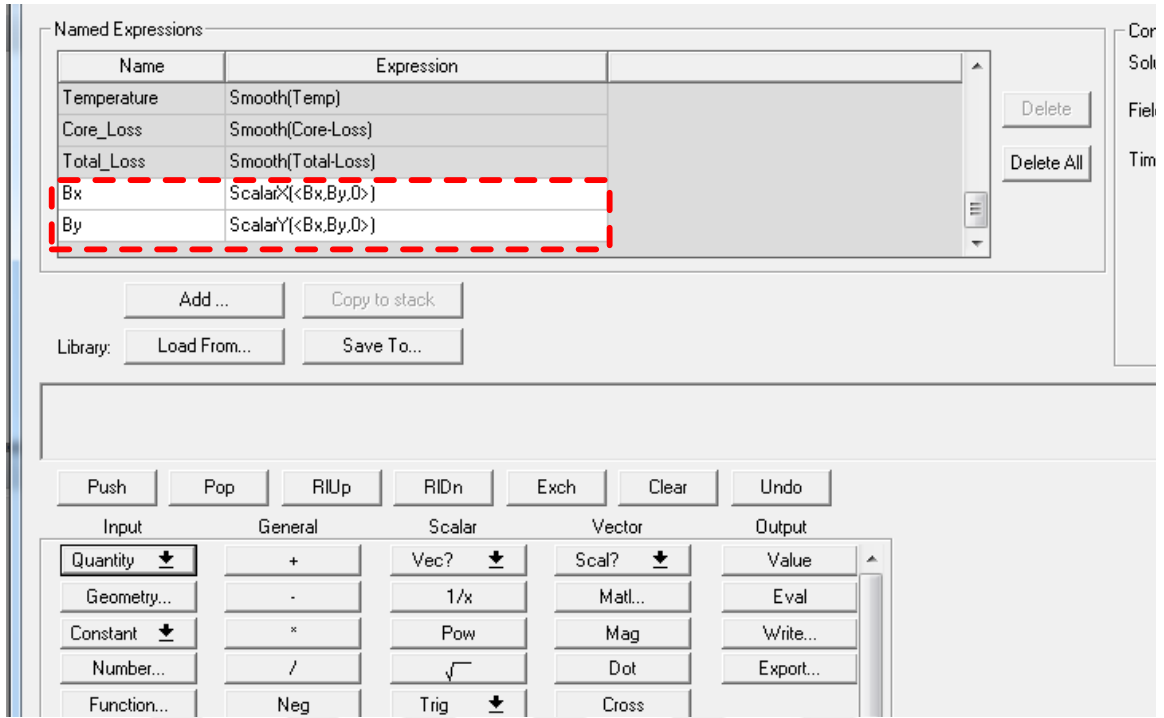
➤ Koordinat düzlemine göre bakılan B_x ve B_y programda *calculator* kısmında hesaplanarak işleme dahil edilmiştir (Bkz. Şekil 3.9).

$$B_x = \text{ScalarX}(<B_x, B_y, 0>) \quad (3.1)$$

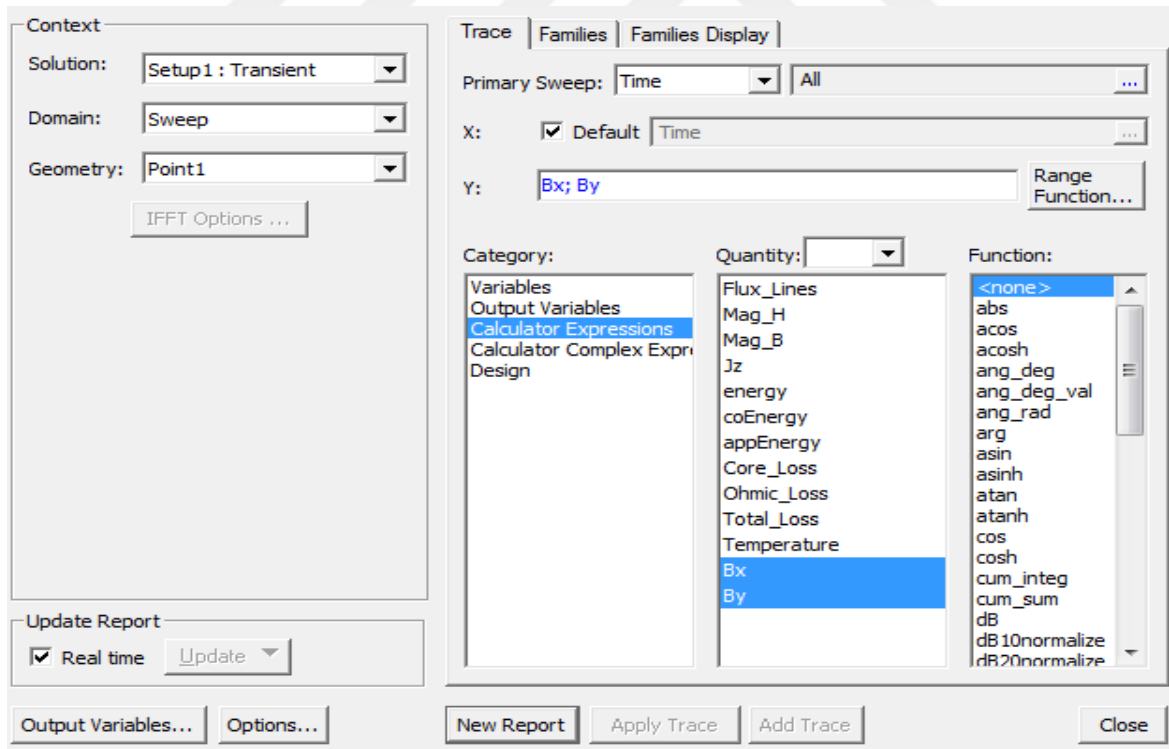
$$B_y = \text{ScalarY}(<B_x, B_y, 0>) \quad (3.2)$$

Denklem 3.1 ve 3.2 eklenerek sensör üzerinden geçen manyetik alan dağılımının sonucuna bakılarak kaçak akı incelemesi yapılabilmektedir.

➤ Denklem hesabından sonra kaçak akının grafiklerini elde etmek için sonuçların olduğu kısımda kaçak akıya ait olan B_x ve B_y değerlerinin grafikleri eklenir (Bkz. Şekil 3.10).



Şekil 3.9: B_x ve B_y denklemlerinin calculate kısmında oluşturulması

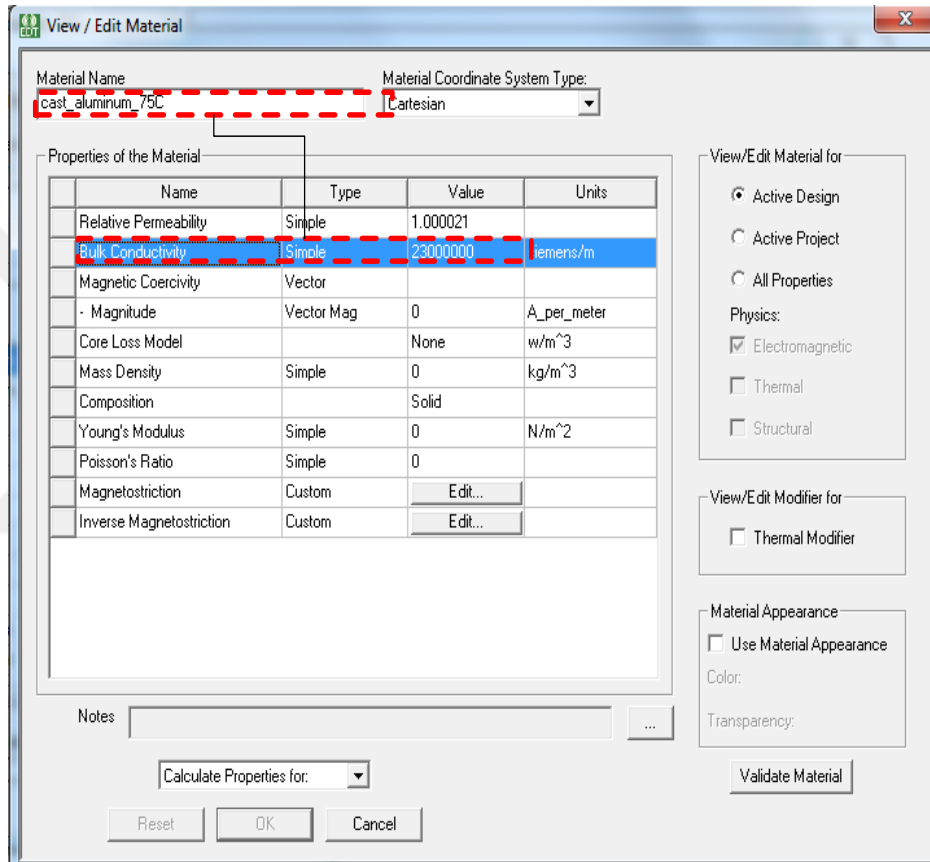


Şekil 3.10: B_x ve B_y grafik oluşturulması

3.2 Kırık Rotor Çubuğu Simülasyonu

Kaçak akı sensörü modellendikten sonra kırık rotor çubuk arızasının modellenmesi gerekmektedir. Arızanın nasıl oluşturulduğu ve kırılma sonucunda analiz işlemlerinde kullanılacak sonuçların elde edilmesi işlemleri aşağıda belirtildiği şekilde yapılır;

➤ RMXprt kısmında girilen değerlere göre daha önce rotorun ham maddesi cast_aluminum_75C olarak belirlenmiştir. Seçilen bu madde belli bir iletkenliğe sahiptir (Bkz. Şekil 3.11).

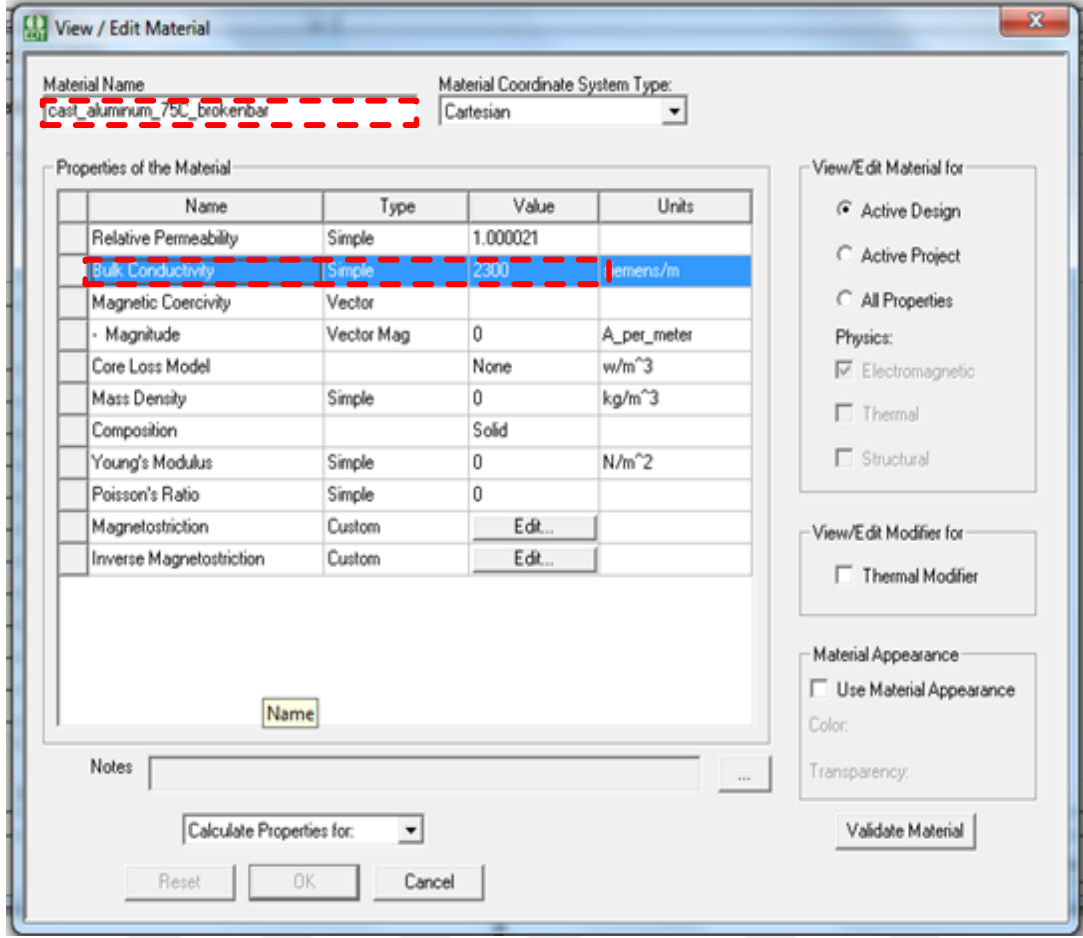


Şekil 3.11: Rotorun yapısını oluşturan maddenin iletkenlik katsayısı

➤ Belirlenen herhangi bir rotor çubuğun cast_aluminum_75C maddesinin iletkenlik kat sayısı 1000 kat düşürülerek gerçek hayatta kırılmış olarak kabul edilebilir. Böylece rotorun bir çubuğu kırılmış olacaktır.

➤ Şekil 3.12’de iletkenlik kat sayısı düşürülmüş ve yeniden adlandırılmış cast_aluminum_75C değeri gösterilmiştir. Burada yenilenmiş ismi cast_aluminum_75C_brokenbar olarak verilmiştir.

➤ Belirtilen işlemler tamamlandıktan sonra motorda farklı kırık çubuk arızaları için çeşitli analizler yapılabilmektedir.



Şekil 3.12: 1000 kat değeri düşürülmüş cast_aluminum_75C iletkeni

3.3 Kırık Rotor Çubuğu Arızasının ANSYS@Maxwell'de Analizi

Bu bölümde de *ANSYS@Maxwell* programında kırık rotor çubuğu arızasına ait analiz sonuçlarının elde edilmesi anlatılacaktır. Tüm işlemler sırasıyla yapıldıktan sonra motorun belli bir süre nominal koşullarda çalıştırılarak analiz edilmesi gerekmektedir. Çalışma süresinin sonucunda elde edilen akım, kaçak akı, hız ve moment gibi sonuçlar Matlab programında FFT sonuçlarına bakılarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında; kırık çubuk arızası incelenirken farklı durumlar için analizler yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına;

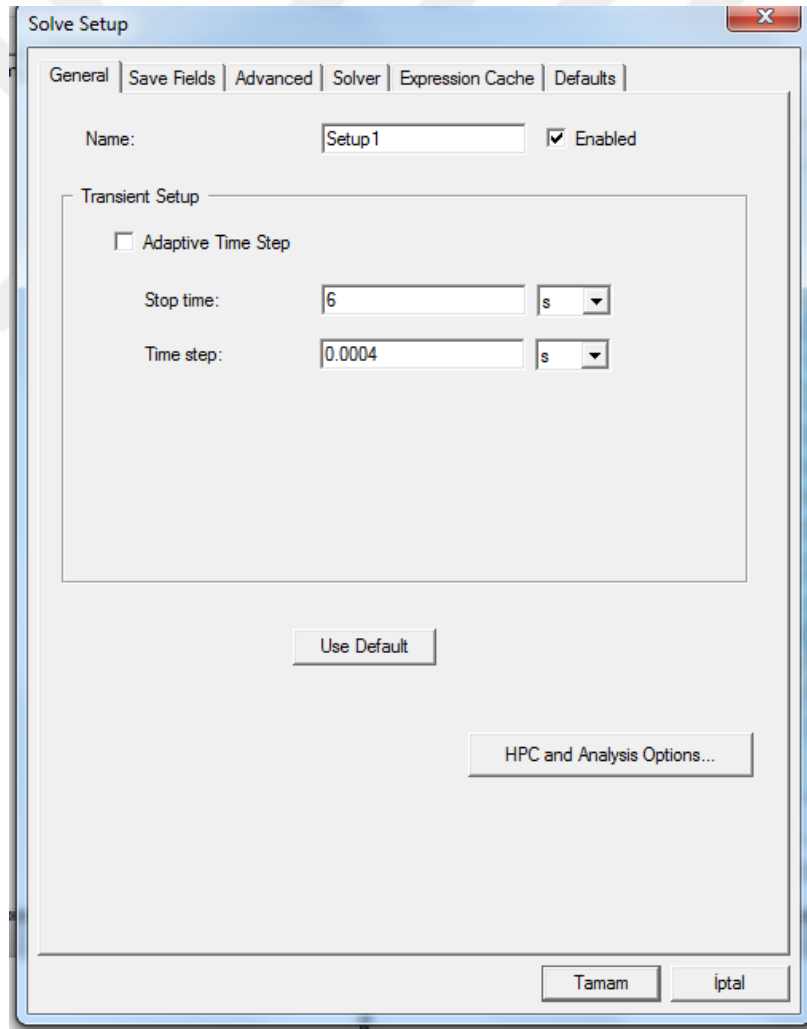
- Öncelikle bir tane çubuk kırılması
- İki çubuğun bitişik olarak kırılması
- Yarım kutup aralıklı iki çubuğun kırılması
- Tam kutup aralıklı iki çubuğun kırılması

durumları için bakılmıştır.

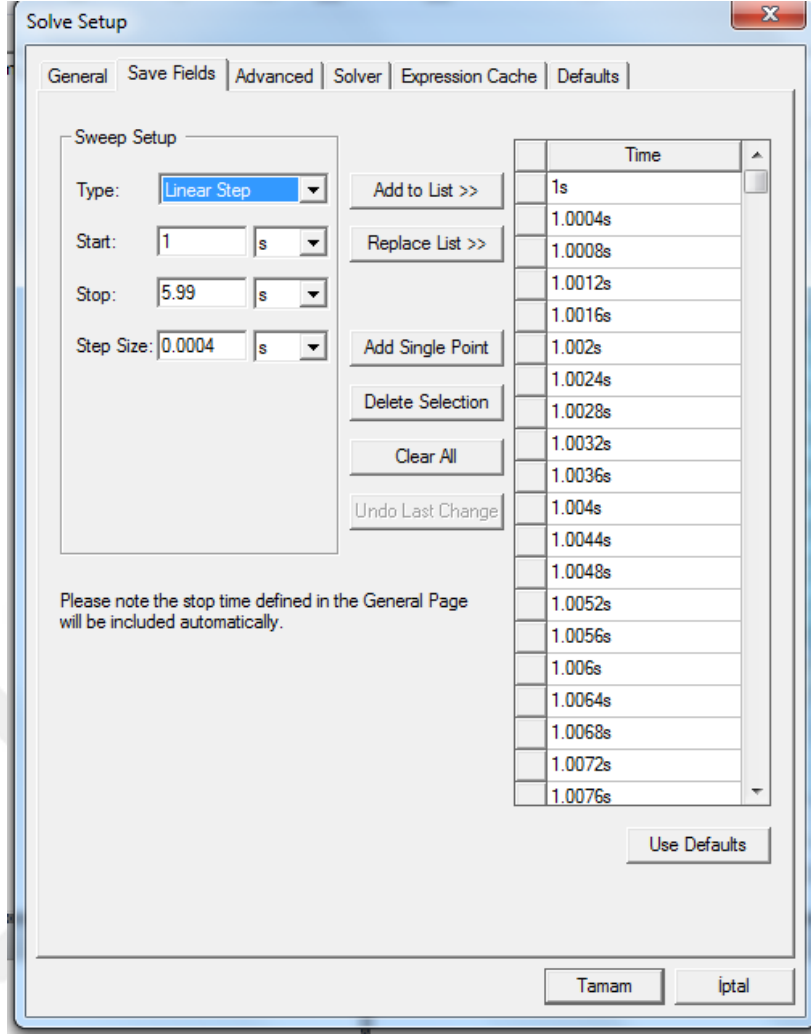
Bu bölümde kısaca ANSYS@Maxwell programında motorun simülasyonu ve sonuçlarının alınması durumuna bakılacaktır. Sonraki bölümde de analizler değerlendirilecektir.

Simülasyon programında kırık çubuk arızası modellendikten sonra motor performans açısından analiz edilecektir. Analiz için öncelikle setup kısmında motorun kaç saniye çalışacağı, gerekli olan zaman aralığı (Time step) ve manyetik alanların kaydedilmesi için gerekli zamanın basamak aralığının başlangıç-bitiş saniyesi kaydı yapılır. Kayıt yapıldıktan sonra analize başlanır.

Şekil 3.13’de zaman aralıkları belirlenmiştir. Zaman aralıkları motorun 6 saniye boyunca çalıştırılması için belirlenmiştir. Şekil 3.14’de ise manyetik alanların kaydedilmesi için Save Fields kısmında alanların başlangıç ve bitiş zamanları ayarlanmıştır.



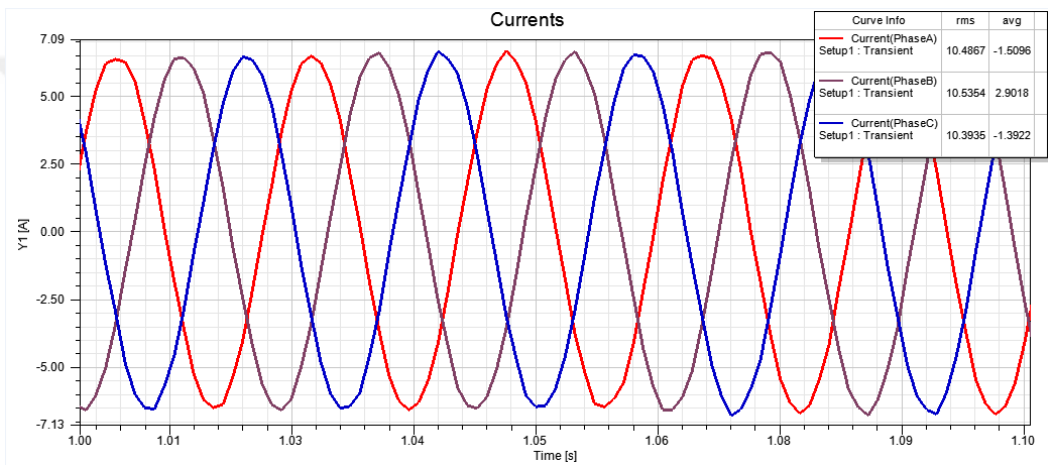
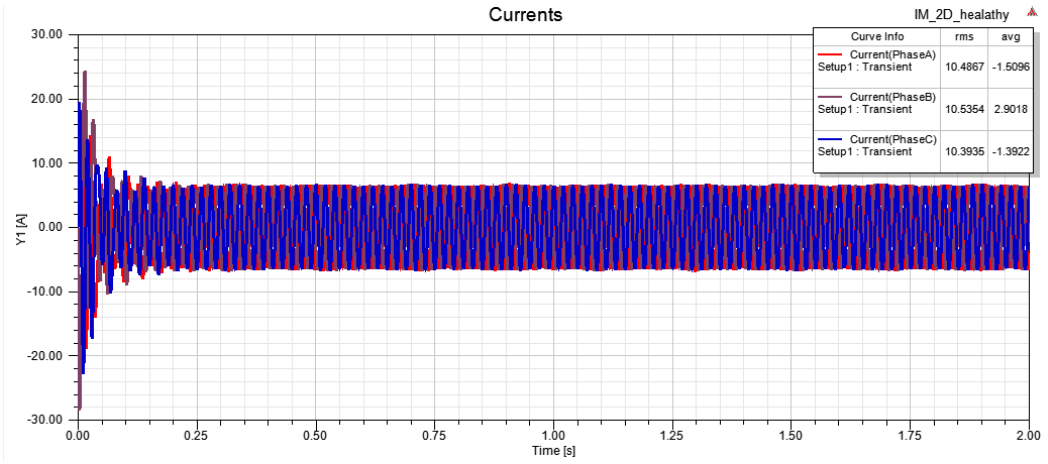
Şekil 3.13: Zaman aralığının belirlenmesi



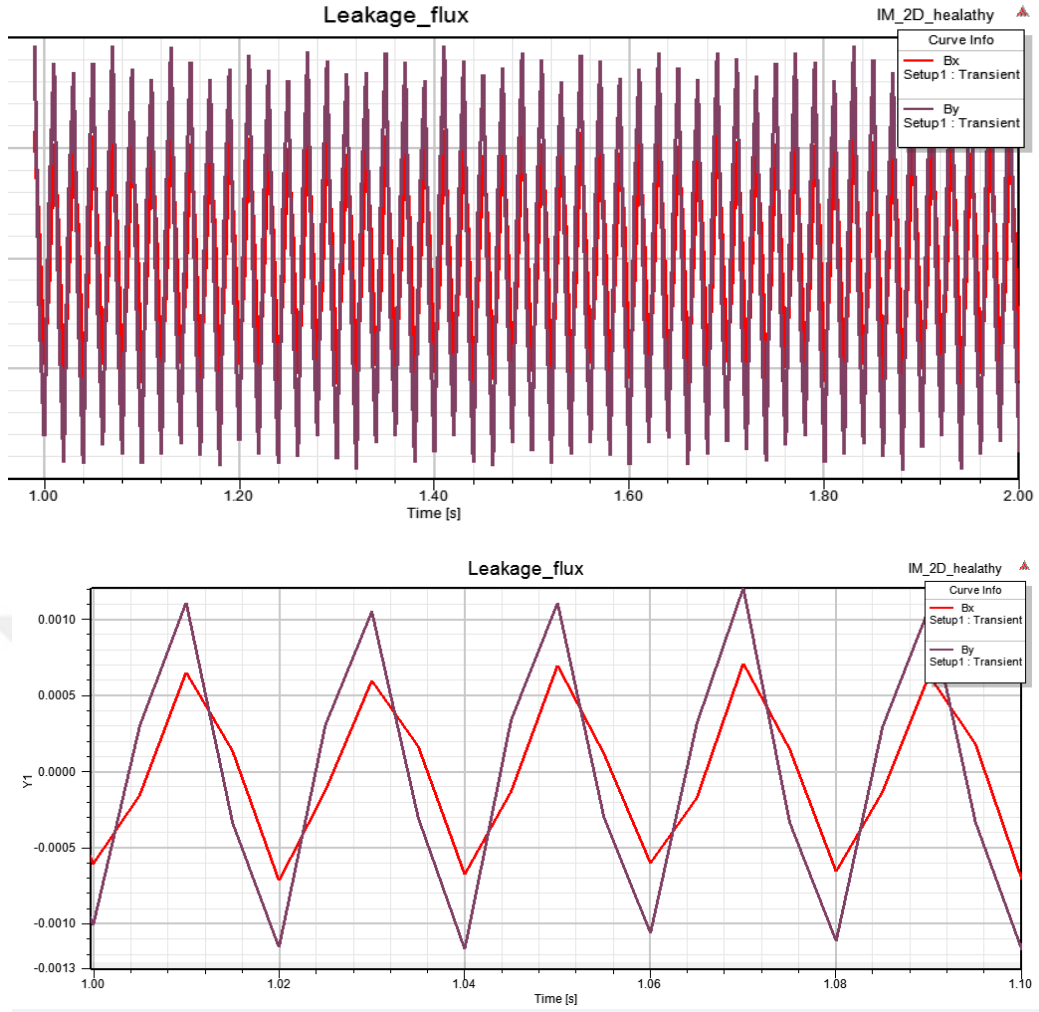
Şekil 3.14: Manyetik alanların kaydedildiği zaman dilimi

Alınan sonuçlar program üzerinden zamana bağlı olarak elde edilmektedir. Örnek olarak Şekil 3.15 ve 16'da sırasıyla zamana bağlı akım ve kaçak akı değişimleri gösterilmiştir.

Analiz tamamlandıktan sonra gerekli sonuçlar alınarak Matlab programında FFT uygulanarak incelenmiştir.



Şekil 3.15: ANSYS@Maxwell programında akım sonuçları



Şekil 3.16: ANSYS@Maxwell programında kaçak akı sonuçları

4. KIRIK ÇUBUK ARIZASININ SİMÜLASYONU

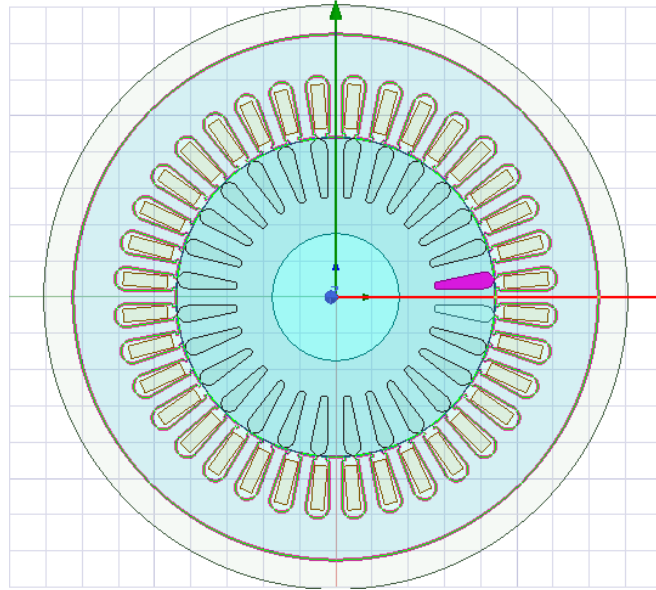
Rotor çubuğunun kırılması arızasını incelerken bazı deneysel sonuçlar temel alınmıştır. Arıza durumunda karşılaşılabilecek ihtimaller temel alınarak çeşitli benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında farklı yükler altındaki değişiklikler incelenmiştir. Özellikle kaçak akı ve akım karşılaştırılması sağlıklı ve arızalı durum olarak yapılmıştır. Bunun için;

- Bir çubuk kırılması
- Bitişik iki çubuğun kırılması
- Yarım kutup aralıklı iki çubuğun kırılması
- Tam kutup aralıklı iki çubuğun kırılması

durumları sırasıyla modellenerek sonuçlar analiz edilmiştir.

4.1 Bir Rotor Çubuğunun Kırılmasının Simülasyonu

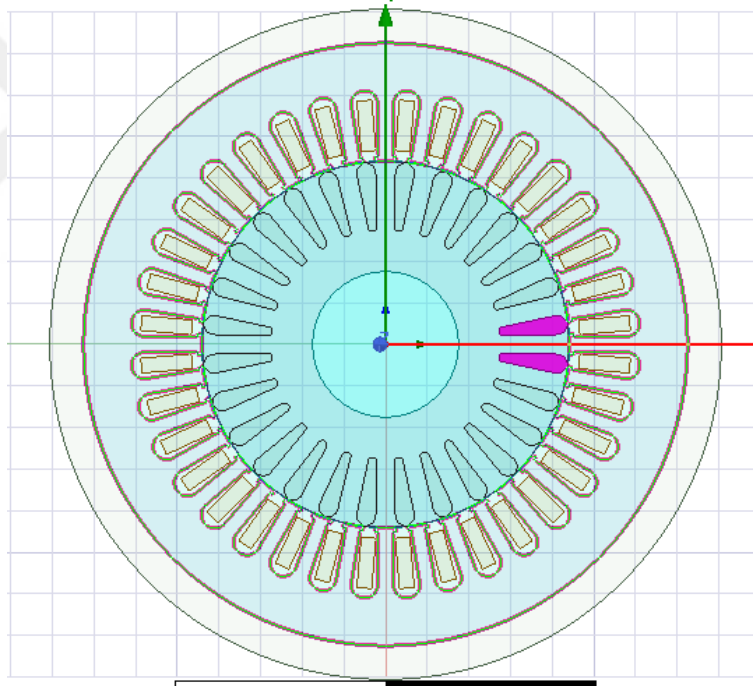
Bu bölümde gerçek hayatta karşılaşılabilecek ihtimali yüksek olan bir durum analiz edilmiştir. Öncelikle 3. Bölümde anlatıldığı üzere rastgele seçilen herhangi bir çubuk kırılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Daha sonraki bölümde ise simülasyon sonuçları MATLAB ortamına aktarılarak frekans ekseninde incelenecek ve farklı yükler altında motorun akım ve kaçak akı değişimlerine bakılacaktır.



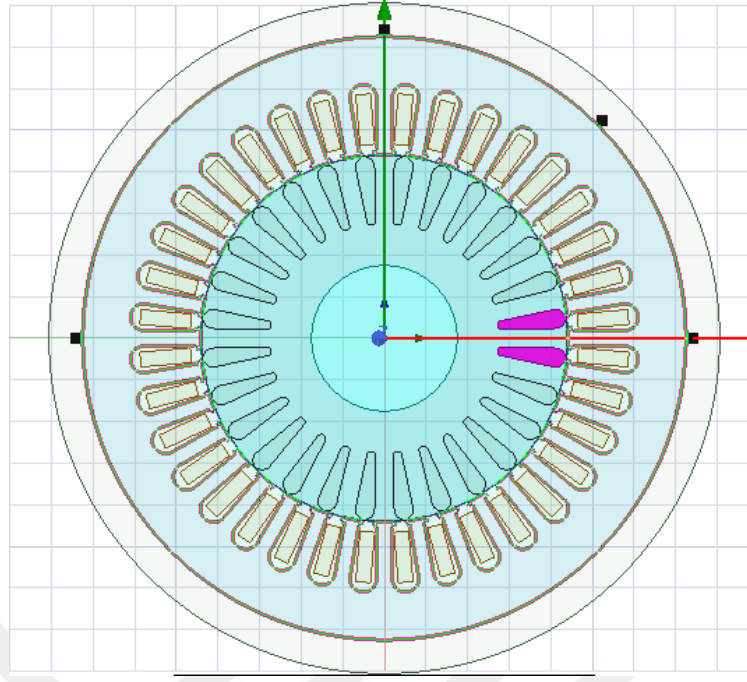
Şekil 4.1: Seçilen bir rotor çubuğunun konumu

4.2 Komşu (Bitişik) İki Çubuğun Kırılması Simülasyonu

Çubukların bitişik olarak kırılması durumunun arıza harmonikleri üzerindeki etkilerini incelemek için bitişik iki çubuğun kırılmasının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4’de bitişik olarak seçilen iki çubuğun konumları gösterilmiştir. Rastgele seçilen bu iki çubuğun kırılması gerçek hayatta karşımıza çıkma olasılığı yüksek olduğundan detaylı analizlerin yapılması önemlidir. Simülasyonlar farklı yüklerde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları farklı konumlara yerleştirilen sensörlerden alınan bilgiler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Sensörlerin farklı konumlara yerleştirilmesinde amaç; bitişik olarak kırılan çubukların farklı noktalardaki akı değişimini ayrıntılı olarak incelemek ve arıza analizi yöntemine farklı bir bakış açısı kazandırmaktır. Şekil 4.5’te sensörlerin yerleştirildiği konumlar verilmiştir.



Şekil 4.4: İki rotor çubuğunun bitişik şekilde kırılması



Şekil 4.5: Bitişik kırık rotor çubukları ve sensör konumları



Şekil 4.6: İki bitişik(komşu) rotor çubuğu

Konumlar belirlenirken ilk olarak modellenen sensörün bulunduğu $\alpha=0^0$ konumunu referans alınmış ve $\alpha=0^0$, $\alpha=45^0$, $\alpha=90^0$ ve $\alpha=180^0$ açısal konumları için analizler yapılmıştır. Şekil 4.5’de yerleştirilen sensörlerin benzetim programı üzerindeki konumları gösterilmiştir. Analizler farklı yükler altında her sensör için ayrı ayrı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek bitişik kırık rotor çubuğu arızası olduğunda akım ve kaçak akıda meydana gelen değişime bakılmıştır.

4.3 Yarım Kutup Aralıklı İki Çubuğun Kırılması

Kırık rotor çubuğu arızasının incelenmesi yapılırken farklı konumlarda ve mesafelerde kırılma durumları için de simülasyonlar ve analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı konum ve mesafelerde rotor çubuklarındaki kırılmaların arıza sinyalleri üzerindeki etkilerini gözlemek için kutup aralık durumlarına bakılmıştır. Kutup aralıkları için hangi aralıklarla rotor çubuklarının kırılacağı belirlenmesi gerekmektedir. Kutup aralığı seçimi yapılırken yarım kutup aralığı veya tam kutup aralığında iki farklı rotor çubuğu belirlenir. Kutup aralıkları belirlenirken aşağıdaki denklem kullanılabilir

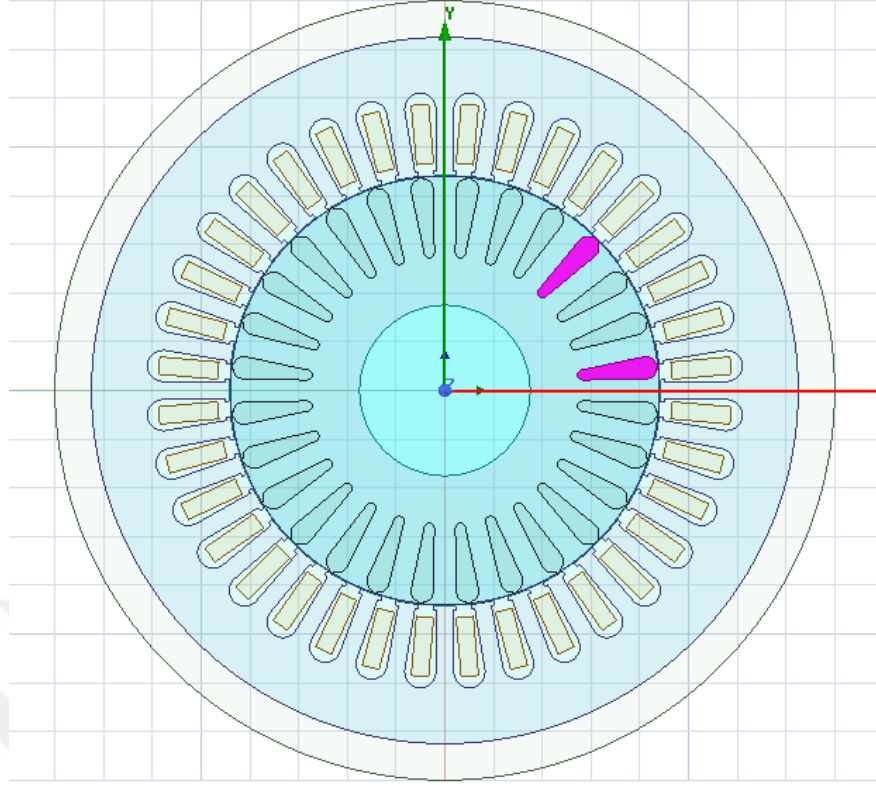
$$X = \frac{R}{P} \quad (4.1)$$

Burada R rotor çubuk sayısı, P kutup sayısı ve X ise tam kutup aralığının kapladığı çubuk sayısını belirtmektedir. Bizim kullandığımız motor 28 rotor çubuklu ve 4 kutuplu olduğundan yarım kutup aralığına hangi rotor çubukların denk gelmesi gerektiğini şöyle hesaplayabiliriz;

$$X = \frac{R}{P} = \frac{28}{4} = 7 \quad (4.2)$$

Bu hesaplamadan anlaşılacağı üzere 4 kutuptan birine denk gelen rotor çubuğu sayısı 7 olmaktadır. Yarım kutup rotor çubukları ise bu durumda yaklaşık olarak 1-3 arası, tam kutup aralığındaki ise 1-7 arası olarak isimlendirdiğimiz çubuklara denk gelmektedir. İncelemeler yapılırken farklı noktalara yerleştirilen sensörlerden alınan sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

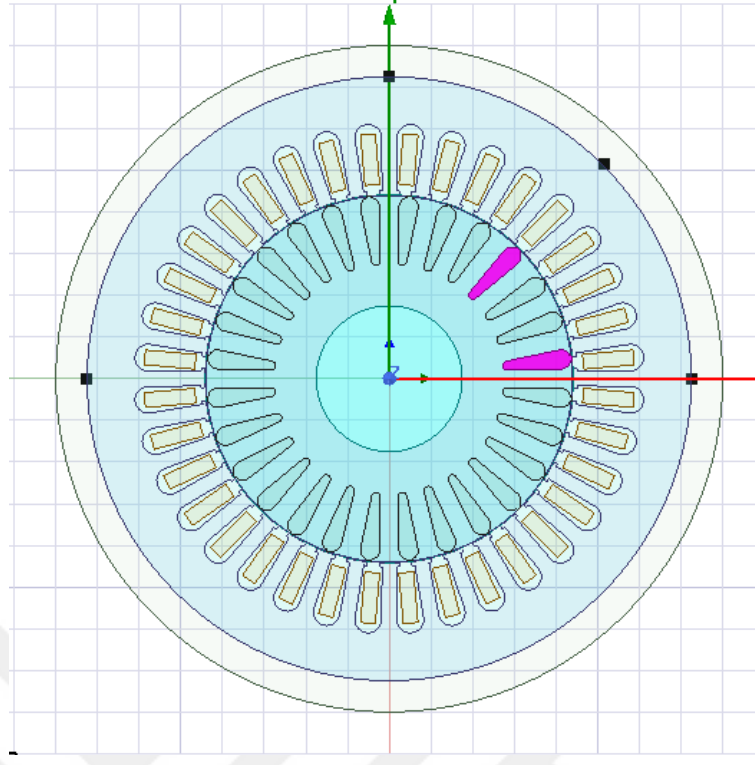
Yarım kutup aralığında oluşturulan kırık rotor çubuğu arızasının ayrıntılı incelenmesi ve sonuçların değerlendirilmesi daha sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.7: Yarım kutup aralıklı iki kırık rotor çubuğu



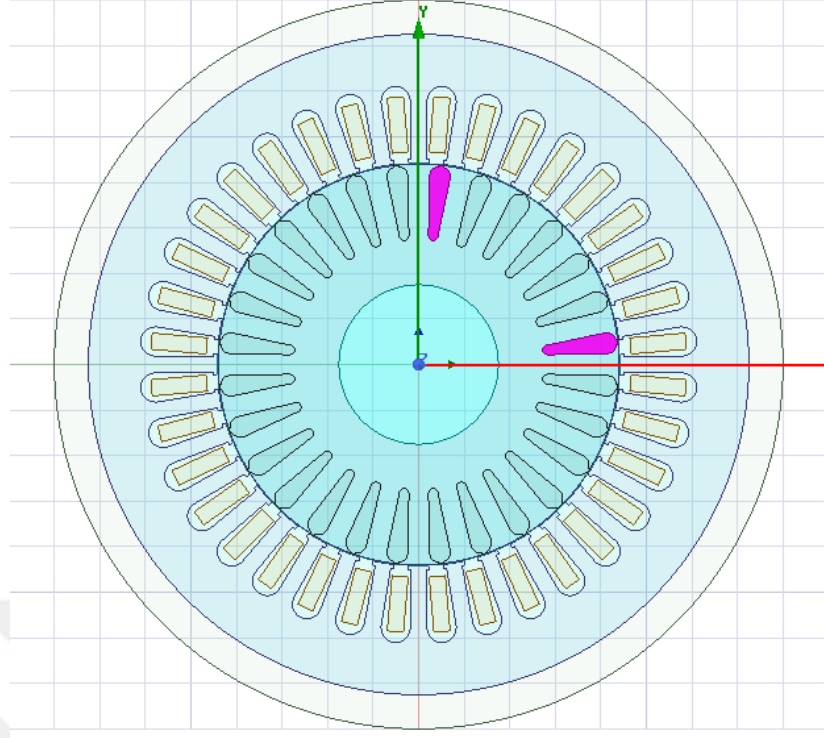
Şekil 4.8: Yarım kutup aralıklı kırılmış rotor çubukları



Şekil 4.9: Yarım kutup aralıklı rotor çubukları ve sensör konumları

4.4 Tam Kutup Aralıklı İki Çubuğun Kırılması

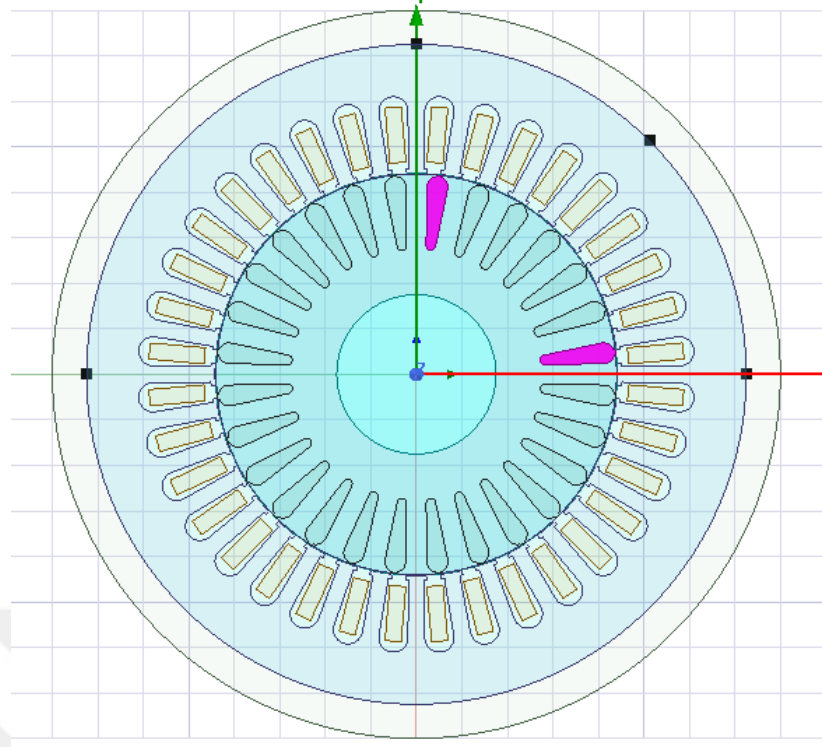
Tam kutup aralığında bulunan rotor çubuklarının tespiti yarım kutup aralığındaki işlemlerden yola çıkarak yapılmıştır. 1 ve 7 numaralı çubuklar kırılarak tam kutup aralığında iki rotor çubuğu kırılması arızası oluşturulmuş ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları sonuç kısmında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.10: Tam kutup aralıklı rotor çubukları



Şekil 4.11: Tam kutup aralıklı kırık iki rotor çubuğu



Şekil 4.12: Tam kutup aralıklı kırık rotor çubukları ve sensör konumları

Şekil 4.11’de tam kutup aralığında belirlenen çubukların, gerçek hayatta arızaların oluşmasında motor rotoru üzerinde nasıl görülebileceğinin şekli verilmiştir. Şekil 4.12’de ise tam kutup aralığında bulunan rotor çubukları ve sonuçların değerlendirilmesi için motor çevresine yerleştirilmiş sensör konumlarına yer verilmiştir.

5. ARIZA ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde kırık rotor çubuğu arızasının akım ve kaçak akı bazında incelemesi yapılarak analiz sonuçları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Analiz işlemleri yapılırken ANSYS@Maxwell programından gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen sonuçlara Matlab programında FFT alınarak bulgulara bakılmıştır. Analiz işlemleri yapılırken sağlıklı ve arızalı durumların sonuçları karşılaştırılmıştır. Motor yükünün sonuçlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi için %100, %75, %50 ve %25 gibi farklı yüklerdeki değerlerine bakılmıştır. Böylece geniş bir çalışma aralığında arıza sinyalleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. %100 yük altında alınan sağlıklı ve arızalı sonuçlar grafiksel olarak verilmiş ve diğer sonuçlar ise çizelge halinde sunulmuştur.

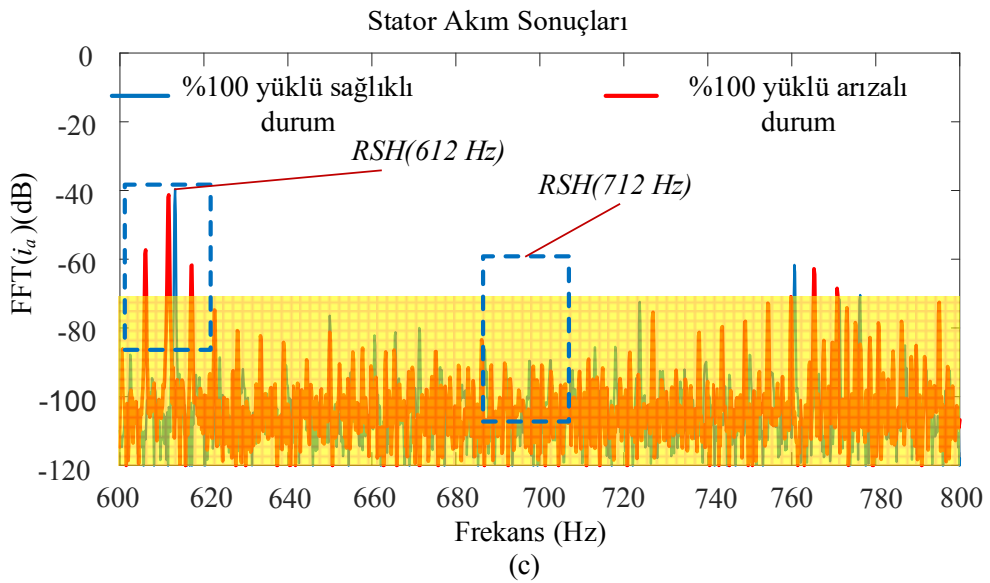
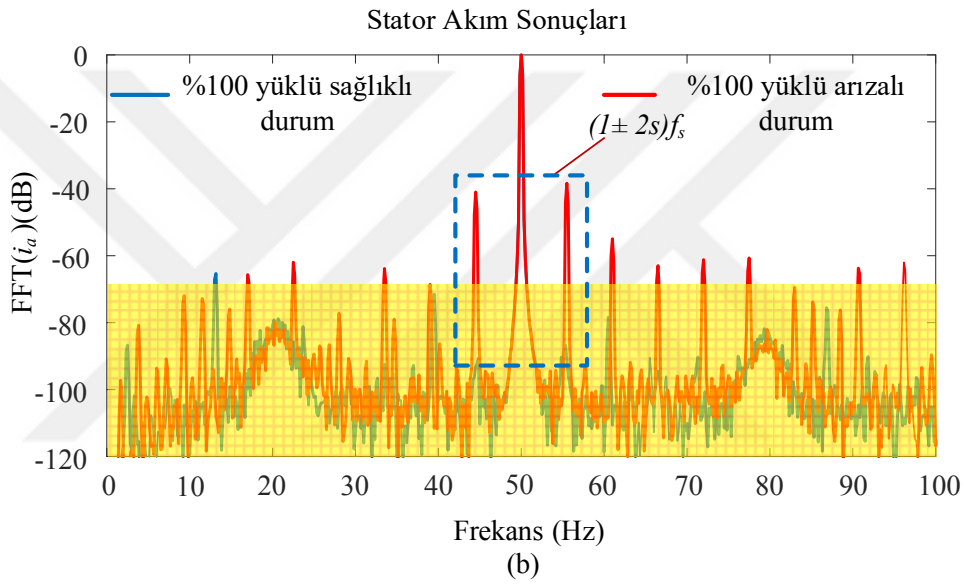
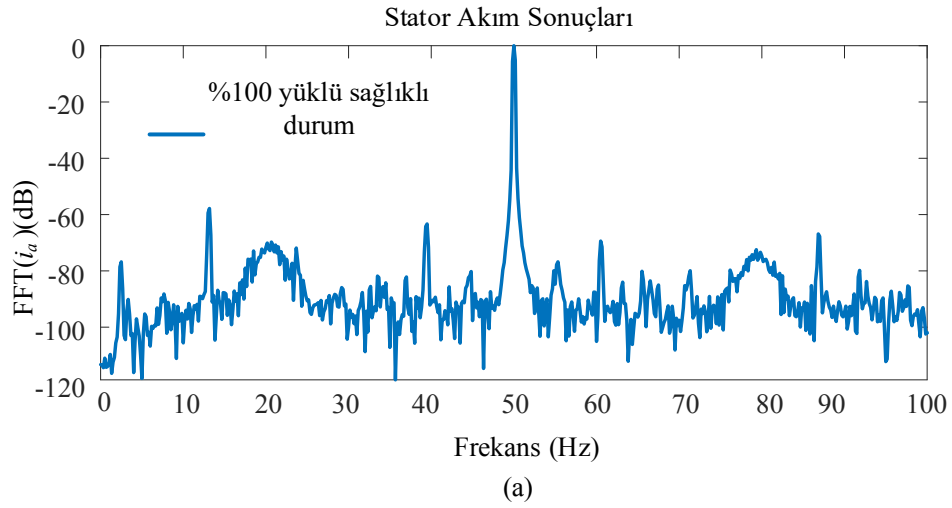
5.1 Bir Kırık Rotor Çubuğu Arızasının Analizi

Analiz işlemleri yapılırken öncelikle bir kırık rotor çubuğunun kırılması ile oluşan arızanın sonuçları incelenmiştir. Arıza harmonikleri incelenirken motorun hem arıza olmayan (sağlıklı) durum sonuçları hem de arızalı durum sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra Matlab programında FFT alınarak sinyallerin karşılaştırılması yapılmıştır. Asenkron motorun rotor çubuklarının yalnızca bir tanesinde kırık oluşması durumunda; akım ve kaçak akıda nasıl bir değişim meydana geldiği detaylı olarak incelenmiştir.

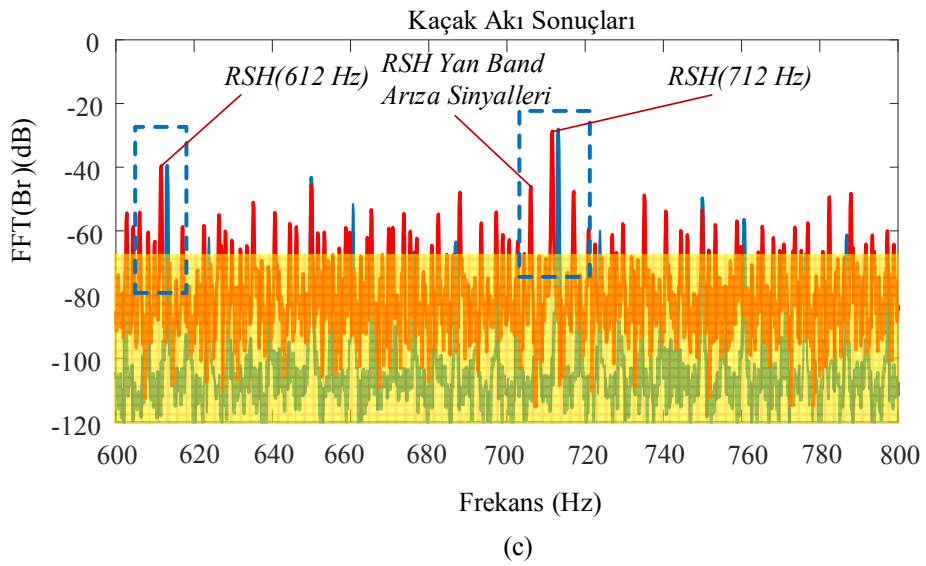
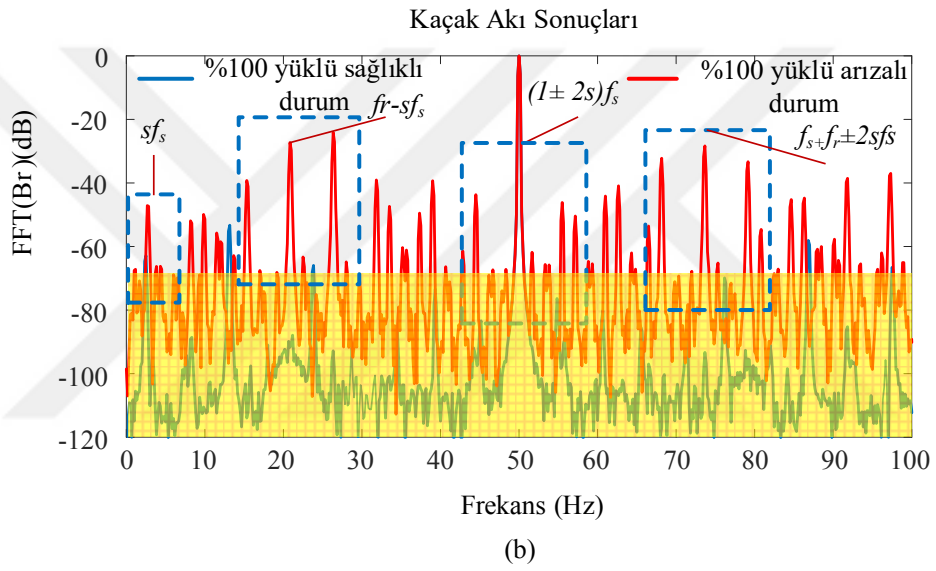
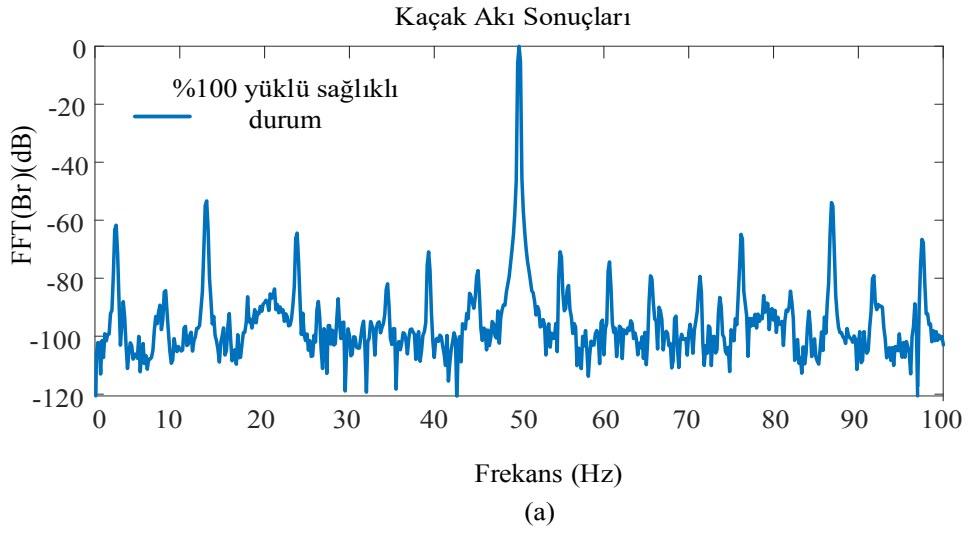
Kırık rotor çubuğu arıza tespitinde literatürde en çok kullanılan arıza sinyalleri denklem 5.1'de verilmiştir.

$$f_{brb} = f_s(1 \pm 2ks) \quad (5.1)$$

Şekil 5.1'de sağlıklı ve bir kırık rotor çubuk arızalı durumlara ait akım sinyallerinin değişimi sunulmuştur. Şekil 5.1'de açıkça görüldüğü üzere temel frekansın yan bantlarında kırık rotor çubuğu arıza sinyalleri akım sonuçlarında ortaya çıkmıştır. Arızalı ve sağlıklı durum arasında doğru bir kıyaslama yapılabilmesi amacı ile sonuçlar sağlıklı ve arızalı durum için ayrı ayrı verilmiştir. Harmonikler incelendiğinde, tam yük çalışma koşullarında ($n_m=1420$ rpm, $s=0.055$) arıza durumunda temel frekansın yan bantlarında stator akımında $(1-2s)f_s$ (45.5 Hz) ve $(1+2s)f_s$ (55.5 Hz) arıza harmonikleri görülmüştür.



Şekil 5.1: Tam yükte bir kırık rotor çubuğu arızası akım sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları



Şekil 5.2: Tam yükte bir kırık rotor çubuğu arızası kaçak akı sonuçları a) Sağlıklı durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

Frekans incelemesinde, kaçak akıda başka arıza sinyallerinin olma ihtimalinden dolayı kaçak akı spektrumu da detaylı olarak incelenmiştir. Kaçak akı incelemesi yapılırken aynı durumlar üzerinde durulmuştur. Bir rotor çubuğunun kırılması ile oluşan arızanın boyutunun motora yerleştirilen fluxgate sensörlerden elde edilen kaçak akı sonuçları *ANSYS@Maxwell* programından alındıktan sonra Matlab programında FFT alınarak incelenmiştir. Kaçak akı incelenirken öncelikle temel frekansın yan bant sinyallerine bakılmıştır. Asenkron motorun arıza analiz aşamasında kırık rotor çubuğu için stator akımı ve kaçak akı sonuçları arasında farklar olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 5.2’de bu durumun tam yük altında sağlıklı ve arızalı sonuçlarına bakılmıştır. Sinyal karşılaştırılması yapılırken temel frekansın yan bantlarında bulunan arıza harmoniklerinin dışında literatürde var olan farklı arıza sinyallerinin kaçak akıda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Grafikler ayrıntılı olarak ele alındığında $sf_s, f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r \pm 2sf_s$ arıza sinyallerinin belirgin olduğu görülmüştür. Tam yük altında alınan sonuçlarda akım grafiğinde olmayan ama kaçak akı incelemesi sonunda bulunan farklı arıza sinyalleri görülmüştür.

Akım ve kaçak akı sinyal spektrumları denklem 5.2’de verilen rotor slot harmoniklerinin yan band arıza harmonikleri (5.3) dikkate alınarak da detaylı analizler yapılmıştır.

$$f_{RSH} = \left[\frac{R(1-s)}{p} \pm v \right] f_s \quad (5.2)$$

$$f_{RSH_fault} = \left[\frac{R(1-s)}{p} \pm v \pm 2ks \right] f_s \quad (5.3)$$

Denklem 5.2’de $R=28$, $p=2$ ve $v=+1, -1$ değerlerini alacak olursak denklemin ifade ettiği rotor slot harmoniği frekansları $(13-14s)f_s$ (tam yük sağlıklı durumda 612 Hz) ve $(15-14s)f_s$ (tam yük sağlıklı durumda 712 Hz) ve $k=1$ için yan band arıza harmonikleri $(13-14s \pm 2s)f_s$ ve $(15-14s \pm 2s)f_s$ olur. Motor akım spektrumu incelendiğinde rotor slot harmoniklerinden (RSH) (Şekil 5.1c) $(13-14s)f_s$ sinyalinin yan bandında $(13-14s \pm 2s)f_s$ arıza harmonik sinyali görülmekte, fakat $(15-14s)f_s$ frekansının yan bandında arıza harmonik sinyalleri bulunmamaktadır. Kaçak akı spektrumunda rotor slot harmonikleri 612 Hz ve 712 Hz sinyallerinin yan bandlarında ise kırık rotor çubuğu arıza sinyalleri görülmüştür. Arıza sinyali olarak kullanılabilir olan rotor slot harmonikleri yan bant sinyalleri kaçak akıda Şekil 5.2c’de görüldüğü gibi belirgindir. Ancak bu sinyaller stator akımı için bakılan 712 Hz frekans değerlerinde görülmemiştir. Rotorun bir çubuğunun kırılması sonucu ortaya çıkan

arıza sinyalleri akımda sadece temel frekansın yan bantları olan $f_s \pm 2ksf_s$ ve 612 Hz yan bant harmonikleri görülmüştür. Fakat kaçak akı da ise daha ayrıntılı ve daha farklı arıza sinyalleri gözlemlenmiştir. Tam yükte yapılan bu çalışmalara ek olarak %75, %50 ve %25 yük altında motorun aynı şekilde hem sağlıklı hem de arızalı sonuçları incelenmiştir. İnceleme sonucunda kaçak akı ve akımda gözlemlenen arıza sinyalleri çizelge halinde sunulmuştur.

Çizelge 5. 1 Bir kırık rotor çubuğu arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi

Yük	Kaçak Akı						Akım
	sf_s	$f_r - sf_s$	$f_s \pm 2ksf_s$	$f_s + f_r \pm 2sf_s$	$(13-14s \pm 2s)f_s$	$(15-14s \pm 2s)f_s$	$f_s \pm 2ksf_s$
%100	-47.12	-27.3	-43.69/- 46.16	-32.23/- 33.33	-39.59	-2867	-40.95/- 38.34
%75	-49.59	-27.67	-50.02/-48.4	-34.28/- 33.96	-54.37	-55.1	-40.73/- 40.16
%50	-58.78	-31.53	-48.19/- 53.86	-38.77/- 38.36	-55.91	-55.17	-43.26/- 43.25
%25	-63.99	-36.28	-56.07/- 62.02	-46.2/- 44.12	-69.93	-75.19	-48.02/- 47.63

5.2 Bitişik (Komşu) İki Kırık Rotor Çubuğun Analizi

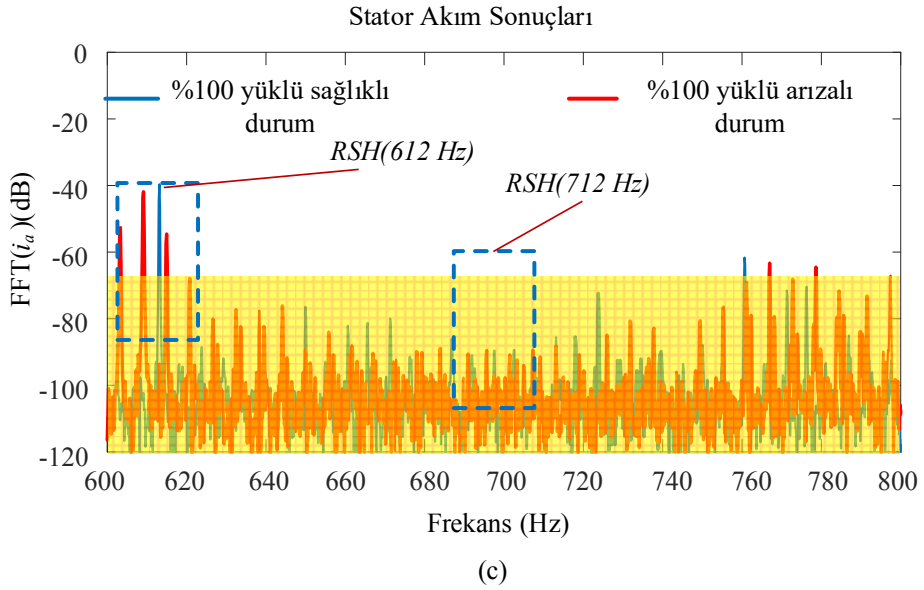
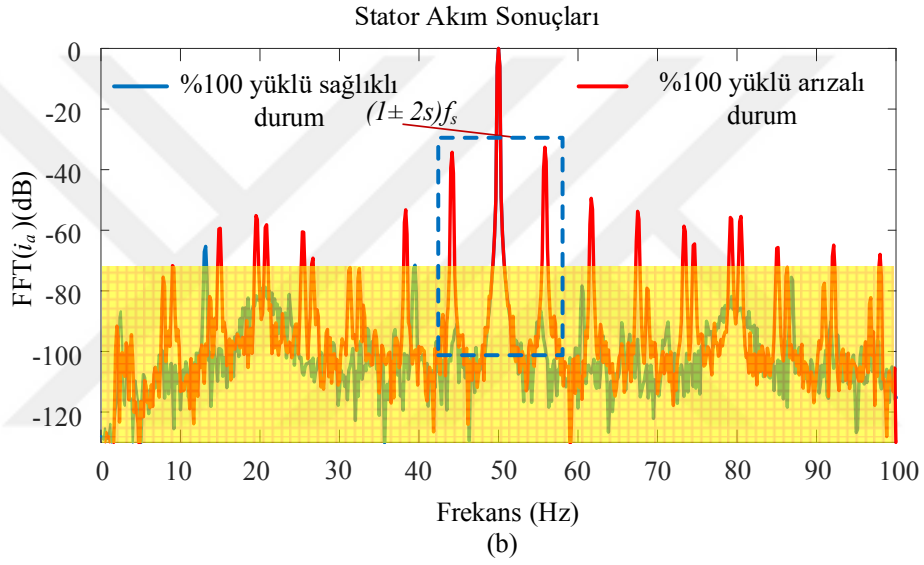
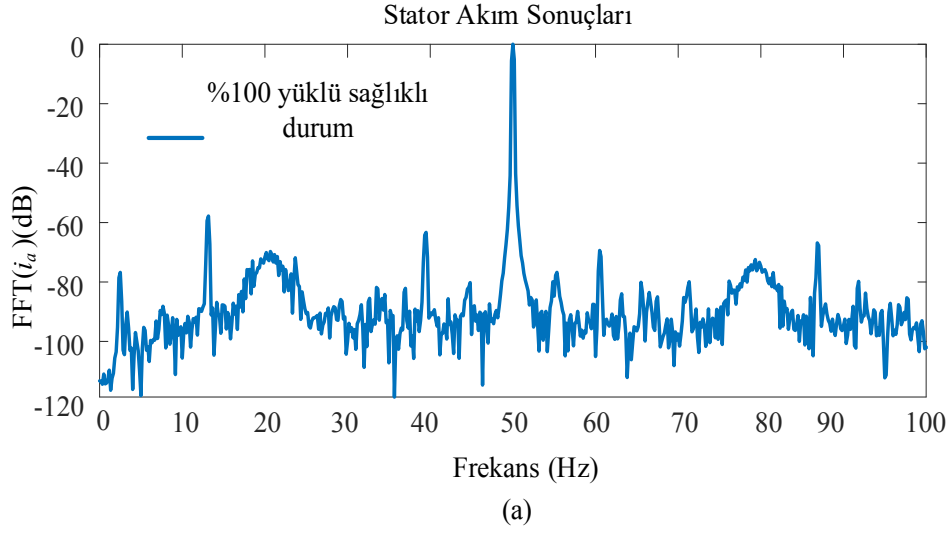
Bu bölümde bitişik (komşu) iki rotor çubuğunun herhangi bir nedenden dolayı kırılması durumunda arıza sinyallerinin oluşması ve arıza sinyallerinin olduğu durumda boyutlarda bir farklılık olup olmadığına bakılmıştır. Arıza oluşturmak için benzetim programı olan *ANSYS@ Maxwell* programında seçilen asenkron motorun rast gele iki tane rotor çubuğu bitişik olacak şekilde kırılmıştır. Daha sonra arızalı motor simüle edilmiş ve sonuçlar alınmıştır. *ANSYS@Maxwell* programında alınan sonuçların Matlab programında FFT'si alınarak ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Analiz işlemi sırasında kaçak akıda herhangi bir değişim olup olmadığına bakmak için asenkron motorun farklı konumlarına fluxgate sensörleri yerleştirilmiştir. Bu sensörlerden alınan bilgiler arızanın boyutunun farklı noktalarda nasıl görüldüğüne dair bilgiler vermiştir. Arıza durumu daha net anlaşılması için testi yapılan asenkron motorun hem arıza olmayan(sağlıklı) durumu hem de kırık rotor çubuğu olarak ele alınan arızalı durumu karşılaştırılmıştır. Aynı durum farklı yükler altında da incelenmiş ve analizler sonucunda daha net ve anlaşılır bilgiler elde edilmeye çalışılmıştır.

Sensörlerin yerleştirildiği açısal konumlar daha önceki bölümde anlatıldığı üzere $\alpha=0^0$, $\alpha=45^0$, $\alpha=90^0$ ve $\alpha=180^0$ olarak belirlenmiştir. Sensörlerin farklı konumlarda olmasında amaç, motor çalışırken arıza durumunun etkisini farklı noktalarda görmeye

çalışmaktadır. Her bir açı konumundaki sonuçlar %100, %75, %50 ve %25 yüklü motor için elde edilmiştir ve sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Kaçak akının sonuçları grafikler halinde daha sonra ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

5.2.1 Stator akım sonuçları

Bu bölümde elde edilen akım sonuçlarının grafikleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekil 5.3a sağlıklı durumda motorun tam yük altındaki spektrumunu göstermektedir. Şekil 5.3b'ye bakıldığında ise iki rotor çubuğun bitişik olarak kırılması sonucunda özellikle temel frekansın yan bantlarında arıza sinyalleri oluşmuştur. Yan bant arıza sinyalleri olarak belirtilmiş olan $f_s \pm 2k_s f_s$ sinyalleri sağlıklı durum sonuçları ile karşılaştırıldığında arızalı durumda meydana gelmiştir. Akım spektrumu tüm frekans aralıkları için incelenmiş arızanın boyutuna göre başka noktalarda arıza sinyallerinin olup olmadığına bakılmıştır. RSH yan bant harmoniklerine yine bu arızada da bakılmıştır. Şekil 5.3c'de görüldüğü üzere arıza harmonikleri 612 Hz yan bandında varken, 712 Hz frekansının yan bandında görülmemiştir.



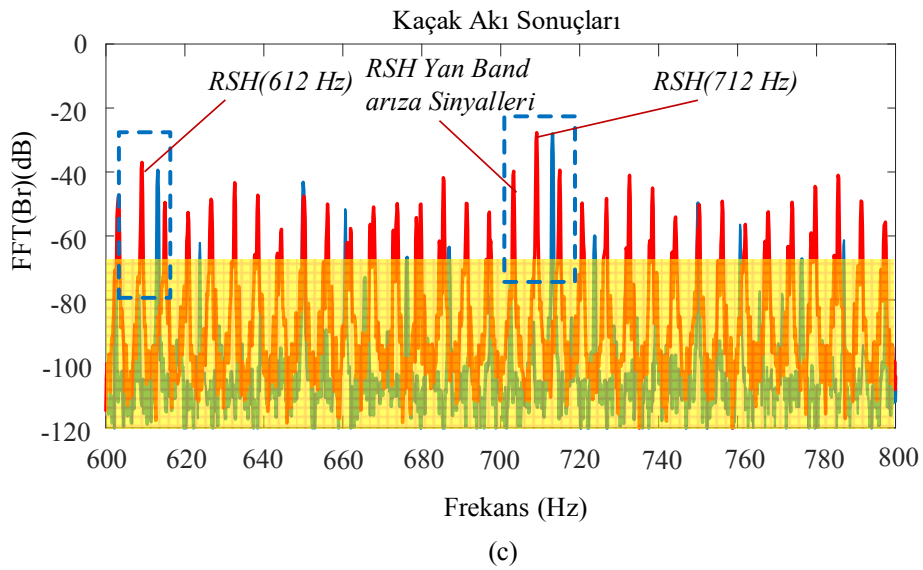
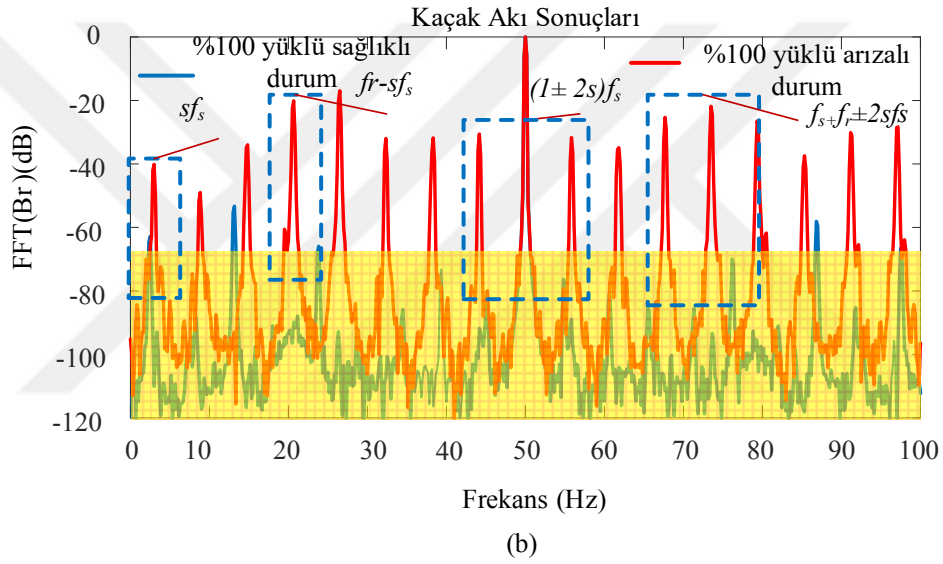
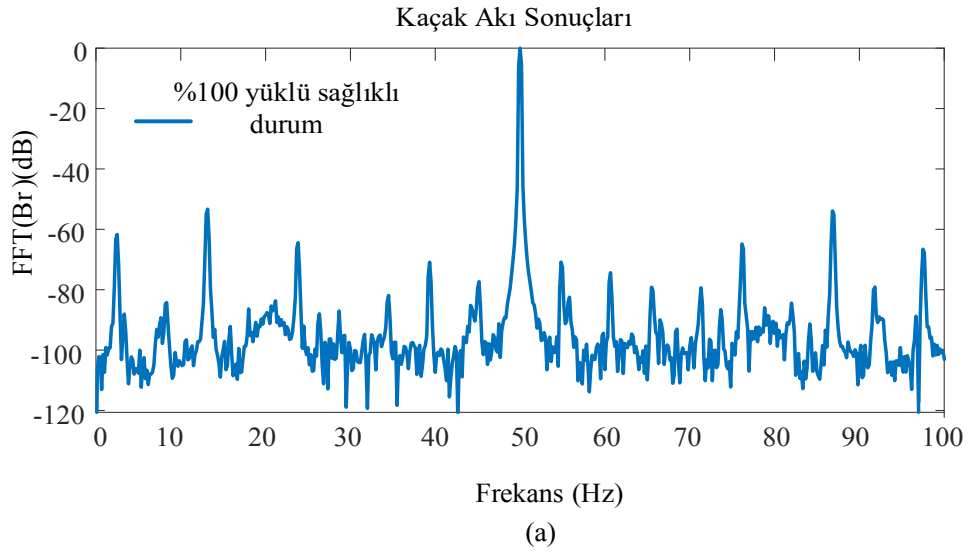
Şekil 5.3: Tam yükte bitişik iki kırık rotor çubuğu arızası akım sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.2.2 Sensör konumu $\alpha=0^0$ olan kaçak akı sonuçları

Bu bölümde $\alpha=0^0$ konumundaki sensörden alınan sonuçlar incelenmiştir. Sensör konumları belirlenirken motor üzerinde açısız konumlar seçilmiştir. Şekillerde sadece %100 yük altındaki durumların grafikleri verilmiştir. Diğer k yükler için elde edilen arıza sinyalleri çizelge halinde sunulmuştur.

Şekil 5.4'de $\alpha=0^0$ konumunda bulunan fluxgate sensöründen alınan kaçak akı bilgileri verilmiştir. Kaçak akı incelemesinde Şekil 5.4a'da bulunan sağlıklı durum ve Şekil 5.4b'de bulunan arızalı durum karşılaştırılması sonucunda arıza sinyallerinin net olarak ortaya çıkmaktadır. Akım ve kaçak akı karşılaştırıldığında bir kırık çubuk arızasında görülen arıza sinyalleri iki bitişik kırık çubuk arızası durumunda da görülmüştür. Akımda belirgin olarak arıza sinyalleri $f_s \pm 2ksf_s$ ve 612 Hz RSH yan bandında görülürken, akıda ise $f_s \pm 2ksf_s$, sf_s , $f_r - sf_s$, $f_s + f_r \pm 2sf_s$, 612 Hz ve 712 Hz RSH yan bandlarında oldukça net bir şekilde görülmüştür.

Sonuç olarak elde edilen bulgulardan yola çıkılırsa arıza incelemesinde $\alpha=0^0$ konumuna yerleştirilen sensörlerden elde edilen bilgilerde kaçak akıya bakılarak varılan sonuçlar daha net ve güvenilirdir. Stator akım incelmesinin ise arıza tespiti için bazı noktalarda yetersiz kaldığı fark edilmiştir.



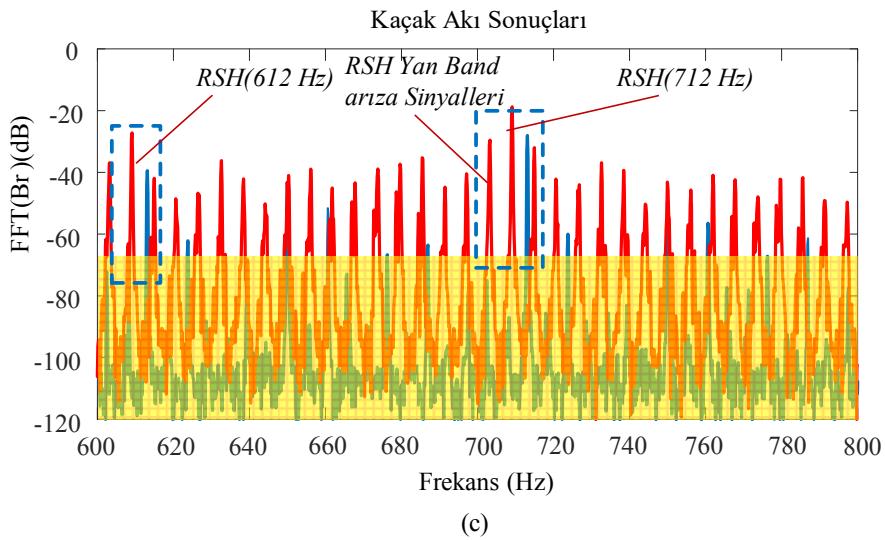
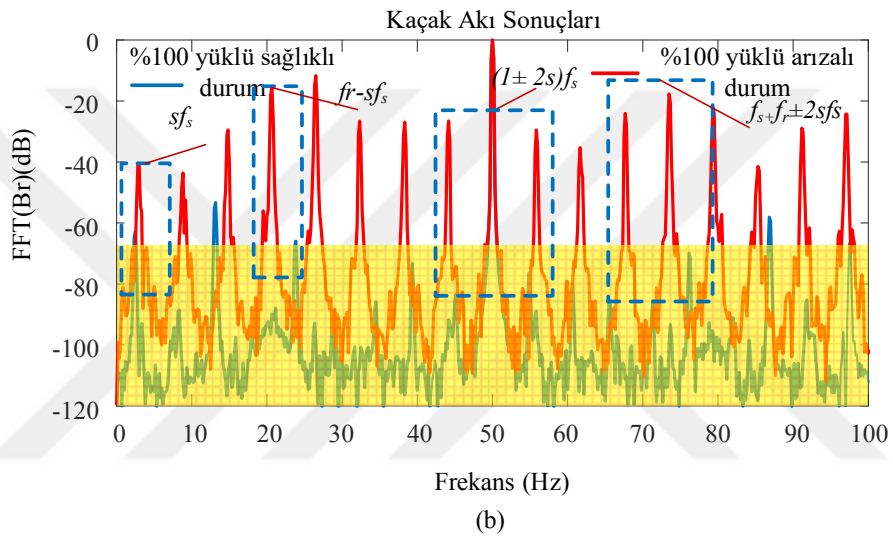
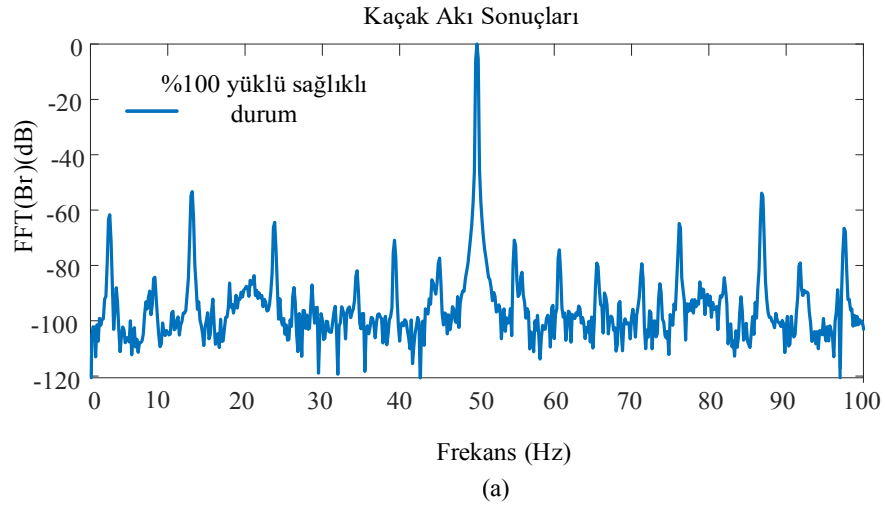
Şekil 5.4: Tam yükte bitişik iki kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=0^0$ için kaçak akı sonuçları

a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.2.3 Sensör konumu $\alpha=45^0$ olan kaçak akı sonuçları

Bu bölümde $\alpha=45^0$ konumundaki sensörden alınan bilgilerin sonuçları incelenmiştir. Bu konumdaki sensörden %100 yüklü motor için grafikler elde edilmiştir ve sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Kaçak akı ve akım karşılaştırılması yapılarak arıza sinyallerin durumuna vurgu yapılmıştır. Diğer yükler için elde edilen arıza sinyalleri çizelge halinde sunulmuştur.

Şekil 5.5’de verilen üç ayrı grafik $\alpha=45^0$ açılı konumunda bulunan fluxgate sensöründen alınan bilgilerin *Matlab* programında *FFT* alınmasıyla elde edilmiştir. Temel olarak bakıldığında arıza sinyallerinin etkin bir şekilde belirgin olma durumu kaçak akıda akıma göre daha fazla netlik kazanmıştır. Aynı şekilde farklı yükler altında bu durum kanıtlanabilir şekilde tespit edilmiştir. Farklı yükler altında bulunan sinyallerin varlığı çizelge halinde gösterilmiştir. Arıza tespit yöntemlerine farklı açıdan bakılması söz konusu olunca kaçak akı incelemesinin göz önüne alınması gerektiği vurgulanmıştır. Fluxgate sensörünün $\alpha=45^0$ konumunda kaçak akıyı bakılması, daha önce bakılan $\alpha=0^0$ konumunda bulunan sensörden alınan bilgilerden farklılık gözlenmiştir. Bu duruma göre sinyaller aynı şekilde varlığı söz konusu olmasına karşın nümerik olarak tepe noktalarında farklılık gözlenmiştir. Örneğin f_r-sf_s sinyalinde elde edilen tepe değeri $\alpha=0^0$ için -20.12 ifade ederken $\alpha=45^0$ için bu değer -15.62 olarak güncellenmiştir. Bu konumda yapılan ölçümlerden alınan sonuçlarda da $f_s \pm 2ksf_s$, sf_s , f_r-sf_s , $f_s+f_r \pm 2sf_s$, ve RSH yan bant sinyallerinde arıza sinyallerinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.



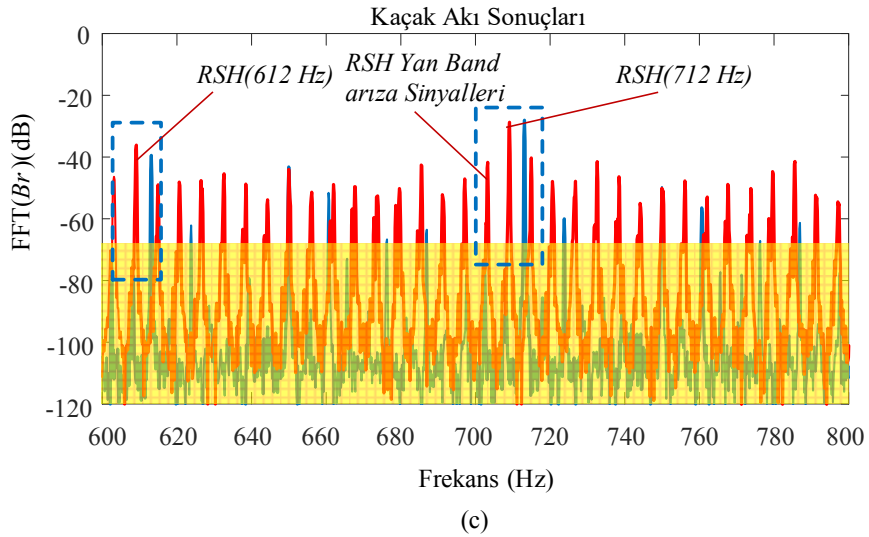
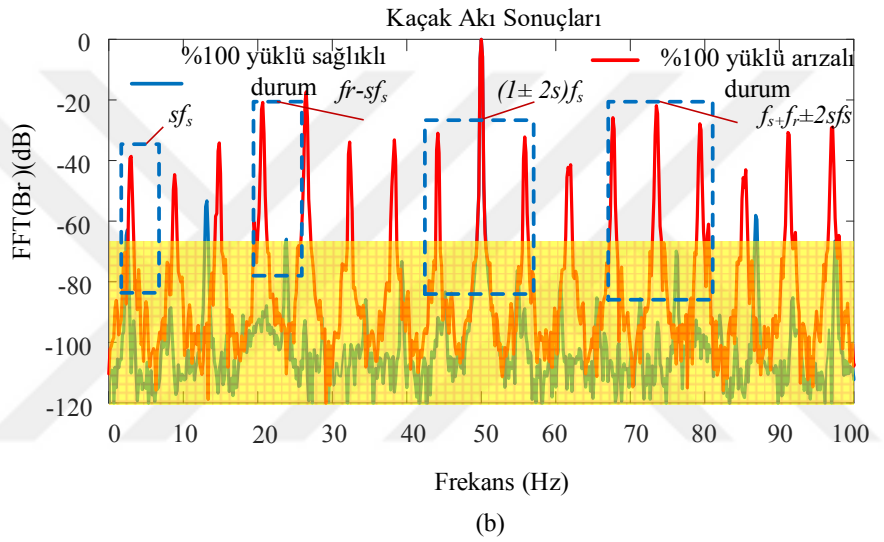
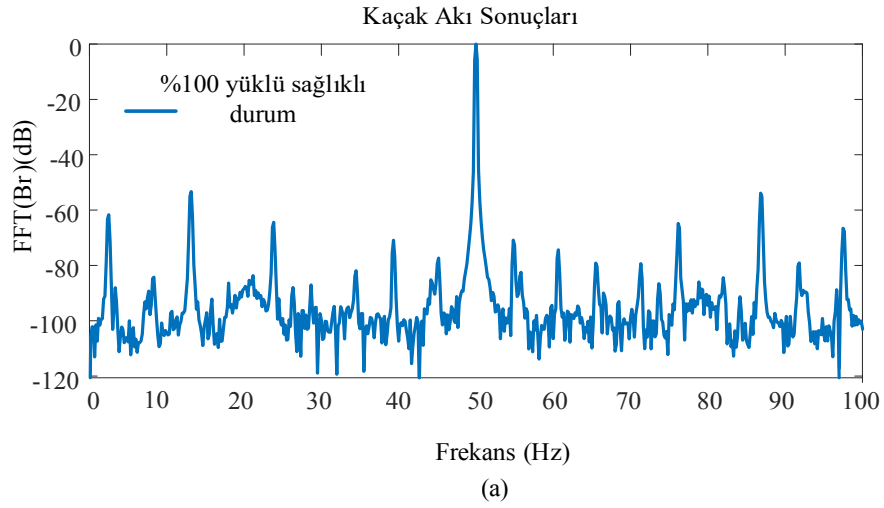
Şekil 5.5: Tam yükte bitişik iki kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=45^\circ$ için kaçak akı sonuçları

a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.2.4 Sensör konumu $\alpha=90^0$ olan kaçak akı sonuçları

Sensör konumlarına bakılarak yapılan değerlendirmeler için bu bölümde motor çerçevesine $\alpha=90^0$ konumuna yerleştirilen sensörden alınan sonuçlara bakılmıştır. Fluxgate sensöründen alınan bilgiler grafiklerle değerlendirilmiştir. Stator akımından elde edilen bilgilerden farklılıklar olup olmadığına bakılmış ve bu noktadan alınan verilerle değerlendirme yapılmıştır. Farklı konumlarda bulunan sensörlerden elde edilen sonuçlar arıza sinyalleri tespit edebilme amacıyla incelenmiştir. Daha önceki bölümlerde de olduğu gibi stator akımlarının grafikleri ile kaçak akı grafiklerinin sağlıklı ve arızalı durumları karşılaştırılmıştır.

Şekil 5. 6a'da motorun sağlıklı durumu için kaçak akı değişimi verilmiştir. Şekil 5.6b'de 2 bitişik rotor çubuğu kırıldığında meydana gelen arıza sinyalleri görülmektedir. Ayrıntılı bakıldığında yan bant arıza sinyalleri olan $f_s \pm 2ksf_s$ ve sf_s , $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r \pm 2sf_s$, RSH yan bant sinyalleri bu konumda da görülmüştür. Elde edilen veriler $\alpha=0^0$ ve $\alpha=45^0$ konumunda bulunan sensörlerden alınan veriler ile aynı arıza sinyalleri sonuçlarının varlığı gözlemlenmiştir.



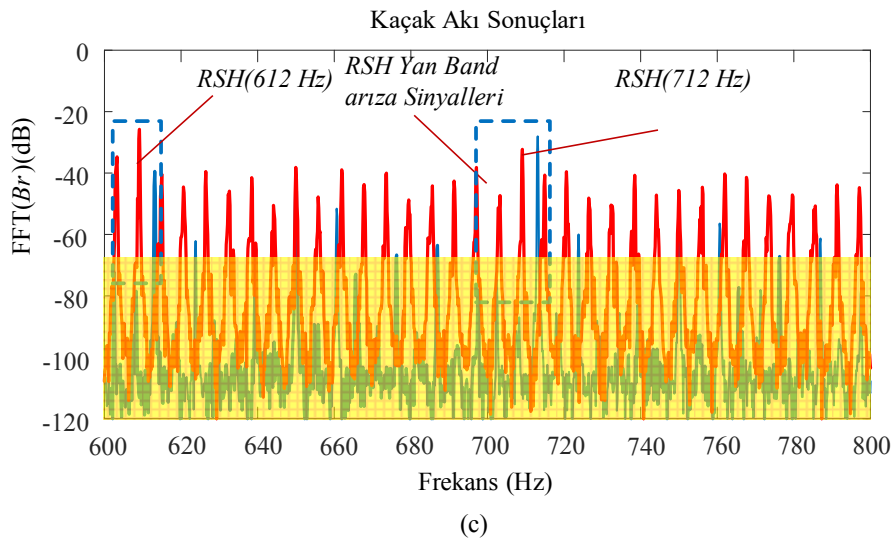
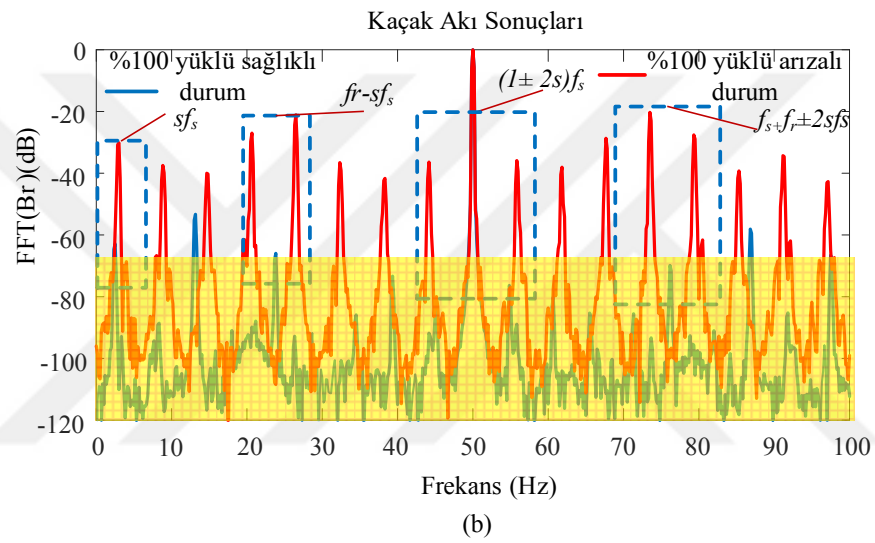
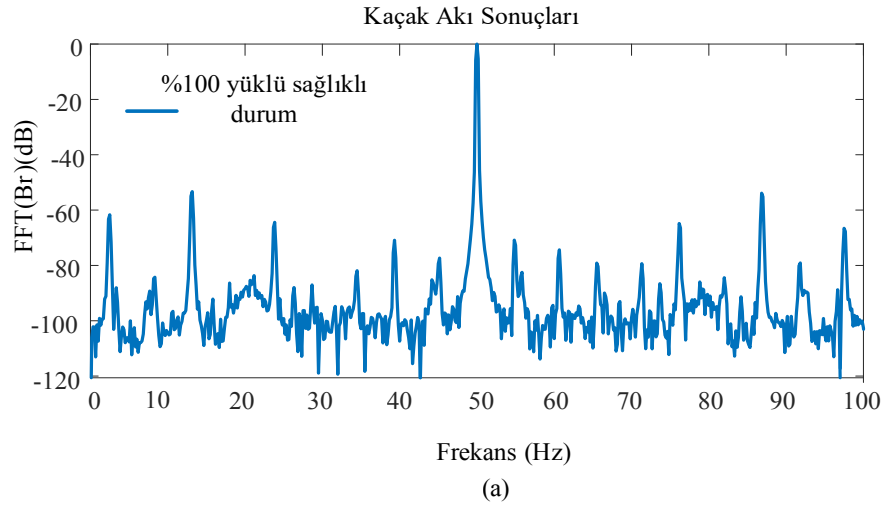
Şekil 5.6: Tam yükte bitişik iki kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=90^\circ$ için kaçak akı sonuçları

a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.2.5 Sensör konumu $\alpha=180^0$ olan kaçak akı sonuçları

Bu bölümde farklı konumlara yerleştirilen $\alpha=180^0$ 'de bulunan sensörün sağlıklı ve arızalı motorda meydana gelen değişimlerine bakılmıştır. Şekil 5.7'de asenkron motorda iki bitişik kırık rotor çubuğunun kırılması sonucunda sinyallerde meydana gelen değişimlere bakılmıştır.

Şekil 5.7 verilen grafikler ayrıntılı olarak ele alındığında sensör farklı konumlarda olması durumunda dahi arıza sinyallerinin var olduğunu göstermektedir. Şekil 5.7a'da sağlıklı durumdaki motorun kaçak akı sinyal sonuçları verilmiştir. Şekil 5.7b'de arıza olması halinde kaçak akıda, meydana gelen arıza sinyallerinin varlığı görülmektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere $f_s \pm 2ksf_s$ ve sf_s , $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r \pm 2sf_s$, RSH yan bant sinyalleri mevcuttur. $\alpha=180^0$ konumuna yerleştirilen sensörden alınan bilgilerin diğer konumlarda bulunan sensörlerde elde edilen sonuçlar ile genel olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir. $\alpha=0^0$ konumda alınan $f_r - sf_s$ sinyalinin değeri -20.12 iken, bu konumda alınan sonuç -27.02 değerine düşmüştür. Sayısal olarak küçük düşmeler veya yükselmeler görülmüş olsa da, arıza sinyallerinin varlığı aynı şekilde devam etmiştir. Stator akımında bu durumun bulunmaması ve kaçak akıda görülmesi, arıza tespit yöntemlerinden kaçak akı incelemesinin önemli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.7: Tam yükte bitişik iki kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=180^\circ$ için kaçak akı sonuçları a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere incelemesi yapılan %75, %50 ve %25 yüklü motorun stator akımı ve kaçak akı sonuçlarında elde edilen sinyaller verilmiştir. Çizelge de görüldüğü üzere %100 yüklü motor sonucunda görülen arıza sinyalleri bu yüklerde alınan sonuçlarda da görülmüştür.

Çizelge 5. 2 : Bitişik iki kırık rotor çubuk arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi

Yük	Kaçak Akı						Akım
	sf_s	f_r-sf_s	$f_s\pm 2ksf_s$	$f_s\pm f_r\pm 2sf_s$	$(13-14s\pm 2s)f_s$	$(15-14s\pm 2s)f_s$	$f_s\pm 2ksf_s$
%100	-40.14	-20.12	-30.55/- 31.69	-25.31/- 26.47	-36.98	-27.69	-34.26/-32.59
%75	-42.59	-21.03	-35.41/- 34.64	-34.28/- 33.96	-28.39	-27.29	-35.17/-34.12
%50	-43.72	-23.46	-41.34/- 46.21	-32.09/- 30.7	-30.45	-35.22	-43.26/-43.25
%25	-50.34	-28.64	-52.01/- 50.28	-39.97/- 36.77	-69.93	-75.19	-48.02/-47.63

5.3 Yarım Kutup Aralığında Kırılmış Rotor Çubuk Arızasının Analizi

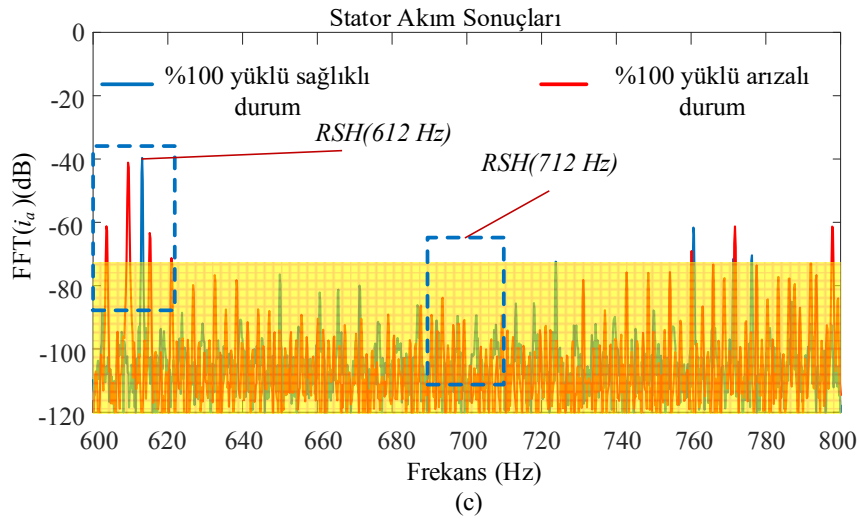
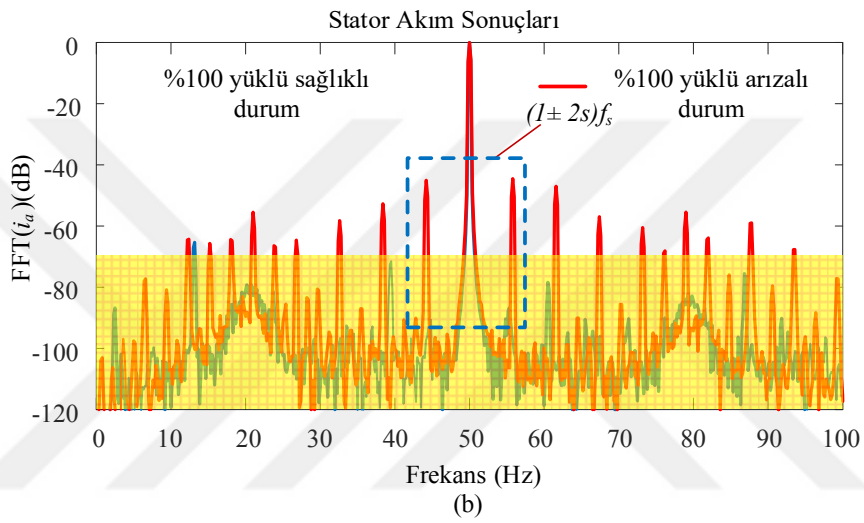
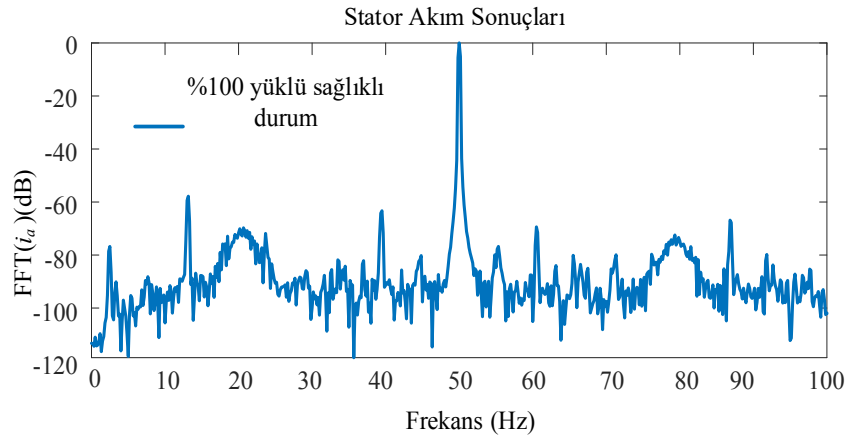
Rotor çubuklarının farklı noktalarda kırılması durumunda stator akımında bulunan arıza sinyallerinin genliklerinde değişikliklere neden olduğu daha önce yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Bu amaçla literatürde stator akımı üzerine yapılan incelemeler doğrultusunda rotor çubuklarının kutup aralığında kırılması durumunda akı arıza sinyallerindeki farklılıklara bakılmıştır. Özellikle kutup aralıklarına denk gelen rotor çubuklarının kırılmasında sinyallerde olabilecek değişimler incelenmiştir. Bu amaçla yarım kutup (half pole pitch) ve tam kutup (full pole pitch) aralığında bulunan rotor çubuklarının kırılması simüle edilmiştir. Arıza sonucunda sinyallere bakılarak bir farklılık olması veya yeni bir arıza sinyalinin varlığının tespiti için çalışma yapılmıştır. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda stator akımında bazı yan band harmoniklere ve yüksek frekanslı harmoniklere bakılmıştır. Bu amaçla farklı konumlarda kırılan rotor çubuk arızası durumunda kaçak akıdaki değişimler detaylı olarak incelenmiştir.

Yarım kutup aralığı kırık rotor çubuk arızası önceki bölümlerde hesaplanan ve 1-3 olarak numaralandırılan rotor çubuklarının kırılması sonucu oluşturulmuştur. Farklı yükler altında ve farklı konumlardaki fluxgate akı sensörlerinden alınan kaçak akı bilgilerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Asenkron motorun $\alpha=0^0$, $\alpha=45^0$, $\alpha=90^0$ ve $\alpha=180^0$ açıda bulunan sensörlerden alınan sonuçlara bakılmıştır. %100, %75, %50 ve %25 yüklerinde

ayrıca farklılık olup olmamasına ilişkin değerlendirilme yapılmıştır. Farklı noktalarda konumlanan sensörlerden alınan kaçak akı sonuçları alt başlıklar halinde sunulmuştur. Bu alanda tüm sensörlerden alınan kaçak akı sonuçlarının farklı yüklerdeki sonuçları çizelge halinde sunulmuştur. Stator akımından alınan bilgilerde grafikler halinde ele alınmıştır.

5.3.1 Stator akım sonuçları

Şekil 5.8'de bulunan grafiklerde stator akımının yarım kutup aralığında iki rotor çubuğunun kırılması sonucuna bakılmıştır. Arıza meydana geldiğinde akım sinyallerinde sağlıklı durum dışında arıza sinyalleri olup olmadığına ve bakılan arıza sinyallerinde değişim olup olmadığına bakılmıştır. İncelemeler göstermiştir ki yarım kutup aralığında oluşan arızanın stator akımında temel frekansın ve RHS yan bantlarında arıza sinyalleri oluşmuştur. Stator akımının sonuçlarında Şekil 5.8b'de $f_s \pm 2k f_s$ sinyalleri ve Şekil 5.8c'de RSH yan bandında arıza sinyallerinin bulunduğu belirgin olarak görülmüştür.



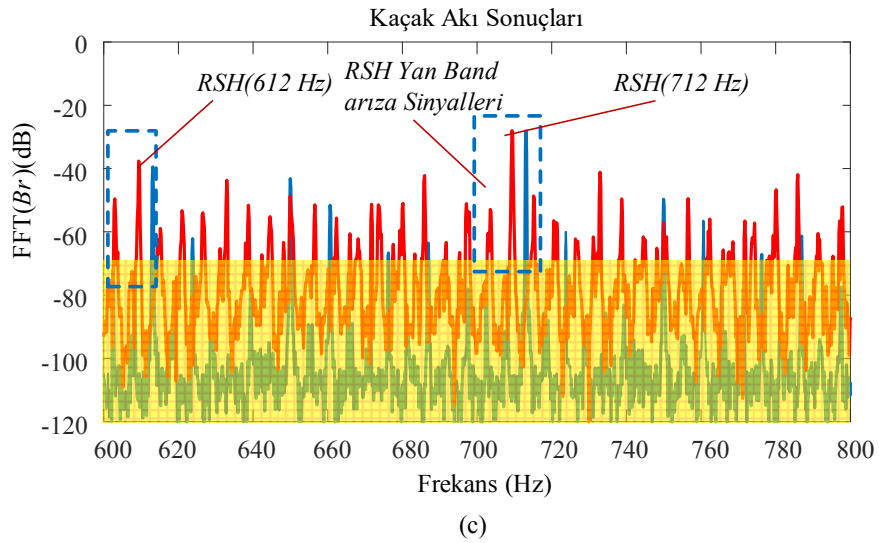
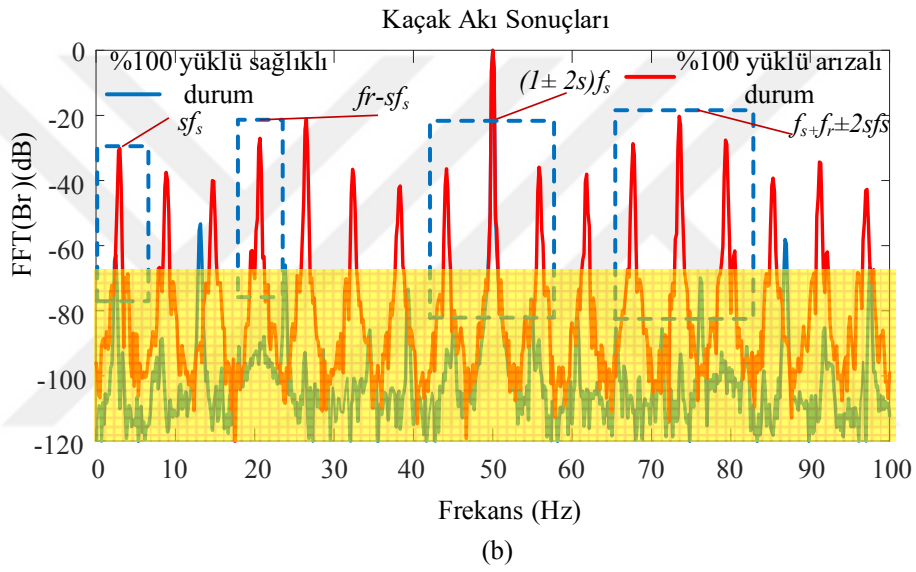
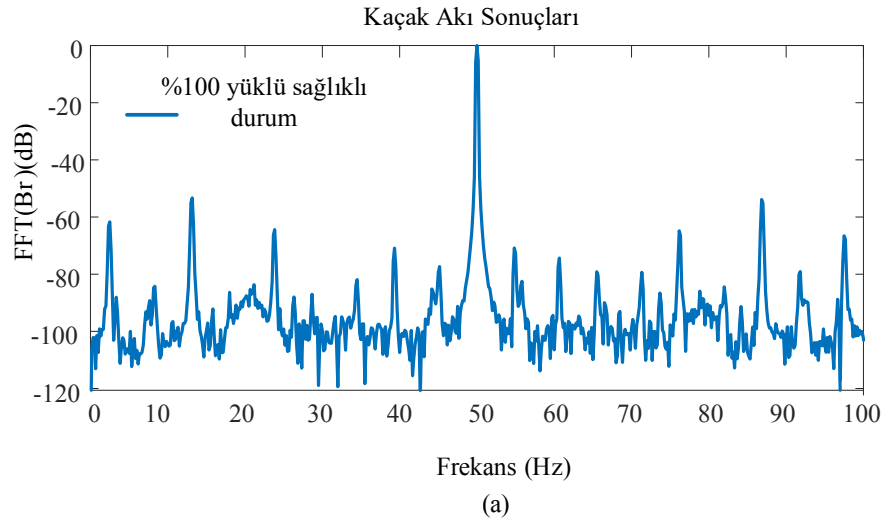
Şekil 5.8: Tam yükte yarım kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının akım sonuçları
a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.3.2 Sensör konumu $\alpha=0^0$ olan kaçak akı sonuçları

Bu bölümde tam yük altında motor kaçak akı sonuçları değerlendirilmiştir. Kırık rotor çubuğu arızasının asenkron motorlarda meydana gelmesi motorların çalışma düzenine zarar vermektedir. Bu bağlamda kaçak akı incelemesi yaptığımız bu çalışmada kırık rotor çubuğu arızasının yarım kutup aralığı içerisinde bulunan bölgede meydana geldiğinde hangi arıza sinyalleri oluşturacağı incelenmiştir.

Şekil 5.9a'ya bakıldığında asenkron motorun tam yük altında sağlıklı durumda çalışırken herhangi bir bozulma meydana gelmediği görülmüştür. Arıza meydana geldikten sonraki değişimler Şekil 5.9b'de görülmektedir. Stator akım grafiklerinde arıza sinyalleri sadece yan bant sinyallerinde görülürken kaçak akıda daha farklı sinyallerin varlığı söz konusudur. Arıza sinyalleri olarak görülen $f_s \pm 2ksf_s$ ve sf_s , $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r \pm 2sf_s$, RSH yan bant sinyalleri yarım kutup aralığında kırılan rotor çubuk arızası durumunda da belirgindir.

Stator akımına bakıldığında, yarım kutup aralığında kırılan rotor çubuğu arızasının sonuç grafiklerinde sinyal genliklerinde düşme meydana gelmiştir. Bu durum arıza tespitini etkilemektedir. Bu bağlamda hem farklı konumlardan alınan sensör bilgileri hem de yarım kutup aralığında meydana gelebilecek arızasının sonuçlarına kaçak akıda bakmak gerektiği önemli hale gelmiştir. Şekil 5.9'da kaçak akı incelemesi sonucunda sf_s ve $f_s + f_r - 2sf_s$ sinyallerinin baskın olarak görülmüştür. Tespit edilen sinyallerin varlığı yine bu konum içinde söz konusu olmuştur. Böylece akımdan daha iyi sonuçların kaçak akıda alındığı görülmüştür.

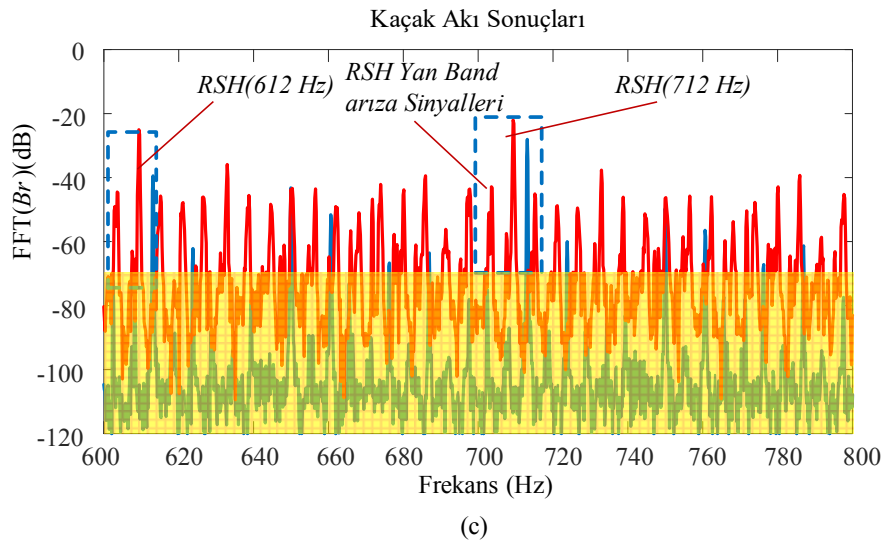
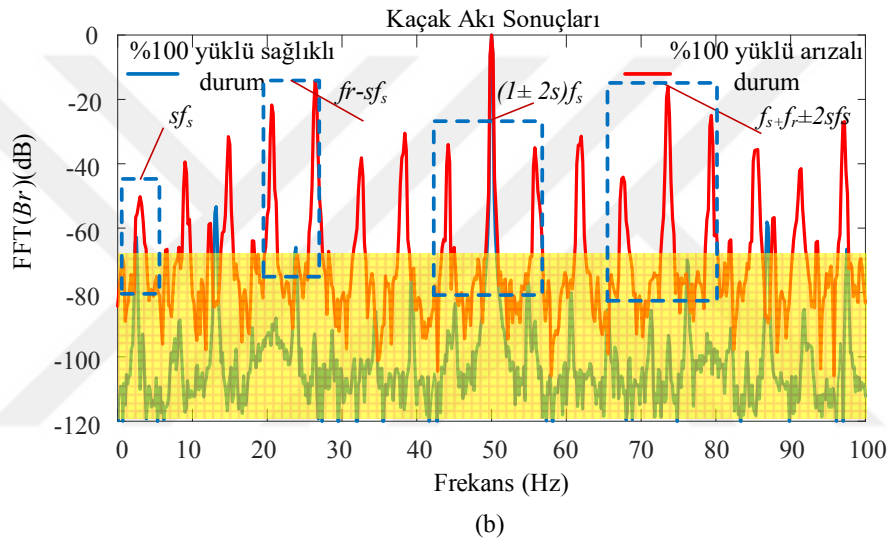
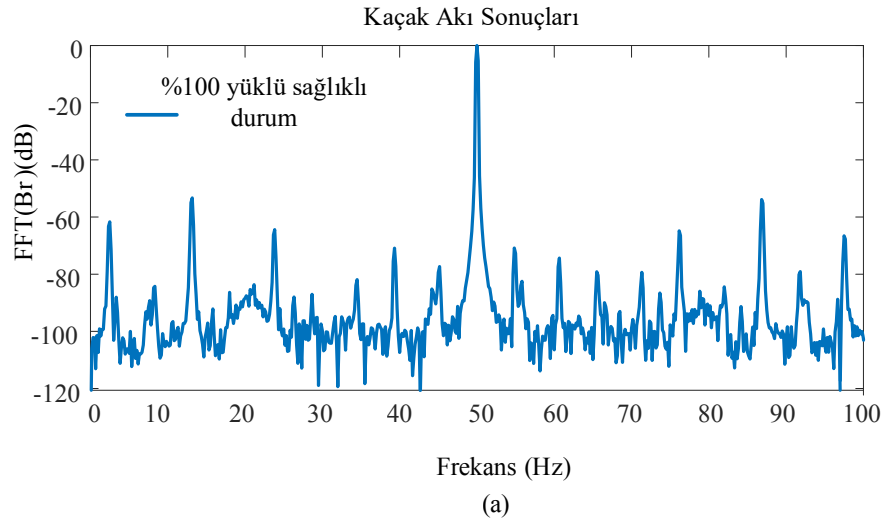


Şekil 5.9: Tam yükte yarım kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=0^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.3.3 Sensör konumu $\alpha=45^0$ olan kaçak akı sonuçları

Yarım kutup aralığında oluşan kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=45^0$ konumunda bulunan sensörden alınan verilerin arıza durumunda ki değişimine bakılmıştır. Farklı konumlara yerleştirilen sensörlerden alınan bilgiler doğrultusunda motorun sağlıklı ve arızalı durumlarının karşılaştırması Şekil 5.10'da yapılmıştır. Şekil 5.10a'da sağlık durum Şekil 5.10b'de arızalı durum sonuçları verilmiştir.

Yarım kutup aralığında meydana gelen arıza durumunda sensör farklı noktalarda da olsa alınan arıza sinyallerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir. sf_s sinyalinin $\alpha=0^0$ konumunda nümerik sonucu -44,53 dB olurken, $\alpha=45^0$ de bulunan sinyalden alınan değeri -50.22 dB'ye düşmektedir. $f_s+f_r+2sf_s$ sinyalinde ise $\alpha=0^0$ konumunda alınan sonuçta değer - 21,91 dB olurken bu değer $\alpha=45^0$ de bulunan sensörden alınan değer -24,98 dB olmuştur. Bu durumda sinyal değerlerinde farklılıklar görülmüştür. Fakat arıza sinyallerinin varlığı devam etmiştir.

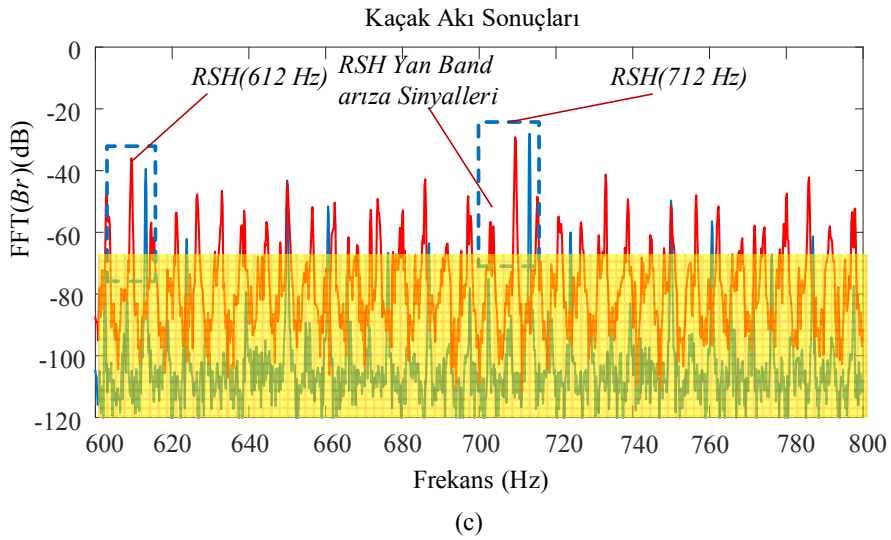
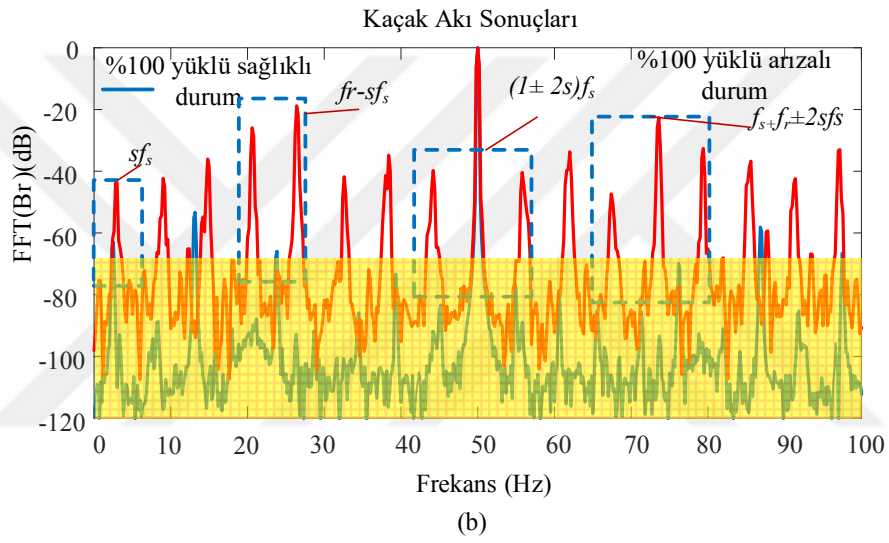
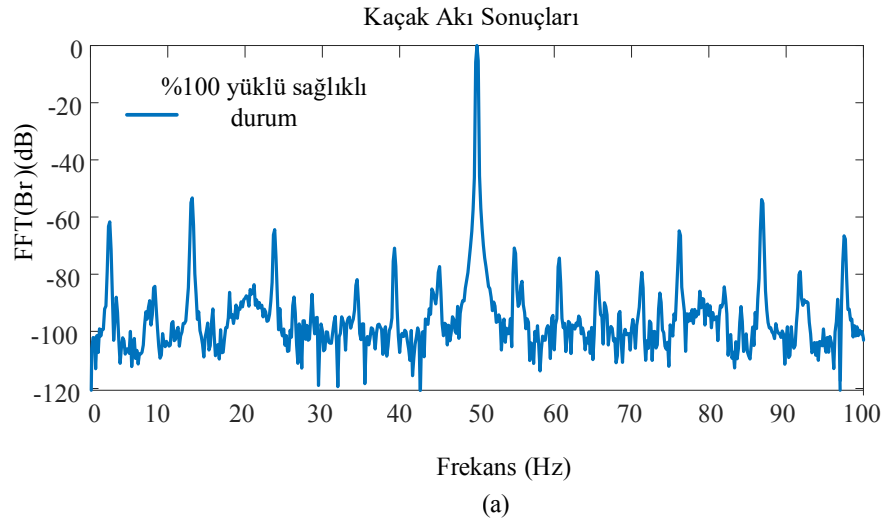


Şekil 5.10: Tam yükte yarım kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=45^\circ$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.3.4 Sensör konumu $\alpha=90^0$ olan kaçak akı sonuçları

Farklı konumlarda bulunan sensörlerden alınan bilgilerin karşılaştırılma işlemine $\alpha=90^0$ açısında bulunan sensörden alınan bilgiler incelenerek devam edilmiştir. Kaçak akı sonuçlarında kırık rotor çubuğu arızası olduğunda sinyallerin değişimine bakılmıştır.

Şekil 5. 11'de $\alpha=90^0$ konumunda bulunan fluxgate sensöründen alınan bilgilerden elde edilen kaçak akı sinyalleri verilmiştir. Arıza durumunda harmoniklerde oluşan değişimlerin ayrıntılarına bakılmıştır. $\alpha=90^0$ açısal konumunda bulunan fluxgate sensöründen alınan bilgiler $\alpha=0^0$ ve $\alpha=45^0$ sensörlerden alınan bilgiler RSH yan band harmonikleri için karşılaştırılmıştır. Nümerik sonuçlarına bakıldığında farklı açılara yerleştirilmiş olması arıza sinyallerinin görüleceğini tekrar ortaya koymuştur. RSH yan bandlarında $\alpha=0^0$ 'da bulunan sensörden alınan bilgilerde nümerik sonuçlarda; 612 Hz yan bandında ki sinyalin değeri -55.3 olurken bu değer $\alpha=45^0$ 'de alınan sonuç da bu değer -47.4 olmuştur. Bu değer $\alpha=90^0$ 'da -46.3 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre sensör farklı konumlarda olsa da arıza sinyalleri görülmüştür.



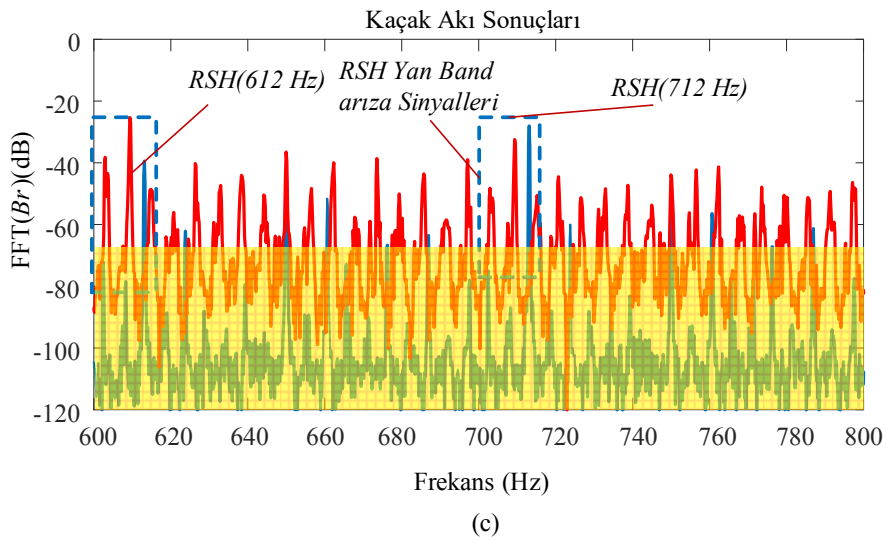
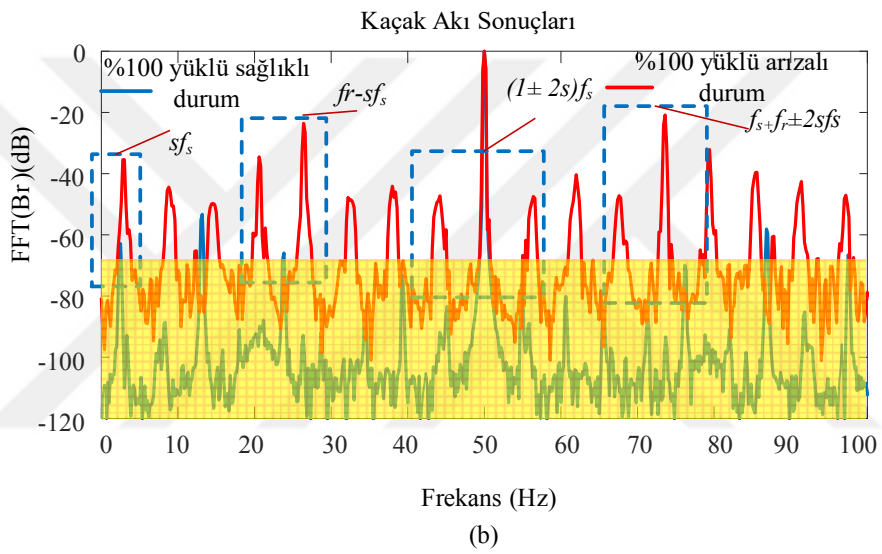
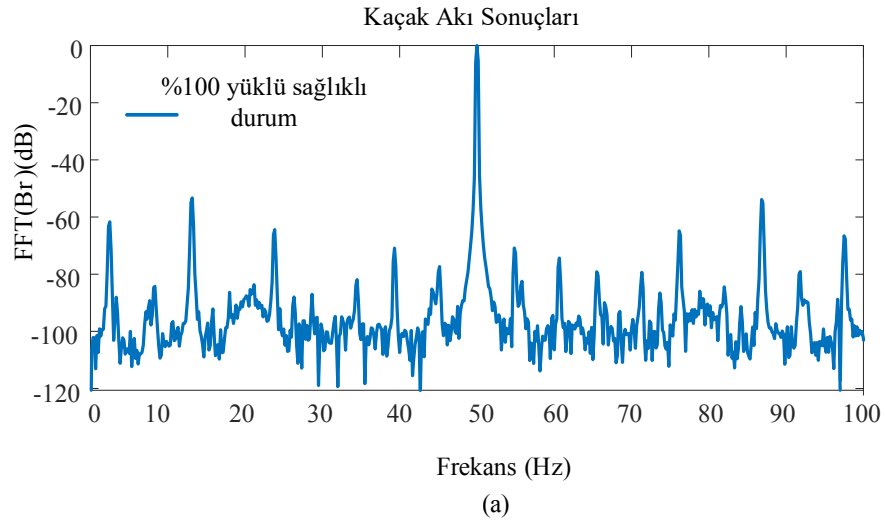
Şekil 5.11: Tam yükte yarım kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=90^\circ$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durum b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.3.5 Sensör konumu $\alpha=180^0$ olan kaçak akı sonuçları

Bu bölümde $\alpha=180^0$ açısına yerleştirilen fluxgate sensöründen alınan kaçak akı bilgilerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Çizelge 5.3'te ise farklı yük altında bulunan motordan alınan akım ve kaçak akı sinyallerine yer verilmiştir. Sonuçlar incelenecek olursa kaçak akıdan alınan değerlerin stator akımından alınan verilerden daha net, farklı ve etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Arıza tespit yöntemlerinde kaçak akı incelemesinin önemi net bir şekilde ortaya konmuştur.

Çizelge 5. 3 Yarım kutup aralığındaki iki kırık rotor çubuk arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi

Yük	Kaçak Akı						Akım
	sf_s	f_r-sf_s	f_s+2ksf_s	$f_s+f_r\pm 2sf_s$	$(13-14s\pm 2s)f_s$	$(15-14s\pm 2s)f_s$	$f_s\pm 2ksf_s$
%100	-44.53	-25.13	-39.21/- 39.69	-47.39/- 30.89	-37.62	-28	-45.03/- 44.49
%75	-45.93	-26.32	-43.1/- 42.25	-25.23/- 43.5	-54.3	-51.46	-47.31/- 4625
%50	-46.93	-28.37	-42.84/- 46.67	-39.29/- 35.3	-54.6	-48.47	-55.68/- -52.8
%25	-62.81	-33.62	-59.65/- 69.79	-47.09/- 41.5	-70.68	-74.40	-68.17/- 6957



Şekil 5.12: Tam yükte yarım kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=180^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.4 Tam Kutup Aralığında Kırılmış Rotor Çubuğu Arızasının Analizi

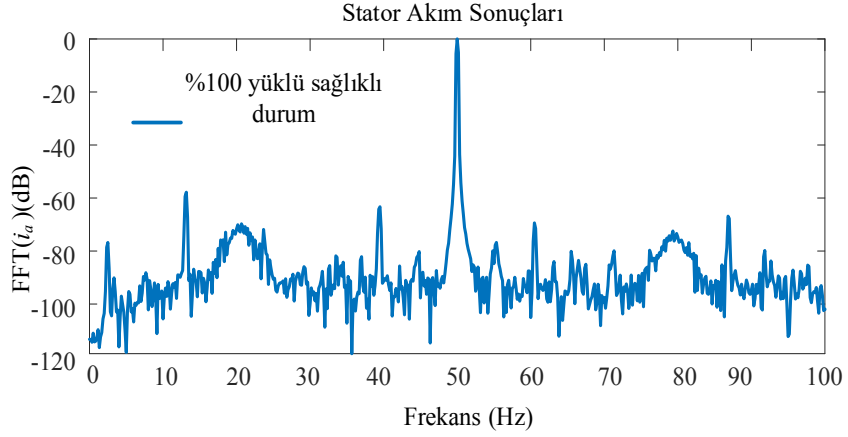
Kırık rotor çubuğu arızasının gerçek hayatta motor üzerinde herhangi bir bölgede meydana geldiğinde oluşabilecek aksaklıkları önceden fark etmek için benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Asenkron motorlarında kırık rotor çubuğu arızasının meydana gelmeden önce veya sonrasında bu arızanın fark edilmesi önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda asenkron motorlarda rotor çubuklarının farklı konumlarda kırılması ile alınan harmoniklerin arıza sinyalleri olup olmadığı karıştırmamak için tam kutup aralığına bakılmıştır. Tam kutup aralığında bulunan noktalarda kırılması sonucu oluşan arızanın boyutuna ve bunun erken fark edilmesine olanak sağlamak için bu çalışma yapılmıştır.

Bu bölümde ANSYS@Maxwell programında benzetim çalışmaları yapılan tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızası meydana geldiğinde kaçak akı ve akımda oluşan değişimler incelenmiştir. Tam kutup aralığı (full pole pitch) bulunan rotor çubuğu arızası için daha önce 1-7 olarak numaralandırılmış iki rotor çubuğu kırılmıştır. Arıza meydana getirildikten sonra motorun sağlıklı ve arızalı durumları karşılaştırılmıştır. Sonuçları daha güvenilir ve doğru olması için farklı yükler altında aynı durumların analizi yapılmıştır. Arıza sinyallerinin incelenmesinde akım ve kaçak akının sonuçlarına göre hangisinin net sonuçlar vermiş olduğuna bakılmıştır. Analiz işlemleri yapılması için benzetim çalışması yapılan motor çerçevesine hava aralığında bulunan kaçak akı sinyallerine bakmak için fluxgate sensörleri yerleştirilmiştir. ANSYS@Maxwell programında asenkron motor çevresine $\alpha=0^{\circ}$, $\alpha=45^{\circ}$, $\alpha=90^{\circ}$ ve $\alpha=180^{\circ}$ 'de yerleştirilen sensörlerden alınan bilgiler ayrı ayrı ele alınmıştır.

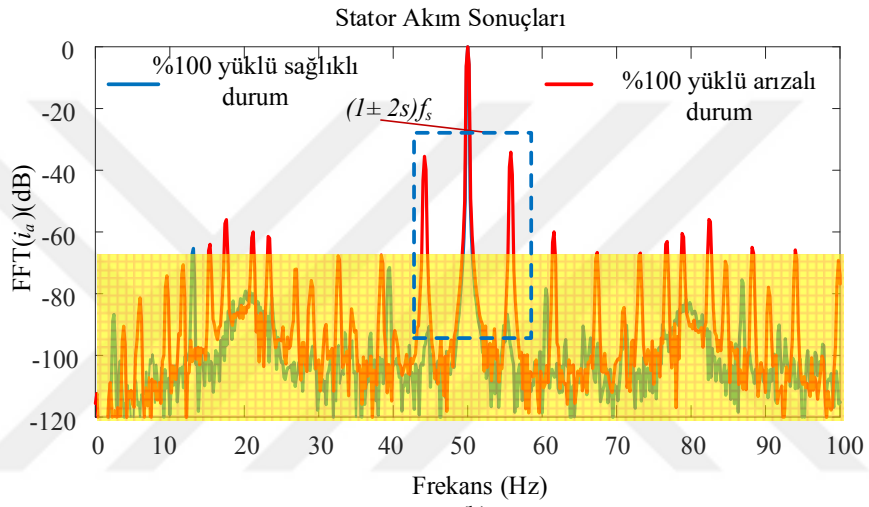
5.4.1 Stator akım sonuçları

Stator akımı ve kaçak akı incelemesi yapılırken daha önceki bölümlerin benzeri işlemler yapılmıştır. Öncelikle akım sonuçları daha sonra farklı noktalarda bulunan sensörlerden alınan kaçak akı bilgileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Arıza tespitinde farklı yükler altında yapılan incelemeler için %100 yüklü sonuçların grafikleri alınmış olup %75, %50 ve %25 yüklü durumların sonuçları çizelge halinde sunulmuştur.

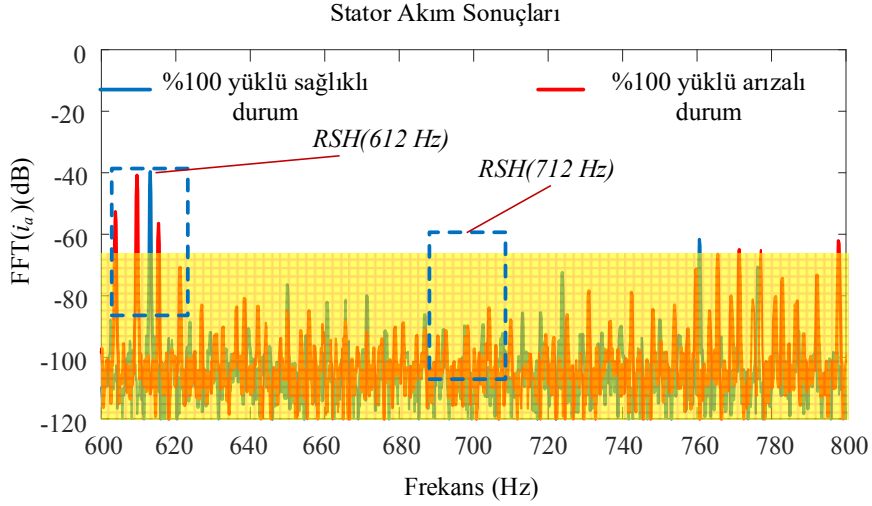
Şekil 5.13a'da stator akımından alınan grafikte motorun sağlıklı durum sonucu verilmiştir. Kırık rotor çubuğu arızası tam kutup aralığında meydana geldikten sonra herhangi bir değişim olup olmadığına bakmak için Şekil 5.13b'de arızalı ve sağlıklı durum karşılaştırılması yapılmıştır. Grafiklerden anlaşılacağı üzere temel frekansın yan bantlarında görülen $f_s \pm 2ksf_s$ arıza sinyalleri belirginleşmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.13: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının akım sonuçları

a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

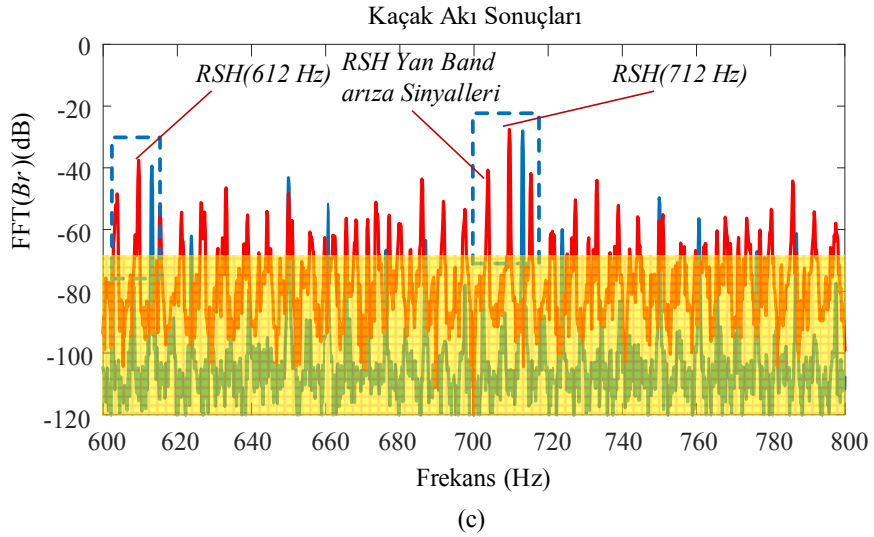
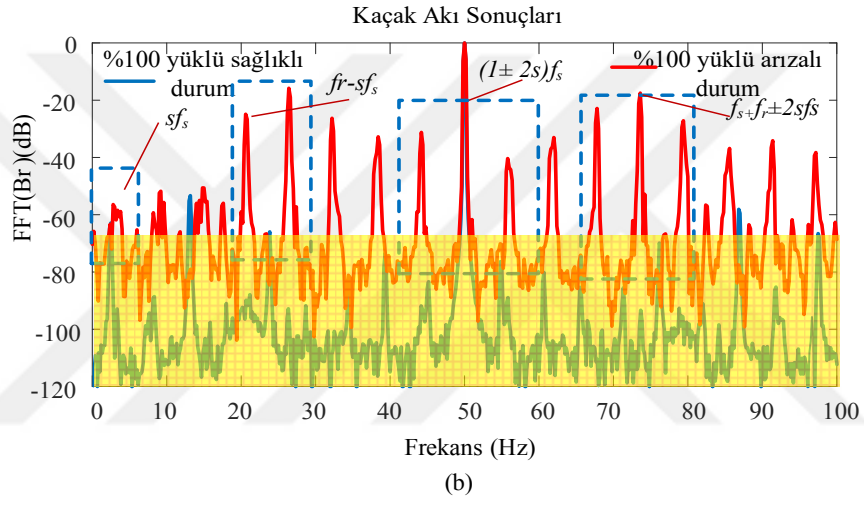
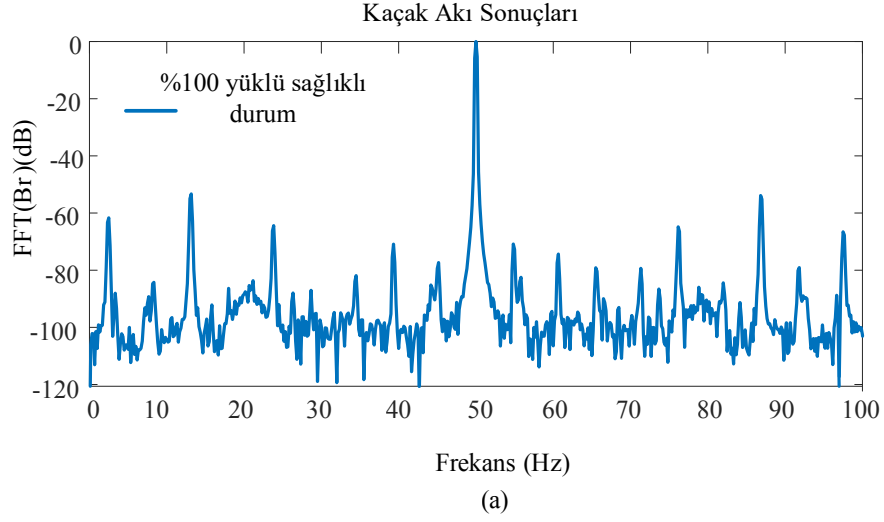
Şekil 5.13c’de RSH harmoniklerinde arıza sinyalinin varlığına bakılmıştır. Hesaplamalar neticesinde tam kutup aralığında kırılmış iki rotor çubuk arızası durumunda da 612Hz frekansının yan bandlarında bulunan sinyalin olduğu ancak 712Hz frekansın yan bandında sinyaller görülmemiştir.

5.4.2 Sensör konumu $\alpha=0^0$ olan kaçak akı sonuçları

Daha önceki bölümlerde de olduğu gibi tam kutup aralığında kırılmış iki rotor çubuğu arızası durumunda fluxgate sensörünün farklı konumlarda olmasının belirlenen arıza harmoniklerine etkisine bu bölümde de bakılmıştır.

İlk olarak $\alpha=0^0$ konumunda bulunan sensörden alınan kaçak akı sonuçları FFT alınarak incelenmiştir. Şekil 5.14a’da motorun sağlıklı çalıştırılmasından alınan bilgiler verilmiştir. Şekil 5.14b’de ise tam kutup aralığında olan arızanın ardından alınan sinyaller grafik halinde verilmiştir.

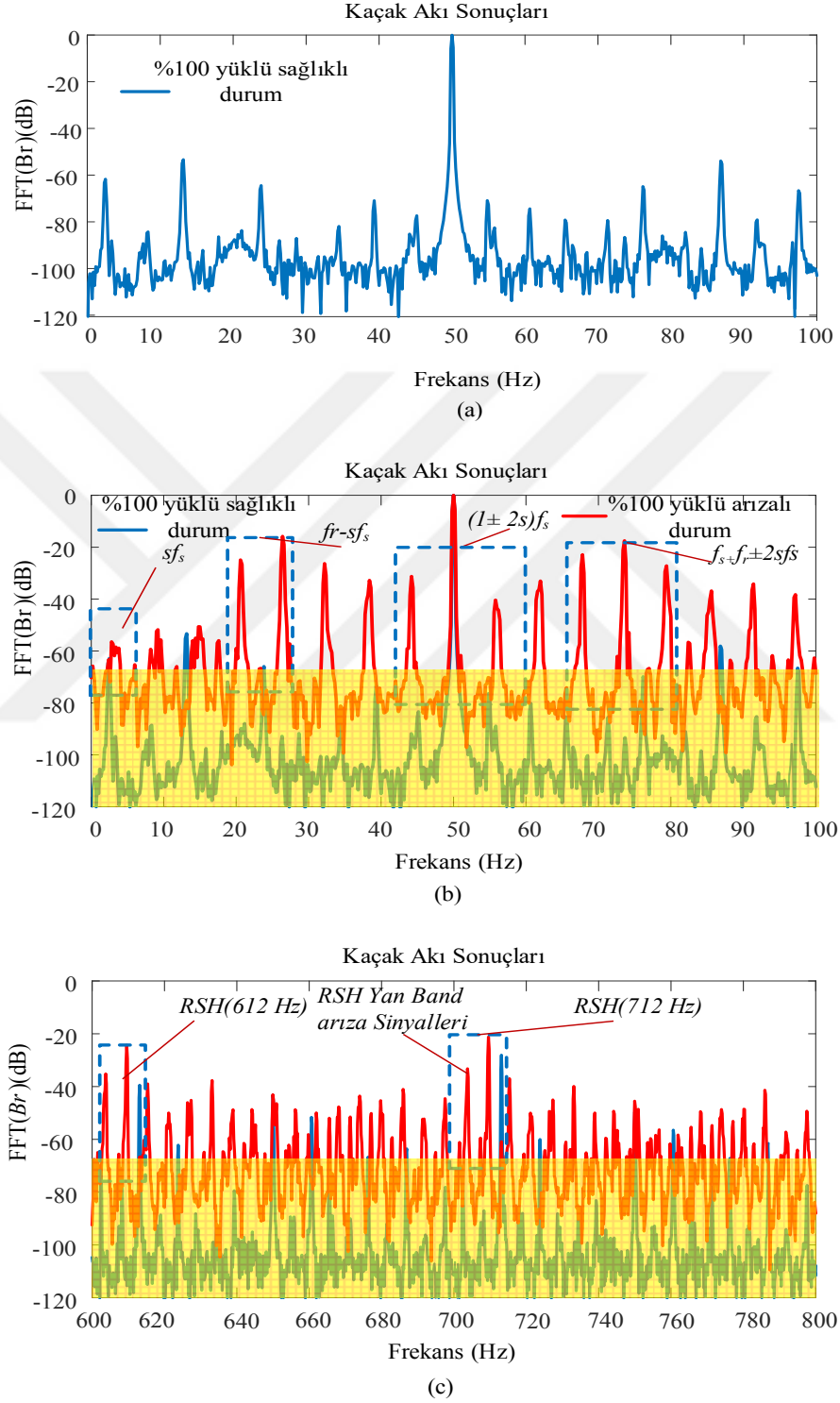
Tam kutup aralığında meydana gelen arıza da elde edilen $f_s+f_r\pm 2sf_s$ sinyalinin bir nebze daha baskın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.14: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=0^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.4.3 Sensör konumu $\alpha=45^0$ olan kaçak akı sonuçları

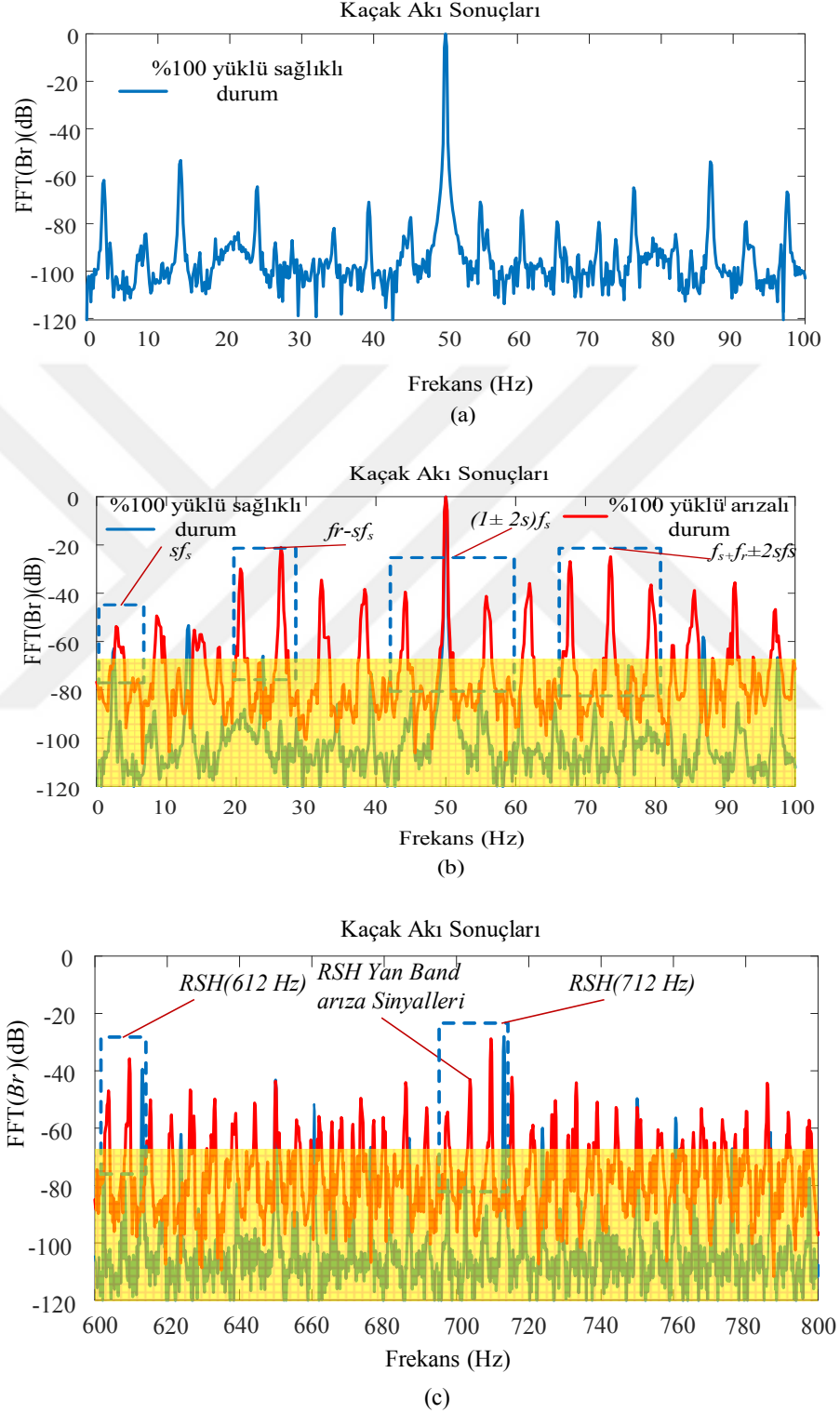
Yerleştirilen fluxgate sensörleri için bu bölümde $\alpha=45^0$ 'te olan sensör sonuçları Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=45^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.4.4 Sensör konumu $\alpha=90^0$ olan kaçak akı sonuçları

Fluxgate sensöründen alınan verilerin incelenmesine $\alpha=90^0$ konumda olan sensöründen alınan sonuçların değerlendirilmesi ile devam edilmiştir.

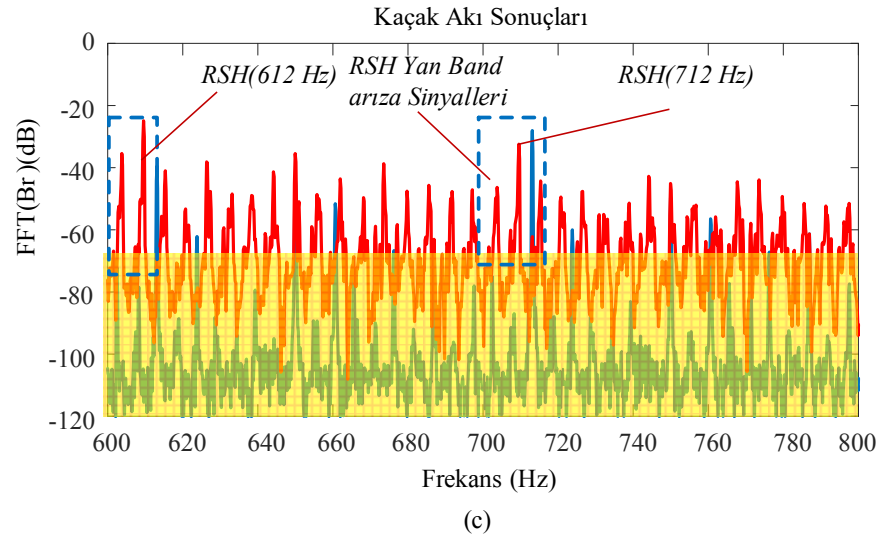
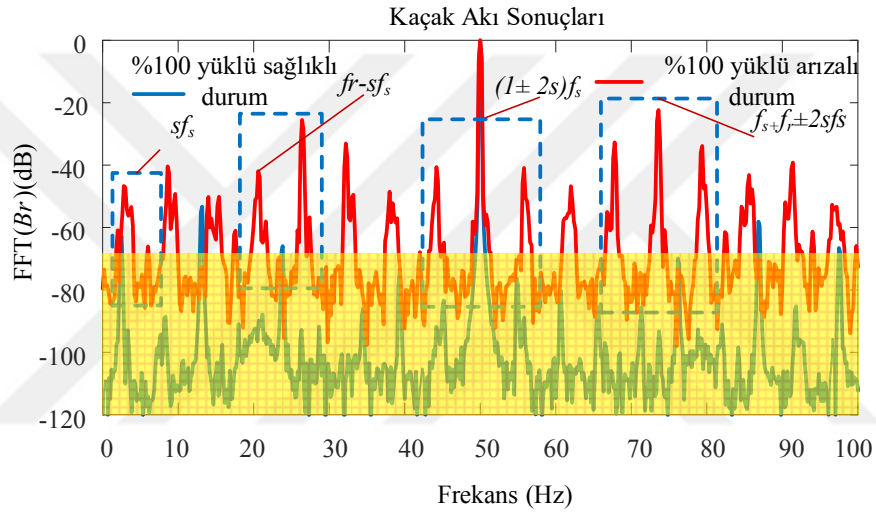
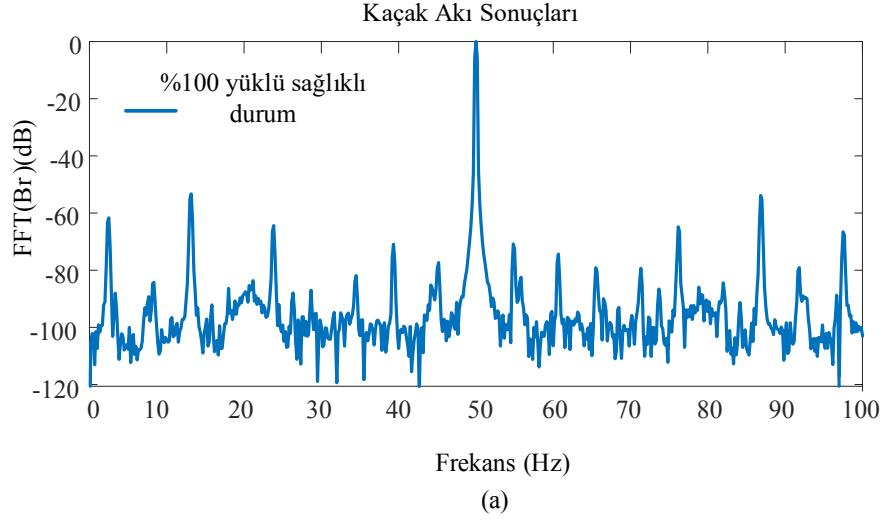


Şekil 5.16: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=90^0$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

5.4.5 Sensör konumu $\alpha=180^0$ olan kaçak akı sonuçları

Kaçak akı incelemesine $\alpha=180^0$ 'de bulunan sensörden alınan verilerin analizi ile devam edilmiştir. Şekil 5. 17a'da motorun sağlıklı durum sonuçları verilmiştir. Şekil 5.17b'de ise tam kutup aralığında iki rotor çubuğunun kırılması sonucu frekans sinyallerinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Temel frekansın yan bantlarında görülen $f_s \pm 2k f_s$ ve $s f_s$, $f_r - s f_s$ ve $f_s + f_r \pm 2s f_s$, RSH yan bant sinyallerinin olduğu görülmüştür. Arıza sinyallerinin boyutlarında farklılıklar görülmüş olsa da RSH ve diğer sinyaller kaçak akı incelemesinde görülmüştür. Şekil 5.17c'de RSH' de arıza sinyallerinin varlığı net olarak görülmüştür.

Bu açıdan alınan sonuçlara bakıldığında kaçak akıda alınan bilgiler aynı sonuçlara ulaşıldığını göstermiştir. Aynı şekilde net sonuçlar verilmesi için ve çalışmaya güvenilirlik kazanması amacı ile asenkron motorda farklı yükler için testler yapılmıştır. %75, %50 ve %25 yüklerden alınan sonuçlar her bölümde olduğu gibi bu bölümün sonucunda çizelge halinde sunulmuştur.



Şekil 5.17: Tam yükte tam kutup aralığında kırık rotor çubuğu arızasının $\alpha=180^\circ$ kaçak akı sonuçları a) Sağlık durumu b) Arızalı durum c) RSH sonuçları

Çizelge 5. 4 Tam kutup aralığındaki iki kırık rotor çubuk arızasında farklı motor yüklerinin karakteristik arıza harmonikleri üzerindeki etkisi

Yük	Kaçak Akı						Akım
	sf_s	f_r-sf_s	$f_s\pm 2ksf_s$	$f_s+f_r\pm 2sf_s$	$(13-14s\pm 2s)f_s$	$(15-14s\pm 2s)f_s$	$f_s\pm 2ksf_s$
%100	-64.65	-28.93	-38.58/ 41.91	-25.98/ 34.33	-37.54	-27.56	-35.5/-34.14
%75	-55.73	-31.48	-46.32/ 47.71	-25.53/ 37.16	-53.19	-57.3	-36.42/ 35.59
%50	-56.21	-32.33	-47.63/ 53.92	-33.16/ 39.28	-60.22	-52.18	-37.77/ 37.65
%25	-61.5	-37.11	-54.9/ 61.19	-39.48/ 45.2	-74.2	-74.91	-42.51/-42.8

Tam yük sonuçları grafikler halinde sunulan kırık rotor çubuğu arızasının, farklı yüklerden alınan kaçak akı ve akım bilgileri ise Çizelge 5.4'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Böylece tüm yükler altında kaçak akının stator akım incelemesine göre daha net ve güvenilir sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Stator akımında sadece temel frekansın yan bantları arıza durumunda belirgindir. Kaçak akıya bakıldığında ise temel frekansın yan bant arıza sinyallerinin yanı sıra sf_s , f_r-sf_s , $f_s+f_r\pm 2sf_s$ ve RSH yan bant sinyalleri de farklı yükler altında da gözlemlenmiştir. Böylece kırık rotor çubuğu arızası tespit yöntemlerinde kaçak akı incelemesinin stator akım incelemesine göre oldukça güvenilir sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Farklı açılara yerleştirilen sensörlerden alınan bilgilerde nümerik olarak küçük farklılıklar oluşsa da genel olarak arıza sinyallerinin varlığı tüm sensör konumlarında söz konusu olmuştur. Stator akım sonuçlarında sinyallerinin bazılarının olmaması, kaçak akı da ise kırık rotor çubuğu arızası ile ilişkili birçok arıza harmoniğinin varlığı kaçak akı incelemesini önemli yapmıştır. Kaçak akının daha fazla karakteristik harmonik içermesinden dolayı kırık rotor çubuk arıza tespitinde akıma göre daha etkin olduğu söylenebilir.

5.5 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi yapılırken simülasyon programında farklı noktalarda kırılan rotor çubuklarının sonuçları değerlendirilmiştir. Bu durumda sonuçlara bakıldığında;

Bir kırık rotor çubuğu arızasından alınan sonuçlara göre;

- Stator akımının incelenmesinde alınan bilgiler neticesinde $f_s\pm 2ksf_s$ sinyallerinin varlığı görülmüştür.

- Kaçak akı incelemesinde ise $f_s \pm 2ksf_s$ arıza sinyallerinin yanında özellikle sf_s , $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r \pm 2sf_s$ sinyallerinin baskın olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra RSH harmoniklerinin yan bandlarında arıza sinyallerinin varlığına bakılmıştır. Stator akımında bulunmayıp kaçak akı incelemesinde arıza sinyallerinin varlığı ortaya çıkmıştır.
- Motorun farklı yükler altında alınan sonuçlarına bakıldığında ise motorun yüklenme durumuna göre arıza sinyallerinin genliğinde artış gözlemlenmiştir. $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r + 2sf_s$ sinyallerinin yükten bağımsız olduğu ortaya çıkmıştır.

Komşu (Bitişik) iki rotor çubuğu arızasından alınan sonuçlara göre;

- Motor rotorunun iki çubuğunun yan yana denk gelecek şekilde kırılması ile karakteristik arıza harmoniklerinde farklılık olup olmayacağına bakılmıştır. Stator akımı sonuçlarında temel frekansın yan bandlarında meydana gelen sinyaller burada da gözlemlenmiştir. Fakat diğer sinyaller görülmemiştir.
- Kaçak akı incelemesi yapıldığında ise $f_s \pm 2ksf_s$ arıza sinyallerinin yanında özellikle sf_s , $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r \pm 2sf_s$ sinyalleri ortaya çıkmıştır. Arıza şiddeti arttıkça bu durum bir kırık rotor çubuğu arızasına göre oldukça farklı genlikler görülmüştür.
- RSH harmoniklerinin yan bandlarında arıza sinyallerinin varlığına bakılmıştır. 612 Hz ve 712 Hz harmoniğin yan bandlarında bulunan $(13-14s \pm 2s)f_s$ ve $(15-14s \pm 2s)f_s$ sinyallerinin varlığını göstermiştir.
- Motorun farklı yükler altında alınan sonuçları değerlendirildiğinde arıza sinyallerinin varlığı görülmüştür.
- Kaçak akı incelemesinde ayrıca sensörler motor üzerinde farklı konumlara yerleştirilerek farklı sonuçların olup olmayacağına bakılmıştır. Arıza sinyalleri sensörler farklı konumlarda olsa dahi varlıklarını göstermiştir.

Yarım kutup aralığında kırılmış rotor çubuğu arızasına göre;

- Asenkron motorda arıza tespiti yapılırken arızalı çubukların konumu arıza sinyallerinin genliklerinde farklılık oluşturması veya farklı sinyallerin ortaya çıkma ihtimalini ortaya koymuştur. Bu bağlamda rotor çubuklarını 90^0 (yarım

kutup aralığı, half pole pitch) elektriksel derece aralığında kırılması ile elde edilen sonuçlara bakılmıştır.

- Kaçak akı inceleme neticesinde temel frekansın yan bandları ile birlikte sf_s , $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r + 2sf_s$ sinyallerinin genliği oldukça net görülmüştür.
- Bu durum farklı sensör konumlarında ve RSH harmoniklerinin yan bandlarında da net olarak görülmüştür.
- Motorun farklı yükler altında alınan sonuçlarında ise $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r + 2sf_s$ yükten bağımsız olarak net sonuçlar vermiştir.

Tam kutup aralığında kırılmış rotor çubuğu arızasından alınan sonuçlara göre;

- Rotor çubuklarını 180^0 (tam kutup aralığı, full pole pitch) elektriksel derece aralığında kırılması ile elde edilen sonuçlara bakılmıştır. .
- Akım ve kaçak akı sonuçlarında karşılaştırılması yapılmıştır. Akımda olmayıp kaçak akıda görülen sinyallerin varlığına değinilmiştir.
- $f_r - sf_s$ ve $f_s + f_r \pm 2sf_s$ sinyallerinin varlığı tam kutup aralığına kırılan rotor çubuğun arızasının sonuçları kaçak akıda net olarak görülmüştür.
- Tam kutup aralığında meydana gelen arızanın sonuçları RSH harmoniklerindeki varlığına bakılmıştır. Kaçak akıda 612 Hz ve 712 Hz sinyallerinin yan bantlarında arıza sinyallerinin varlığı söz konusu olmuştur.
- Kaçak akıyı incelerken farklı konumlarda bulunan sensörler aynı arıza harmoniklerinin varlığını göstermiştir.

Bu durumda kaçak akı incelemesi stator akım incelenmesinden alınan sonuçlardan daha net ve güvenilir sonuçlar vermiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Asenkron motorlar; geniş ve yoğun kullanım alanına sahip olmaları motor üzerinde çeşitli mekaniksel ve elektriksel arızaların oluşumunu beraberinde getirmiştir. Bu arızalar motorlarda maddi kayıplara neden olurken aynı zamanda güvenlik ve sağlık açısından istenmeyen bazı tehlikeler oluşturabilmektedir. Bu nedenle oluşan arızaların erken tespiti ve kısa sürede müdahale edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında asenkron motorların çalışması sırasında en fazla karşılaşılan arızalardan biri olan kırık rotor çubuğu arızası incelenmiştir. Bu amaçla *ANSYS@Maxwell* simülasyon programında modellenen bir asenkron motorda 4 farklı kırık rotor çubuğu arızası oluşturulup farklı yükler altında motorun akımında ve kaçak akıda meydana gelen arıza sinyalleri analiz edilmiştir. Kaçak akı sinyallerini inceleyebilmek için simülasyon modellerine akı sensörleri yerleştirilmiştir. Asenkron motor %100, %75, %50 ve %25 yükler altında çalıştırılmış ve elde edilen sonuçların *Matlab* programında Fast Fourier Transformu (FFT) alınarak sağlıklı ve arızalı verilerin karşılaştırılması yapıp değerlendirilmiştir. Kaçak akı inceleme yöntemi ile motor arızalarında klasik olarak kullanılan Motor Akım İmza Analizi (MAİA) yöntemi karşılaştırılarak, iki yöntem ile elde edilen arıza sinyalleri arasındaki farklılıklara değinilmiştir. Akım incelemesinde temel frekansın yan bantlarında görülen $f_s \pm 2ksf_s$ sinyaller gözlemlenmiştir. Kaçak akı incelenmesinde ise daha ayrıntılı ve daha farklı olan arıza sinyalleri ile karşılaşılmıştır. Kaçak akı sinyallerinde; temel frekansın yan bantlarında görülen sinyaller dışında sf_s , $f_r - sf_s$, $f_s + f_r \pm 2sf_s$, ve RSH yan bantlarında görülen harmoniklerin kırık rotor çubuğu arızasını tespit etmede kullanılabileceği görülmüştür. Kırık rotor çubuğu arızasında kaçak akı izleme yönteminin stator akımından elde edilen sonuçlara kıyasla daha güvenilir sonuçlar verdiği net olarak ortaya konmuştur.

Tez kapsamında yapılan benzetim çalışmaları gerçek hayatta karşılaşılması mümkün olan kırık çubuk arızaları temel alınarak yapılmıştır. Yapılan ayrıntılı analizler ile kırık çubuk arızası tespit etmede MAİA yöntemi yerine kaçak akı incelemesi yöntemini kullanmanın daha net ve güvenilir olduğu gösterilmiştir. İleride yapılacak arıza tespiti çalışmalarında kaçak akı incelemesi yöntemi ile birlikte farklı arıza analiz yöntemleri birlikte kullanılarak daha güvenilir sonuçlara ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] I. Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, and Xiaodong Li, “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, 2018.
- [2] C. C. Yeh *et al.*, “A reconfigurable motor for experimental emulation of stator winding interturn and broken bar faults in polyphase induction machines,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 4, pp. 1005–1014, 2008.
- [3] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, “Advances in diagnostic techniques for induction machines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, 2008.
- [4] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and G. B. Kliman, “Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp. 1248–1255, 2001.
- [5] P. O. Donnell, C. Heising, C. Singh, and S. J. Wells, “Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations: Part 3,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-23, no. 1, pp. 153–158, 1987.
- [6] K. N. Gyftakis, D. V. Spyropoulos, J. C. Kappatou, and E. D. Mitronikas, “A novel approach for broken bar fault diagnosis in induction motors through torque monitoring,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2013.
- [7] K. Saad and G. Mirzaeva, “Advanced diagnosis of rotor faults in large induction motors based on internal flux measurement,” *IEEE Ind. Appl. Soc. 52nd Annu. Meet. IAS 2016*, pp. 1–8, 2016.
- [8] M. Reliability, W. Group, P. Systems, R. Subcommittee, and E. Committee, “Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations Parts II,” vol. I, no. February 1987, pp. 853–872, 2007.
- [9] A. Sapena-Bano *et al.*, “Harmonic Order Tracking Analysis: A Novel Method for Fault Diagnosis in Induction Machines,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 833–841, 2015.
- [10] C. G. Dias and F. H. Pereira, “Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Running at Very Low Slip Using a Hall Effect Sensor,” *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 11, pp. 4602–4613, 2018.

- [11] J. A. Ramirez-Nunez *et al.*, “Evaluation of the Detectability of Electromechanical Faults in Induction Motors Via Transient Analysis of the Stray Flux,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 4324–4332, 2018.
- [12] K. N. Gyftakis, P. A. Panagiotou, and S. Bin Lee, “The Role of the Mechanical Speed Frequency on the Induction Motor Fault Detection via the Stray Flux,” *Proc. 2019 IEEE 12th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives, SDEMPED 2019*, pp. 201–207, 2019.
- [13] T. Goktas, M. Arkan, M. Salih Mamis, and B. Akin, “Broken rotor bar fault monitoring based on fluxgate sensor measurement of leakage flux,” in *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2017*, 2017.
- [14] P. J. Tavner, P. Hammond, and J. Penman, “Contribution To the Study of Leakage Fields At the Ends of Rotating Electrical Machines.,” *Proc Inst Electr Eng*, vol. 125, no. 12, pp. 1339–1349, 1978.
- [15] K. Saad and G. Mirzaeva, “Fault diagnostics of induction motors based on internal flux measurement,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 201–206, 2014.
- [16] “An experimental approach for diagnosis of adjacent and nonadjacent broken bars in induction motors at very low slip.”
- [17] K. N. G. P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, N. Lophitis, J. A. Antonino-Daviu, “Analysis of Stray Flux Spectral Components in Induction Machines under Rotor Bar Breakages at Various Locations,” no. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018, pp. 2345-2351.
- [18] P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, N. Lophitis, J. A. Antonino-Daviu, and K. N. Gyftakis, “A New Approach for Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors Using Frequency Extraction in Stray Flux Signals,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 4, pp. 3501–3511, 2019.
- [19] I. Chernyavska and O. Vitek, “Analysis of broken rotor bar fault in a squirrel-cage induction motor by means of stator current and stray flux measurement,” in *Proceedings - 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2016*, 2016.

- [20] A. Yazidi, H. Henao, G. A. Capolino, M. Artioli, F. Filippetti, and D. Casadei, "Flux signature analysis: An alternative method for the fault diagnosis of induction machines," *2005 IEEE Russ. Power Tech, PowerTech*, pp. 1–6, 2005.
- [21] K. Saad and G. Mirzaeva, "Space harmonics analysis of the main air gap flux of an induction motor and its applicability to detect faults," *2014 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2014 - Proc.*, no. October, pp. 1–6, 2014.
- [22] E. Maloma, M. Muteba, and D. V. Nicolae, "Effect of rotor bar shape on the performance of three phase induction motors with broken rotor bars," in *Proceedings - 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017 and 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2017*, 2017.
- [23] R. Romary, R. Pusca, J. P. Lecoite, and J. F. Brudny, "Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis," *Proc. - 2013 IEEE Work. Electr. Mach. Des. Control Diagnosis, WEMDCD 2013*, pp. 247–256, 2013.
- [24] N. Praveen Kumar and T. B. Isha, "Electromagnetic field analysis of 3-phase induction motor drive under broken rotor bar fault condition using FEM," in *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2016*, 2017.
- [25] A. Yazidi, H. Henao, and G. A. Capolino, "Broken rotor bars fault detection in squirrel cage induction machines," *2005 IEEE Int. Conf. Electr. Mach. Drives*, pp. 741–747, 2005.
- [26] M. E. Iglesias-Martinez, P. F. De Cordoba, J. A. Antonino-Daviu, and J. A. Conejero, "Detection of Bar Breakages in Induction Motor via Spectral Subtraction of Stray Flux Signals," in *Proceedings - 2018 23rd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2018*, 2018, pp. 1796–1802.
- [27] K. N. Gyftakis, E. Palomeno, D. V. Spyropoulos, and E. D. Mitronikas, "Detection of Rotor Electrical Faults in Induction Motors during the Start-up via Torque Monitoring," *IECON 2019 - 45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, pp. 3673–3678, 2019.
- [28] K. Saad and G. Mirzaeva, "Fault diagnosis of induction motors by space harmonics analysis of the main air gap flux," in *Proceedings - 2014 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014*, 2014.

- [29] C. G. Dias and I. E. Chabu, "Spectral analysis using a Hall effect sensor for diagnosing broken bars in large induction motors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 12, pp. 2890–2902, 2014.
- [30] A. Bellini, C. Concari, G. Franceschini, C. Tassoni, and A. Toscani, "Vibrations, currents and stray flux signals to asses induction motors rotor conditions," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2, no. 3, pp. 4963–4968, 2006.
- [31] I. Chernyavska and O. Vitek, "Analysis of broken rotor bar fault in a squirrel-cage induction motor by means of stator current and stray flux measurement," *Proc. - 2016 IEEE Int. Power Electron. Motion Control Conf. PEMC 2016*, pp. 532–537, 2016.
- [32] M. E. Iglesias-Martinez, P. F. De Cordoba, J. A. Antonino-Daviu, and J. Alberto Conejero, "Detection of Nonadjacent Rotor Faults in Induction Motors via Spectral Subtraction and Autocorrelation of Stray Flux Signals," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 5, pp. 4585–4594, 2019.
- [33] Y. Park, H. Choi, S. Bin Lee, and K. Gyftakis, "Flux-based detection of non-adjacent rotor bar damage in squirrel cage induction motors," *2019 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2019*, pp. 7019–7026, 2019.
- [34] T. Goktas, M. Arkan, İ. Ekinci, M. S. Mamiş, and N. Yüklü, *Monitoring of Leakage Flux for Rotor Fault Detection under non-adjacent broken rotor bars in Induction Motors*.
- [35] G. Y. Sizov, A. Sayed-Ahmed, C. C. Yeh, and N. A. O. Demerdash, "Analysis and diagnostics of adjacent and nonadjacent broken-rotor-bar faults in squirrel-cage induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4627–4641, 2009.
- [36] K. N. Gyftakis, J. A. Antonino-Daviu, and A. J. M. Cardoso, "A reliable indicator to detect non-adjacent broken rotor bars severity in induction motors," in *Proceedings - 2016 22nd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2016*, 2016.
- [37] J. A. Antonino-Daviu, K. N. Gyftakis, R. Garcia-Hernandez, H. Razik, and A. J. M. Cardoso, *Comparative Influence of Adjacent and Non-adjacent Broken Rotor Bars on the Induction Motor Diagnosis through MCSA and ZSC Methods*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyadı: İMRAN EKİNCİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2016, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Pedagojik Formasyon Eğitimi:** 2021, İnönü Üniversitesi, Eğitim Fakültesi

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020-2021 döneminde Özel Beydağı Mimar Sinan Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Elektrik-Elektronik Öğretmeni olarak çalıştı.
- 2019-2020 döneminde YUSA ELEKTRİK'te Proje Mühendisi olarak çalıştı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **T. Goktas, M. Arkan, İ. Ekinci, M. S. Mamiş, and N. Yüklü,** , *Monitoring of Leakage Flux for Rotor Fault Detection Under Non-adjacent Broken Rotor Bars in Induction Motors*, 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID).
- **İ. Ekinci, T. Goktas, M. Arkan, and M. Salih,** , *“Detection of Broken Bar Fault based on the Sidebands of Rotor Slot Harmonics in Leakage Flux.”*, 2018 International Conference on Energy Research(ICER)