

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ORTA GÜÇLÜ ÜÇ FAZLI SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA
EKSANTRİK ARIZANIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TESPİTİ
VE ANALİZİ**

DAVUT SUN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2024**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ORTA GÜÇLÜ ÜÇ FAZLI SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA
EKSANTRİK ARIZANIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TESPİTİ
VE ANALİZİ**

DAVUT SUN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2024**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Asenkron Motorda Oluşan Arızalar	3
1.3. Eksantrik Arızası	5
1.3.1. Eksantrik arızanın oluşma sebepleri	9
1.4. Eksantrik Arızanın Makina Üzerinde Yarattığı Etkiler	11
1.5. Tezin Amacı	12
1.6. Tez İçeriği	13
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM	18
3.1. Kullanılan Tasarım ve Analiz Programına Genel Bakış	18
3.1.1. Çözüm türünü belirleme işlemi	20
3.1.2. Sonlu elemanlar yöntemi	22
3.1.3. Maxwell_2D	24
3.2. Sincap Kafesli Asenkron Motorun Modellenmesi	25
3.2.1. Tasarlanan sağlıklı motora ait manyetik alan dağılımı	40
3.2.2. Tasarlanan sağlıklı motora ait vektör çizgileri	42
3.2.3. Tasarlanan sağlıklı motora ait manyetik akı çizgileri	43
3.2.4. Tasarlanan sağlıklı motora ait mesh yapısı	45
3.2.5. Tasarlanan sağlıklı motora ait eşdeğer devre	47
3.2.6. Sincap kafesli asenkron motor modelinde eksantrik arızanın modellenmesi	48
4. ARAŞTIRMA BULGULAR ve TARTIŞMA	55
4.1. 11Kw_4p_IE4 Asenkron Motorun Benzetim Sonuçları	55
4.2. 11kw_4p_IE4 Asenkron Motorun Sağlıklı Durum İçin Benzetim Sonuçları	55
4.3. Eksantrik Arızalı Durumlar İçin Benzetim Sonuçları	58
4.3.1. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu açısından benzetim sonuçları	58
4.3.2. Moment açısından benzetim sonuçları	65
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	77
5.1. Sonuçlar	77
5.2. Öneriler	78
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	82

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ORTA GÜÇLÜ ÜÇ FAZLI SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA EKSANTRİK ARIZANIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TESPİTİ VE ANALİZİ

Davut SUN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Buket SONBAŞ COBB
Yıl:2024, Sayfa: 82

Sincap kafesli asenkron motorlar, basit yapıları, düşük maliyetleri, yüksek verim ve enerji tasarrufu sağlamaları, ayrıca düşük bakım gereksinimleri nedeniyle endüstride oldukça tercih edilmektedirler. Bu nedenle sincap kafesli asenkron motorların arızalı durumları da birçok çalışmada ele alınmıştır. Bu çalışmada, eksantrik arızanın oluşumundan arızalı durumlarına kadar geniş kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Eksantrik arıza, stator ile rotor arasında homojen olarak dağılan havanın bozulması durumunu ifade eder. Bu arıza, statik, dinamik ve karışık olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Arızanın oluşması, motorun tasarımından çalışma koşullarına kadar bir dizi faktöre bağlıdır. Eksantrik arızanın ortaya çıkmasıyla birlikte, motorun dengesiz hava aralığı, manyetik akı yoğunluğu, gürültüler, ısınmalar, moment dalga değişimleri ve yükün kararsızlaşması gibi durumlar öne çıkar.

Çalışmada, 11 kW, 4 kutuplu, premium yüksek verim sınıfına ait bir sincap kafesli asenkron motor incelenmiştir. Sağlıklı durumdaki motor ile eksantrik arızalı durumdaki motoru karşılaştırmak amacıyla farklı tiplerde arızalar ve arızanın şiddetine göre sonlu elemanlar yöntemi ile durum tespiti ve analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sağlıklı ve arızalı durumdaki motorlar karşılaştırılmış ve benzetim sonuçlarıyla desteklenmiştir. Ansys_Maxwell programı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tasarım öncesi davranışların ve hatalı durumların nasıl değerlendirileceğini kolaylaştıran bir yazılım paketidir. Modelleme ve benzetim sonuçları karşılaştırılarak, eksantrik arızanın kapsamında manyetik akı yoğunluğu, moment, titreşim, gürültü gibi parametrelerin nasıl yorumlanması gerektiği detaylı olarak incelenmiştir. Motorun farklı arıza şiddetlerinde nasıl etkilendiği detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu tez çalışmasında eksantrik arızanın tespitinde kontrol edilmesi gereken parametrelerin tüm sonuçları ile sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Sincap kafesli asenkron motor, eksantrik arıza, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, sonlu elemanlar yöntemi, arıza tespiti

ABSTRACT

MSc thesis

DETECTION AND ANALYSIS OF ECCENTRIC FAILURE IN MEDIUM POWER THREE-PHASE SQUIRREL CAGE ASYNCHRONOUS MOTORS USING FINITE ELEMENT METHOD

Davut SUN

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Dr. Öğretim Üyesi Buket SONBAŞ COBB
Year: 2024, Page: 82**

Squirrel cage induction motors are highly preferred in the industry due to their simple structures, low costs, high efficiency, and energy-saving capabilities, as well as their minimal maintenance requirements. Therefore, faulty conditions of squirrel cage induction motors have been the subject of many studies. In this study, a comprehensive examination is conducted, covering the formation of eccentric faults to faulty conditions. Eccentric fault refers to the disruption of the homogeneously distributed air between the stator and rotor. This fault is divided into three categories: static, dynamic, and mixed eccentric faults. The occurrence of the fault depends on various factors from the motor's design to its operating conditions. With the emergence of the eccentric fault, the motor experiences imbalances in air gap, magnetic flux density, noise, heating, changes in torque waveform, and instability in the load.

In the study, an 11 kW, 4-pole squirrel cage induction motor belonging to the premium high-efficiency class is examined. Different types of faults and their intensities are investigated using the finite element method for the purpose of comparing a healthy motor with a motor experiencing eccentric faults. Healthy and faulty motors are compared using the finite element method, and the simulation results support the analysis. The Ansys Maxwell program, utilizing the finite element method, is a software package that facilitates the evaluation of behaviors and faulty conditions before the design phase. By comparing modeling and simulation results, the interpretation of parameters such as magnetic flux density, torque, vibration, and noise within the scope of eccentric faults is examined. The detailed impact of various fault intensities on the motor is thoroughly investigated. Thus, all the results regarding the parameters to be monitored in detecting eccentric faults are presented in this thesis.

KEY WORDS: Squirrel cage asynchronous motor, eccentric malfunction, air gap magnetic flux density, finite element method, troubleshooting

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her zaman desteklerini hissettiren, tezimin eksik noktalarında yardımcı olan, tezimde yaşadığım sıkıntıları gidermeme her zaman destek olan, çalışmış olduğum program üzerinde ve takıldığım noktalarda ve tez yazımında yardımlarını esirgemeyen, çok değerli tez danışman hocam sayın Dr. Öğretim Üyesi Buket SONBAŞ COBB hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin ilk aşamasından son aşamasına kadar desteklerini esirgemeyen ve her zaman eğitim noktasında daha ileri noktalara ulaşmam konusunda yanımda olan, çok değerli ilk danışmanım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Ferhat ÇIRA hocama teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca kullandığım programda aldığım hataları düzeltmemde çok yardımcı olan ve her zaman bilgileriyle yönlendiren Fırat Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE hocama teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve yaşadığım her türlü zorluklarda destek olan, çalışmalarımnda her zaman bana destek olup cesaretlendiren maddi ve manevi olarak beni her zaman destekleyen aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Yapmış olduğum bütün çalışmaları eşim Dilan SUN ve biricik oğlum Muhammed Karan SUN'a armağan ediyorum.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun kısımları	2
Şekil 1.2. Sincap kafesli asenkron motorlarda arıza kaynaklarının yapılan araştırmalar sonucuna göre oranları	4
Şekil 1.3. Eksantrik arızası oluşma durumu; (a) statik eksantrik, (b) dinamik eksantrik, (c) karışık eksantrik	6
Şekil 1.4. Statorun oval şeklinde olması	10
Şekil 1.5. Rotorun oval şeklinde olması.....	10
Şekil 1.6. Rotorun stator merkezine göre yataklanamaması.....	11
Şekil 3.1. Ansys_Maxwell_2D ile tasarımı yapılmış motor modelleri için a) RMxprt modeli (tek boyutlu model) b) Maxwell_2D (iki boyutlu model) c) Maxwell_3D (üç boyutlu model)	20
Şekil 3.2. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait Project arayüzü	25
Şekil 3.3. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan makine tipi seçimi.....	26
Şekil 3.4. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun etiket değerleri.....	27
Şekil 3.5. Ansys_Maxwell ile tasarlanan motorun project Manager bölümü.....	27
Şekil 3.6. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun genel özellikleri	28
Şekil 3.7. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun stator özellikleri.....	29
Şekil 3.8. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait stator slot tipi ve malzeme seçimi.....	29
Şekil 3.9. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait bobin değerleri.....	30
Şekil 3.10. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun stator sargı kutupları.....	31
Şekil 3.11. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun stator sargı dağılımı.....	32
Şekil 3.12. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait rotor parametreleri	33
Şekil 3.13. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun RMxprt modeli	34
Şekil 3.14. Ansys_Maxwell ile tasarlanan motorun RMxprt modeline ait data arayüzü.....	35
Şekil 3.15. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait RMxprt modelinde hızın faz akımına göre değişimi	35
Şekil 3.16. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait RMxprt modelinde hızın moment' e göre değişimi	36
Şekil 3.17. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait RMxprt modelinde çıkış gücünün moment' e göre değişimi	36
Şekil 3.18. Maxwell_2D tasarımına geçiş komutu.....	37
Şekil 3.19. Maxwell_2D motor fractions seçimi.....	37
Şekil 3.20. Ansys_Maxwell ile tasarlanan sağlıklı motorun tam daire şekli	38
Şekil 3.21. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motorun tam daireye ait validation check sonucu.....	39
Şekil 3.22. Ansys_Maxwell ile tasarlanan motora ait kurulum değerleri.....	40
Şekil 3.23. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motora ait (0.017s)' deki manyetik alan dağılımı	41
Şekil 3.24. Ansys_Maxwell ile tasarlanan sağlıklı motora ait 0.017s deki vektör çizgileri	43
Şekil 3.25. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motora ait 0.017s deki manyetik akı çizgileri	44
Şekil 3.26. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motora ait ağ yapısı	45
Şekil 3.27. Ansys_Maxwell ile tasarlanan asenkron motora ait elektriksel eşdeğer devre	47
Şekil 3.28. Maxwell_2D Modeler Ara yüzü	48
Şekil 3.29. Tanımlanan yeni koordinat sistemine ait eksen değerleri	49
Şekil 3.30. Sheet arayüzü	50
Şekil 3.31. Koordinat Sistemi değişim arayüzü	50
Şekil 3.32. Moving vektör değişimi	51
Şekil 3.33. Maxwell eksantrik seçim paneli.....	52
Şekil 3.34. Maxwell eksantrik oluşturma paneli	53
Şekil 4.1. Sağlıklı durum manyetik akı yoğunluğu dağılımı	57
Şekil 4.2. Hava aralığı mesafesi: (a) sağlıklı durum için hava aralığı mesafesi, (b) %10 statik eksantrik için hava aralığı mesafesi, (c) %30 statik eksantrik için hava aralığı mesafesi, (d) %50 statik eksantrik için hava aralığı mesafesi.....	59

Şekil 4.3. Hava aralığının dar olduğu bölge için manyetik akı yoğunluğu dağılımı: (a) sağlıklı durum için, (b) %10 statik eksantrik arızası için, (c) %30 statik eksantrik arızası için, (d) %50 statik eksantrik arızası için hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dağılımı	60
Şekil 4.4. Hava aralığının geniş olduğu bölge için: (a) sağlıklı durum için, (b) %10 statik eksantrik arızası için, (c) %30 statik eksantrik arızası için, (d) %50 statik eksantrik arızası için hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı	62
Şekil 4.5. %30 Dinamik eksantrik hava aralığı manyetik akı yoğunluğu: (a) hava aralığının geniş olduğu bölge, (b) hava aralığının dar olduğu bölge.....	63
Şekil 4.6. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu: (a) %30 dinamik eksantrik arızası için, (b) %50 dinamik eksantrik arızası için hava aralığı manyetik akı yoğunluğu.....	64
Şekil 4.7. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dağılımı: (a) %10 SE + %50 DE için geniş olan hava aralığı, (b) %10 SE + %50 DE arızası için dar olan hava aralığı	65
Şekil 4.8. Hava Aralığı Momentri: (a) 0-50 Ms Arası İçin Sağlıklı Durum Momenti, (b) 0-50ms Arası İçin %50 Dinamik Eksantrik Arızası Momenti	70
Şekil 4.9. Moment eğrilerinin tepe değerleri: (a) sağlıklı durum için, (b) %10 SE için, (c) %30 SE için , (d) %50 SE için, (e) %10 DE için, (f) %30 DE için, (g) %50 DE için, (h) %10 SE + %50 DE için, (i) %30 SE + %50 DE için tepe moment değerleri	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1. Eşdeğer devreye ait parametreler	47
Çizelge 4.1. Sağlıklı durum için benzetim sonuçları.....	56
Çizelge 4.2. Sağlıklı durum benzetim sonucunda hesaplanan motor parametreleri	56
Çizelge 4.3. Sağlıklı durum ve statik eksantrik arızası için zamana bağlı olarak değişen moment değerleri	66
Çizelge 4.4. Sağlıklı durum ve dinamik eksantrik arızası için zamana bağlı olarak değişen moment değerleri	67
Çizelge 4.5. Sağlıklı durum ve karışık eksantrik arızası için zamana bağlı olarak değişen moment değerleri	67
Çizelge 4.6. Sağlıklı durum ve statik eksantrik arızalı durum için moment eğimi.....	68
Çizelge 4.7. Sağlıklı durum ve dinamik eksantrik arızalı durum için moment eğimi	68
Çizelge 4.8. Sağlıklı durum ve karışık eksantrik arızalı durum için moment eğimi	68
Çizelge 4.9. Tepe Değerleri Verilen Moment Değerleri	76

SİMGELER ve KISALTMALAR

2D	İki Boyutlu Model
3D	Üç Boyutlu Model
A	Akım
AC	Alternatif Akım
C	Derece
DC	Doğru Akım
DE	Dinamik Eksantrik
F	Frekans
Hz	Frekans Birimi
KW	Kilowatt
L	Bobin
M	Eğim
ME	Karışık Eksantrik
Ms	Mili Saniye
N.M	Moment Birimi
Ns	Nano Saniye
Oc	Dönme Merkezi
OHM	Direnç Birimi
Or	Rotor Merkezi
Os	Stator Merkezi
P	Kutup
R	Direnç
Rpm	Devir Sayısı
S	Saniye
SE	Statik Eksantrik
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
V	Gerilim
W	Watt

1.GİRİŞ

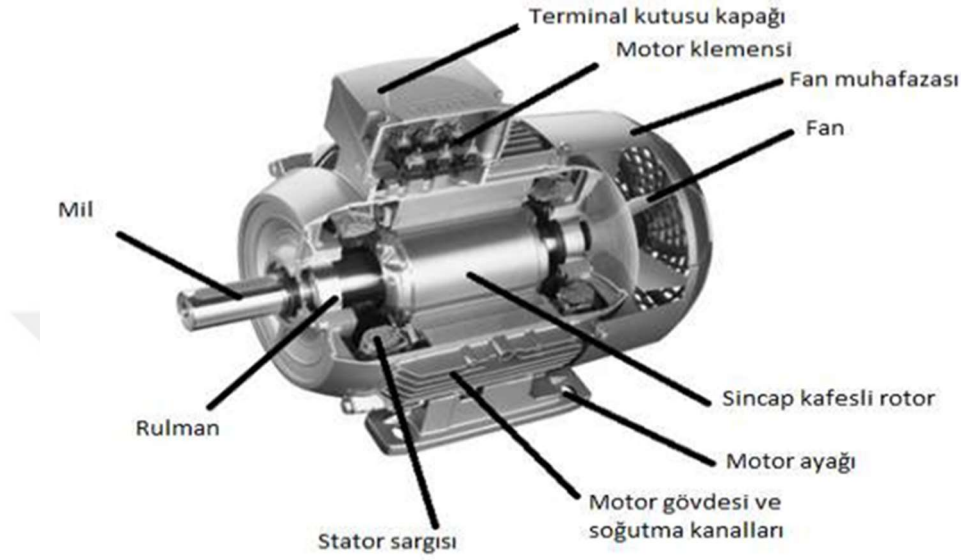
1.1. Genel Bakış

Günümüz teknolojisinin her alanında var olduğu gibi endüstri sistemlerindeki önemli gelişmeler kendini ön planda göstermiştir. Hızla büyüyen ve değişen teknolojik hareketlere bağlı olarak endüstrinin sağlık, uzay sistemleri, savunma sanayii robotik sistemler, otomotiv sektörü gibi birçok alanda asenkron motor tasarımı ve teknolojileri gelişmektedir. Gelişmekte olan bu teknolojilerden biri olan asenkron motorlarını ve üzerinde oluşan arızalarını yapılan bu tez çalışmasında daha spesifik bir şekilde değinilecektir (Ortega ve ark., 2010; Beerten ve ark., 2010; Errauissi ve ark., 2012).

Endüstri sistemlerinde kullanılan asenkron motorlarından en verimli, en az arızaya uğrayan, maliyeti en düşük olan ve sanayii sistemlerinde en çok kullanılan motorlar asenkron motorlardır. Asenkron motorlarını senkron motorlardan ayıran en önemli özelliklerinden biri dönme hızının sabit olmamasıdır. Oluşan bu hız makine olarak çalışmada, senkron hızdan daha küçüktür. Motorun adının asenkron motor oluşu bu özelliğinden kaynaklanır. Asenkron motorlar tek fazlı, iki fazlı, üç fazlı ve çok fazlı olarak imal edilmektedir. Günümüz teknolojisinde fabrikalarda, meskenlerde, ticarethanelerde tek fazlı ve üç fazlı asenkron makineler çok kullanılmaktadır (Turan, 2009). Şekil 1.1.' de gösterildiği gibi asenkron motorun tüm parçalarının görünümü gösterilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında üç fazlı sincap kafesli asenkron motor üzerinde çalışma yapılmıştır.

Elektrik makinelerinde meydana gelen elektriksel veya mekanik arıza durumları yaşanmadan önce mevcut çalışan tüm sistemlerin sürekli durum analizleri yapılması gerekir. Arıza durum tespiti önceden yapılması endüstriyel sistemlerin daha sağlıklı çalışması ve ekonomik kayıpların azalması için çok önemlidir. Oluşması muhtemel arızaların önceden tespiti için kullanılan yöntemler işletme güvenliğini arttırmakla

beraber bakım onarım maliyetlerini de oldukça düşürmektedir. Bu sebeplere bağlı olarak elektrik makinalarında durum takibi ve durum analizi arıza tespiti için oldukça önemli bir işlemdir (Seker, 2000; Seker ve Ayaz, 2003; Ayaz ve ark., 2006; Ayaz ve ark., 2009; Nandi ve ark., 2000; Seker ve Ayaz, 2003).



Şekil 1.1. Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun kısımları (Karakaya, 2011)

Sincap kafesli asenkron motorları gelişmiş ülkelerde üretilen toplam enerjinin %40-50' sini tükettiği kanaatine varılmıştır. Bu asenkron makinalarının hem endüstriyel hem de evsel amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Düşük bakım gerektirmesi, düşük maliyetli olması, yapısının basit olması, yüksek güvenli olması, birçok alanda kullanılması ana nedenlerinden biridir. Sayılan tüm bu özelliklerden dolayı, asenkron motorları enerji santrallerinde, meskenlerde, pompa, fan, kompresör yükleri vb. İçin kullanılmıştır. Yoğun kullanımları nedeniyle, asenkron makinelerinin kaçınılmaz hale gelen arızalarına yol açan çeşitli streslere maruz kalırlar. Bu nedenle meydana gelen arızaların asenkron makinenin çeşitli parametrelerinin izlenmesiyle tespiti esastır (Yıldız, 2019).

Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar, elektriksel veya mekanik olmak üzere iki başlık olarak incelenir. Bu başlıklar kısaca incelenecek olursa elektriksel arızalar

makinadaki sargıların dengeli ve homojen sarılmaması, şebekede oluşan elektriksel dengesizlik, kısa devre durumlarının yaşanması, sürücü devresinden kaynaklı dengesizlikler olarak ifade edilir. Mekanik arızalarda ise rulman aksanında oluşan arızalar, mil arızaları, sürtünme arızaları, rotor kırık çubuğu arızası, rotor dengesizliği ve gevşekliği ve yapılan bu çalışmada ayrıntılı olarak işlenecek olan eksantrik arızası.

Eksantrik arızası genel olarak rotor ile stator arasındaki homojen dağılan havanın homojen dağılması özelliğini kaybettiği durumudur. Başlıca sebepleri ise rotorun sisteme düzgün yerleştirilmemesi, üretim aşamasında yaşanan olumsuzluklar, rotor ve statorun silindirik yapısını kaybetmesi başlıca sebepleri arasında yer almaktadır. Bu arıza statik, dinamik ve bu iki arızanın bir arada görülmesiyle oluşan karışık eksantrik arızalarından oluşur ve elektrik motorlarının en önemli ve kaybı çok fazla olan arızaların başında gelmektedir.

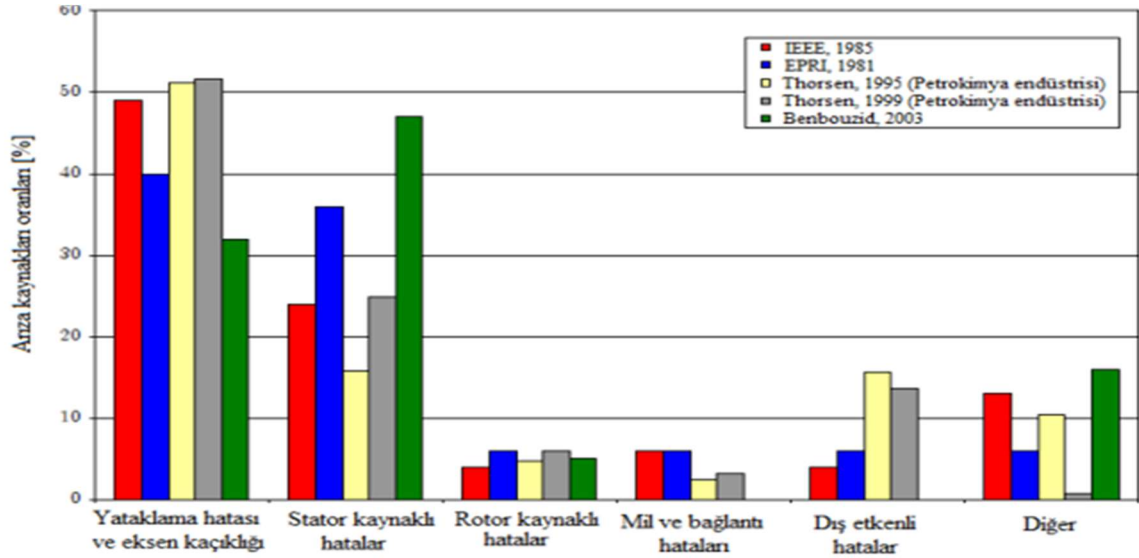
Yapılan bu tez çalışmasında eksantrik arızanın tiplerini ve farklı şiddetlere göre çalışma durumları ayrıntılı olarak işlenmiştir. Ayrıca modelleme ve sonuçlar eşliğinde, arızanın tipleri ve farklı şiddetleri için hava boşluğu manyetik akı yoğunluğu, moment gibi farklı parametrelere etkilerini gözlemleyip geniş yelpazeli bir çalışma yapılmıştır.

1.2. Asenkron Motorda Oluşan Arızalar

Sincap kafesli asenkron motorlar yapı olarak basit olmaları, çok fazla bakım gerektirmemeleri, maliyetlerinin düşük olması ve kararlı olarak çalışmaları gibi özellikleriyle en çok tercih edilen elektrik motorlarındandır (Yıldız, 2019).

Eksantrik arızası ve bu arızanın sincap kafesli asenkron motor değişkenlerine olası etkilerini daha ayrıntılı olarak incelenmesinden önce, sincap kafesli asenkron motorda arızanın oluşmasından sonra motor üzerinde hangi parametrelere etki ettiğini ve bu etkilerin makina üzerinde ne derece olumsuzluklar oluşturduğu hakkında detaylı bilgi

verilmiştir ve bu sonuçlar ışığında arızanın tipine ve şiddetine bağlı olarak sağlıklı durum ve farklı eksantrik arızalı durumlar karşılaştırılıp deney sonuçlarıyla birlikte yer alacaktır.



Şekil 1.2. Sincap kafesli asenkron motorlarda arıza kaynaklarının yapılan araştırmalar sonucuna göre oranları (Sprooten, 2007)

Sincap kafesli asenkron motor arızalarının hangi sebeplere bağlı olarak ve hangi zaman aralıklarına göre meydana geldiğine dair çok farklı uygulama alanları için çok fazla araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, Sprooten tarafından yapılan bir araştırmada sonuçlarının bazı kısımlarının derlendiği Şekil 1.2.' de gösterildiği gibi sütun grafiğinde verilmiştir. Asenkron motorların arızalarına neden olan bu tür durumların oranları grafik eşliğinde karşılaştırılmıştır (Sprooten, 2007).

Yapılan bu araştırma sonuçlarının da gösterdiği gibi en çok karşılaşılan hata tiplerinin yataklama hatası ve eksantrik arızasından kaynaklıdır. Hemen ardından ise stator kaynaklı arızalar gelmektedir (Tanver ve Penman, 1987). Oluşan bu arızalar Şekil 1.2. de verilen sütun grafiğindeki sebeplerden dolayı meydana gelmektedir. Kısaca oluşan bu arıza sebeplerine değinecek olursak:

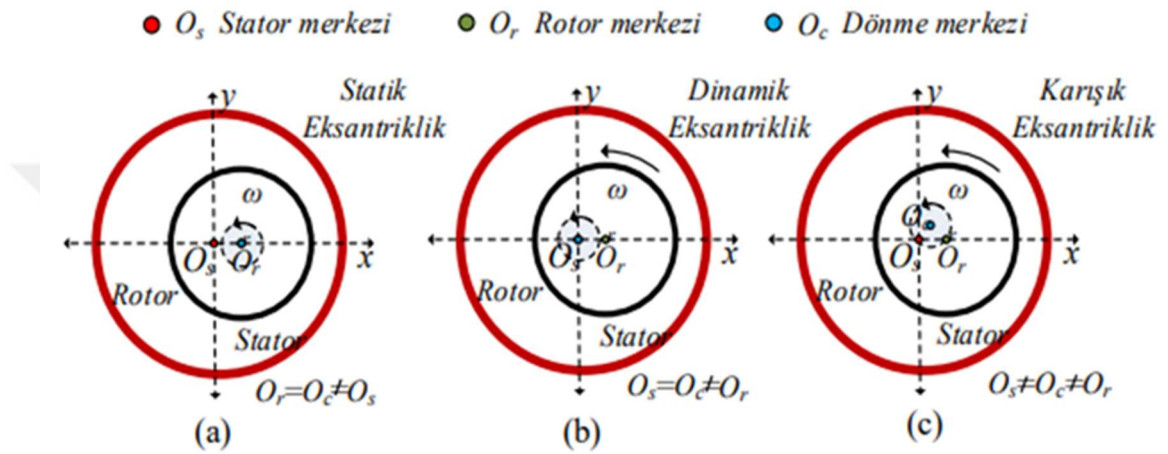
- Üretim aşamasında meydana gelen arızalar,

- Aşırı derece ve homojen olmayan yüklere bağlı olarak, aşırı derece ısınma ve mekanik zorlanmalar,
- Elektromanyetik gürültü ve buna bağlı olan titreşimler,
- Gereksiz durma-kalkma yapan makinalarda şebekeden çekilen anlık olarak gerçekleşen aşırı akımlar,
- Rutubet, nem, buhar veya kimyasal etkilerin yaşanması,
- Aşırı derecede çevre sıcaklığı ve çevresel faktörler.

1.3. Eksantrik Arızası

Eksantrik arızası stator ile rotor arasındaki homojen olmayan hava boşluğu sonucunda oluşan bir arıza durumudur. Bu mesafe genel olarak milimetrik mertebelerde oluşmaktadır. Üretim esnasında eksantrik arıza oranına %5' ten fazla izin verilmemektedir. Üretim esnasında meydana gelebilecek çok az bir kaymanın meydana getireceği mekanik ve elektromanyetik sorunlar kaçınılmaz olur. Bu sonuçlara bağlı olarak sincap kafesli asenkron motorlarda meydana gelen arızaların önemli bir kısmı eksantrik arızası olduğu kanaatine varılmaktadır. Sağlıklı bir asenkron makinada stator, rotor ve dönüş merkezi koordinatları aynıdır, yani bu üç nokta aynı eksen üzerindedir. Rotor merkezi ve dönme merkezi aynı eksen üzerinde olup, stator ekseninden farklı bir noktada ise bu durumda statik eksantrik arızası meydana gelmektedir. Statik eksantrik arızası stator nüvesinin oval olması veya rotor koordinatlarının yanlış bir şekilde konumlandırılmasındandır. Dinamik eksantrik arızasında ise stator dönme merkezi ile dönme merkezi aynı nokta üzerindedir ancak rotor merkezi farklı bir noktadadır bu durum sonucu dinamik eksantrik arızası meydana gelmektedir. Karışık eksantrik arızası ise bu iki arızanın aynı anda görülmesi durumudur. Kısaca özetlenecek olursa eksantrik arızası, hava boşluğunun stator ve rotor arasında her noktada homojen olarak dağılmaması durumudur. Bu arızalar, Statik, dinamik ve karışık eksantrik arızası olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Sincap kafesli asenkron makinalarda oluşan eksantrik arızası hava boşluğunun oluşturduğu dengesiz manyetik çekim sebebine bağlı olarak faz akımları, moment ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğunda değişimler meydana getirmektedir (İngenç ve Ark., 2014). Eksantrik arızası Şekil 1.3.' te gösterildiği gibi rotor ve dönme merkezinin aynı nokta üzerinde olması durumunda statik eksantrik rotor merkezinin farklı noktada olması durumunda dinamik eksantrik ve bu ikisinin aynı anda olması durumu karışık eksantrik olmak üzere üç çeşittir.



Şekil 1.3. Eksantrik arızası oluşma durumu; (a) statik eksantrik, (b) dinamik eksantrik, (c) karışık eksantrik (Gur ve ark., 2018; Gur ve ark., 2019)

Rotor merkezinin (O_r), dönme merkezinin (O_c) ve stator merkezinin ise (O_s) noktası olmak üzere rotor merkezinin ve dönme merkezinin stator merkezinden kaymış olduğu durumu ve hava boşluğu mesafesinin ordinat ve apsis eksenlerinde sabitlendiği durumda statik eksantrik arızası Şekil 1.3.a' gösterilmiştir (Nandi ve ark., 2015). Dönme merkez noktasının stator merkez noktasında olması durumu, fakat rotor merkez noktasının stator merkez noktasından farklı konumda olması durumunda ise dinamik eksantrik arızası Şekil 1.3.b' de gösterildiği gibi oluşmaktadır. Dinamik eksantrik arızasında hava boşluğu mesafesi zamana bağlı olarak değişmektedir, statik eksantrik arızasında ise hava boşluğu zamana bağlı olarak değişmemektedir (Nandi ve ark., 2015). Her iki arızanın aynı anda görülmesi durumunda ise karışık eksantrik arızası Şekil 1.3.c' de gösterildiği gibi meydana gelmektedir (Nandi ve ark., 2015).

Eksantrik arızasının meydana geldiği, sincap kafesli asenkron motorlarda homojen olmayan bir hava aralığı ve manyetik akı yoğunluğu oluşmaktadır. Statik eksantrik arızasının meydana geldiği durumlarda gerçekleşen hava boşluğu Denklem 1.1.' de verilmiştir (Zafarani ve ark., 2016).

$$\delta(\varphi, t) = \delta_0(1 - \delta_{se} \cos(\omega_r - \varphi)) \quad (1.1)$$

Yukarıda verilmiş olan Denklem 1.1.' de δ_0 sağlıklı çalışan asenkron motordaki hava boşluğu mesafesi yani stator iç çapı ve rotor dış çapı arasındaki farktır. Ayrıca δ_0 (0,1) arasında bir değerdir. δ_{se} statik eksantrik arıza şiddetini, φ statorun çevresinde oluşan boşluk parametresi, $\omega_r = \omega_s/p$ rotorun açısal hızı, p kutup çiftinin sayısı, ω_s açısal besleme frekansını ifade eder (Zafarani ve ark., 2016). Hava boşluğunun meydana getirmiş olduğu manyetik geçirgenlik ayrıca üçüncü, dördüncü ve diğer terimler ihmal edilerek hesaplanır (Zafarani ve ark., 2016).

$$\begin{aligned} \Lambda(\varphi, t) &= \frac{1}{\delta(\varphi, t)} = \frac{1}{\delta_0(1 - \delta_{se} \cos(\omega_r t - \varphi))} \\ &= \frac{1}{\delta_0} (1 + \delta_{se} \cos(\omega_r t - \varphi)) \\ &= \frac{1}{\delta_0} (1 + \delta_{se} \cos\left(\frac{\omega_s}{p} t - \varphi\right)) \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$j_s(\varphi, t) = j_0 \sin(\omega_s t - p \varphi) \quad (1.3)$$

$$B_s(\varphi, t) = \Lambda(\varphi, t) \int \mu_0 j_s(\varphi, t) d\varphi \quad (1.4)$$

Buradan Denklem 1.3.' teki j_s ifadesi statorun iç yüzeyinde oluşturduğu akım yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem 1.4.' teki B_s statorda meydana gelen hava

boşluğunun akı yoğunluğunu ifade eder. Denklem (1.2.), (1.3.) ve (1.4.)' deki ifadelerde gerekli matematiksel işlemler yapıp birleştirildikten sonra hava boşluğunda meydana gelen akı yoğunluğu Denklem 1.5.' deki gibi elde edilir (Zafarani ve ark., 2016).

$$\begin{aligned}
 B_s(\varphi, t) = & \frac{\mu_0 j_0}{\delta_0 p} c \cos(\omega_s t - p \varphi) \\
 & + \frac{\mu_0 j_0 \delta_{se}}{2 \delta_0 p} \cos\left(\left(1 + \frac{1}{p}\right) \omega_s t\right. \\
 & \left. + \frac{\mu_0 j_0 \delta_{se}}{2 \delta_0 p} \cos\left(\left(1 - \frac{1}{p}\right) \omega_s t - (p - 1) \varphi\right) \right.
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

Denklem 1.5.' e göre hava boşluğunda oluşan akı yoğunluğu hesaplanmış olur. Eksantrik arızası ile çalışan asenkron motorlarda homojen olmayan bir hava aralığı oluşmaktadır. Arızanın şiddetine ve tipine bağlı olarak manyetik akı yoğunluğunda ve moment gibi parametrelerde harmonikler tepe değeri değişimleri moment eğim değişimleri manyetik akı renk değişimleri meydana gelmektedir (Eker ve Akar, 2016).

Ayrıca statik eksantrik arızasının, rotor yarıklarının oluşturduğu titreşimlerin genel olarak değişmesiyle, dinamik eksantrik arızasında ise akım ve oluşan titreşim sinyallerinde frekans bileşenlerinin kendine has görünümüyle tespit edilebilir. Arızalı durumda doğan frekansın Denklem 1.6. da gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$f_{ecc=f_s} \left[(kQ_2 \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n_v \right] \tag{1.6}$$

$f_s, Q_2, n_d = 0, n_d = 1, 2, 3 \dots, s, p, k, n_w$ sırasıyla beslemeye ait frekans, rotorun çubuk sayısı, statik ve dinamik eksantrik arıza derecesi, kayma, çift kutup sayısı, sabit sayı ve makinayı besleyen kaynakta oluşan stator zaman harmoniği derecesi

Statik ve dinamik eksantrik arızasının akımda yan bantlar oluşturduğu ve oluşan bu yan bant frekanslarının akım spektrumunda Denklem 1.7. ve Denklem 1.8. da hesaplanabilir.

$$f_{ecc,i=f_s} \left[1 \pm k \frac{(1-s)}{p} \right] \quad (1.7)$$

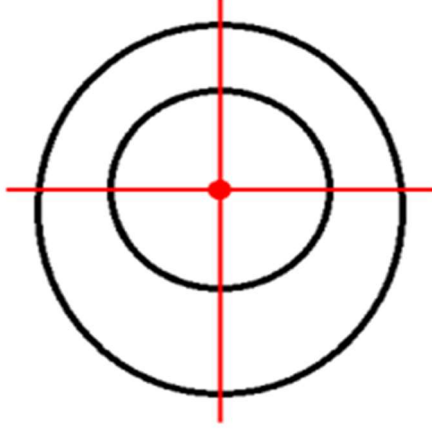
Kaynaktan beslenen bu harmoniklerin etkileşiminin sonucu ise güç ve moment spektrumunda yeni harmonikler meydana getirir. Bunun frekansı ise Denklem 1.8. de hesaplanabilir.

$$f_{ecc,p} = f_s k \frac{(1-s)}{p} \quad (1.8)$$

1.3.1. Eksantrik arızanın oluşma sebepleri

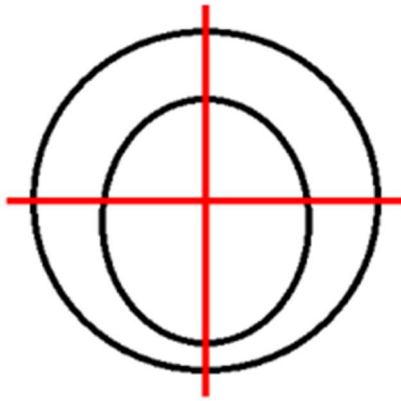
Sincap kafesli asenkron motorlarda hava aralığı mesafesinin homojen şekilde dağılmaması durumu arızanın en baştaki sebeplerinden biridir. Üreticilerin asenkron motorların üretim esnasında dengesiz elektromanyetik çekme kuvvetini en düşük değerlerde tutup, titreşim ve gürültüleri minimum seviyeye indirmek için oluşabilecek eksantrik arızaları düşük şiddetlerde tutmaya çalışmaktadırlar. Çünkü, eksantrik arızası sebep olduğu dengesiz elektromanyetik çekme kuvveti sonucunda sürekli olarak daha fazla büyümektedir. Ayrıca önemli sebeplerden bir diğeri ise, motorun üretim aşamasında belirli bir çekme kuvveti mevcuttur. Bu çekme kuvvetini makine yük üzerinde iken aşması durumunda rotor mil yataklamasında dengesizlik meydana gelir ve bu dengesizlik rotorun sağlıklı konumun dışına çıkmasına sebep olur. Makinanın üretim esnasında rulman bilyelerinin konumlandırılması ve ölçülerinin birbirine uygun olması bu arızanın oluşmasında önemli rol oynamaktadır. Sincap kafesli asenkron motorun eksantrik arıza ile sonuçlanan, arızalı çalışmasına sebep olan etkenler ise aşağıdaki Şekil (1.4.), (1.5.) ve (1.6.)’ da detaylı bir şekilde açıklanmıştır (Özelgin, 2008; Werner ve Binder, 2005).

- Statorun Şekil 1.4.' teki gibi oval şeklinde olması. rotorun kendi yörüngesinde dönmesine rağmen statorun oval şeklinde olması sebebiyle stator ve rotorun aynı merkez üzerinde olmaması sonucunda eksantrik arızası meydana gelmektedir.



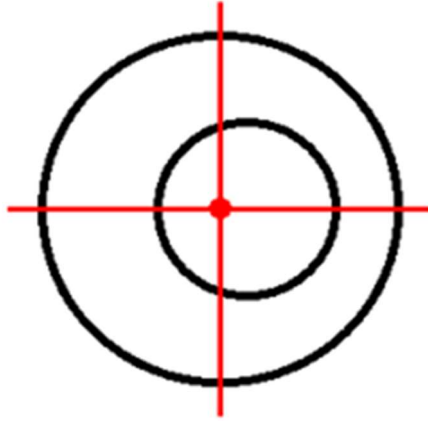
Şekil 1.4. Statorun oval şeklinde olması

- Rotorun oval şeklinde olması durumu, rotorun şeklinden dolayı, hava boşluğunun her noktada eşit olmaması yani homojen olarak dağılmaması ve hava boşluğunun en az olduğu bölgenin rotora bağlı olarak dönmesi sebebiyle eksantrik arızası oluşmaktadır.



Şekil 1.5. Rotorun oval şeklinde olması

- Rotor ve statorun merkezleri aynı nokta üzerinde olmaması



Şekil 1.6. Rotorun stator merkezine göre yataklanamaması

- Motora dengesiz olarak manyetik çekme kuvveti uygulanması ve buna bağlı olarak milin eğilmesi durumu,
- Yanlış yataklama sonucu yatakların aşınması durumuna bağlı olarak eksantrik arızası meydana gelebilmektedir.

1.4. Eksantrik Arızanın Makina Üzerinde Yarattığı Etkiler

Eksantrik arızanın sincap kafesli asenkron motor üzerindeki olumsuz etkilerini yapılan bu çalışmanın sonraki başlıklarında daha detaylı bir şekilde değinilmiştir.

Bu etkileri kısaca özetleyecek olursak

- Homojen olmayan hava aralığının gerilim ve akım değerlerindeki olumsuzluklar,
- Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun yarattığı harmonik bileşenlerin tepe değerlerindeki artış,
- Moment darbelerinde yaşanan artışlar,
- Moment eğimlerinde yaşanan değişimler,
- Moment tepe değerlerinin değişimi,
- Ortalama moment parametrelerinde azalma,
- Kayıpların artmasına bağlı olarak, verimin azalması,
- Motorun stator kısmında aşırı ısınmaların meydana gelmesi,
- Motorun yarattığı ses ve gürültülerin artması,
- Kaymanın derecesine bağlı olarak oluşan titreşimleri,
- Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerindeki değişimler ve bu değişimlerin arızanın şiddetine bağlı olarak değişmesi.

1.5. Tezin Amacı

Elektrik makinelerinde arıza tespiti üzerinde pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda eksantrik arızasının motor üzerinde bıraktığı etkileri incelenerek arıza tespiti yapılmıştır. Stator akımı, moment, titreşim, manyetik alan dağılımları, vektör çizgileri gibi parametrelerin ölçüm sonuçlarına bakılarak eksantrik arızanın şiddetide saptanabilir.

Ansys_Maxwell programını kullanarak 11KW, 4 kutuplu, premium yüksek verim sınıfına ait parametrelere sahip sincap kafesli asenkron motor modellenerek sağlıklı bir asenkron motor tasarımı yapılmıştır. Daha sonra bu model üzerinde eksantrik arızasına sahip motor modeli oluşturulup simülasyonlar gerçekleştirilip iki durum arasında yaşanan değişimleri karşılaştırarak benzetim sonuçları eşliğinde durum analizi ve tespiti yapmak.

Yapılan bu tez çalışmasında oluşturulan model üzerinde manyetik alan dağılımı, vektör çizgileri, statorda indüklenen gerilim, moment gibi büyüklükler incelenerek asenkron motorlarda eksantrik arıza analizi yapılmıştır ve oluşturulan arızanın şiddetine ve çeşidine göre yaşanan değişimler ele alınmıştır.

Farklı arıza şiddeti yüzdelerine sahip eksantrik arızası oluşturulup, farklı eksantrik arıza tipine (statik, dinamik ve karışık eksantrik arızası) bağlı olarak hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, moment, vektör çizgileri vb. değerler değerlendirilip karşılaştırılmıştır.

1.6. Tez İçeriği

Tez çalışmasında orta güçlü üç fazlı sincap kafesli asenkron makinalarda meydana gelen arızalara genel bir bakış yapılmıştır. Sincap kafesli asenkron motorlarda meydana gelen arızalara değinilmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar yönteminin kullanımı ve kapsamı hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca kapsamlı bir literatür taraması yapıp asenkron motorda meydana gelen farklı tip eksantrik arıza tespiti üzerine analiz yapılmıştır ve bu eksantrik arıza çeşidine ve arıza şiddetine bağlı olarak motorda meydana getirdiği etkiler ele alınmıştır.

Sincap kafesli asenkron motorun sağlıklı ve arızalı durumları sonlu elemanlar yöntemi ile maxwell_2D modeli ile elde edilerek sağlıklı durum ve arızalı durum için benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Farklı tiplerde eksantrik arıza oluşturulup arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak sonuçlar elde edilmiştir. Oluşturulan modeller ile arızalı durum ve sağlıklı durum için karşılaştırmalar, analizler ve tespitler yapılmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Eksantrik arızasının meydana getirdiği homojen olmayan hava aralığı manyetik akı yoğunluğu ile ilgili 20. yüzyılın başlarından bu yana birçok çalışma ve araştırmalar yapılmıştır. Simetrik olmayan hava boşluğunun sebep olduğu manyetik akı düzensizliğini mıknatıslanma eğrilerini kullanarak tespit ve analiz etmeyi amaçlamıştır (Rosenberg, 1918). Bu sonuçlar doğrultusundan sonra yapılan bir çok çalışma, hava boşluğunda ki elektromanyetik alanın dengesizliği eksantrik arızanın sebep olduğu gürültülerin bir fonksiyon olarak hesaplanması ve eksantrik arızaya sebep olan durumların tanımlanması ve bu durumların çözümü üzerinde durulmuştur (Rosenberg, 1918; Von Kaehne, 1963; Bradford ve Greenslade, 1971).

Summers (1955), elektrik makinalarında meydana gelen elektriksel ve mekaniksel arızaların neden olduğu yüksek frekanslı olan harmoniklerin meydana getirdiği titreşimler hakkında birçok çalışmalara imza atmıştır (Summers, 1955). Bu titreşimler doğrultusunda oluşan arızanın şiddeti ve çeşidi saptanabilir.

Elektrik makinalarında meydana gelen arızalar, tümleşik bir sistemin performansını etkileyen en önemli faktörler arasında yer alır. Arızalı bir makinanın, arızasının henüz ilk aşamasında tespit edilip önlemlerin alınması mevcut sistemlerin kararlı çalışması yönünden çok büyük önem arz etmektedir. Bu durum, durum analizinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Çıra, 2017). Sonlu elemanlar yöntemi, bütün parametreleri tek bir ortak simülasyon platformu ortamına entegre eder ve model oluşturup modelin tüm sonuçları elde edilir. Bu sonuçlar tasarım ve üretim aşamasındaki sistemlerin minimum hata ile tasarlanması açısından çok önemlidir (Sun ve Çıra, 2022). 1970 yıllardan itibaren elektrik motorlarında eksantrik arızasının yaşanması durumunda meydana gelecek arızaların önceden tespitinin yapılabilmesi için çok farklı yöntemlerin kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır. Elisson ve Yang (1971)' ın beraber yapmış olduğu çalışmalarda farklı boyutlardaki ve güçlerdeki elektrik makinalarında, farklı eksantrik arıza çeşitleri ve farklı güçlerdeki elektrik

makinalarında, farklı eksantrik arıza şiddetleri için ses ölçümleri alınmıştır. Eksantrik arızanın ses sinyalleri üzerindeki etkileri incelenmiş olup eksantrik arıza seviyesi ile elektriksel ses arasındaki ilişkiyi tespit etmişlerdir. Fakat bu tespit yönteminde elektrik motorlarının işlem gördüğü endüstriyel ortamlar baz alındığında, test edilen deneysel ortamların dışında olan uygulamaya yönelik bir metod olarak kabul görmemişlerdir. Verma ve Natarajan (1982) ise eksantrik arızasını tespit etmek için arızalı durum hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun değişimini araştırma bobinini referans alarak test etmiş ve deneyini gerçekleştirmiştir.

Daha sonraki yıllarda ise eksantrik arızasını meydana getiren sebepler ve bu arıza sonucunda meydana gelen manyetik ve mekanik sorunlar gerek deneysel olarak gerekse nümerik analiz çalışmaları ile incelenmiştir.

Statik, dinamik ve karışık eksantrik arızalarının tespitini yapabilmek için titreşim ve ses ölçümleri, araştırma bobini (search coil) kullanımı, manyetik alan izleme, stator ve rotor sıcaklık ölçümleri, kızıl ötesi tanıma işlemi, radyo frekansı salınımı gibi birçok yöntem kullanılmıştır. Sincap kafesli asenkron motorların üzerinde yapılan çalışmaların birçoğunda titreşim ve stator akım sinyalleri bu tip arızaların tespitini yapabilmek için en ideal sinyaller olarak kullanılmıştır. Son zamanlarda, statik dinamik ve karışık eksantrik arızalarının tespitini ve analizini yapabilmek için sonlu elemanlar yöntemi tabanlı sistemler kullanılmıştır (Cameron ve ark., 1986; Toliyat ve ark., 1996).

Sincap kafesli asenkron motorlar üzerinde oluşabilecek statik, dinamik ve karışık eksantrik arızasının asenkron motorun üzerinde ki performansı ve üzerinde ki etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiş olup tespit ve analizi yapılmıştır. Statik eksantrik, Dinamik eksantrik ve karışık eksantrik arızasına sahip bir sincap kafesli asenkron motorun radyal kuvvet, titreşim, sıcaklık, elektriksel ve mekaniksel gürültüler üzerindeki sonuçları sonlu elemanlar yöntemi üzerinde karşılaştırarak çeşitli etkilerin olduğu tespiti ve analizi yapılmıştır. Farklı eksantrik arıza tiplerinin radyal

kuvvet üzerinde çeşitli etkilerinin olduğu tespit ve analizi yapılmıştır. Örneğin, statik eksantrik arızasında sadece radyal kuvvetin dizilişini değiştirirken dinamik eksantrik arızası ve karışık eksantrik arızası'nın hem radyal kuvvetin sırasını ayrıca frekans spektrumunu genişlettiği analizi ve tespiti yapılmıştır. Eksantrik arızanın bir sonucu olarak eksantrik arızaya sahip motorlarda radyal kuvvet frekansı sebebiyle titreşim ve oluşan gürültünün de büyük seviyede arttığı belirtilmiştir (Shaofeng ve ark., 2014).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Tasarım ve Analiz Programına Genel Bakış

Ansys_Maxwell programı elektrik ve elektromanyetik alan problemlerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analizini yapan yüksek performansa ve hızlı bir veri tabanına sahip bir paket yazılımıdır. Ansys_Maxwell programı elektrik makineleri, transformatörler, elektromanyetik ve elektromekanik cihazların tasarımı ve matematiksel analizini yapmaya yarayan çok yönlü bir programdır. Bu programda normal analizi zor olan transformatörlerin ve elektrik motorlarının kurulum parametrelerini kullanarak modeli oluşturulur bu model üzerinde motorun verimi arızalı durumlarını sağlıklı durumlarını ve tüm parametreleri incelenir bu incelemeler doğrultusunda cihazların nasıl rol oynadığı saptanabilir.

Ansys_Maxwell programında örneğin, normal şartlar altında elektrik motorlarında ya da transformatörlerde arıza analizi ve tespitini yapmak çok zordur. Bu program sayesinde bu cihazların arıza analizi ve tespiti farklı parametrelerini, manyetik alan dağılımını, manyetik akı çizgilerini, vektör çizgilerini karşılaştırarak arıza analizi ve tespiti kolaylaşmaktadır.

Genel olarak Ansys_Maxwell programı düşük frekanslı elektromekanik bileşen ve sistemlerin tek, iki ve üç boyutlu modellerde sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik ve elektrik çözümleri ile zamana bağlı geçici(transient) ve frekans domeninde elektromanyetik çözümlerin gerçekleştirildiği bir yazılımdır. Yapılan bu tez çalışmasında transient çözüm türü kullanılmıştır. Bu çözüm türü hakkında sonraki aşamalarda daha detaylı bir şekilde değinilecektir.

Ansys_Maxwell programında farklı tasarım tipleri ve farklı çözüm türleri kullanılarak gerekli matematiksel denklem setleri ile analiz ve tespitler gerçekleştirilmektedir (Çoramık, 2018).

Ansys_Maxwell programı aşağıdaki çözücü türlerini içermektedir

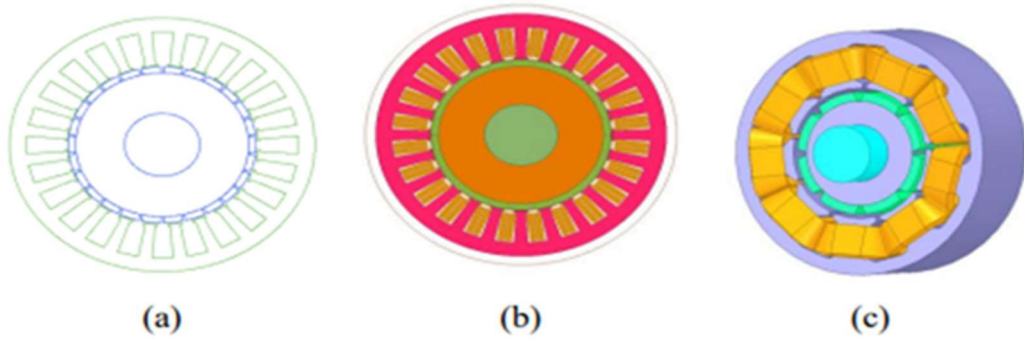
- Elektriksel ve elektro manyetik çözücü türü,
- AC elektromanyetik çözücü türü,
- Magnetostatik çözücü türü,
- Elektrostatik çözücü türü,
- DC iletim çözücü türü,
- Elektrik motorları ve transformatörler için tasarlanan program ara yüzleri,
- Devreler ve sistemler simülasyonu.

Ansys_Maxwell programı genel olarak aşağıda belirtilen alanlarında kullanılmaktadır

- Havacılık sistemleri,
- Uzay sistemleri,
- Savunma sanayii,
- Düşük, orta ve yüksek gerilim elektriği sistemleri,
- Elektromekanik sistemler,
- Tüketici elektroniği,
- Otomotiv sistemleri,
- Enerji sistemleri,
- Güç elektroniği sistemleri,
- Endüstriyel sistemler,
- Robotik sistemler.

Ansys_maxwell programında simülasyon ve tasarım için RMXprt model, Maxwell_2D model ve Maxwell_3D modeli olmak üzere üç farklı tasarım ve simülasyon tipi Şekil 3.1.' de gösterildiği gibi yer almaktadır. Rmxprt modeli tek boyutlu model) elektrik makineleri, algılayıcı sistemler, dönüştürücü sistemleri, elektromanyetik ve

elektromekanik araçların tasarımı, simülasyonu, arıza tespiti ve analizinde kullanılmaktadır. Ayrıca RMxprt modeli tek boyutlu model olarak ta adlandırılabilir. Maxwell_2D olan 2 boyutlu sistem, xy yada rz düzlemlerinde, Maxwell_3D ise üç boyutlu sistem olarak oluşan problemlerin çözümlerini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ve tespitini yaparak gerçekleştirmektedir (Çoramık, 2018).



Şekil 3.1. Ansys_Maxwell_2D ile tasarımı yapılmış motor modelleri için a) RMxprt modeli (tek boyutlu model) b) Maxwell_2D (iki boyutlu model) c) Maxwell_3D (üç boyutlu model) (Çoramık, 2018)

3.1.1. Çözüm türünü belirleme işlemi

Oluşturulan projede modeli çizmeye başlamadan önce, yapılan çalışmaya göre ve o çalışmanın temel yapı taşlarında birini oluşturan çözüm türünün belirlenmesi gerekmektedir. Her çözüm türü işlemi, farklı türde bir sorun kurulumu gerektirir. Daha sonra çözüm türünü değiştirme işlemi yapılır ise, tüm sorun kurulumları geçersiz olur ve tüm çözümler silinmiş olur. Bu nedenle projeyi oluşturmadan önce herhangi bir çözüm türüne karar vermek gereklidir. Bir çözüm türünü belirlemek için, kullanılan programda aşağıdaki adımlar takip edilmelidir.

Click Maxwell_2D>Solution Type or Maxwell_3D>Solution tipine tıklanır.

- 1- Çözümler genellikle Magnetostatic, Transient ve Eddy current çözüm türleri arasında yer almaktadır.
- 2- Maxwell_3D tasarımları için aşağıdaki çözüm türlerinden biri seçilir:
 - Magnetostatic

- Eddy Current
- Transient
- Electrostatic
- DC Conduction, either with or without Insulator Field
- Electric Transient

3- Maxwell_2D tasarımları için aşağıdaki çözücü türlerinden biri seçilir:

- Magnetostatic
- Eddy Current
- Transient
- Electrostatic
- AC Conduction
- DC Conduction

4- Click OK.

3.1.1.1. Transient çözüm türü

Transient çözüm türü (geçici çözümleyici), belirlenen bir süre boyunca bir çözümün farklı zaman aralıklarında bir modelin manyetik alanlarını, enerjisini, vektör çizgilerini, akı çizgilerini, kuvvet torkunu, güç kaybını, çekirdek kaybını hızını ve akışını analiz etmemize olanak tanır. Bu çözüm türü, sinüzoidal olmayan akım veya gerilim uyarımının yanı sıra dönme veya öteleme hareketine izin verir. Asenkron motor tasarımı, analizi ve arıza tespiti çalışmalarında genel olarak transient çözüm türü kullanılmaktadır. Transient çözüm türü, sorunla ilgili aşağıdaki koşulları varsayar

- Oluşturulan modelde hareket oluşursa, bant nesnesinin dışında hareket olmaz,
- Dönme hareketi silindirik veya silindirik olmayabilir,
- Bant nesnesi içinde birden fazla nesneye aynı hareket atanabilir.

Ayrıca, Maxwell_2D tasarımları için ayrıca Kartezyen, XY veya Z hakkında silindirik geometri modunun belirtilmesi gerekmektedir.

3.1.2. Sonlu elemanlar yöntemi

Elektrik makinelerinin veya transformatörlerin analizi veya arıza tespiti esnasında, elektrik makinelerinde veya transformatörlerde arıza hesaplanması amacıyla matematiksel modellerin kullanımı süratle yayılmaktadır. Elektrik motorlarının oldukça karmaşık yapıda olmaları ve kullanılan malzemelerin doğrusal olmayan karakteristikleri sebebiyle analitik olarak çözüm yapılabilmenin zorluğu göz önüne alınacak olursa, matematiksel çözümlerin neden bu kadar çok kullanıldığı açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Örneğin, birçok matematiksel parametreye sahip karmaşık bir yapıdaki elektrik motorunun çözümlenmesi ve analizi sonlu elemanlar yöntemi ile kolay bir şekilde yapılabiliriz.

Sonlu elemanlar yöntemi ise açıklanan bu amaç için en uygun sayısal veya matematiksel analizlerden biridir. Zamana bağlı olan alanlar ve homojen olarak dağılmayan, malzemeler içeren analitik yöntemlerin yetersiz olduğu matematiksel problemlerin çözümünde tercih edilmektedir (Bianchi, 2005). Sonlu elemanlar yönteminde tasarlanan veya analizi yapılan bir sistemin sonlu sayıdaki bilinen parametreler cinsinden bulunması yolu izlenir. Herhangi bir matematiksel problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesi için izlenmesi gereken adımlar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Çözüm bölgesi içinde, çözülmesi istenen mekanik veya elektriksel parçanın sonlu elemanlara ayrılması,
- Her bir parçanın elemanı için belirlenen temel sayısal denklemlerin yazılması,
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların bir parça olarak birleştirilmesi,
- Elde edilen tüm denklem sistemlerinin çözümü.

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüme gidilen sayısal problemlerde maxwell denklemlerinin çözümü baz alınacaktır. Elektromanyetik akı yoğunluğu, akı şiddeti, elektriksel akı yoğunluğu ve akı şiddeti gibi ifadeleri içeren denklemler aşağıda verilmiştir.

Manyetik alan problemlerin ve denklemlerin çözümünü basitleştirmek için, yapılan hesaplamalarda alanın kendisi yerine alan potansiyeli olan **A** ifadesi kullanılmaktadır. Her elektromanyetik vektör potansiyeli ile manyetik akı yoğunluğu Denklem 3.1.' de olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.1)$$

Kartezyen koordinat sistemlerinde oluşan hava aralığı manyetik akı yoğunluğu bileşen parametreleri aşağıdaki Denklem 3.2.' de ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} B_x &= \partial A_z / \partial y - \partial A_y / \partial z \\ B_y &= \partial A_x / \partial z - \partial A_z / \partial x \\ B_z &= \partial A_y / \partial x - \partial A_x / \partial y \end{aligned} \quad (3.2)$$

Elektrik makineleri ve transformatörler için sonlu elemanlar yönteminde çok küçük hesaplama belleği kullanımı ve analiz, tasarım aşamasında daha hızlı sonuç elde edilmesi amacıyla iki boyutlu maxwell_2D, sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir. Buna bağlı olarak maxwell_2D modelinde ki problemlerde **Z** eksenini için parametrelerin sıfır kabul edilmesinden dolayı manyetik vektör potansiyeli **A** için iki boyutlu maxwell_2D kullanılacaktır(Dönmezer, 2010). Manyetik akı yoğunluğu, maxwell_2D düzleminde aşağıda Denklem 3.3.' teki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} B_x &= \partial A_z / \partial y \\ B_y &= - \partial A_z / \partial x \\ \mathbf{B}_z &= 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Maxwell denklemlerine göre elektromanyetik alan şiddeti eşitliği ise maxwell_2D modeli için Denklem 3.4.' te gösterilmiştir.

$$(\partial/\partial x) (1/\mu \partial \mathbf{A}/\partial x) + (\partial/\partial y) (1/\mu \partial \mathbf{A}/\partial y) = -J_s \quad (3.4)$$

Denklem 3.4.' teki bileşende $\mathbf{A}$ manyetik vektör potansiyelini, μ manyetik geçirgenliği, $\mathbf{J}_s$ ise akım yoğunluğunu ifade etmektedir.

3.1.3. Maxwell_2D

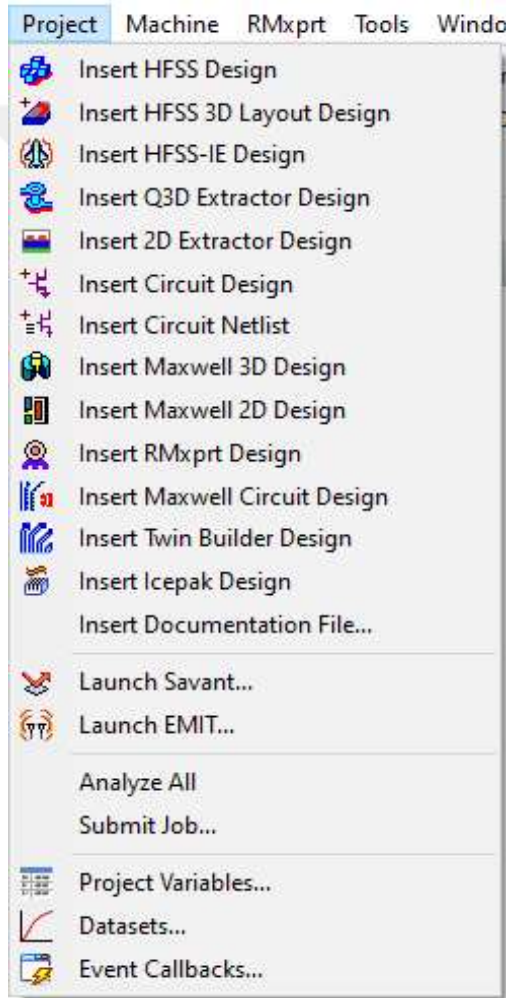
Maxwell_2D, iki boyutlu elektromanyetik alan problemlerini simüle etmek, analizini ve arıza tespitini yapmak için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizini kullanan etkileşimli bir yazılım paketidir. Maxwell kullanımı kolay kalırken karmaşık görevleri gerçekleştirmek için diğer ANSYS yazılımlarıyla entegre olur.

Maxwell_2D' nin en önemli özelliklerinden bir diğeri ise Kuvvet, moment, kapasitans, endüktans, direnç ve empedans gibi alan parametrelerini doğru bir şekilde çözmek için 3D/2D manyetik geçici, AC elektromanyetik, magnetostatik, elektrostatik, DC iletimi ve elektrik geçici çözümleri içerir. Maxwell_2D endüstriyel bileşenlerde düşük frekanslı elektromanyetik alanların güvenilir simülasyonunu sunar ve tek biçimli yapılarda elektrik ve manyetik alanları analiz etmek için kullanılır.

Genel olarak elektromanyetik alanların 2D modellenmesi, cihazların uçlarından uzağa yerleştirildiği düşünülen bir cihazın 2D kesitindeki alanlarını çözerek nihai etkileri göz ardı eder. Uygulanabilir tüm modelleme görevleri için mükemmel doğruluk sağlanabilse de 2D çözüm dizileri her zaman elektromanyetik cihazları doğru bir şekilde modellemek için kullanılamaz. Son etkilerin önemli olduğu veya tam dönüş simetrisi sergilemeyen cihazlar en yüksek doğruluk için 3D olarak modellenmesi önerilmektedir.

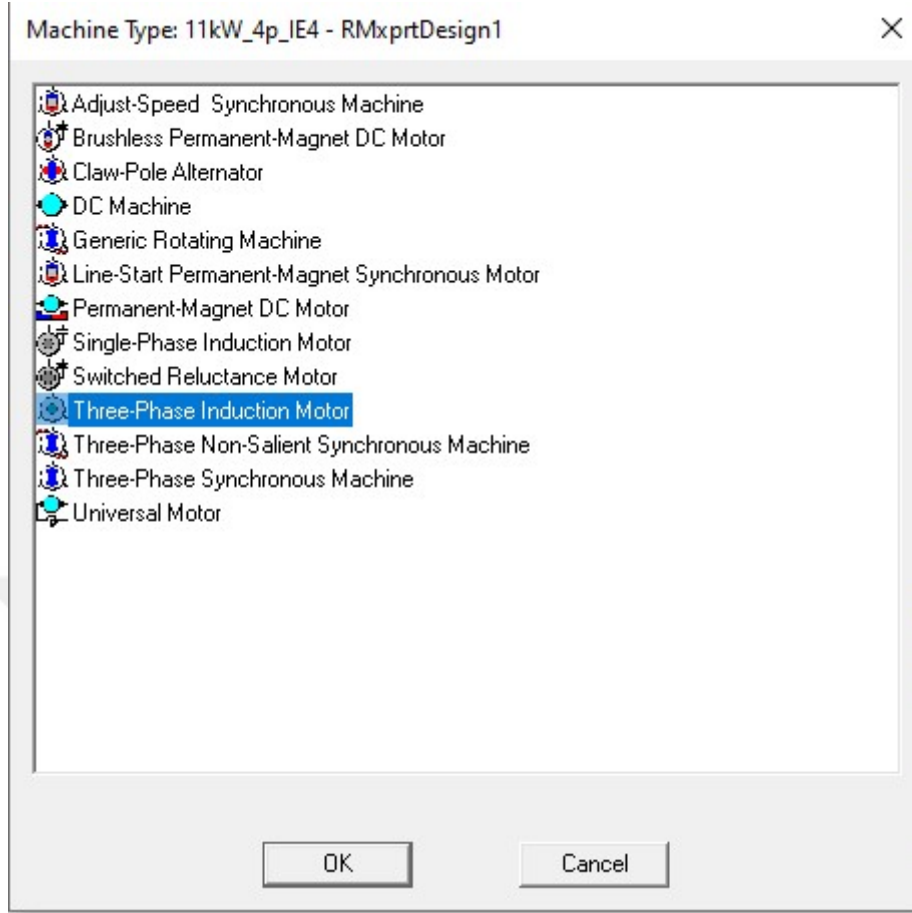
3.2. Sincap Kafesli Asenkron Motorun Modellenmesi

Ansyz_Maxwell programı birçok elektrik motorunun tasarımı için uygun bir donanıma sahip bir programdır. İstenilen motorun tasarımı, arıza tespiti ve analizi yapılmadan önce bazı adımlardan geçilmektedir. Bu adımlar ile istenilen tasarımın parametrelerini doğru bir şekilde ve uygun sıralamalara tabi olarak girilmektedir. İlk olarak Project ara yüzünden Şekil 3.2.' de gösterildiği gibi (Insert maxwell2D desing) seçilir.



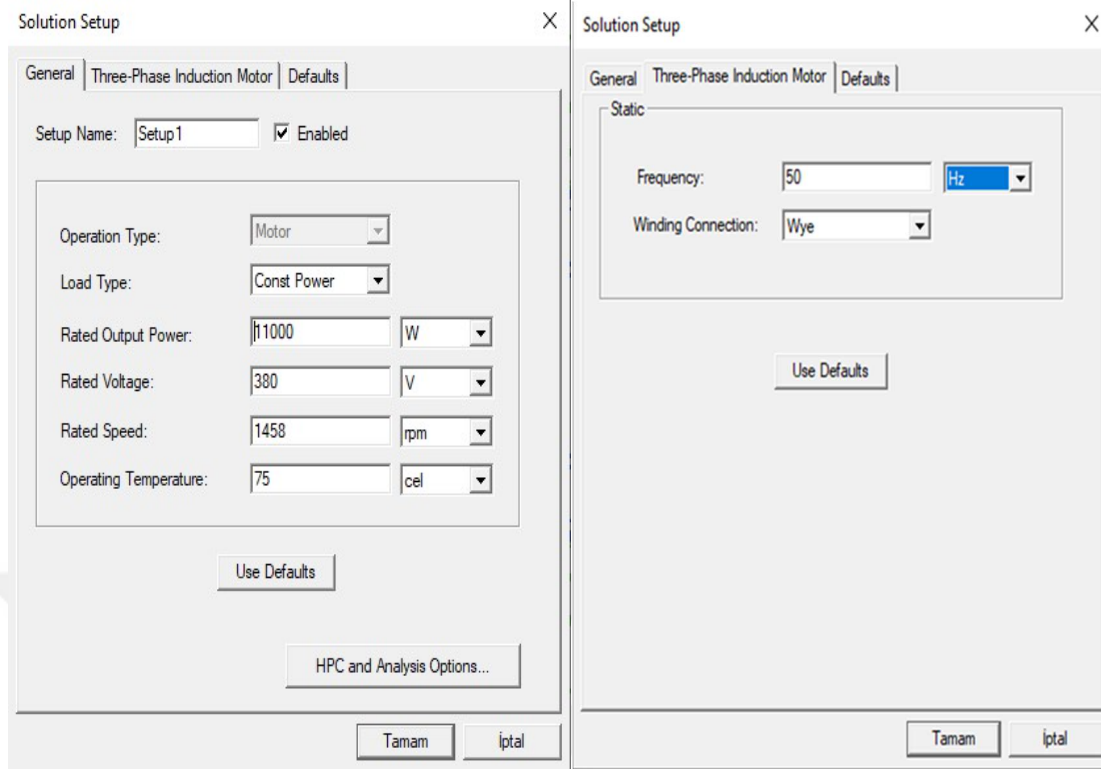
Şekil 3.2. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait Project arayüzü

Seçilen Insert RMxprt Desing bölümü ile tasarımı ve analizi yapılacak elektrik motoru Şekil 3.3.' te gösterildiği gibi seçilir.



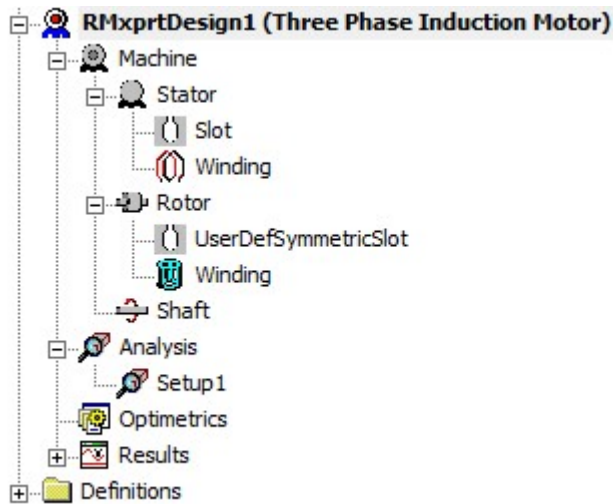
Şekil 3.3. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan makine tipi seçimi

Tasarımı ve analizi yapılacak motorumuzu seçtikten sonra (RMxprt arayüzünden- Analysis setup (kurulumu çöz)- Add solution setup) ile motorun etiket değerleri olan Anma çıkış gücü, anma gerilimi, anma hızı ve çalışma sıcaklığı Şekil 3.4.' te gösterildiği gibi girilmektedir. Ayrıca motora ait olan frekans değeri de girilmektedir. Frekans değerinin girilmemesi durumunda program tasarımı durdurur.



Şekil 3.4. Ansys Maxwell ile Tasarlanan motorun etiket değerleri

Makinenin genel özelliklerini belirlemek için Şekil 3.5.' te gösterildiği Project manager bölümünden machine sekmesine tıklanır.



Şekil 3.5. Ansys_Maxwell ile tasarlanan motorun project Manager bölümü

Buradan Şekil 3.6.' da gösterildiği gibi makinenin tipi, kutup sayısı, kayıp faktörü, sürtünme kaybı, rüzgar kaybı ve referans hız değerleri girilir.

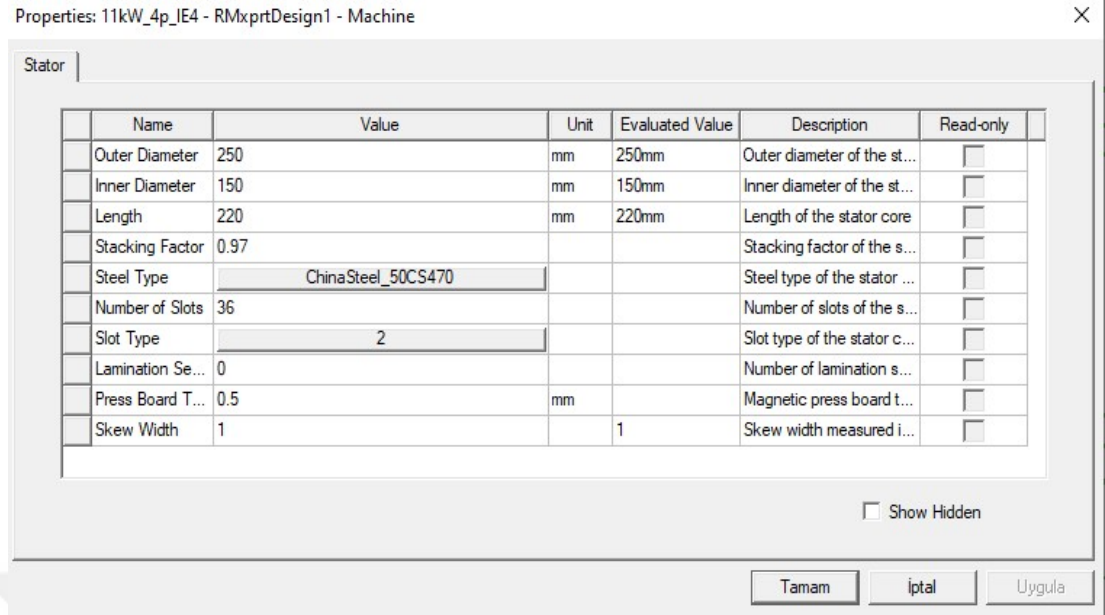
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Machine Type	Three Phase Induction Motor				☒
Number of Poles	4			Number of poles of the ...	☐
Stray Loss Fac...	0.01		0.01	Stray Loss Factor	☐
Frictional Loss	34	W	34W	The frictional loss meas...	☐
Windage Loss	60	W	60W	The windage loss meas...	☐
Reference Sp...	1458	rpm		The reference speed at...	☐

☐ Show Hidden

Tamam İptal Uygula

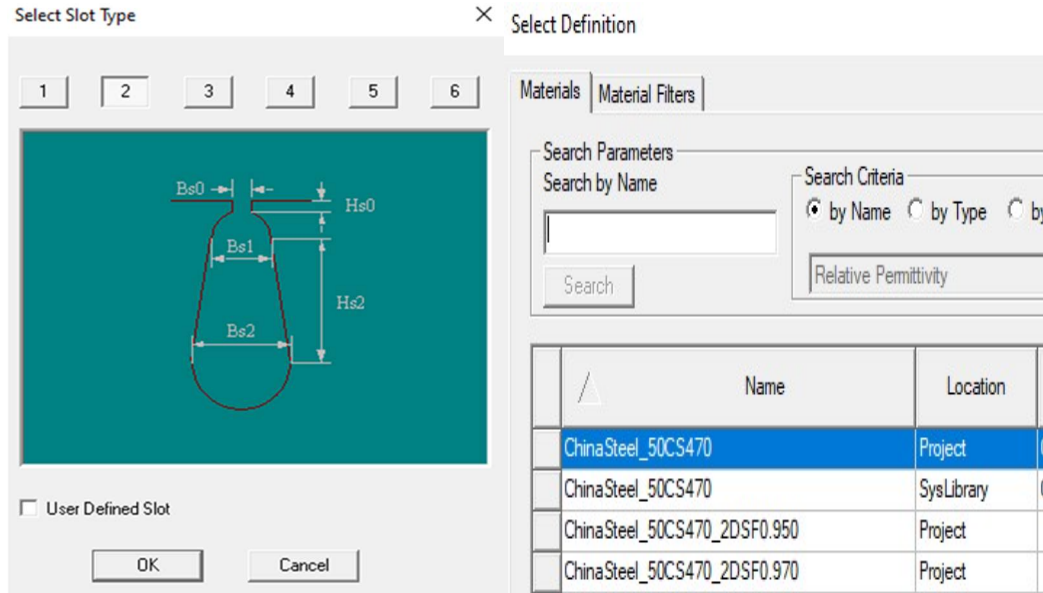
Şekil 3.6. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun genel özellikleri

Motorun genel özelliklerinin belirledikten sonra statora ait genel özellikler girilir. Şekil 3.7.' da belirtildiği gibi statora ait olan dış çap, iç çap, stator uzunluğu, istiflenme faktörü statorun çelik tipi, stator slot sayısı, yuva türü, laminasyon sektörleri, pres tahtası kalınlığı ve çarpık genişlik değerleri girilir.



Şekil 3.7. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun stator özellikleri

Statora ait parametrelerin birimleri milimetre cinsinden verilmiş olup tasarımın oluşumuna göre istenilen farklı milimetrik birimlere çevirmek mümkündür.



Şekil 3.8. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait stator slot tipi ve malzeme seçimi

Tasarlanan motorun stator değerleri girildikten sonra statora ait bobin değerleri project manager bölümünden stator alt başlığında bulunan winding (sarım) sekmesine tıklanır ve bobine ait olan sarma katmanları, sarma tipi, paralel dallar, telli iletkenler, tel sayısı, tel sarma ve tel boyutu değerleri Şekil 3.9.' da gösterildiği gibi girilir.

Properties: 11kW_4p_IE4 - RMxprtDesign1 - Machine

Winding | End/Insulation |

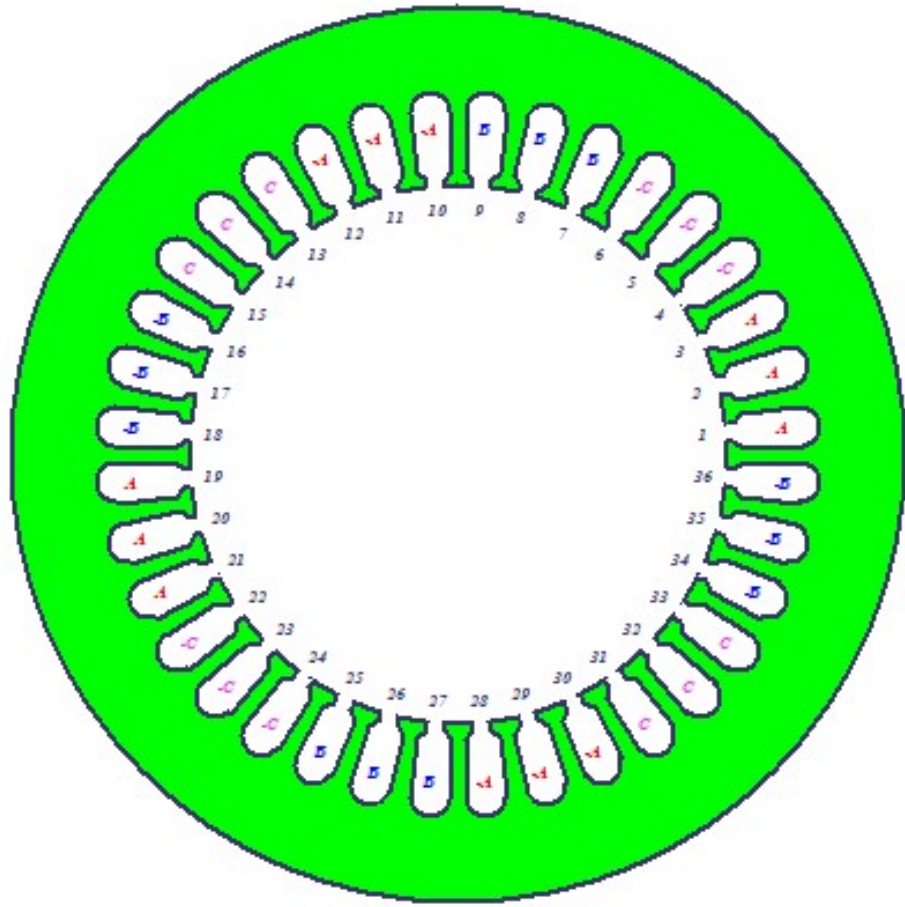
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Winding Layers	1			Number of winding layers	☐
Winding Type	Whole-Coiled			Stator winding type	☐
Parallel Branch...	1			Number of parallel bran...	☐
Conductors pe...	13		13	Number of conductors ...	☐
Number of Stra...	8		8	Number of strands (nu...	☐
Wire Wrap	0	mm		Double-side wire wrap t...	☐
Wire Size	Diameter: 1.085mm			Wire size, 0 for auto-de...	☐

☐ Show Hidden

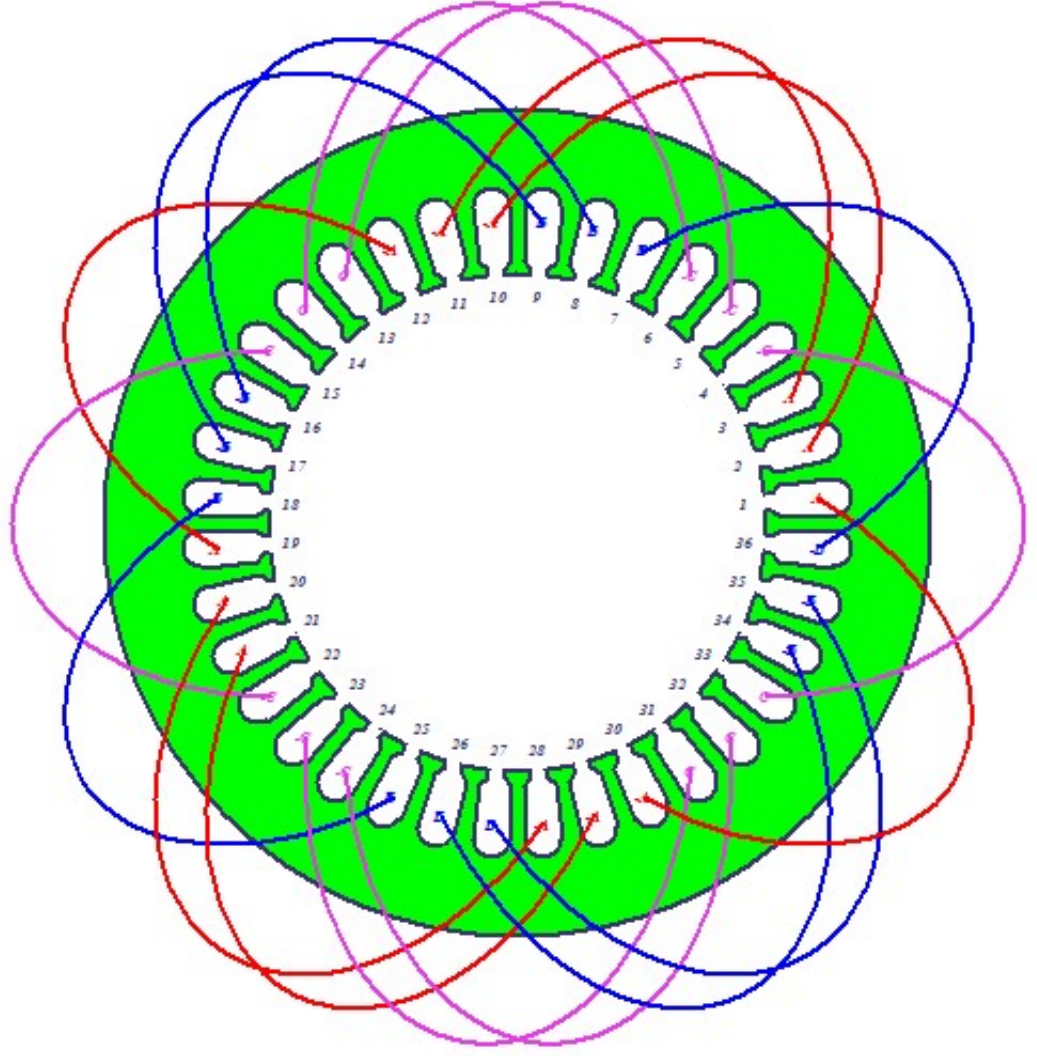
Tamam İptal Uygula

Şekil 3.9. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait bobin değerleri

Motorun bobinine ait değerler girildikten sonra Project manager bölümünde bulunan stator/winding sekmesine tıklanıldığında Şekil 3.10.' daki gibi statorun sargı kutup modeli oluşur. Oluşan bu modele sağ tıklanır connect all coils (tüm bobinleri bağlayın) sekmesine tıklanır ve statora ait bobinlerin bağlantı şekilleri girilen bobin değerleri doğrultusunda Şekil 3.11.' da çok net bir şekilde gözlemlenir.

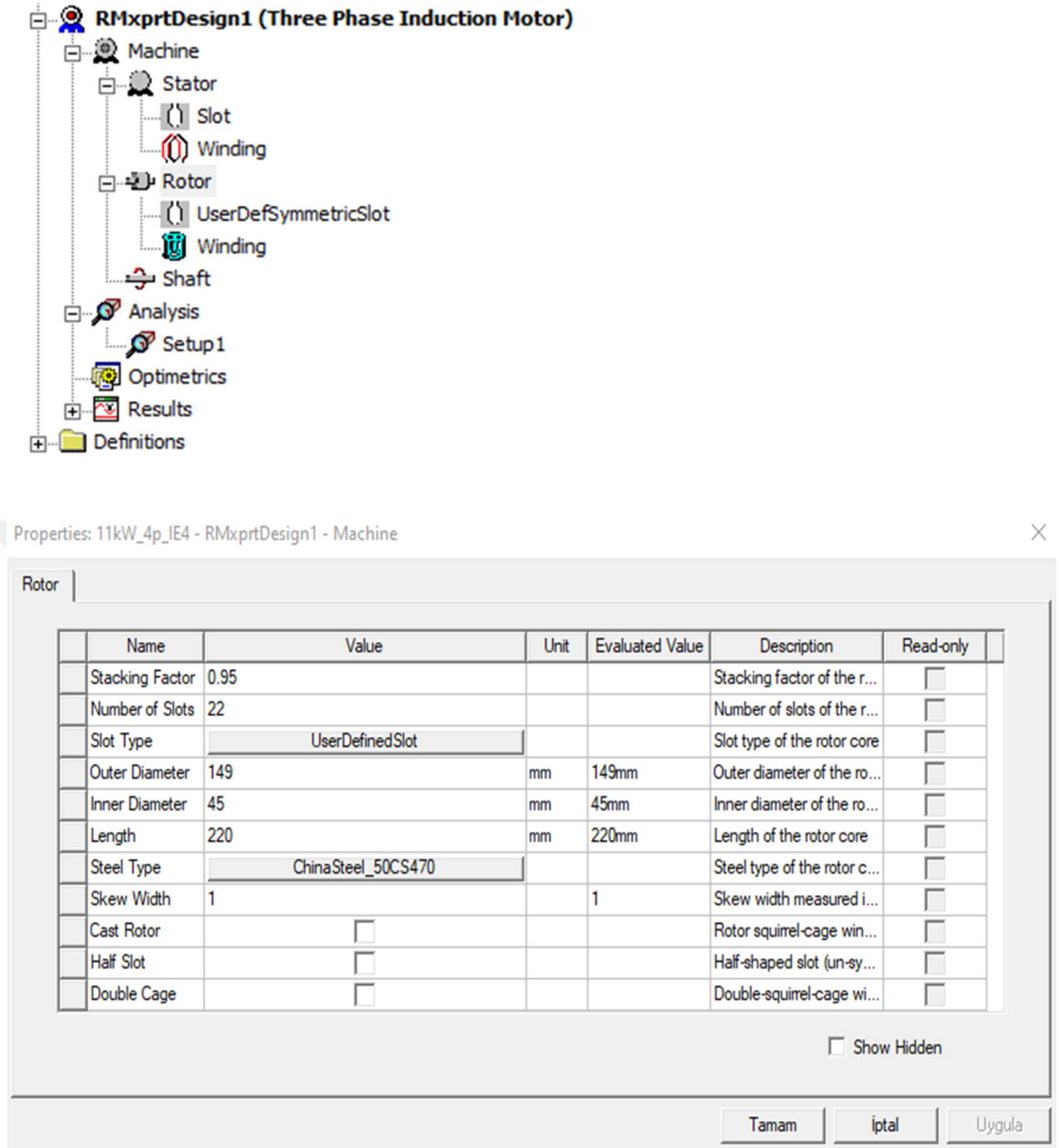


Şekil 3.10. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun stator sargı kutupları



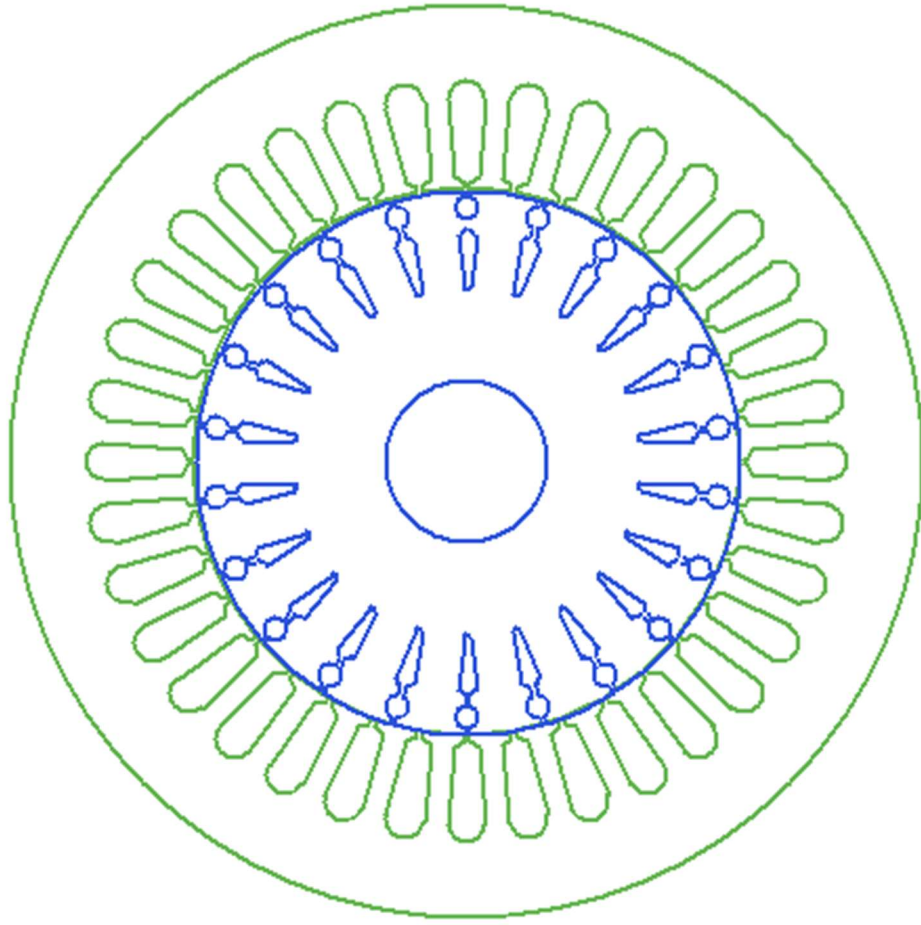
Şekil 3.11. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun stator sargı dağılımı

Makinenin statoruna ait bobin değerleri girildikten sonra, project manager bölümünden machine bölümünden rotor bölümüne gelinir burada rotora ait istiflenme faktörü, slot sayısı, yuva türü, rotor dış çapı, rotor iç çapı, rotor uzunluğu, rotor çelik tipi değerleri Şekil 3.12.' deki gibi girilir.



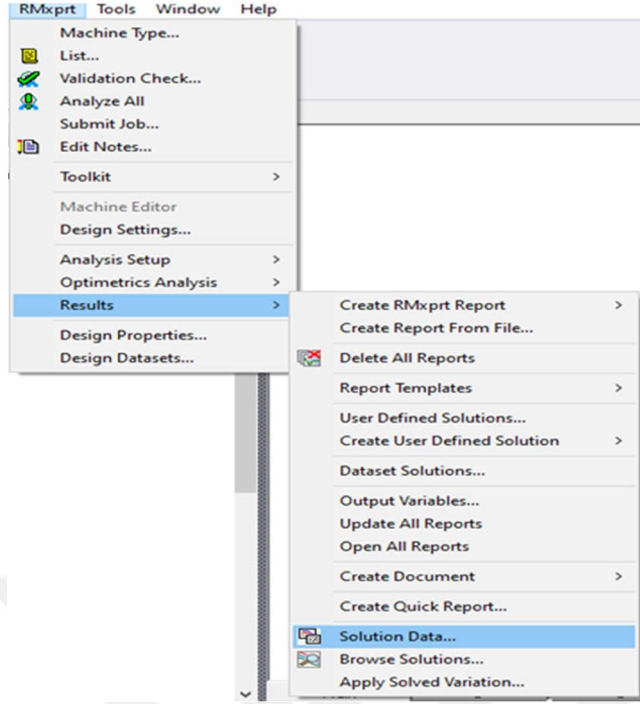
Şekil 3.12. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait rotor parametreleri

Girilen tüm bu değerler doğrultusunda Şekil 3.13.' te gösterildiği gibi tasarlanan motorun RMxpRT modeli oluşmuş olur.



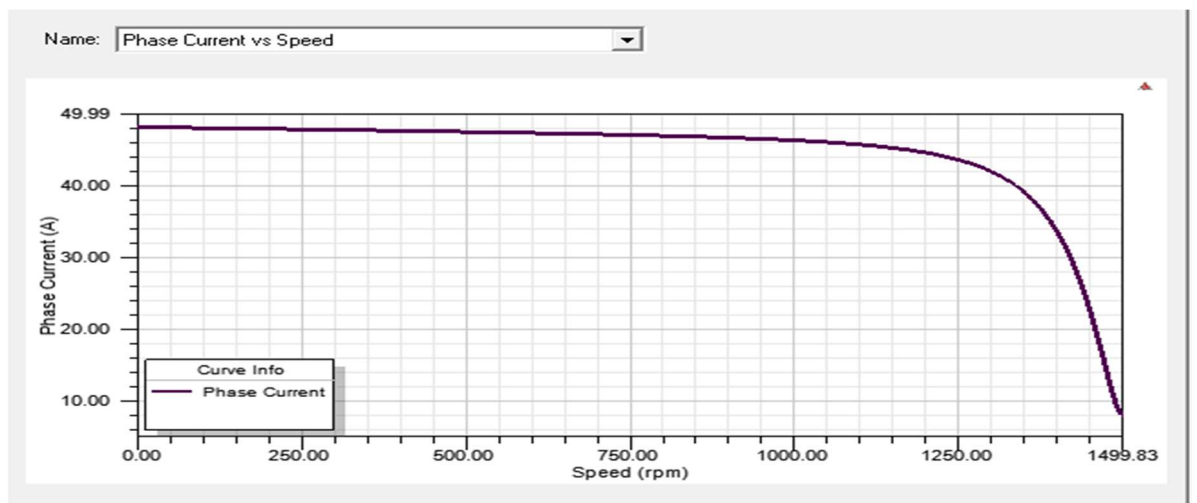
Şekil 3.13. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motorun RMxprt modeli

Ansys_maxwell programında tasarlanan makinenin genel özellikleri belirlendikten sonra RMxprt arayüzünden validation check ile design settings, machine, analysis setup, optimetrics parametrelerinin sorunsuz bir şekilde çalışması gerekmektedir. Aksi bir durumda tasarlanan motor maxwell_2D modeline geçemez. Daha sonra RMxprt arayüzünden Analyze All ile modellenen motor program tarafından kayıt altına alınır. Motor kayıt altına alındıktan sonra tasarlanan motorun RMxprt modeline ait tüm eğri ve parametrelere ulaşmak için RMxprt arayüzünden – Result – soludation data ile Şekil 3.14.’ te gösterildiği gibi RMxprt modelinde motora ait Performance, design seheet ve curves v.b. parametrelerine ulaşılır.

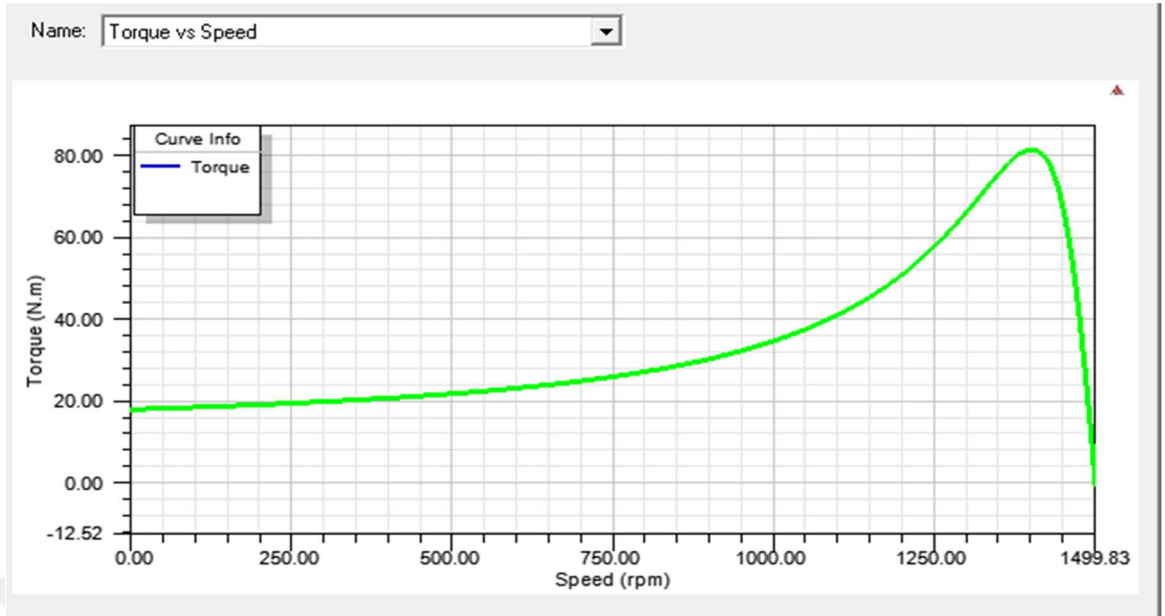


Şekil 3.14. Ansys_Maxwell ile tasarlanan motorun RMxprt modeline ait data arayüzü

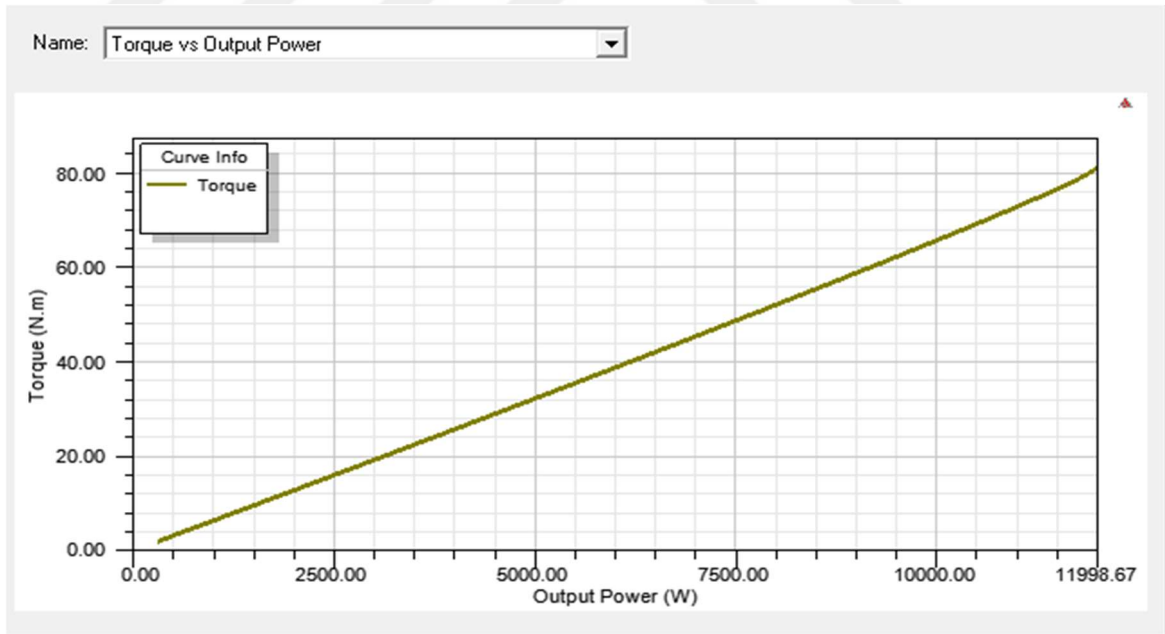
Örneğin, tasarlanan motorun RMxprt modeline ait hızın faz akımına bağlı olarak değişimi Şekil 3.15.' te gösterildiği gibi, hızın moment' e göre değişimi Şekil 3.16.' te gösterildiği gibi, çıkış gücünün moment' e göre değişimi Şekil 3.17.' de grafik eşliğinde belirtilmiştir.



Şekil 3.15. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait RMxprt modelinde hızın faz akımına göre değişimi

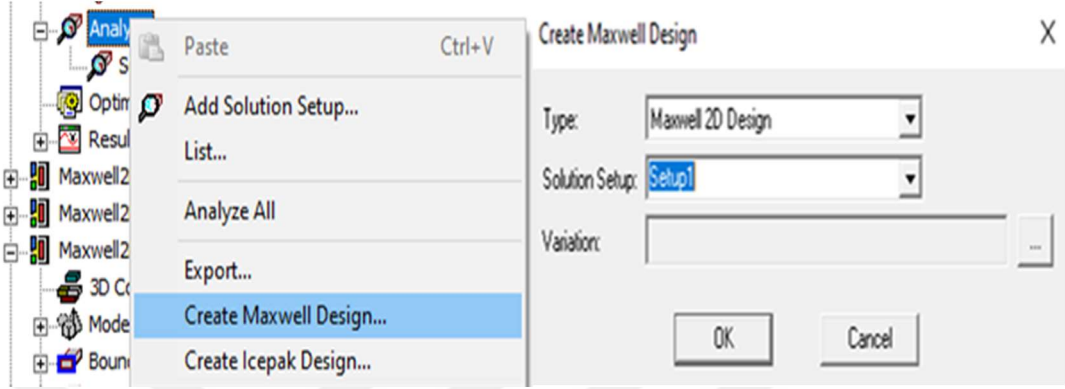


Şekil 3.16. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait RMxpirt modelinde hızın moment' e göre değişimi



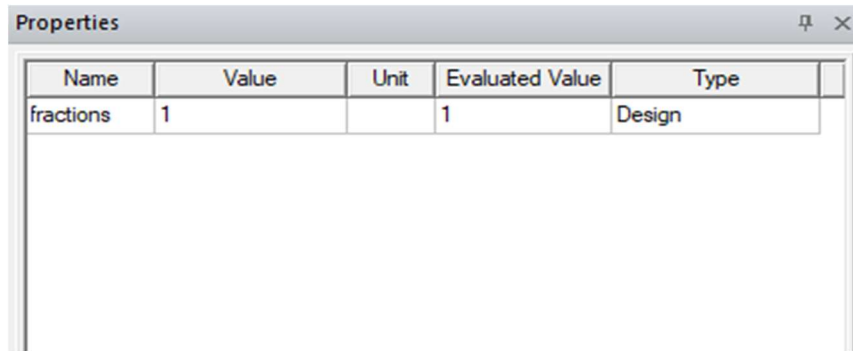
Şekil 3.17. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan motora ait RMxpirt modelinde çıkış gücünün moment' e göre değişimi

Buradan, project manager bölümünden Analysis' e sağ tıklanır daha sonra Create Maxwell Design'e tıklanır Şekil 3.18.' de gösterildiği gibi. Maxwell_2D design seçilip maxwell_2D analizine sorunsuz bir şekilde geçilmiş olur.



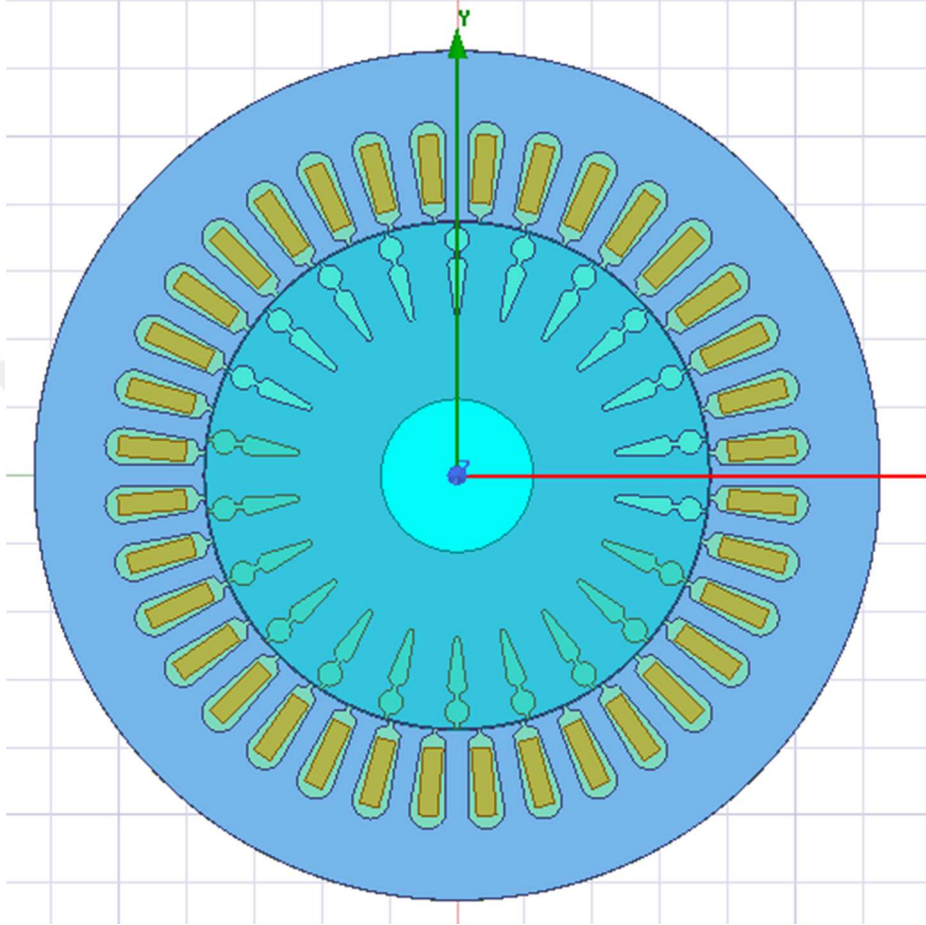
Şekil 3.18. Maxwell_2D tasarımına geçiş komutu

Maxwell_2D modeline geçtikten sonra tasarlanan motor programın yazılım tipine göre çeyrek daire, yarım daire şeklinde olabilir. Oluşan bu şekiller doğrultusunda istenen arızanın analizini ve tespitini yapabilmek için motorun tam daire şekline dönüştürülmesi gerekiyor. İlk olarak view arayüzünden properties bölümü açılır. Daha sonra Şekil 3.19.' da gösterildiği gibi fractions değeri 1 olarak ayarlanır.



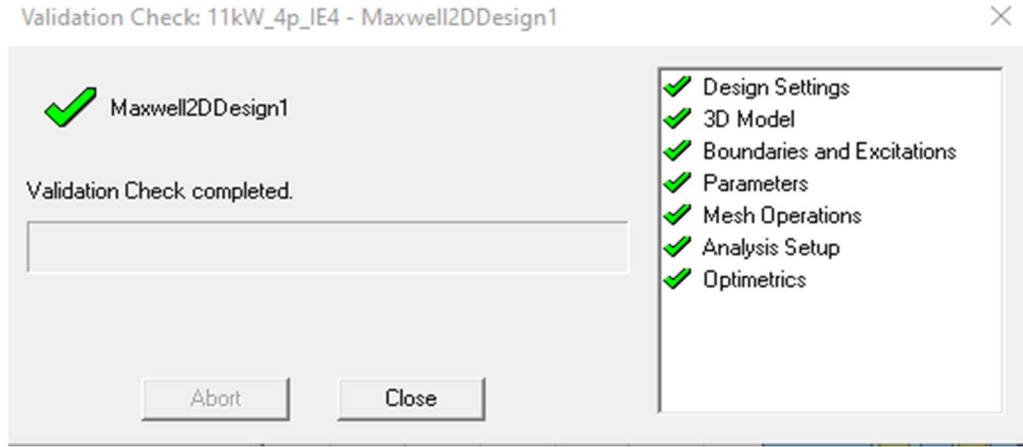
Şekil 3.19. Maxwell_2D motor fractions seçimi

Motor tam daireye ayarlandıktan sonra motor Şekil 3.20.' de gösterildiği gibi tam daire şeklini almış olur.



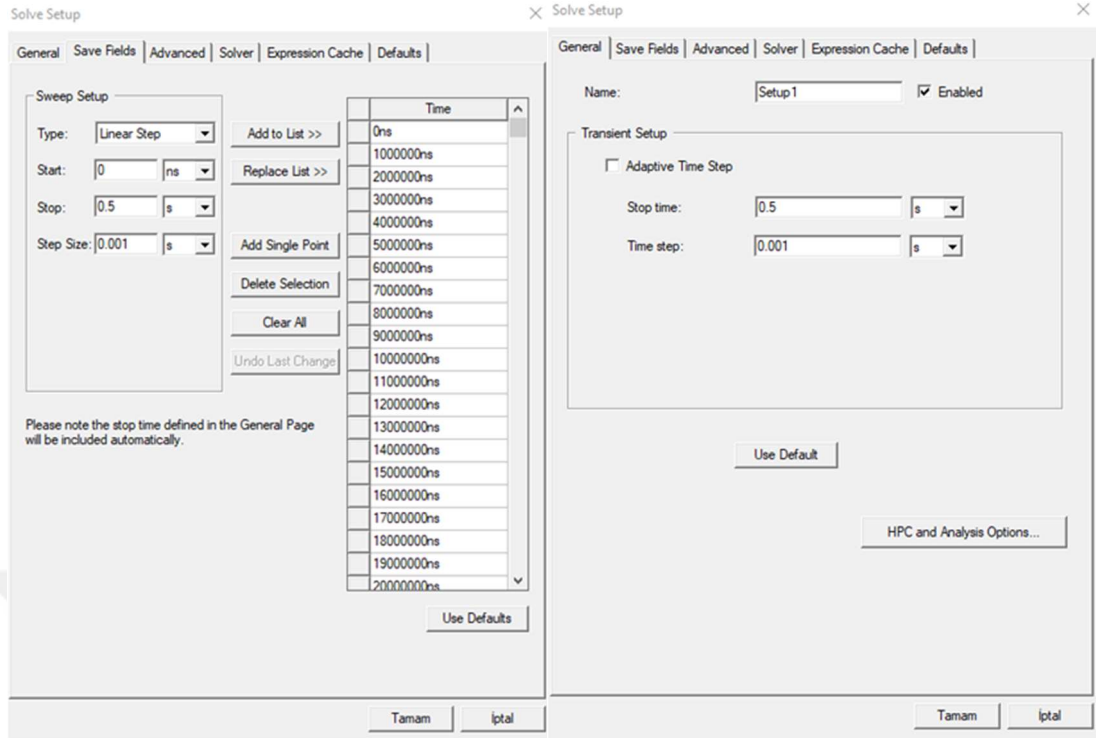
Şekil 3.20. Ansys_Maxwell ile tasarlanan sağlıklı motorun tam daire şekli

Daha sonra Validation check yapınca Boundaries and excitations hatasını almış oluruz bunun çözümü için ilk olarak motorun girdap efektlerini ayarlanması gerekiyor. Sonra programın ayarladığı sınır koşulları silinir, motorun hepsini içine alan yeterince büyük bir daire içine alınır malzeme olarak vacuum olmasına dikkat edilir. Sonra edge' ye geçilir ve çizilen dairenin dış kenarlarını seçip vektör potansiyel değeri olarak '0' değer girilir. Bu adımlardan sonra Validation check yapınca Şekil 3.21.' de görüldüğü gibi hatasız bir şekilde çalıştığı gözlemlenir.



Şekil 3.21. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motorun tam daireye ait validation check sonucu

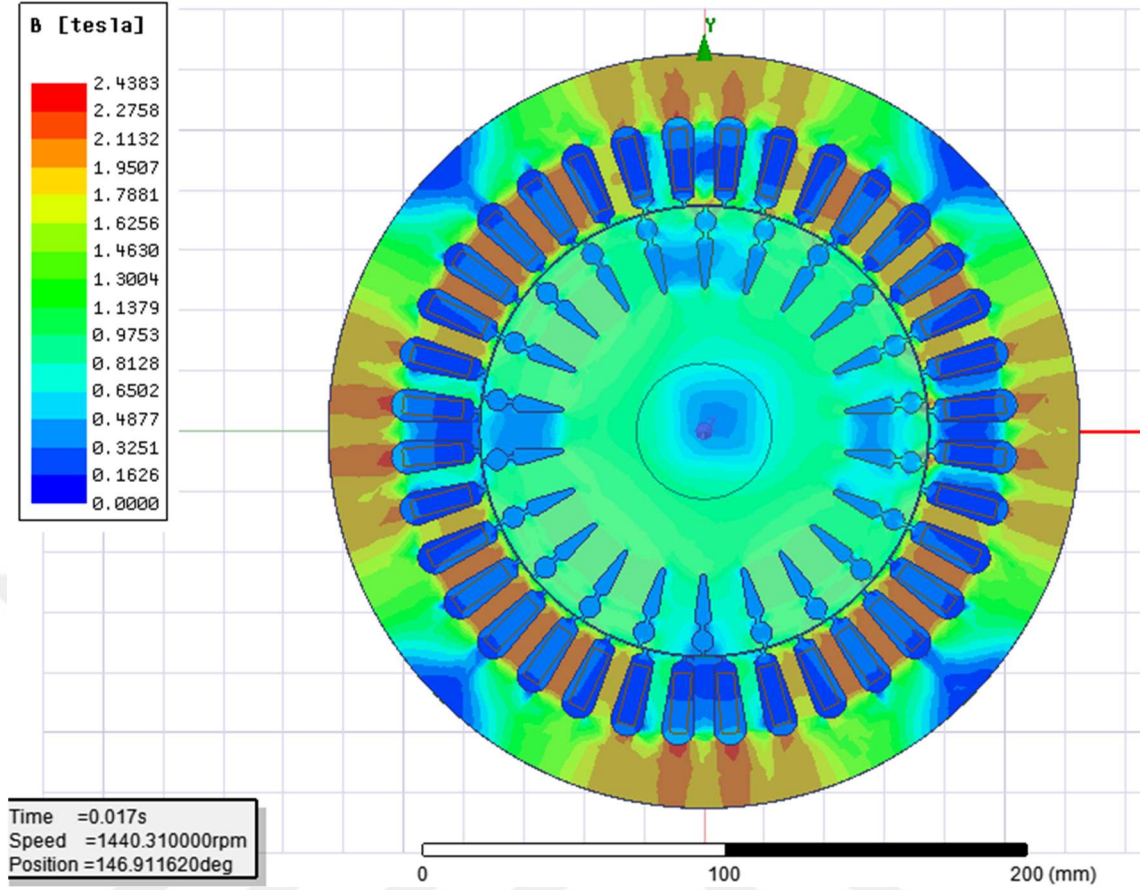
Tasarlanan sağlıklı motora ait manyetik alan dağılımı, akı çizgileri ve vektör çizgilerini incelemek ve analizini yapmak için motora ait başlama, adım ve bitiş sürelerinin Şekil 3.22.' de gösterildiği gibi ayarlanması gerekmektedir ve girilen değerlerin saniye cinsinden olduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir



Şekil 3.22. Ansys_Maxwell ile tasarlanan motora ait kurulum değerleri

3.2.1. Tasarlanan sağlıklı motora ait manyetik alan dağılımı

Tasarımı yapılan sağlıklı motora ait manyetik alan dağılımının analizini yapmak için ilk olarak motorun tamamı seçilir sonra Maxwell_2D arayüzünden – Fields – Fields – B – Mag_B ile tasarlanan motora ait manyetik alan dağılımı istenen zamana göre incelenir. Örneğin, Şekil 3.23.' de gösterildiği gibi 0.017s' deki manyetik alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motora ait (0.017s)' deki manyetik alan dağılımı

Maxwell_2D, xy problemi için vektörlerin z yönünde yalnızca bir bileşeni vardır. Zamana bağlı manyetik denklem Denklem 3.5.' teki gibi ifade edilir:

$$\nabla \times v \nabla \times A = j_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c + \sigma V \nabla \times A \quad (3.5)$$

- H_c kalıcı mıknatısın zorlayıcılığıdır,
- v hareketli parçaların hızıdır,
- A , manyetik vektör potansiyelidir,
- V elektrik potansiyelidir,
- J_s , kaynak akım yoğunluğudur.

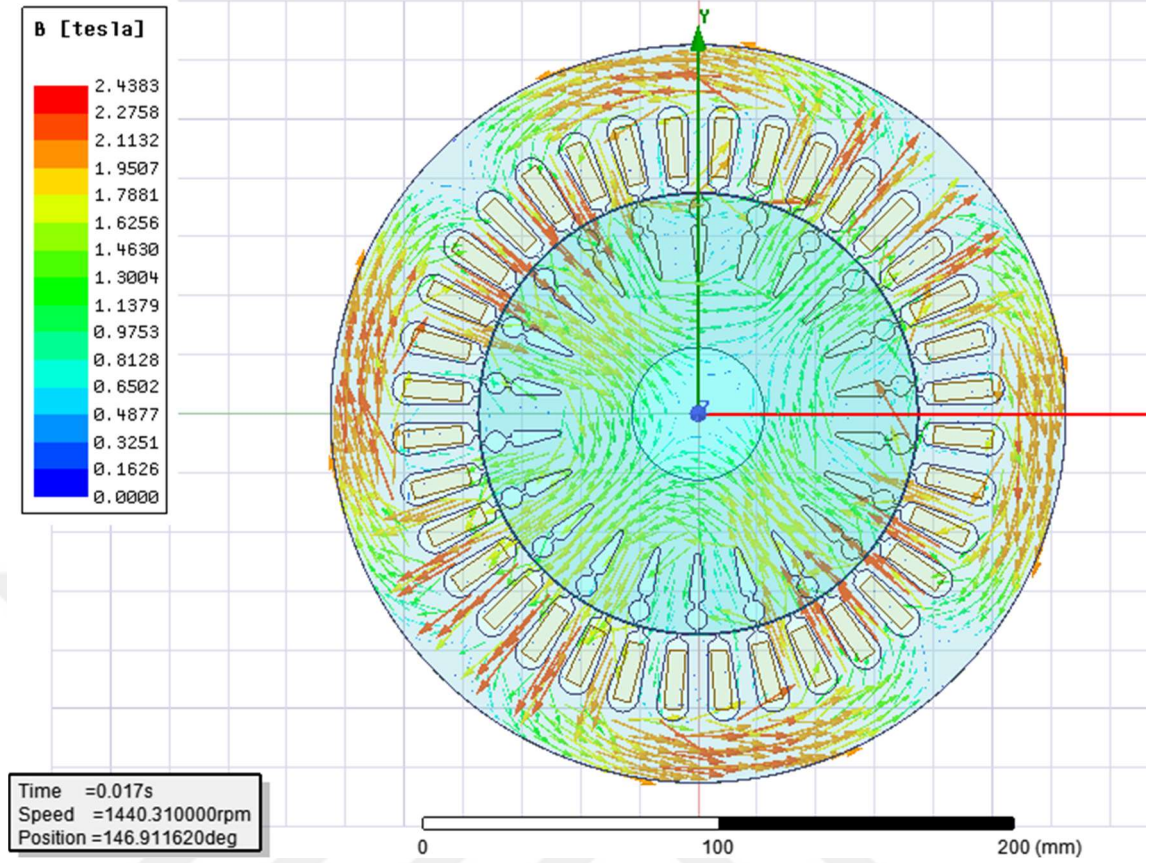
Geçici çözümleyici, hızı sıfıra eşitleyerek modeldeki bileşenlere göre sabitlenmiş bir referans çerçevesi uygular. Bu hızın her zaman sıfır olduğu kendi referans çerçevelerinde hem hareketli kısımdaki hem de sabit kısımdaki manyetik vektör potansiyeli denklemini dikkate alarak mümkündür. Hareket eden bileşenler artık kendi koordinat sistemlerine sabitlendiğinden, kısmi zaman türevi, A'nın toplam zaman türevi olur. Böylece, hareket denklemi Denklem 3.6.'daki gibi olur.

$$\nabla_x v \nabla_x A = J_s - \sigma \frac{dA}{dt} - \sigma \nabla V + \nabla_x H_c \quad (3.6)$$

Sonlu elemanlar modelinde hareket denklemi, her düğümde ve her zaman adımında elde edilebilir. Yukarıdaki Denklem 3.6.'da gösterildiği gibi hareket, dolaylı olarak A'nın toplam türevinde bulunur.

3.2.2. Tasarlanan sağlıklı motora ait vektör çizgileri

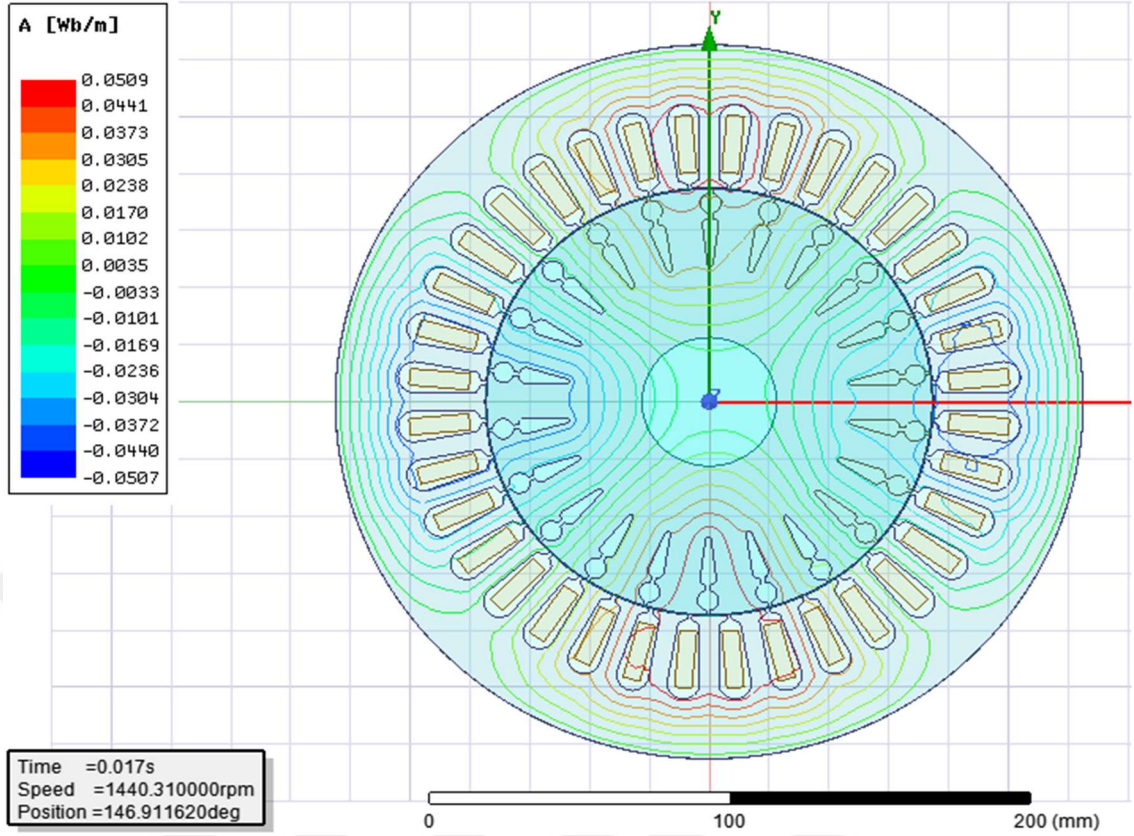
Tasarlanan sağlıklı motora ait vektör çizgilerinin analizini yapmak için ilk olarak motorun tamamı seçilir sonra Maxwell_2D arayüzünden – Fields – Fields – B – B_vector ile tasarlanan motora ait vektör çizgileri istenen zamana göre incelenir. Örneğin, Şekil 3.24.'de gösterildiği gibi 0.017s zamanındaki vektör çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Ansys_Maxwell ile tasarlanan sağlıklı motora ait 0.017s deki vektör çizgileri

3.2.3 Tasarlanan sağlıklı motora ait manyetik akı çizgileri

Tasarlanan sağlıklı motora ait manyetik akı çizgilerinin analizini yapmak için ilk olarak motorun tamamı seçilir sonra Maxwell_2D arayüzünden – Fields – Fields – A – flux_line ile tasarlanan motora ait manyetik akı çizgileri istenen zamana göre incelenir. Örneğin, Şekil 3.25.' de gösterildiği gibi 0.017s zamanındaki manyetik akı çizgileri gösterilmiştir.



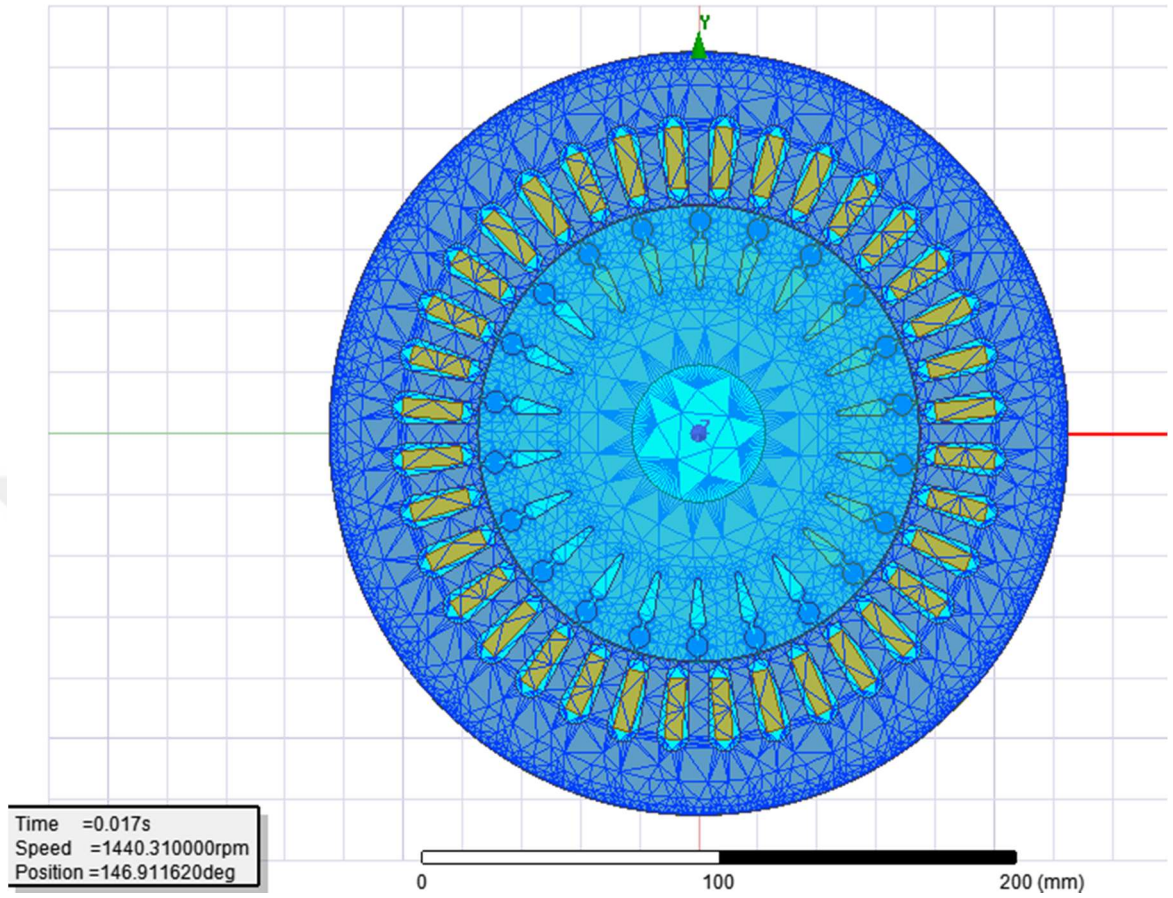
Şekil 3.25. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motora ait 0.017s deki manyetik akı çizgileri

Elektrik akısı bağlantısını hesaplamak için elektrostatik alan çözücü Denklem 3.7. deki gibidir.

$$\psi = \int E \cdot dA \quad (3.7)$$

Burada, E elektrik alanını ve A akı yoğunluğunun hesaplandığı alanı ifade etmektedir. Kartezyen (XY) modellerde alan, xy düzleminde çizdiğiniz akı çizgisini z yönüne süpürerek 3 boyutlu bir yüzey oluşturarak bulunur. Hesaplanan elektrik akısı değeri, z yönünde metre derinliğindeki akıdır. Eksenel simetrik (RZ) modellerde rz düzleminde çizdiğiniz akı doğrusunun z eksenini etrafında 360 derece döndürülmesiyle alan bulunur. Hesaplanan elektrik akısı, bu yüzeyden geçen toplam akıyı ifade eder. Çizdiğiniz her çizgi için ayrı bir akı bağlantı değeri hesaplanır.

3.2.4. Tasarlanan sağlıklı motora ait mesh yapısı



Şekil 3.26. Ansys_Maxwell ile Tasarlanan sağlıklı motora ait ağ yapısı

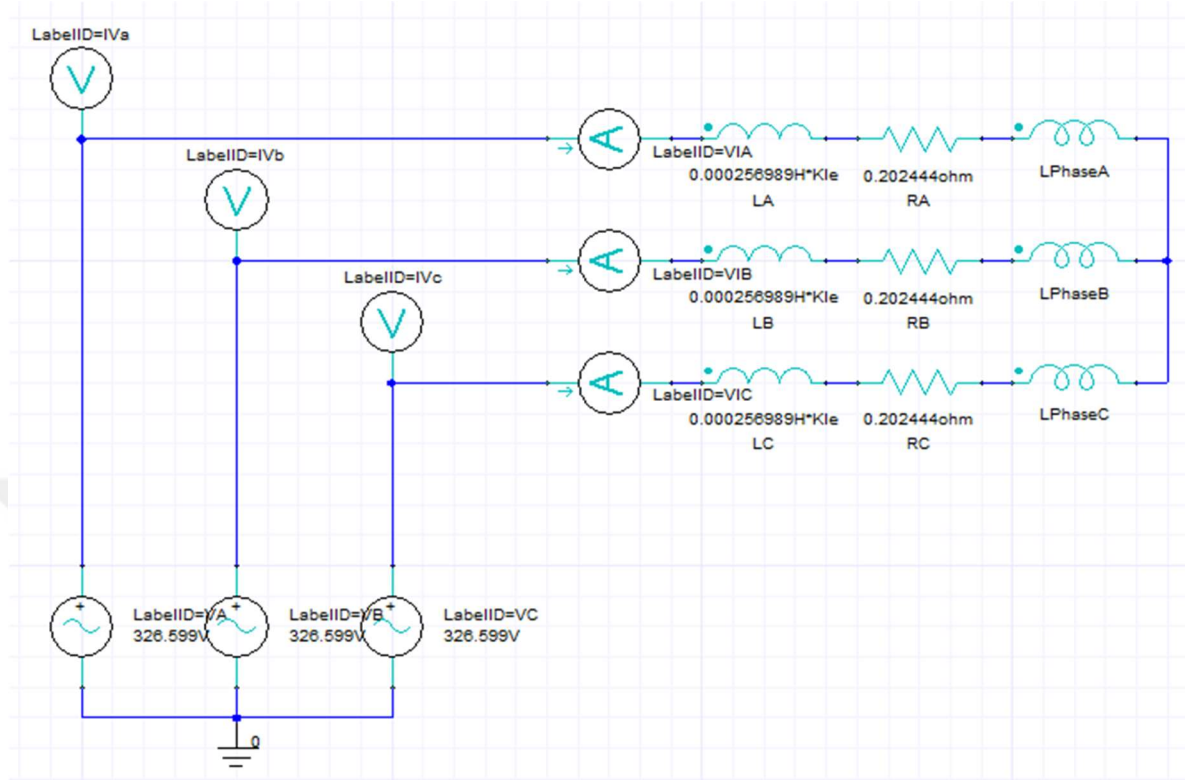
Maxwell' de ağ işlemleri, Maxwell' e ağ yapısı kılavuzu sağlayan isteğe bağlı ağ iyileştirme ayarlarıdır. Maxwell' in ağ yapısına rehberlik eden bu tekniğe, ağın "tohumlanması" denir. Tohumlama, Maxwell_3D veya Maxwell_2D menüsündeki Mesh İşlemleri komutları kullanılarak gerçekleştirilir.

Bir ağ tanımlarken, genellikle, önce ağ işlemlerini atarsınız (Maxwell_3D>Mesh İşlemleri veya Maxwell_2D>Mesh İşlemleri komutlarını kullanarak) ve ardından ağı yaratırsınız (Maxwell_3D veya Maxwell_2D menüsünü kullanarak ve Analysis Setup>Apply Mesh İşlemleri komutunu seçerek). Ancak, ilk ağ oluşturulduktan sonra da ağı hassaslaştırabilirsiniz

Maxwell' e bir yüzeydeki veya bir hacim içindeki dört yüzlü elemanların uzunluğunu belirli bir değerin altına düşene kadar hassaslaştırması talimatını verebilirsiniz (uzunluk tabanlı ağ iyileştirme) veya Maxwell' e bir yüzeydeki tüm dört yüzlü elemanların yüzey üçgen uzunluğunu hassaslaştırması talimatını verebilirsiniz. Bazı durumlarda, bir veya daha fazla yüz için Maxwell' in yüzey yaklaşım ayarlarını değiştiren bir ağ işlemi de oluşturmak isteyebilirsiniz. Bazı durumlarda, bir silindirik boşluk işlemine mesh işlemi de atamak isteyebilirsiniz. Maxwell_2D için, İlk Ağ Ayarları iletişim kutusunda ‘mesher’ seçildiğinde, seçilen kenarlara karşılık gelen (Skin Depth Layers) ağ ayarını tanımlayabilirsiniz.

Şekil 3.26.' da gösterildiği gibi stator oluklarının ve rotor çubuklarının daha çok daha küçük ve daha dar ve sık elemanlardan oluşmakta iken statorun kendisi ise oluklardan uzaklaştıkça daha büyük ve daha seyrek elemanlardan meydana geldiği görülmektedir. Çok daha küçük boyutlara sahip olan hava aralığı ise görüldüğü gibi çok daha küçük boyutlarda ve daha sık elemanlardan meydana gelmektedir.

3.2.5. Tasarlanan sağlıklı motora ait eşdeğer devre



Şekil 3.27. Ansys_Maxwell ile tasarlanan asenkron motora ait elektriksel eşdeğer devre

Çizelge 3.1. Eşdeğer devreye ait parametreler

V	R	L
Va=326.599V	RA=0.202444ohm	LA=0.000256989H*Kle
Vb=326.599V	RB=0.202444ohm	LB=0.000256989H*Kle
Vc=326.599V	RC=0.202444ohm	LC=0.000256989H*Kle

3.2.6. Sincap kafesli asenkron motor modelinde eksantrik arızanın modellenmesi

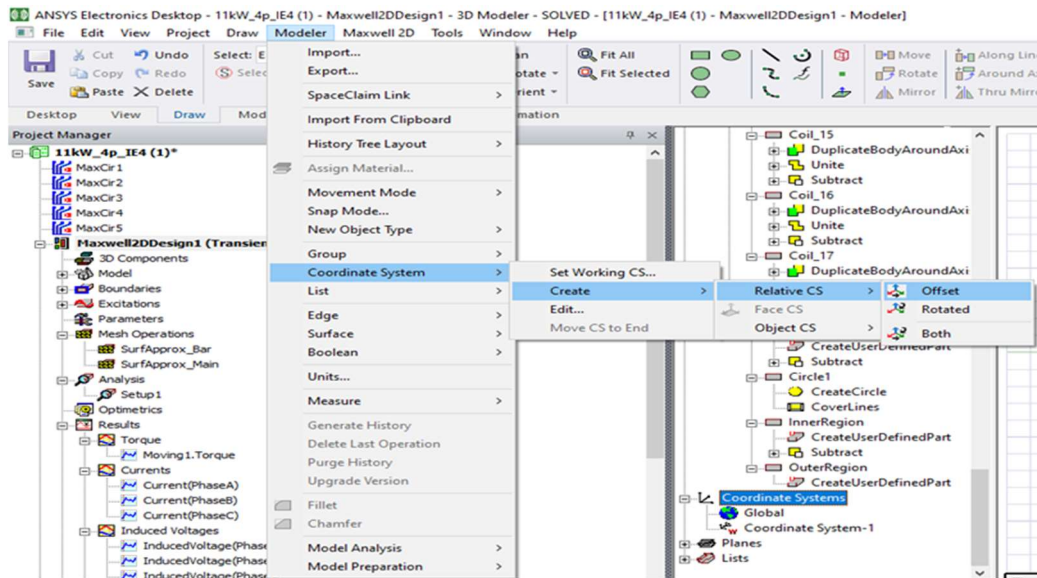
Ansyz_Maxwell_2D programında transient(geçici) çözüm türüne göre oluşturulan sağlıklı asenkron motor üzerinde farklı arıza şiddetlerinde statik, dinamik ve karışık eksantrik arızası oluşturulacaktır ve oluşturulan bu arızalı motor sağlıklı çalışan motor ile daha sonra karşılaştırılacaktır. İlk olarak arıza oluşturma metodları oluşturulur.

3.2.6.1. Maxwell_2D ile eksantrik arıza oluşturma metodları

Ansyz_maxwell programında statik, dinamik ve karışık eksantrik arızalarını oluşturmak için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan bu iki yöntemlere kısaca değinip, daha sonra oluşturulan arızalı durumlar ele alınacaktır.

1) Manuel yöntemler ile eksantrik arıza oluşturma yöntemi

Sincap kafesli asenkron motorlarda manuel yöntem ile eksantrik arızasını oluşturmak için ilk olarak Ansys_Maxwell_2D programında Şekil 3.28.' da görüldüğü gibi modeler arayüzünün alt sekmelerinden "Coordinate System-1" isimli yeni bir koordinat sistemi tanımlanır.



Şekil 3.28. Maxwell_2D Modeler Ara yüzü

Eksen tanımlaması yapıldıktan sonra Şekil 3.29.' da gösterildiği gibi istenilen isimde büyüklük ve açıda eksen parametreleri tanımlanmış olur.

Properties: 11kW_4p_JE4 - Maxwell2DDesign1 - Modeler

Coord System

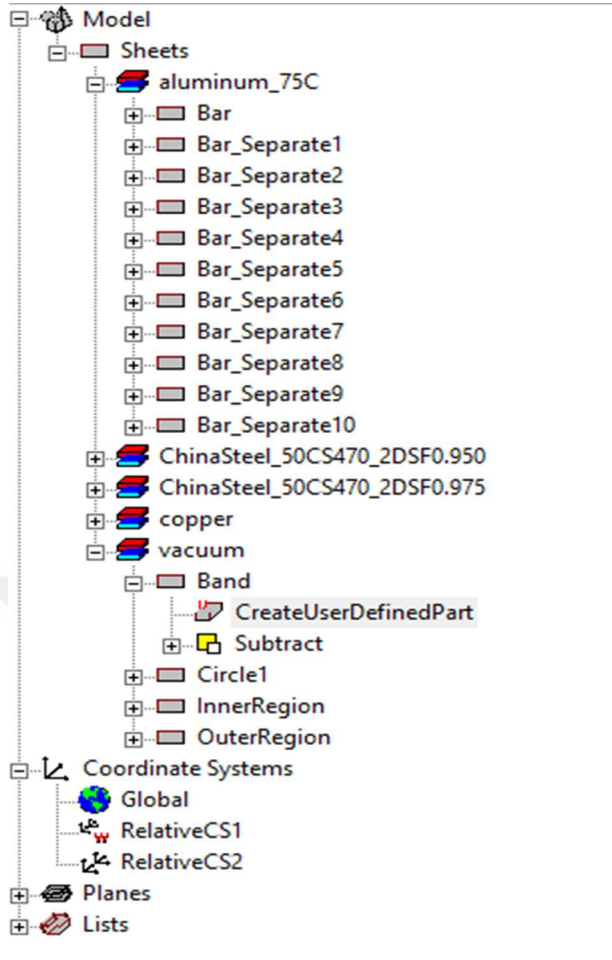
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Type	Relative			
Name	Coordinate system 1			
Reference CS	Global			
Mode	Axis/Position			
Origin	5.5.0	mm	5mm, 5mm, 0mm	
X Axis	5.0.0	mm	5mm, 0mm, 0mm	
Y Point	0.5.0	mm	0mm, 5mm, 0mm	

☐ Show Hidden

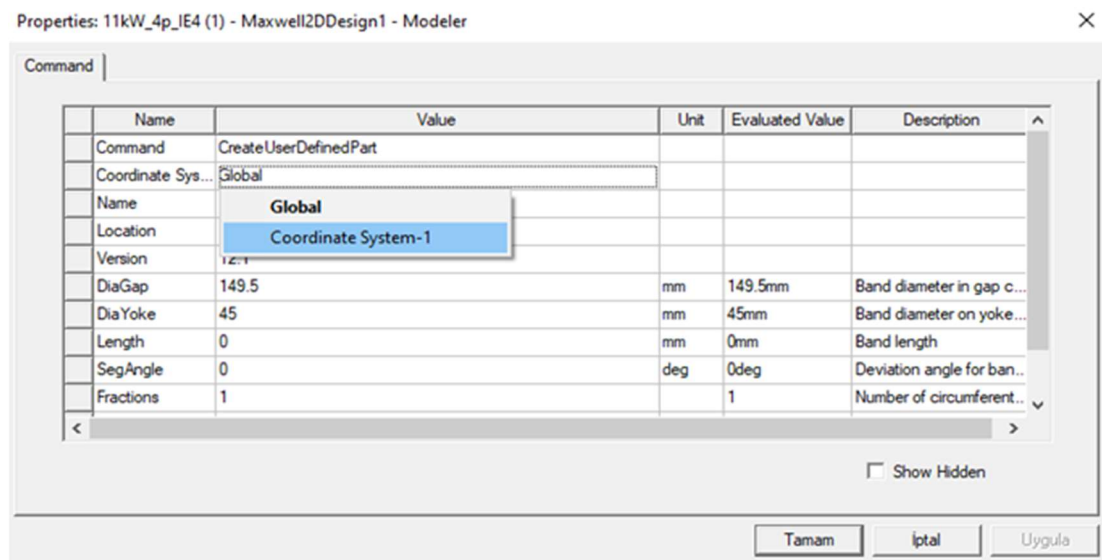
Tamam İptal Uygula

Şekil 3.29. Tanımlanan yeni koordinat sistemine ait eksen değerleri

Eksen tanımlama işlemi ve parametre değerlerinin girilmesinden sonra Şekil 3.30.' de görüldüğü gibi 'vacuum' kısmındaki 'band' bölümüne girilir ve burada koordinat sistemi "Coordinate System-1" olarak değiştirilir. Bu işlem gerçekleştirildikten sonra Şekil 3.31.' de gösterildiği gibi 'Band' bölümünün içerisinde yer alan ilgili alanları her biri sırasıyla "Coordinate System-1" olarak değiştirilmesine dikkat edilmelidir. Aksi durumda bu kısımdaki parametrelerin 'Global' eksen olarak bırakılması durumu eksantrik arızanın oluşturulamaması durumu oluşur.



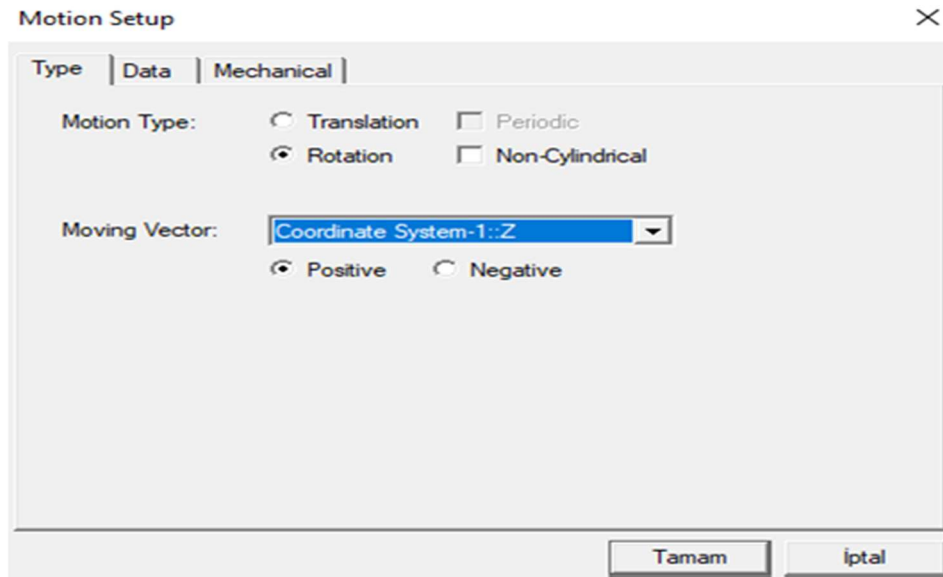
Şekil 3.30. Sheet arayüzü



Şekil 3.31. Koordinat Sistemi değişim arayüzü

Yapılan bu işlemlerden sonra global ekseninde yer alan rotor ve barlar seçilerek sağ tıklanıp sırasıyla Edit-Arrage-Move' a tıklanır böylece yeni bir vektör olan 'Move' vektörü tanımlanmış olur. Tanımlanan 'Move' vektöründe rotor ve barların merkezi istenilen ölçüde değiştirilebilir.

Bu işlemler yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise rotor ve barların içerisinde bulunan her elemanın 'global' koordinat ekseninde bulunması gerekmektedir. Daha sonra 'properties' arayüzünde bulunan sırasıyla Model-Motionsetup1' e tıklanır. 'Motion setup' bölümünde 'Moving' Vektör kısmı Şekil 3.32.' teki gibi Coordinate System-1 olarak değiştirilir.



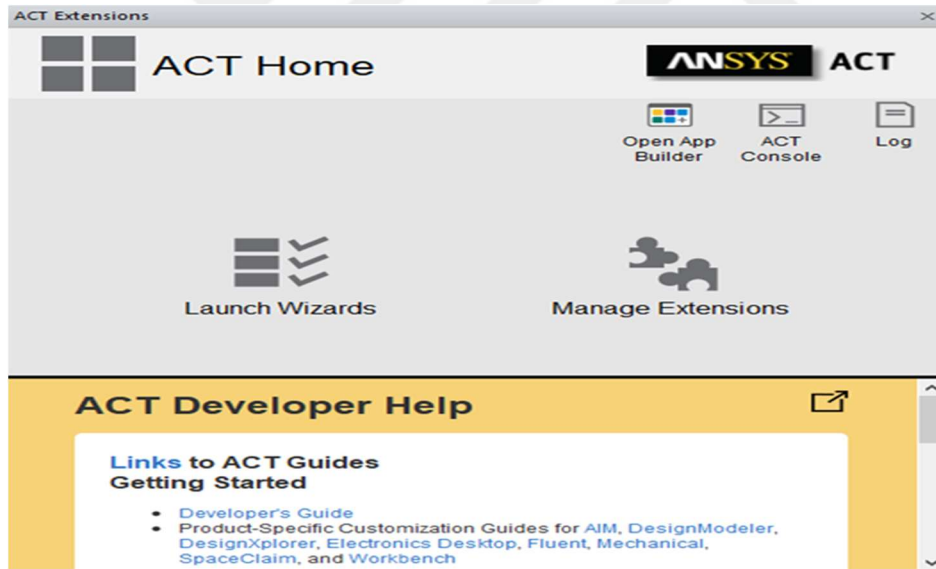
Şekil 3.32. Moving vektör değişimi

Yapılan tüm bu işlemler sonucunda istenilen eksantrik arızası manuel yöntemler ile gerçekleşmiş olur. Ancak kullanılan bu yöntem çok tercih edilmemektedir. Çünkü işlem basamaklarının çokluğu ayrıntılı olması ve hata yapma ihtimalinin yüksek olması tercih edilememeye sebeplerinin başında gelmektedir.

2) Maxwell eccentricity yöntemi ile eksantrik arıza oluşturma yöntemi

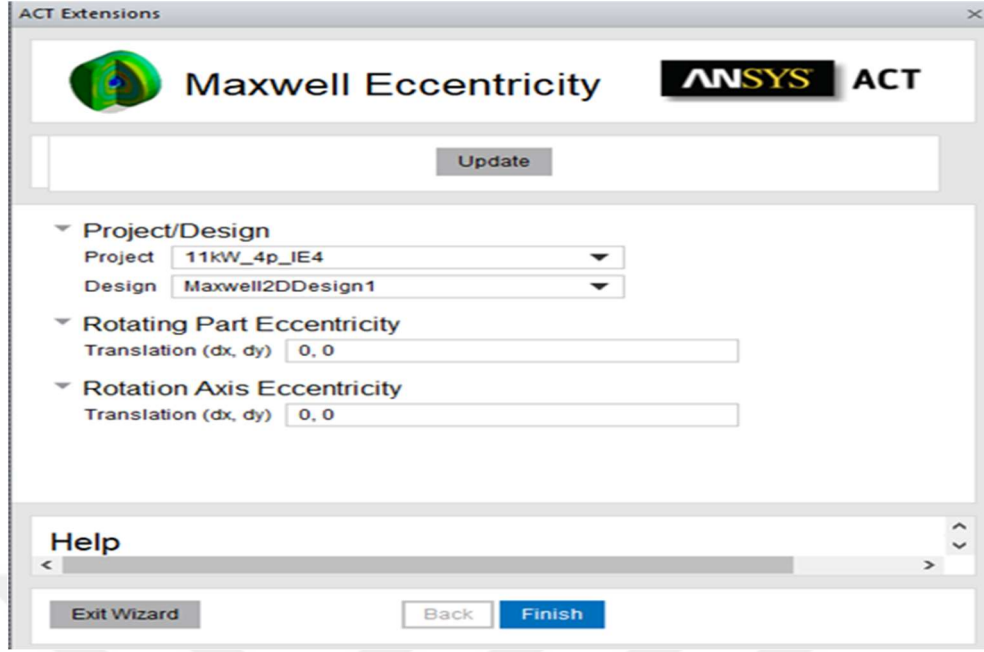
2019 yılında üretilen ‘Ansys electronics desktop (19.2/R2)’ versiyonunun gerçekleştirdiği ‘Maxwell Eccentricity’ bölümü ile istenilen eksantrik arızanın daha sağlıklı bir şekilde oluşturmamıza olanak tanımaktadır. Sağlıklı sincap kafasli asenkron motoru oluşturduktan sonra oluşturulan bu motor üzerinde sırasıyla statik, dinamik ve karışık eksantrik arızasını ‘Maxwell Eccentricity’ yöntemi ile oluşturulur.

View arayüzünden ‘ACT Extensions’ a giriş yapılır. Hemen ardından çıkan ekran üzerinde Şekil 3.33.’ te gösterildiği gibi ‘Launch Wizard’ ile eksantrik arıza oluşturma sihirbazına giriş yapılır.



Şekil 3.33. Maxwell eksantrik seçim paneli

Eksantrik arıza oluşturma sihirbazını başlattıktan sonra çıkan bölümde ‘Maxwell Eccentricity’ yöntemine başlanır.



Şekil 3.34. Maxwell eksantrik oluşturma paneli

Eksantrik arızası, stator ve rotor arasında homojen olmayan hava boşluğu sonucu oluşan bir arıza durumudur. Üretici firmalar tarafından müsaade edilebilir eksenden kaçıklık oranı %5 i geçmemektedir. Bu oran ve altındaki değer ile oluşan bir eksantrik arızası motor ve yükü üzerinde çok fazla etki bırakmamaktadır. Ancak (%10, %20,%30) v.b. oranlarda oluşan herhangi bir eksantrik arızası hem motor üzerinde hem de yükü üzerinde olumsuz ve gözle görülebilir etkiler bırakmaktadır. Yapılan bu çalışmada müsaade edilenin dışında oluşacak olan bir eksantrik arızasının motor üzerinde manyetik alan dağılımı, rotor ve stator sıcaklıklarını, ve gözle görülebilir bir etki oluşturduğu için yük altında olan işlemlerinde olumsuz etkileneceği kanaatine varılır.

Sağlıklı bir elektrik motorunun rotor ekseninin merkezi, stator ekseni merkezi ve dönüş eksen merkezleri aynı nokta üzerindedir. Aksi durumda farklı arıza şiddetlerinde eksantrik arızası oluşur. Statik eksantrik arızasında stator merkezi konumu değişmeksizin rotor dönme merkezi ve dönme merkezinin aynı nokta

üzerinde olup stator merkezine göre konum değiştirmesi sonucudur. Yani bu arızada rotor merkezinin ve dönme merkezinin aynı değerde ordinat veya apsis eksenine göre konum değiştirmesidir.

Dinamik eksantrik arızasında dönme merkezi ve stator merkezinin konumu değişmeksizin yani aynı nokta üzerinde olup, rotor merkezinin bu iki noktaya göre konum değiştirmesi sonucudur. Bu arızada sadece rotor merkezinin ordinat veya apsis eksenine göre konum değiştirmesidir. Karışık eksantrik arızasında ise stator merkezinin ekseninin konumu değişmeksizin, dönme merkezinin ve rotor merkezinin farklı değerlerde ordinat veya apsis eksenlerine göre konum değiştirmesidir. Kısaca dinamik eksantrik arızası, statik ve dinamik eksantrik arızasının birlikte görülmesi demektir. şekil 3.34.' de istenen şiddette eksantrik arızası oluşturulur.

Statik eksantriği modellemek için dönen parça eksantrikliğini (rotating part eccentricity) ve dönüş eksen eksantrikliğini (rotation axis eccentricity) ayarlamamız gerekir. Dönen parça eksantrikliği ve dönüş eksen eksantrikliği değerleri aynı değerlerde olmaları gerekmektedir. Dinamik eksantrikliği modellemek için dönen parça eksantrikliğinin (rotating part eccentricity) istenen değerde ayarlanması gerekmektedir. Karışık (Mix) eksantrikliği modellemek için hem dönen parça eksantrikliğini (rotating part eccentricity), hem de dönüş eksen eksantrikliğinin (rotation axis eccentricity) ayarlanması gerekmektedir. Ancak bu iki değerinde farklı değerlerde olmasına dikkat edilmelidir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. 11Kw_4p_IE4 Asenkron Motorun Benzetim Sonuçları

Ansys_Maxwell programı ile 11kw, 4 kutuplu, premium yüksek verim sınıfına ait motoru modelleyerek sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektriksel ve manyetik alan analizleri yapılmıştır.

Modellenen motorun 5 saniye boyunca 0.01 adım frekansı ile tam yükte çalıştırılmıştır. Ansys_Maxwell programında sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen motorun ilk olarak sağlıklı durum sonuçları referans alınarak farklı arıza şiddetlerinde farklı tip eksantrik arızaları oluşturularak durumlar analizi yapılmıştır.

4.2. 11kw_4p_IE4 Asenkron Motorun Sağlıklı Durum İçin Benzetim Sonuçları

Üç fazlı sincap kafesli asenkron makinenin sağlıklı çalışma durumu için sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modelin etiket değerlerine ait parametreleri Çizelge 4.1.' de verilmiştir

Çizelge 4.1. Sağlıklı durum için benzetim sonuçları

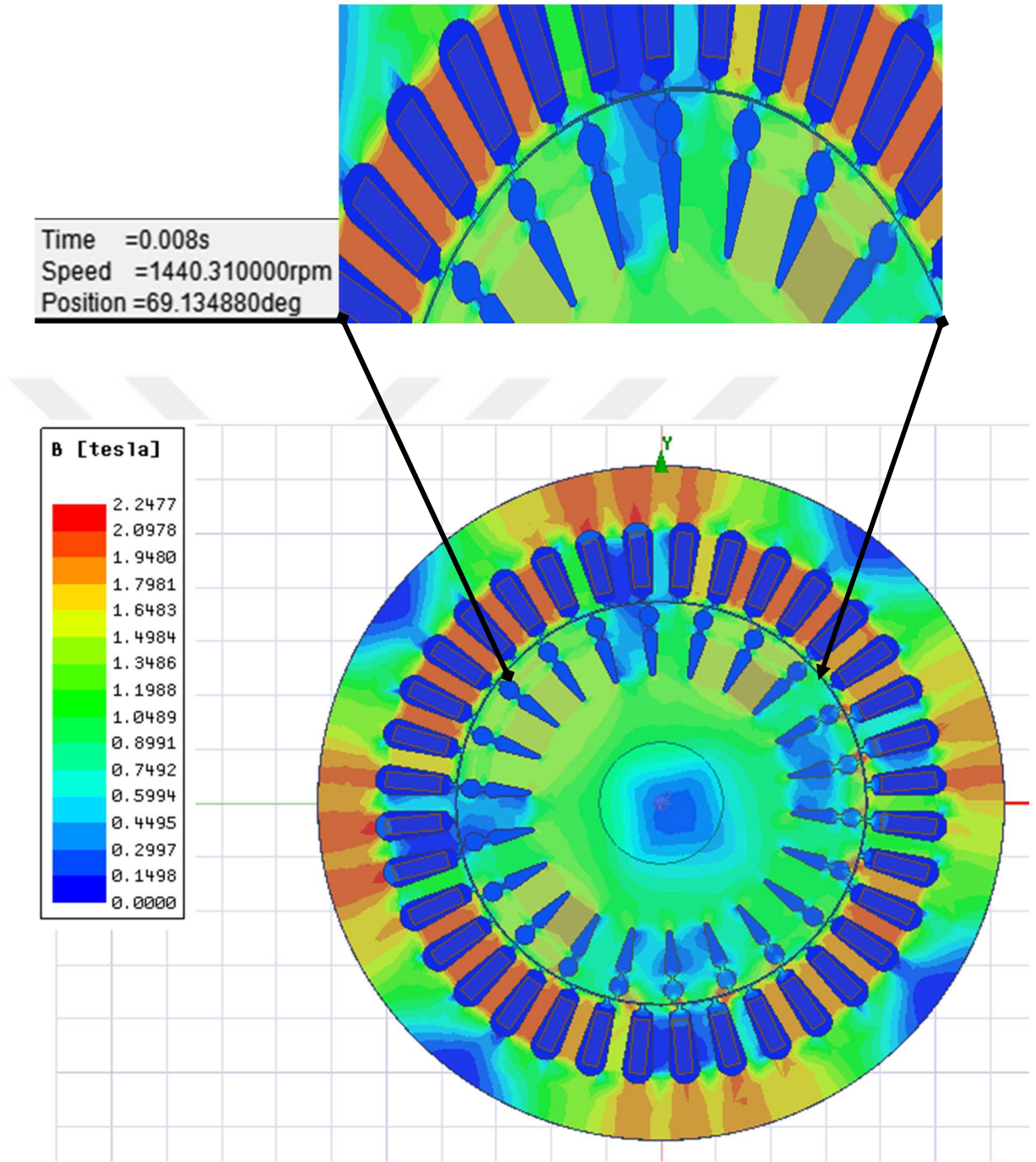
Çıkış Gücü (kW):	11
Anma Gerilimi (V):	400
Kutup Sayısı:	4
Devir Sayısı(rpm):	1458
Frekans (Hz):	50
Başboş Kayıplar (W):	110
Sürtünme Kaybı (W):	34
Rüzgar Kaybı (W):	60
Çalışma Sıcaklığı (C):	75

Elde edilen sonuçlar ile Çizelge 4.2' de gösterildiği gibi rotor faz akımı, stator faz akımı, demir kaybı, arıza faz akımı, stator direnci, rotor direnci, mıknatıslanma akımı, toplam kayıp, güç faktörü, arıza momenti gibi değerler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. Sağlıklı durum benzetim sonucunda hesaplanan motor parametreleri

Rotor Faz Akımı (A):	20.5776
Arıza Faz Akımı (A):	33.0245
Stator Faz Akımı (A):	25.091
Demir Çekirdek Kaybı (A):	1.39922e-05
Stator Direnci R1 (ohm):	0.166945
Rotor DirenciR2 (ohm):	0.361876
Mıknatıslanma Akımı (A):	7.58891
Toplam Kayıp (W):	976.438
Güç Faktörü:	0.682635
Arıza Torku (N.m):	81.4151

Manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 4.1.' de renk tayfı ve istenilen zaman ve pozisyonadaki değer ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.1. Sağlıklı durum manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Renk yoğunluğunun nerelerde daha yoğun nerelerde daha az olduğu Şekil 4.1.' de görülmektedir. Sağlıklı çalışan bir asenkron motorun hava aralığının homojen dağılmasından dolayı renk dağılımı da sağlıklı bir şekilde dağılmaktadır. Örneğin Şekil 4.1.' de işaretlenen bölgenin yoğunluğu sağlıklı çalışan asenkron motorun o andaki pozisyonunun normal yoğunluğudur. Ancak bu durumun daha net bir şekilde incelenmesi anormal durumlarını incelemek için sağlıklı çalışan bir motorun eksantrik arıza ile çalışan bir motor ile karşılaştırılması durumu daha net bir şekilde belirtmektedir. Renk dağılımını arızalı durumda rotor pozisyonuna göre değiştiğini net bir şekilde incelenecektir.

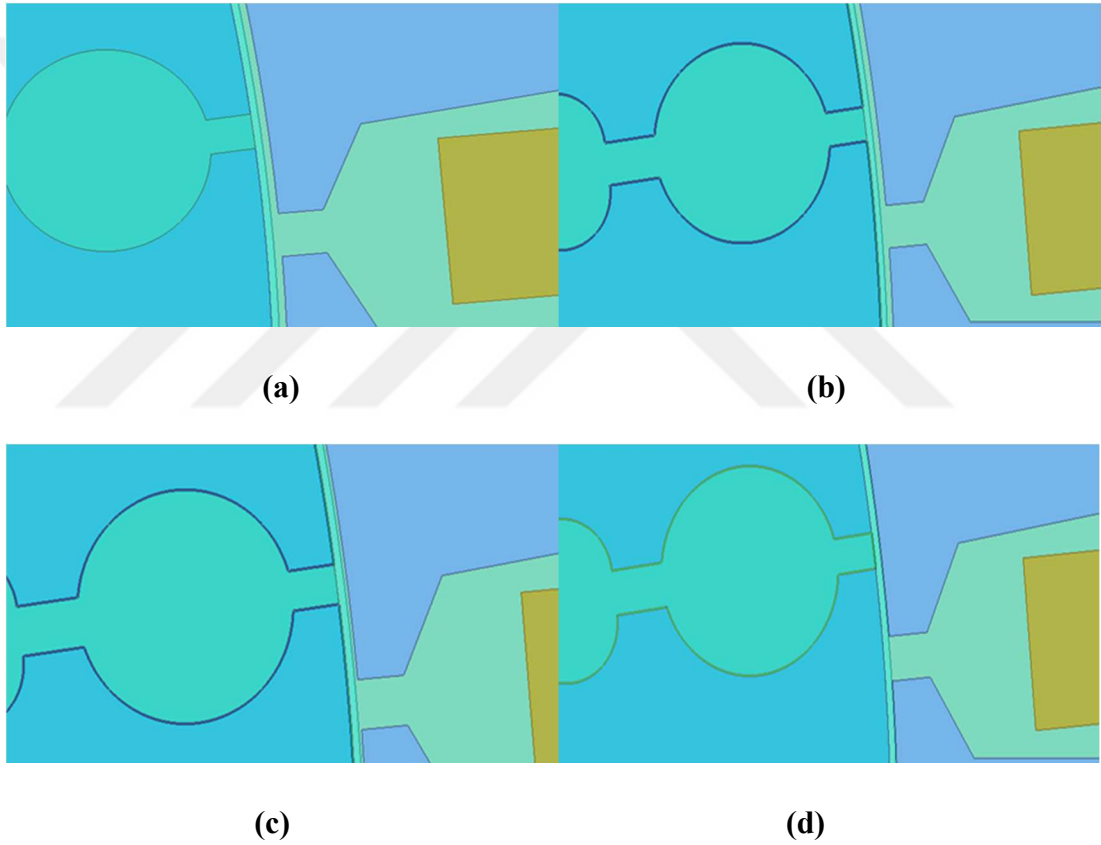
4.3. Eksantrik Arızalı Durumlar İçin Benzetim Sonuçları

Sağlıklı durumda çalışan motor parametreleri elde edildikten sonra, farklı tip eksantrik arıza ile çalışan asenkron motorun arızalı durumdaki parametrelerin farklı durumlara göre ve zamana göre nasıl değiştiğini tespit ve gözlemlemek için sırasıyla statik, dinamik ve karışık eksantrik arızalı durumları göz önüne alarak rotor ve stator arasında kalan hava boşluğunun manyetik akı yoğunluğu, moment v.b. parametreler incelenip analiz ve tespitleri yapılmıştır.

4.3.1. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu açısından benzetim sonuçları

Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu benzetim sonuçlarını incelemekten önce hava aralığının arızanın şiddetine göre nasıl etkilendiğini gözlemleyip daha sonra akı yoğunluğu açısından benzetim sonuçlarına değinilecektir. Bu sebeple karşılaştırma işlemleri daha sağlıklı bir şekilde yapılmış olur. Eksantrik arızanın statik, dinamik ve karışık tipleri ve farklı arıza şiddetleri için oluşturulan arızalı durum motorunda elde edilen sonuçları ile hava aralığı akı yoğunluğunun sağlıklı durum ile karşılıklı analizi yapılacaktır. Buna bağlı olarak hatanın sebep olduğu etkileri görülecektir İlk olarak statik eksantrik arızasının hava aralığı akı yoğunluğu farklı arıza şiddetleri için durum analizi yapılacaktır.

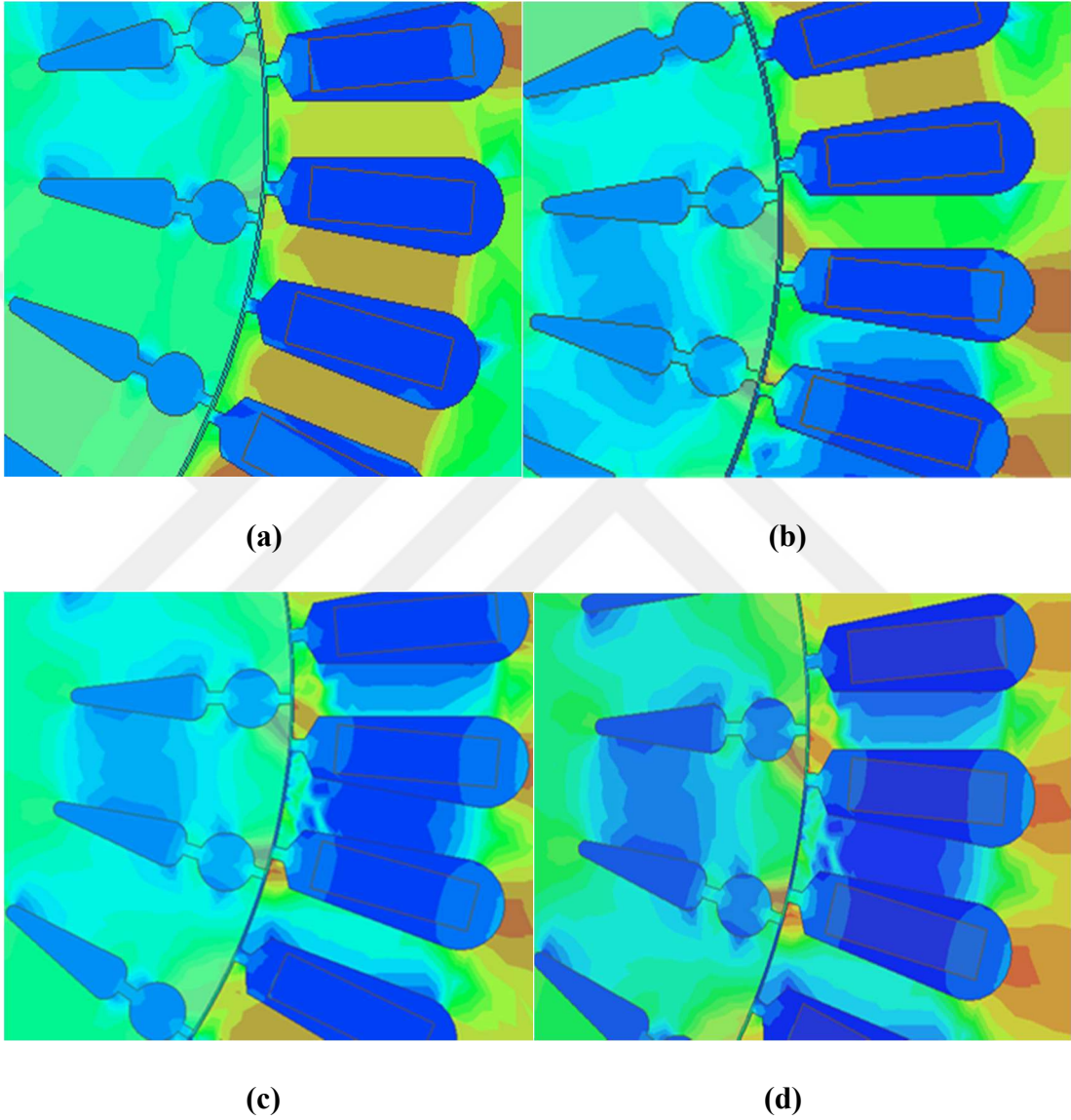
Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, sağlıklı duruma göre homojen yapısını kaybetmiştir. Statik eksantrik arızasında dönme merkezi ile rotor merkezi aynı değerde konum değiştirdiği için zamana bağlı olarak rotorun dönmesi ile hava aralığı mesafesi tüm zamanlarda aynı konumdadır. Ancak ötelenen bölge tarafındaki hava aralığı normale göre dar, diğer tarafta ise normale göre geniştir. Eksantrik arıza ile oluşan bu hava aralığının mesafesi oluşturulan eksantrik arızanın şiddetine göre Şekil 5.9.' te gösterildiği gibi değişiklik göstermektedir. Buna bağlı olarak hava aralığında oluşan hava aralığı manyetik akı yoğunluğu da farklılık göstermektedir.



Şekil 4.2. Hava aralığı mesafesi: (a) sağlıklı durum için hava aralığı mesafesi, (b) %10 statik eksantrik için hava aralığı mesafesi, (c) %30 statik eksantrik için hava aralığı mesafesi, (d) %50 statik eksantrik için hava aralığı mesafesi

Yukarıdaki Şekil 4.2.' de anlaşıldığı gibi sağlıklı durumda rotor, stator ve dönme merkezi aynı nokta üzerinde olduğu için hava aralığı mesafesi her noktada homojen

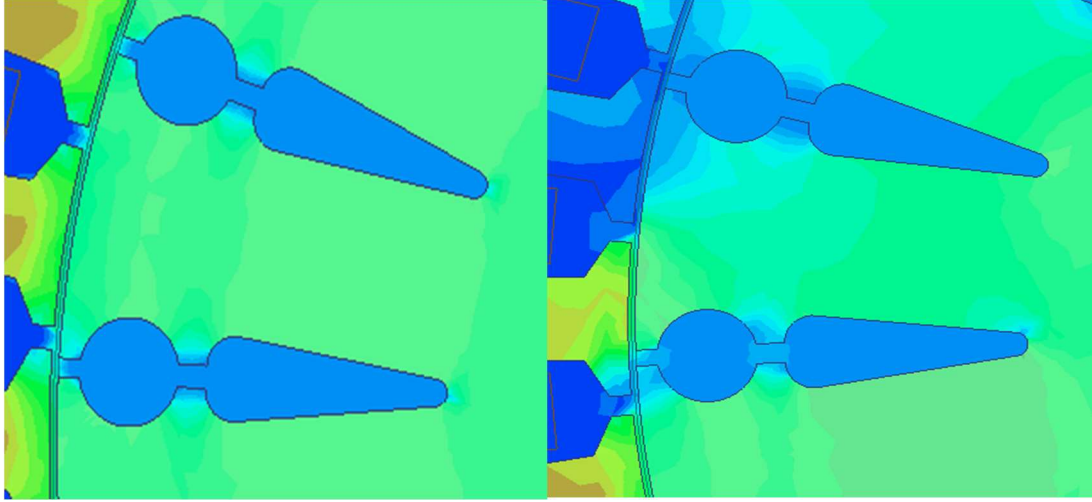
dağılmaktadır. Statik eksantrik arızanın şiddetine göre band' a bağlı olarak rotor ve dönme merkezi istenen dereceye göre ötelenir. Böylece derece arttıkça rotorun statora yaklaşp mesafenin azaldığı tespiti yapılmış olur. Yukarıdaki hava aralığı analiz işlemlerinden sonra ise statik eksantrik arızanın derecelerine göre hava aralığı akı yoğunluğunun değişiminin analizi Şekil 4.3.' te yapılmıştır.



Şekil 4.3. Hava aralığının dar olduğu bölge için manyetik akı yoğunluğu dağılımı: (a) sağlıklı durum için, (b) %10 statik eksantrik arızası için, (c) %30 statik eksantrik arızası için, (d) %50 statik eksantrik arızası için hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dağılımı

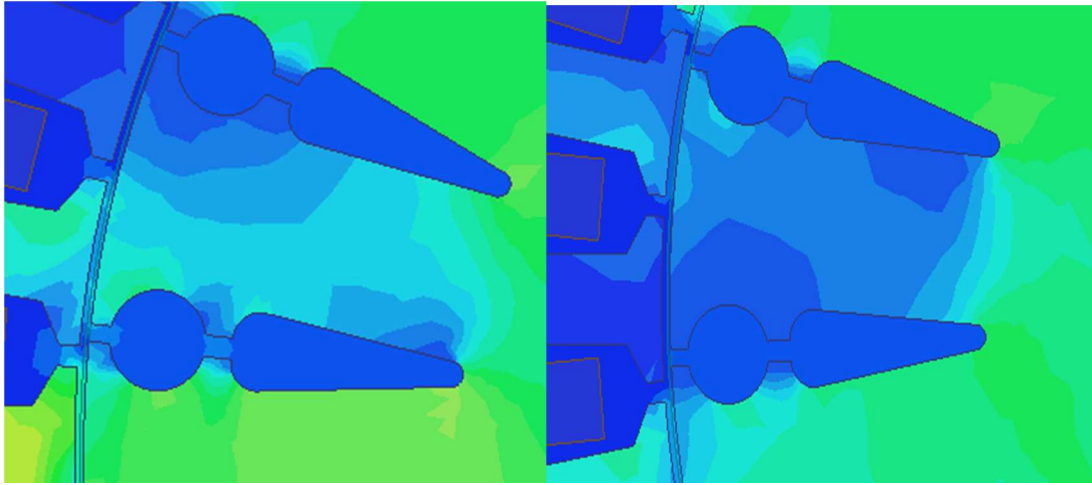
Şekil 4.3.' da gösterildiği gibi sağlıklı durum için ve statik eksantrik arızanın farklı arıza şiddetlerine ait hava aralığı manyetik akı yoğunluğu verilmiştir. Statik eksantrik arızanın arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak hava aralığının dar olduğu yerlerde manyetik akı yoğunluğunun arızanın şiddetine göre arttığı analizi yapılmıştır. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun arızanın şiddetine bağlı olarak artmasıyla birlikte homojen yapının daha çok bozulduğu arızanın şiddetine bağlı olarak saptanmıştır. Buna bağlı olarak motorda sürekli olarak dengesiz çekmeler meydana gelecektir. Böylece arızalı durum çekme kuvvetinin arızanın şiddetine bağlı olarak artış yaşandığı tespiti saptanır. Ayrıca arıza şiddetinin artmasıyla beraber torkun dengesizleşmesi, bunlara bağlı olarak tasarlanan motorda titreşimler ve ısınmalar kaçınılmaz hale gelecektir. Tasarlanan motora ait yükün, arızanın şiddetinin artmasıyla orantılı olarak hasar alması ve yapılan iş ve işlemler için sağlıklı durumun dışına çıkmış olur.

Hava aralığının dar olduğu bölgede arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun artması görülürken aynı zamanda geniş olan bölgenin arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak genişlemesi söz konusu olduğu için hava aralığı manyetik akıyoğunluğu değerinin azaldığı Şekil 4.4.' te gösterilmiştir.



(a)

(b)



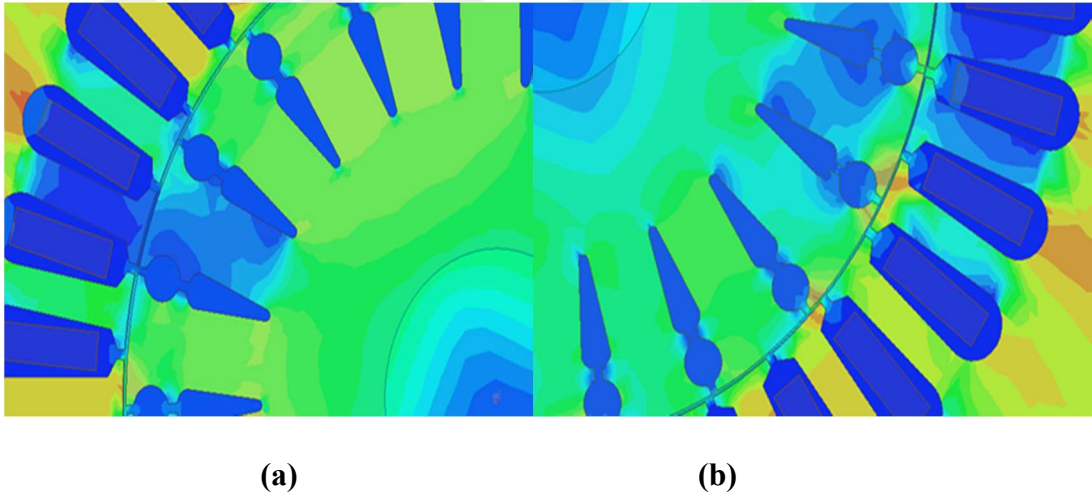
(c)

(d)

Şekil 4.4. Hava aralığının geniş olduğu bölge için: (a) sağlıklı durum için, (b) %10 statik eksantrik arızası için, (c) %30 statik eksantrik arızası için, (d) %50 statik eksantrik arızası için hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı

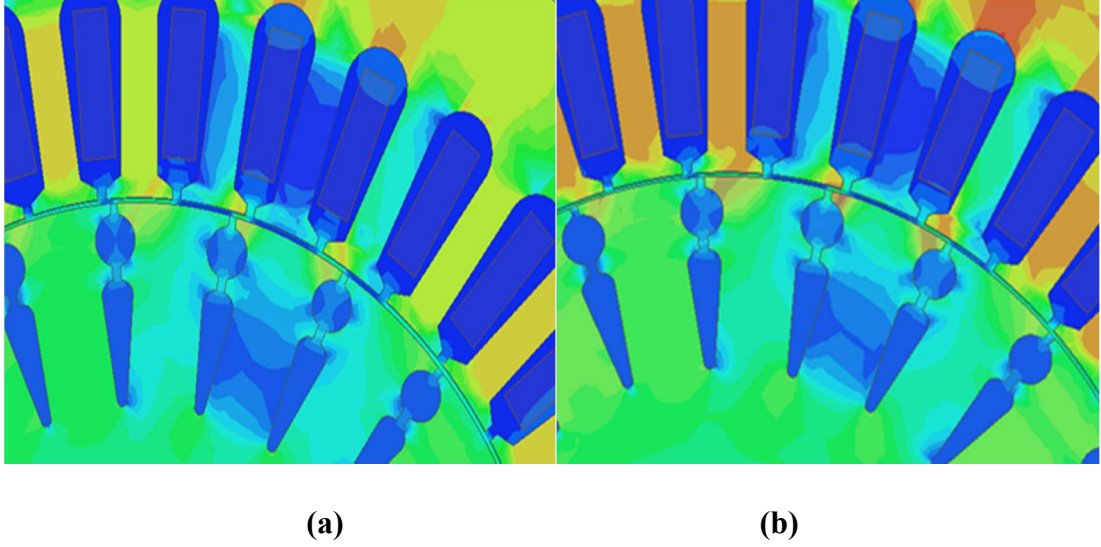
Hava aralığının küçük olduğu bölgede arızanın şiddetinin artmasıyla hava aralığı akı yoğunluğu değerinin artması görülürken, arızanın şiddetine bağlı olarak geniş olan bölgenin hava aralığı akı yoğunluğu değerinde azaldığı analizi ve tespiti yapılmıştır.

Statik eksantrik arızasında rotor ve dönme merkezleri aynı noktada iken stator merkezine göre ötelenirken, dinamik eksantrik arızasında ise stator ve dönme merkezi aynı noktada bulunurken rotor merkezi istenen değerde, apsis veya ordinat eksenlerine göre ötelenir. Motorun çalışma esnasında dönme merkezi stator merkezinde olduğundan dolayı rotor bulunduğu dönme alanının dışına çıkar. Böylece rotor yalpalayarak dönüş sağlamış olacaktır. Buna bağlı olarak moment frekansları statik eksantrik arızasına göre artış gösterecektir. Kısacası statik eksantrik arızasında rotor ötelenir ancak dönme merkezi de rotor merkezinde olduğu için rotor ötelenen bölgede dönüş sağlamış olur ve zamana bağlı olarak hava aralığı değişmemektedir ancak dinamik eksantrik arızasında hava aralığı zamana bağlı olarak değişmektedir, çünkü dönme merkezi ile rotor merkezi aynı nokta üzerinde değildir.



Şekil 4.5. %30 Dinamik eksantrik hava aralığı manyetik akı yoğunluğu: (a) hava aralığının geniş olduğu bölge, (b) hava aralığının dar olduğu bölge

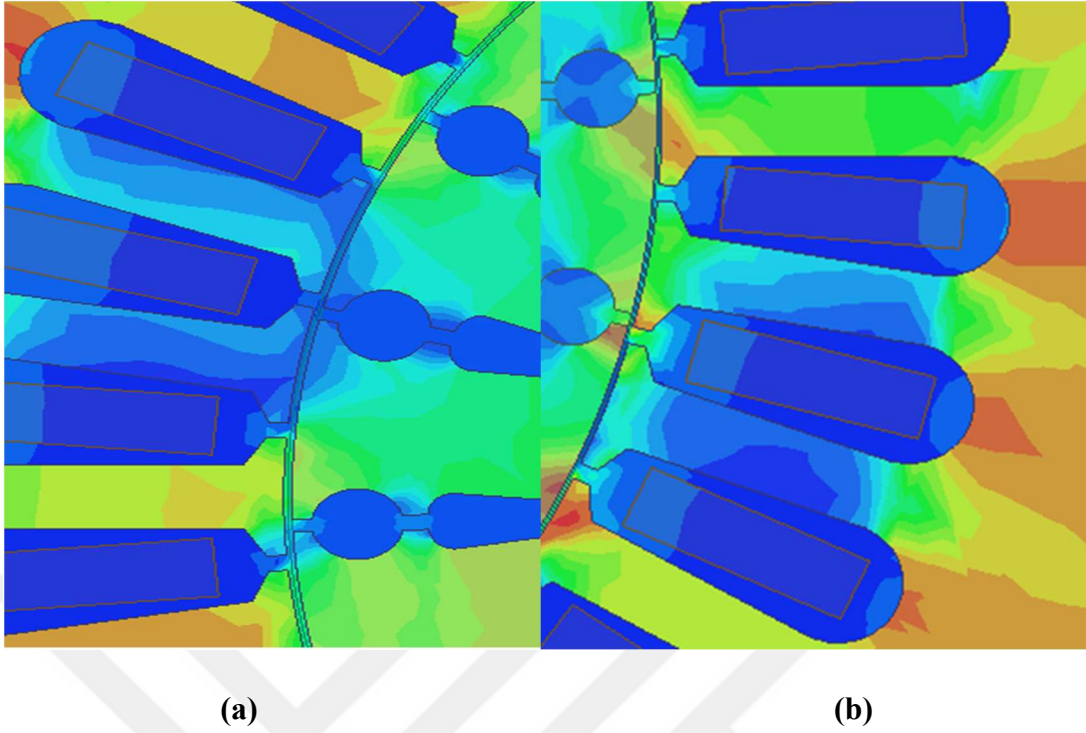
Şekil 4.5.' tede gösterildiği gibi dinamik eksantrik arızasında zamana bağlı olarak hava aralığı değişmektedir. Rotorun statora yakın olduğu bölgede manyetik akı yoğunluğunun daha yoğun, uzak olduğu bölgede ise manyetik akı yoğunluğunun daha az olduğu görülmektedir. Bu değişim zamana bağlı olarak rotorun zamana bağlı hareketine göre değişmektedir.



Şekil 4.6. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu: (a) %30 dinamik eksantrik arızası için, (b) %50 dinamik eksantrik arızası için hava aralığı manyetik akı yoğunluğu

Şekil 4.6.' da gösterildiği gibi dinamik eksantrik arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerinin arttığıda görülmektedir. %30 dinamik eksantrik arızası için yoğunluğun belirlenen zamana göre oluşturmuş olduğu hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değeri %50 dinamik arızası ile oluşan hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerine göre daha azdır.

Ayrıca aşağıdaki Şekil 4.7.' de %10 SE + %50 DE şiddetindeki karışık eksantrik arızalı durumun hava aralığının dar olduğu bölge ve geniş olduğu bölgedeki hava aralığı manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir. Buradan anlaşıldığı gibi rotorun statora yakın olduğu bölgede hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun daha yoğun olduğu, rotorun statora uzak olduğu bölgede ise hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun daha az olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.7. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dağılımı: (a) %10 SE + %50 DE için geniş olan hava aralığı, (b) %10 SE + %50 DE arızası için dar olan hava aralığı

4.3.2. Moment açısından benzetim sonuçları

Eksantrik arıza ile çalışan motora ait arızalı durumlarda moment değerleri, eğim değerleri, belirli zaman aralıklarında ki değerleri ve tepe değerlerinin farklı eksantrik arıza ve farklı arıza şiddetindeki eksantrik arızalı durumlarının değerlendirilmesi, tespiti ve analizi yapılmıştır. Sincap kafesli asenkron motorlarda moment karakteristiğinin kararlı ve doğru bir şekilde çalışması makine için en önemli etkenlerden biridir. Asenkron motorlar yük üzerinde iken bu karakteristiğin bozulmaması için sürekli olarak istemi kontrolü ve analizi anlık olarak yapılmalıdır. Çünkü olası bir kararsızlık durumunda makine üzerindeki yükünde kararsız bir şekilde çalışması kaçınılmaz olur. Buda sistem üzerinde çeşitli aksamalara neden olmaktadır.

Ansys_Maxwell programı hem güçlü bir analiz sistemi olması hemde güçlü bir durum analizi sistemi olması, sistemi anlık olarak takip etmemizi sağlar. Bu da sistemde yaşanan problemleri anında müdahale ederek sistemin kararlılığını bozmamasını

sağlar. Sürekli olarak takip altında olması gereken parametrelerin en önemlilerinden biri de moment parametresidir.

Eksantrik arızanın şiddetinin artması ve eksantrik arızanın çeşidinin değişmesine bağlı olarak moment parametresinde yaşanan eğim değişimleri, tepe değer değişimleri ve seçilen değerler arasındaki değişimler benzetim sonuçları başlığı altında detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Çizelge 1.3. Sağlıklı durum ve statik eksantrik arızası için zamana bağlı olarak değişen moment değerleri

Zaman (ms)	100	200	300	400	500
Sağlıklı Durum (Nm)	58.7297	85.7518	99.0372	73.4585	102.4669
%10 SE (Nm)	58.7518	85.4519	99.1228	73.3511	102.4346
%30 SE (Nm)	59.3006	86.0163	99.0556	72.3510	101.7383
%50 SE (Nm)	59.3006	86.3816	99.1347	72.3659	101.8617

Çizelge 4.4. Sağlıklı durum ve dinamik eksantrik arızası için zamana bağlı olarak değişen moment değerleri

Zaman (ms)	100	200	300	400	500
Sağlıklı durum (Nm)	58.7297	85.7518	99.0372	73.4585	102.4669
%10 DE (Nm)	58.9189	85.5521	99.1086	73.2299	101.5333
%30 DE (Nm)	59.3006	86.8415	98.3448	72.0493	101.3306
%50 DE (Nm)	58.5160	86.5080	96.4825	69.8215	100.7097

Çizelge 4.5. Sağlıklı durum ve karışık eksantrik arızası için zamana bağlı olarak değişen moment değerleri

Zaman (ms)	100	200	300	400	500
Sağlıklı durum (Nm)	58.7297	85.7518	99.0372	73.4585	102.4669
%10 SE + %50 DE (Nm)	58.0618	85.4761	98.3630	72.5312	100.4966
%30 SE + %50 DE (Nm)	57.6854	85.3754	97.5076	72.3774	100.4855

Yukarıdaki Çizelge 4.3., 4.4. ve 4.5.' te gösterildiği gibi çeşitli eksantrik arızalı durumda momentin sağlıklı duruma göre değiştiği gözlemlenir. Bu değişim arızanın şiddetine ve tipine göre değişiklik göstermektedir. Bu değişimin bazı noktalar arasında artış bazı noktalar arasında azalış göstermektedir. Bunun en temel sebebi ise arızanın çeşidi ve arızanın şiddetidir.

Çizelge 4.6. Sağlıklı durum ve statik eksantrik arızalı durum için moment eğimi

Zaman Aralığı (ms)	100-200	200-300	300-400	400-500
Sağlıklı durum (m)	0.2626	0.1364	-0.2558	0.2901
%10 SE (m)	0.2670	0.1367	-0.2577	0.2908
%30 SE (m)	0.2672	0.1304	-0.2670	0.2939
%50 SE (m)	0.2708	0.1275	-0.2677	0.2950

Çizelge 4.7. Sağlıklı durum ve dinamik eksantrik arızalı durum için moment eğimi

Zaman Aralığı (ms)	100-200	200-300	300-400	400-500
Sağlıklı durum (m)	0.2626	0.1364	-0.2558	0.2901
%10 DE (m)	0.2663	0.1356	-0.2588	0.2830
%30 DE (m)	0.2883	0.1150	-0.2630	0.2928
%50 DE (m)	0.2799	0.0997	-0.2666	0.3089

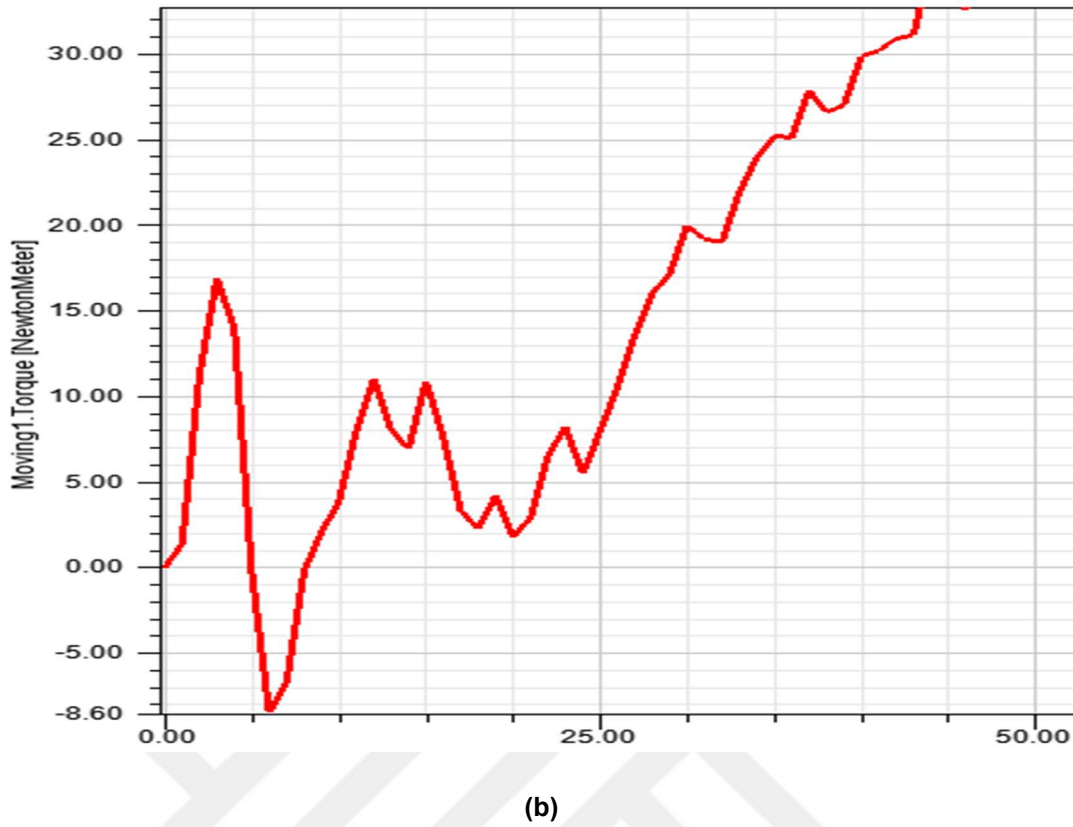
Çizelge 4.8. Sağlıklı durum ve karışık eksantrik arızalı durum için moment eğimi

Zaman aralığı (ms)	100-200	200-300	300-400	400-500
Sağlıklı durum (m)	0.2626	0.1364	-0.2558	0.2901
%10 SE + %50 DE (m)	0.2741	0.1289	-0.2583	0.2797
%30 SE + %50 DE (m)	0.2819	0.1163	-0.2513	0.2721

Çizelge 4.6., 4.7. ve 4.8.' de gösterildiği gibi Sağlıklı duruma göre ve statik, dinamik ve karışık eksantrik arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak eğim değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir. Moment eğrileri tepe değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi ve moment dalgalılığının eksantrik arıza şiddetinin artışına bağlı olarak değişiklik gösterdiğini aşağıdaki Şekil 4.7.' de detaylı olarak incelenebilir.

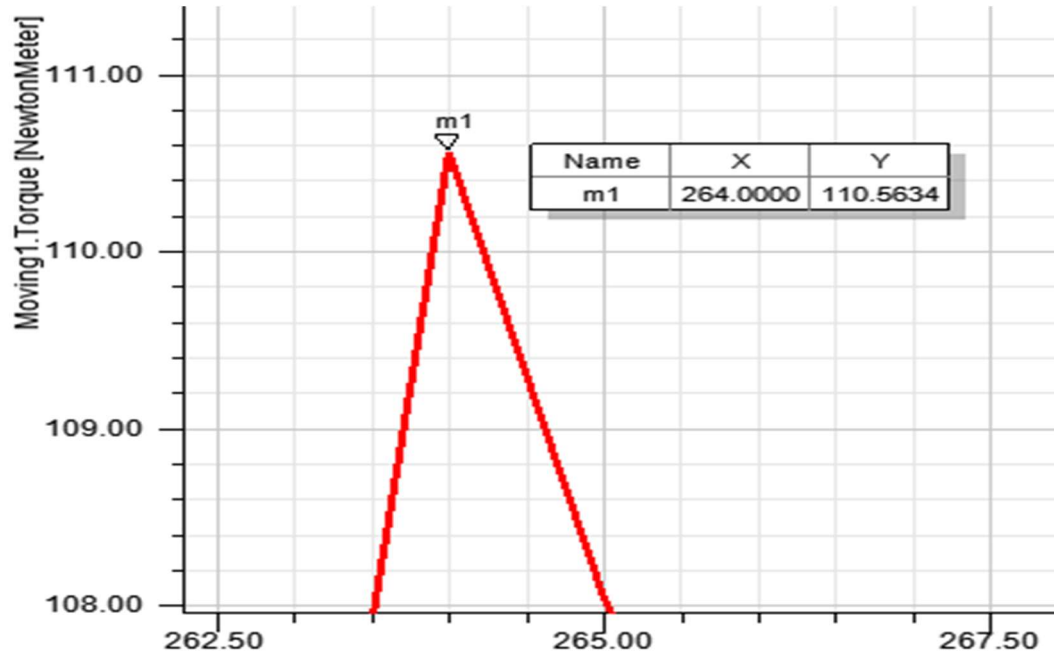


(a)

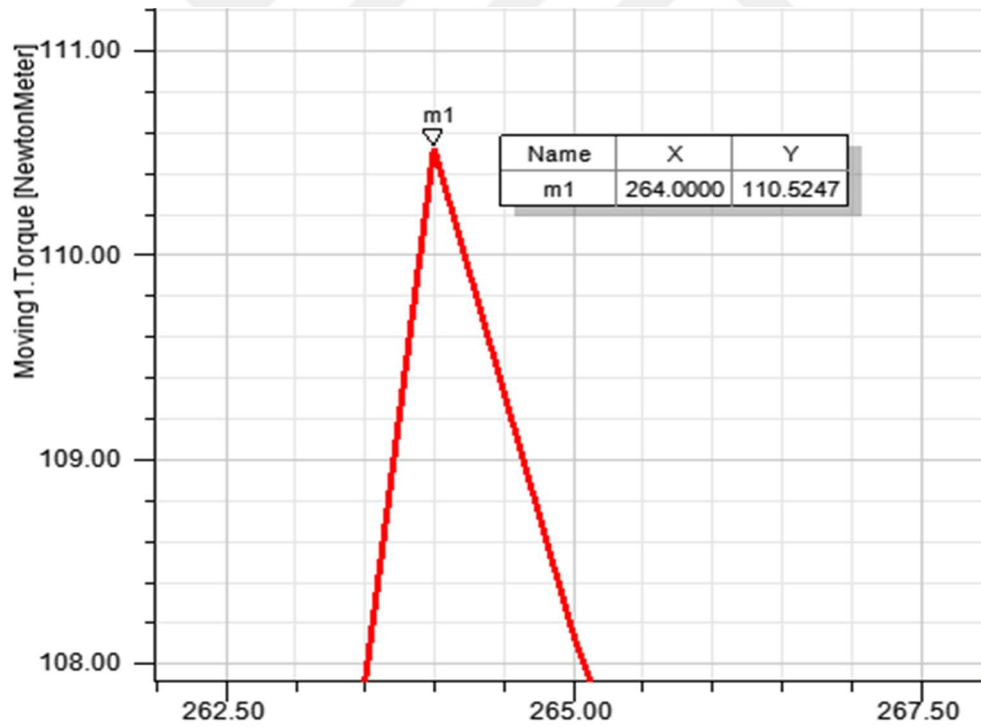


Şekil 4.8. Hava Aralığı Momentri: (a) 0-50 ms Arası İçin Sağlıklı Durum Momenti, (b) 0-50 ms Arası İçin %50 Dinamik Eksantrik Arızası Momenti

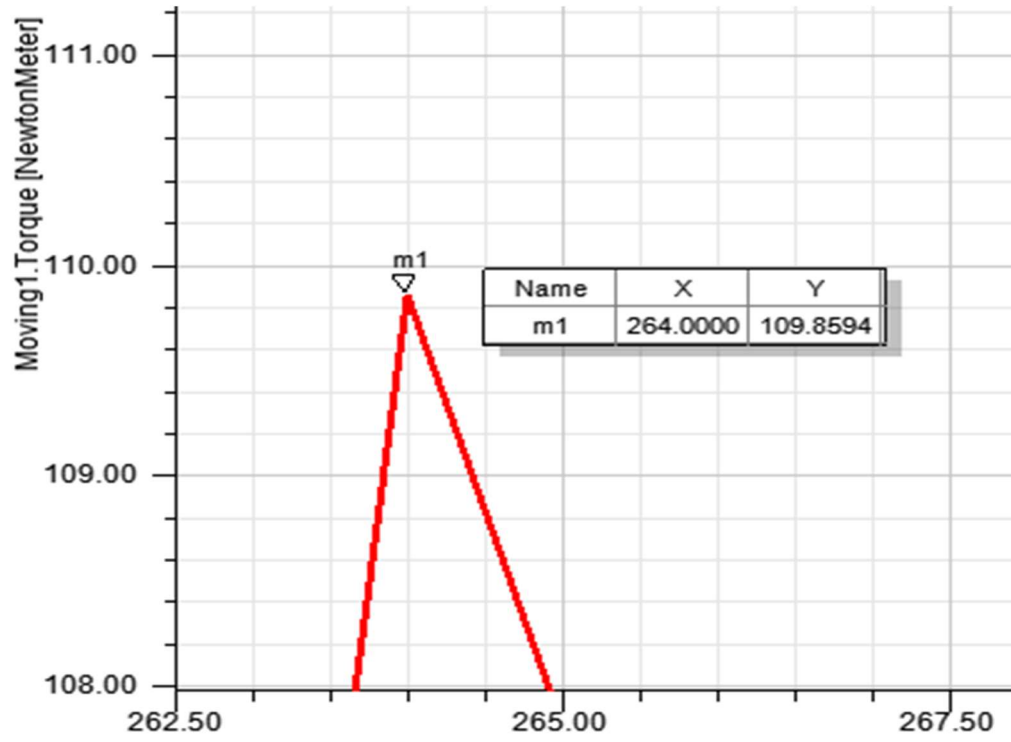
Şekil 4.8' de gösterildiği gibi belirlenen aralık arasında moment eğrileri verilmiştir. Arızalı durumun sağlıklı duruma göre karşılaştırması yapılmıştır. Moment karakteristiğinin sağlıklı durumun dışına çıktığı net bir şekilde gözlemlenmiştir. Özellikle, 20-25 ms arasındaki eğrilere değinilecek olunursa, dinamik eksantrik arızalı durumda rotorun hava boşluğunu zamana bağlı olarak değiştirdiği kanaatine dayanarak dönme kuvvetinin çok az miktarda azaldığı görülmektedir. Yani asenkron motor üzerindeki yükün sağlıklı çalışmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumlara göre eksantrik arızanın şiddetinin artmasına bağlı olarak asenkron motor üzerindeki yükün sağlıklı çalışmasının düzensizleştiğinde arttığı anlaşılmaktadır.



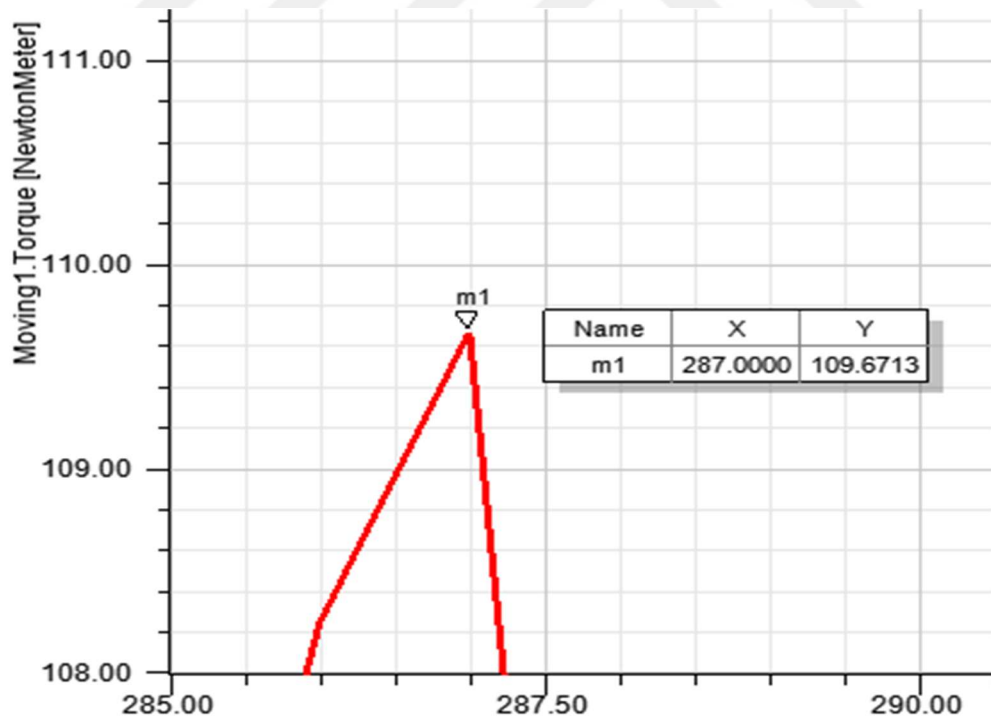
(a)



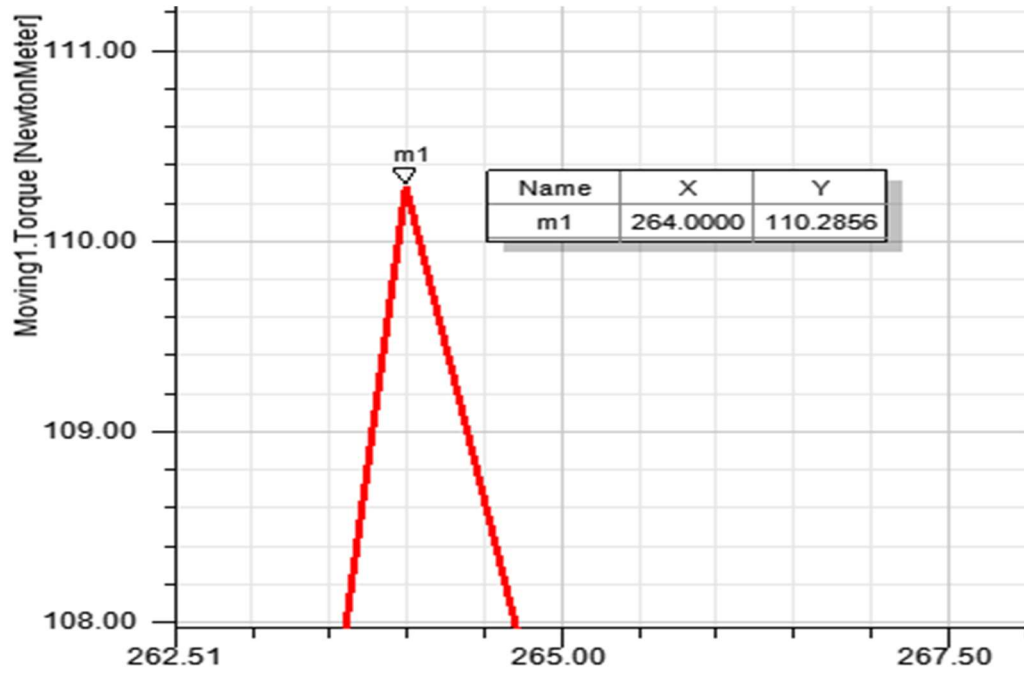
(b)



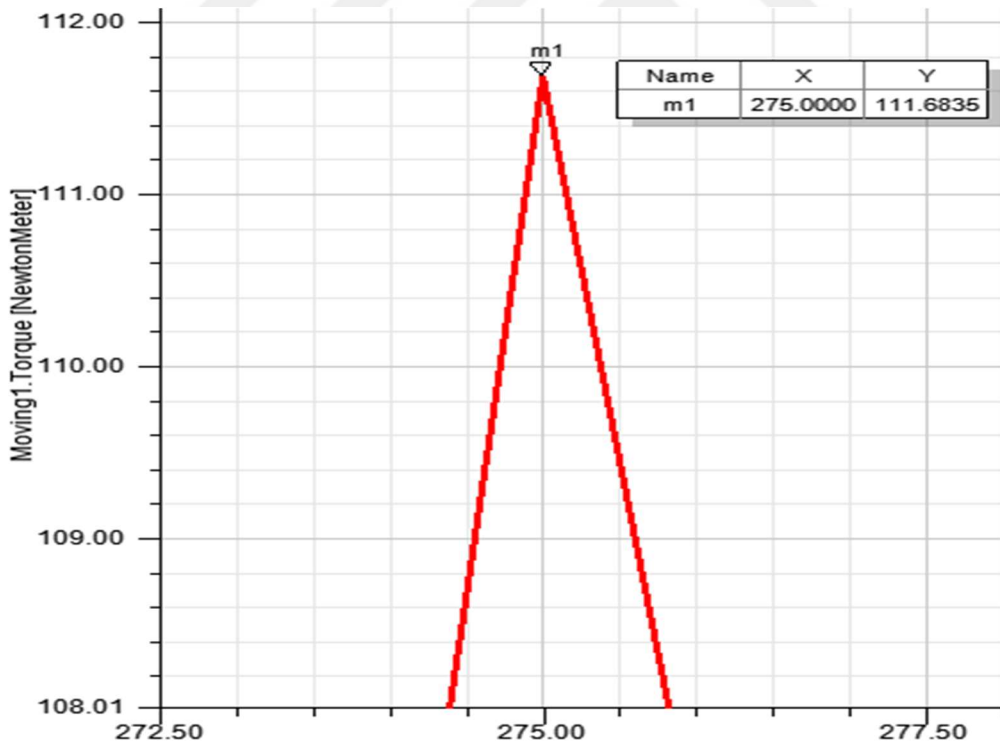
(c)



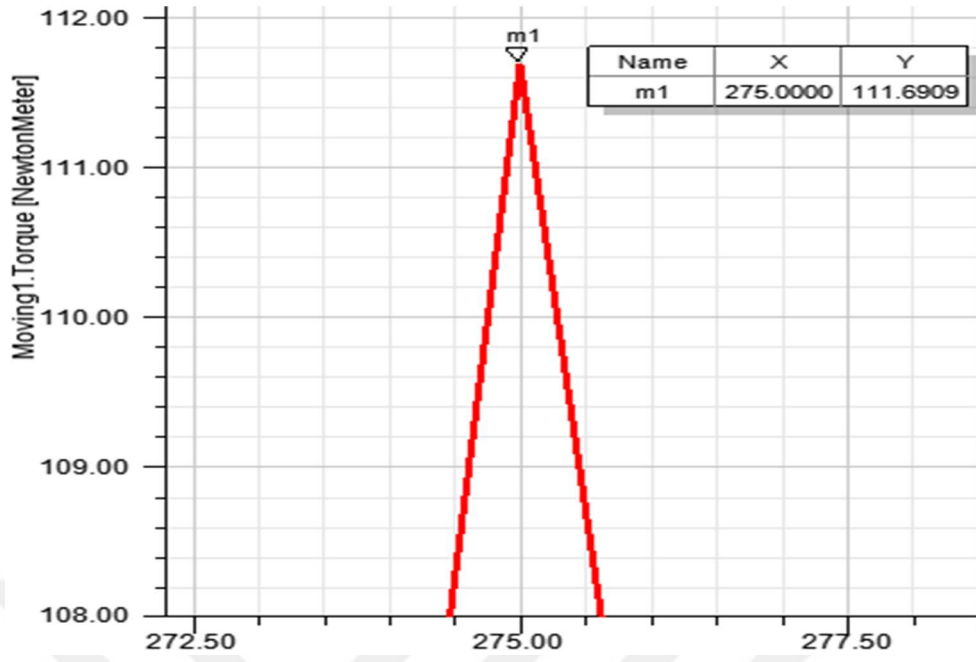
(d)



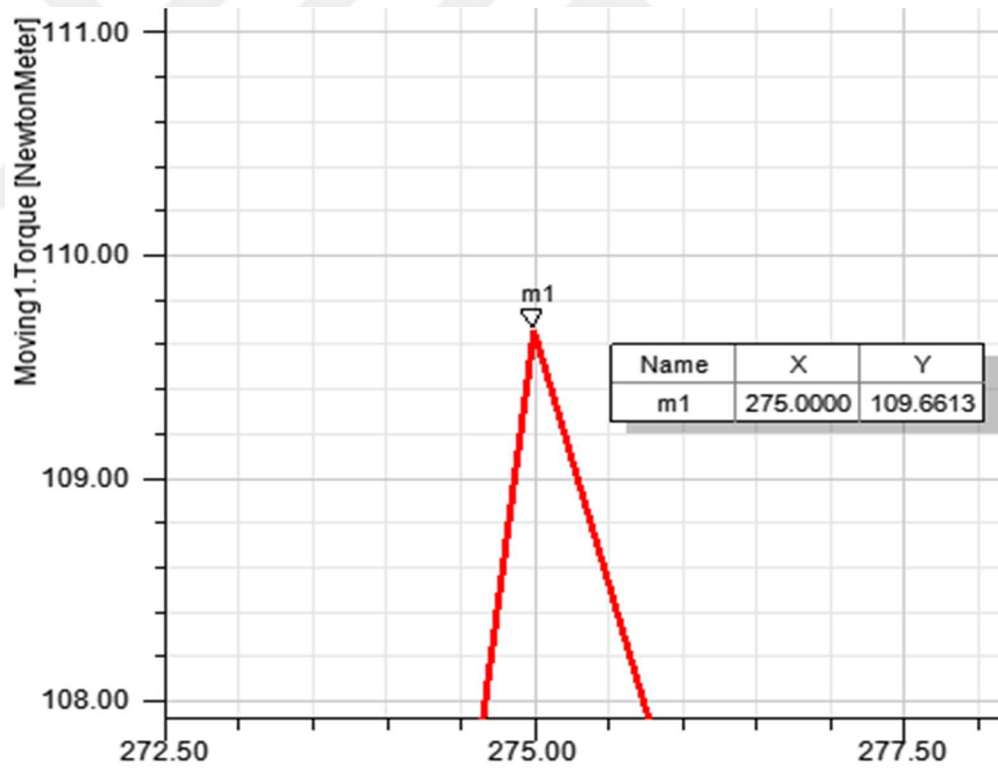
(e)



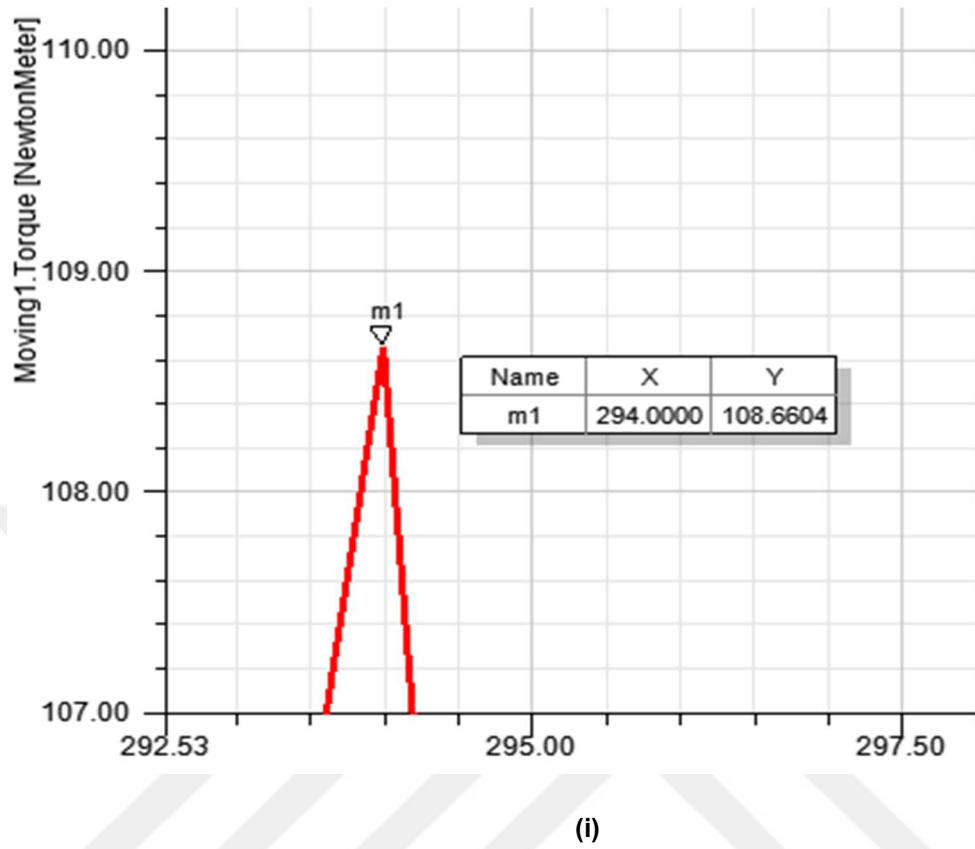
(f)



(g)



(h)



Şekil 4.9. Moment eğrilerinin tepe değerleri: (a) sağlıklı durum için, (b) %10 SE için, (c) %30 SE için, (d) %50 SE için, (e) %10 DE için, (f) %30 DE için, (g) %50 DE için, (h) %10 SE + %50 DE için, (i) %30 SE + %50 DE için tepe moment değerleri

Şekil 4.9.' da gösterildiği gibi sağlık durum ile statik eksantrik arızanın şiddetinin artmasına bağlı olarak moment tepe değerinde azalma görülmektedir. Burada arızanın şiddetinin artması ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun zamana bağlı olarak değişmemesi en temel sebeptir. Ayrıca dinamik eksantrik arızasında ise arızanın şiddetini artmasına bağlı olarak, moment tepe değerinde artma görülmektedir. Bunun en temel sebebi ise arızanın şiddetinin artması ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun zamana bağlı olarak değişmesidir. Karışık eksantrik arızasında ise, arızanın şiddetinin artmasına bağlı olarak moment tepe değerinde azalma görülmektedir. Burada ki değişimin en temel sebebi ise rotorun zamana bağlı olarak yalpalayarak dönmesidir. Zamana bağlı olarak rotor sürekli konum değiştirmektedir.

Çizelge 4.9. Tepe Değerleri Verilen Moment Değerleri

Şekil	Zaman (ms)	Moment Tepe Değeri (Nm)
5.16.a.	264.0000	110.5634
5.16.b.	264.0000	110.5247
5.16.c.	264.0000	109.8594
5.16.d.	287.0000	109.6713
5.16.e.	264.0000	110.2856
5.16.f.	275.0000	111.6835
5.16.g.	275.0000	111.6909
5.16.h.	275.0000	109.6613
5.16.j.	294.0000	108.6604

Çizelge 4.9.' de arıza tipi ve arıza şiddetine göre moment tepe değerleri verilmiştir. Moment değerinin minimum derecede değişmesine rağmen moment dalga değerinin görünür bir şekilde değişimi analizi yapılmıştır. Dinamik ve karışık eksantrik arızasındaki değişim statik eksantrik arızasına göre daha belirgindir. Bunun temel sebebi ise dinamik ve karışık eksantrik arızasında rotorun hem yalpalayarak dönmesi hemde hava boşluğunun zamana bağlı olarak değişmesi temel sebeplerden biridir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan bu tez çalışmasında sağlıklı olarak çalışan ve eksantrik arızası bulunan bir asenkron motor tasarımı yapılmıştır. Yapılan bu motorlar tüm özellikleriyle ve benzetim sonuçlarıyla beraber incelenmiştir. Eksantrik arızanın farklı tipleri olan statik eksantrik, dinamik eksantrik ve bu iki arızanın aynı anda görülmesiyle oluşan karışık eksantrik arızası modelleri ayrı ayrı oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan bu üç arıza tipinde farklı arıza şiddetlerinde deneyler yapılmıştır. Sağlıklı durum, statik eksantrik, dinamik eksantrik ve karışık eksantrik arızası durumları karşılaştırılıp ve farklı arıza şiddetlerine göre karşılaştırılıp arızanın farklı boyutlarında makine parametrelerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçlarıyla elde edilen değerler, manyetik ve elektriksel parametrelerin dışında deney sonuçlarıyla manyetik akı yoğunluğu ve moment parametreleri elde edilmiştir. Böylece eksantrik arızanın etkileri manyetik ve elektriksel yönlerden incelenmiştir.

Sağlıklı olarak çalışan model elde edildikten sonra, eksantrik arızası oluşturmak için rotor merkezi stator merkezine göre farklı arıza şiddetlerine göre kaydırılarak modeller oluşturulmuştur. Hava aralığı genişliğinin arıza ile birlikte değişmesinden dolayı, manyetik alan dağılımı ve moment parametrelerindeki değişimlerde benzetim sonuçlarıyla birlikte verilmiştir. Arıza şiddetinin artmasına bağlı olarak hava aralığının dar olduğu bölgede hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun arttığı ve hava aralığının geniş olduğu bölgede ise manyetik alan dağılım yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı zaman dilimlerinde çalıştırılan modeller incelendiğinde moment karakteristiklerinin arıza tipine ve şiddetine göre değişimleri benzetim sonuçlarıyla beraber verilmiştir. Bu durumda titreşim seviyesinde artışa ve ortalama tork değerlerinde değişimlere sebep olduğu görülmüştür.

5.2. Öneriler

Elektriksel ve mekaniksel arızaların, tespit ve analizinin yapılabileceği çok daha büyük boyutlarda arızalar oluşmadan önce programda müdahale imkanı' nın geliştirilmesi öngörülmüştür.

Yaşanan bu olumsuzlukları en aza indirmek için durum izleme metotlarının çeşitlendirilmesi önerilmiştir. Çünkü farklı durum izleme metotları kullanılarak arıza karşılaştırılması yapıp daha verimli tespit ve analiz yapılmış olur.

Yapılan bu tez çalışmasında sincap kafesli asenkron motor tam yükte test edilmiştir. Farklı yüklerde arıza tespitlerinin yapılması çalışmada daha çok verim alınacağı kanaatine varılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi barındıran paket programların statik, dinamik ve karışık eksantrik arızaları oluşturduktan sonra, bu üç farklı arıza çeşidini aynı anda analiz eden programların geliştirilmesi tespit ve analizi daha kolay hale getirmektedir.

KAYNAKLAR

- AYAZ, E., OZTURK, A., and SEKER, S., 2006. Continuous Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors. Electrotechnical Conference, Electrotechnical Conference, 10-11 Haziran, Malaga, s. 33-1130.
- AYAZ, E., OZTURK, A., SEKER, S., and UPADHYAYA, B.R., 2009. Fault Detection Based on Continuous Wavelet Transform and Sensor Fusion in Electric Motors. COMPEL The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 28(2): 454-470.
- BEERTEN, J., VERVECKKEN, J., DRIESEN, J., 2010. Predictive Direct Torque Control for Flux and Torque Ripple Reduction . IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(1): 404-412.
- BIANCHI, N., 2005. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements. Taylor & Francis Group, USA, 304s.
- BRADFORD, M., and GREENSLADE, J.A., 1971. Greenslade, Discussion on Effects of Rotor Eccentricity on Acoustic Noise from Induction Machines and Natural Frequencies of Stators of Small Electric Machines. Proc. IEEE, 118(7): 899-900.
- CAMERON, J.R., THOMSON, W.T., and DOW, A.B., 1986. Vibration and Current 64 Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors. IEE Proceedings, 133(3): 155-163.
- ÇIRA, F., 2017. Sürekli mıknatıslı senkron motorun stator kısa devre arızasının tespiti ve arıza şiddetinin otomatik olarak belirlenmesi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Malatya, 135s.
- ÇORAMIK, M., 2018. Örnek Bir Analiz Üzerinden ANSYS MAXWELL Kullanımında Karşılaşılan Güçlüklere Detaylı Çözüm Önerileri. International Necatibey Educational and Social Sciences Research Congress, 10 October, Balıkesir, s.78-91.
- DÖNMEZER, Y., 2010. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment Titreşimlerinin Azaltılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 97s.
- EKER, M., ve AKAR, M., 2016. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Titreşim Sinyaline Dayalı Eksenden Kaçıklık Arızasının Tespiti. EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 14 November, Tokat, s. 270-279.
- ELLISON, A.J., and YANG, S., 1971. Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines. The Institution of Electrical Engineers, 118(1): 174-184.
- ERROUSSI, R., OUHROUCHE, M., CHEN, W.H., and TRZYNADLOWSKI, A.M., 2012. Robust Cascaded Nonlinear Predictive Control of a PMSM with an Anti-windup Compensator. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(8): 3078-3088.

- GUR, M., GOKTAS, T., and ARKAN, M., 2018. Detection of eccentricity fault in Permanent magnet synchronous motors through torque and speed spectrums. International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, 22-23 November, Ankara, s.2517-2522.
- GUR, M., GOKTAS, T., and ARKAN, M., 2019. Continuous in Case of Eccentricity Failure Monitoring Stator Current and Leakage Flux in Magnet Synchronous Motors, 6. International Multidisciplinary Studies Congress (Multicongress Gaziantep), 26-27 April, Gaziantep, s.193-188.
- İNGENÇ, E., HATIK, G., and AKAR, M., 2014. Asenkron Motorda Statik Eksenden Kaçıklık Arızasının İncelenmesi. Mühendislik ve Doğa bilimleri Fakültesi Dergisi, 24(3): 1390-1395.
- KARAKAYA, O., 2011. Asenkron Motorlarda Rotor Arıza Analizi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, 90s.
- NANDI, S., TOLİYAT, H.A., and Lİ, X., 2000. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors -A Review. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(2): 719-729.
- NANDI, S., TOLİYAT, H.A., and Lİ, X., 2005. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(4): 719-729.
- ORTEGA, C., ARIAS, A., CARUANA, C., BALCELL. J., and ASHER, G.M., 2010. Improved Waveform Quality in the Direct Torque Control of Matrix- Converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(6): 2101-2110.
- ÖZELGİN, İ., 2008. Analysis of Magnetic Flux Density for Airgap Eccentricity and Bearing Faults, International Journal of Systems Applications, 4(2): 162-169.
- ROSENBERG, E., 1918. Magnetic Pull in Electric Machines, in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 20 July, cilt. XXXVII, Amerika, s.1425-1469.
- SEKER, S., 2000. Determination of Air-Gap Eccentricity in Electric Motors Using Coherence Analysis. IEEE Power Engineering Review, 20(7): 45-50.
- SEKER, S., 2010. A Reliability Model for Induction Motor Ball Bearing Degradation. Electric Power Components and Systems, 31(7): 639-652.
- SEKER, S., and AYAZ, E., 2003. Feature Extraction Related to Bearing Damage in Electric Motors by Wavelet Analysis. Journal of the Franklin Institute, 340(2): 125-134.
- SHAOFENG, J., RONGHAI, Q., JIAN, L., ZANSONG, F., HONG, C., and LEILEI, W., 2014. Analysis of FSCW SPM Servo Motor with Static, Dynamic and Mixed Eccentricity in Aspects of Radial Force and Vibration. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 14-18 September, Pittsburgh, s.1745-1753.

- SPROOTEN, J., 2007. Finite Element and Electrical Circuit Modeling of Faulty Induction Machines. University of Bruxelles, Institute of Science, doctoral thesis, Belgium, 104s.
- SUMMERS, E.W., 1955. Vibration in 2-pole induction motors. in Electrical Engineering, 74(5): 424-424.
- SUN, D., ve ÇİRA, F., 2022. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Asenkron Motorun PWM Arızasının Analizi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 7(3): 217-228.
- TANVER, P.J., and PENMAN, J., 1987. Implementation of Wavelet Packet Transform for Detection and Analysis of Stator Faults in Induction Machine. Circuits and Systems, 7(10): 3253-3259.
- TOLİYAT, H.A., AREFEEN, M.S., and PARLOS, A.G., 1996. A Method for Dynamic Simulation of Airgap Eccentricity in Induction Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 32(4): 910-918.
- TURAN, M., 2009. Asenkron Makinaların yapısı. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 77s.
- VERMA, S.P., and NATARAJAN, R., 1982. Effects of Eccentricity in Induction Motors. Proceedings of International Conference on Electrical Machines, 14-16 November, Viyana, Cilt 3, s.930-933.
- VON KAEHNE, P., 1963. Unbalanced Magnetic Pull in Rotating Electric Machines. British Electrical and Allied Industries Research Association, Germany, 30s.
- WERNER, U., and BİNDER, A., 2005. 2005 5. IEEE Uluslararası Elektrik Makineleri, Güç Elektroniği ve Sürücülerin Teşhisi Sempozyumu, 7-9 September, Viyana, s.1-6.
- YILDIZ, K., 2019. Elektrik Motorlarında Çevirim İçi Arıza Tespiti. Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Lisans Tezi, Siirt, 111s.
- ZAFARANI, M., GOKTAS, T., and AKIN, B., 2016. Discernment of Broken Magnet and Static Eccentricity Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 31(2): 1-10.