İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTORDA EKSEN KAÇIKLIĞININ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah POLAT

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTORDA EKSEN KAÇIKLIĞININ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah POLAT
504101001

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE

Haziran 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Abdullah POLAT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"Asenkron Motorda Eksen Kaçıklığının Analizi"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 3 Mayıs 2013
Savunma Tarihi : 7 Haziran 2013

Ailem ve Sevdiğime,

ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü eğitim hayatımda kendisiyle çalışmaktan ve asistanı olmaktan son derece mutlu olduğum, kendisinden hayata ve mesleğime dair çok kıymetli tecrübeler edindiğim, öğrencilerinin Lale hocası, Elif Ece ve Emre' nin annesi ve İTÜ'nün değerli öğretim üyesi Doç. Dr. Lale Tükenmez Ergene' ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Elektrik Makineleri denildiğinde akla gelen tüm hocalarıma, teknisyen abilerime, dostluğunu ve tecrübelerini samimiyetle paylaşan Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet Kocabaş'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Öğrenciliğim ve araştırma görevliliğim boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Elektrik Mühendisliği Bölümü'nün çok kıymetli hocalarına,

Yüksek lisans ve araştırma görevliliği esnasında, her sıkıştığımda yanımda olan, ilk mesai arkadaşlarım, Ahmet Kubilay Atalay, Aytuğ Font, Furkan Başkurt, Ahmet Yasin Yeksan ve Mehmet Onur Gülbahçe'ye,

Beni hiç yalnız bırakmayan dostlarım, Emrah Dokur, Uğur Biçici ve Bilal Düzgün'e,

Hayatımın her anında yanımda olan, bana insanların yapmakta en çok zorlandığı işi, sevebilmeyi öğreten güzel ailem; annem, babam, kız kardeşime ve rahmetli dedeme,

Onun eşlik etmediği bir ömrü tahayyül edemediğim nişanlım Hatice Esra Yılmaz' a teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Mayıs 2013

Abdullah POLAT
(Araştırma Görevlisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 2
2. ASENKRON MOTORLARA GENEL BAKIŞ **7**
2.1 Yapısal Özellikleri 7
2.2 Çalışma Prensipleri 8
2.3 Manyetik, Elektriksel ve Mekanik Açıdan Asenkron Motor 9
3. ASENKRON MOTORLARDA EKSEN KAÇIKLIĞI **13**
3.1 Asenkron Motor Arızalarına Genel Bakış 13
3.1.1 Arızalara sebep olan etkenler 14
3.1.1.1 Mekanik zorlanmalar 14
3.1.1.2 Elektriksel zorlanmalar 14
3.1.1.3 Manyetik zorlanmalar 15
3.1.1.4 Isıl zorlanmalar 15
3.1.2 Arızaların motor üzerindeki etkileri 15
3.1.3 Arıza tanısı için izleme yöntemleri 16
3.2 Eksen Kaçıklığı 17
3.2.1 Eksen kaçıklığının sebepleri 18
3.2.2 Eksen kaçıklığının çeşitleri 19
3.2.2.1 Statik eksen kaçıklığı 20
3.2.2.2 Dinamik eksen kaçıklığı 21
3.2.2.3 Karma eksen kaçıklığı 21
3.2.3 Eksen kaçıklığının motor üzerindeki etkileri 22
4. ASENKRON MOTOR PARAMETRELERİNİN MATEMATİKSEL MODELİ **23**
4.1 Hava Aralığı Akı Yoğınluğu 24
4.1.1 MMK hesabı 25
4.1.2 Permeans hesabı 27
4.1.2.1 Carter faktörü 28
4.1.3 Hava aralığı akı yoğunluğunun hesabı 29
4.2 Elektromanyetik Kaynaklı Biçimi Bozulmuş Kuvvet Dalgalarının Hesabı 30
4.2.1 Radyal kuvvetlerin hesabı 30
4.2.2 Teğetsel kuvvet bileşeni hesabı 31

5. EKSEN KAÇIKLIĞININ MODELLENMESİ 33
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) 33
5.2 Modellerin Oluşturulması 36
5.2.1 Sağlıklı çalışma durumu için model oluşturulması 36
5.2.1.1 Motor geometrisinin elde edilmesi 37
5.2.1.2 Malzeme özelliklerinin tanıtılması 37
5.2.1.3 Elektriksel parametrelerin belirlenmesi 37
5.2.1.4 Ağ yapısının elde edilmesi 38
5.2.2 Asimetrik çalışma durumu için model oluşturulması 39
5.2.2.1 Statik eksen kaçıklığı 39
5.2.2.2 Dinamik eksen kaçıklığı 40
5.2.2.3 Karma eksen kaçıklığı 41
5.3 Modellerin Çözümü 43
5.3.1 Kararlı hal için çözüm 43
5.3.1.1 Sabit hız 43
5.3.2 Geçici hal için çözüm 43
5.4 Benzetim Sonuçları 43
5.4.1 Sağlıklı durum için benzetim sonuçları 44
5.4.2 Asimetrik durumlar için benzetim sonuçları 50
5.4.2.1 Hava aralığı akı yoğunluğu açısından benzetim sonuçları 50
5.4.2.2 Akım açısından benzetim sonuçları 65
5.4.2.3 Moment açısından benzetim sonuçları 67
6. TEST SONUÇLARI 71
6.1 Akım Açısından Test Sonuçları 72
6.2 Titreşim ve Gürültü Açısından Test Sonuçları 73
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKLAR 77
ÖZGEÇMİŞ 81

KISALTMALAR

EMK	**:** Elektro-motor kuvvet
FFT	**:** Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
MMK	**:** Manyeto-motor kuvvet
PWM	**:** Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RF	**:** Radyo frekansı
SEY	**:** Sonlu elemanlar yöntemi
UMP	**:** Dengesiz Manyetik Çekme Kuvveti (Unbalanced Magnetic Pull)
WFA	**:** Sargı Fonksiyonu Yaklaşımı (Winding Function Approach)
IEC	**:** International Electrotechnical Commission
SEK	**:** Statik eksen kaçıklığı
DEK	**:** Dinamik eksen kaçıklığı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Motora ait anma değerleri ve genel özellikler..... 36
Çizelge 5.2 : Statik eksen kaçıklığı 39
Çizelge 5.3 : Dinamik eksen kaçıklığı..... 41
Çizelge 5.4 : %10 Statik eksen kaçıklığı barındıran karma eksen kaçıklığı 42
Çizelge 5.5 : %30 Statik eksen kaçıklığı barındıran karma eksen kaçıklığı 42
Çizelge 5.6 : Benzetim sonucunda elde edilen motor parametreleri 44
Çizelge 5.7 : Benzetim sonucunda hesaplanılan motor parametreleri 44
Çizelge 5.8 : Sağlıklı durum için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik değerleri 47
Çizelge 5.9 : Sağlıklı durum ve statik eksen kaçıklığı barındıran modeller için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik değerleri..... 53
Çizelge 5.10 : Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumlarında ortalama akım değerleri..... 65
Çizelge 5.11 : Detay görüntüsü verilen moment değerleri..... 70
Çizelge 5.12 : Detay görüntüsü verilen moment değerlerine ait bağıl hata ve dalgalılık değerleri..... 70
Çizelge 6.1 : Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için test sonucunda elde edilen akım değerleri 73
Çizelge 6.2 : Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için test sonucunda elde edilen titreşim ve gürültü değerleri..... 74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kafesli asenkron motor 8
Şekil 2.2 : Manyetik eş akı eğrileri 10
Şekil 3.1 : Asenkron motor arıza kaynaklarının araştırma sonuçlarına göre oranları 13
Şekil 3.2 : Oval stator..... 18
Şekil 3.3 : Oval rotor 19
Şekil 3.4 : Yanlış yataklama..... 19
Şekil 3.5 : Eksen kaçıklığı..... 20
Şekil 3.6 : Statik eksen kaçıklığı 20
Şekil 3.7 : Dinamik eksen kaçıklığı 21
Şekil 3.8 : Karma eksen kaçıklığı 21
Şekil 4.1 : Elektromanyetik kaynaklı kuvvetlerin oluşum süreci 23
Şekil 4.2 : Hava aralığı akı yoğunluğu oluşumu : (a) Sadece stator oluklu olduğunda hava aralığı genişliği, (b) Stator ve rotor oluklu olduğunda hava aralığı genişliği (c) Mmk eğrisi (d) Sadece stator oluklu olduğunda hava aralığı akı yoğunluğu (e) Stator ve rotor oluklu olduğunda hava aralığı akı yoğunluğu..... 24
Şekil 4.3 : Hava aralığı akı yoğunluğunun hesaplanması süreci..... 25
Şekil 4.4 : Hava aralığı kesiti : (a) Statorun oluklu, rotorun düz olduğu yapı (b) Rotorun oluklu, statorun düz olduğu yapı..... 28
Şekil 5.1 : Ağ yapısı..... 35
Şekil 5.2 : Hava aralığı bölgesinde ağ yapısı..... 35
Şekil 5.3 : Rotor ve stator için kullanılan malzemeye ait B-H eğrisi..... 37
Şekil 5.4 : Sağlıklı motor ağ yapısı..... 38
Şekil 5.5 : Statik eksen kaçıklığı kesiti 40
Şekil 5.6 : Manyetik eş akı eğrileri 45
Şekil 5.7 : Akı yoğunluğu dağılımı (renk tayfı) 45
Şekil 5.8 : Hava aralığı akı yoğunluğu normal ve teğetsel bileşenleri..... 46
Şekil 5.9 : Hava aralığı akı yoğunluğu normal ve teğetsel bileşenler için harmonik açılımı..... 47
Şekil 5.10 : Motor uçlarına uygulanan gerilim 48
Şekil 5.11 : Şebekeden çekilen akım 48
Şekil 5.12 : Faz akımları 49
Şekil 5.13 : Sağlıklı durum için hava aralığı momenti 49
Şekil 5.14 : Sağlıklı ve statik eksen kaçıklığı barındıran motorlara ait hava aralığı akı yoğunluğu eğrileri 51
Şekil 5.15 : Manyetik akı dağılımı (renk tayfı) : (a) Hava aralığı genişliğinin en küçük olduğu bölgeler. (b) Hava aralığı genişliğinin en büyük olduğu bölgeler..... 52
Şekil 5.16 : Sağlıklı durum ve %50 statik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik bileşenlerin karşılaştırılması 53

Şekil 5.17 : %10 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 54
Şekil 5.18 : %30 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 55
Şekil 5.19 : %50 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 56
Şekil 5.20 : Farklı konumlarda rotor pozisyonuna göre manyetik akı yoğunlukları (% 50 DEK için) 57
Şekil 5.21 : %10 statik + %10 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 58
Şekil 5.22 : %10 statik + %30 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 59
Şekil 5.23 : %10 statik + %50 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 60
Şekil 5.24 : %30 statik + %10 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 62
Şekil 5.25 : %30 statik + %30 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 63
Şekil 5.26 : %30 statik + %50 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi 64
Şekil 5.27 : Karma ve dinamik eksen kaçıklıkları için akı yoğunluklarının karşılaştırılması 65
Şekil 5.28 : Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için akım karakteristikleri 66
Şekil 5.29 : Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için moment karakteristikleri 68
Şekil 5.30 : Moment karakteristikleri detay görünümü 69
Şekil 6.1 : Test yapılan motorun rotoru: (a) Seri üretim (b) Balans pulu olmayan (c) Balans pulu olmayan+darbeli 71
Şekil 6.2 : Sağlıklı durum için benzetim ve test sonuçlarıyla akım 72
Şekil 6.3 : Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için akım karakteristiklerine dair test sonuçları 73
Şekil 6.4 : Test sonucu elde edilen titreşim değerlerinin frekans bandındaki gösterimi 74

ASENKRON MOTORLARDA EKSEN KAÇIKLIĞININ ANALİZİ

ÖZET

Asenkron motorlar, düşük maliyetleri, uygun boyutları ve çok fazla bakım gerektirmemeleri gibi özellikleri sayesinde en çok tercih edilen elektrik motorlarıdır ve günlük hayatta, endüstriyel birçok çalışma alanında sıkça kullanılmaktadırlar. Bu sebeple bu motorların arıza durumları da, birçok çalışmaya konu olmuştur. Eksen kaçıklığı bu çalışmaların büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Eksen kaçıklığı, stator ve rotor arasındaki hava aralığının homojen bir şekilde dağılmadığı durumdur. Statik, dinamik ve bu iki durumu aynı anda ihtiva eden karma eksen kaçıklığı olmak üzere üç farklı tipi mevcuttur. Hava aralığının homojen olmayışı ve asimetrik çalışma durumu, tasarım öncelikleri, üretim süreci ve çalışma koşullarına bağlıdır. Bu hata sonucunda, dengesiz hava aralığı akı yoğunluğu, moment titreşimlerine artış, kayıpların artması ve verimin düşmesi, aşırı ısınma ve gürültü seviyesinde artış gibi sorunlar ortaya çıkacaktır.

Tez çalışmasında, endüstride ve günlük hayatta sıkça kullanım alanı bulan boyutlarda, 3 fazlı, 2.2 kW gücünde, sincap kafesli, 4 kutuplu, 36 stator oluğu ve 28 rotor barı bulunan bir asenkron motor incelenmiştir.

Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumlarının karşılaştırılması amacıyla, hem sağlıklı hem de farklı mertebelerde statik, dinamik ve karma eksen kaçıklığı barındıran modeller kurulmuş ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapılmıştır. Aynı zamanda, modelleme esnasında parametreleri kullanılan motor için, sağlıklı durum ve asimetrik çalışma durumları deneysel açıdan incelenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık makine yapıları ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri sebebiyle analitik çözüm yapabilmenin zorluğunu aşabilmek için, elektrik makinelerinin analizinde sıkça kullanılan sayısal bir yöntemdir.

Modelleme ve test sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Böylece, eksen kaçıklığı hatası kapsamında, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, akım, moment gibi parametrelerin yanı sıra titreşim ve gürültü gibi mekanik parametrelerin nasıl yorumlanması gerektiği konusu incelenmiştir. Farklı mertebelerde eksen kaçıklığının, motorun manyetik, elektriksel ve mekanik parametrelerine nasıl tesir ettiği, hangi arıza boyutlarında, motorun çalışmasını nasıl etkilediği ayrıntılı olarak incelenmiştir. Böylece eksen kaçıklığının tanısı amacıyla hangi parametrelerin izlenmesi gerektiği benzetim ve deney sonuçları ışığında araştırılmıştır.

THE ANALYSIS OF THE ECCENTRICITY IN ASYNCHRONOUS MOTORS

SUMMARY

Induction motors are the most preferred electrical motor because of their low cost, reasonable size and low maintenance. Besides all these advantages, induction motors can be operated under many stresses such as, thermal, electrical, mechanical and environmental impacts. Hence, induction motors are used in many applications of daily life and industry. The failure analysis of these machines has been researched by many years in terms of mechanical, electrical, etc. Eccentricity constitutes a significant portion of the faults related to induction motors.

The different studies about eccentricity and unbalanced magnetic pull (UMP) caused by this fault have been carried since the first quarter of 20th century. The study about to identify and measure of unbalanced flux caused by asymmetric air gap was made by Rosenberg at 1918. After that, most of the works have been based on calculation of the air gap flux density as a function of eccentricity and definition of the main factors that cause UMP. Eccentricity has been studied from the mechanical point of view and magnetic and mechanical problems resulting from this fault until the last quarter of the 20th century. In later years, studies were made on diagnosis of eccentricity fault in order to prevent the system, not to run as required or becoming breakdown. The unpredictable faults cause high cost problems and these problems could be removed by well-designed monitoring method. Therefore, many different diagnosis methods were studied. Ellison and Yang investigated the relationship between acoustic and eccentricity. Verma and Natarajan have studied the changes in the air gap field as a function of eccentricity using search coils in the stator core. However, if the working environments of induction motors are considered, these methods are not applicable and economical for diagnosis. In an eccentric motor, the current and voltage of the motor don't have sinusoidal forms and contain time harmonics. Thus, the magnetic flux also includes harmonic content by the interaction of time and space harmonics. Consequently a pulsating torque is produced on the motor shaft. Cameron and Thomson studied on vibration and current monitoring for detecting air gap eccentricity. Vibration and current signs are selected as the most convenient parameters for diagnosis and preferred in many applications. More recently, most of the studies on the eccentricity are about the modeling of the different types of motors for different reasons that cause eccentricity and different degrees of static and dynamic eccentricity. Therefore, the motor parameters could be analyzed for faulty condition. Generally, finite element method (FEM) is used for the analysis as a numerical method.

Eccentricity is the condition of non-uniform air gap that exists between the stator and rotor. There are three types of eccentricity; static eccentricity, dynamic eccentricity and mixed eccentricity that is combination of former two. The stator is centered on first axis and the rotor is centered on second axis. In a healthy machine, first and second axes are coincident. Static eccentricity occurs when second axis is the center

of rotation. If the first axis is center of rotation, the dynamic eccentricity occurs at this time. Besides, if the center of rotation can be anywhere between first and second axes, the mixed eccentricity appear to be a problem.

The non-uniformity of the air gap of an induction motor depends on design features, manufacturing process and operating conditions. The asymmetric operational conditions of induction motors are connected with bearing fault, stator windings fault, broken rotor, cracked end ring and eccentricity related faults. The causes of the misalignment of the rotor as follows; the rotor center is not being at the center of the stator (bearing fault), the stator bore and rotor face are not perfectly cylindrical, bent rotor shaft, bearing wear or mechanical resonance at critical speed.

These faults produce that the differences of characteristics of motor parameters as follows; non-stable air gap voltage and line current, unbalanced air gap flux density, increase in pulsating torque, decrease in average torque, reduction in efficiency (increase in losses), over heating and increase in noise level.

In most of the literature, the studies are relevant to which parameters should be monitored for the detection of eccentricity in consideration of analytical calculations. The thesis presents the dynamic model of the induction motor and shows the deviation in the magnetic flux, the current and the torque values. Faulty conditions are investigated for static, dynamic and mixed eccentricity. The air gap flux density and its harmonic components are researched for healthy and asymmetric operational conditions. Therefore, the change in the harmonic components with increasing of eccentricity is analyzed.

A 2.2 kW, 4 pole, 50 Hz, delta connected squirrel cage induction motor is used in this thesis. The finite element method (FEM) is used for the analysis as a numerical method.

FEM expresses a physical system in terms of mathematical quantities. Besides, it is a model that could be decomposed into sub-elements and have material properties and applicable boundary conditions. Unknown quantities with finite number are obtained by using known quantities of system.

In thesis, the dynamic model of the induction motor is created for healthy and eccentric condition by changing the air gap. After verification of the healthy model respect to the experimental results, the flux density, current and torque characteristics of the eccentric models are examined. The test motor has 3 phase, 4 poles, 36 slots and 28 rotor bars.

Firstly, the motor is modeled for the rated operation condition with no eccentricity. The eccentricity is modeled by shifting the rotor position and defining the axes of rotation. The non-uniform air gap is obtained in order to analysis the asymmetric operational conditions.

The uniformity of the air gap width is corrupted with eccentricity. Consequently the air gap flux density will be different than the one in the healthy condition. Therefore, the higher air gap flux density values appear in points where air gap width is smaller and lower values appear where air gap width is larger, similarly.

The harmonic spectrum is obtained in order to investigate the eccentricity effect on the air gap flux density. When fundamental component is decreasing with eccentricity fault, the high frequency components increase. As the eccentricity increases, the magnitude of the harmonic permeance waves due to eccentricity will

increase. The flux density distribution in the air gap is found as the product of the permeance and the magnetomotive force (MMF), so, when the harmonic permeance waves due to eccentricity increases, the magnitude of harmonic components of air gap flux density will also increase as shown in simulation results.

Therefore, pulsation of torque increases. The peak values of torque increase with eccentricity about 1%. Besides, the torque ripple increases 1~14 % with increasing of eccentricity.

In addition, eccentricity is investigated in terms of mechanical parameters such as vibration and noise with using experimental setup. The two different asymmetrical condition and healthy condition of motor are tested. In this way, the vibration level of asymmetric operational conditions increase %8.5 compared to the healthy conditon.

In conclusion, in this thesis , the dynamic model of the induction motor is modeled with uniform and non-uniform air gaps. The results for the healthy model are verified the rated values of the motor. After the verification of the motor parameters, the motor geometry is redesigned for static, dynamic and mixed eccentricity condition. Changing of the air gap flux density is illustrated for eccentric conditions. The decreasing of fundamental component and the increasing of high frequency components with increasing the percentage of eccentricity are observed. The effects of eccentricity on the air gap flux distribution, current and torque characteristics are investigated with simulation results. Besides, the effects on vibration and noise are observed with test results. Therefore, the monitoring methods of eccentricity are studied in terms of different parameters, for instance; air gap flux density, harmonic components, current, moment and vibration.

1. GİRİŞ

Elektrik makineleri gerek sanayide gerekse günlük hayatımızdaki birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Özellikle asenkron motorlar, elektrik makinesi kullanımının büyük bir oranında tercih edilen motor tipidir. Hayatın olağan bir şekilde devam etmesinde önemli bir rolü olan elektrik makinelerinin, arızalanması durumu da bu sebeple, çok fazla araştırmaya konu olmuştur.

Elektrik makinesi arızaları, elektriksel ve mekanik olarak iki ana başlıkta incelenecek olursa; elektriksel arızalar; sargıların dengeli sarılmaması, şebekedeki elektriksel dengesizlik, kısa devre durumları, sürücü arızası kaynaklı dengesizlikler olarak ifade edilebilir. Mekanik arızalar ise; rulman arızaları, mil eğilmesi, sürtünme, rotor dengesizliği, gevşeklik ve tez çalışmasında da ayrıntılı olarak incelenecek olan eksen kaçıklığı başlıkları altında toplanabilir.

Eksen kaçıklığı genel ifadeyle, rotor ve stator arasındaki hava aralığının homojen bir yapıda olmamasıdır. Rotorun düzgün yerleştirilmemesi, üretimdeki toleransların kötü olması, stator ve rotor yüzeylerinin silindirik yapıda olmaması gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Statik, dinamik ve bu iki durumun birlikte görüldüğü karma tipleri olan, elektrik makine arızalarının en önemlilerinden biridir.

Bu önemli arızanın ayrıntılı olarak incelenmesi amacıyla, modelleme ve deneysel sonuçlar eşliğinde, hatanın farklı tipleri ve farklı mertebeleri için; akı, akım, moment, titreşim ve gürültü gibi farklı parametrelere etkisinin gözlemlendiği çok yönlü bir çalışma yapılacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Asenkron motorun asimetrik olarak çalıştığı durumlar, bu duruma sebep olan elektriksel ve mekanik hatalar ayrıntılı bir şekilde incelenecektir. Daha sonra eksen kaçıklığı hatası, tipleri ve bu hatanın tanısı hakkında detaylı bir araştırma yapılacaktır.

Tez çalışması kapsamında, eksen kaçıklığının motor parametrelerini nasıl etkilediğini tespit etmek amacıyla, endüstride yaygın olarak kullanılan boyut ve güçlerde bir asenkron motora ait, öncelikle sağlıklı durum için gerekli hesaplamalar yapılacaktır. Daha sonra, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı Flux2D programı aracılığıyla sağlıklı durum ve farklı tiplerde ve farklı derecelerde eksen kaçıklığı içeren motorlar için dinamik modeller oluşturulacaktır. Elde edilen bu modeller hem kararlı hal, hem de geçici hal çalışma, durumları için çözülecektir. Aynı zamanda, modelleme esnasında parametreleri kullanılan motor için, sağlıklı durum ve statik eksen kaçıklığı içeren durumlar deneysel açıdan incelenecektir. Modelleme ve test sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılacaktır. Böylece, eksen kaçıklığı hatası kapsamında, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, akım ve moment değerlerinin nasıl yorumlanması gerektiği konusu incelenecektir. Test sonuçlarıyla, akım, moment değerlerinin ve harmonik bileşenlerin elde edilmesinin yanı sıra, eksen kaçıklığı hatasının tespiti amacıyla izlenen, gürültü, titreşim işaretleri gibi diğer tanı yöntemlerine dair deneysel sonuçlarda elde edilerek, hata tanısı üzerine çalışmalar yapılacaktır.

Farklı mertebelerde eksen kaçıklığının, motorun akım, akı yoğunluğu ve moment gibi parametrelerine nasıl tesir ettiği, hangi arıza boyutlarında, motorun çalışmasını nasıl etkilediği ayrıntılı olarak incelenecektir.

1.2 Literatür Özeti

Eksen kaçıklığı ve sebep olduğu dengesiz manyetik çekme kuvveti (UMP)' ne dair 20. yüzyılın ilk çeyreğinden bu yana farklı çalışmalar yapılmıştır. Rosenberg, mıknatıslanma eğrilerini kullanarak, asimetrik hava aralığının sebep olduğu, akı dengesizliğini tespit etmeyi ve ölçmeyi amaçlayan çalışmasını 1918 yılında yapmıştır [1]. Daha sonra konu hakkındaki çoğu çalışma; hava aralığındaki manyetik alanın eksen kaçıklığının bir fonksiyonu olarak hesaplanması ve UMP' ye sebep olan başlıca etkenlerin tanımlanması üzerine olmuştur. Bu çalışmalardan başlıcaları da 1963 yılında Von Kaehne [2] tarafından yapılan ve 1968 yılında Bradford [3] tarafından yapılan elektrik makinelerindeki UMP' nin incelenmesine dair çalışmalardır. Bradford, daha önceki çalışmalara ilave olarak farklı yük durumlarında, anma gerilimi ve farklı gerilimlerde, hem bilezikli hem de kafesli

asenkron makine için eksen kaçıklığının farklı mertebelerinde ortaya çıkan UMP' yi incelemiştir.

Görüldüğü gibi daha erken yıllarda, eksen kaçıklığı konusu, bu hataya sebep olan mekanik sebepler ve bu hata sonucunda ortaya çıkan manyetik ve mekanik sorunlar üzerine yapılan gerek test gerekse matematiksel analiz çalışmaları eşliğinde incelenmiştir. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalar ise, eksen kaçıklığı arızası sonucunda sistemin gerektiği gibi çalışamaması ya da daha ileriki safhalarda sistemin tamamen çalışamaz hale gelmesini engellemek amacıyla bu arızanın tanısı üzerine olmuştur. Önceden tahmin edilemeyen hataların yüksek maliyetlere sebep olacağı ve bu durumun iyi tasarlanan bir izleme metoduyla bertaraf edilebileceğini göstermek amacıyla 1970'li yıllardan itibaren elektrik makinelerinde eksen kaçıklığı sebebiyle ortaya çıkabilecek hataların önceden tespiti için farklı tanı yöntemleri kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır.

Ellison ve Yang [4], yankı yapmayan odada, küçük ve orta ölçekli elektrik makinelerini kullanarak, farklı eksen kaçıklığı mertebeleri için gerekli ses ölçümlerini almışlardır. Eksen kaçıklığının gürültü üzerindeki etkilerini incelemiş ve eksen kaçıklığının mertebesi ile gürültü arasındaki doğru orantıyı tespit etmişlerdir. Fakat bu tanı yöntemi, elektrik makinalarının çalıştığı ortamlar düşünülecek olursa, test yapılan özel ortamlar dışında yeterince uygulamaya yönelik bir yöntem olarak kabul görmemiştir.

Verma ve Natarajan [5] ise eksen kaçıklığının tespiti amacıyla hava aralığındaki manyetik alanın değişimini görmek için araştırma bobini kullanmışlardır. Fakat tahmin edileceği üzere bu yöntem de, endüstride kullanılan elektrik motorlarının hata tanısı amacıyla kullanılmak için hem uygulanabilir hem de ekonomik bir yöntem değildir.

1955 yılında Summers [6], elektriksel ve mekanik dengesizliklerin sebep olduğu yüksek frekanslı harmoniklerin oluşturduğu titreşimler hakkında çalışmalar yapmıştır. Ardından literatürde titreşimler yardımıyla eksen kaçıklığı hatasının tanısı üzerine de birçok çalışma yapılmıştır. Eksen kaçıklığı hatasının söz konusu olduğu bir motorda, makinenin akım ve gerilimi sinüsoidal olmayacak, zaman harmonikleri içerecektir. Zaman ve uzay harmoniklerinin etkileşimi ile akı da harmonikli olacak ve motor milinde titreşimli moment indüklenmesine sebep olacaktır. Cameron ve

Thomson [7], öncelikle, stator gövdesindeki titreşimlerin statik ve dinamik eksen kaçıklığı hatasının bir fonksiyonu olarak değiştiğini, titreşim işaretlerine bağlı olarak da harmoniklerin değişiminin gözlemlenebildiğini fark etmişlerdir. İlk sonuçların ardından da, statik ve dinamik eksen kaçıklığı hatasının tanısı için titreşim izleme yöntemini araştırmışlardır.

Gürültü ölçümleri, titreşim işaretleri ve araştırma bobini kullanımı ile eksen kaçıklığı hatası tanısının yapılmasının yanı sıra, elektromanyetik alan izleme, sıcaklık ölçümleri, kızılötesi tanıma, radyo frekansı (RF) salınımı gözlemi gibi yöntemler de, statik ve dinamik eksen kaçıklığı ve sebep olduğu UMP hatasının tanısı amacıyla literatürde yer bulmuşlardır. Ancak, titreşim ve akım işaretleri, bu hatanın tanısı amacıyla kullanılabilecek en uygun parametreler olarak seçilmiş ve uygulamalarda tercih edilmiştir. Motor akımının analizi, 1990'lı yıllarda hata tanısı amacıyla yapılan birçok araştırmaya konu olmuştur. 1996 yılında, eksen kaçıklığı ve UMP ile ilgili birçok çalışması bulunan Toliyat [8] tarafından yapılan çalışmada, akım analizi, yalnızca ölçümlerdeki kesinliği sebebiyle değil, sağlıklı ve hatalı durumların ayırt edilmesi konusunda da çok başarılı bir yöntem olarak gösterilmiştir.

Daha yakın geçmişte ise, konu üzerine yapılan çalışmaların çoğu, farklı özellikteki makineler için farklı sebeplerden ortaya çıkan, farklı mertebelerdeki dinamik ve statik eksen kaçıklığı hatalarının modellenmesi ve bu durum altındaki motor parametrelerinin incelenmesi üzerine olmuştur. Bu modellemeler de genellikle sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı çalışan programlar eşliğinde yapılmaktadır. Manyetik alan problemlerini SEY ile çözmeye dair ilk çalışmalar 1960 sonlarında yapılmıştır. Elektrik makinelerindeki ilk uygulama ise 1971 yılında senkron ve doğru akım makinelere Chari ve Silvester [9,10] tarafından uygulanmıştır. Asenkron makinelerin numerik analizi ise zamana bağlı, lineer olmayan alanların çözümünün getirdiği zorluklar sebebiyle 1980'lerin başına kadar ertelenmiştir. 1987 yılında Arkkio [11], asenkron motora dair SEY tabanlı numerik analiz yöntemleri ile manyetik alan ve devre eşitliklerini incelemiştir. 1998 yılında Thomson ve Barbour [12], eksen kaçıklığı bulunan bir makinenin SEY ile stator sargılarında indüklenen elektromanyetik kuvvetini (emk) hesaplayıp, zamana bağlı dalga şeklini elde etmişlerdir. Gerekli eşdeğer devre parametrelerini kullanarak akım dalga şeklini elde edip, FFT işaret işleyen bir program aracılığıyla, akım bileşenlerinin frekans ve

genliklerini bulmuşlardır. Elde edilen veriler ışığında, statik eksen kaçıklığı hatasının mertebesini tahmin etmeye çalışmışlardır.

1996 yılında Toliyat [8] Sargı Fonksiyonu Yaklaşımı' nı (WFA) kullanarak, gerekli endüktans değerlerini hesaplayarak statik eksen kaçıklığını modellemiştir. Aynı yöntemle 2000 yılında, Joksimovic [13] tarafından dinamik eksen kaçıklığı modellenmiş, akım spektrumu elde edilmiş ve sağlıklı durum ile karşılaştırılmıştır. 2002 yılında ise aynı yöntemi modifiye ederek kullanan, Nandi [14] statik ve dinamik eksen kaçıklığının bir arada olduğu, karma eksen kaçıklığı durumunu modellemiş ve sonuç olarak bu hatanın saptanması için yüksek frekanslı bileşenlerin yanı sıra düşük frekanslı bileşenlerin de incelenmesi gerektiğini göstermiştir.

2000'li yıllarda konu ile ilgili yapılan çalışmaların temelini, eksen kaçıklığı harmoniklerinin incelenmesi oluşturmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar göstermekte ki, eksen kaçıklığı hatası söz konusu iken dahi, bazı harmoniklerin oluşması, temel olarak rotor barı, stator oluk sayısı ve kutup sayısı ile ilgilidir. 2001 yılında Nandi [15] farklı yapısal özelliklere sahip asenkron motorlar için eksen kaçıklığı hatası kaynaklı harmonikleri incelemiştir. 2007 yılında Frauman [16], oluk harmoniklerinin eksen kaçıklığı bulunan bir motordaki UMP'ye etkileri üzerine çalışmalar yapmıştır.

2. ASENKRON MOTORLARA GENEL BAKIŞ

Asenkron motorlar, ekonomik olmaları, makul boyutları, sağlamlıkları ve düşük bakım maliyetleri gibi avantajlara sahip olmaları sayesinde endüstride en çok tercih edilen motor tipleridir. Genellikle, elektriksel ve mekanik anlamda çevresel birçok zor koşul altında çalışmaktadır. Bu zor koşullar, rotor ve statorda meydana gelebilecek arızalar sebebiyle asenkron motorların ömrünü etkilemektedir. Önemli bir konumda çalışmakta olan bir asenkron motorda meydana gelebilecek ani bir arıza büyük ekonomik kayıplara sebep olacaktır. Bu sebeple, hem bakım masraflarını en aza indirmek, hem de zamansız meydana gelebilecek bir arızaya mahal vermemek amacıyla, asenkron motorların işletme esnasında manyetik, elektriksel ve mekanik büyüklüklerinin gözlenmesi ve meydana gelebilecek arızaların daha önceden tespiti önemli bir konudur.

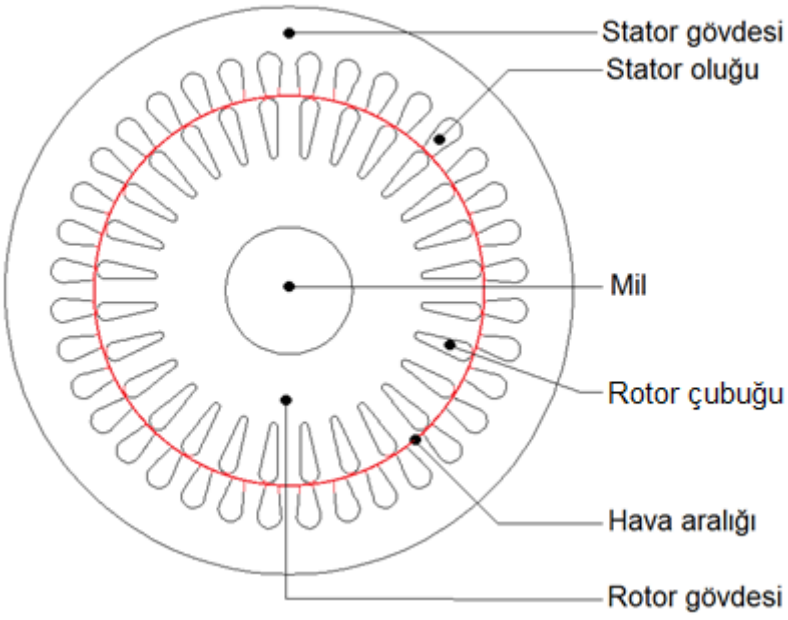
Tez çalışmasında, eksen kaçıklığı ve bu hatanın makine parametrelerinde sebep olacağı değişiklikler ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Eksen kaçıklığının detaylı olarak incelenmesinden önce, üzerinde çalışılacak olan sincap kafesli asenkron motorun yapısal özellikleri, çalışma prensipleri, manyetik, elektriksel ve mekanik büyüklükleri hakkında kısaca bilgi verilecektir.

2.1 Yapısal Özellikleri

Asenkron motorların, rotor yapılarına göre, bilezikli ve kısadevre kafesli olmak üzere iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Bilezikli asenkron motorların, gerek daha pahalı olması, gerekse fırça-bilezik sisteminden dolayı daha fazla bakım gerektirmeleri sebebiyle, kafesli asenkron motorlar endüstride daha çok rağbet görmektedir. Bu sebeple, tez çalışması için kafesli asenkron motor tercih edilmiştir.

Eksen kaçıklığı hatası, gerek üretim esnasında, gerekse motorun kullanıma hazırlanması aşamasında ve kullanımı esnasında ortaya çıkabilecek yapısal bir bozukluk sebebiyle meydana gelmektedir. Bu arızanın söz konusu olmadığı durumlarda, motor yapısı, birbirinden bağımsız stator, rotor ve genellikle 1 mm

civarında olup stator ve rotor arasında bulunan sabit hava aralığından oluşmaktadır. Kafesli asenkron motora ait kesit, Şekil 2.1' deki şemada gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Kafesli asenkron motor.

Rotor ve stator gövdeleri daha düşük girdap ve histerezis kayıplarına sebep olan, daha yüksek indüksiyon değerlerine sahip sac malzemeden yapılmaktadır. Stator üzerinde üç fazlı alternatif akım sargıları bulunmaktadır. Bu sargılar, uygun şekilde düzenlenerek motor istenilen kutup sayısında üretilir [17]. Kafesli makinenin rotoruna ise alüminyum veya bakır iletkenler yerleştirilip, rotor silindirinin her iki ucunda bu iletkenler, kısa devre halkaları ile kısa devre edilir. Küçük ve orta güçlü kafesli asenkron motorlarda imalatın kolaylığı, dolayısıyla maliyetin daha düşük olması sebebiyle, rotor iletkeni olarak genellikle alüminyum tercih edilmektedir. Bu sebeple tez çalışmasında rotor iletkenleri alüminyum olan asenkron motor incelenecektir.

2.2 Çalışma Prensipleri

Üç fazlı stator sargısının şebekeden beslenmesi sonucunda, bu sargılardan akacak akım, dönen manyetik alanı oluşturacaktır. Döner alanın oluşturduğu manyetik akı, makinenin çevresinde frekansla doğru, kutup sayısı ile ters orantılı olan senkron hızda dönecektir.

$$n_s = \frac{60f}{p} \tag{2.1}$$

Bu hızla dönen manyetik alan vektörü kısa devre edilmiş, durmakta olan rotor iletken düzlemlerinden geçerek Faraday yasasına göre bu iletkenlerde bir gerilim indükleyecektir. Kısa devre edilen rotor sargılarından rotor akımının akması sonucu Biot-Savart yasası gereğince oluşan kuvvetler rotorun dönmesini ve hızlanmasını sağlayacaktır. Bu hızlanma, rotor hızının senkron hıza çok yakın fakat senkron hızdan küçük olduğu mertebelerde, sürekli olarak aynı kalacağı hız değerine kadar devam edecektir.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{2.2}$$

Makinenin bu sürekli çalışma noktasına gelmesi ise, rotorun hızlanması sonucu döner alan ile arasındaki hız farkının azalması, manyetik akının rotor iletken düzlemlerinden daha seyrek geçmesi, indüklenen gerilimin ve dolayısıyla rotor iletkenlerinde akacak akımın azalması, bunun sonucu olarak rotora etkiyen kuvvetlerin azalması sürecini takip etmektedir.

2.3 Manyetik, Elektriksel ve Mekanik Açıdan Asenkron Motor

Elektrik makinalarının ihtiva ettiği tüm elektromanyetik olaylar Maxwell denklemleri ile açıklanabilmektedir. Bu genel bağıntılar makine içindeki her nokta ve her hangi bir zaman dilimi için geçerlidir [18]. Asenkron motor, manyetik, elektriksel ve mekanik açıdan bu denklemler aracılığıyla tanımlanacaktır.

Elektriksel alan (**E**) ve manyetik alan (**H**) vektörleri, bulundukları ortamda, akım yoğunluğu (**J**), elektrik akı yoğunluğu (**D**) ve manyetik alan yoğunluğu (**B**) vektörlerini meydana getirir. Elektriksel iletkenlik (σ), dielektrik sabiti (ε) ve manyetik geçirgenlik (μ) gibi elektromanyetik parametrelerle alanlar ve alan yoğunlukları arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \tag{2.3}$$

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} \tag{2.4}$$

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} \tag{2.5}$$

Akı ve akım yoğunluklarının yanı sıra, bu vektörlerin belirli bir alandaki integrallerinin alınması ile skaler olan manyetik akı (Φ), elektrik akısı (Ψ) ve akım (I) değerleri tanımlanmaktadır.

$$\Phi = \int_S \boldsymbol{B}.d\boldsymbol{S} \tag{2.6}$$

$$\Psi = \int_S \boldsymbol{D}.d\boldsymbol{S} \tag{2.7}$$

$$I = \int_S \boldsymbol{J}.d\boldsymbol{S} \tag{2.8}$$

Manyetik alan ve akım yoğunluğu arasındaki ilişki ise Ampere yasası olarak bilinen (2.9)'da gösterilen Maxwell denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\nabla x \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} \tag{2.9}$$

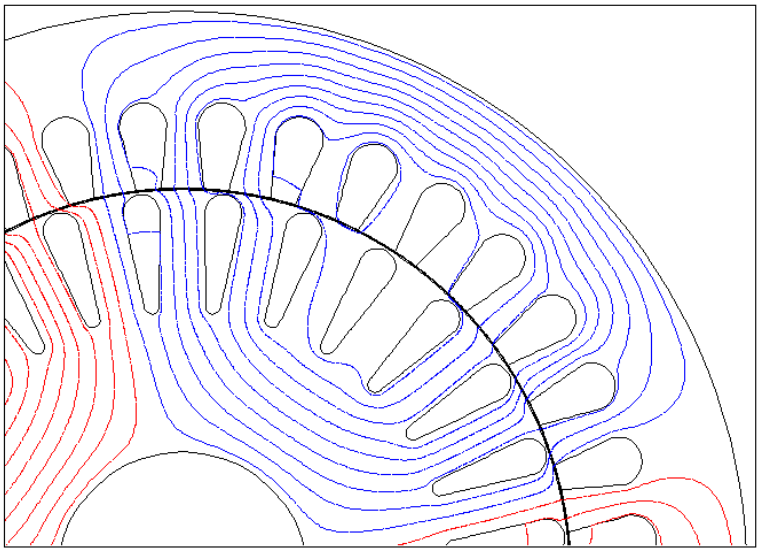
Bu ifade elektrik makinelerinde genellikle integral formunda kullanılmaktadır.

$$\oint \boldsymbol{H}.d\boldsymbol{l} = \Sigma I = F \tag{2.10}$$

Toplam akım ifadesi amper-sarım ile gösterilen manyeto-motor kuvvete (MMK) eşittir. Elektrik devresinde kaynağın akım akıtması gibi, mmk de manyetik devrede akıyı oluşturmaktadır.

Maxwell denklemlerinde, kapalı bir yüzey için (2.6) eşitliği sıfıra eşit olmaktadır.

$$\oint_S \boldsymbol{B}.d\boldsymbol{S} = 0 \tag{2.11}$$



Şekil 2.2 : Manyetik eş akı eğrileri.

Asenkron motorda bu kapalı yüzey rotor silindiridir ve manyetik akı periyodik olarak rotora girer daha sonra tekrar hava aralığından geçerek statorda yolunu tamamlar, böylece gerilim indüklenmesine sebep olacak akı halkalanması meydana gelmektedir. Şekil 2.2' de görüldüğü gibi akı çizgileri yollarını statorda başlayıp, statorda tamamlamaktadırlar.

Faraday yasası olarak bilinen bir diğer Maxwell denklemi ise rotorda indüklenen gerilim eşitliğini açıklamaktadır. Rotora giren ve zamanla değişen akı rotor iletkenlerinde (2.12) ve (2.13)'de gösterildiği gibi gerilim indüklenmesini sağlayacaktır.

$$\nabla \, x \, \boldsymbol{E} \, = \, -\frac{d\boldsymbol{B}}{dt} \tag{2.12}$$

$$e \, = \, -\frac{d\Phi}{dt} \tag{2.13}$$

Sarım sayısı da hesaba katılacak olursa toplam akı yani akı halkalanması (λ) için indüklenen gerilim (2.14)' de gösterildiği gibidir.

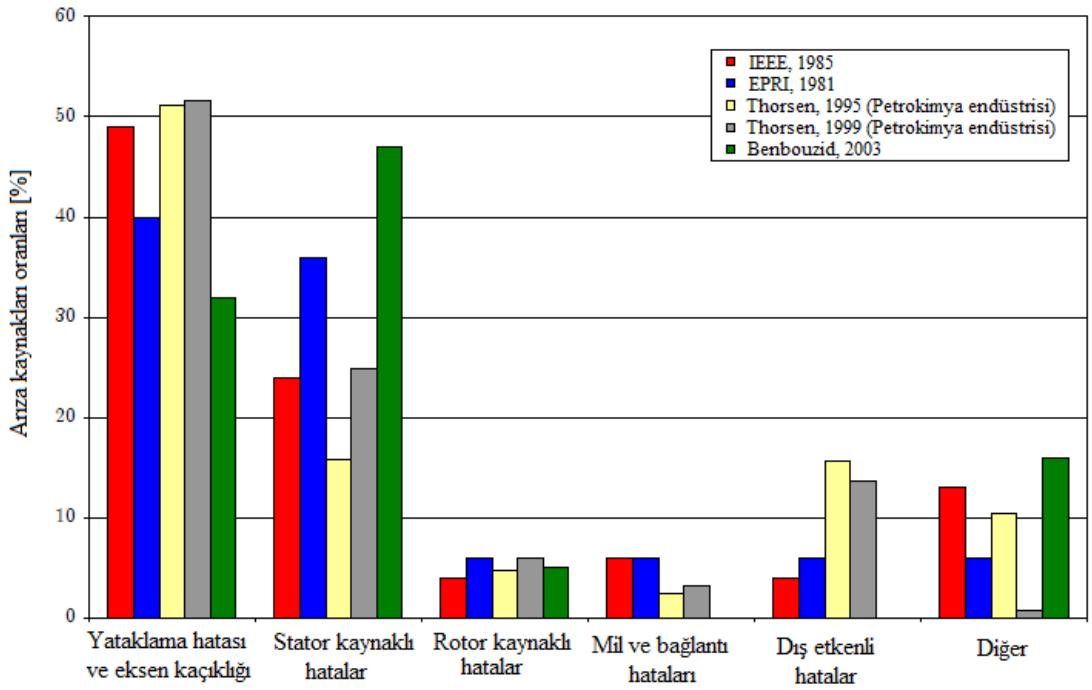
$$e \, = -\frac{d\lambda}{dt} \tag{2.14}$$

3. ASENKRON MOTORLARDA EKSEN KAÇIKLIĞI

3.1 Asenkron Motor Arızalarına Genel Bakış

Eksen kaçıklığı ve bu durumun asenkron motor parametrelerine etkisinin ayrıntılı olarak incelenmesinden önce asenkron motorlarda hangi arızaların meydana geldiği ve bu hataların ne şekilde ortaya çıktığı hakkında bilgi verilecektir. Asenkron motor arızaları; sargıların dengeli sarılmaması veya kısa devre olması, rulman arızaları, sürtünme, rotor dengesizliği, gevşeklik ve rotor çubuğunun kırılması gibi elektriksel ve mekanik kaynaklı olabilir. Bu arızalar genel olarak aşağıda belirtildiği gibi dört ana başlık altında sınıflandırılabilir:

- Yataklama hatası ve eksen kaçıklığı,
- Stator kapsamlı hatalar,
- Rotor içerikli hatalar,
- Dış etkenli hatalar (motora bağlı elemanlardan kaynaklanan).



Şekil 3.1 : Asenkron motor arıza kaynaklarının araştırma sonuçlarına göre Oranları [19].

Asenkron motor arızalarının hangi sebepten ne sıklıkta yaşandığına dair farklı uygulama alanları için pek çok araştırma yapılmıştır. Sprooten tarafından bu araştırma sonuçlarının bir kısmının derlendiği Şekil 3.1' de, asenkron motor arızalarına sebep olan durumların oranları karşılaştırılmıştır [19].

Araştırma sonuçlarından da açıkça görüldüğü gibi en sık karşılaşılan arızalar yataklama hatası ve eksen kaçıklığı kaynaklıdır.

3.1.1 Arızalara sebep olan etkenler

Stator, rotor, harici bileşenler ve yataklama kaynaklı asenkron motor arızalarının ortaya çıkmasının sebepleri; mekanik, elektriksel, manyetik ve ısıl zorlanmalar olmak üzere dört ana başlık altında açıklanabilir.

3.1.1.1 Mekanik zorlanmalar

- Rotor yataklarının dayanıklılığını yitirmesi sonucu (metal yorulması kaynaklı) yüzeyde ince çatlaklar oluşabilir ve bu çatlaklar zamanla yayılıp parçaların dağılmasına yol açabilir.
- Sargı sıcaklıklarının artıp azalması sebebiyle izolasyonda genleşmeler ve daralmalar meydana gelecektir. Bu döngü sebebiyle izolasyonda çatlaklar oluşabilir ve sargı zarar görebilir.
- Merkezkaç kuvveti etkisiyle oluşan mekanik gerilmeler sonucunda rotor çubukları kırılabilir.

3.1.1.2 Elektriksel Zorlanmalar

- Anma değerinden daha yüksek gerilim veya daha yüksek *dV/dt* (kondansatör ihtiva eden anahtarlama elemanı, devreyi açıp-kapama veya Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) kullanan sürücüler, …) izolasyonun bozulmasına yol açacaktır [19].
- İzolasyon malzemesinin içine istenmeyen maddeler veya nemin sızması sonucu, faz ve toprak arası küçük akımlar akacaktır, bu da malzemenin akımın aktığı yol boyunca yanmasına sebep olacaktır.
- Sargıların dengesiz sarılması, kısa devre durumu, şebekedeki elektriksel dengesizlik ve sürücü devrelerindeki arızalar da elektriksel zorlanmalara ve asenkron motor arızalarına sebebiyet verecektir.

3.1.1.3 Manyetik zorlanmalar

- Az da olsa hava aralığı her noktada eşit değilse, hava aralığının daha küçük olduğu bölgede dengesiz manyetik çekme kuvveti oluşacaktır ve bu kuvvet eksen kaçıklığını artırıcı etki yapacaktır. Sargı akımı aynı olmasına rağmen, manyetik akı yolu, dolayısıyla manyetik hava aralığı relüktans değeri azalacak, böylece daha fazla akı ve dengesiz çekme kuvveti ortaya çıkacaktır.

3.1.1.4 Isıl zorlanmalar

Asenkron motorlar anma sıcaklığında çalıştırıldıkları takdirde, izolasyonları ömürlerini en uzun tutacak şekilde tasarlanmaktadır. Ancak çalışma sıcaklığı, tasarlanan ve standartlar doğrultusunda tayin edilen sıcaklığın üzerine çıktıkça, motor ömrü azalacaktır. Sıcaklık artışına sebep olan durumlar ise aşağıdaki gibidir:

- Gerilim dengesizlikleri,
- Kısa aralıklarla motorun kalkış yapması,
- Aşırı yüklenme,
- Yetersiz soğutma,
- Yüksek ortam sıcaklığı.

3.1.2 Arızaların motor üzerindeki etkileri

Asenkron motor dinamik olarak incelenecek olursa; stator akımı, manyetik akı, indüklenen gerilim, rotor çubuklarında akan akım, meydana gelen kuvvet, devir sayısı ve moment gibi tüm parametrelerinin birbiriyle bağıntılı olduğu görülecektir. Yukarıda kaynaklarına göre ayrı ayrı incelenen arıza durumları da hangi kaynaklı olursa olsun motorun tüm parametrelerine etki edecektir. Bu etkiler bazen mevcut olan hatanın etkisini artırırken, bazı durumlarda da başka arızaların tetiklenmesine sebep olacaktır. Arızaların motor üzerindeki etkileri şu şekildedir;

- Yataklama hatası kaynaklı arıza durumlarında;
    - Açıkça görüldüğü üzere, eksen kaçıklığının küçük seviyeleri dahi, dengesiz manyetik çekme kuvveti sebebiyle daha tehlikeli boyutlara ulaşabilir. Sonuç olarak rotor ve statorun birbirine sürtünmesi tehlikesi meydana gelecektir.
    - Rotorun salınımlı hareketlerinin sebep olduğu, belirli frekanslarda mekanik titreşimler ortaya çıkacaktır.

- Hava aralığı genişliğinin değişken olması ortak endüktans değerinin dalgalanmasına yol açacaktır. Bu durum da akımın harmonik bileşenlerinin genliklerine etki edecektir.

- Stator kaynaklı arıza durumlarında;
  - İzolasyonun bozulması, izolasyon boşluklarında boşalma akımlarının akmasına sebep olacaktır. Bu durum da, motor uçlarında gerilim sıçramalarına ve gerilim düşmelerine yol açacaktır.
  - Ayrıca bu kısmi boşalmalar, ozon ve nitrojen-oksit bileşenlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu bileşenlerin nemli ortamda izolasyona daha çok zarar verecek nitrik-asiti oluşturmaktadır [20].
- Rotor kaynaklı arıza durumlarında;
  - Herhangi bir rotor barı kısmen ya da tamamen kırıldığında, akım bitişik barlardan akacaktır. Bu barlarda akan akım normal duruma göre daha fazla olacağından, kayıplar artacaktır.
  - Ayrıca bitişik barlardan birinde akı yoğunluğu artarken, diğerinde aksine azalacaktır. Bu durumda da normal duruma göre demir kayıplarında artış gözlemlenecektir [20].
  - Her iki durumda da kayıplar arttığı için sıcaklık da artacaktır.

3.1.3 Arıza tanısı için izleme yöntemleri

Elektrik makinelerinde durum izleme son yıllarda üzerinde birçok çalışma yapılan bir konudur. Daha detaylı bilgiler eşliğinde daha hızlı sonuçlar alınabilecek birçok çalışmanın da konusu olacaktır. Bu yöntemlerin başlıcaları; mekanik, kimyasal, sıcaklık, elektriksel ve manyetik başlıkları altında şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Mekanik yöntemler;
  - Titreşim izleme: Her arıza, asenkron motorda bir titreşim üretmektedir. Bu titreşimin frekans spektrumu sayesinde arızanın tipi belirlenmektedir. Titreşim işaretlerinin izlenmesi amacıyla, örneğin piezo-elektrik algılayıcılar kullanılmaktadır [19].
  - Hız değerlerinin izlenmesi: Hız değerlerinde meydana gelen dalgalanmaların izlenmesi ile hata tanısı yapılmaktadır.
  - Gürültü izleme
- Elektriksel ve manyetik yöntemler;

- Eksenel akı izleme: Motor miline monte edilen araştırma bobini ile tespit edilen eksenel akı değerleri arıza tanısı amacıyla kullanılmaktadır.
- Hava aralığı akısı izleme: Araştırma bobini bu yöntemde stator dişlerinin birine monte edilir ve bobinde indüklenen gerilim değerlerinin tespiti ile hata tanısı yapılmaktadır.
- Motor akım işaretlerini izleme
- Motor güç işaretlerinin analizi
- Gerilim işaretlerinin analizi
- Moment işaretlerinin analizi
- Empedans hesabı ile hata tanısı [21,22].

- Kimyasal yöntemler;
  - Soğutma amaçlı kullanılan yağın analizi (yatak aşınması veya sargılarda oluşan bozulmalardan dolayı parçacık içermesi durumunun incelenmesi)
  - Ayrıca soğutma amaçlı kullanılan hava da izolasyonda meydana gelen bozulmalar sonucu ortaya çıkan karbon-monoksit tanısı için analiz edilebilir.
- Sıcaklık izleme: Arızalar sonucu meydana gelen ısı artışı sayesinde hata tanısı yapılabilmektedir. Bu amaçla, ısıl sensörler ya da kızılötesi kameralar kullanılmaktadır.

3.2 Eksen Kaçıklığı

Asenkron motorların elektromanyetik açıdan en üst düzey performansla çalışması için hava aralığı genişliğinin mekanik faktörler göz önünde bulundurularak olabildiğince küçük tasarlanması gerekmektedir. Bu uzunluk genelde milimetre mertebelerinde olmaktadır. Hava aralığının bu denli küçük mertebelerde üretilmesi dikkate alındığında, üretim aşamasında ya da işletmeye alınması esnasında meydana gelebilecek çok küçük bir kaymanın sebep olacağı mekanik ve manyetik sorunlar kaçınılmaz olacaktır. Bu doğrultuda, asenkron motor arızalarının önemli bir kısmının eksen kaçıklığı hatası ile bağlantılı olduğu gerçeği yadsınamaz.

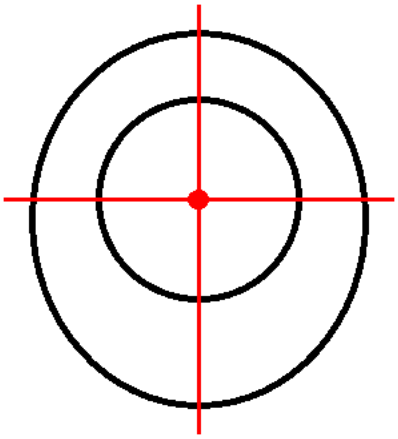
Eksen kaçıklığı, hava aralığının stator ve rotor arasında her yerde eşit bir şekilde dağılmaması durumudur. Statik, dinamik ve bu iki durumun bir arada bulunduğu karma eksen kaçıklığı olmak üzere üç farklı şekilde ortaya çıkabilir.

3.2.1 Eksen kaçıklığının sebepleri

Asenkron motorlarda hava aralığının homojen bir şekilde olmayışı, genel itibariyle, tasarım özellikleri ve öncelikleri, üretim süreci ve işletme şartlarına bağlıdır. Üretim esnasında toplam eksen kaçıklığı mertebesinin %10'u aşmadığı durumlar, hatanın ihmal edilebilir boyutlarda kabul edilmesi ile sonuçlanmaktadır. Ancak çoğu üretici, dengesiz manyetik çekme kuvvetini en küçük mertebelerde tutup, titreşim ve gürültüyü en aza indirmek için, eksen kaçıklığını olabildiğince küçük mertebelerde tutmaya çalışmaktadır. Çünkü eksen kaçıklığı hatası, sebep olduğu dengesiz manyetik çekme kuvveti sonucunda, kartopu etkisi gibi, sürekli daha fazla büyümektedir.

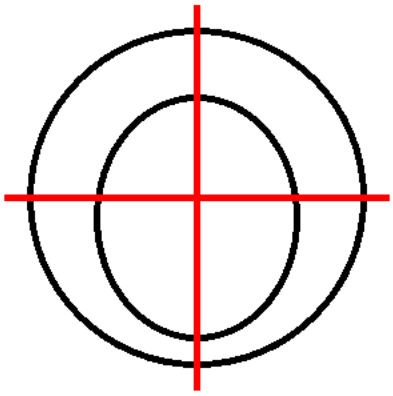
Asenkron motorun eksen kaçıklığı ile sonuçlanan, asimetrik çalışmasına sebep olan etkenler ise şu şekilde gösterilebilir [23,24];

- Statorun oval şeklinde olması; rotor kendi merkezinde dönmesine rağmen, statorun ovalliği sebebiyle rotor ve stator merkezlerinin çakışmaması sonucunda eksen kaçıklığı oluşmaktadır.



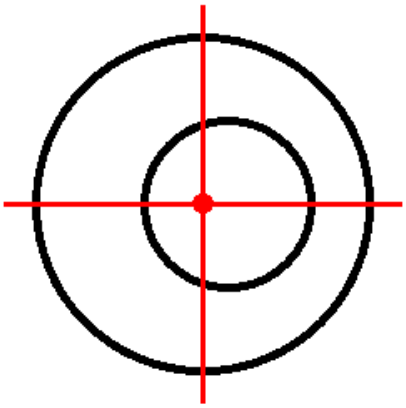
Şekil 3.2: Oval stator.

- Rotor yüzeyinin oval şeklinde olması; rotorun şekli sebebiyle, hava aralığının her yerde sabit olmaması ve hava aralığının en küçük olduğu bölgenin rotorla birlikte dönmesi sebebiyle eksen kaçıklığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.3: Oval rotor.

- Rotorun, stator merkezine düzgün bir şekilde yataklanamaması;

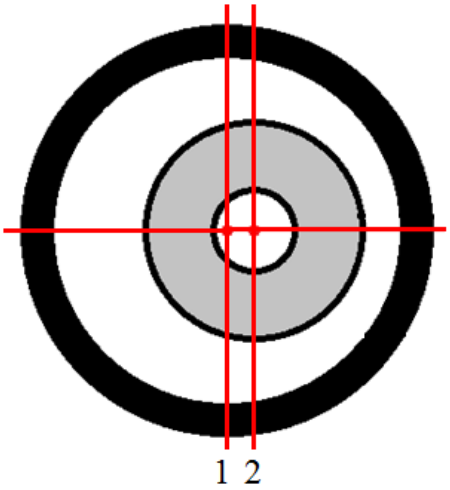


Şekil 3.4: Yanlış yataklama.

- Dengesiz manyetik çekme kuvvetleri sebebiyle milin eğilmesi,
- Yatakların aşınmasıyla,
- Tasarım ve üretim esnasındaki toleranslar sebebiyle eksen kaçıklığı meydana gelebilir.

3.2.2 Eksen kaçıklığının çeşitleri

Eksen kaçıklığı sebebiyle, hava aralığı genişliği motorun bir tarafında daha küçük iken, bir tarafında daha büyük olacaktır. Hava aralığı genişliğinin, motor pozisyonuna bağımlı ya da bağımsız olması durumları gözetilerek eksen kaçıklığı; statik, dinamik ve bu iki durumun bir arada bulunduğu karma olmak üzere üç farklı başlık altında incelenmektedir. Eksen kaçıklığının bu üç farklı tipi, Şekil 3.5 yardımıyla açıkça ifade edilecektir.

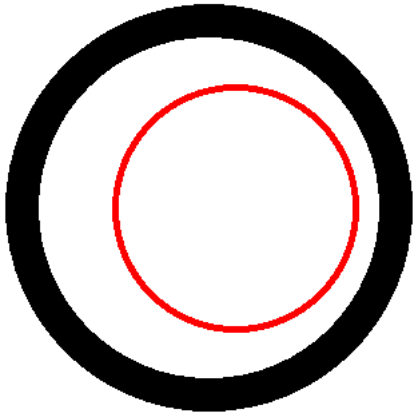


Şekil 3.5: Eksen kaçıklığı.

Statorun birinci eksende, rotorun ise ikinci eksende döndüğü düşünülürse, sağlıklı bir motorda birinci ve ikinci eksen çakışık konumdadır. Statik eksen kaçıklığı (SEK), ikinci eksenin dönme ekseni olduğu durumda ortaya çıkacaktır. Birinci eksenin dönme ekseni olduğu durum ise dinamik eksen kaçıklığı (DEK) ortaya çıkacaktır. Statik ve dinamik eksen kaçıklığının bir arada bulunduğu karma eksen kaçıklığı ise dönme ekseninin birinci ve ikinci eksen arasında herhangi bir yerde olması durumunda söz konusu olacaktır [25].

3.2.2.1 Statik eksen kaçıklığı

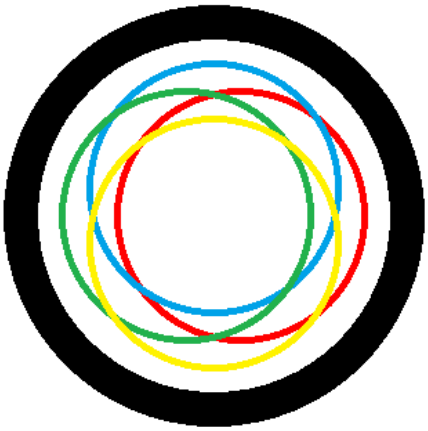
Statik eksen kaçıklığı yukarıda belirtilen, statorun oval olması durumu ve rotorun yanlış yataklanması gibi durumlarda ortaya çıkabilir. Hava aralığının en küçük ve en büyük olduğu yerler rotorun kendi ekseni etrafında dönmesi sebebiyle sabit kalmaktadır.



Şekil 3.6: Statik eksen kaçıklığı.

3.2.2.2 Dinamik eksen kaçıklığı

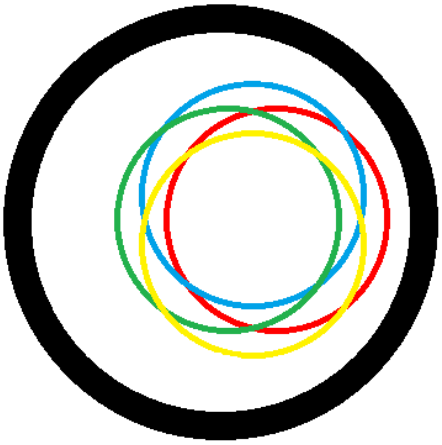
Dinamik eksen kaçıklığı ise milin bel vermesi, yatakların aşınması gibi durumlarda ortaya çıkabilmektedir. Rotorun, statorun dönme ekseni etrafında dönmesi sebebiyle, rotor pozisyonu ve hava aralığı statik eksen kaçıklığının aksine sabit olarak kalmayacaktır. Bu durum Şekil 3.7' de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.7: Dinamik eksen kaçıklığı.

3.2.2.3 Karma eksen kaçıklığı

Dengesiz manyetik çekme kuvveti sebebiyle genellikle statik ve dinamik eksen kaçıklığı durumları bir arada bulunur. Bu durumda hava aralığı, hem dinamik eksen kaçıklığının sonucu olarak rotor pozisyonuna bağlı olarak sabit kalmayacaktır, hem de bu değişken durum statorun bir tarafına daha yakın olarak gerçekleşecektir. Şekil 3.8 ile hava aralığının motorun karma eksen kaçıklığı barındırdığı durumda nasıl değiştiği açıkça görülmektedir.



Şekil 3.8: Karma eksen kaçıklığı.

3.2.3 Eksen kaçıklığının motor üzerindeki etkileri

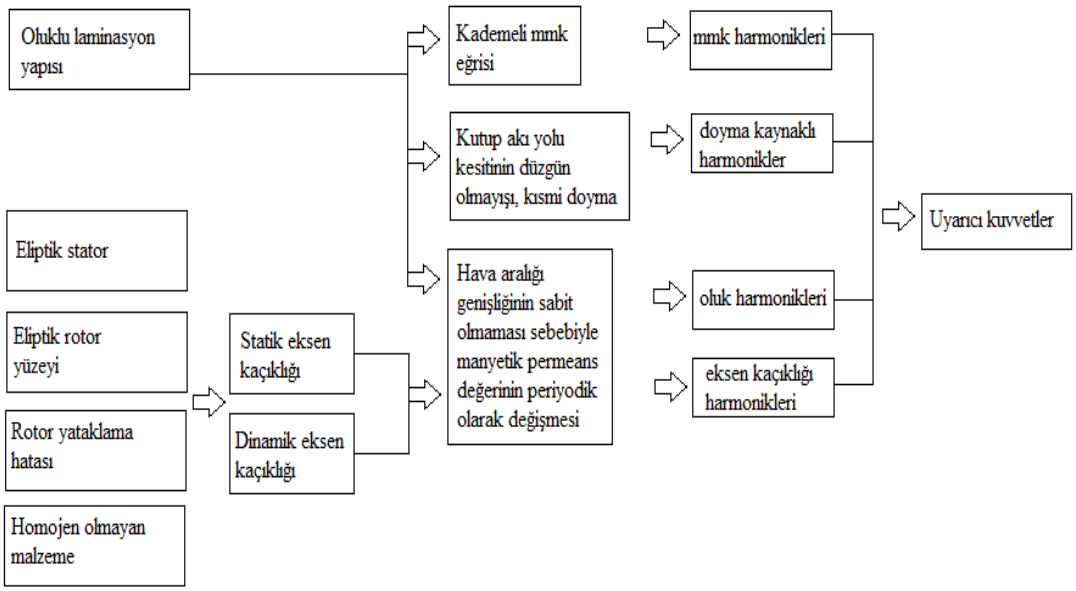
Eksen kaçıklığının asenkron motor üzerindeki etkileri diğer bölümlerde benzetim ve deney sonuçları yardımıyla ayrıntılı olarak incelenecektir. Bu etkiler, genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

- Dengesiz hava aralığı gerilimi ve stator akımı,
- Hava aralığı akı yoğunluğu harmonik bileşenlerin genliklerinde artış,
- Moment darbelerinde artış,
- Ortalama moment değerinde azalma,
- Kayıpların artması sebebiyle verimde azalma,
- Aşırı ısınma,
- Gürültü seviyesinde artış.

4. ASENKRON MOTOR PARAMETRELERİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

Asenkron motorda elektromekanik enerji dönüşümünün gerçekleşmesi için en önemli adım, döner manyetik alanın oluşmasıdır. Bu manyetik akının hava aralığında oluşması için, stator oluklarına yerleştirilen sargılardan akım akması gerekmektedir. Oluklu stator yapısının iki önemli etkisi vardır. Bunlardan ilki, MMK karakteristiğinin stator çevresi boyunca yoğun harmonik bileşen içermesidir. İkinci etki ise, stator çevresi boyunca hava aralığı genişliğinin homojen bir şekilde dağılmamasıdır. Manyetik devreye ait toplam direnç değerinin neredeyse tamamına tesir eden hava aralığı, rotorun pozisyonuna göre periyodik olarak değişmektedir.

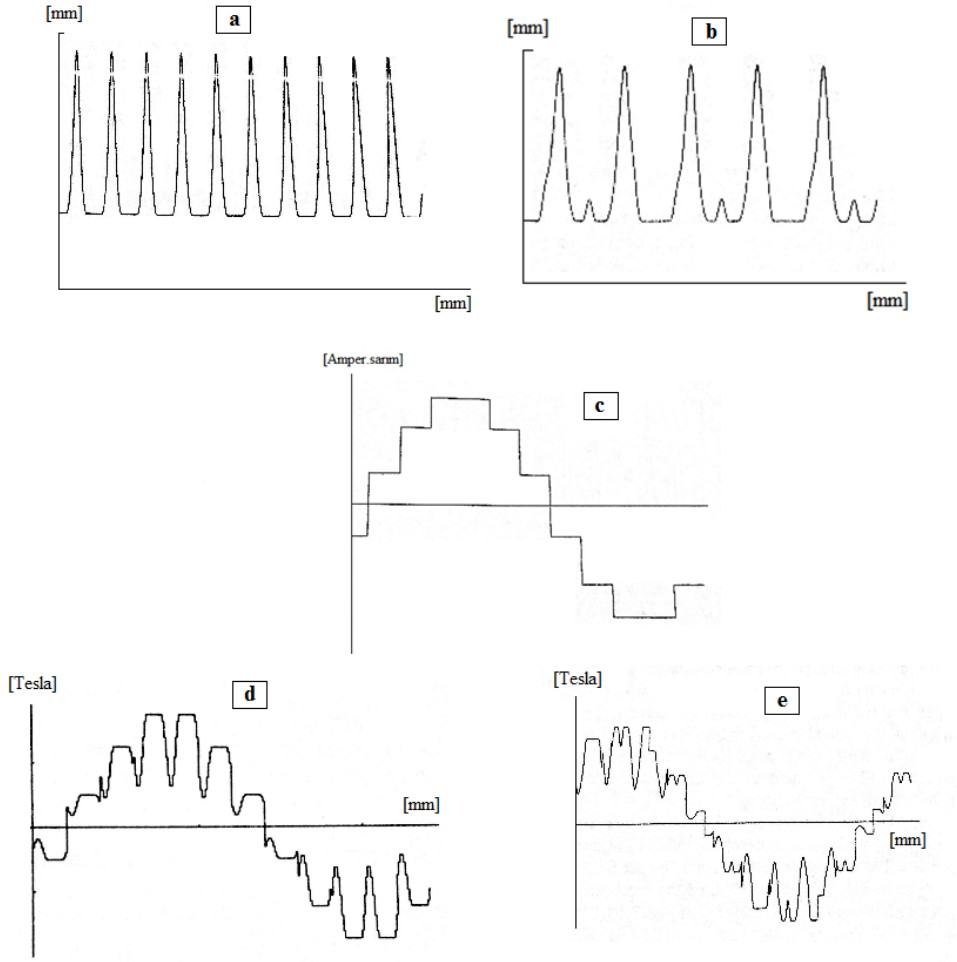
Asenkron motorda hava aralığı oldukça küçük boyutlarda tasarlanmaktadır. Ancak çok küçük bir kayma dahi, hava aralığı permeans değerinde önemli bir değişime sebep olacak ve harmoniklerin artmasına yol açacaktır. Hava aralığı akı yoğunluğuna ait bu harmonik bileşenler mekanik açıdan kendisini gösterecek kuvvetlerin indüklenmesine sebep olacaktır. Elektromanyetik kaynaklı bu kuvvetlerin oluşması süreci Şekil 4.1 ile özetlenmektedir.



Şekil 4.1: Elektromanyetik kaynaklı kuvvetlerin oluşum süreci [26].

4.1 Hava Aralığı Akı Yoğunluğu

Etkin hava aralığı genişliği, stator ve rotorun oluklu yapıları doğrultusunda Şekil 4.2a ve 4.2b' de görüldüğü gibi değişim göstermektedir. Bu hava aralığı genişliği ile doğru orantılı olan permeans eğrisi ve ampersarım eğrisinin etkileşimi sonucunda hava aralığı akı yoğunluğu eğrisi Şekil 4.2d ve 4.2e' de gösterildiği gibi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.2: Hava aralığı akı yoğunluğu oluşumu: (a) Sadece stator oluklu olduğunda hava aralığı genişliği. (b) Stator ve rotor oluklu olduğunda hava aralığı genişliği. (c) mmk eğrisi. (d) Sadece stator oluklu olduğunda hava aralığı akı yoğunluğu. (e) Stator ve rotor oluklu olduğunda hava aralığı akı yoğunluğu [18].

Hava aralığı akı yoğunluğu (4.1)' de görüldüğü gibi konuma ve zamana bağlı olarak elde edilir.

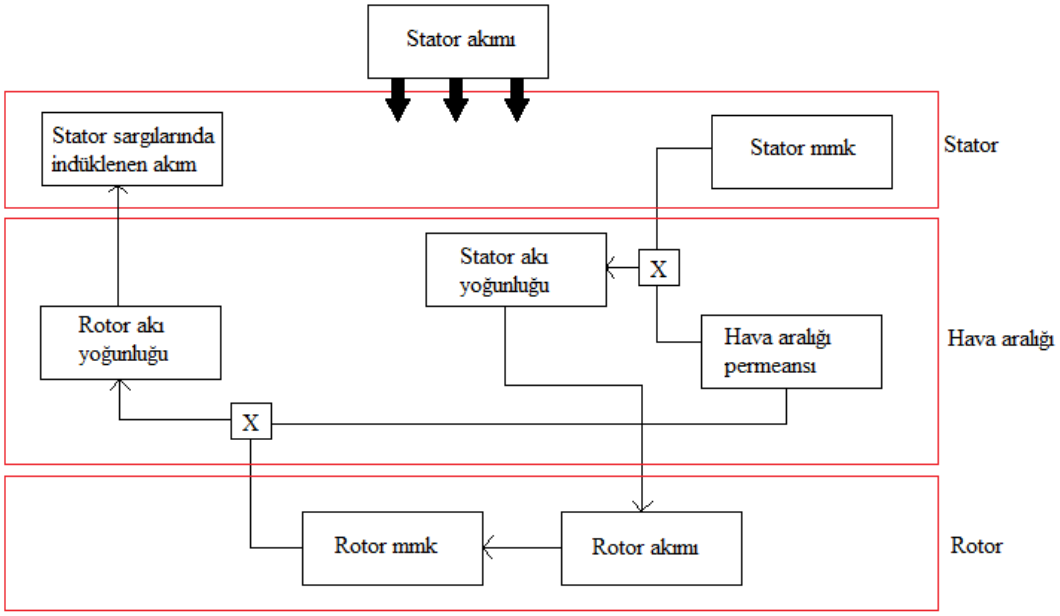
$$\boldsymbol{B}(x,t) = \boldsymbol{F}(x,t).\boldsymbol{G}(x,t) \qquad \textbf{(4.1)}$$

B: manyetik akı yoğunluğu

F: mmk

G: permeans (manyetik iletkenlik)

Hava aralığı akı yoğunluğunun hesaplanması süreci, Şekil 4.3' de gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Hava aralığı akı yoğunluğunun hesaplanması süreci [27].

4.1.1 MMK hesabı

Hava aralığı boyunca ortaya çıkan MMK;

$$\boldsymbol{F}(x,t) = F_{1p}(x,t) + \boldsymbol{F_1}(x,t) + \boldsymbol{F_2}(x,t) \qquad \textbf{(4.2)}$$

F_{1p}, MMK temel bileşen olup, aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\boldsymbol{F_{1p}}(x,t) = \frac{S_1.z_s.\sqrt{2}.I_m.\xi_p}{2p\pi}\, e^{j(px-\omega_1 t-\varphi_m)} = F_{1p}.\, e^{j(px-\omega_1 t-\varphi_m)} \qquad \textbf{(4.3)}$$

S_1: stator oluk sayısı

z_s: bir oluktaki iletken sayısı

$\mathbf{I_m}$: boştaki stator akımı

p: kutup çifti sayısı

φ_m: boşta akıma ait faz açısı

ξ_p: temel bileşen için sargı faktörü

F_1, stator MMK uzay harmoniklerine karşılık gelmektedir ve aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$\boldsymbol{F_1}(x,t) = \sum_{\mu} F_{1p} \frac{I_1}{I_m} \frac{\xi_\mu}{\xi_p} \frac{1}{\mu} . e^{j(\mu p x - \omega_\mu t - \varphi_\mu)} = \sum_{\mu} F_{m_\mu} e^{j(\mu p x - \omega_\mu t - \varphi_\mu)} \quad \textbf{(4.4)}$$

$\mu = 2mg \pm 1$: uzay harmoniği mertebesi

m: faz sayısı

g = 0, 1, 2, …

$\omega_\mu = \omega_1$

$\varphi_\mu = \varphi_1$

F_2 ise, kafesli asenkron motorlarda, rotor MMK uzay harmoniklerini ifade etmekte ve denklemi aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{F_2}(x,t) &= \sum_{\lambda} -(-1)^g \frac{\sqrt{2} m I_1 \cos\varphi_1 N_1 \xi_\lambda \xi_p}{p\lambda\pi} e^{j(\lambda p x - \omega_\lambda t - \varphi_\lambda)} \\ &= \sum_{\lambda} F_2 e^{j(\lambda p x - \omega_\lambda t - \varphi_\lambda)} \end{aligned} \quad \textbf{(4.5)}$$

$\lambda = \frac{gS_2}{p} + 1$: rotor uzay harmoniği mertebesi

I_1: stator akımı

φ_1: stator akımı faz açısı

N_1: stator faz başına sarım sayısı

ξ_λ: λ. harmonik için sargı faktörü

$\omega_\lambda = \omega_1 \left(\frac{gS_2}{p} (1 - s) + 1 \right)$

$\varphi_\lambda = \varphi_1 + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{I_m}{I_{sc}} s_{max}}{s} \right)$

s: kayma

s_{max}: maksimum momente ait kayma değeri

I_{sc}: kısa devre akımı

S_2: rotor bar sayısı

4.1.2 Permeans hesabı

Permeans hesabı için, stator olukları, rotor barları, doyma ve eksen kaçıklığı dikkate alınmaktadır. Doyma etkisi ihmal edilecektir.

$$G(x,t) = G_0 + G_1(x) + G_2(x,t) + G_e(x,t) + G_{sat}(x,t) \quad \textbf{(4.6)}$$

G_0, ortalama hava aralığı permeans değeri olarak ifade edilmektedir ve gerçek hava aralığı değerinin Carter faktörü (k_c) ile çarpımı sayesinde hesaplanmaktadır.

$$G_0 = \frac{\mu_0}{\delta_g k_{c1} k_{c2}} \quad \textbf{(4.7)}$$

δ_g: hava aralığı genişliği

k_{c1}: statorun oluklu olduğu durumdaki Carter faktörü

k_{c2}: rotorun oluklu olduğu durumdaki Carter faktörü

G_1, statorun oluklu olduğu durumdaki permeans harmoniklerini ifade etmektedir ve şu şekilde hesaplanır.

$$G_1(x) = G_0\, k_{c1} \sum_{g=1}^{\infty} -(-1^g) \frac{\sin g\pi}{g\pi} \frac{2(k_{c1}-1)}{k_{c1}} e^{jgS_1 x} \quad \textbf{(4.8)}$$

G_2, rotorun oluklu olduğu durumdaki permeans harmoniklerini ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$G_2(x,t) = G_0\, k_{c2} \sum_{g=1}^{\infty} -(-1^g) \frac{\sin g\pi}{g\pi} 2 \frac{(k_{c2}-1)}{k_{c2}} e^{jgS_2(x-\omega t)} \quad \textbf{(4.9)}$$

G_e, eksen kaçıklığı durumundaki permeans harmoniklerini ifade eder ve şu şekilde elde edilir.

$$G_e(x,t) = \frac{\mu_0 e}{\delta_g{}^2 k_{c1}{}^2 k_{c2}{}^2} e^{j(x-\omega_e t-\varphi_e)} \quad \textbf{(4.10)}$$

e: eksen kaçıklığı mertebesi

ω_e: statik eksen kaçıklığı durumunda 0'a eşit, dinamik eksen kaçıklığı durumunda ise $\left(\frac{\omega_1}{p}(1-s)\right)$ şeklinde hesaplanmaktadır.

4.1.2.1 Carter faktörü

Hava aralığı genişliği stator ve rotor olukları sebebiyle sabit değildir. Dolayısıyla, permeans ve hava aralığı akı yoğunluğu değerleri de sabit olmayacaktır. Her iki değerin hesaplanmasında da ortalama değerin bulunması amacıyla düzeltme katsayısı olarak Carter faktörü kullanılır [23]. Bu katsayı deneysel olarak elde edilmiştir. Carter' in bulduğu bu katsayı aşağıdaki denklemden faydalanarak hesaplanabilir.

$$k_c = \frac{t_d}{t_d - \gamma \delta_g} \tag{4.11}$$

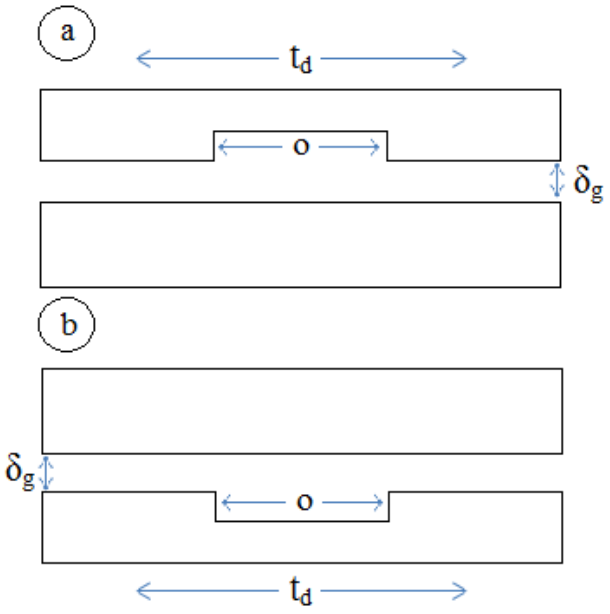
$$\gamma = \frac{4}{\pi}\left(\frac{o}{2\delta_g} tan^{-1}\left(\frac{o}{2\delta_g}\right) - ln\sqrt{\left(1+\left(\frac{o}{2\delta_g}\right)^2\right)}\right) \tag{4.12}$$

Şayet, $\frac{o}{\delta_g}$ >1 ise (4.12) yerine (4.13) kullanılabilir.

$$\gamma = \frac{\left(\frac{o}{\delta_g}\right)^2}{5+\frac{o}{\delta_g}} \tag{4.13}$$

t_d: iki diş arasındaki mesafe

o: oluk açıklığı



Şekil 4.4: Hava aralığı kesiti: (a) Statorun oluklu, rotorun düz olduğu yapı. (b) Rotorun oluklu, statorun düz olduğu yapı.

Statorun oluklu, rotor yüzeyinin düz olduğu ve rotorun oluklu, stator yüzeyinin düz olduğu durumlar için ayrı ayrı Carter faktörleri hesaplanmaktadır. Rotor ve statorun oluklu olduğu durumda, her iki durum için bulunan katsayıların çarpımından yararlanılır.

4.1.3 Hava aralığı akı yoğunluğunun hesabı

Hava aralığı akı yoğunluğunun temel bileşeni, (4.3) ve (4.7)' de verilen denklemler kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\boldsymbol{B_{1p}}(x,t) = \boldsymbol{G_0}.\boldsymbol{F_{1p}}(x,t) = B_{1p}e^{j(px-\omega_1 t-\varphi_m)} \quad \textbf{(4.14)}$$

Anlık değeri ise, genliği $b_{1p} = G_0 F_{1p}$ olmak üzere aşağıdaki eşitlikle verilebilir.

$$b_{1p}(x,t) = B_{1p}.cos(px-\omega_1 t-\varphi_m) \quad \textbf{(4.15)}$$

Hava aralığı akı yoğunluğu harmonikleri öncelikle, stator ve rotor mmk uzay harmonikleri ve ortalama hava aralığı permeans bileşeninin etkileşimi sonucu hesaplanacaktır. Ardından, MMK temel bileşeni ile stator olukları, rotor olukları ve eksen kaçıklığı için verilen permeans değerlerinin etkileşimi sonucu ortaya çıkan harmonik bileşenleri hesaplanacaktır.

Stator ve rotor mmk uzay harmonikleri için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik bileşenleri, (4.4) ve (4.5) ile (4.7)' nin etkileşimi sonucu hesaplanacaktır ve 'w' indisi ile ifade edilecektir.

$$\boldsymbol{B_{\mu w}}(x,t) = \boldsymbol{G_0}.\boldsymbol{F_1}(x,t) = B_{\mu w}e^{j(\mu px-\omega_\mu t-\varphi_\mu)} \quad \textbf{(4.16)}$$

$$\boldsymbol{B_{\lambda w}}(x,t) = \boldsymbol{G_0}.\boldsymbol{F_2}(x,t) = B_{\lambda w}e^{j(\lambda px-\omega_\lambda t-\varphi_\lambda)} \quad \textbf{(4.17)}$$

Permeans değerleri için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik bileşenleri ise, (4.3) ile (4.8) ve (4.9)' un etkileşimi ile hesaplanacaktır ve 's' indisi ile ifade edilecektir.

$$\boldsymbol{B_{\mu s}}(x,t) = \boldsymbol{F_{1p}}(x,t).\boldsymbol{G_1}(x) = \sum_{\mu s} B_{\mu s}e^{j(\mu_s px-\omega_1 t-\varphi_m)} \quad \textbf{(4.18)}$$

$$\boldsymbol{B_{\lambda s}}(x,t) = \boldsymbol{F_{1p}}(x,t).\boldsymbol{G_2}(x,t) = \sum_{\lambda s} B_{\lambda s}e^{j(\lambda_s px-\omega_{\lambda s} t-\varphi_m)} \quad \textbf{(4.19)}$$

$\mu_s = 6.g.q_1$

$q_1 = \frac{S_1}{2pm}$

$\lambda_s = \lambda$

$\omega_{\lambda s} = \omega_\lambda$

Eksen kaçıklığı durumundaki hava aralığı akı yoğunluğu harmonikleri ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\boldsymbol{B_{\mu e}}(x,t) = \boldsymbol{F_{1p}}(x,t).\boldsymbol{G_e}(x,t) = B_{\mu e} e^{j(\mu_e p x - \omega_{\mu e} t - \varphi_{\mu e})} \quad \textbf{(4.20)}$$

$B_{\mu e} = B_{1p} \frac{e}{2\delta_g}$

$\mu_e = 1 \pm \frac{1}{p}$

$\omega_{\mu e} = \omega_1 \pm \omega_e$

$\varphi_{\mu e} = \varphi_m \pm \varphi_e$

4.2 Elektromanyetik Kaynaklı Biçimi Bozulmuş Kuvvet Dalgalarının Hesabı

Hava aralığı akı yoğunluğunun rotor ve stator MMK uzay harmonikleri ve permeans değerleri için farklı bileşenleri hesaplandıktan sonra, bu akı yoğunluklarının sebep olduğu kuvvet dalgalarının hesabı da yapılabilmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğunun normal ve teğetsel bileşenleri hesaba katılarak radyal ve teğetsel kuvvetleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir.

4.2.1 Radyal kuvvetlerin hesabı

Maxwell denklemleri doğrultusunda radyal kuvvetler, hava aralığı akı yoğunluğunun normal bileşeninin karesiyle orantılı olarak hesaplanmaktadır.

$$p(x,t) = \frac{b^2(x,t)}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0}\left[{b_{1p}}^2 + 2\left(\sum_\mu b_{1p} b_\mu + \sum_\lambda b_{1p} b_\lambda\right) + \sum_\mu {b_\mu}^2 + \sum_\lambda {b_\lambda}^2 + 2\left(\sum_{\mu\lambda} b_\mu b_\lambda\right)\right] \quad \textbf{(4.21)}$$

(4.21)' de, akı yoğunluğunun temel bileşeninin karesi, temel bileşen ve eksen kaçıklığı kaynaklı bileşenlerin çarpımı yanı sıra rotor ve stator dalgalarının etkileşimi ile ortaya çıkan kuvvet dalgalarının toplamı görülmektedir. Rotor ve stator dalgalarının etkileşimi sonucu ortaya çıkan kuvvet bileşeni genlik olarak

diğerlerinden daha küçük olduğu için çoğu çalışmada ihmal edilmektedir. Bu kuvvet bileşeninin genliği şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$p_r(x,t) = P_r \cos(rx - \omega_r t - \psi_r) \tag{4.22}$$

$r = (\mu_i \pm \lambda_j)p$

$\omega_r = \omega_{\mu i} \pm \omega_{\lambda j}$

$\psi_r = \psi_{\mu i} \pm \psi_{\lambda j}$

$P_r = \frac{B_{\mu i} B_{\lambda j}}{2\mu_o}$

4.2.2 Teğetsel kuvvet bileşeni hesabı

Hava aralığı akı yoğunluğu ile rotor akımının etkileşimi Biot-Savart yasası gereğince, kuvvetin teğetsel bileşeninde artışa sebep olmaktadır. Bu bileşen şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$P_{tan}(x,t) = \sum_{\mu} \sum_{\lambda} b_{\mu}(x,t).a_{\lambda}(x,t) \tag{4.23}$$

$b_{\mu}(x,t)$: stator akı yoğunluğu uzay harmoniği radyal bileşeni

$a_{\lambda}(x,t)$: rotor akımı

Rotor akımı ile rotor akı yoğunluğu uzay harmonikleri arasındaki ilişki (4.24)' de gösterildiği gibidir.

$$a_{\lambda}(x,t) = \frac{\delta_g}{\mu_0 R} \frac{\partial b_{\lambda}(x,t)}{\partial x} \tag{4.24}$$

$b_{\lambda}(x,t)$: rotor akı yoğunluğu uzay harmoniği radyal bileşeni

R: rotor yarıçapı

(4.24), (4.23) denkleminde yerine konursa kuvvetin teğetsel bileşeni şu şekilde elde edilir.

$$P_{tan}(x,t) = -\sum_{\mu} \sum_{\lambda} \frac{p\lambda\delta_g B_\mu B_\lambda}{2\mu_0 R} \sin\left(r_{tan}x - \omega_{r,tan}t - \psi_{r,tan}\right) \quad \textbf{(4.25)}$$

$r_{tan} = (\mu_i \pm \lambda_j)p$

$\omega_{r,tan} = \omega_{\mu i} \pm \omega_{\lambda j}$

$\psi_{r,tan} = \psi_{\mu i} \pm \psi_{\lambda j}$

Radyal ve teğetsel kuvvet bileşenlerinin genlikleri karşılaştırılacak olursa, teğetsel bileşenin $\left(\frac{p\lambda\delta_g}{R}\right)$ oranında normal bileşenden çok küçük olduğu görülmektedir [26].

5. EKSEN KAÇIKLIĞININ MODELLENMESİ

Asenkron motorlarda eksen kaçıklığının ayrıntılı olarak incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kararlı ve geçici hal analizleri yapılacaktır. Motor üzerindeki etkilerin görülmesi için öncelikle sağlıklı motor için gerekli benzetim sonuçları elde edilecektir. Daha sonra eksen kaçıklığının farklı çeşitleri için farklı mertebelerde hata durumları oluşturulacak ve asimetrik çalışma durumu gözetilerek, motor parametreleri ve karakteristiklerine dair sonuçlar elde edilecektir.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

Elektrik makinelerinin analizi esnasında, elektrik ve manyetik alanların hesaplanması amacıyla sayısal modellerin kullanımı hızla yayılmaktadır. Elektrik makinelerinin karmaşık yapıları ve kullanılan malzemelerin lineer olmayan karakteristikleri sebebiyle analitik çözüm yapabilmenin zorluğu göz önünde bulundurulacak olursa, sayısal çözümlerin neden bu kadar çok kullanıldığı açıkça anlaşılacaktır.

SEY ise bu amaç için en uygun sayısal yöntemlerden biridir. Zamana bağlı alanlar ve homojen olmayan, yönlü ve lineer olmayan malzemeler içeren, analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı problemlerin çözümünde tercih edilmektedir [28]. SEY' de bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir. Herhangi bir problemin SEY ile çözümü için izlenmesi gereken adımlar şu şekildedir:

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılması,
- Her bir eleman için temel denklemlerin yazılması,
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi,
- Elde edilen denklem sisteminin çözümü

SEY ile çözüm yoluna gidilen problemlerde esasen Maxwell denklemlerinin çözümü temel alınmaktadır. Manyetik akı yoğunluğu, akı şiddeti, elektriksel akı yoğunluğu ve akım şiddeti ifadelerini içeren bu denklemlerden 2. bölümde bahsedilmiştir.

Alan probleminin çözümünü basitleştirmek amacıyla, hesaplamalarda alanın kendisi yerine alan potansiyeli **A** kullanılacaktır. Her manyetik vektör potansiyeli ile manyetik akı yoğunluğu (5.1) ifadesinde olduğu gibi gösterilebilir.

$$\boldsymbol{B} = \nabla x \boldsymbol{A} \tag{5.1}$$

Kartezyen koordinatlarda hava aralığı akı yoğunluğu bileşenleri şu şekilde ifade edilmektedir;

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}$$

$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \tag{5.2}$$

$$B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}$$

Elektrik makineleri için, daha küçük hesaplama belleği kullanımı ve daha hızlı sonuç elde edilmesi amacıyla iki boyutlu sonlu elemanlar analizi tercih edilebilir. Bu durumda, iki boyutlu problemlerde z ekseni için bileşenlerin sıfır kabul edilmesi sebebiyle manyetik vektör potansiyeli **A** için iki boyut kullanılacaktır [29]. Manyetik akı yoğunluğu, iki boyutlu düzlemde şu şekilde ifade edilebilir;

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \tag{5.3}$$

$$B_z = 0$$

Maxwell denklemlerine göre, manyetik alan şiddeti eşitliği ise iki boyutlu model için (5.4)' de gösterildiği gibidir.

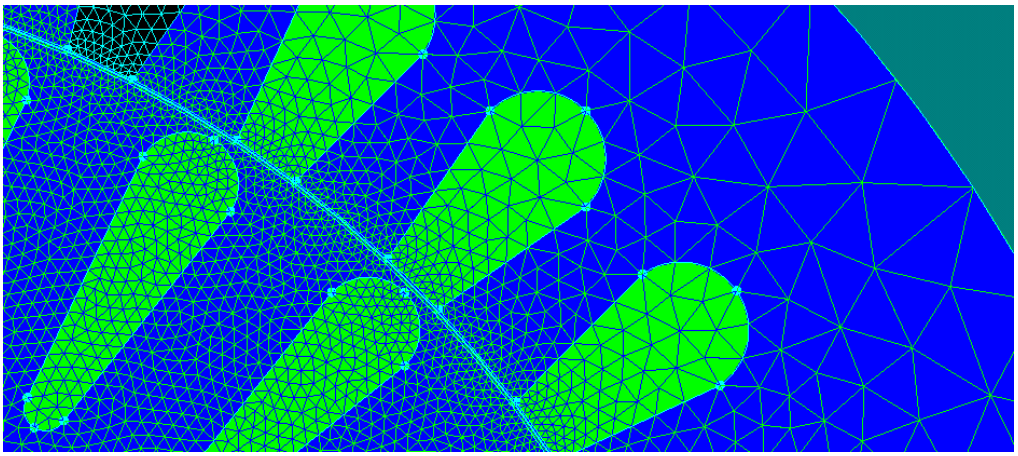
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial y}\right) = -J_s \tag{5.4}$$

A: Manyetik vektör potansiyeli

μ: Manyetik geçirgenlik

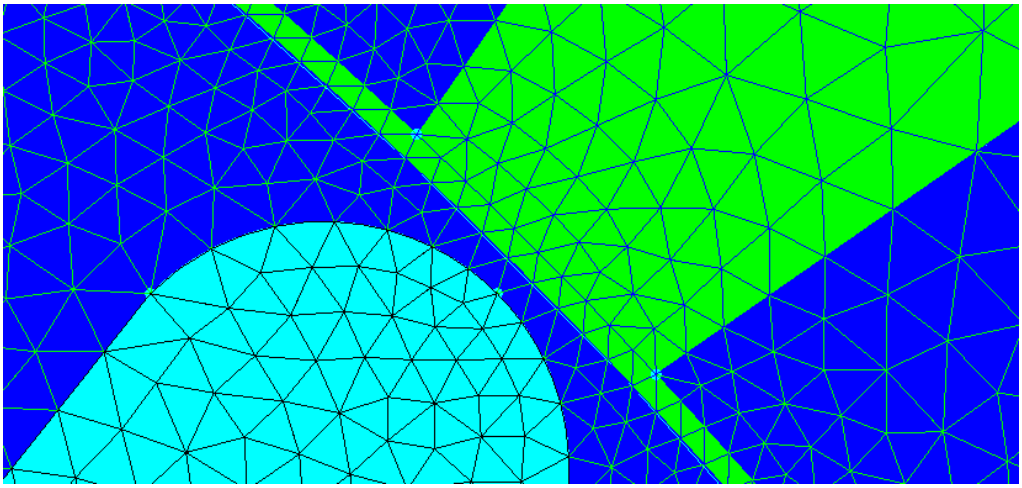
J_s: Akım yoğunluğu

İki boyutlu bir bölgenin sınırı nokta nokta tanımlanıp, bu noktaların doğru parçaları ile birleştirilmeleri suretiyle elde edilir. Gerçek sınırın daha doğru biçimde tanımlanması için daha fazla nokta ve dolayısıyla daha küçük doğru parçaları kullanılmalıdır. Ağ elemanlarının yoğunluğu çözümün kesinliğine etki etmektedir ve eleman yoğunluğu bölge içindeki yapıya göre dağılmaktadır [28]. Küçük eğrilik yarıçapı olan bölgelerde daha küçük ve daha sık elemanlar kullanılırken, daha büyük eğrilik yarıçapına sahip bölgelerde büyük ve daha seyrek elemanların kullanımı tercih edilebilir.



Şekil 5.1: Ağ yapısı.

Şekil 5.1' de görüldüğü gibi stator olukları ve rotor çubukları daha küçük ve sık elemanlardan oluşmakta iken, statorun kendisi, oluklardan uzaklaştıkça daha büyük ve seyrek elemanlardan meydana gelmektedir. Çok daha küçük boyutlara sahip hava aralığı ise Şekil 5.2' de görüldüğü gibi daha küçük boyutlarda ve daha sık elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 5.2: Hava aralığı bölgesinde ağ yapısı.

5.2 Modellerin Oluşturulması

Eksen kaçıklığının etkilerini inceleyebilmek amacıyla, hatalı motor modellerine geçmeden önce, sağlıklı çalışma durumu için, analizi yapılacak olan motor modeli oluşturulacaktır. Benzetim sonuçları ile test sonuçlarının karşılaştırılabilmesi amacıyla üretimde olan ve kullanılan bir motor tercih edilmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan motora ait anma değerleri ve genel özellikler Çizelge 5.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Motora ait anma değerleri ve genel özellikler.

Güç	2.2 kW
Gerilim	230/400 V
Akım	8.7/5 A
Güç faktörü	0.73
Moment	14.6 Nm
Frekans	50 Hz
Devir sayısı	1440 rpm
Kutup sayısı	4
Stator oluk sayısı	36
Rotor bar sayısı	28

Kafesli yapıya sahip olan asenkron motor sargıları üçgen bağlıdır.

Öncelikle stator ve rotorun geometrik parametreleri kullanılarak motor geometrisi elde edilecektir. Ardından, malzeme özellikleri tanıtılacaktır. Daha sonra, elektriksel parametrelerin girilmesi ile model sonlu elemanlara ayrılıp, çözüm aşamasına hazır hale gelecektir.

5.2.1 Sağlıklı çalışma durumu için model oluşturulması

Sağlıklı modelde, rotor ve stator eksenleri çakışık olduğu için, bu iki elemanın eksenlerinin merkezlendiği tek bir koordinat sistemi tanımlanabilir. Ancak eksen kaçıklığı içeren modellerin oluşturulması esnasında kullanılmak üzere rotor ve stator merkezleri, birbirinden bağımsız iki farklı koordinat sistemi oluşturularak tanımlanacaktır. Motor geometrisi için kullanılan parametreler, elektriksel devre parametreleri ve malzeme özellikleri tüm çalışma durumları için ortak olarak kullanılacaktır. Eksen kaçıklığının analizi için oluşturulacak modellerde; dönme ekseni, rotor ve stator merkezleri ve ağ yapısını oluşturma aşamalarında değişiklikler yapılacaktır. Bu sebeple, tüm çalışma durumlarında ortak olacak model kurulum aşamaları, sadece sağlıklı çalışma durumu başlığı altında incelenecektir.

5.2.1.1 Motor geometrisinin elde edilmesi

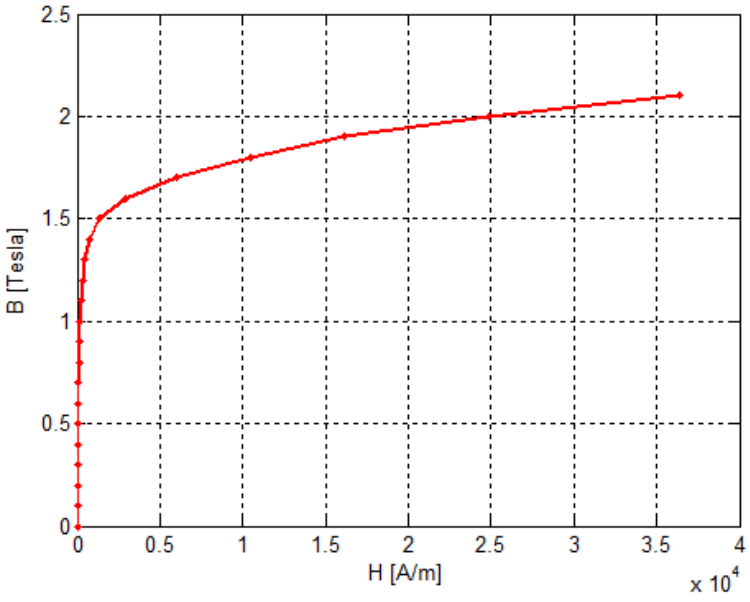
Üç fazlı, kafesli, statorunda 36 oluk ve rotorunda 28 bar bulunduran asenkron motor, iki boyutlu olarak modellenmiştir. Bu amaçla manyetik alanın z ekseni doğrultusunda değişmediği kabulü yapılmış ve uç sarım endüktansları elektriksel devreye harici olarak eklenmiştir.

Motor modelini oluştururken, hem süreden hem de çözüm için kullanılan bellekten tasarruf etmek amacıyla kutup simetrilerinden faydalanılabilir. Ancak, tez çalışmasında eksen kaçıklığı kaynaklı asimetrik çalışma durumları inceleneceği için tam model kullanılacaktır.

5.2.1.2 Malzeme özelliklerinin tanıtılması

Modelde demir, alüminyum ve hava olmak üzere üç malzeme bilgisi kullanılmaktadır. Rotor ve stator için demir, rotor barları için alüminyum bilgisi tanımlanmaktadır.

Kullanılan ferromanyetik malzemeye ait mıknatıslanma eğrisi Şekil 5.3' de görülmektedir.



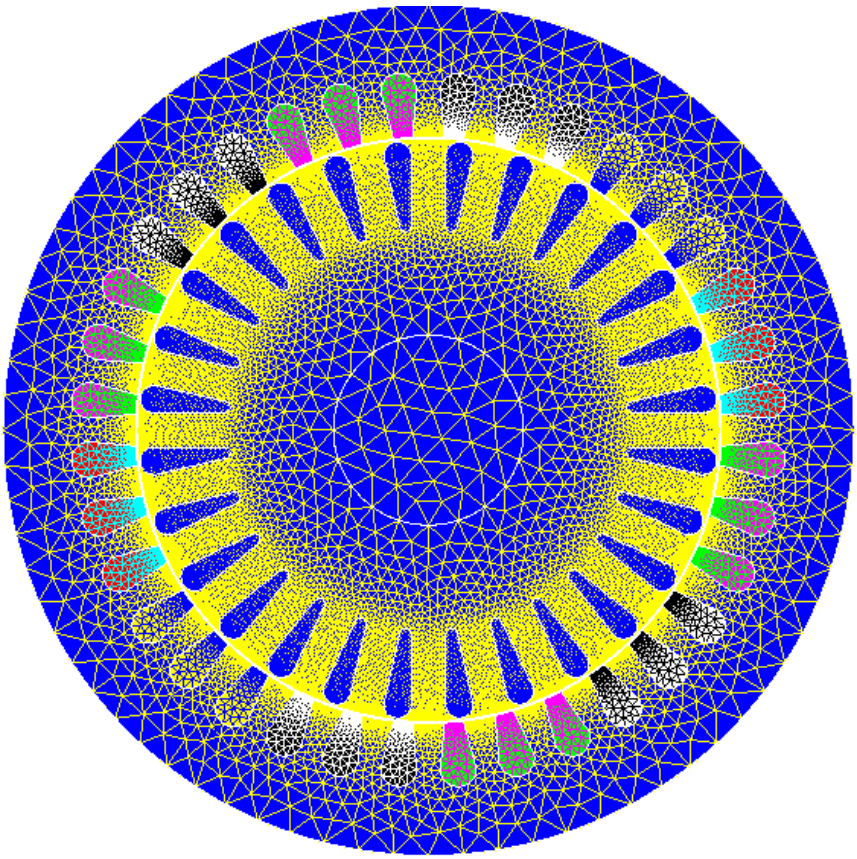
Şekil 5.3: Rotor ve stator için kullanılan malzemeye ait B-H eğrisi.

5.2.1.3 Elektriksel parametrelerin belirlenmesi

Motorun geometrisi elde edilip, malzeme bilgileri tanıtıldıktan sonra, elektrik devresinin oluşturulması ve devre parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir.

5.2.1.4 Ağ yapısının elde edilmesi

İki boyutlu asenkron motor modelinin SEY ile analizinin yapılabilmesi için uygun ağ yapısına sahip olması gerekmektedir. Oluşturulan motor modeli üzerine yerleştirilecek eleman sayısı ve boyutu, sonucu doğrudan etkilemektedir. Çok küçük elemanlar kullanılması, hata birikimlerine sebep olmakla birlikte, analiz süresini artıracak ve kullanılan belleğin boyutunu artıracaktır. Bunun yanı sıra, gereğinden az eleman kullanılması da, sonucun istenilen kesinlikte elde edilememesi durumuna yol açacaktır. Dolayısıyla, motor geometrisi göz önünde bulundurularak en uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Motor laminasyonu için elde edilen ağ yapısı Şekil 5.4' de görülmektedir.



Şekil 5.4: Sağlıklı motor ağ yapısı.

SEY ile analiz esnasında noktasal, çizgisel ve yüzeysel elemanlar kullanılmıştır. Sağlıklı çalışma durumu için oluşturulan yukarıdaki modelde yaklaşık 65000 düğüm, 10000 civarı çizgisel ve 32000 civarı yüzeysel eleman kullanılmıştır.

5.2.2 Asimetrik çalışma durumu için model oluşturulması

Yukarıda da belirtildiği gibi sağlıklı model oluşturulurken, motor geometrisi asimetrik çalışma durumları göz önünde bulundurularak, birbirinden bağımsız iki koordinat sistemi kullanılarak oluşturulmuştur. Stator ve stator olukları, bir koordinat sistemi merkez alınarak oluşturulurken, rotor, mil ve rotor barları, ilk koordinat sisteminden bağımsız ikinci bir koordinat sistemi merkez alınarak oluşturulmuştur. Böylece, rotorun eksenini kaydırarak ve dönme eksenini değiştirerek statik, dinamik ve karma eksen kaçıklığı durumları incelenebilecektir.

5.2.2.1 Statik eksen kaçıklığı

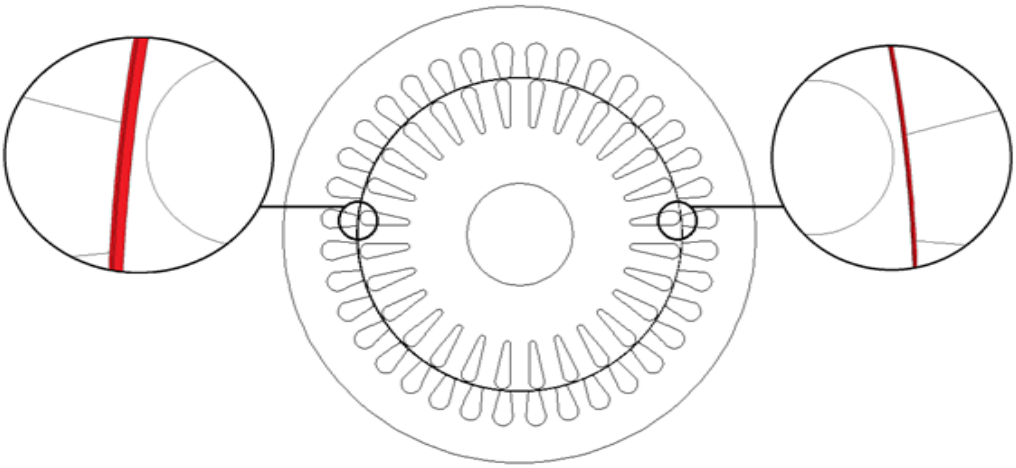
Statik eksen kaçıklığı durumunda, rotor ekseni belirli ölçülerde kaydırılacaktır. Hava aralığı genişliği göz önünde bulundurularak, farklı mertebelerde eksen kaçıklığının incelenmesi amacıyla, %10, %30 ve %50 mertebelerinde eksen kaçıklığı içeren modeller oluşturulacaktır. Statik eksen kaçıklığına dair bu dereceler, merkezden uzaklık (e) ile hava aralığı genişliğinin (δ_g) birbirine oranı olan bağıl eksen kaçıklığı (ε) olarak ifade edilir ve (5.5)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta_g} \tag{5.5}$$

Farklı mertebelerde statik eksen kaçıklığı içeren modelleri oluşturmak amacıyla, rotor eksenlerinin, merkezden ne kadar kaydırıldıkları ve bu kaymanın sebep olduğu bağıl eksen kaçıklığı mertebeleri Çizelge 5.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2: Statik eksen kaçıklığı.

e [mm]	ε [%]
0.0275	10
0.0825	30
0.1375	50



Şekil 5.5: Statik eksen kaçıklığı kesiti.

Şekil 5.5' de açıkça görüldüğü gibi, rotor ekseni kaydırılırken, stator ekseni sabit bırakılmıştır. Hava aralığının en küçük ve en büyük olduğu yerlerin, statik eksen kaçıklığı gereğince rotorun pozisyonu ile değişmemesi amacıyla dönme ekseni de rotor ekseni olarak ayarlanmıştır. Böylece, dönme esnasında statorun herhangi bir yerinden bakıldığında sürekli aynı hava aralığı genişliği gözlenecektir.

Hali hazırda, çok küçük boyutlarda olan hava aralığı genişliği, eksen kaçıklığı içeren modelde daha da küçülmektedir. Bu sebeple, hava aralığı ağ yapısı oluşturulurken, SEY ile analize mani olacak eleman yapılarından kaçınılarak, modeller oluşturulmuştur.

5.2.2.2 Dinamik eksen kaçıklığı

Dinamik eksen kaçıklığı söz konusu olduğunda, yine rotor ekseni farklı mertebelerde asimetrik çalışma durumunun analizi amacıyla kaydırılacaktır. Ancak bu sefer, dönme ekseni, rotor ekseni ile kaydırılmayıp, stator ekseninde sabit olarak ayarlanacaktır. Böylece, hava aralığının en küçük ve en büyük olduğu yerler, rotor pozisyonuna bağlı olarak değişecektir. Daha açıkça, statorun herhangi bir yerinden hava aralığına bakıldığında, rotor pozisyonuna göre hava aralığı genişliği sürekli değişecektir. Bu durumu incelemek amacıyla, rotorun 0-360 derece arasında, 30 derece aralıklarla geldiği farklı konumlar için 12 farklı model kurulacaktır. Böylece, statorun herhangi bir noktasından rotor pozisyonuna göre değişen hava aralığı için analiz sonuçları elde edilecektir. Ayrıca, dinamik eksen kaçıklığının farklı mertebelerinin analizi için, bağıl eksen kaçıklığının farklı mertebeleri göz önünde

bulundurularak, yukarıda açıklanan model oluşturma işlemi her mertebe için tekrar edilecektir.

Çizelge 5.3: Dinamik eksen kaçıklığı.

Rotor pozisyonu [derece]	%10		%30		%50	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
0	0.0275	0	0.0825	0	0.1375	0
30	0.0238	0.0138	0.0714	0.0413	0.1191	0.0688
60	0.0138	0.0238	0.0413	0.0714	0.0688	0.1191
90	0	0.0275	0	0.0825	0	0.1375
120	-0.0138	0.0238	-0.0413	0.0714	-0.0688	0.1191
150	-0.0238	0.0138	-0.0714	0.0413	-0.1191	0.0688
180	-0.0275	0	-0.0825	0	-0.1375	0
210	-0.0238	-0.0138	-0.0714	-0.0413	-0.1191	-0.0688
240	-0.0138	-0.0238	-0.0413	-0.0714	-0.0688	-0.1191
270	0	-0.0275	0	-0.0825	0	-0.1375
300	0.0138	-0.0238	0.0413	-0.0714	0.0688	-0.1191
330	0.0238	-0.0138	0.0714	-0.0413	0.1191	-0.0688

Dinamik eksen kaçıklığının %10, %30 ve % 50 mertebeleri için 0-360 derece arasında alacağı 12 farklı pozisyona dair modellerin oluşturulması için gerekli koordinat bilgileri Çizelge 5.3' de verilmektedir. Bu sayede oluşturulan modeller eşliğinde dinamik eksen kaçıklığı incelenecektir.

5.2.2.3 Karma eksen kaçıklığı

Hem statik hem de dinamik eksen kaçıklığının bir arada bulunduğu karma eksen kaçıklığı içeren bir motorda ise, dinamik eksen kaçıklığı içeren bir motorda olduğu gibi hava aralığının rotor pozisyonuna bağlı olarak değişmesinin yanı sıra, bu değişim statorun bir tarafına daha yakın olarak gerçekleşecektir. Bu durumun analizini yapmak için, dinamik eksen kaçıklığında olduğu gibi farklı rotor pozisyonları için farklı modeller kurulacaktır, ancak, bununla birlikte, dönme ekseni artık stator ekseni olmayacaktır. Stator ekseni ve rotor ekseninden bağımsız, bir dönme ekseni oluşturulacak ve farklı mertebelerde karma eksen kaçıklığına sebep olacak şekilde kaydırılacaktır. Böylelikle farklı mertebelerde statik eksen kaçıklığı ve dinamik eksen kaçıklığı barındıran bir motorun analizi yapılacaktır.

Çizelge 5.4: % 10 Statik eksen kaçıklığı barındıran karma eksen kaçıklığı.

Statik Eksen Kaçıklığı	Dinamik Eksen Kaçıklığı					
%10	%10		%30		%50	
Rotor pozisyonu [derece]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
0	0.055	0	0.11	0	0.165	0
30	0.0513	0.0138	0.0989	0.0413	0.1466	0.0688
60	0.0413	0.0238	0.0688	0.0714	0.0963	0.1191
90	0.0275	0.0275	0.0275	0.0825	0.0275	0.1375
120	0.0137	0.0238	-0.0138	0.0714	-0.0413	0.1191
150	0.0037	0.0138	-0.0439	0.0413	-0.0916	0.0688
180	0	0	-0.055	0	-0.11	0
210	0.0037	-0.0138	-0.0439	-0.0413	-0.0916	-0.0688
240	0.0137	-0.0238	-0.0138	-0.0714	-0.0413	-0.1191
270	0.0275	-0.0275	0.0275	-0.0825	0.275	-0.1375
300	0.0413	-0.0238	0.0688	-0.0714	0.0963	-0.1191
330	0.0513	-0.0138	0.0989	-0.0413	0.1466	-0.0688

Çizelge 5.4’ de %10 statik eksen kaçıklığı ile birlikte sırasıyla; %10, %30 ve %50 dinamik eksen kaçıklığını birlikte barındıran motora ait modellerin oluşturulması için gerekli koordinat bilgileri verilmektedir. Statik eksen kaçıklığının %30 olduğu durum için gerekli koordinat bilgileri ise Çizelge 5.5’ de verilmektedir.

Çizelge 5.5: % 30 Statik eksen kaçıklığı barındıran karma eksen kaçıklığı.

Statik Eksen Kaçıklığı	Dinamik Eksen Kaçıklığı					
%30	%10		%30		%50	
Rotor pozisyonu [derece]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
0	0.11	0	0.165	0	0.22	0
30	0.1063	0.0138	0.1539	0.0413	0.2016	0.0688
60	0.0963	0.0238	0.1238	0.0714	0.1513	0.1191
90	0.0825	0.0275	0.0825	0.0825	0.0825	0.1375
120	0.0687	0.0238	0.0412	0.0714	0.0137	0.1191
150	0.0587	0.0138	0.0111	0.0413	-0.0366	0.0688
180	0.055	0	0	0	-0.055	0
210	0.0587	-0.0138	0.0111	-0.0413	-0.0366	-0.0688
240	0.0687	-0.0238	0.0412	-0.0714	0.0137	-0.1191
270	0.0825	-0.0275	0.0825	-0.0825	0.0825	-0.1375
300	0.0963	-0.0238	0.1238	-0.0714	0.1513	-0.1191
330	0.1063	-0.0138	0.1539	-0.0413	0.2016	-0.0688

Her iki çizelgede de açıkça görüldüğü gibi, sabit bir kayma değeri üzerine dinamik eksen kaçıklığının sebep olacağı ve rotor pozisyonu ile değişen konum bilgilerinin ilave edilmesiyle karma eksen kaçıklığının etkilerinin incelenmesi için gerekli modeller oluşturulmaktadır.

5.3 Modellerin Çözümü

Sağlıklı durum ve eksen kaçıklığının farklı tipleri için oluşturulan modeller SEY ile çözülecek ve motor parametrelerinin değişimi analiz sonuçları eşliğinde incelenecektir. Kararlı ve geçici hal için hesaplamalar yapılacaktır. Kararlı hal analizinde, sabit hızda ve değişken hızlar için çözümlemeler yapılırken, geçici halin incelenmesi amacıyla, oluşturulan modeller, farklı zaman dilimlerinde çözülecektir.

5.3.1 Kararlı hal için çözüm

Elde edilen modellerin çözümü, SEY' ne göre eşitliklerin elemanlarının belirlenmesi, matris formuna getirilmesi ve iterasyonlar eşliğinde sonuca ulaşılması adımlarından oluşmaktadır. Bu matrisin boyutları ve problemin çözümü için geçen süre, ağ yapısını oluşturan eleman sayısı ile doğru orantılıdır. Problemin doğru bir şekilde çözülmesi için, yeterli sayıda yineleme adımı kullanılmalı ve hata oranı yeterince küçük olarak atanmalıdır.

5.3.1.1 Sabit hız

Kararlı hal analizleri, zamandan bağımsız olarak, motorun kararlı çalışma durumu esnasında hava aralığı akı yoğunluğu, harmonik bileşenleri, akım ve gerilim gibi parametrelerinin incelenmesi amacıyla yapılmaktadır. Motorun anma çalışma hızı için kararlı hal analizleri yapılacaktır.

5.3.2 Geçici hal için çözüm

Oluşturulan modeller için kararlı hal analizinin yanı sıra, kalkış anından kararlı hale oturana kadar motor parametrelerindeki değişimi gözlemlemek amacıyla, belirli zaman adımları ile farklı zamanlarda analiz belirli sayıda tekrarlanmaktadır. Zaman adımı, değişimleri iyi gözlemleyebilmek amacıyla yeterince küçük seçilmelidir.

5.4 Benzetim Sonuçları

Sağlıklı ve asimetrik durumlar için ayrı ayrı oluşturulan, kararlı ve geçici hal durumları için çözülen modeller aracılığıyla, eksen kaçıklığının asenkron motor parametrelerine olan etkileri incelenecektir. Öncelikle sağlıklı durumdaki benzetim sonuçları verilecek, anma çalışmasında sağlıklı durum sonuçları referans alınarak, asimetrik çalışma durumları için elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir.

5.4.1 Sağlıklı durum için benzetim sonuçları

Üç fazlı kafesli asenkron motorun sağlıklı çalışma durumu için elde edilen modelin SEY ile çözümü sonucunda moment, aktif ve reaktif güç parametrelerinin yanı sıra akım ve gerilimin etkin değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6' da verilmiştir.

Çizelge 5.6: Benzetim sonucunda elde edilen motor parametreleri.

Giriş aktif gücü	(Pg)	2451.7 W
Giriş reaktif gücü	(Qg)	1817.6 VAr
Gerilim	(V)	400 V
Akım	(I)	4.404 A
Hava aralığı moment	(Ti)	14.86 Nm

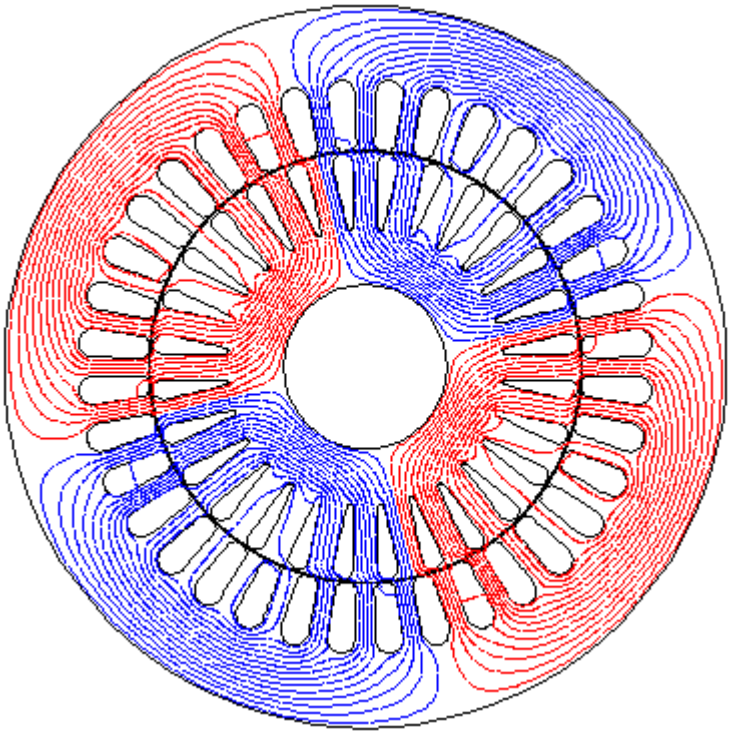
Elde edilen sonuçlar ışığında, güç faktörü, iç güç, iç mekanik güç, bakır kayıpları, çıkış gücü ve verim değerleri Çizelge 5.7' de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.7: Benzetim sonucunda hesaplanılan motor parametreleri.

Giriş görünür gücü	(Sg)	$\sqrt{P^2 + Q^2}$	3052 VA
Güç faktörü	(cosφ)	P / S	0.803
Açısal hız	(ω)	(2π.1440) / 60	150.8 rad/s
İç güç	(Pi)	Ti . ω	2241 W
Bakır kayıpları	(Pcu)	Pi . s	89.6 W
Çıkış gücü	(Pç)	Pi . (1-s)	2151.4 W

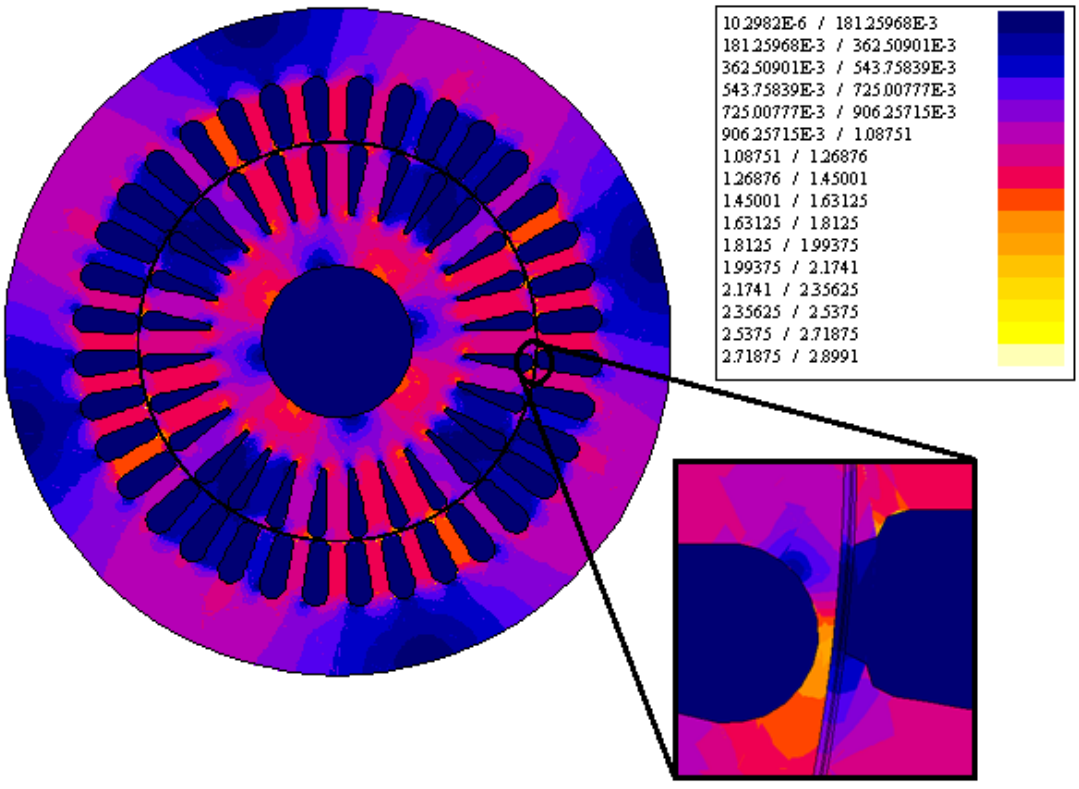
SEY ile hesaplanan değerler, motorun anma değerleri ile karşılaştırıldığında sonuçların %1'in altında hata payı içerdikleri görülmüştür. Benzetim sonuçları ile anma değerleri karşılaştırılıp, uyumlu sonuçların elde edildiği görüldükten sonra motor karakteristikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Öncelikle, dört kutuplu bir asenkron motorda olması gerektiği gibi eş akı çizgileri Şekil 5.6' da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Akı çizgileri, manyetik malzeme üzerinde devrelerini tamamlamaktadır.



Şekil 5.6: Manyetik eş akı eğrileri.

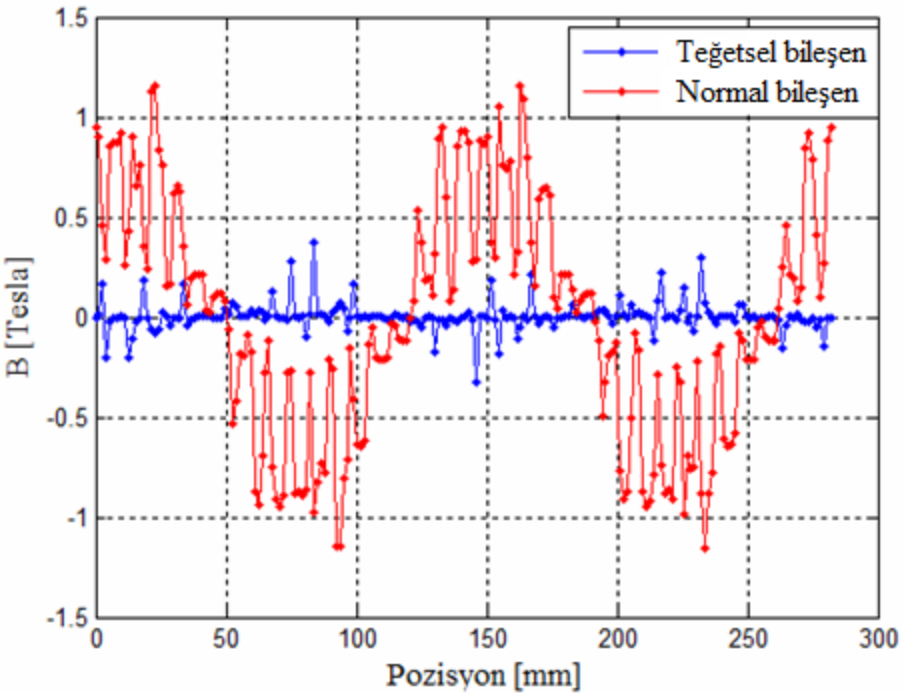
Eş akı çizgilerinin yanı sıra, akı yoğunluğu dağılımı da, Şekil 5.7' de görüldüğü gibi renk tayfı eşliğinde elde edilmiştir.



Şekil 5.7: Akı yoğunluğu dağılımı (renk tayfı).

Renk tayfı ile hava aralığı akı yoğunluğunun, motor laminasyonu üzerinde nerelerde daha yoğun nerelerde daha az yoğun olduğu görülebilmektedir. Ancak daha ayrıntılı inceleme yapılabilmesi ve asimetrik çalışma durumundaki farkın daha net bir şekilde ortaya konması için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonuna göre değişimini gösteren eğriler kullanılacaktır.

Hava aralığı akı yoğunluğu, normal ve teğetsel bileşenlerinden oluşmaktadır. Hava aralığı akı yoğunluğunun neredeyse tamamını normal bileşen oluşturmakta ve teğetsel bileşen sıfıra yakın değerler aldığından sağlıklı motor analizlerinde genelde ihmal edilmektedir. Şekil 5.8' de hava aralığı akı yoğunluğunun normal ve teğetsel bileşenleri aynı eksende gösterilmektedir.

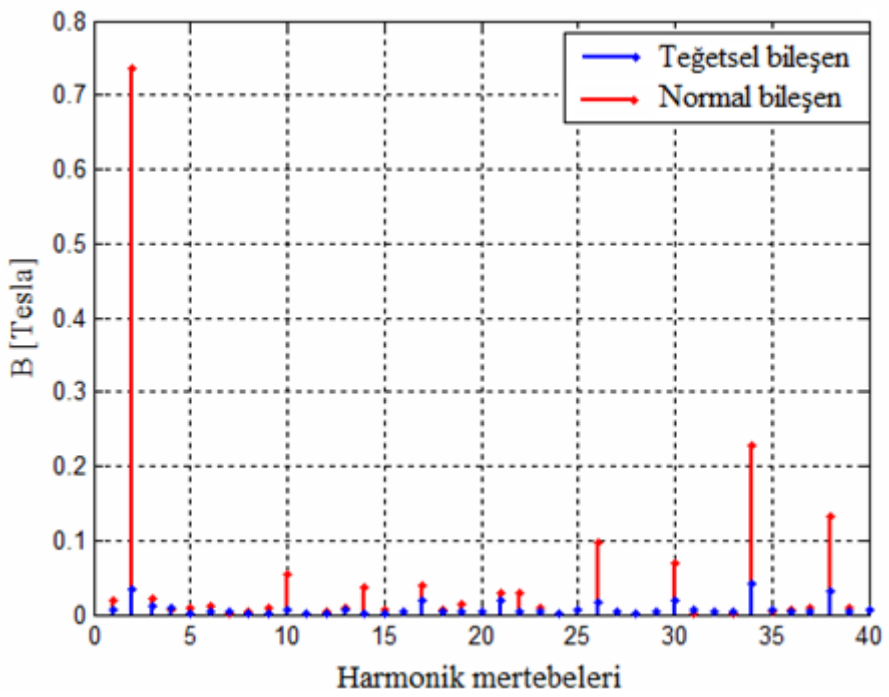


Şekil 5.8: Hava aralığı akı yoğunluğu normal ve teğetsel bileşenleri.

Ancak, moment titreşimleri ve gürültüler sadece normal bileşenin sebep olduğu radyal kuvvetler sebebiyle değil, teğetsel bileşenin sebep olduğu kuvvetler tarafından da oluşmaktadır [30]. Asimetrik çalışma durumlarında bu durum daha açık bir şekilde görülmektedir.

Hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonuna göre elde edilmiş eğrisine bakılarak, statorun kaç oluklu olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bir kutup altında bulunan 9 stator oluğunun, bir kutup altındaki hava aralığı akı yoğunluğu karakteristiğindeki etkisi Şekil 5.8' de görülmektedir.

Asenkron motorda sargı için açılan stator oluklarına yerleştirilen iletkenler sinüs biçimli dağıtılmadığından, stator sargılarının saf sinüs biçimli gerilimle beslenmesi durumunda dahi, ampersarım ifadesi, dolayısıyla hava aralığı akı yoğunluğu saf sinüs biçimli olmayacaktır. Dolayısıyla ampersarım fonksiyonu ve hava aralığı akı yoğunluğu ifadeleri bir harmonik toplamı içerir [31]. Benzetim sonucu elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu eğrisinin, normal ve teğetsel bileşenleri için harmonik açılımı Şekil 5.9' da gösterilmiştir.



Şekil 5.9: Hava aralığı akı yoğunluğu normal ve teğetsel bileşenler için harmonik açılımı.

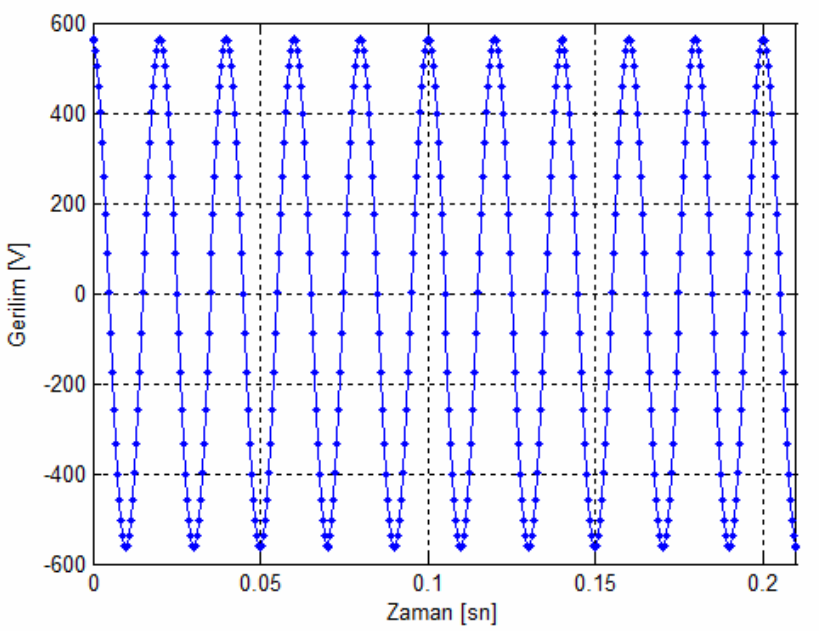
Çizelge 5.8' de sağlıklı durum için harmonik bileşenlerin aldıkları değerler görülmektedir.

Çizelge 5.8: Sağlıklı durum için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik değerleri.

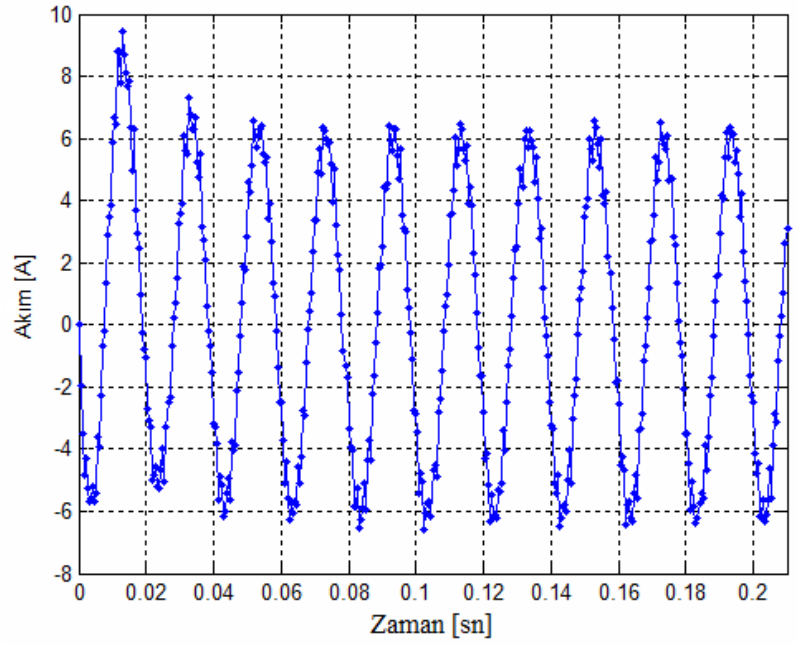
Harmonik mertebesi	Normal bileşen [T]	Teğetsel bileşen [T]
Temel bileşen	0.73608	0.03336
3	0.01197	0.00374
5	0.05524	0.00581
7	0.03532	0.00037
11	0.02994	0.00354
13	0.09664	0.01696
15	0.06802	0.01958
17	0.22724	0.04147
19	0.13133	0.03222

Çift harmonikler, simetriden ötürü sıfır iken, 3 ve 3'ün katı olan harmonikler ise döner alan oluşturmadıkları için gerilim ve moment indükleyemezler. Dolayısıyla temel bileşenin yanı sıra gözlenmesi gereken en önemli harmonikler 5, 7, 11, 13, 17 ve 19. harmoniklerdir.

Motor uçlarına uygulanan gerilim ve motorun çektiği akım ise Şekil 5.10 ve 5.11' de görülmektedir.

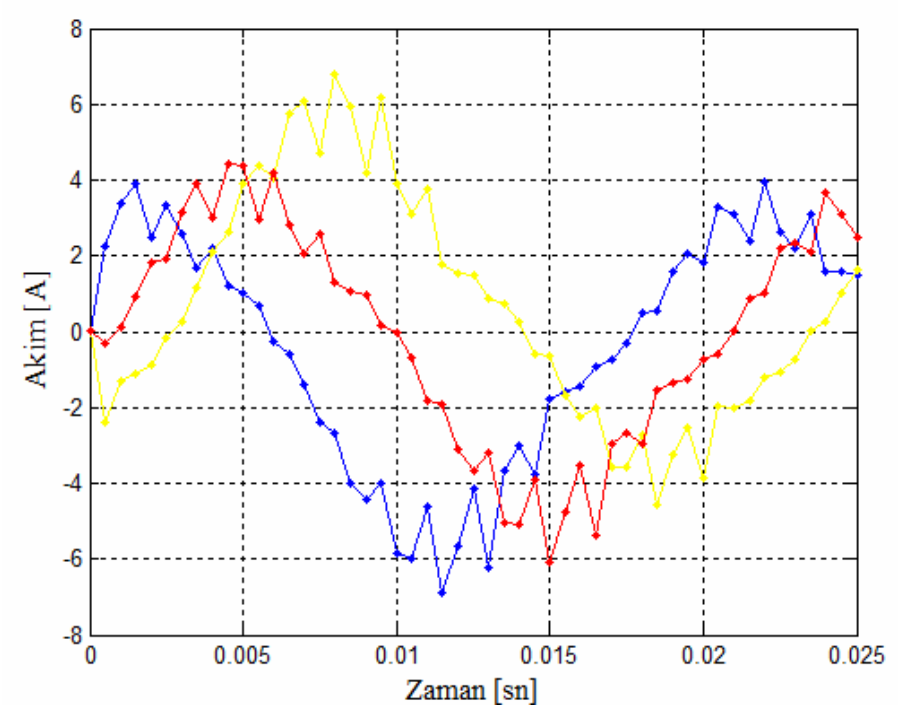


Şekil 5.10: Motor uçlarına uygulanan gerilim.



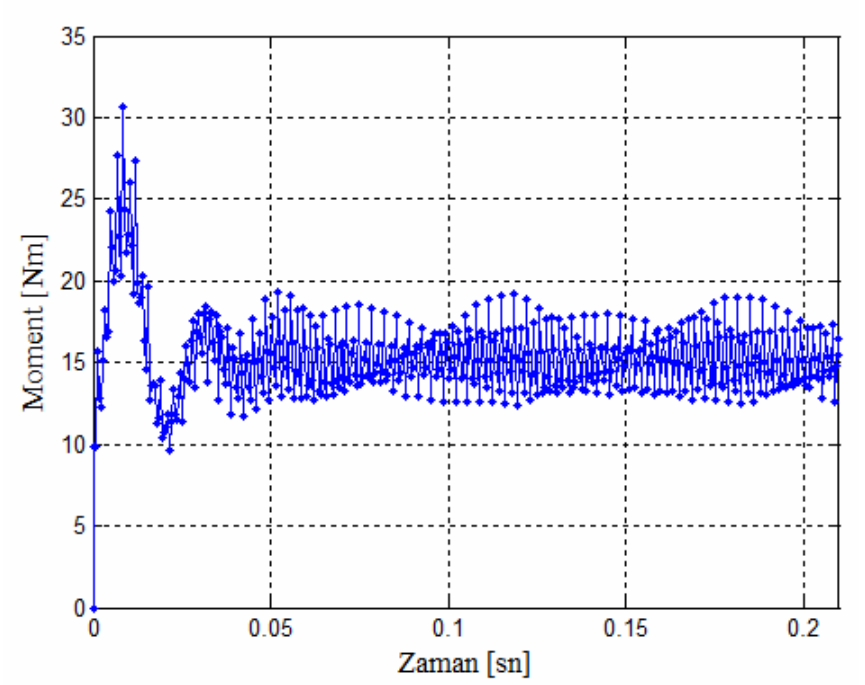
Şekil 5.11: Şebekeden çekilen akım.

Şebekeden çekilen akımın yanı sıra, stator sargılarındaki akımlarda Şekil 5.12'de görüldüğü gibi olacaktır.



Şekil 5.12: Faz akımları.

Hava aralığı momenti ise Şekil 5.13' de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.13: Sağlıklı durum için hava aralığı momenti.

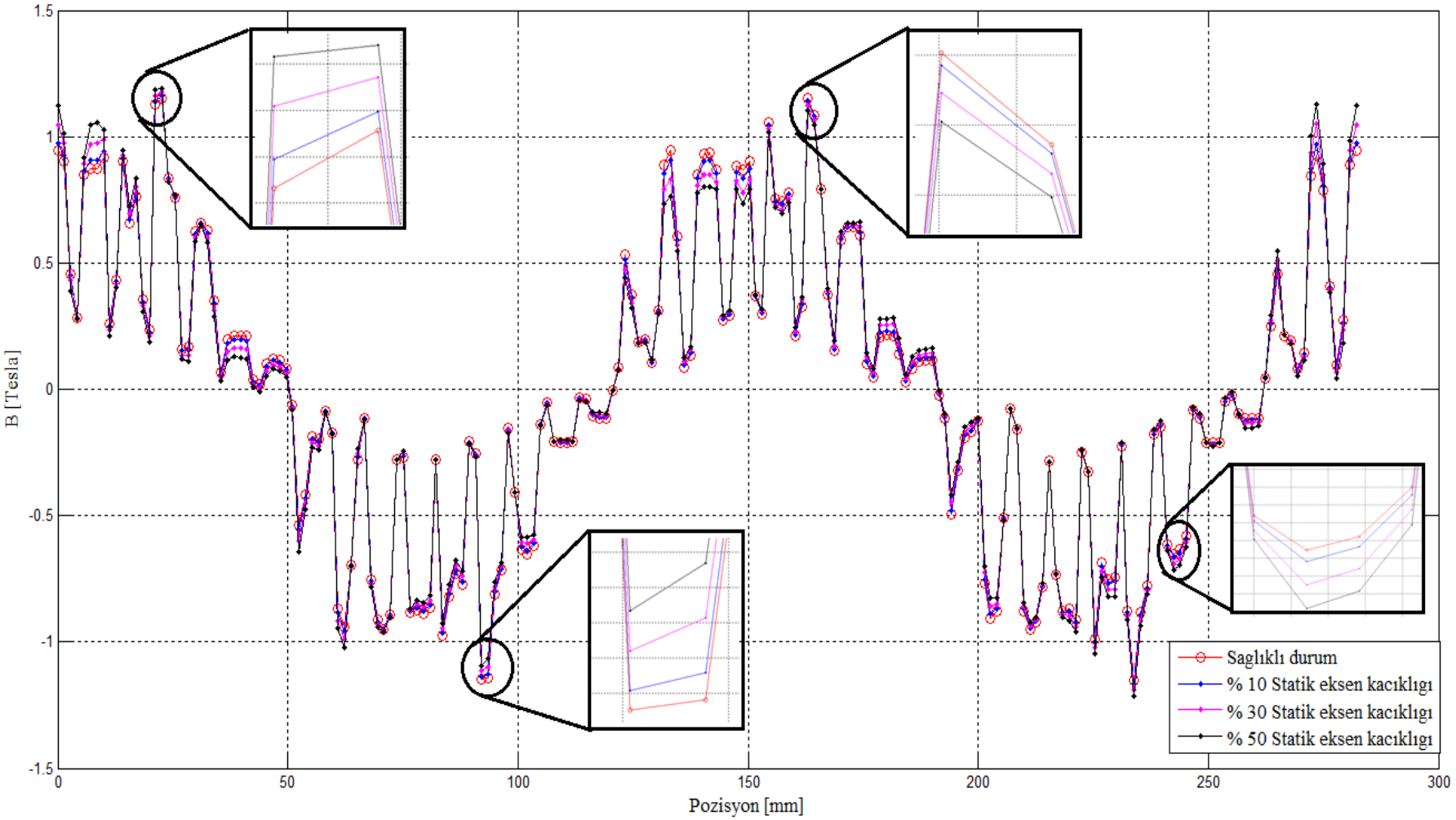
5.4.2 Asimetrik durumlar için benzetim sonuçları

Sağlıklı durum için motor karakteristikleri elde edildikten sonra, asimetrik durumda bu parametrelerin nasıl değiştiğini gözlemleyebilmek amacıyla, sırasıyla statik, dinamik ve karma eksen kaçıklığı durumları göz önünde bulundurularak, hava aralığı akı yoğunluğu, akım ve moment parametreleri incelenecektir.

5.4.2.1 Hava aralığı akı yoğunluğu açısından benzetim sonuçları

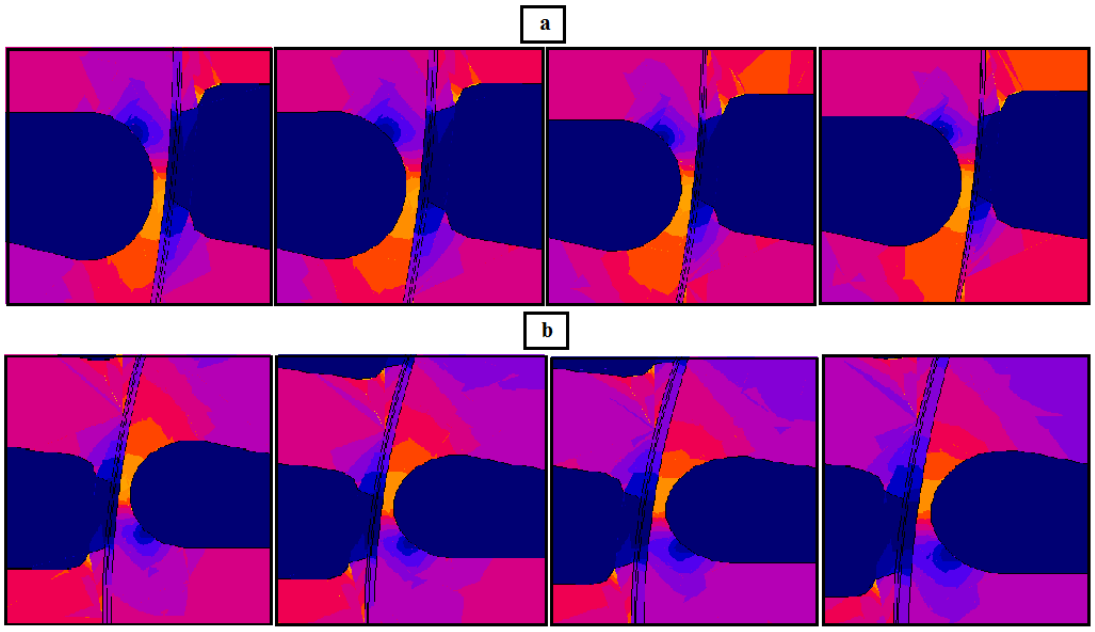
Eksen kaçıklığının farklı tipleri ve farklı mertebeleri için oluşturulan modellerin çözümleri ile elde edilen sonuçlar, hava aralığı akı yoğunluğu açısından sağlıklı modelle karşılaştırılacaktır. Böylece hatanın sebep olduğu etkiler görülecektir.

İlk olarak, statik eksen kaçıklığı göz önünde bulundurularak hava aralığı akı yoğunluğu eğrisi sağlıklı ve ekseni kaçık modeller için üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 5.14: Sağlıklı ve statik eksen kaçıklığı barındıran motorlara ait hava aralığı akı yoğunluğu eğrileri.

Hava aralığı sağlıklı durumun aksine homojen yapısını kaybetmiştir. Ancak statik eksen kaçıklığı söz konusu olduğu için, hava aralığının en küçük ve en büyük olduğu yerler rotor pozisyonuna göre değişmemektedir. Şekil 5.14'de görüldüğü gibi hava aralığı genişliğinin küçüldüğü yerlerde manyetik akı yoğunluğu artmakta, genişliğin büyüdüğü yerlerde ise manyetik akı yoğunluğu azalmaktadır. Statik eksen kaçıklığının mertebesinin artması ile manyetik akı yoğunluğunun dağılımındaki bozulma da artmaktadır.



Şekil 5.15: Manyetik akı dağılımı (renk tayfı): (a) hava aralığı genişliğinin en küçük olduğu bölgeler, (b) hava aralığı genişliğinin en büyük olduğu bölgeler.

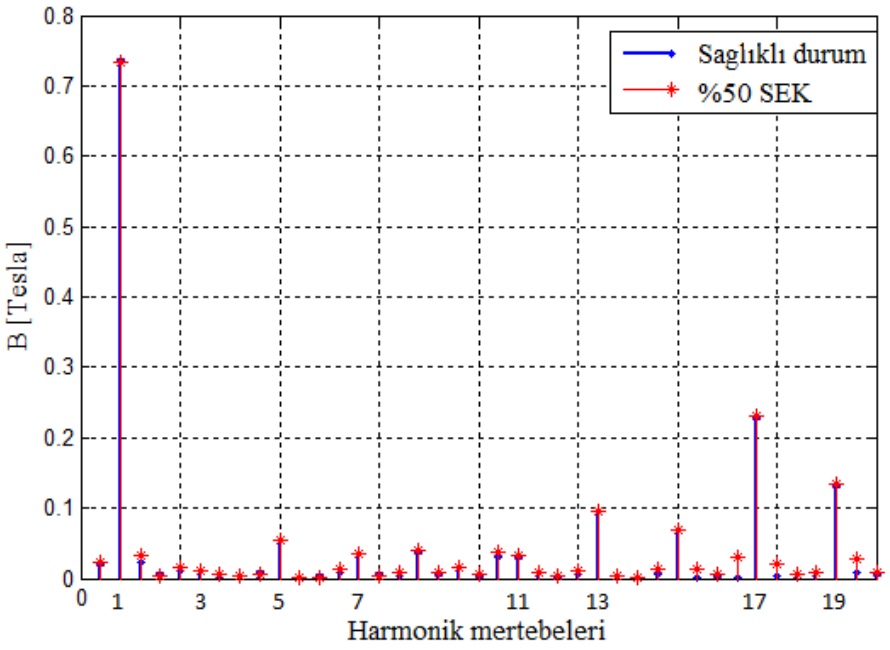
Şekil 5.15' de sağlıklı durum ve statik eksen kaçıklığının farklı mertebelerini barındıran modellere ait manyetik akı yoğunlukları görülmektedir. Statik eksen kaçıklığının mertebesinin artmasıyla, hava aralığı genişliğinin en küçük olduğu bölgede, akı yoğunluğunun arttığı görülürken, hava aralığı genişliğinin en büyük olduğu bölgede, akı yoğunluğu azalmaktadır. Sağlıklı durumdaki homojen dağılım eksen kaçıklığının artmasıyla, hava aralığı genişliğinin ve manyetik akı yoğunluğunun homojen bir şekilde dağılmamasına sebep olmuştur. Böylece motor da sürekli dengesiz manyetik çekmeler meydana gelecek ve asimetrik durum çekme kuvvetinin yönünde artış gösterecektir.

Akı yoğunluğu harmonik bileşenler açısından incelendiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 5.16' da gösterilmektedir. Önemli bileşenler ve değişimler ise Çizelge 5.9' da görülmektedir.

Çizelge 5.9: Sağlıklı durum ve statik eksen kaçıklığı barındıran modeller için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik değerleri.

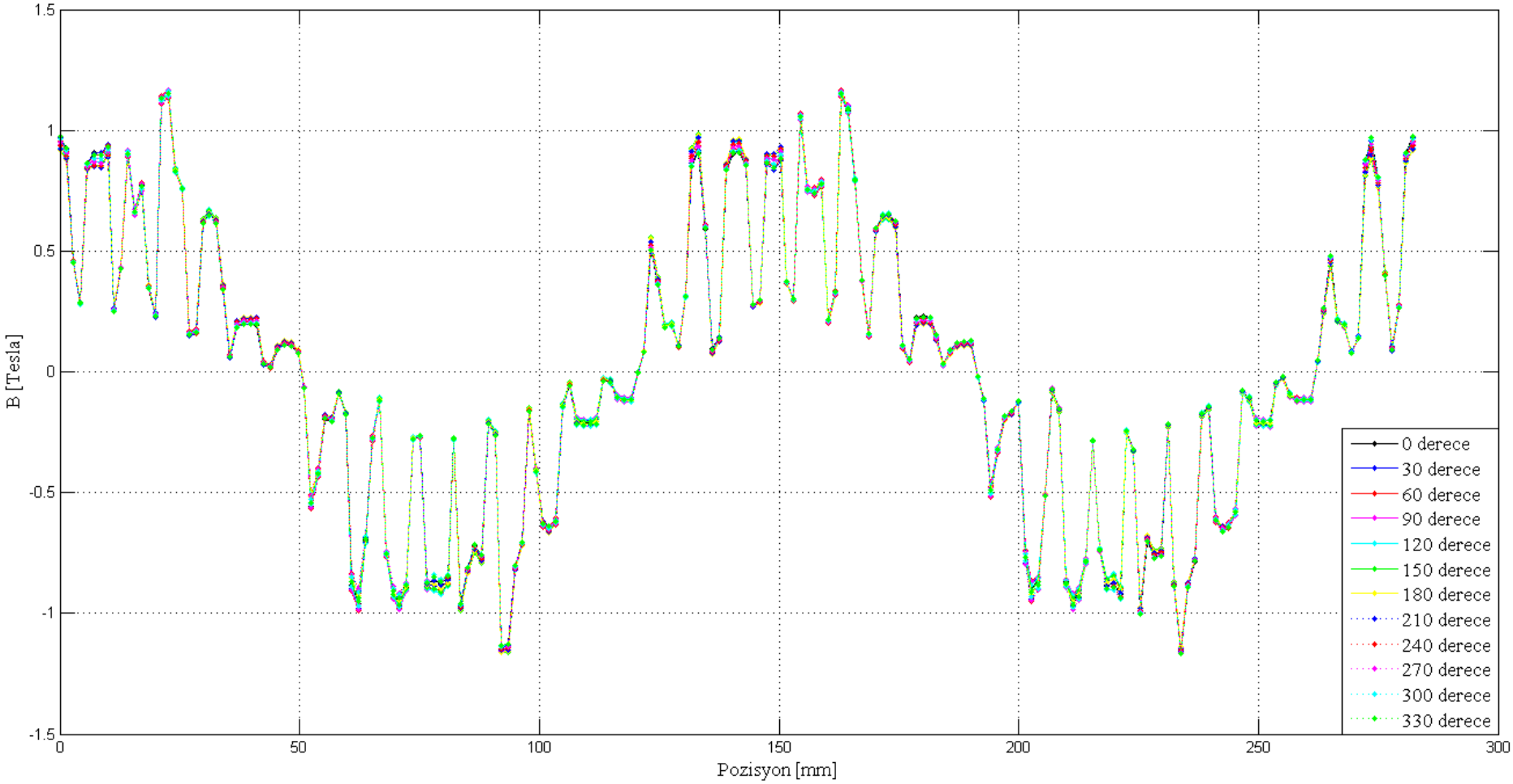
Harmonik mertebesi	Sağlıklı durum	%10 SEK	%30 SEK	%50 SEK	ε [%] %50
Temel bileşen	0.73608	0.73570	0.73480	0.73354	-0.346
3	0.01197	0.01194	0.01150	0.01048	-14.173
5	0.05524	0.05507	0.05445	0.05346	-3.325
7	0.03532	0.03543	0.03566	0.03623	2.49
11	0.02994	0.03030	0.03136	0.03273	8.502
13	0.09664	0.09673	0.09657	0.09617	-0.49
17	0.22724	0.22744	0.22872	0.23130	1.758
19	0.13133	0.13147	0.13229	0.13371	1.779

Temel bileşen çok az azalırken, 7, 11, 17 ve 19. harmonikler gibi yüksek frekanslı bileşenler eksen kaçıklığı ile birlikte artmaktadır.

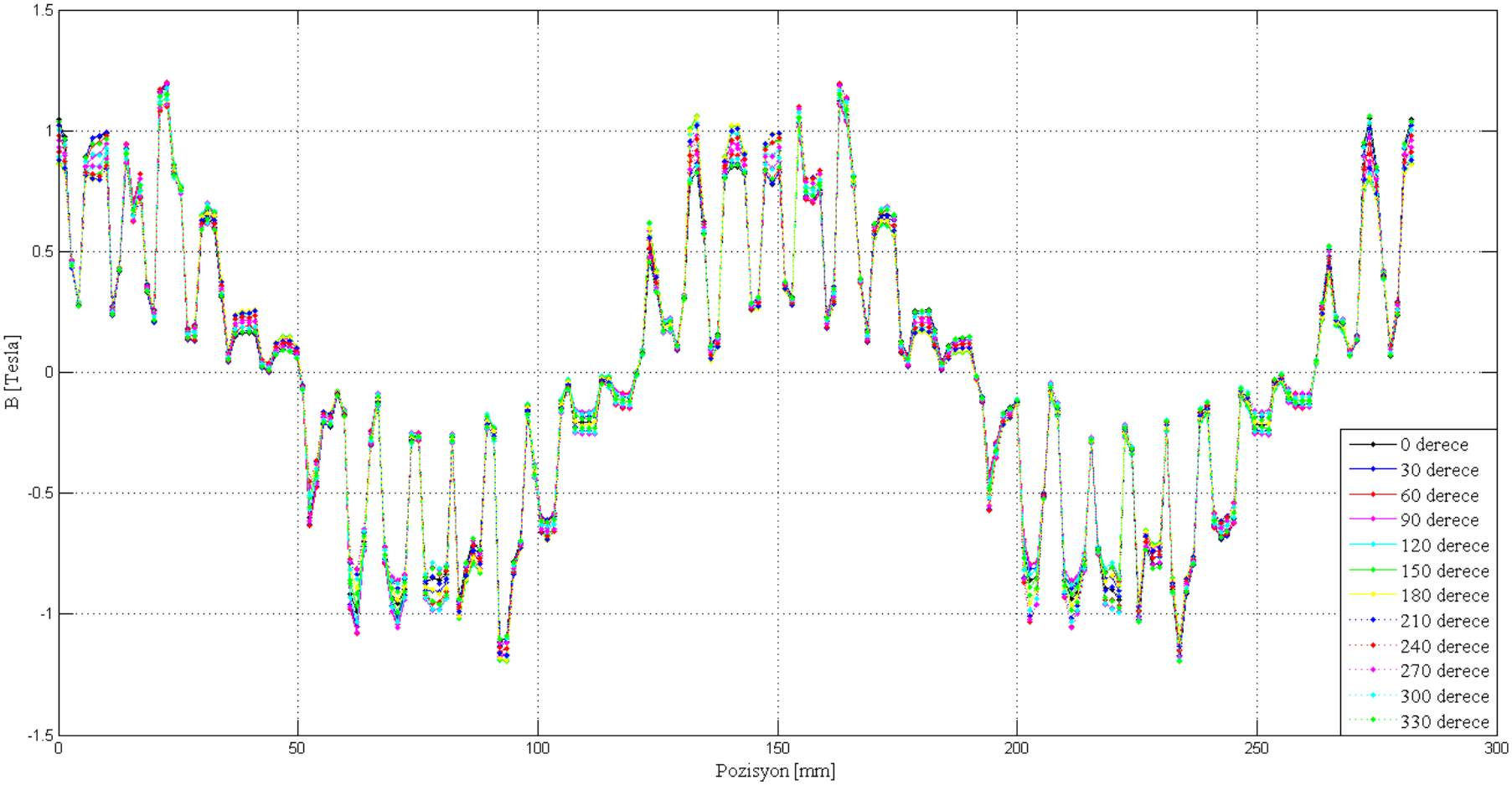


Şekil 5.16: Sağlıklı durum ve %50 statik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğu harmonik bileşenlerin karşılaştırılması.

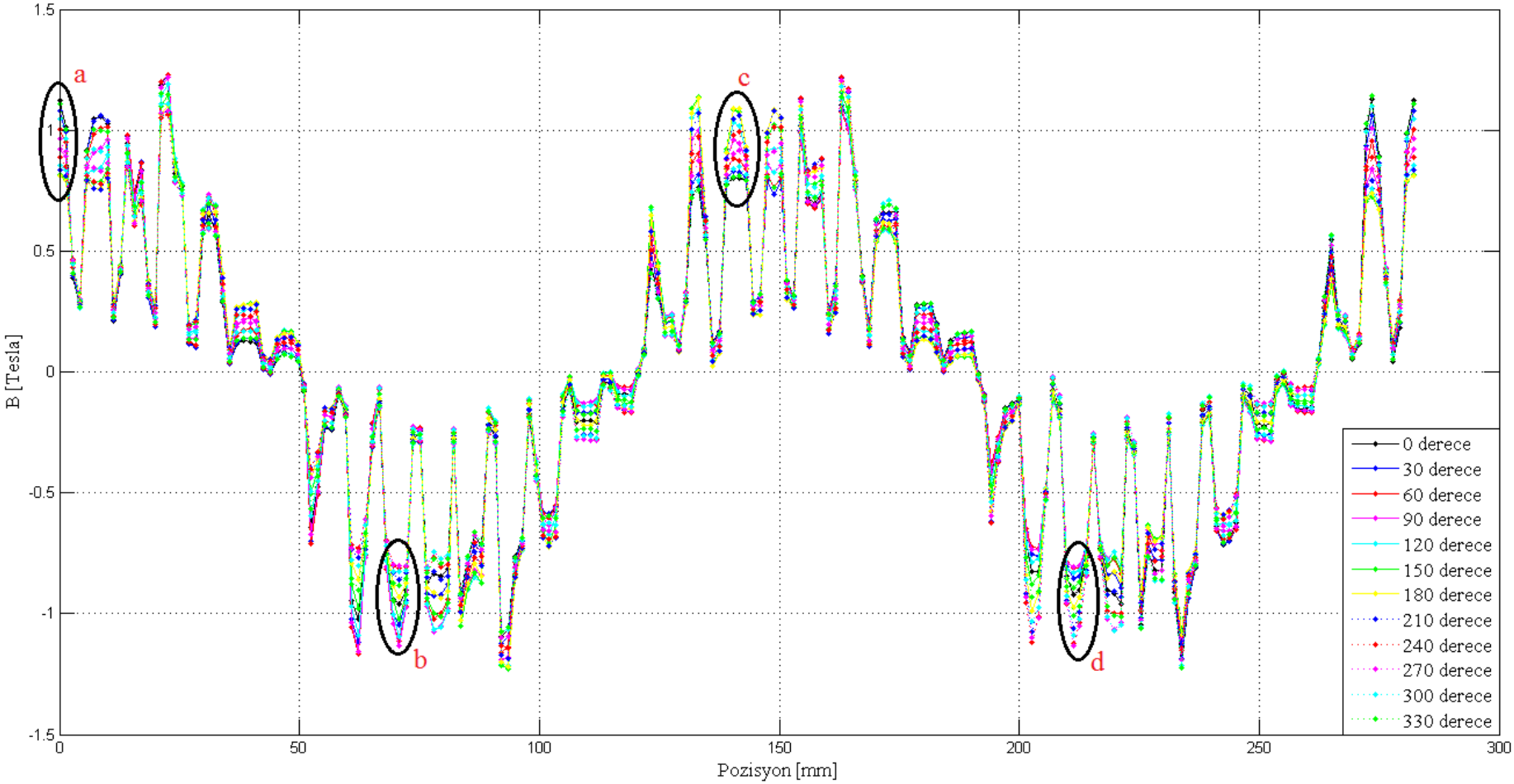
Dinamik eksen kaçıklığı durumu söz konusu olduğunda ise, hava aralığı genişliğinin en büyük ve en küçük olduğu yerler rotor pozisyonu ile değişeceğinden, statorun her hangi bir noktasından rotora bakıldığında sürekli değişen bir hava aralığı akı yoğunluğu olacaktır. Bu sebeple, moment titreşimleri statik eksen kaçıklığına göre daha da artış gösterecektir.



Şekil 5.17: %10 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.

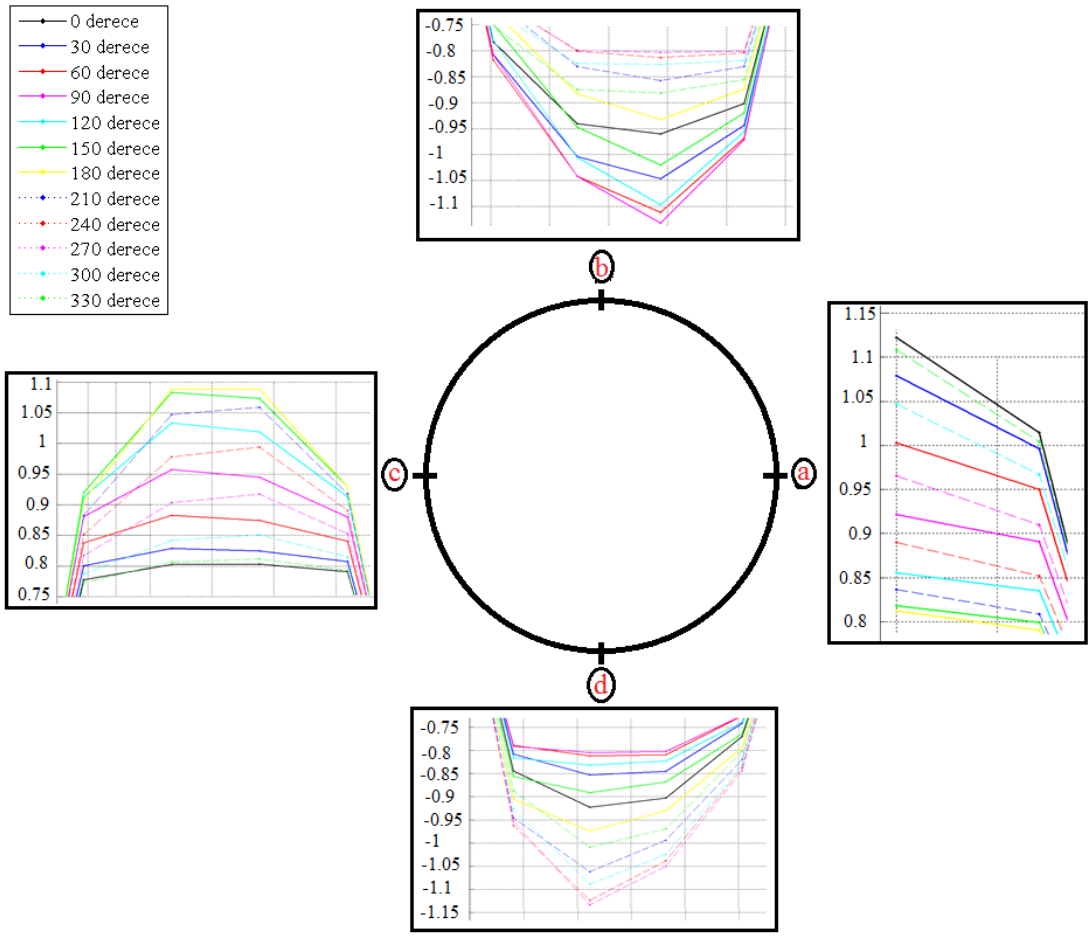


Şekil 5.18: %30 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.



Şekil 5.19: %50 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.

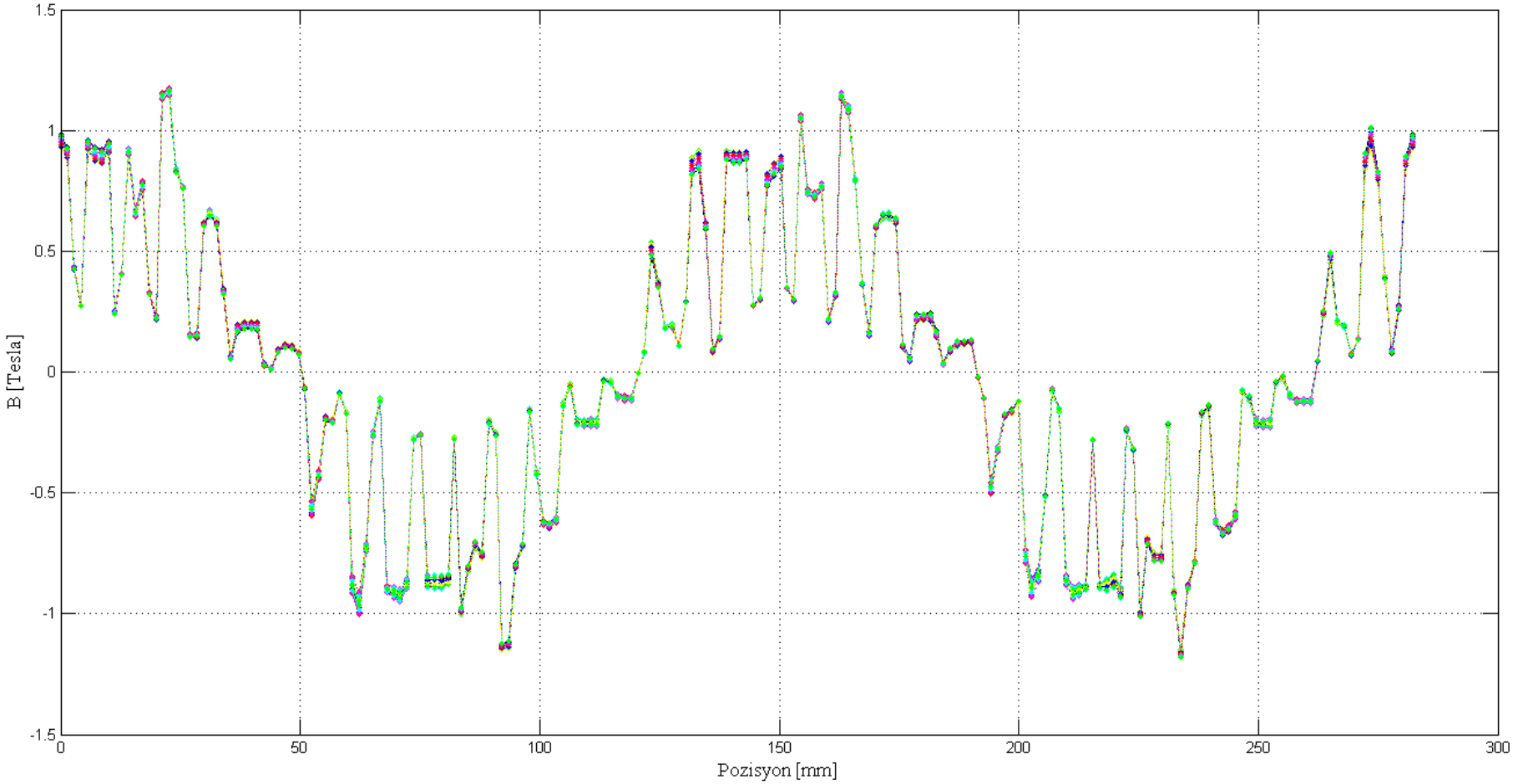
Şekil 5.19 daha yakından incelenecek olursa, rotor pozisyonu ile hava aralığı genişliğinin değişimi sonucu, statorun farklı noktalarından bakıldığında sürekli değişen manyetik akı yoğunluğu görülecektir. Bu durum şekil 5.20 sayesinde daha açıkça görülecektir.



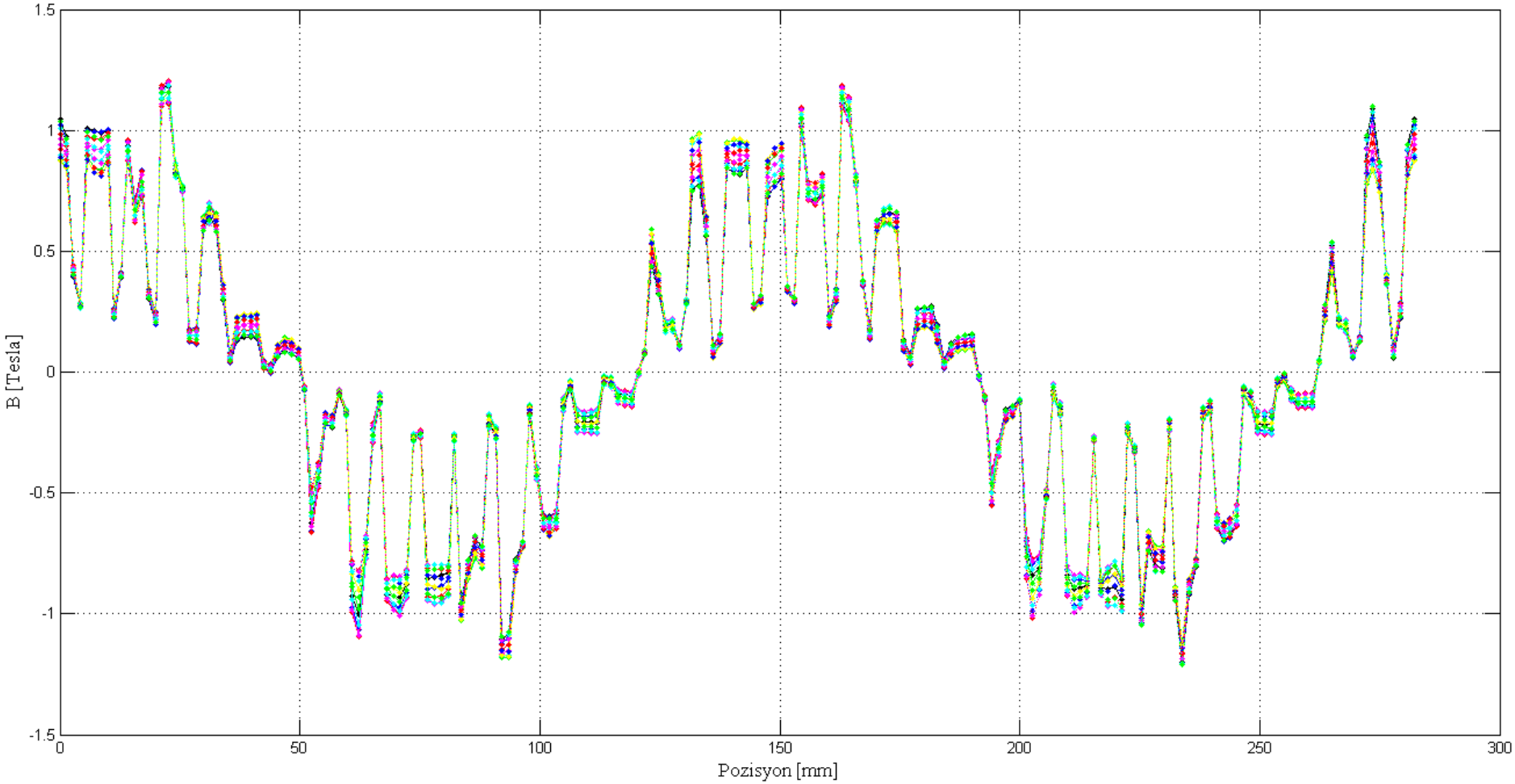
Şekil 5.20: Farklı konumlarda rotor pozisyonuna göre manyetik akı yoğunlukları (%50 DEK için).

Görüldüğü gibi dinamik eksen kaçıklığı mertebesi arttıkça, manyetik akı yoğunluğunun rotor pozisyonuna göre değişim aralığı da artmaktadır.

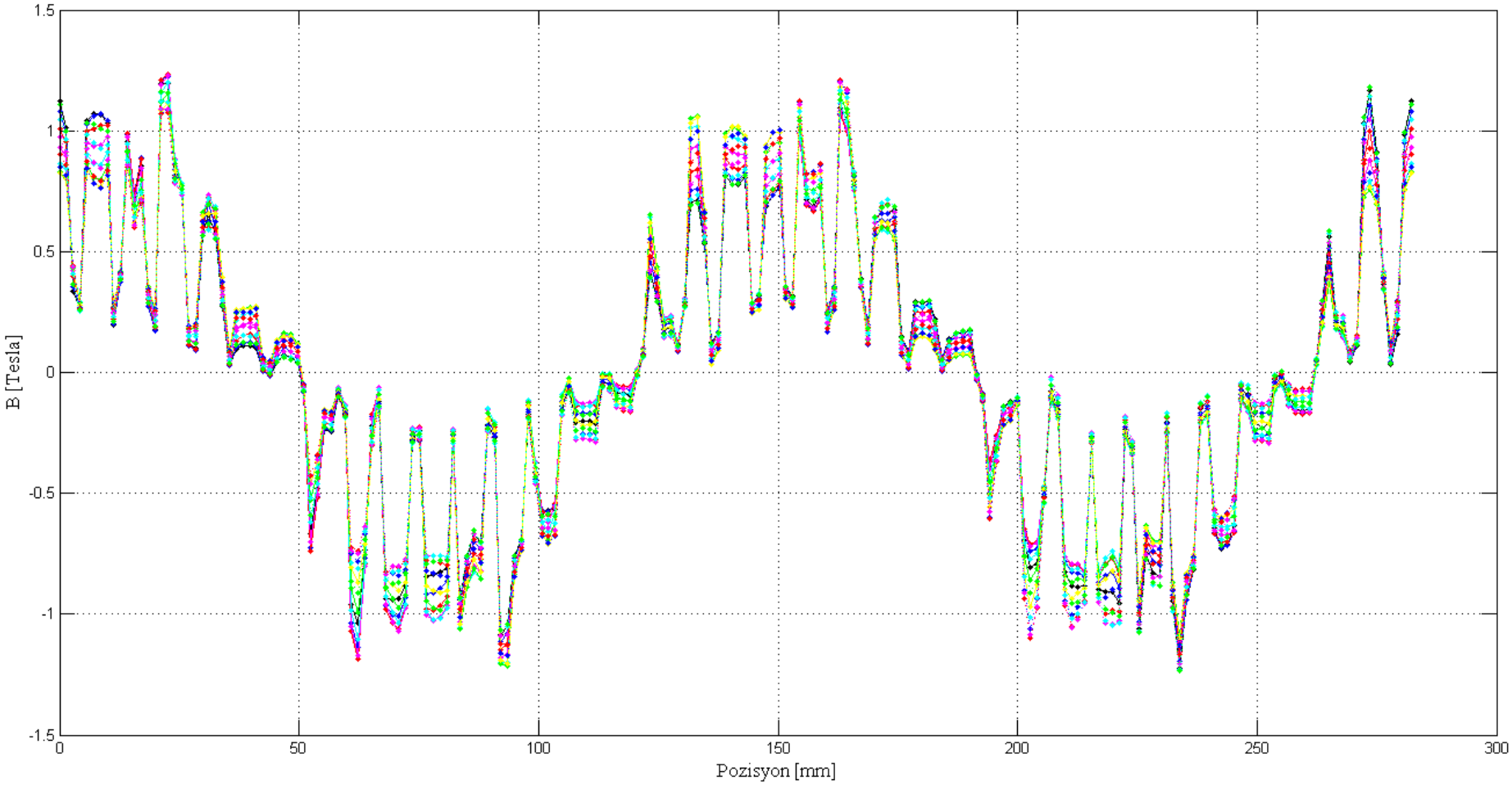
Karma eksen kaçıklığında ise dinamik eksen kaçıklığında olduğu gibi hava aralığı genişliği rotor pozisyonuyla değişecektir. Fakat statik bir kaymaya ilave olarak ortaya çıkan dinamik eksen kaçıklığı sonucu rotor, sürekli olarak bir tarafa daha yakın dönecektir. Bu da hava aralığı genişliğinin, rotorun pozisyonuna bağlı olarak, bir tarafta çok daha fazla küçülmesine ve diğer tarafta çok daha büyümesine yol açacaktır. Sonuç olarak ortaya daha büyük dengesiz çekme kuvvetleri çıkacaktır.



Şekil 5.21: %10 statik + %10 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.

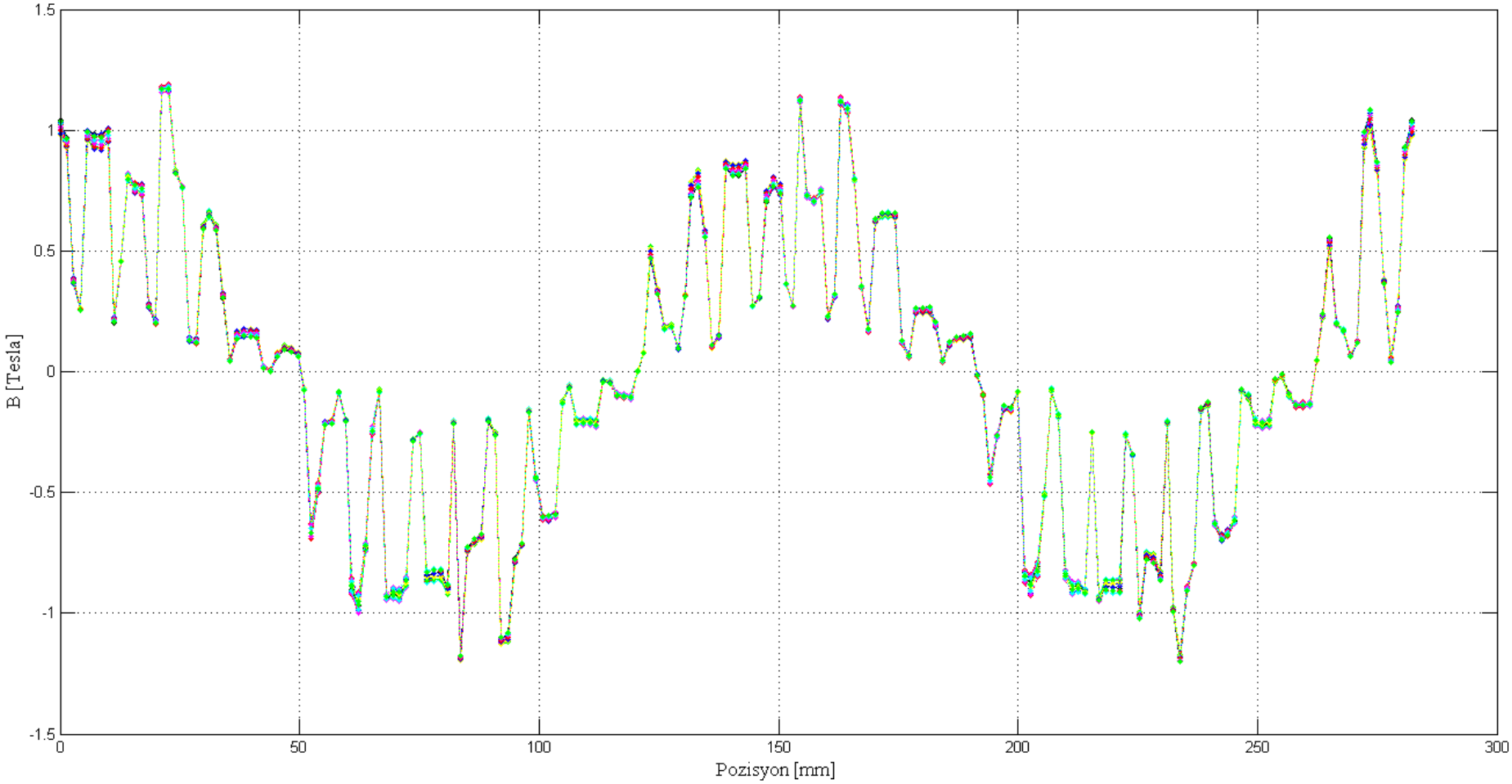


Şekil 5.22: %10 statik + %30 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.

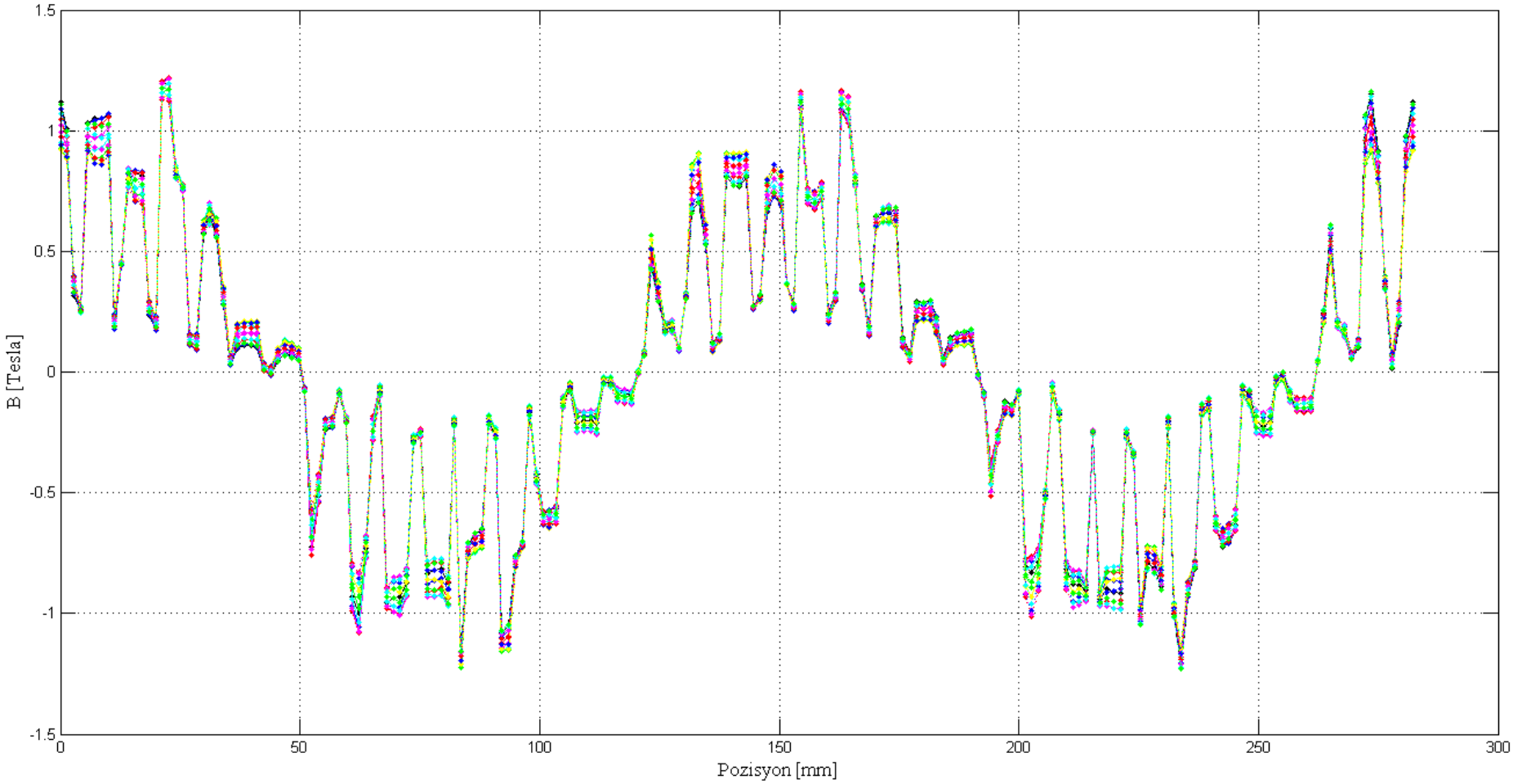


Şekil 5.23: %10 statik + %50 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.

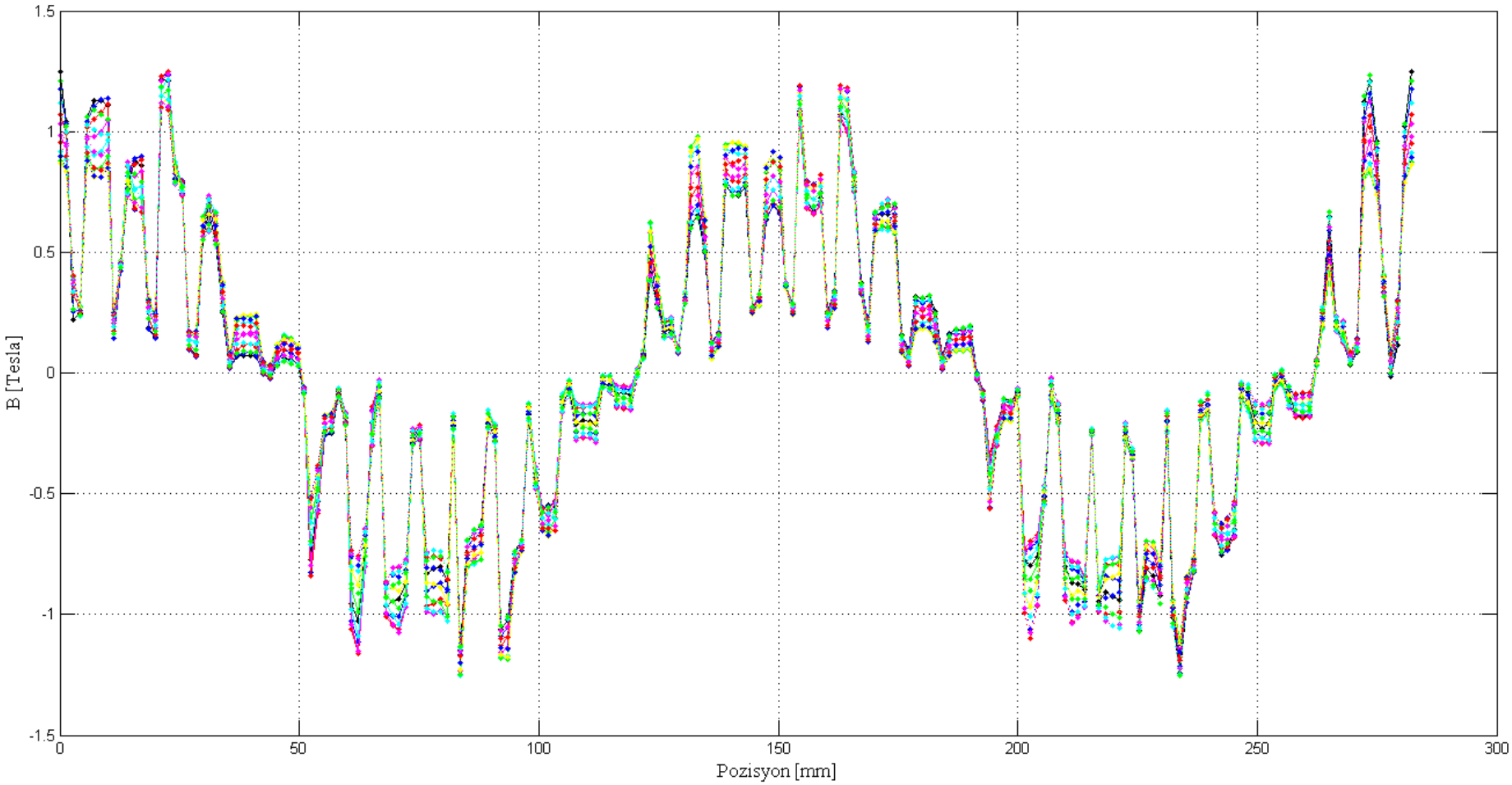
Öncelikle %10 mertebesinde statik eksen kaçıklığı ile farklı mertebelerde dinamik eksen kaçıklığının birleşmesi sonucu ortaya çıkan karma eksen kaçıklığı durumu incelenmiştir. Ardından karma eksen kaçıklığının, statik eksen kaçıklığı bileşeni %30 mertebesine getirilerek, hava aralığı genişliğinin en küçük ve en büyük değerlerini aldığı modeller kurulmuştur.



Şekil 5.24: %30 statik + %10 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.

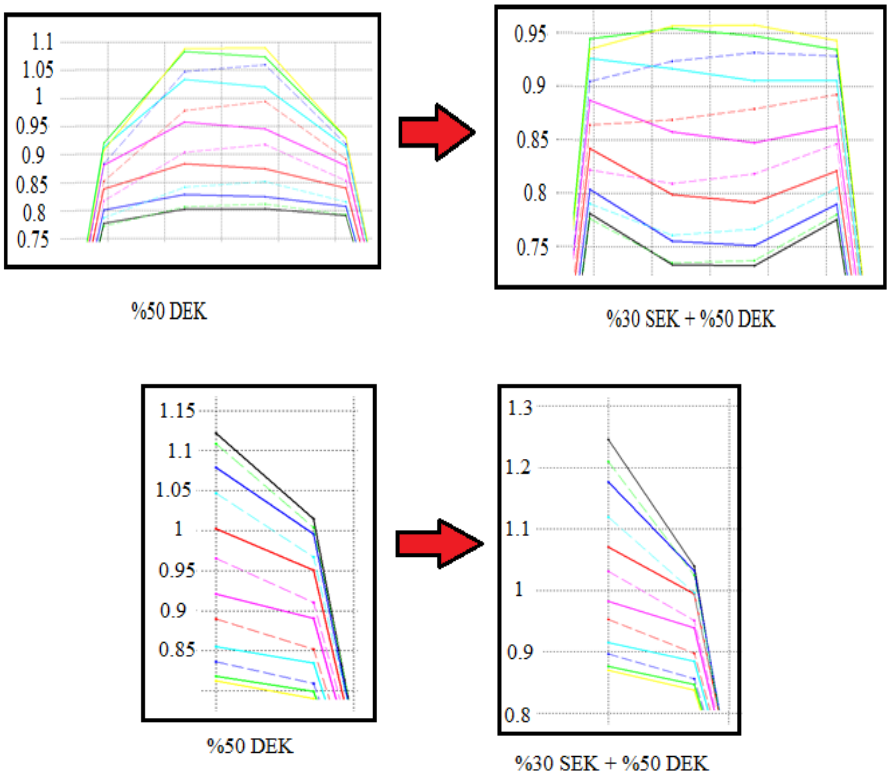


Şekil 5.25: %30 statik + %30 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.



Şekil 5.26: %30 statik + %50 dinamik eksen kaçıklığı için hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonu ile değişimi.

Karma eksen kaçıklığı için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, aynı mertebede dinamik eksen kaçıklığı içeren modele kıyasla, aynı konumlar göz önünde bulundurulursa, akı yoğunluğunun en büyük ve en küçük noktaları arasındaki fark daha da artmıştır. Şekil 5.27 bu durumu açıkça göstermektedir.



Şekil 5.27: Karma ve dinamik eksen kaçıklıkları için akı yoğunluklarının karşılaştırılması.

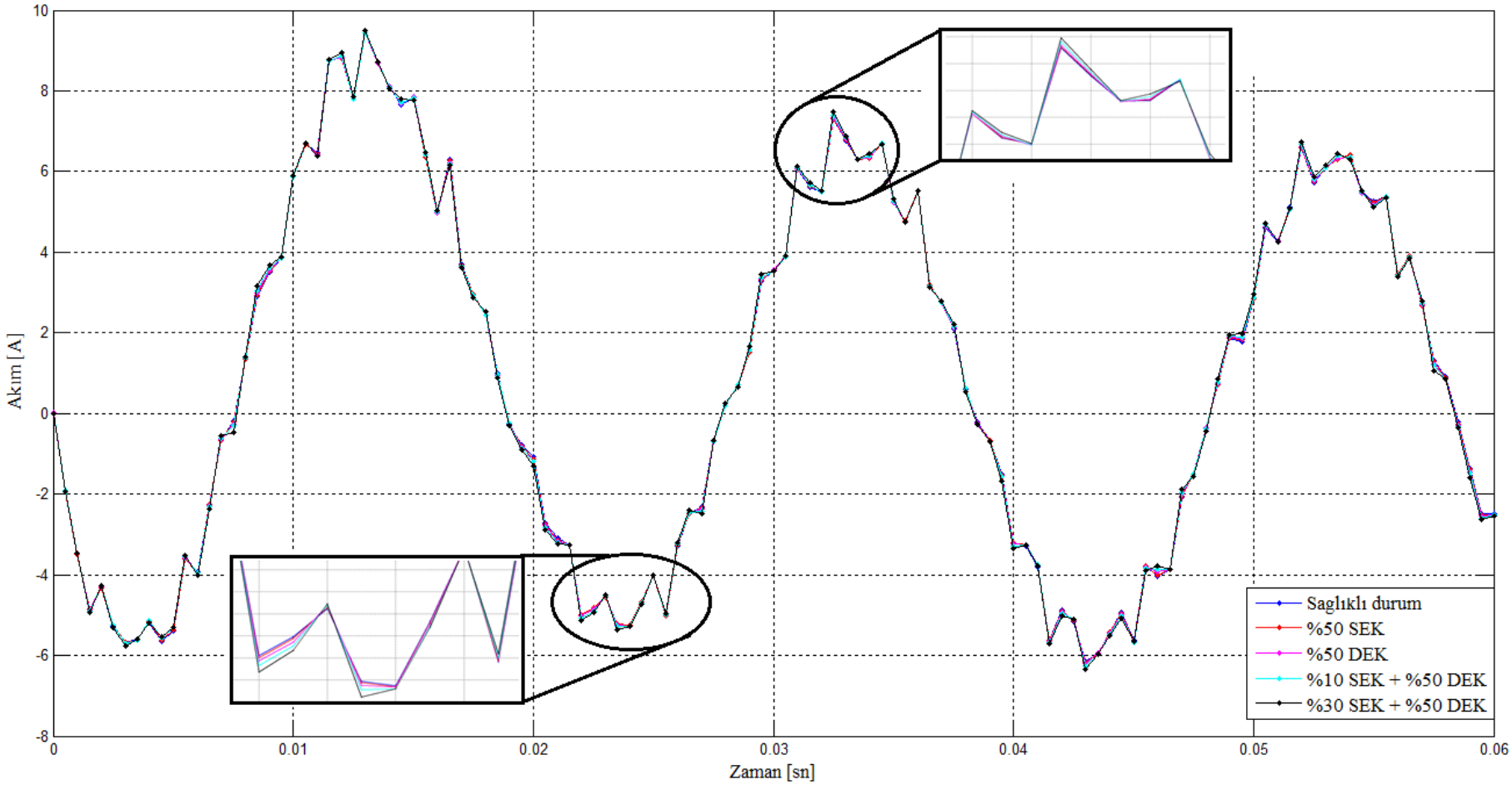
5.4.2.2 Akım açısından benzetim sonuçları

Eksen kaçıklığı arttıkça motorun şebekeden çektiği akımın ortalama değeri de artmaktadır. Böylece kayıplar artacak ve verim de düşecektir. Eksen kaçıklığı tipi ve mertebesine göre motorun şebekeden çektiği akım değerleri ve sağlıklı duruma göre hata mertebeleri Çizelge 5.10' da gösterilmektedir.

Çizelge 5.10: Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumlarında ortalama akım değerleri.

Çalışma durumu	Akım [A]	ε [%]
Sağlıklı durum	4.403582	
%50 SEK	4.410534	0.158
%50 DEK	4.422681	0.432
%10 SEK + %50 DEK	4.428956	0.573
%30 SEK + %50 DEK	4.444086	0.912

Ayrıca akım karakteristikleri de Şekil 5.28'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

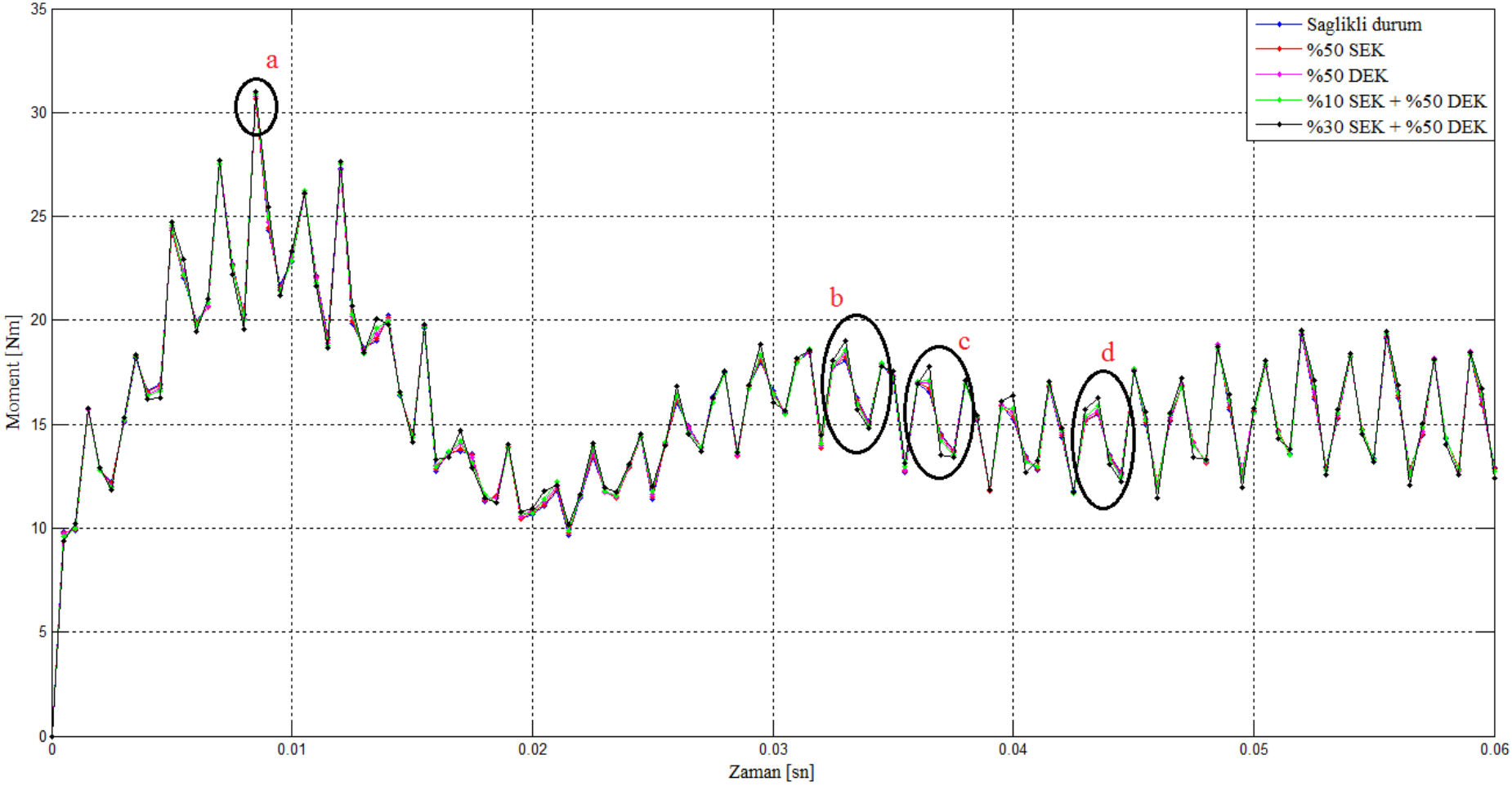


Şekil 5.28: Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için akım karakteristikleri.

5.4.2.3 Moment açısından benzetim sonuçları

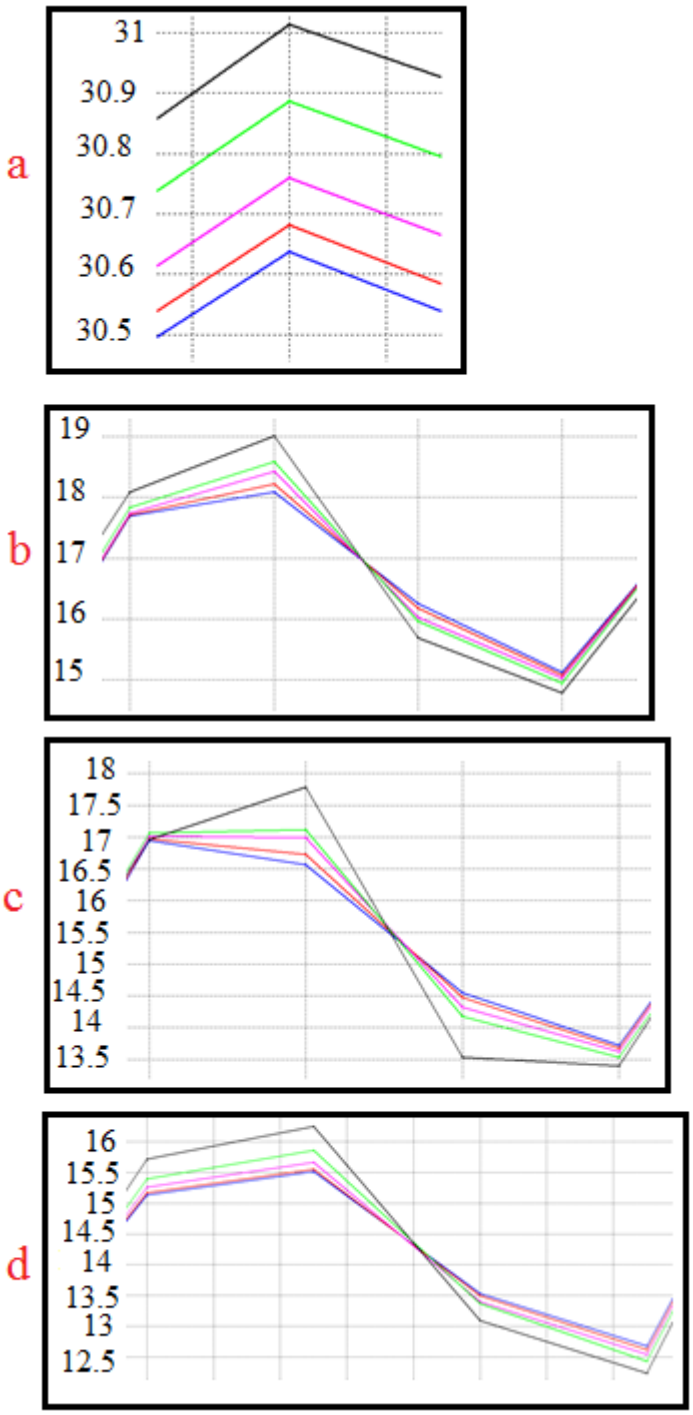
Eksen kaçıklığının moment üzerindeki etkisi her çalışma durumu için elde edilen moment karakteristiklerinin incelenmesi ile ortaya koyulacaktır. Asimetrik çalışma durumunun artmasıyla moment karakteristiklerindeki tepe değerlerinin ve dalgalılığın arttığı görülmüştür.

Tüm çalışma durumlarının en yüksek mertebede hata içeren modellerine ait moment eğrileri Şekil 5.29' da üst üste gösterilmiştir.



Şekil 5.29: Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için moment karakteristikleri.

Moment eğrileri tepe değerlerinin değişimini ve moment dalgalılığının eksen kaçıklığının artışı ile arttığını görmek amacıyla farklı çalışma noktalarındaki moment değerlerine Şekil 5.30 aracılığıyla daha yakından bakılabilir.



Şekil 5.30: Moment karakteristikleri detay görünüm.

Çizelge 5.11: Detay görüntüsü verilen moment değerleri.

Şekil	Sağlıklı durum [Nm]	%50 SEK [Nm]	%50 DEK [Nm]	%10 SEK %50 DEK [Nm]	%30 SEK %50 DEK [Nm]
5.29.a	30.64	30.68	30.76	30.89	31.01
5.29.b	18.08	18.22	18.43	18.58	19.01
	15.12	15.07	15.03	14.95	14.79
5.29.c	16.57	16.73	16.99	17.12	17.79
	14.55	14.47	14.32	14.17	13.53
5.29.d	15.51	15.55	15.66	15.86	16.25
	12.68	12.62	12.55	12.43	12.23

Çizelge 5.12: Detay görüntüsü verilen moment değerlerine ait bağıl hata ve dalgalılık değerleri.

ε_1 [%]	Toplam Dalgalılık [%]	ε_2 [%]	Toplam Dalgalılık [%]	ε_3 [%]	Toplam Dalgalılık [%]	ε_4 [%]	Toplam Dalgalılık [%]
0.13		0.39		0.81		1.19	
0.77 -0.33	1.1	1.9 -0.6	2.5	2.7 -1.14	3.84	4.9 -2.23	7.13
0.96 -0.55	1.51	2.47 -1.6	4.07	3.21 -2.68	5.89	6.86 -7.54	14.4
0.26 -0.48	0.74	0.96 -1	1.96	2.21 -2.01	4.22	4.55 -3.68	8.23

Çizelge 5.12’ de tepe değerlerinin eksen kaçıklığı değişimi ilk satırda verilmiştir. Ardından moment dalgalılığının eksen kaçıklığı ile değişimini göstermek amacıyla farklı zaman dilimlerinde alınmış moment değerleri verilmiştir. Ortalama moment değeri çok küçük mertebelerde değişmesine rağmen dalgalılık görüldüğü gibi dikkate değer bir şekilde artmaktadır. Statik eksen kaçıklığında %1 mertebelerindeki değişim karma eksen kaçıklığında % 14’lere kadar varmaktadır.

6. TEST SONUÇLARI

Asimetrik çalışma durumunu deney sonuçları eşliğinde incelemek amacıyla, benzetimi yapılan motorda, eksen kaçıklığı meydana getirilerek farklı testler yapılmıştır. Seri üretimde olan motorun öncelikle sağlıklı durum için testleri yapılmış, ardından da, iki farklı kademede asimetrik çalışma durumu test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda, akım, ses ve titreşim ölçümleri elde edilmiştir. Böylelikle sağlıklı durum ve eksen kaçıklığı barındıran durum, benzetim sonuçlarında elde edilen, hava aralığı akısı, akım ve moment gibi parametrelerin yanı sıra, titreşim açısından da karşılaştırılmıştır. Ayrıca benzetim sonucunda elde edilen akım karakteristiği, test sonuçlarında osiloskoptan alınan veriler eşliğinde ortaya çıkan akım karakteristiği ile karşılaştırılmış, benzetim ve deney sonuçlarının tutarlılığı tekrardan gösterilmiştir.



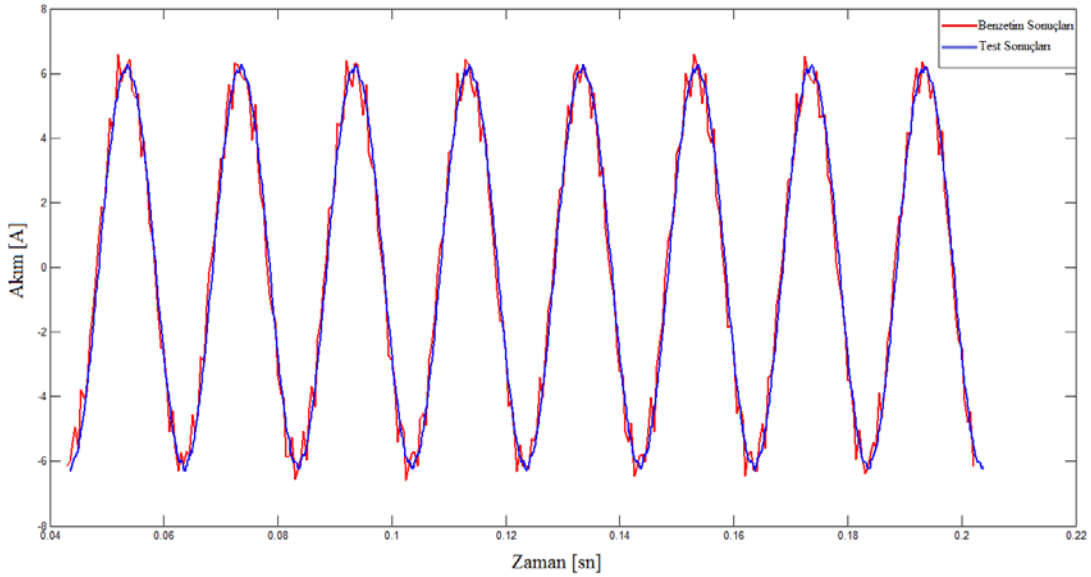
Şekil 6.1: Test yapılan motorun rotoru: (a) Seri üretim (b) Balans pulu olmayan (c) Balans pulu olmayan+darbeli.

Şekil 6.1 (a)' da seri üretimde kullanılan motorun rotoru balans pulu ile birlikte görülmektedir, (b)' de, balans pulunun çıkartıldığı durum, (c)' de ise balans pulu çıkartılan rotorun fiziksel darbeler ile daha da bozulduğu durum görülmektedir. Böylece sağlıklı ve iki farklı kademede asimetrik çalışma durumu incelenmiştir.

6.1 Akım Açısından Test Sonuçları

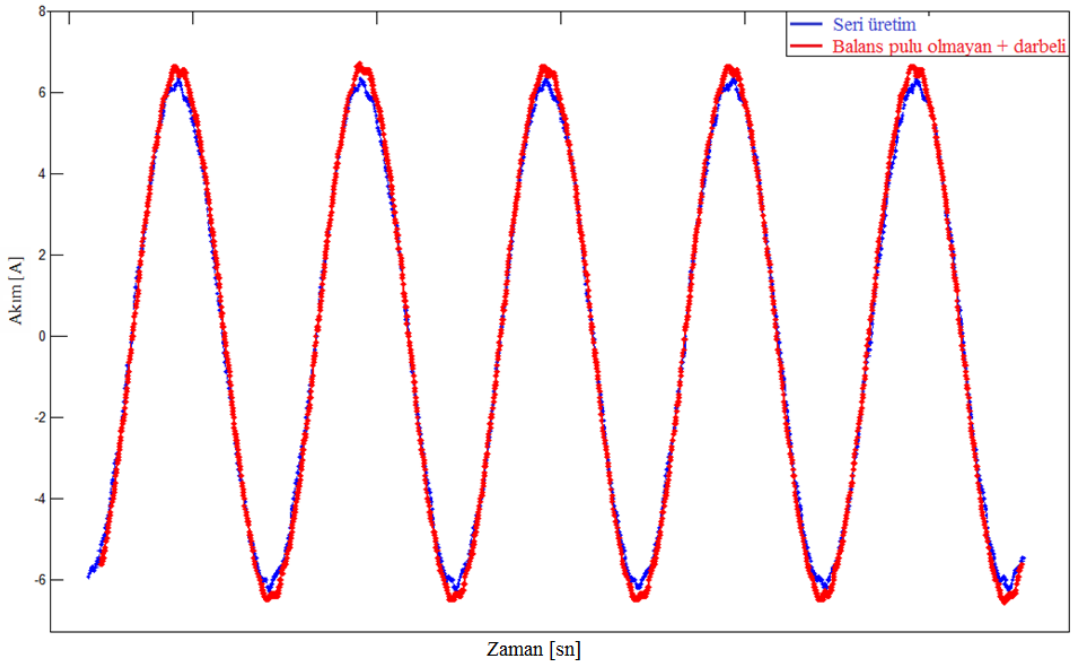
Asenkron motorun sağlıklı durumu için yapılan testi sonucu akım değerleri osiloskop yardımıyla elde edilmiştir. Ayrıca asimetrik çalışma durumunun akıma olan etkisinin deneysel sonuçlara da gösterilmesi amacıyla balans pulu olmayan ve darbeli durum için de akım değerleri ölçülmüştür.

İlk olarak sağlıklı duruma ait test ve benzetim sonuçları karşılaştırılıp, benzetim sonuçları doğrulanmıştır. Şekil 6.2' de test ve benzetim sonuçlarının tutarlılığı görülmektedir.



Şekil 6.2: Sağlıklı durum için benzetim ve test sonuçlarıyla akım.

Daha sonra sağlıklı ve asimetrik durum deneysel sonuçlar eşliğinde karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarında olduğu gibi, eksen kaçıklığının artmasıyla şebekeden çekilen akım mertebesinde artış görülmektedir. Test sonuçlarında, sağlıklı durum ve asimetrik çalışma durumunda elde edilen akım değerleri Şekil 6.3' de görülmektedir.



Şekil 6.3: Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için akım karakteristiklerine dair test sonuçları**.**

Akımın efektif değerleri karşılaştırılacak olursa, sağlıklı durum ve asimetrik çalışma durumlarında çekilen akımlar ve bağıl hata oranı Çizelge 6.1' de görülmektedir.

Çizelge 6.1: Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için test sonucunda elde edilen akım değerleri.

	Seri üretim	Balans pulu olmayan + Darbeli
Akım [A]	4.469	4.582
ε [%]	2.45	

6.2 Titreşim ve Gürültü Açısından Test Sonuçları

Benzetim sayesinde, eksen kaçıklığı ve etkileri; hava aralığı akı yoğunluğu, akım ve moment gibi parametreler açısından incelenmiştir. Bunun yanı sıra, mekanik açıdan ortaya çıkan etkilerin incelenmesi amacıyla deneylerden yararlanılacaktır. Sağlıklı durum ve iki farklı kademede asimetrik çalışma durumlarında titreşim ve gürültü açısından etkilerin incelenmesi amacıyla gerekli test düzenekleri sayesinde ölçümler yapılmıştır.

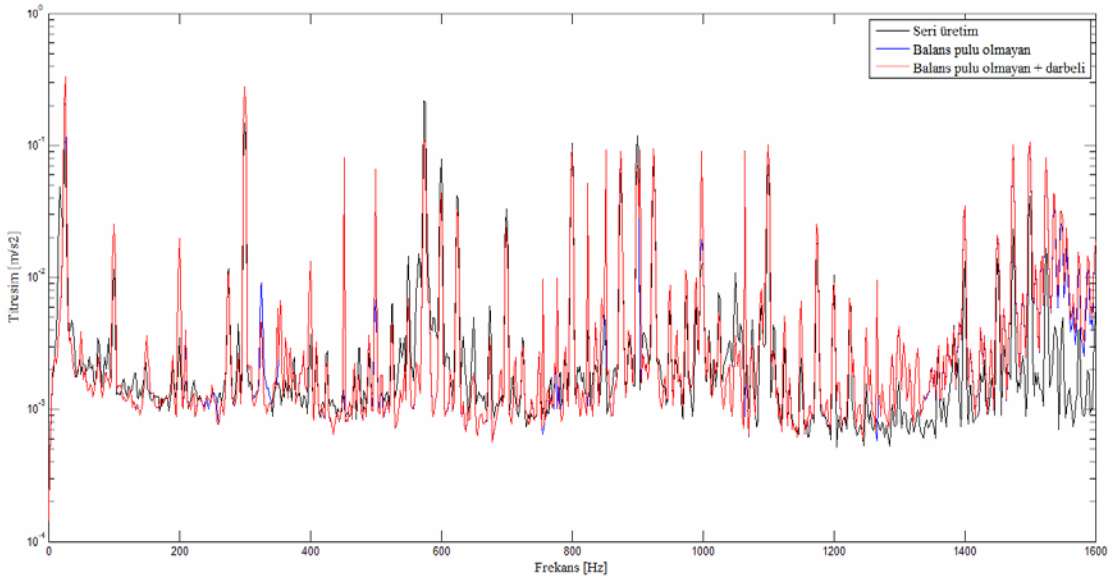
Titreşim mertebeleri konuma, hıza ve ivmeye bağımlı olarak elde edilebilmektedir ve mil yüksekliklerine göre meydana gelecek titreşimler standartlar çerçevesinde belirlenmiştir. IEC 60034-14 standartı içeriğinde, titreşimlerin önemleri, ölçümleri ve limitleri ayrıntılı olarak ifade edilmiştir [32].

Test sonuçlarına göre her üç durum için titreşim ve gürültü ölçümleri Çizelge 6.2' de verildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 6.2: Sağlıklı ve asimetrik çalışma durumları için test sonucunda elde edilen titreşim ve gürültü değerleri.

	Seri üretim	Balans pulu olmayan	Balans pulu olmayan + Darbeli
Titreşim [m/s^2]	0.49	0.513	0.535
Gürültü [dB]	54.86	54.56	55.08

Test sonucu elde edilen titreşim ve gürültü verileri eşliğinde mevcut olan eksen kaçıklığı hatasının gürültü değerleri ışığında tespit edilemediği fakat titreşim değerlerinin %8.5 mertebesinde artış gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca Şekil 6.4 incelendiğinde asimetrik çalışma durumunda yüksek frekanslı bileşenler için titreşim değerlerinin artış gösterdiği sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.4: Test sonucu elde edilen titreşim değerlerinin frekans bandındaki gösterimi.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eksen kaçıklığı bulunan asenkron motor, benzetim sonuçları ve deney sonuçları yardımıyla incelenmiştir. Eksen kaçıklığının farklı tipleri olan statik, dinamik ve bu iki durumu bir arada ihtiva eden karma eksen kaçıklığı hataları farklı mertebelerde modellenmiştir. Her modelin çözümü ile, hava aralığı akı yoğunluğu, akı dağılımı, akım, moment ve hava aralığı akı yoğunluğuna dair harmonik bileşenler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sağlıklı durum, statik, dinamik ve karma eksen kaçıklığı durumları karşılaştırılmış ve hatanın farklı boyutlarında motor parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Ayrıca benzetim için kullanılan motora dair sağlıklı durum ve asimetrik çalışma durumu için deney sonuçları elde edilmiş ve benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarıyla elde edilen, manyetik ve elektriksel parametrelerin yanı sıra, deney sonuçlarıyla titreşim ve gürültü gibi mekanik parametrelerde elde edilmiştir. Böylece eksen kaçıklığı hatasının etkileri, manyetik, elektriksel ve mekanik yönlerden incelenmiştir.

Sağlıklı model elde edildikten sonra, rotor ekseni ve motorun dönme ekseni kaydırılarak, farklı mertebelerde eksen kaçıklığı içeren modeller oluşturulmuş ve her biri, geçici hal ve kararlı hal durumları için analiz edilmiştir. Hava aralığı genişliğinin hata ile birlikte değişmesinden dolayı, permeans değerinin de değişmesi sonucu, hava aralığı akı yoğunluğu, hava aralığı genişliğinin daraldığı bölgelerde artış göstermiş ve genişlediği bölgelerde azalmıştır. Bu durum da, harmonik içerikte yüksek mertebeli bileşenlerin genliğinde artışlara sebep olmaktadır. Hava aralığı akı yoğunluğu karakteristiğinde ki bu bozulmalar, momenti de etkilemektedir. Farklı zaman dilimlerinde çalıştırılan modeller incelendiğinde, moment karakteristiğinin kararlı durumda dahi, dalgalılığının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun da titreşim seviyesinde artışa ve ortalama moment değerinde azalmaya sebep olduğu görülmüştür.

Deney esnasında, rotorun ve dönme ekseninin kaydırılması işlemi, mekanik zorluklardan ötürü, benzetimde olduğu kadar kolay olmamıştır. Seri üretimdeki motorun testlerinin yapılmasının yanı sıra, iki farklı kademede asimetrik çalışma

durumu oluşturularak akım, titreşim ve gürültü ölçümleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, elektriksel parametrelerde, benzetim sonuçlarına paralel ölçümler alınmıştır. Ayrıca titreşim ve gürültü gibi mekanik ölçümler de elde edilmiş ve eksen kaçıklığının artışıyla bu büyüklüklerin de artış gösterdiği gözlenmiştir.

Elde edilen benzetim ve test sonuçları ışığında, eksen kaçıklığı hatasının analizi yapılmıştır. Böylece bu hatanın tanısı amaçlı izlenilebilecek parametreler belirlenmiştir. Hava aralığı akı yoğunluğu, akım, moment ve titreşim gibi manyetik, elektriksel ve mekanik büyüklükler farklı yöntemlerle izlenerek eksen kaçıklığı hatasının tesbitinin yapılabileceği ve daha büyük boyutlarda arızalar meydana gelmeden müdahele imkanı geliştirilebileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Rosenberg E.** (1918). Magnetic Pull in Electric Machines, AIEE, 1425 – 1469.

[2] **Von Kaehne P.** (1963). Unbalanced Magnetic Pull in Electrical Machines, ERA Report, Z/T142.

[3] **Bradford M. ve Greenslade J. A.** (1971). Discussion on Effects of Rotor Eccentricity on Acoustic Noise from Induction Machines and Natural Frequencies of Stators of Small Electric Machines, Proc. IEE, Vol. 118, No. 7, 899–900.

[4] **Ellison, A. J. ve Yang**, **S. J.** (1971). Effects of Rotor Eccentricity on Acoustic Noise from Induction Machines, Proc. IEE, Vol. 118, No. 1, 174–184.

[5] **Verma S. P. ve Natarajan R.** (1982). Effects of Eccentricity in Induction Motors, Proceedings of International Conference on Electrical Machines, Vol. 3, 930–933.

[6] **Summers E. W.** (1955). Vibration in 2-Pole Induction Motors Related to Slip Frequency, AIEE Rotating Machinery Committee, 69–72.

[7] **Cameron J. R., Thomson W. T. ve Dow A. B.** (1986). Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors, IEE Proceedings, Vol. 133, No. 3, 155–163.

[8] **Toliyat H. A., Arefeen M.S. ve Parlos A.G.** (1996). A Method for Dynamic Simulation of Airgap Eccentricity in Induction Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, 910–918.

[9] **Chari M. V. K. ve Silvester P.** (1971). Finite Element Analysis of Magnetically Saturated DC Machines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2362–2372.

[10] **Chari M. V. K. ve Silvester P.** (1971). Analysis of Turbo-Alternator Magnetic Fields by Finite Elements, IEEE Trans., Vol. 90, 454–464.

[11] **Arkkio A.** (1987). Analysis of Induction Motors Based on the Numerical Solution of the Magnetic Field and Circuit Equations, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Finland, (Doktora Tezi).

[12] **Thomson W. T. ve Barbour A.** (1998). On-line Current Monitoring and Application of a Finite Element Method to Predict the Level of Static Air Gap Eccentricity in Three Phase Induction Motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 4, 347–357.

[13] **Joksimovic G.M., Durovic M.D., Penman J. ve Arthur N.** (2000). Dynamic Simulation of Dynamic Eccentricity in Induction Machines-Winding Function Approach, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 2, 143–148.

[14] **Nandi S., Bharadwaj R. M. ve Toliyat H. A.** (2002). Mixed Eccentricity in Three Phase Induction Machines: Analysis, Simulation and Experiments, Industry Applications Conference, Vol. 3, 1525–1532.

[15] **Nandi S., Ahmed S. ve Toliyat H.A.** (2001). Detection of Rotor Slot and Other Eccentricity Related Harmonics in a Three Phase Induction Motor with Different Rotor Cages, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 16, No. 3, 253–260.

[16] **Frauman P., Burakov A. ve Arkkio A.** (2007). Effects of the Slot Harmonics on the Unbalanced Magnetic Pull in an Induction Motor With an Eccentric Rotor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 8, 3441–3444.

[17] **Alger P.L.** (1965). Induction Machines – Their Behaviour and Uses, Gordon and Breach Science Publishers, Basel, Switzerland.

[18] **Ostovic V.** (1994). Computer Aided Analysis of Electric Machines, Prentice Hall Inc., Cambridge, Great Britain.

[19] **Sprooten J.** (2007). Finite Element and Electrical Circuit Modeling of Faulty Induction Machines – Study of Internal Effects and Fault Detection Techniques, University Libre de Bruxelles, Department of Bio, Electro and Mechanical Systems, Belgium, (Doktora Tezi).

[20] **Da Silva A.M.** (2006). Induction Motor Fault Diagnostic and Monitoring Methods, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, USA, (Yüksek Lisans Tezi).

[21] **Nandi S., Toliyat H. A. ve Li X.** (2005). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, 719–729.

[22] **Vas P.** (1993). Parameter Estimation Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford University Press Inc., New York, USA.

[23] **Özelgin İ.** (2008). Analysis of Magnetic Flux Density for Airgap Eccentricity and Bearing Faults, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Issue 4, Vol. 2, 162–169.

[24] **Werner U. ve Binder A.** (2005). Dynamic Analysis Due to Eccentricity in Asynchronous Machines, International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

[25] **Nandi S., Ilamparithi T.C., Lee S.B. ve Hyun D.** (2011). Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 5, 1673–1683.

[26] **Timar P.L.** (1989). Noise and Vibration of Electrical Machines, Elsevier Science Publishers, Budapest, Hungary.

[27] **Sahraoui M., Ghoggal A., Zouzou S. E. ve Benbouzid M. E.** (2008). Dynamic Eccentricity in Squirrel Cage Induction Motors – Simulation and Analytical Study of Its Spectral Signatures on Stator Currents, Simulation Modeling Practice and Theory 16, 1503–1513.

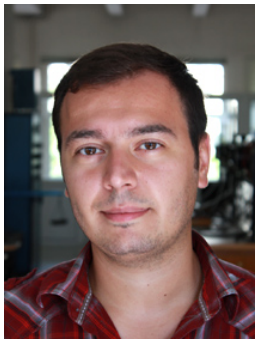
[28] **Bianchi N.** (2005). Electrical Machine Analysis Using Finite Elements, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA.

[29] **Dönmezer Y.** (2010). Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment Titreşimlerinin Azaltılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi).

[30] **Salon S., Sivasubramaniam K. ve Ergene L. T.** (2001). The Effect of Asymmetry on Torque in Permanent Magnet Motors, International Electric Machines and Drives Conference, 208–217.

[31] **Kocabaş D.A.** (2004). Asenkron Makinalarda Uzay Harmoniklerinin Etkilerini Azaltmaya Katkılar, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Doktora Tezi).

[32] **IEC 60034-14** (2007). Rotating Electrical Machines – Part 14: Mechanical Vibration of Certain Machines with 56 mm and Higher – Measurement, Evaluation and Limits of Vibration Severity, International Electrotechnical Commission.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Abdullah POLAT

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 17.11.1987

Adres: Çamlık Caddesi Gülhatmi Sokak No:13/5 Bahçelievler/İstanbul

E-Posta: polata@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim:

- **Kasım 2010–Devam Ediyor :** İstanbul Teknik Üniversitesi
  - Araştırma Görevlisi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi:

Polat A., Ergene L.T., Fırat, A., ‘‘ Dynamic Modeling of the Universal Motor Used in Washers’’, International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics & Electromotion Joint Conference (ACEMP-2011), Istanbul – Turkey, 8-10/09/2011

Polat A., Ertuğrul, Y. D., Ergene L.T., ‘‘Analysis of Static Eccentricity in Squirrel Cage Induction Motors’’, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG-2013), Istanbul – Turkey, 13-17/05/2013