

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTORLARDA ROTOR OLUK ŞEKLİ VE KAYKININ
ELEKTROMANYETİK TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ SPEKTRUMU ÜZERİNE
ETKİSİNİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Duygu ÇATAL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

OCAK 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTORLARDA ROTOR OLUK ŞEKLİ VE KAYKININ
ELEKTROMANYETİK TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ SPEKTRUMU ÜZERİNE
ETKİSİNİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DUYGU ÇATAL
(504171015)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ KIRIŞ

OCAK 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504171015 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Duygu ÇATAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ASENKRON MOTORLARDA ROTOR OLUK ŞEKLİ VE KAYKININ ELEKTROMANYETİK TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ SPEKTRUMU ÜZERİNE ETKİSİNİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ KIRIŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Seher EKEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Nihan ALTINTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : 14 Ocak 2022
Savunma Tarihi : 28 Ocak 2022





Aileme...



ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitim sürecinde tez danışmanım olan ve desteğini eksik etmeyen Prof. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ KIRIŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince gerek teknik konularda gerek motivasyon olarak yanımda olan sevgili dostlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde üzerimde emeği olan, verdiğim kararları destekleyip hep yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2022

Duygu ÇATAL
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGELER	xvii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. ASENKRON MOTOR	13
2.1 Asenkron Motorun Yapısı.....	13
2.2 Asenkron Motorun Çalışma Prensibi	13
2.3 Asenkron Motorda Ana Boyut Tayini	16
2.4 Eşdeğer Devre Parametreleri ve NEMA Tasarım Sınıfları.....	20
2.5 Harmonik Analiz.....	23
3. ELEKTRİK MAKİNALARINDA GÜRÜLTÜ ÜRETİMİ VE YAYILIMI ..	25
3.1 Ses, Gürültü ve Titreşim Tanımı.....	25
3.2 Ses Şiddeti Seviyeleri ve Gürültü Kontrol Önlemleri.....	25
3.3 Elektrik Makinalarında Gürültü Kaynakları ve Enerji Dönüşümü	26
3.3.1 Aerodinamik gürültü kaynakları	27
3.3.2 Mekanik gürültü kaynakları	27
3.3.3 Elektromanyetik gürültü kaynakları	28
3.4 Stator Geometrisinin Doğal Frekans Hesabı.....	28
3.5 Akustik Ses Gücü ve Basınç Hesabı	30
4. MANYETİK ALAN VE RADYAL KUVVET HESABININ ANALİTİK	
İNCELEMESİ	31
4.1 Hava Aralığı Manyetik Alan Hesabı.....	31
4.1.1 Oluk etkisi	31
4.1.2 Eksen kaçıklığı etkisi	33
4.1.3 Manyetik doymanın etkisi.....	34
4.1.4 Oluk eğriligi etkisi	35
4.2 Manyetik Kuvvetler	37
4.2.1 Manyetik basınç ve kuvvet hesabı	37
4.2.2 Stator çekirdeği deformasyonu ve titreşim modları.....	39
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	41
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Tanımı.....	41
5.1.1 Method	41
5.1.2 Maxwell denklemleri	42
5.1.3 Ağ (Örgü) yapısı	43

5.2 Doğal Frekansın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi	44
5.3 Elektromanyetik Kuvvetin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi	46
6. TASARIM VE SAYISAL BENZETİM SONUÇLARI.....	47
6.1 Asenkron Motor Tasarımı	48
6.2 Rotor Oluk Geometrisinin Belirlenmesi.....	49
6.3 Moment ve Reaktans Değer Karşılaştırması	52
6.4 Manyetik Analiz	54
6.5 Harmonik Spektrum ve Manyetik Kuvvet Analizi.....	62
6.5.1 Rotor oluk eğriliğinin etkisi	77
6.5.2 Karşılaştırma	78
6.6 Modal Analiz	80
6.7 Deformasyon ve Akustik İnceleme	85
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ	107



KISALTMALAR

PMSM	: Sürekli Mıkanatıslı Senkron Motor
SRM	: Senkron Relüktans Motor
NEMA	: National Electrical Manufacturers Association
IEC	: The International Electrotechnial Comission
MMF	: Manyetomotor Kuvvet
SPL	: Ses Basınç Seviyesi
SIL	: Ses Yoğunluğu Seviyesi
SWL	: Ses Gücü Seviyesi
SED	: Ses Enerjisi Yoğunluğu
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
TK	: Tek Kafesli
ÇK	: Çift Kafesli
TKK	: Tek Kafesli Kapalı



SEMBOLLER

n_s	: Senkron hız
s	: Kayma
n_r	: Rotor hızı
p	: Kutup çifti sayısı
m	: Faz sayısı
F_r, F_s, F_t	: Fazlara göre amper-sarım
i_r, i_s, i_t	: Faz akımları
D	: Stator iç çapı
D_o	: Stator dış çapı
D_{ro}	: Rotor dış çapı
D_{ri}	: Rotor iç çapı
P_n	: Nominal güç
C	: Faydalanma katsayısı
k_w, k_d, k_p	: Sargı parametreleri
g	: Hava aralığı genişliği
Q_s	: Stator oluk sayısı
Q_r	: Rotor oluk sayısı
τ	: kutup aralığı
γ_{geo}	: Oluklar arası geometrik açı
γ_{elk}	: Oluklar arası elektriksel açı
q	: Bir faz ve kutup başına düşen oluk sayısı
Z	: Toplam iletken sayısı
Z_q	: Oluk başına düşen iletken sayısı
A_{co}	: İletken kesiti
J_{cos}	: Stator akım yoğunluğu
h_{cs}	: Stator boyunduruk kalınlığı
A_{rb}	: Rotor bar kesiti
J_{rb}	: Rotor bar akım yoğunluğu
I_{rb}	: Rotor bar akımı

A_{rb}	: Rotor bar kesiti
h_{cs}	: Stator boyunduruk yüksekliği
B	: Hava aralığı indüksiyonu
h_r	: Rotor çubuk yüksekliği
b_r	: Rotor çubuk genişliği
R_1	: Stator direnci
X_1	: Stator kaçak rektansı
R_2'	: Rotor direncinin statora indiregenmiş direnci
X_2'	: Rotor kaçak rektansının statora indiregnmiş reaktansı
R_{Fe}	: Demir direnci
X_m	: Mıktanılanma reaktansı
M	: Çıkış momenti
M_k	: Kalkış momenti
M_d	: Devrilme momenti
K_m	: Stator sertlik katsayısı
E_c	: Elastisite modülü
A_m	: m modundaki yer değiştirme
F_m	: m modundaki uyarıcı kuvvet
ζ_m	: Sönümleme katsayısı
ν_c	: Poison oranı
Π	: Ses gücü
ρ_0	: Hava yoğunluğu
c_0	: Ses hızı
S_f	: Stator yüzeyi
Λ_g	: Hava aralığı geçirgenliği
b_o	: Oluk açıklığı
e, ϵ	: Eksen kaçıklığı
e_d, ϵ_d	: Dinamik eksen kaçıklığı
Ω_e	: Açısal frekans
k_s	: Eğrilik faktörü
b_s	: Oluk eğriliği
B_1	: Stator akı yoğunluğu
B_2	: Rotor akı yoğunluğu
μ_0	: Hava geçirgeliği

B_n	: Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni
B_ϕ	: Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun teğetsel bileşeni
F	: Manyetik kuvvet
σ	: Manyetik gerilme
σ_n	: Radyal manyetik gerilme
d	: Statorun sapması
D	: Elektrik akı yoğunluğu
J	: Akım yoğunluğu
H	: Manyetik alan kuvveti
$u, \dot{u}, \ddot{u}$	: Yer değiştirme vektör matrisi ve türevleri





ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 2.1 : Asenkron makinanın kayma ile çalışma şekli arasındaki ilişki.....	15
Çizelge 2.2 : Asenkron makina bölümlerinde beklenen manyetik alan yoğunlukları.....	16
Çizelge 2.3 : Asenkron makina bölümlerinde beklenen akım yoğunlukları.....	17
Çizelge 2.4 : Kutup sayısına göre λ sabiti.....	17
Çizelge 2.5 : Stator iç çapının dış çapına oranının kutup sayısına göre değişimi.	17
Çizelge 6.1 : Motor tasarım değerleri.....	48
Çizelge 6.2 : Motorun temel büyüklükleri.....	49
Çizelge 6.3 : Motorun kalkış ve devrilme anı karakteristikleri.....	52
Çizelge 6.4 : Oluk tipine göre verim değerleri.....	53
Çizelge 6.5 : Nominal koşullarda karakteristik.....	54
Çizelge 6.6 : Akı yoğunluğunun bölgelere göre ortalama değerleri.....	57
Çizelge 6.7 : Tasarlanan motorların harmonik bileşenlerinin karşılaştırılması.....	68
Çizelge 6.8 : Seçilen stator için maksimum ve ortalama manyetik kuvvetler.....	72
Çizelge 6.9 : Manyetik kuvvet yoğunluğu bileşenlerinin maksimum ve ortalama değerleri.....	76
Çizelge 6.10 : Manyetik kuvvet karşılaştırması.....	79
Çizelge 6.11 : Kuvvet yoğunluğu karşılaştırması.....	80
Çizelge 6.12 : Sınır koşullarına göre doğal frekans değerleri.....	81
Çizelge 6.13 : Malzeme özellikleri.....	84
Çizelge 6.14 : Akustik yapı parametreleri.....	86
Çizelge 6.15 : Oluk tipine göre ses şiddeti seviyesi.....	92



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Asenkron motorun eşdeğer devresi [39].	21
Şekil 2.2 : Asenkron motor moment-hız değişimi [40].	22
Şekil 2.3 : NEMA oluk sınıfları ve hız-moment eğrileri [40,41].	23
Şekil 3.1 : Frekansa göre ses şiddeti seviyesi değişimi [45].	25
Şekil 3.2 : Çevresel gürültü seviyeleri [44].	26
Şekil 3.3 : Elektrik makinasında gürültü oluşumu [44].	26
Şekil 3.4 : Gürültü oluşumunun elektrik makinası üzerindeki gösterimi [44].	27
Şekil 4.1 : Doyma anında oluk açıklığı şekli [44].	35
Şekil 4.2 : Taslak rotor gösterimi a) Normal rotor çubukları b) Eğritilmiş rotor çubukları [54].	35
Şekil 4.3 : Rotor akı değişimi a) Normal rotor çubukları b) Eğritilmiş rotor çubukları [54].	36
Şekil 4.4 : Stator dış yüzeyine etki eden radyal kuvvet [58].	38
Şekil 4.5 : Stator titreşim modları [60].	40
Şekil 5.1 : Kaynak uygulaması a) Geleneksel kaynak b) Eğrisel kaynak [58].	45
Şekil 6.1 : Tasarım sonrası işlem basamakları.	47
Şekil 6.2 : Stator sargı yapısı.	48
Şekil 6.3 : M36_24G manyetik malzemenin B-H eğrisi.	49
Şekil 6.4 : TKK oluk grubu.	50
Şekil 6.5 : ÇK oluk grubu.	51
Şekil 6.6 : TK oluk grubu.	51
Şekil 6.7 : SEY analizinde kullanılan ağ yapısı.	55
Şekil 6.8 : Çıkış momenti dalga şekli a) T1 b) T12.	56
Şekil 6.9 : TK grubunda bulunan motorların manyetik alan yoğunlukları ve akı dağılımları.	58
Şekil 6.10: ÇK grubunda bulunan motorların manyetik alan yoğunlukları ve akı dağılımları.	60
Şekil 6.11 : TKK grubunda bulunan motorların manyetik alan yoğunlukları ve akı dağılımları.	61
Şekil 6.12 : TK grubunda bulunan motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğu bileşenleri.	64
Şekil 6.13 : TK oluk gruplarına ait harmonik bileşenleri a) radyal b) teğetsel.	64
Şekil 6.14 : ÇK grubunda bulunan motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğu bileşenleri.	65
Şekil 6.15 : ÇK oluk gruplarına ait harmonik bileşenleri a) radyal b) teğetsel.	66
Şekil 6.16 : TKK grubunda bulunan motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğu bileşenleri.	67
Şekil 6.17 : TKK oluk gruplarına ait harmonik bileşenleri a) radyal b) teğetsel.	67
Şekil 6.18 : Tasarlanan motorların harmonik içeriklerinin bileşenlere göre karşılaştırması.	69

Şekil 6.19 : Eksen üzerinden bir stator dişi için örnek.	70
Şekil 6.20 : TK grubunda bulunan motorların bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.	71
Şekil 6.21 : ÇK grubunda bulunan motorların bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.	71
Şekil 6.22 : TKK grubunda bulunan motorların bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.	72
Şekil 6.23 : TKK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin radyal bileşenine ait dalga şekilleridir.	73
Şekil 6.24 : TKK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin teğetsel bileşenine ait dalga şekilleridir.	73
Şekil 6.25 : TK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin radyal bileşenine ait dalga şekilleridir.	74
Şekil 6.26 : TK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin teğetsel bileşenine ait dalga şekilleridir.	74
Şekil 6.27 : ÇK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin radyal bileşenine ait dalga şekilleridir.	75
Şekil 6.28 : ÇK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin teğetsel bileşenine ait dalga şekilleridir.	75
Şekil 6.29 : Rotor oluklarında kaykı uygulması.	77
Şekil 6.30 : T15 motorunun hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun dalga şekli. ..	78
Şekil 6.31 : T15 motorunun stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin dalga şekilleri a) radyal b) teğetsel.	78
Şekil 6.32 : T15 motorunun bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.	78
Şekil 6.33 : Radyal harmonik bileşen karşılaştırması.	79
Şekil 6.34 : Teğetsel harmonik bileşen karşılaştırılması.	79
Şekil 6.35 : Stator ağ yapısı.	81
Şekil 6.36 : Doğal frekansın sınır koşullarına göre değişimi.	82
Şekil 6.37 : Modal analiz sonuçları.	83
Şekil 6.38 : Doğal frekansın malzeme ile değişimi.	85
Şekil 6.39 : ANSYS Workbench arayüzü.	86
Şekil 6.40 : Stator geometrisi a) sabitleme noktaları b) ağ yapısı c) akustik yapı.	86
Şekil 6.41 : T1 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	87
Şekil 6.42 : T1 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	87
Şekil 6.43 : T7 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	88
Şekil 6.44 : T7 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	88
Şekil 6.45 : T12 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	89
Şekil 6.46 : T12 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	89
Şekil 6.47 : T15 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	90
Şekil 6.48 : T15 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.	90
Şekil 6.49 : Frekansa göre X ekseni deformasyon değerleri.	91

Şekil 6.50 : Frekansa göre Y eksenli deformasyon değeri.	91
Şekil 6.51 : Akustik inceleme sonuçları	92





ASENKRON MOTORLARDA ROTOR OLUK ŞEKLİ VE KAYKININ ELEKTROMANYETİK TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ SPEKTRUMU ÜZERİNE ETKİSİNİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Günümüzde; azalan kaynaklar, çevre kirliliği ve gürültü kirliliği gibi sebeplerden dolayı enerjinin verimli kullanımı dikkat edilmesi gereken konulardan biri haline gelmiştir. Bu önemli hususlardan biri olan gürültü kirliliği yaşam standartlarını etkileyen bir unsurdur. Özellikle işyerlerinde uzun süre gürültüye maruz kalan kişiler üzerinde olumsuz etkiler görülmesinden dolayı gürültü kontrol çalışmaları önem kazanmıştır. Endüstriyel bir ortamda gürültünün bir kısmını elektrik motorları oluşturmaktadır. Elektrik motorlarının amacı düşük ses gücü seviyesi ile yüksek mekanik güç sağlamaktır. Optimum mekanik enerjinin elde edilmesi için motor tasarım sürecinde alınması gereken farklı önlemler mevcuttur ve gelişime açıktır. Bir motorda giriş gücünün bir kısmı ısı olarak dağıtılırken bir kısmı havalandırma sistemi tarafından harcanır ve daha küçük olan bir kısmı ise gürültü olarak kaybolur. Optimum motor tasarımı, beklenen tasarım isterine göre değişkenlik göstermektedir. Bu isterlerden bazıları ise yüksek kalkış momenti, düşük kalkış akımı ve yüksek verim olarak karşımıza çıkmaktadır.

İnsan kulağı yaklaşık 20 Hz. ile 20.000 Hz frekans aralığındaki seslere duyarlıdır. Elektrik makinalarının gürültü seviyelerine bakıldığında, gürültü tepeleri bu frekans aralığında ortaya çıkabilmektedir. İnsan işitme duyusuna hiçbir zarar gelmemesi için tasarım sürecinde gürültü seviyelerini azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmalıdır.

Elektrik makinalarında gürültü kaybına neden olan; aerodinamik, mekanik ve elektromanyetik kaynaklar mevcuttur. Elektromanyetik gürültü sınıfına giren manyetik kuvvetler hareketli yapı olan rotora dönmeye zorlar. Stator ise rotora göre sabittir ve manyetik kuvvete maruz kalır. Manyetik kuvvet, statorda salınım hareketine neden olur. Titreşim enerjisi, mekanik bileşenlere veya çevreleyen ortamlara akustik gürültü şeklinde istenmeyen aktarıma neden olur. Elektrikli makinaların çalışma prensibine göre bu olağan bir durumdur. Bu yüzden elektrik makinelerin, tasarım aşamasında iyileştirme yapılarak manyetik kuvvetin neden olduğu sonuçlar azaltılmaya çalışılır. Bu aşamada statorun manyetik kuvvetten kaynaklanan titreşim analizi önemlidir. Manyetik akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel harmonik bileşenleri manyetik kuvvetin oluşmasında ana etkindir.

Bu tez çalışmasında tasarım konusunu ele alan kaynaklardan tasarım kriterleri incelendiğinde, makinanın bölgesel olarak sınırlandırılmış kısıtları içerisinde kalacak şekilde 7.5kW gücüne sahip 4 kutuplu 36/30 oluk kombinasyonlu sincap kafesli asenkron motor için 14 adet farklı rotor oluk geometrisine sahip motorların ve 1 adet motorun rotor oluğuna bir oluk genişliği kadar kaykık uygulanmış motorun bilgisayar destekli programlar aracılığı ile tasarımı tamamlanmıştır.

Oluk geometrileri belirlenirken literatürde var olan çalışmalardaki oluk şekilleri incelenmiş 14 adet farklı oluk geometrisi ve oluk alanı yaklaşık sabit kalacak şekilde tasarlanmıştır. Bu oluklar sınıflandırılarak 3 grup altında toplanmıştır. Stator çekirdeğinde kullanılan 2 tabakalı sargı yapısı, oluk geometrisi ve makinanın ana boyutları tüm motorlarda sabit tutulup sadece rotor oluk geometrisi değiştirilmiştir. Sabit rotor oluk alanı koşulu altında mümkün olduğu kadar verim yüksek tutulmaya özen gösterilmiştir. Tasarım sürecinde ANSYS RMxprt ve Maxwell programları kullanılmıştır.

Tasarlanan motorların her biri için sabit güç kriteri altında geçici hal analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan bilgisayar destekli program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan motorlara ait performans, manyetik, elektriksel ve harmonik karşılaştırmaları yapılmıştır.

15 adet makinanın hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel bileşenlerine ait dalga şekli elde edilmiş ve Fourier dönüşümü MATLAB programı kullanılarak radyal ve teğetsel harmonik spektrumları çıkarılmıştır. Her bir motor için manyetik kuvvet yoğunluğu dalga şekilleri hava aralığı manyetik akı yoğunluğundan yararlanılarak çıkartılmış radyal ve teğetsel bileşenlerinin stator iç yüzeyine göre değişimi elde edilmiştir. Radyal kuvvet yoğunluğu çıkarılırken manyetik akı yoğunluğundan gelen teğetsel etki dikkate alınmıştır.

Statorda eksen üzerinde yer alan bir diş seçilmiş ve tasarlanan her bir motor için bu dişe etkiyen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenlerinin zamana göre grafiği çizdirilmiştir.

Manyetik gerilme ile manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenlerinin maksimum ve ortalama değerleri karşılaştırılmıştır. Her grup içerisinde işletme değerleri (kalkış momenti, kalkış akımı ve verim gibi) optimal ve radyal manyetik kuvvet yoğunluğu yüksek 1 adet motor seçilerek titreşim ve akustik inceleme için kullanılmıştır. Seçilen motorun bir tanesinde rotor oluklarına 1 oluk genişliği mertebesinde kaykır uygulanmış ve geri kalan tüm parametreleri sabit tutulmuştur. Analiz çalışmaları bu motor içinde yapılarak akustik inceleme için hazır hale getirilmiştir.

Manyetik açıdan önemli bir parça olan stator yapısına ait doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Doğal frekansın farklı malzeme ve farklı sınır koşulları altında değişimini belirlemek amacıyla stator yapısı kullanılarak inceleme gerçekleştirilmiştir. Doğal frekans değerleri öncelikle farklı sınır koşulları altında aynı malzeme kullanılarak elde edilmiş böylece sabitleme şartlarının doğal frekansa etkisine ulaşılmıştır. Sınır koşul kriterine karar verildikten sonra malzemenin doğal frekansına etkisi incelenmiş ve malzeme parametrelerine göre doğal frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Doğal frekans analizlerinde ANSYS Workbench programı kullanılmıştır.

Motorun deformasyon ve gürültü dağılımını belirlemek için optimal olarak çalışan ve yüksek manyetik kuvvet yoğunluğu değerine sahip 4 çeşit motor seçildi. Bu motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel harmonik bileşenleri, manyetik kuvvet etkisi altında stator çekirdeğinde meydana gelen değişimi ve frekansa göre değişen gürültü değerleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Deformasyon ve gürültü analizleri için ANSYS Workbench modülleri kullanılmıştır. Deformasyon ve gürültü eğrilerinin frekansa göre değişiminin doğal frekans değerleriyle karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu tez ilk olarak küçük güçlü bir asenkron makinanın tasarımını performans değerlendirmesini ve uzay harmoniklerini ele almıştır. İlave olarak manyetik gerilme

ve kuvvet hesabında hava aralığı manyetik akısından gelen teğetsel bileşen katkısını ihmal etmemiştir ve motor karşılaştırması yapılan uygulamalarda göz önüne alınması gerektiğine varılmıştır. Stator çekirdeğinde kullanılan sınır koşulları ve malzeme kütle yoğunluğunun doğal frekans üzerinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Rotor oluk geometrisinin ve rotor oluk kaykısı uygulamasının deformasyon ve akustik açıdan sonuçlarına ulaşılmıştır. Tasarım için seçilen rotor oluk alanının yüksek performans değerleri elde etmek için uygun olmadığına ve rotor kaykısı uygulamasının baskın değerde gürültünün azaltılması için oluk kaykısı değerinin parametrik analiz yapılarak belirlenmesinin uygun olduğuna varılmış ve ulaşılan sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.





ANALYSIS AND EVALUATION OF THE EFFECT OF ROTOR SLOT SHAPES AND SKEWING ON ELECTROMAGNETIC VIBRATION AND NOISE SPECTRUM IN INDUCTION MACHINE

SUMMARY

Today, the efficient use of energy has become one of the issues to be considered due to reasons such as decreasing resources, environmental pollution and noise pollution. Noise pollution, one of these important issues, is a factor that affects living standards. Noise control studies have gained importance, especially because of the negative effects on people who are exposed to noise for a long time in their workplaces. One of the noise factors in an industrial environment is electric motors. The purpose of electric motors is to provide high mechanical power with low sound power level. In order to obtain the optimum mechanical energy, there are different methods to be considered during the motor design process. Studies on these methods are developing day by day. In a motor, some of the input power is dissipated as heat, while some is consumed by the ventilation system, and a smaller portion is lost as noise. The optimum motor design varies according to the expected design requirements. Some of these requirements are high starting torque, low starting current and high efficiency.

The human ear is sensitive to sounds in the frequency range of about 20 Hz to 20,000 Hz. Noise levels of electrical machines are considered, noise peaks can occur in this frequency range. In order to avoid any harm to human hearing, studies should be made to reduce noise levels in design stage.

Noise sources in electrical machines are examined under 3 groups as aerodynamic, mechanical and electromagnetic sources. The magnetic forces, which are in the electromagnetic noise class, force the rotor, which is a movable structure, to rotate. The stator is fixed relative to the rotor and is affected by magnetic force. The magnetic force causes oscillating motion in the stator. Vibration energy causes undesirable transmission in the form of acoustic noise to neighboring mechanical components or surrounding environments. According to the working principle of electrical machines, this situation is expected. For this reason, improvements can be taken to reduce the results caused by the magnetic force in the design stage of electrical machines. At this stage, the vibration analysis of the stator caused by the magnetic force is important. The radial and tangential harmonic components of the magnetic flux density are the main factors in the generation of the magnetic force.

In this thesis, when the design criteria are examined from the sources that deal with the design issue, the design was made to remain within the regionally limited constraint of the machine. 14 motors with different rotor slot geometry and 1 skewing rotor geometry are designed for 4-pole 36/30 pole and slot combination squirrel cage induction motor with 7.5kW power. Computer aided programs were used in design stages.

While determining the rotor slot geometries, existing studies were examined in the literature. According to literature review, 14 different geometries were designed and the rotor slot area remained approximately constant for each one. These slots are classified in 3 groups according to slot shapes. The 2 layer winding structure used in the stator core, the slot geometry and the main dimensions of the machine were kept constant in all motors and only the rotor slot geometries were changed. An efficiency of motor is kept as high as possible under the condition of constant rotor slot area. ANSYS RMxpert and Maxwell programs were used in the design process.

Transient analysis for each of the motors under the constant power criterion was simulated using a computer aided program working with the finite elements method. Performance, magnetic, electrical and harmonic comparisons of designed machines were examined.

The waveform of the radial and tangential components of the air gap magnetic flux density of 15 machines was obtained and the radial and tangential harmonic spectra were extracted using the Fast Fourier transform with MATLAB program. The magnetic density waveforms for each motor were extracted using the air gap magnetic flux density, and the variation of the radial and tangential components with respect to the stator inner surface was obtained. The tangential effect from the magnetic flux density is taken into account when subtracting the radial force density.

A tooth located on the axis of the stator is selected. Moreover, the radial and tangential components of the magnetic force are plotted versus time for each designed motor.

Maximum and average values of radial- tangential components of magnetic stress and magnetic force were compared. One motor was selected with high radial magnetic force density and optimal operating values (such as starting torque, starting current and efficiency) from each group for using vibration and acoustic analysis. In one of the selected motor, skewness was applied to the rotor slots. On the other hand all parameters except rotor slot were kept constant. Also, this motor analyzed in order to examine acoustic and deformation.

The natural frequency values of the stator structure were obtained. The natural frequency values were first obtained by using the same material under different boundary conditions, thus the effect of the boundary conditions on the natural frequency was reached. After deciding on the type of fixed points, the effect on the natural frequency of the material was examined and the natural frequency values were compared according to the material parameters. ANSYS Workbench program was used in natural frequency analysis.

The radial and tangential harmonic components of the air gap magnetic flux density, the change in the stator core under the influence of magnetic force, and the noise values varying according to the frequency were investigated comparatively for 4 types of motors operating optimally and having high magnetic force values. ANSYS Workbench modules were used for deformation and noise analysis. The variation of the deformation and noise curves according to frequency was compared with the natural frequency values.

This thesis first deals with the design, performance and space harmonics of a small powerful asynchronous machine. In addition, the tangential component contribution from the air gap magnetic flux has not been neglected in the calculation of magnetic stress and force, and it has been concluded that it should be considered in applications

where motor comparisons are made. It has been observed that the fixation method and material mass density used in the stator core play an important role on the natural frequency. The results of rotor slot geometry and skewness of rotor in terms of deformation and acoustics were obtained. It has been concluded that the area of the rotor slot shape is not suitable to obtain high performance values and it is appropriate to perform parametric analysis instead of skewness factor is 1 in order to reduce noise dominantly and the results are given comparatively.





1. GİRİŞ

Gelişen sanayi ile birlikte birçok uygulama alanında faydalanılan elektrik makinalarına olan gereksinim artmaktadır. Sincap kafesli asenkron motor sağlamlığı, yapı basitliği, düşük maliyeti ve bakımının kolay olması nedeniyle yaygın kullanım alanına sahiptir. Kullanım alanı geniş olan asenkron motorlar için literatürde çeşitli yönlerde iyileştirme yapılmak üzere birçok çalışma bulunmaktadır. Elektrik makinaları enerji dönüşümü sağlayan önemli yapılardır. Enerji dönüşümü ve bunun verimli kullanılması çevremiz ve üretimden alınacak verim açısından önem arz eder. Motorlarda enerjinin bir kısmı akustik enerjiye dönüşür ve kayıp değeri olarak göz önüne alınır. Sincap kafesli asenkron motordan yüksek performans değerlerinde düşük titreşim ve gürültü talep edilmektedir.

Sincap kafesli asenkron motorların gürültü kaynakları genellikle üç kategori altında toplanır. Bunlar elektromanyetik, aerodinamik ve mekanik kaynaklardır. Dönen makinalar için titreşim ve akustik son zamanlarda önemli konu haline almıştır ve titreşime neden olan elektromanyetik kaynak ele alındığında ana nedeni olarak manyetik kuvvetlere odaklanılmıştır. Asenkron makinalardaki, özellikle 4 ve 6 kutuplu motorlardaki gürültünün çoğu, elektromanyetik kuvvetin ürettiği titreşimden gelir.

Elektrik makinalarında manyetik kuvvetlerden kaynaklanan gürültü ve titreşimlerin incelemesi hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun zamana ve uzay dağılımının bilgisine ihtiyaç duyar. Ayrıca manyetik kuvvetlerin radyal ve teğetsel bileşenleri, akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel bileşenlerine bağlıdır. Bu nedenle, manyetik kuvvetlerin doğru tahmini için hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun her iki bileşeni de zaman ve uzay alanlarında belirlenmelidir. Manyetik kuvvetlerdeki ufak bir harmonik makinanın yapısal modu ile rezonansına bağlı olarak büyük akustik gürültü ve titreşime neden olabilir. Stator yapısı, titreşim tepkisini belirlemek için önemli olan kısımdır.

Rotor oluk geometrileri makinanın moment, akım ve verim gibi karakteristiklerini etkilediği gibi hava aralığı manyetik akı dağılımını da etkilemektedir. Dolayısı ile

harmonikleri etkileyen bir faktörde rotor yapısıdır. Rotor oluk geometrileri ile dalga şeklinde farklılık sağlanabilir. Ayrıca rotor oluğuna kaykı uygulanarak hava aralığında meydana gelen akı yüzey üzerinde dağıtılarak harmonikler kısmen bastırılabilir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez kapsamında asenkron motorda farklı rotor geometrileri kullanılmıştır. Rotor oluk geometrilerinin etkisi ile değişen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu incelemesi yapılmış ve buna bağlı manyetik gerilme ile manyetik kuvvetin değişimi radyal ve teğetsel etkiler göz önüne alınarak incelenmiştir. Tasarlanan oluk geometrileri üç grup altında sınıflandırılmıştır. Her grup içerisinde, radyal kuvvet yoğunluk değeri yüksek ve performans değerleri optimum olan bir adet motor seçilmiştir. Rotor geometrisinde referans olarak seçilen motorun rotor oluklarına bir oluk adımı kadar kaykı uygulanmış ve seçilen diğer motorlar ile deformasyon ve akustik incelemesi yapılmıştır. İlk aşamada makinaların ANSYS RMXprt modülü kullanılarak numerik analizleri gerçekleştirilmiş, sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan ANSYS Maxwell 2D programında her oluk yapısı için manyetik analiz, harmonik analiz ve manyetik kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir. MATLAB kullanılarak elde edilen hava aralığı dalga şekillerine Fourier Dönüşümü yapılarak harmonik spektrumlarına ulaşılmıştır. Akustik incelemelerinde manyetik kuvvet kadar yapının doğal frekans değerleri de önemli olduğu için model ANSYS Workbench'e taşınmıştır. Bu program sayesinde stator yapısının farklı sabitleme noktaları ve farklı malzeme koşulları altında modal analizi gerçekleştirilmiştir. Modal analizi ve kuvvet incelemesi yapıldıktan sonra seçilen motorlara ANSYS Workbench programı yardımıyla deformasyon ve akustik inceleme yapılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Elektrik makinaları, elektrik enerjisini mekanik işe dönüştüren önemli cihazlardır. Yaygın kullanıma sahip olan elektrik makinalarının performans değerlerini iyileştirmek için literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların içerikleri istenen kriterlere göre değişmektedir. Oluk şekli, oluk kombinasyonları, kullanılan malzemenin manyetik karakteristiğinin etkisi, rotorda ya da statorda kullanılan sargı yapısı, hata koşulları altında makinanın performans değişimi ve makinada arıza tespiti

gibi birçok konu üzerinde araştırmalar mevcuttur. Önemli konulardan biri de elektrik makinalarında oluşan manyetik alandır; alanın dağılımı bozulursa dengesiz manyetik kuvvetler üretilir ve zararlı titreşimleri uyararak mekanik yapılarla etkileşime girebilir. Elektrik makinelerinin titreşimleri enerji dönüşümünün verimini düşürebilir çünkü titreşim ve buna bağlı olası sıcaklık artışı sistem için istenmeyen enerji kayıplarını meydana getirebilir. Bunun yanı sıra titreşim ile gürültü insanların günlük yaşamını etkiler ve şiddetli titreşim önemli ekonomik kayıplara da neden olabilmektedir.

Gundogdu ve arkadaşları rotor oluk sayısının stator ve rotor akımları, oluk ve dişler üzerindeki akı yoğunluk değeri, moment değışimi, güç faktörü, makina kayıp değeri, elektromanyetik kuvvet ve verim gibi makina performans karakteristiklerindeki değışimi incelemiştir [1].

Jang ve arkadaşları, rotor oluk şekillerinden çift kafesli olan yapıyı optimize etmiş rotor oluk boyutlarını daha derin ve geniş olacak şekilde tasarlayarak verim ve moment değeri üzerinde olumlu etkisini gözlemlemiştir. İncelemelerinde elektrikli araçlar için kafesli asenkron motor kullanmayı tercih etmişlerdir [2].

Kostas Gyftakis, Joya Kappatou ve Athanasios Safacas çalışmalarının birinde NEMA sınıfı A ve D oluk geometrisini birleştiren modelleri sincap kafesli asenkron motor üzerinde incelemişlerdir. Modeller, SEY yöntemi kullanılarak analiz edilmiş. Asenkron kafes motorda A sınıfı ile D sınıfı olukların farklı analojisinin manyetik alan, moment ve ayrıca stator ve rotor akımlarının dağılımı üzerindeki etkilerini araştırmıştır [3].

Efe Ünlükaya, Asım Gökhan Yetgin, Ali İhsan Çanakoğlu ve Mustafa Turan çalışmalarında stator oluk yapısını sabit tutarak rotor oluk geometrisini rotor oluk alanı ve yüksekliği sabit kalacak şekilde değışirmiş, her bir rotor oluk geometrisi için hava aralığında meydana gelen akı dağılımları, performans karakteristikleri ve çeşitli noktalardaki manyetik akı yoğunluk değeri incelemiştir. Ayrıca rotor oluğunda tek kafes veya çift kafes kullanılması durumundaki etkileri ile kamalı rotor oluklarında doyma durumları incelenmiştir [4].

V. Fireteanu, T. Tudorache ve O.A. Turcanu çalışmalarında, yüksek güçlü asenkron motorlara ait bakır çubukların; kalkış momenti, devrilme momenti, verimlilik değeri, güç faktörü ve ayrıca rotorun ısınma değeriine göre optimum tasarımını ele almaktadır. Aynı kesit alanını koruyan rotor oluklarının ve çubuk kesitlerinin üç

farklı geometri; dikdörtgen şekil, kademeli şekil ve basamaklı şeklin etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Simülasyon sonuçlarında devrilme momentinde önemli bir azalma olmaksızın, rotor çubuklarının enine kesitinin basamaklı şekli olması durumunda, sincap kafesli asenkron motorlarının kalkış momentinde önemli artış ve yüksek verimlilik değerlerinin elde edilebileceğini kanıtlamaktadır. Dolayısı ile motorun işletme değerlerinin iyileştirmesi için rotor çubuklarının optimal şekli üzerine yapılan bir çalışma da bu makalede görülmektedir [5].

Dianhai Zhang ve arkadaşları, motorla çalışan valf (MOV) aktüatörü uygulaması için üç fazlı sincap kafesli asenkron motorunda NEMA sınıfı D moment-hız karakteristiğini elde etmek için rotor oluklarının şeklini tasarlayarak optimal tasarım algoritmasını ele almışlardır. Geliştirilen yöntem üç aşamalıdır; eşdeğer devre yöntemine (ECM) dayalı formulasyon tasarım, rotor oluklarının önemli geometrik parametrelerinin seçimi ve sonlu elemanlar yöntemine (SEY) dayalı hassas tasarım. Bu aşamalar ile rotor oluk optimizasyonunu gerçekleştirmiştir [6].

Mahmoud Y. Mohamed, Salah A. Abdel Maksoud, M. Fawzi, Ahmed E. kalas ‘Effect of Poles, Slots, Phases Number and Stack Length Changes on the Optimal Design of Induction Motor’ makalesi bir asenkron motorun indüklenen maksimum moment ile motorun optimum kesitini elde etmeye yönelik bir çalışmadır. Ana makine tasarım parametrelerinden oluşan matematiksel model denklemleri kullanılmaktadır. Optimizasyon stratejisi, optimum hava aralığı akı yoğunluğuna, optimum iç stator çapına, optimum kutup sayısına, stator oluklarına ve rotor çubuklarına ulaşmak için uygulanmıştır. Hem stator hem de rotorun çekirdeğinde ve dışlarında farklı manyetik malzeme türleri kullanılarak optimizasyon tekrarlanmıştır. Ayrıca makinanın paket uzunluğu ve faz sayısındaki değişimin optimize değerler üzerindeki etkisini incelemiştir. Optimizasyon için MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Makinanın stator dış çapı sabit tutularak asenkron makinanın üretim maliyetlerini en aza indirmeyi hedefleyen bir çalışmadır [7].

Gui-Yu Zhou ve Jian-Xin Shen ‘Current Harmonics in Induction Machine with Closed-Slot Rotor’ makalesinde kapalı rotor oluk geometrisini incelemiştir. Motor verimi akım harmoniklerinin değeri ile ters orantıya sahiptir. Motorun verimi ve harmonik değerleri rotor oluk geometrisine bağlı olarak değişebilir. Modelde tek

katmanlı sargı kullanılmıştır ve harmonik değer hesaplaması için sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır [8].

Oluğun açık veya kapalı olması durumunun avantajları ve dezavantajları vardır, istenen gereksinime göre tercih yapılmalıdır. Rotoru açık oluklu motorda daha küçük akı kaçağı vardır bu nedenle motor performansı iyileştirilebilir. Bununla birlikte, dezavantajı olarak eşdeğer hava aralığı uzunluğu büyür ve daha fazla harmonik indüklenir. [9]. Kapalı oluklu rotor, imalat açısından sincap kafesin daha kolay kalıp dökümüne izin verir ve rotor yüzeyinin işlenmesini basitleştirir [10]. Ayrıca, rotor oluk harmoniklerini ortadan kaldırmaya yardımcı olarak gürültüyü, hat akımı harmoniklerini ve moment dalgalanmasını azaltmaya yardımcı olur ancak güç faktörü değerini azaltıcı etkisi vardır [11].

T. J. Flack ve S. Williamson ‘Air Gap Fields And Pressure Waves In Closed-Slot Cage Rotor Induction Motors’ adlı çalışmalarında kafesli asenkron makinalarında kapalı rotor oluk tasarımlarının kullanılmasının hava aralığı akı yoğunluğu dalgaları ve dolayısıyla stator üzerine etki eden radyal basınç dalgası üzerindeki etkisinin araştırılmasını açıklamaktadır. Sunulan sonuçlar, rotor oluklarının kapatılmasının kafesli asenkron makinalarının hem radyal basınç dalgaları hem de genel performansı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Rotor ağız açıklığı azaldıkça manyetik basınç dalgası zayıflar aynı zamanda zayıflama derecesi yüke bağlı olarak değişir. Bu durum asenkron motorlarındaki akustik gürültünün başlıca nedeni olarak gösterildiğinden kapalı oluk olması tercih sebebi haline gelir [12].

Cui Shumei, Dai Ying ve Song Liwei elektrikli araçlarda kullanılan asenkron motor için üç farklı tipte oluk yapısını ele alarak motorun performans karakteristiğini hem de işletme için önemli kriter olan gürültü etkisini incelemiştir. Bu üç farklı rotor oluk yapısını moment verimliliği açısından karşılaştırıp sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Rotor oluk tasarımının ve oluk kombinasyonunun makinanın gürültü seviyesi üzerinde etkisini modelleyip deneysel olarak çalışmasını da yapmıştır [13].

Jan Laksar ve Lukas Veg ‘Numerical Calculation of the Air Gap Flux Density Distribution in Rotary Electrical Machines’ makalesinde hava aralığı akı yoğunluğu dağılımının hesaplamasında oluk açıklığı etkisini birçok makalede incelendiğini bunun içinde oluk açıklığı ile birlikte diğer parametrelerden makinanın doyma

(kullanılan çelik malzemenin B-H eğrisine göre değişen) ve sargı dağılımı etkisini analitik olarak inceleyip sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır [14].

Akustik gürültü, elektrikli makinelerinde önemli bir sorun olduğundan literatürde birçok araştırmaya konu başlığı olmuştur. Bu konunun önemi, hava aralığı küçük ve stator çerçeveleri dar olan asenkron makinelerde daha baskındır. Manyetik seslerin kaynağı elektriksel açıdan bakıldığında genellikle hava aralığı içindeki manyetik kuvvetlerdir. Hava aralığı kuvvetleri genellikle manyetostriktif ve maxwell kuvvetleri olmak üzere iki başlık olarak genellenebilir.

Mohsen Cheraghi, Mehran Karimi ve Mohammad Bayati Booin'nın 'An Investigation on Acoustic Noise Emitted by Induction Motors Due to Magnetic Sources' makalesi asenkron motorlarda manyetik ile ilgili gürültü kaynaklarının tanınması için yapılan bir çalışmadır. Bu gürültüler çoğunlukla makinanın manyetik doymaya bağlı harmoniklerinden, statik ve dinamik eksantrikliğe bağlı hava aralığında değişen manyetik direncinden ve rotor- stator oluk kombinasyonundan kaynaklandığını savunmuşlardır. Makalede, asenkron motorlarının tasarımını iyileştirmek ve optimum sonuca ulaşmak için matematiksel yaklaşımları sistematik olarak incelemişlerdir [15].

Tom Hilgert, Lieven Vandeveld ve Jan Melkebeek arkadaşları; manyetik kuvvetler ve manyetostriksiyon etkisinin titreşimlere katkısını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Manyetik kuvvetlerin ve manyetostriksiyonun bir elektromekanik cihazın titreşimlerine katkılarının, makinanın geometrisine ve deformasyon moduna bağlı olarak ya artabileceği ya da azalabileceği sonucuna varmışlardır [16].

Manyetostriktif kuvvetlerin çoğunlukla düşük frekansları, özellikle stator ana bileşeninin çift frekanslı bileşenlerini etkilediği görülmüştür [16-17]. Bu nedenle, makalelerin çoğu bu kuvvetleri göz ardı edip esas olarak Maxwell kuvvetlerinin neden olduğu akustik seslere odaklanmıştır [15-17].

Chapman hazırladığı bir çalışmada gürültü fenomenini asenkron motorlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Hava aralığı manyetik alanının ideal sinüzoidal olmayan akı yoğunluğu dağılımı nedeniyle yüksek harmoniklerin oluşturacağını öne sürmüştür. Hava aralığı alanını bileşenlerine ayırma ve Maxwell gerilme tensör yöntemi ile rotor

dişlerinin yanı sıra stator üzerinde etkili olan farklı kuvvet dalgası bileşenlerini hesaplama fikri uygulamasını gerçekleştiren önder çalışması bulunmaktadır [18].

L. E. Hildebrand'ın 'Quiet induction motors' ve P. L. Alger'ın 'The magnetic noise of polyphase induction motors' çalışmaları manyetostriktif etkilerin ve iletkenler üzerindeki Lorentz kuvvetlerinin gürültü kaynağı olarak ihmal edilebileceğini göstermiş [19-20]. A. Belahcen'in 'Vibrations of rotating electrical machines due to magnetomechanical coupling and magnetostriction' makalesinde titreşim analizinde manyetostriktif etkiyi araştırmak için manyeto-mekanik bağlantı kullanarak ve kullanmadan sayısal hesaplama sonuçları gerçekleştirmiş. Sonuçları orta büyüklükte bir senkron generatör ve küçük bir asenkron makinanın ölçümleriyle karşılaştırmıştır [17]. Analizde, manyetostriksiyon etkisinin ve manyeto-mekanik bir kaplin kullanma gerekliliğinin yalnızca ince bir stator boyunduruğuna sahip büyük makineler için dikkate alınabileceğinin ve düşük frekanslardaki titreşimlerin büyüklük olarak arttığını gözlemlemiştir. Dolayısıyla, manyetostriktif etkileri ve Lorentz kuvvetlerini belli koşul harici ihmal etme varsayımını geçerli kılmıştır.

Mingzhong Qiao, Chao Jiang, Yongxin Zhu, And Geng Li, 'Research on Design Method and Electromagnetic Vibration of Six-Phase Fractional-Slot Concentrated-Winding PM Motor Suitable for Ship Propulsion' adlı makalesinde 20kW sabit mıknatıslı dört tip motorun (oluk- kutup kombinasyonları 48/44, 48/46, 48/50 ve 48/52) radyal elektromanyetik kuvveti ve hava aralığı manyetik alanı hesaplanmıştır. Oluk sayısı kutupların sayısına yakın olduğunda titreşimin kötüleştiğini görmüştür. Tasarım değeri 48/44 kombinasyonunun deneysel olarak doğrulamasını yapmıştır [21].

Oluk-kutup kombinasyon etkisini PMSM makine üzerinde inceleyen Jean Le Besnerais üç farklı model için akustik ve elektromanyetik simülasyonlarını MANATEEE yazılımı ile gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak manyetik kuvvetlerin neden olduğu gürültü ve titreşimleri değerlendirmek için basit bir analitik tasarım kuralının kullanılamayacağı ve sayısal simülasyonun gerekli olduğu düşüncesine varmıştır [22].

Prashanth S A, Sameer Nekkalapu, Ankit Dalal, Praveen Kumar 'Analytical Determination of Slot Harmonics content of Air-Gap Magnetic Field for an Induction Machine' makalesinde bir asenkron makinanın manyetik akı yoğunluğu hem rotor hem de statordaki oluklar nedeniyle temel manyeto motor kuvveti ve oluk

harmoniklerinden kaynaklanan uzay harmoniklerinin bir kombinasyonudur. Bir asenkron makinanın analitik modellemesi için oluk harmoniklerinin hava aralığı manyetik alanı üzerindeki etkilerinin doğru belirlenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada, analitik olarak hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun harmonik içeriği belirlenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile de incelenmiştir [23].

Sebastiao Lauro Nau ‘Acoustic Noise In Induction Motors: Causes And Solutions’ makalesinde motor üretiminden önce ve sonra gürültüyü azaltmak için yöntemler sunmuştur. Gürültü kaynaklarını mekanik ve elektriksel olarak ele alarak; havalandırma sistemi, hava aralığındaki elektromanyetik kuvvetler nedeni ile çekirdekte meydana gelen titreşimler ve yatakların ürettiği gürültüler şeklinde 3’e ayırmıştır. Manyetik gürültünün stator-rotor oluk tasarımına bağlı ve tasarım aşamasında müdahale edilmesi gerektiği sonucuna varmış. Havalandırma için kullanılan fanın seviyesi ile gürültü seviyesinin orantılı olduğunu savunmuştur. Motor monte edildikten sonra alınacak önlemlerin az olduğunu ve tasarım aşamasında yapılması gerektiği sonucuna varmıştır [24].

Elektrik makinalarında incelenen önemli konulardan biri de rotor oluşuna uygulana kaykı uygulamasıdır. S.L. Nau adlı araştırmacı azaltma yöntemlerinden biri olan oluk eğriliği etkisini incelemiştir. Oluk eğriliği asenkron makinaların durmasını, kilitlenmesini ve sürtünmeyi ortadan kaldırmasına da yardımcı olur. Deneyler, rotorun yaklaşık bir stator oluk aralığı kadar eğrilmesinin gürültü ve titreşimleri azaltma açısından iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Stator veya rotor oluklarının eğrilmesi, küçük makinelerde ortalama radyal kuvvetleri azaltarak gürültüde önemli bir azalma sağlarken, büyük makinelerde burulma titreşimlerine ve dolayısıyla akustik gürültüde bir artışa neden olabilir [25].

Yapının doğal davranışı ve yapının manyetik hesap ile arasında bir ilişki vardır. Yapısal hesaplamalarda kuvvet dalgalarının dikkate alınması, çoğunlukla daha düşük frekanslarda ve büyük dalga boylarına sahip olanlarla sınırlıdır, çünkü bunlar daha önce sunulan araştırmalarda da belirtildiği gibi, stator boyunduruğunun kritik bükülme deformasyonlarına yol açabilir [26].

Alger P.L., araştırmasında stator sonsuz uzunlukta bir silindir olarak kabul etmiş ve radyal yöndeki deformasyonu radyal kuvvet dalgası genliği, frekansı ve dalga sayısına göre belirlemiştir. Statorun dişleri, boyunduruğa dağılmış ilave kütle olarak eklenmiş,

yapısal davranış üzerinde önemli etkisi olabilecek sargıların da aynı şekilde kütleye ekleme yaklaşımının mümkün olacağını belirtmiştir. Bununla birlikte, iki boyutlu bir modele sınırlandırmasının yanı sıra, mahfaza ve bunun statora bağlanmasını hesaba katmamıştır [19].

Ciprian Gheorghe Nistor ve Luminița Roxana Cloțea ‘Determination of frequencies and vibration modes for a three phase induction motor IE3 premium efficiency’ adlı çalışmalarında 11kW 1000 rpm IE3 sınıfına ait üç fazlı bir asenkron motor için ANSYS 3D simülasyon aracını kullanarak modal analizini yapıp mod frekans ve titreşimlerini çıkarmışlardır. Darbeli çekiç yöntemi ile deneysel tespitini gerçekleştirmiştir. Modal analizin gürültüyü oluşturan titreşimleri bulmak için gerekli olduğunu özellikle incelenmesi gereken bileşenlerin rezonans frekansları olduğu sonucuna varmıştır [27].

Fuminori Ishibashi ve arkadaşları bir çalışmada, asenkron motorların elektromanyetik akustik gürültüsü, statorun mekanik doğal frekansları manyetomotor kuvvetlerin frekanslarıyla çakıştığı veya bunlara yakın olduğu zaman üretildiğinden asenkron motorun yapısal özelliklerini belirlemesini ele almıştır. Basit boyunduruk halkadan bütün yapısal motora doğru doğal frekans değişimini deneysel, analitik ve yapısal sonlu eleman yöntemi analizi ile incelemiştir [28].

Jean Le Besnerais ve arkadaşları ‘Optimal Slot Opening Width for Magnetic Noise Reduction in Induction Motors’ makalesinde bir asenkron makinada ana manyetik kuvvet dalgalarını karakterize etmiştir. Bu kuvvetlerin büyüklük değerinde rotor oluşunu veya stator oluk açıklıklarının doğru bir şekilde seçilmesi ile ilgili yöntem sunulmuş ve hem simülasyonlar hem de deneylerle doğrulanmıştır. Bu yöntem tasarım aşamasında uygulanabilen bir yöntem olup oluk kaçak endüktansını artırmaz ve bir dizi farklı değerde oluk açıklığını seçebilen tasarımcıya bir dereceye kadar özgürlük sağlar. Sonuç olarak manyetik gürültüyü azaltmak için rotor ve stator oluk açıklıklarını azaltmayı öneren genel tasarım kuralının aksine, daha geniş bir oluk açıklığı doğru seçildiğinde gürültü seviyesinin düşürülebileceği gösterilmiştir [11].

Do-Jin Kim, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong, Kwang-Jin Kim ve Chul-Jun Park ‘A Study on the Design Process of Noise Reduction in Induction Motors’ makalesinde asenkron makinada meydana gelen gürültünün kaynaklarından biri olan manyetik gürültünün tasarım aşamasında azaltılmasına yönelik inceleme gerçekleştirmişlerdir.

Elektromanyetik uyarma kuvvetini ve kutup- oluk kombinasyonundan oluşan harmonik bileşenleri analiz etmişlerdir. Mekanik kısımda, rezonansı önlemek için braket, stator ve rotor çekirdekleri gibi motor bileşenlerinin doğal frekans modları sonlu elemanlar analizi (FEA) ile hesaplanmıştır. Tasarımda iyileştirme için rotor oluşuna eğiklik verilerek harmonik spektrumlara etkisi incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile makinanın yüksüz durumda gürültü analizi yapıp deneysel değerlerle karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak gürültü değerinde deney ve simülasyon arasında %7'nin altında fark bulunmaktadır [29].

G. Chun ve arkadaşları 'Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors' adlı makalede bir senkron relüktans motor için stator ve rotorun değişik kombinasyonlardaki oluklara uygulanan kaykışılmanın titreşim üzerindeki etkisini incelemiştir. Stator boyunduruğuna gelen radyal kuvvet dağılımının farklılaşması, sonlu elemanlar yöntemi ve dört prototip üzerinde deneysel testler ile kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Motorun endüktansı ve moment karakteristikleri üzerinde etkisini de ele almıştır. Deneysel sonuçlar ve sayısal modellemeler motor titreşimini azaltmada kaykışılmasının etkinliğini doğrulamaktadır. Test sonuçlarına göre SRM'lerde stator oluşuna uygulanan kaykışılmanın rotor oluşuna uygulanmasından daha etkili olduğunu göstermiştir [30].

Zelmira ve Vlademir yaptıkları 'Influence of Skewed Squirrel Cage Rotor with Intermediate Ring on Magnetic Field of Air Gap in Induction Machine' çalışmalarında farklı rotor geometrilerine sahip sincap kafesli asenkron makinaların hava aralığındaki akı yoğunluğu spektrumunu karşılaştırmaktadır. Ara halkalı eğritilmiş oluklu rotor ile eğritilmiş oluklu rotor uygulamasını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak normal rotorla karşılaştırmıştır. Düz rotor çubukları göz önüne alındığında, hava aralığı alanının spektrumu nispeten zengindir. Gürültü ve bastırılmamış parazitik torklar nedeniyle önemli rahatsızlıklar üretir. Kaykışılma uygulaması bazı tamsayı harmoniklerini (temel dalga dahil) etkili bir şekilde azaltır, ancak tam tersine, eksenel yön boyunca eşit olmayan alan dağılımının neden olduğu 0,5'inci sıra yan bantları ekler. Çapraz akımlar nedeniyle daha büyük yerel çekirdek doygunluğu, daha kötü verimlilik ve daha düşük güç faktörü ile sonuçlanır [31].

Houquan, Guihou, Jin ve Hailong 'Analysis and Study of Skewed Slot Tooth Distance on Low Electromagnetic Noise of Three-phase Induction Motor with Squirrel Cage

Rotor' çalışmalarında eğri oluklu sincap kafesli rotor üzerinde çok dilimli yöntemle elektromanyetik gürültüsünü ve titreşimini, farklı eğrilikli oluk dış mesafesi açısından incelemişlerdir. Bu yöntemin uygulanabilirliğini doğrulamak ve simülasyon sonuçlarının doğruluğunu incelemek için farklı eğrilikli oluk dış mesafesine sahip rotorlar kullanan üç prototip makine geliştirilmiştir [32].

Dong Quichao ve arkadaşları 'Analysis and evaluation of electromagnetic vibration and noise in permanent magnet synchronous motor with rotor step skewing' adlı çalışmalarında elektromanyetik gürültü simülasyon modelinin elektromanyetik gürültüyü tahmin etme ve değerlendirmedeki etkinliğini doğrulamaktadır. Elektromanyetik gürültüyü etkileyebilecek rotor oluşunu kademeli eğriltme modeli önermiş ve eğriltme açısının elektromanyetik gürültü üzerindeki etkisini detaylı olarak incelemiştir. Elektromanyetik gürültü üzerinde büyük etkisi olan düşük mertebeden radyal manyetik kuvvetin karakteristikleri incelenerek, rotoruna kaykı uygulanmış motorun ve normal rotorlu sabit mıknatıslı senkron motorun (PMSM) elektromanyetik gürültü özelliklerini karşılaştırmıştır. Elektromanyetik gürültünün frekansa göre değişimi, rotor eğriliği olan ve olmayan motor arasında tutarlıdır, ancak rotor oluşuna eğriltme uygulanan motorun ses şiddeti seviyesi, normal rotorlu motordan daha yüksektir. Bunun nedeni, kalıcı mıknatıslar tarafından belirlenen ana akı eksenine, sargılar tarafından belirlenen ana akı eksenine bir açıda olduğunda daha fazla harmonik manyetik potansiyel üretilir ve bu harmonik manyetik potansiyellerin neden olduğu düşük dereceli radyal manyetik kuvvet, motor sesleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [33].

Literatürde yapılan çalışmaların bir kısmı elektrik makinalarında meydana gelen gürültü ve kaynaklarını inceleyip makina üzerinde etkilerini çeşitli yönlerden ele almışlardır. Ayrıca elektrik makinasında meydana gelen gürültüyü azaltmak için tasarım aşamasında alınması gereken önlemlerle ilgili çalışmalarda bulunmaktadır. Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile tasarım basamağında bilgisayar destekli araştırmalar hız kazanmış yapılan modellemeler ile gerçeğe yakınsama oranı artmıştır. Araştırmaların bir kısmı yapılan modellemeler üzerine üretilen prototip üzerinde test çalışmaları ile bu durumu doğrulamışlardır.



2. ASENKRON MOTOR

2.1 Asenkron Motorun Yapısı

Asenkron motorlar, düşük maliyetleri ve yüksek güvenilirlikleri nedeniyle endüstride, ticari ve yerel pazarlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğru akım ve mıknatıslı makinalara göre kontrol yapıları daha karmaşıktır bu durum matematiksel modelin doğrusal olmamasından kaynaklanır. Güç elektroniği ve sinyal işlemedeki son gelişmeler sayesinde hızlarını kontrol etme kabiliyetleri bulunmaktadır. Asenkron motorların uygulamaları, enerji sektörü, yiyecek ve içecek, metal işleme, tekstil ve kamu hizmetlerinden ev aletlerine kadar birçok endüstri sektöründe çeşitlilik gösterir [34].

Asenkron motorlarda fırça, komütatör veya kayma halkası bulunmayışı, kayıp değerlerini azaltmasının yanında bakıma gerek kalmadan sorunsuz çalışmasına olanak sağlar. Böylece doğru akım motorlarında kolektör dilimleri ile fırçalar arasında meydana gelen ark olayları da asenkron motorda gözlenmez [35].

Asenkron motoru oluşturan genel elemanlar; stator, rotor, gövde ve rulmanlardır. Stator, döner alanın oluşmasına olanak sağlayan üç fazlı sargıları içeren bölümdür. İçerdiği sargı yapısı ve kutup sayısı tasarım kriterlerine göre motordan motora farklılık gösterebilir. Statorun sargısı ile meydana gelen manyetik alanın etkisinde kalarak enerji dönüşümünün gerçekleştiği hareketli kısım ise rotordur. Asenkron motorlar rotor tipine göre çeşitlilik gösterir. Sincap kafesli ve sargılı rotor olarak iki çeşittir.

2.2 Asenkron Motorun Çalışma Prensipleri

Asenkron motorlar bir fazlı ve üç fazlı olarak üretilirler. Statorunda bulunan 3 fazlı sargılar geometrik olarak aralarında 120 derece olacak şekilde oluklara yerleştirilir. Bu sargılar 3 fazlı bir alternatif gerilim kaynağından beslendiğinde makinanın hava aralığında döner manyetik alan oluşur. Üç farklı kaynaktan eş genlikli, fakat aralarında 120 derece yani radyan olarak $2\pi/3$ üç adet gerilim ile beslendiğinde bu gerilimlerin

akıtacakları akımların arasında da aynı miktar faz farkları olacaktır. $I_{\max}$ akımın maksimum değeri, ω açısal frekansı, i_R , i_S ve i_T faz akımlarının zamana göre ifadeleridir. Dolayısıyla her akımın içinden geçtiği sargıda meydana getirdiği amper-sarım, bu faz farkına uygun olan gecikme ile titreşir [34-36].

$$i_R = I_{\max} \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

$$i_S = I_{\max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.2)$$

$$i_T = I_{\max} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.3)$$

N adet sarım sayısı için $N(x)$ sarım ifadeleri de ardışık fazlar için 120 derece ötelenir. Böylece R, S, T fazları için sarım sayıları,

$$N_R = N \sin(x) \quad (2.4)$$

$$N_S = N \sin(x - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.5)$$

$$N_T = N \sin(x - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.6)$$

Makinada üretilen toplam amper-sarım ise, her faza ait amper sarımın toplanması ile elde edilir. R, S, T fazlarının ürettiği amper-sarım sırasıyla; $F_R(x, t)$, $F_S(x, t)$, $F_T(x, t)$ 'dir.

$$F(x, t) = F_R(x, t) + F_S(x, t) + F_T(x, t) \quad (2.7)$$

$$F = N_R I_R + N_S I_S + N_T I_T \quad (2.8)$$

Denklem 2.3'teki ifadeler yerine yazılıp trigonometrik özdeşlikler çözüldüğünde toplam amper-sarım (F);

$$F = \frac{3}{\sqrt{2}} N I_{\max} \sin(x - \omega t) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9 toplam amper-sarımın fazör büyüklük olarak ifade şeklidir.

$$F = \frac{3}{\sqrt{2}} N I_{\max} e^{j\omega t} \quad (2.10)$$

Manyetik alanın dönme hızına ‘senkron hız’ denir ve n_s ile ifade edilir. Senkron hız frekansla (f) doğru, kutup çifti (p) ile ters orantılıdır.

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad (2.11)$$

n_s hızı ile dönen manyetik alan vektörü durağan halde olan rotor iletkenlerinde Faraday yasasına göre gerilim indüklenir. Rotor sargısının uçları kısa devre edilmiş rotor çubuklarından bir akım akmaya başlar ve Biot-Savart yasasına göre kuvvet üretir. Bu kuvvet sayesinde rotor kendiliğinden hareket eder ve asenkron makina dönmeye başlar [36].

Kalkış anında durmakta olan rotor yavaş yavaş hızlanarak senkron hıza ulaşmaya çalışır fakat ulaşamaz. Çünkü hızlanmakta olan rotor ile döner alan arasındaki hız farkı yavaş yavaş azalmaya başlar ve manyetik alan vektörü, iletken düzlemlerinden birim zaman içinde daha seyrek geçer. Bunun sonucu rotorda indüklenen gerilim azalır ve rotordan akan akım değeri düşer. Sonuç olarak rotor hızı senkron hıza çok yakın bir değerde ama senkron hızdan düşük değerde seyreder. Senkron hız ve rotorun hızının arasındaki farkın senkron hıza oranına kayma (s) denir ve denklem 2.12’de gösterilmektedir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.12)$$

Kayma oranı 0 ile 1 arsında değer alabilir ve bu değerler asenkron motor çalışma durumunu belirtir.

Çizelge 2.1 : Asenkron makinanın kayma ile çalışma şekli arasındaki ilişki.

Rotor Hızı (n_r)	Kayma (s)	Çalışma Şekli
$n_r < n_s$	$0 < s < 1$	Motor Çalışma
$n_r > n_s$	$s < 0$	Generatör Çalışma
n_r	$s > \pm 1$	Fren Çalışma
$n_r = n_s$	$s = 0$	Boşta Çalışma
$n_r = 0$	$s = 1$	Transformatör Çalışma

İlk kalkış anında rotor hareketsiz ise, asenkron makina sekonderi kısa devre olan bir “transformatör” gibi çalışır. Hareket başladıktan sonra sürekli çalışma hızına ulaşıncaya kadar ve ulaşıncaya “motor” çalışma olarak adlandırılır. Stator sargısı beslenen fakat rotoruna akım geçemeyen makina sıfır güç üretir buna “boşta” çalışma denir. Rotorun dışarıdan kuvvet yardımıyla senkron hızın üzerine çıkmasıyla makina mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek “generatör” çalışır. Makinanın çalışma yönüne ters bir moment üretilirse makina yavaşlar buna “fren çalışma” denir. Çizelge 2.1 kayma ile çalışma şekli ilişkisini göstermektedir.

2.3 Asenkron Motorda Ana Boyut Tayini

Tasarım sürecinde makinanın ana boyutlarını optimal değerlere yakın olarak belirlemek elektriksel ve manyetik özellikleri iyileştirmektedir. Dolayısı ile makinadan alınan güç değeri ilişkilidir.

D stator iç çapı (mm), L sac paketi uzunluğu (mm), P_n makinanın nominal güç değeri (kVA), C faydalanma katsayısı ($kVA \cdot dk/m^3$), k_w sargı faktörü, A çevresel akım yoğunluğu, P motor giriş gücü, B hava aralığı endüksiyonu olmak üzere;

$$P_n = C * D^2 * L * n_s \quad (2.13)$$

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2} * 60} * k_w * A * B * 10^{-3} \quad (2.14)$$

Standart elektrik makinaları için izin verilen manyetik alan yoğunlukları, akım yoğunlukları sırasıyla Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’te verilmiştir [37-38].

Çizelge 2.2 : Asenkron makina bölümlerinde beklenen manyetik alan yoğunlukları.

Asenkron Makina Bölümleri	Manyetik Alan Yoğunlukları (T)
Hava Aralığı	0.7 – 0.9
Stator Boyunduruğu	1.4 – 2.0
Stator Diş	1.4 – 2.1
Rotor Diş	1.5 – 2.2
Rotor Boyunduruğu	1.0 – 1.9

Çizelge 2.3 : Asenkron makina bölümlerinde beklenen akım yoğunlukları.

Asenkron Makina Bölümleri	Akım Yoğunluğu
Stator Sargısı	3.0 – 8.0 (A/mm ²)
Alüminyum Rotor Çubukları	3.0 – 6.5 (A/mm ²)
Çevresel	30 – 65 (kA/m)

$D^2 \cdot L$ arasındaki ilişki ve λ sabiti sayesinde D (m) ve L (m) boyutları belirlenebilir. K_E indüklenen gerilimin giriş gerilimine oranıdır, S_g ise hava aralığı gücü (VA), τ kutup aralığı, D_o stator dış çapı(m), η makinanın verimi, $\cos\phi$ güç faktörü olmak üzere;

Çizelge 2.4 : Kutup sayısına göre λ sabiti.

Kutup Sayısı ile λ Değişimi				
2p	2	4	6	8
λ	0.6 – 1.0	1.2 – 1.8	1.6 – 2.2	2.0 – 2.3

Kutup sayısına göre λ değişimi Çizelge 2.4’te verilmiştir.

$$D = \sqrt[3]{\frac{2p}{\pi\lambda} * \frac{p}{f} * \frac{S_g}{C}} \quad (2.15)$$

$$K_E = 0.98 - 0.005p \quad (2.16)$$

$$S_g = \frac{K_E * P_n}{\eta * \cos\phi} \quad (2.17)$$

$$\lambda = L * \left(\frac{2 * p}{\pi * D} \right) = \frac{L}{\tau} \quad (2.18)$$

Stator iç çapının dış çapına oranının kutup sayısına göre değişimi Çizelge 2.5’te görülür.

Çizelge 2.5 : Stator iç çapının dış çapına oranının kutup sayısına göre değişimi.

Stator İç Çapının Dış Çapına Oranının Kutup Sayısına İle Değişimi				
2p	2	4	6	8
λ	0.6 – 1.0	1.2 – 1.8	1.6 – 2.2	2.0 – 2.3

Hava aralığı g , kutup sayısına göre denklem 2.19 ve denklem 2.20 arasında seçim yapılarak hesaplanır. Hava boşluğunun çok küçük olması, büyük uzay hava aralığı alanı harmonikleri ve ek kayıplar üretirken, çok büyük olması güç faktörünü ve verimliliği azaltacaktır.

$$g = (0.1 + 0.02\sqrt[3]{P_n}) * 10^{-3} \text{ (m)} \quad 2p = 2 \quad (2.19)$$

$$g = (0.1 + 0.012\sqrt[3]{P_n}) * 10^{-3} \text{ (m)} \quad 2p \geq 2 \quad (2.20)$$

$$D_{ro} = D - 2g \quad (2.21)$$

Q_s stator oluk sayısı olsun bu olukların arasındaki geometrik açı γ_{geo} denklem 2.22 ile hesaplanır. Olukların arasında bulunan elektriksel açı γ_{elk} ise kutup sayısı ile bağlantılıdır ve geometrik açı ile elektriksel açı arasındaki bağlantı denklem 2.23’de verilmiştir. Bir faz ve kutup başına düşen oluk sayısı denklem 2.24’de gösterilmiştir.

$$\gamma_{geo} = \frac{360^\circ}{Q_s} \quad (2.22)$$

$$\gamma_{elk} = p * \gamma_{geo} \quad (2.23)$$

$$q = \frac{Q_s}{2 * p * m} \quad (2.24)$$

Sargı faktörü k_w ’nin iki bileşeni mevcuttur. Bunlar kırıleme faktörü (k_p) ve dağılma faktörüdür (k_d). Sargı faktörü 0 ile 1 arasında herhangi bir değer alabilir. Bobin adımının kutup adımından farklı olması durumunda kırılenmiş sargı oluşur. Denklem 2.27’de ifade edilen β kırıleme açısıdır. Bazı uzay harmonikleri kırıleme açısına göre yok edilebilir [36].

$$k_w = k_p * k_d \quad (2.25)$$

$$k_d = \frac{\sin(q * \frac{\gamma_{elk}}{2})}{q * \sin(\frac{\gamma_{elk}}{2})} \quad (2.26)$$

$$k_p = \cos(\frac{\beta}{2}) \quad (2.27)$$

$$E = 4.44 * k_w * n_q * f * \emptyset \quad (2.28)$$

$$\emptyset = \frac{2}{\pi} * B * \tau * L \quad (2.29)$$

Denklem 2.28 indüklenen gerilim değerini gösterirken n_q faz başına sarımı ve $\emptyset$ akı değerinin simgeleridir. Z toplam iletken sayısı ve Z_q oluk başına düşen iletken sayısı olmak üzere denklem 2.30 ve 2.31 ile hesaplanır.

$$Z = 2 * m * n_q \quad (2.30)$$

$$Z_q = \frac{Z}{Q_s} \quad (2.31)$$

A_{co} iletken kesiti (mm^2), I_n faz akımı (A), J_{cos} stator akım yoğunluğu (A/mm^2) olmak üzere denklem 2.32 ve Çizelge 2.6 yardımıyla hesaplanır.

$$A_{co} = \frac{I_n}{J_{cos}} \quad (2.32)$$

Stator boyunduruğunun yüksekliği h_{cs} hesabında Çizelge 2.2'den uygun manyetik alan yoğunluğu seçimi yapılarak denklem 2.33'de yerine konur.

$$h_{cs} = \frac{\emptyset}{2 * L * B_{cs}} \quad (2.33)$$

Rotor geometrisine ait parametrelerin hesabı için; rotor iç çapı (D_{ri}), I_{rb} rotor bar akımı (A), Q_r rotor oluk sayısı, A_{rb} rotor bar kesiti (mm^2), J_{rb} rotor bar akım yoğunluğu (A/mm^2); bulunacak, rotor bar kesit alanı rotor oluk alanına eşit olacaktır.

$$I_{rb} = 0.95 * \frac{\pi * D * A}{Q_r} \quad (2.34)$$

$$A_{rb} = \frac{I_{rb}}{J_{rb}} \quad (2.35)$$

$$D_{ri} = D_{ro} - 2h_r - 2b_r \quad (2.36)$$

Denklem 2.35 ile A_{rb} hesabı yapıldıktan sonra rotordaki çubukların yüksekliğinin (h_r) genişliğe (b_r) oranı (2.5- 4) olacak şekilde seçim yapılabilir. Tabi bu durumda uygun

değerleri yakalamak için bir program aracılığı ile optimizasyon yapmak daha sağlıklı sonuçlar verecektir [34].

Analitik yöntemler makina tasarımı için büyük önem arz eder. Fakat analitik hesaplamalarda yapılan kabuller ve doyma gibi hassas değerlerin ayrıntılı olarak ele alınamaması bir dezavantaj olarak düşünülebilir. Makina tasarım ve modelleme programları ile ideal değere yakınsama daha kolay bir şekilde ve doğruluğu daha yüksek bir oranla sağlanabilmektedir.

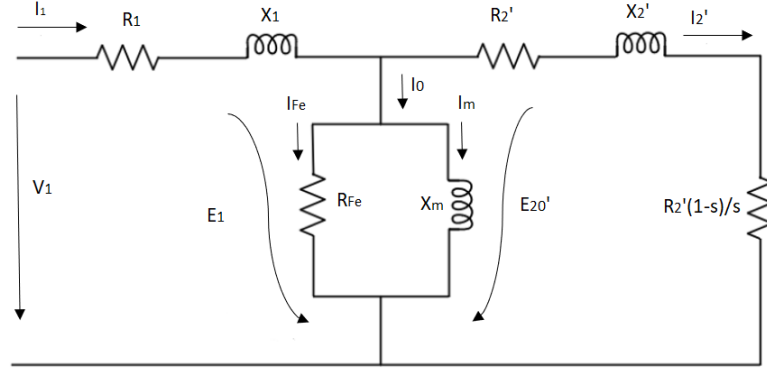
2.4 Eşdeğer Devre Parametreleri ve NEMA Tasarım Sınıfları

Asenkron makinalar ve senkron makinalar gibi herhangi bir elektrikli makinasının eşdeğer devresi, makina sargılarının dirençlerini ve reaktanslarını temsil eden çeşitli parametreleri gösterir. Faz sayısı ve güç değeri arttıkça fazlara ait değerlerin hesabı zordur. Bu yüzden işlem kolaylığı sağlamak ve devresel yapıyı basitleştirmek için makinanın bir fazına ait modeli çıkartıp hesaplamalara devam edilir. Bir fazı temsil eden elektriksel devreye “eşdeğer devre” denir [39].

Bazı kabuller yapılarak devrede sadeleştirme yapılır.

- Manyetik devrenin lineer bölgede çalışması
- Hava aralığı manyetik akısının sinüzoidal olması
- Faz sargılarının birbirine eşit olması
- Hava aralığının uniform olmasıdır.

Şekil 2.1’de gösterilen parametreler stator ve rotor dirençlerini, sızıntı ve mıknatıslanma endüktanslarını ve çekirdek kayıp eşdeğer direncini temsil eder. V_1 faz nötr gerilimini, I_1 faz akımını, R_1 stator direncini, X_1 kaçak reaktansı, R_{Fe} motorun demir kayıplarını oluşturan direnci, I_{Fe} demir direncinden geçen akımı, bu direncin uçlarındaki gerilim E_1 , X_m mıknatıslanma reaktansını, I_m mıknatıslanma akımını, I_0 boşa akımı, R_2 rotor direncini, X_2 kaçak reaktansı ifade eder.



Şekil 2.1 : Asenkron motorun eşdeğer devresi [39].

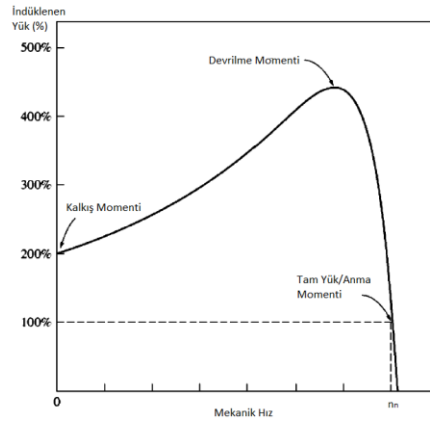
Statora indirgenmiş rotor direnci ve kaçak reaktansı R_2' ve X_2' ayrıca Sekonderden akan gerçek rotor akımı tarafından üretilen amper-sarım değerini primer sargıda elde etmek için var olmayan hayali I_2' akımı aktığı düşünülür. Çıkışta bulunan $R_2'(1-s)/s$ ifadesi de makinadan alınan gücü veren direnci temsil eder [36]. Bu durumda milden alınan güç (P_ζ) ve moment (M) değerleri denklem 2.37 ve denklem 2.38 yardımı ile hesaplanabilir.

$$P_\zeta = m * \frac{E^2}{R_2'^2 + X_2'^2} * R_2' * \frac{1-s}{s} \quad (2.37)$$

$$M = \frac{P_\zeta}{2 * p * n} \quad (2.38)$$

$$M_d = \frac{m}{2 * \pi * n_s} * \frac{E_{20}'^2}{X_2'} \quad (2.39)$$

Şekil 2.2’de motorun kalkış anından senkron hızına ulaşana kadar üretilen moment değişimini gösteren moment – hız grafiğidir. Grafikte görüldüğü gibi motorun hızının sıfır ($n=0$), kayma değerinin de 1’e ($s=1$) eşit olduğu konumda makinanın ürettiği moment değerine “kalkış momenti (yol verme)” denir. Kalkış moment değerinin değiştirmek için çeşitli yol verme teknikleri bulunmaktadır. Bir motor kalkış yaptıktan sonra yani hızın sıfır olduğu yerden senkron hıza ulaşana kadar hızlanır. Momentin maksimum olduğu değere “devrilme momenti” denir [36]. Denklem 2.39’da görüldüğü üzere makinanın reaktansı ne kadar küçükse maksimum moment değeri o kadar artma eğilimindedir.



Şekil 2.2 : Asenkron motor moment-hız değişimi [40].

Motor kalkış anında çok yüksek akımlar çeker bu durum şebekede geçici ve büyük gerilim düşümüne neden olur. Bu durum makina sargılarının ısınmasına ve yüksek joule kayıplarına neden olur. Bu yüzden makinanın kalkış anında çektiği akım değerini düşürmek ve kalkış momentin artırmak için çeşitli yol verme teknikleri mevcuttur.

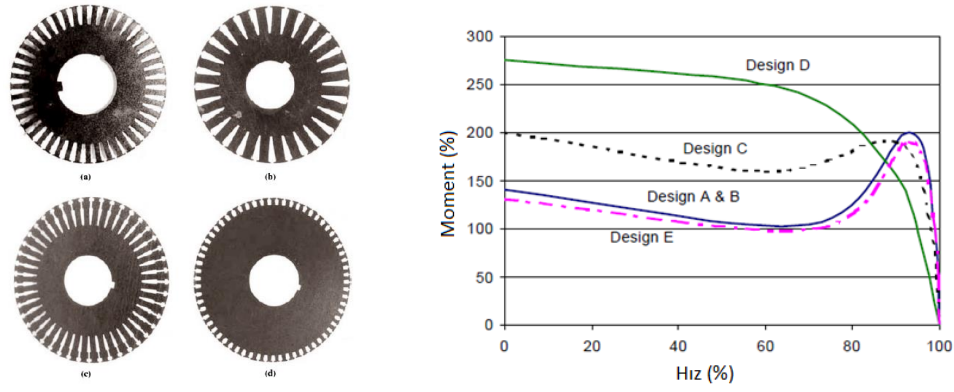
Motor tasarımında istenen performans ve işletme değerleri için önemli olan bir noktada oluk yapısıdır. Çeşitli uygulamalar için uygun motor seçiminde, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki NEMA ve Avrupa'daki Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), farklı moment-hız eğrilerine sahip bir dizi standart tasarımları vardır. 4 ayrı tasarım sınıfının belirgin özellikleri verilmiş ve Şekil 2.3'de karşılaştırmalı olarak moment-hız grafiği ve oluk şekilleri verilmiştir [40].

Derin rotor çubukları veya çift kafesli rotorlar kullanılarak değişken bir rotor direnci üretmek mümkündür.

NEMA A sınıfı rotor çubukları nispeten geniş ve yüzeye yakın yani hava aralığına yakın konumdadır. Rotor direnci küçük olduğu için, motorun kalkış momenti normal ve kalkış akımı yüksektir. Bu motorlar için tipik uygulamalar, tahrik fanları, üfleyiciler, pompalar, torna tezgahları ve diğer takım tezgahlarıdır [3].

NEMA B sınıfı rotor çubukları geniş ve derin yapıya sahiptir. Şekil 2.3 'de görüldüğü gibi kalkış momenti A sınıfına yakın bir değerdedir, kalkış akımı ise A sınıfından daha düşüktür.

NEMA C sınıfında çift kafesli rotor yapısı kullanılmaktadır. Nominal yükte düşük kalkış akımı, düşük kayma ve yüksek bir kalkış momenti özelliklerine sahiptir. Yüksek kalkış momentine ihtiyaç duyulan pompalar, kompresörler gibi uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2.3 : NEMA oluk sınıfları ve hız-moment eğrileri [40,41].

NEMA D sınıfı yüzeye yakın küçük rotor çubuklarını içerir. Bu tip oluk yapısını içeren motorların kalkış momenti (nominal momentin en az %275'i), düşük bir kalkış akımına sahiptir, ancak aynı zamanda tam yükte yüksek bir kayma değeri vardır. A sınıfı gibidir, ancak rotor çubukları daha küçük ve daha yüksek dirençli bir malzemeden yapılmıştır.

Ayrıca artık kullanılmayan NEMA E ve F sınıfı da bulunmaktadır. Bu tasarımlar, çok düşük kalkış akımlarına sahiptirler. Başlangıç akımlarının sorun olduğu durumlarda düşük momentli yükler için kullanılıyordu.

2.5 Harmonik Analiz

Bir asenkron motorun beslenmesi sinüzoidal formunda olmasına rağmen oluklara yerleştirilmiş sargıların sinüzoidal dağıtılmaması durumundan amper sarım ifadesi idealde istenen saf sinüzoidal şekline sahip olamaz [42]. Denklem 2.8'de ifade edildiği gibi amper sarım konuma ve zamana göre değişmektedir, uzay harmonik değerleri de bu sebeple dinamik değişime sahiptir.

Bir elektrik makinesindeki uzay harmonikleri, harmonik sıraya bağlı olarak ileri veya geri dönen dalgalar üretebilir. Simetrik üç fazlı makineler için, stator sargısı tarafından oluşturulan, n düzenindeki uzay harmonikleri için genel ifade; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ tam sayı olmak üzere;

$$\text{Uzay Harmoniği } (n) = 6m \mp 1 \quad (2.40)$$

Uzay harmonikleri tamamen yok edilemese de uygun tasarım optimizasyonu ile daha büyük bir seviyede bastırılabilirler. Uzay harmoniklerinde çift harmonik genlikleri 3

faz akım – gerilim dalga şekli gereği sıfırdır. 3 ve 3'ün katı harmonikler döner alan oluşturmamasından gerilim indüklemeyi ve moment üretmez, bunun için göz önüne alınmazlar. Denklem 2.40'ta ifadenin “-” olması durumunda uzay harmonikleri temel bileşene zıt yönde, “+” olması durumunda temel bileşenle aynı yönde dönerler. Açıklamaya uygun olarak; 5., 11. ve 17. derecenin harmonikleri geriye doğru dönerken, 7., 13. ve 19. dereceden olanlar ileri doğru döner. Bu harmonikler, frenleme ve parazitik torkların oluşması nedeniyle motorun çalışması üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir [43].

Özetle, hava aralığı manyetik alanındaki harmonikler, uzay harmonikleri olarak bilinmektedir. Uzay harmonikleri, elektrikli makinelerin içindeki dönen manyetik alan üretim mekanizmasının yan ürünleridir, dolayısıyla tamamen ortadan kaldırılamazlar. Bu harmonikler makinenin performansında ek gürültüye, titreşime, ek kayıplara neden olur ve asenkron motorların kalkış performansını olumsuz etkiler. [43]. Stator sargılarında, stator ve rotor geometrilerinde çeşitli tasarım teknikleri uygulayarak uzay harmoniklerinin değeri azaltılması amaçlanır.

3. ELEKTRİK MAKİNALARINDA GÜRÜLTÜ ÜRETİMİ VE YAYILIMI

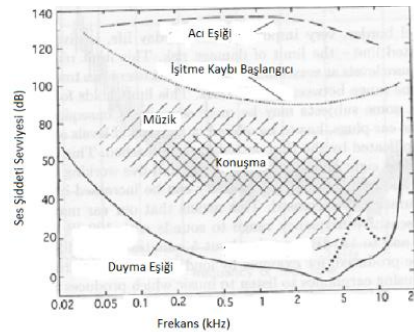
3.1 Ses, Gürültü ve Titreşim Tanımı

Titreşim, elastik bir cismin dengesi bozulduğunda, denge konumundan sınırlı miktarda yapmış olduğu salınımsal ileri geri hareketidir. Titreşim için sistem iki özelliğe sahip olmalıdır: esneklik ve kütle. Titreşimin genliği, titreşen bir parçacığın veya cismin denge konumundan yer değiştirme genliğine göre değişir. Ses, insan kulağının yaklaşık 20 ila 20.000 Hz aralığında frekanslara sahip elastik bir katı, sıvı veya gaz yoluyla iletilen titreşimler olarak tanımlanır. Ses dalgaları, dalga hızı, dalga boyu, frekans ve genlik ile karakterize edilen küçük genlikli adyabatik (ısı alışverişi olmayan) salınımlardır [44].

Gürültü, hoşnut olmayan veya istenmeyen sestir. Havadan yayılan gürültü, büyük hacimli havanın hareketinden ve yüksek basınç kullanımından kaynaklanan gürültüdür. Yapı kaynaklı gürültü, katı cisimlerin titreşimleriyle taşınan sestir. Ses genliği, ses basınç seviyesi (SPL), ses yoğunluğu seviyesi (SIL), ses gücü seviyesi (SWL) ve ses enerjisi yoğunluğu (SED) olarak ölçülebilir [44].

3.2 Ses Şiddeti Seviyeleri ve Gürültü Kontrol Önlemleri

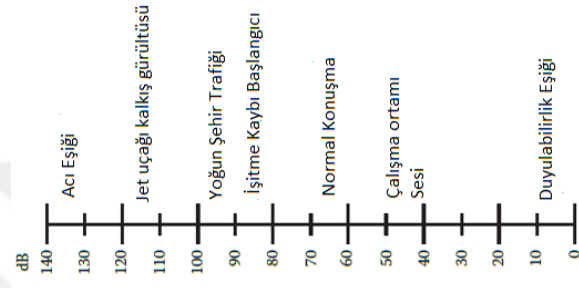
Bir insan kulağı, frekansları yaklaşık olarak 20 ila 20.000 Hz (ses frekansı aralığı) arasında olan yeterli yoğunluktaki ses dalgalarını algılayabilir. Sesin insan kulağı tarafından algılanabileceği belirli bir frekans için minimum ses yoğunluğu vardır.



Şekil 3.1 : Frekansa göre ses şiddeti seviyesi değişimi [45].

Minimum ses yoğunluğu, farklı frekanslar için farklıdır ve duyulabilirlik eşiği olarak adlandırılır. Şekil 3.1, tüm ses frekansı aralığı için duyulabilirlik bölgesini göstermektedir.

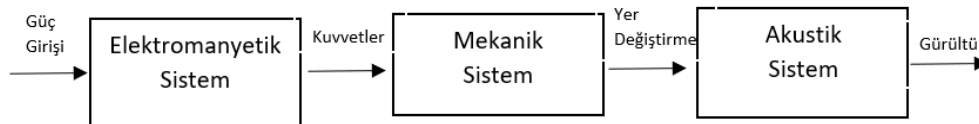
Kulak tarafından algılanabilen ses yoğunluğu aralığı, 20 μPa ses basıncına karşılık gelen 10^{-12} ila $1 \text{ W} / \text{m}^2$ 'dir. Kulağın ağrı hissettiği maksimum ses yoğunluğuna acı eşiği denir. Aşırı yüksek (acı eşiğinde) ses genlikleri 100 Pa'lık basınç genliklerine sahiptir. Bazı çevresel gürültü seviyeleri Şekil 3.2'de çizelge olarak verilmiştir.



Şekil 3.2 : Çevresel gürültü seviyeleri [44].

3.3 Elektrik Makinalarında Gürültü Kaynakları ve Enerji Dönüşümü

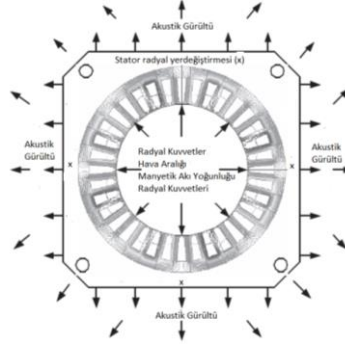
Elektrik motorlarının çeşitli sebeplerden dolayı artan işitilebilir gürültü ve titreşimle birlikte, rezonans konusu çalışmaları kritik bir husus haline gelmiştir. Fakat makinelerin çeşitli sebeplerden daha hafif, gürültüsüz, daha güvenilir ve kullanıcı dostu olması gerekmektedir. Makinanın giriş gücünün bir kısmı ısı olarak dağıtılır, bir kısmı soğutma sistemi tarafından harcanır ve daha küçük olan üçüncü bir kısmı ise ses gürültüsü olarak kaybolur. Şekil 3.3'te bir elektrikli makinada elektrik enerjisinin akustik enerjiye dönüşüm işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Elektrik makinasında gürültü oluşumu [44].

Gürültü ve yer değiştirmenin temsili gösterimi Şekil 3.4'te 2B olarak bir elektrik makinası üzerinde gösterilmiştir.

Titreşim için ilgili frekans aralığı genelde 0 ila 1000 Hz olmakla birlikte gürültü için 1000 Hz'in üzeridir [44]. Elektrik makinalarında meydana gelen titreşimler 3 gruba ayrılır; elektromanyetik kaynaklar, mekanik kaynaklar ve aerodinamik kaynaklardır.



Şekil 3.4 : Gürültü oluşumunun elektrik makinası üzerindeki gösterimi [44].

Elektrikli makinalarına iletilen titreşimler ise;

- Makina yüke bağlanmasından kaynaklanan titreşim. Örneğin; milin yanlış hizalanmasıdır.
- Makinanın monte edildiği tabandan (veya başka bir yapıdan) makineye iletilen titreşim. Örneğin binalara veya yapılara geçen kamyonlardan iletilen titreşimler, doğal olayların neden olduğu titreşimlerdir [46].

Bir elektrik motoru tarafından yayılan gürültüsü, motor ses emici malzemelerle çevrelenmişse azaltılabilir. Ancak bu çözüm genel olarak ekonomik değildir ve ayrıca motorun termal özelliklerini değiştirebilir. Elektrik motorlarının ürettiği gürültüyü azaltmanın en iyi yolu, gürültünün nedenlerini bilmek optimize ederek tasarım aşamasında gürültüyü azaltmaktır [24].

3.3.1 Aerodinamik gürültü kaynakları

Aerodinamik gürültü ana kaynağı fandır. Hava akışındaki her engel titreşim meydana getirebilir. Düşük güçte ve yüksek hızlı elektrik makinalarında, özellikle 2 kutuplu senkron makinalar, için bu gürültü önemlidir. Aerodinamik gürültü, özel montaj tasarımı, akustik emicilerin kullanımı ve uygun soğutma fan tasarımı ile kontrol edilebilir [47].

3.3.2 Mekanik gürültü kaynakları

Mekanik gürültüye neden olan birçok mekanik ekipman bulunmaktadır fakat asenkron motor için özellikle rulmanlar ve rotor dengesi büyük öneme sahiptir. Rotorun hassas bir şekilde dengelenmesi titreşimi önemli ölçüde azaltabilir. Eğer dengelenme düzgün değilse, rotorun dengesizliği dinamik titreşime ve eksantrikliğe neden olur, bu da stator ve rotorun titreşim emisyonlarının artmasına neden olur.

Rulmanlardan kaynaklanan gürültü, rulman parçalarına, dış bileziğin mekanik rezonans frekansına, dönüş hızına, yağlama koşullarına, toleranslara, hizalamaya, yüke, sıcaklığa ve yabancı maddelerin varlığına bağlıdır [44-47].

3.3.3 Elektromanyetik gürültü kaynakları

Manyetik kaynaklı titreşim ve gürültü, rotor eksantrikliği, faz dengesizliği, yüksek uzay ve zaman harmonikleri, oluk açıklıkları, kullanılan manyetik malzemenin doyması ve çekirdek laminasyonlarının manyetostriktiflik etki gibi etkenlerden meydana gelmektedir.

Bu kısımda elektromanyetik kuvvetin stator üzerinde oluşturduğu etki inceleneceği için bu kısma ağırlık verilecektir. Stator bobinlerinin uyarılması, stator ve rotor yüzeylerinde oluşan manyetik kuvvetlere yol açarak elektromanyetik moment üretimine neden olur. Rotor yüzeyinden statora iletilen kuvvetler çok küçük bir yer değiştirme oluşturur. Stator yapısının uyarılma nedeniyle periyodik olarak yer değiştirmesi titreşime neden olur. Stator titreşimi, stator çekirdeğinin iç yüzeyine etki eden elektromanyetik kuvvet tarafından indüklenir [48].

Bir elektrikli makinede üç tür manyetik kuvvet vardır:

1. Farklı manyetik özelliklere sahip malzemelerin sınırlarına etki eden relüktans kuvveti.
2. Manyetik alandaki akımlara etki eden Lorentz kuvveti.
3. Demir çekirdeğin içine etki eden manyetostriktif kuvvet.

Stator ve rotor arasındaki hava boşluğu, relüktans kuvvetinin etki ettiği bölgedir ve dış uçları özellikle yapıya parazitik enerji iletmek için kuvvetlerin bir ara yüzü görevi görür. Kuvvetler olukların geometrisine, hava boşluğunun uzunluğuna, sargı yapısına, manyetik doygunluğa ve oluk eğriliği gibi etkenlere bağlıdır [17-47].

3.4 Stator Geometrisinin Doğal Frekans Hesabı

Modal analiz, motorların titreşim özelliklerini inceleyen önemli bir adımdır. Stator manyetik çekirdeği, dönen elektrikli makinaların doğal frekanslarının özellikleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Titreşimi ve akustik gürültüyü doğru bir şekilde tahmin etmek için, bir statorun doğal frekansını doğru bir şekilde hesaplamak gerekir. Elektromanyetik dalganın harmonik bileşenlerinin frekansları statorun doğal

frekanslarına yakın olduğunda, stator rezonans durumunda olacaktır, bu da büyük bir genlikli titreşim gürültüsüne neden olur [44].

K_m statorun sertlik katsayısı, M_m statorun kütlesi ve “m” çevresel titreşim modu, makina sisteminin statorunun doğal frekansı şu şekilde basitleştirilebilir;

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} \quad (3.1)$$

$$K_m = \frac{4\Omega_m^2}{D_m} * \frac{\pi \cdot L \cdot h_{cs} E_c}{1 - \nu_c^2} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de; E_c elastisite modülü, ν_c ise poisson oranı ve D_m ortalama stator çapı olmakla birlikte Ω_m ifadesi m değerine göre değişen parametredir [44].

- Çevresel mod $m=0$ için;

$$\Omega_0 = 1 \quad (3.3)$$

- Çevresel mod $m \geq 1$ için;

$$\Omega_m = \frac{1}{2} \sqrt{(1 + m^2 + \kappa^2 m^4) \mp \sqrt{(1 + m^2 + \kappa^2 m^4)^2 - 4\kappa^2 m^6}} \quad (3.4)$$

- κ boyutsuz parametre

$$\kappa^2 = \frac{h_c^2}{3 \cdot D_m^2} \quad (3.5)$$

ω_m m modunun açısal doğal frekansı; ω_r r mertebesindeki kuvvet bileşeninin açısal frekansı, ζ_m sönümlleme oranı, F_m uyarıcı kuvvetin değeri olmak üzere; titreşim modundaki yer değiştirmenin (A_m) büyüklüğü,

$$A_m = \frac{\frac{F_m}{M_m}}{\sqrt{(\omega_m^2 - \omega_r^2)^2 + 4\omega_m^2 \omega_r^2 \zeta_m^2}} \quad (3.6)$$

Statorun modal analizi, denklemlerden de anlaşılacağı gibi yapı parametreleriyle yakından ilgilidir. Stator çekirdeğine ait boyunduruk kalınlığı, dış genişliği, dış derinliği gibi özellikler doğal frekansları etkileme eğilimindedir [49].

3.5 Akustik Ses Gücü ve Basınç Hesabı

Statordan yayılan ses, elektromanyetik kuvvetteki uzay / zaman harmoniklerinin frekansı, stator titreşim modlarının doğal bir frekansına yakın olduğunda gürültü tehlikeye yol açar. Bu frekansta, statorun titreşim davranışına özel mod hakimdir ve bu moddan yayılan ses, toplam ses gücünde önemli bir rol oynar. “m” modu için statorun dış yüzeyinden yayılan ses gücü Π denklem 3.7 ile hesaplanabilir [44].

$$\Pi \simeq \Pi_m = \rho_0 c_0 \omega A_m \sigma_m 2S_f \Pi \simeq \Pi_m = \rho_0 c_0 \left(\frac{\omega A_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \sigma_m S_f \quad (3.7)$$

Burada S_f statorun dış yüzeyi, σ_m stator çekirdeğinin modal yayılma verimi, ρ_0 havanın yoğunluğu, c_0 sesin havadaki hızı, D_o çerçevenin dış çapı, L çerçevenin uzunluğudur.

$$S_f = \pi D_o L \quad (3.8)$$

Ses gücü seviyesi L_W (SWL) denklem 3.9’da ifade edilmiştir.

$$L_W \text{ (SWL)} = 10 \log_{10} \frac{\Pi}{\Pi_{\text{ref}}} \quad (\text{dB}) \quad (3.9)$$

Ses basıncı seviyesi, bir ortam ses seviyesinin yüksekliğini karakterize etmek için kullanılan en yaygın tanımdır. Yer değiştirme etkin ses basıncının seviyesini ölçmek için logaritmik bir ölçek olan ses basıncı seviyesine L_p ’ye (SPL) dönüştürebilir denklem 3.11’de ifade edilmiştir. [48]. Genel olarak, ses gücü seviyesini ölçmek, ses basıncı seviyesinden daha karmaşıktır. Denklem 3.11’de p_0 referans ses basıncı ve 20 mikroPa, p ölçülen ses basıncı, f yer değiştirmenin frekansı olmak üzere,

$$p = 2\pi\rho_0 c_0 f A_m \quad (3.10)$$

$$L_p \text{ (SPL)} = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (\text{dB}) \quad (3.11)$$

$\Pi_{\text{ref}} = 10^{-12}$ (W), S_p alanı üzerinde bir dalga için, ses gücü seviyesi ile ses basınç seviyesi arasındaki ilişki denklem 3.12 ile gösterilmektedir [50].

$$L_W = L_p + 10 \log_{10} S_p \quad (\text{dB}) \quad (3.12)$$

4. MANYETİK ALAN VE RADYAL KUVVET HESABININ ANALİTİK İNCELEMESİ

4.1 Hava Aralığı Manyetik Alan Hesabı

Asenkron motorda manyetik alanın modellenmesinde, konformal dönüşüm, manyetik eşdeğer devre ve sonlu elemanlar yöntemi gibi birçok metot vardır. Döner alan metodu gürültü modellemesinde sık kullanılan uygulaması kolay bir yöntemdir. Düzgün hava aralığı (g) için hava aralığı manyetik akı yoğunluğu $B(\alpha, t)$ ve MMF $F(\alpha, t)$ ilişkisi,

$$B(\alpha, t) = F(\alpha, t) \Lambda_g(\alpha) \quad (4.1)$$

Hava aralığı geçirgenliği $\Lambda_g(\alpha)$, t zaman ve α ise açısal yer değiştirmedir. Geçirgenlik ve MMF matematiksel olarak ifade edilirken manyetik gürültüde etken olan harmonikler göz önüne alınır [44].

Bir asenkron makinanın düzgün çalışması, sarım dağılımı ve demir çekirdek doygunluğu ile birlikte oluk geometrisinin etkisi altındadır. Bu özellikler, hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun spektrumunu güçlü bir şekilde yönlendirir. Ortak çalışma durumları altında bile parazitik torklar ek kayıplar ve akustik gürültü üreten birçok harmonik bileşen (uzay harmonikleri) içerir. Spektrumun yüksek frekans bileşenlerinin azaltılması, bu nedenle, makinaryı tasarlamadan önce dikkate alınması gereken önemli bir konudur [31].

4.1.1 Oluk etkisi

Manyetik akı yoğunluğu trapez dağılımında olduğu varsayılırsa, v mertebe uzay harmoniğin genliği, oluk açıklığı katsayısı (k_{ok}) ile çarpılan akı yoğunluğunun tepe değerine eşit olacaktır.

$$k_{ok} = \frac{\sin \sin \left[\frac{k\pi b_o}{2t_s} \right]}{\frac{k\pi b_o}{2t_s}} \quad (4.2)$$

t_s stator oluk adımı, b_o stator oluk açıklığı, ρ ilgili oluk açıklığına bağlı yardımcı fonksiyon, ve k harmonik sayısını ve h_m kutup başına mıknatısın radyal uzunluğunu ifade etmektedir. κ yaklaşık olarak oluk açıklığıdır ve elektrik makinası çeşitlerine göre hesap yöntemi değişkenlik gösterir denklem 4.4 ve denklem 4.5'te bu farklılık gösterilmektedir. κ değeri radyal manyetik kuvvetleri etkileyebilir fakat makinada gürültü üretiminde belirgin bir etkiye sahip değildir.

$$\rho = \frac{\kappa}{5 + \kappa} \frac{2\sqrt{1 + \kappa^2}}{\sqrt{1 + \kappa^2} - 1} \quad (4.3)$$

- Asenkron motor için bağıl oluk açıklığı (κ);

$$\kappa = \frac{b_o}{g} \quad (4.4)$$

- Fırçasız doğru akım motorları için bağıl oluk açıklığı (κ);

$$\kappa = \frac{b_o}{g + h_m/\mu_0} \quad (4.5)$$

Stator oluk sayısı Q_s ve hava aralığının karter katsayısı ile çarpımı g' olmak üzere; oluk açıklığının hava aralığının göreceli geçirgenlik üzerindeki etkisi denklem 4.8 ile açıklanabilir.

$$\alpha = 2\pi x / (Q_s t_s) \quad (4.6)$$

$$\Lambda_{g0} = \mu_0 / g' \quad (4.7)$$

$$\Lambda_g(\alpha) = \Lambda_{g0} \left[1 + \sum_{k=1,2,3}^{\infty} A_k \cos(k Q_s \alpha) \right] = \Lambda_{g0} \lambda_{g1}(\alpha) \quad (4.8)$$

Denklem 4.6 ile açısal yer değiştirme (α), doğrusal uzaklık (x) ile ifade edilebilir. $\lambda_{g1}(\alpha)$ ifadesi statoru oluklu yapıya sahip makina için değişen hava aralığının özgül geçirgenliğinin bir bileşenidir. Ayrıca rotoru oluklu yapıya sahip olan bir makinede ise $\lambda_{g2}(\alpha)$ bileşeni de dikkate alınarak hava aralığı geçirgenliği üzerindeki etkisi denklem 4.10'da göz önüne alınmıştır. $\lambda_g(\alpha, t)$ ifadesi, düzgün dağılımlı hava aralığına ait sabit değeri, stator geçirgenliğinin harmonikleri, rotor geçirgenliğinin harmonikleri ve stator ve rotorun geçirgenliklerinin harmonikleri hava aralığındaki harmoniklerinin bir toplamıdır. Λ_{g0} hava aralığının sabit bileşenidir. Oluk

açıklığı ve hava aralığı boyutlarına bağlı olarak hava aralığı harmonikleri A_k denklem 4.9 ile ifade edilir [44-51].

$$A_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \Lambda_g(\alpha) \cos \cos (kQ_s \alpha) d\alpha \quad (4.9)$$

$$\Lambda_g(\alpha) = \Lambda_{g0} \lambda_{g1}(\alpha) \lambda_{g2}(\alpha) = \Lambda_{g0} \lambda_g(\alpha, t) \quad (4.10)$$

4.1.2 Eksen kaçıklığı etkisi

İdeal koşullar altında, stator ile rotor arasındaki hava boşluğu uniformdur, manyetik devre simetriktir ve rotor eksen kaçıklığı olan e değeri sıfıra eşittir. Denklem 4.12’de ϵ yaklaşık eksantrisiteyi ifade eder. Dinamik eksen kaçıklığı durumunda “d” indisi ile e_d ve ϵ_d olarak denklem 4.13’de sembolize edilmiştir. Manyetik devre çevresinde ve zamanla hava aralığının değişimi denklem 4.11’de verilmiştir.

$$g(\alpha, t) = D - D_{r0} - e \cos(\alpha - \omega_e t) = g(1 - \epsilon \cos(\alpha - \Omega_e t)) \quad (4.11)$$

$$\epsilon = \frac{e}{g} \quad (4.12)$$

$$\epsilon_d = \frac{e_d}{g} \quad (4.13)$$

Mekanik veya elektromanyetik faktörler rotor çevresi etrafındaki radyal kuvveti dengesiz hale getirirse, dengesiz manyetik kuvvet (UMF) olarak da bilinen elektromanyetik bir kuvvet üretecektir. UMF, istenmeyen elektromanyetik titreşim ve gürültüye neden olur, yatak aşınmasını şiddetlendirir, rotor sisteminin stabilitesini etkiler ve hatta rotor ile stator arasında sürtünmeye neden olur [48].

Eksen kaçıklığı statik ve dinamik olmak üzere iki çeşittir. Statik eksen kaçıklığı, rotorun kendi ekseninde fakat stator ekseninden farklı ekseninde dönmesidir. Statik dış merkezlik, kurulumda paralellikten sapma ve yatak aşınmasından kaynaklanabilir. Dinamik eksen kaçıklığı, stator ve rotor eş merkezli olmasına rağmen kendi etrafında dönmez ve genelde çalışma sırasında meydana gelen kaçıklıktır. Dinamik eksantriklik, esas olarak rotorun kütle dengesizliğinden kaynaklanır [44-48-50]. Statik dış merkezlik için açısal frekans $\Omega_e = 0$. Asenkron motorda dinamik dış merkezlik için Ω_e ;

$$\Omega_{\epsilon} = 2\pi \frac{f}{p} (1 - s) \quad (4.14)$$

Karter katsayısı k_c olmak üzere sabit katsayı Λ_{g0} ; denklem 4.7 eksen kaçıklığı olması durumunda denklem 4.15 olarak ifade edilir. k_c

$$\Lambda_{g0} = \frac{\mu_0}{g k_c} \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon^2}} \quad (\text{H/m}^2) \quad (4.15)$$

$$\lambda_{ge}(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon^2}} + 2 \frac{1-\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon\sqrt{1+\epsilon^2}} \cos(\alpha) \quad (4.16)$$

$$\lambda_{ged}(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon_d^2}} + 2 \frac{1-\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon\sqrt{1+\epsilon_d^2}} \cos(\Omega_{\epsilon}t - \alpha) \quad (4.17)$$

Değişen hava aralığı geçirgenliği bileşenleri statik ve dinamik eksen kaçıklığı için sırasıyla; $\lambda_{ge}(\alpha)$, $\lambda_{ged}(\alpha)$ 'dır. Bu durumda hava aralığı geçirgenliği statik ve dinamik durum için sırasıyla denklem 4.18 ve denklem 4.19'da ifade edilmiştir.

$$\Lambda_{ge}(\alpha, t) = \Lambda_{g0} \lambda_{ge}(\alpha, t) \quad (4.18)$$

$$\Lambda_{ged}(\alpha, t) = \Lambda_{g0} \lambda_{ged}(\alpha, t) \quad (4.19)$$

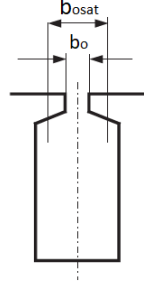
Eksen kaçıklığı stator manyetik akı yoğunlunun harmonik değerlerini de etkilemektedir. Bu durumda da rotor manyetik akı yoğunluğunun harmonik dağılımını etkilemektedir [44].

4.1.3 Manyetik doymanın etkisi

Stator ve rotor MMF'lerinin oluk sızıntısı ve artık alanları büyüktür [53]. Sonuç olarak, oluk ağzı Şekil 4.1'deki gibi b_o 'dan b_{osat} 'a eşdeğer genişlikte yüksek oranda doygun hale gelir (göreceli manyetik geçirgenliğin azalması). Dışlerdeki doygunluktan kaynaklanan maksimum oluk açıklığı, maksimum oluk akımı bölgesine (kutup adımı boyunca) karşılık gelir. Denklem 4.20 hava aralığına toplam etkisini ifade etmektedir, $\Lambda_{sat}(\alpha, t)$ doyma anındaki hava aralığı bileşenidir [44].

$$\Lambda(\alpha, t) = \Lambda_0 + \Lambda_{sat}(\alpha, t) \quad (4.20)$$

$$\Lambda_{\text{sat}}(\alpha, t) = -\Lambda_{\text{sat}} \cos(2p\alpha - 2\omega_1 t - 2\Phi_s) \quad (4.21)$$

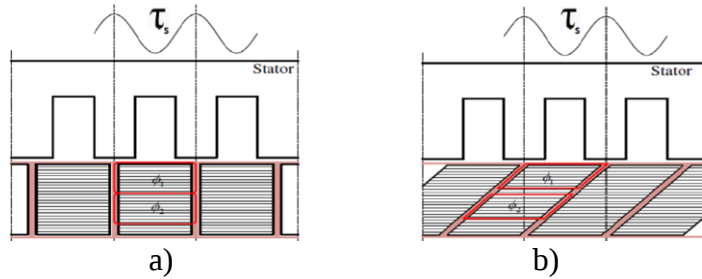


Şekil 4.1 : Doyma anında oluk açıklığı şekli [44].

4.1.4 Oluk eğriliği etkisi

Literatürdeki araştırmaların çoğu, akustik gürültü ve titreşimin ana kaynağının, stator ve rotor kutupları arasındaki hava boşluğu boyunca radyal manyetik kuvvetin hızlı değişimi olduğunu göstermektedir. Radyal kuvvet, statorunda etrafında şiddetlenir. Bu nedenle, bir eğri stator veya rotor tekniği ile radyal kuvvet eğri yüzey etrafında dağıtılarak azaltılabilir; dolayısıyla radyal kuvvetin tepe değeri azaltılabilir [30].

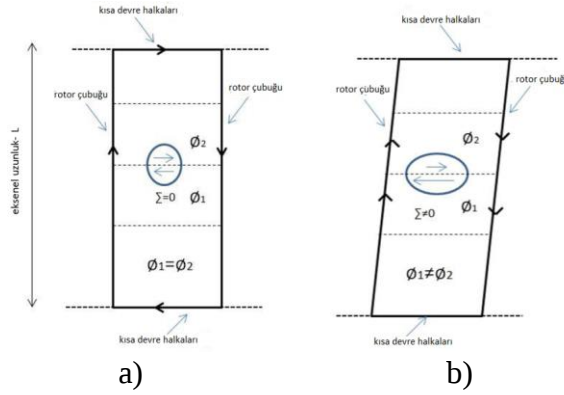
Normal bir rotorun (Şekil 4.2(a)) ve rotoru eğritilmiş (Şekil 4.2(b)) bir motordan küçük bir kesitin taslak görüntüsü Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Taslak rotor gösterimi a) Normal rotor çubukları b) Eğritilmiş rotor çubukları [54].

Çubuklar arası akı ilişkisi Şekil 4.3(a) ve 4.3(b)’de gösterilmektedir. Normal bir rotor olması durumunda; akı rotorun eksenel konumundan bağımsızdır, Şekil 4.3(a)’da gösterildiği üzere akım yalnızca rotor çubukları ve kısa devre halkası arasında akacaktır. Eğri rotor durumunda, rotor çubuğunun bir tarafı, ikinci tarafından oluk aralığının bir kısmı kadar eksenel olarak kaydırılır. Bu nedenle rotor eksenel boyunca akı değişimi önemli ölçüde değişir. Değişen akı bağlantısı, rotor çubuğunun eksenel konumuna bağlı olarak herhangi bir noktasında farklı bir gerilim indükler. Bu gerilim, rotor çubuklarında ve çevresel olarak laminasyon boyunca yani Şekil 4.3(b)’de

görüldüğü üzere düşük dirençli yollar boyunca akan akımı üretir. Bu akımlara barlar arası veya çapraz akımlar denir. Bu akımların büyüklüğü, onları yaratan akının zamana göre türevine bağlıdır [31-54-55].



Şekil 4.3 : Rotor akı değişimi a) Normal rotor çubukları b) Eğritilmiş rotor çubukları [54].

Matematiksel olarak eğrilik faktörü ($k=1, 2, 3, \dots$) denklem 4.22’de ifade edilmiştir. b_s , oluk eğriliği olmak üzere stator ve rotor oluk sayısına ve uygulandığı yapıya göre belirlenir.

$$k_s = \frac{\sin\left(\frac{k\pi b_s}{2\tau}\right)}{\frac{k\pi b_s}{2\tau}} \quad (4.22)$$

$$b_s = \frac{2\pi\tau}{Q_s} \text{ veya } \frac{2\pi\tau}{Q_r} \quad (4.23)$$

Bazen, optimum yuva eğriliği bir oluk aralığından daha az olabilmektedir. Ayrıca eğrilik açısı belli bir sınırı aşması durumunda titreşimleri artırmaktadır. Stator oluk eğriliğinin küçük değerleri için b_s , hem radyal kuvvetin genliği (P_m) hem de radyal yer değiştirmenin genliği (A_m) (denklem 3.6), oluk eğrilik faktörü k_s ile orantılıdır.

$$P_{msk} = k_s * P_m \quad (4.24)$$

$$A_{msk} = k_s * A_m \quad (4.25)$$

Eğrilik, kısa çekirdekli makineler yani ($L \leq 300$ mm) için başarılı bir gürültü azaltma yöntemidir. Daha uzun çekirdekli daha büyük makineler için eğriltme uygun değildir ve gürültü azaltmanın etkili bir yol olarak seçilmez [44].

4.2 Manyetik Kuvvetler

4.2.1 Manyetik basınç ve kuvvet hesabı

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, elektromanyetik kuvvet radyal ve teğet bileşenlere sahiptir. Her iki bileşen de akustikte radyal yönde titreşimi uyarabilir. Ancak radyal bileşen, genel olarak teğetsel bileşenden yaklaşık olarak daha büyük bir büyüklüğe sahip olduğundan, elektromanyetik kuvvetteki teğet bileşenin katkısı ihmal edilebilir [46].

Motor titreşiminin önemli bir nedeni olan elektromanyetik kuvvet Maxwell yasasına göre denklem 4.29 ve denklem 4.31'deki gibi ifade edilebilir; σ Maxwell gerilme tensörü, n , S ve B sırasıyla yüzeyin birim normal vektörü, integral yüzeyi ve manyetik akı yoğunluğudur. B_n ve B_θ sırasıyla akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel bileşeni, μ_0 ise havanın geçirgenliğidir [56].

İki boyutlu bir modelde yüzey integrali hava aralığı boyunca bir çizgi integraline indirgenir. Bu durumda r yarıçaplı bir daire için kuvvet denklem 4.30'dan elde edilir. Denklem 4.26, denklem 4.27 ve denklem 4.28 'de ifade edilen B_1 ve B_2 sırasıyla stator ve rotorun manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir [44].

$$B(\alpha, t) = B_1(\alpha, t) + B_2(\alpha, t) \quad (4.26)$$

$$B_1(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} B_{mv} \cos(v\alpha \pm \omega t) \quad (4.27)$$

$$B_2(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{m\mu} \cos(\mu\alpha \pm \omega_\mu t + \phi_\mu) \quad (4.28)$$

$$F = \int \left[\frac{1}{\mu_0} (B \cdot n) B - \frac{1}{2\mu_0} B^2 n \right] dS \quad (4.29)$$

$$F = \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{\mu_0} B_n B_\theta e_\theta + \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_\theta^2) e_r \right] r d\theta \quad (4.30)$$

Denklem 4.32 ve denklem 4.36'da kullanılan σ_n ve σ_θ sırasıyla birim alana düşen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenini ifade eder [57]. Denklem 4.34 ve denklem 4.35'deki matematiksel ifadeler teğetsel bileşenden gelen katkının ihmal edilmesi durumundaki gerilmenin radyal bileşen ifadesini göstermektedir. Denklem 4.33'de radyal gerilmenin stator ve rotor bileşenleri cinsinden ifadesi verilmiştir.

Denklem 4.34'te bulunan σ_{mr} birim alana uygulanan manyetik kuvvetin genliğidir, ω_r açısal frekansdır ve $r = 0, 1, 2, 3, \dots$ radyal manyetik kuvvetlere karşılık gelen mertebelerdir.

$$F = \int \sigma \cdot dS \quad (4.31)$$

$$\sigma_n(\alpha, t) = \frac{B_n^2(\alpha, t) - B_\emptyset^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad (4.32)$$

$$\sigma_n(\alpha, t) = \frac{1}{2\mu_0} \{ [B_1(\alpha, t)]^2 + 2 * B_1(\alpha, t) * B_2(\alpha, t) + [B_2(\alpha, t)]^2 \} \quad (4.33)$$

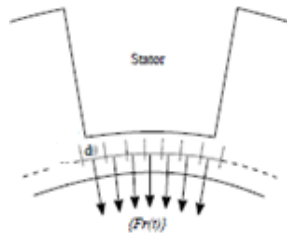
$$\sigma_n(\alpha, t) = \sigma_{mr} \cos(r\alpha - \omega_r t) \quad (4.34)$$

$$\sigma_n = \frac{B_r^2}{2\mu_0} \quad (4.35)$$

$$\sigma_\emptyset(\alpha, t) = \frac{B_r(\alpha, t) * B_\emptyset(\alpha, t)}{\mu_0} \quad (4.36)$$

Gerilme değerinden kuvvetin genliğini elde etmek için σ , dairesel inceleme için πDL ile çarpılmalıdır [30-44-57].

Manyetik akı hava sınırından demir sınırına geçerken en çok zorladığı bölge stator dişleridir. Stator dişlerine uygulanan manyetik kuvvet hesabı diz yüzeyine çizilen bir eğri yardımıyla hesaplanabilir. Şekil 4.4'te eksen üzerine alınan bir stator dişi, çizilen eğri ve diş yüzeyindeki radyal kuvvetler gösterilmiştir. Şekil 4.4 radyal kuvvetin diş yüzeyi ile ilişkisini temsil etmektedir. L paket boyu, $d\delta$ manyetik akı yoğunluğunun entegre edildiği uzunluk olmak üzere dişteki $F_n(t)$ denklem 4.37 ile hesaplanabilir [58].



Şekil 4.4 : Stator diş yüzeyine etki eden radyal kuvvet [58].

$$F_n(t) = \frac{B_n^2}{2\mu_0} * d\delta * L \quad (4.37)$$

Akı yoğunluğunu hesaplamanın etkili yöntemi sonlu elemanlar analizidir (FEA). Akı yoğunluğunun dağılımı, motorun 3 boyutlu modelinde karmaşıktır. İki boyutta gerekli denklem bağıntıları denklem 4.38 ve denklem 4.39’da verilmiştir. B_x , B_y ve φ sırasıyla X, Y eksenine akı yoğunluğu bileşeni ve φ dikdörtgen koordinat sisteminde açıdır [59].

$$B_n = B_x \cos(\varphi) + B_y \sin(\varphi) \quad (4.38)$$

$$B_\theta = -B_x \sin(\varphi) + B_y \cos(\varphi) \quad (4.39)$$

Kuvvet bileşenleri, etki ettikleri yapıyı saptırmaya çalışırlar bu nedenle de statoru, çerçevesini ve monte noktasını titreştirirler. Titreşim seviyesi üç faktöre bağlıdır:

- Kuvvet dalgasının frekansı, dalga sayısı ve genliği
- Uyarıcı frekansta herhangi bir uygun yapısal modunun varlığı
- Stator, çerçeve ve monte edildiği noktanın yapısal sönümlemesi

Kuvvet dalgasının şekli ve frekansı herhangi bir yapısal mod şekli ve doğal frekansla eşleşirse, yüksek titreşim seviyesi ve dolayısıyla gürültü radyasyonu koşulları karşılanır. Bu durumda, sadece yapının sönümleme özellikleri titreşim seviyesini sınırlar. Sönümleme ne kadar yüksek olursa titreşim seviyeleri o kadar düşük olur.

4.2.2 Stator çekirdeği deformasyonu ve titreşim modları

Bölüm 3.4’te anlatıldığı üzere modal analiz, bir yapının veya makine bileşeninin titreşim özelliklerini, yani doğal frekansları ve mod şekillerini belirlemek için gereklidir. Elektrikli dönen makinelerin titreşim ve akustik analizinde, radyal manyetik kuvvetlerin frekanslarını ve sıralarını, stator sisteminin doğal frekansları ve titreşim modları ile karşılaştırmak gerekir.

4.2.2.1 Stator deformasyonu

Sadece stator çekirdeğinin saf çevresel titreşim modları göz önüne alındığında, stator çekirdeğinin d sapması, kuvvet derecesinin (r) dördüncü kuvvetinin ters bir fonksiyonudur.

$$\Delta d \propto \frac{1}{r^4} \quad (4.40)$$

Stator boyunduruğunun en büyük deformasyonu, f_r (radyal kuvvet frekansı) frekansı stator sisteminin doğal mekanik frekansına yakın olduğunda meydana gelir. Gürültü açısından en önemlileri düşük mod numaralarıdır, yani $r = 0, 1, 2, 3$ ve 4 . Burada kritik mod şekilleri açıklaması yapılacaktır [44].

4.2.2.2 Titreşim modları

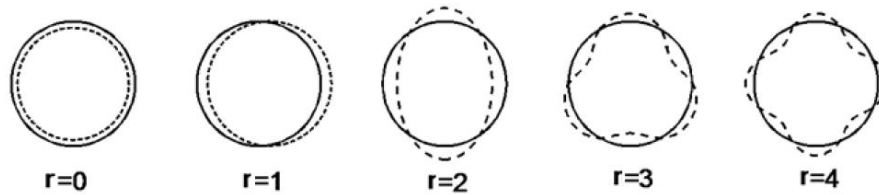
Titreşim modu $r = 0$; titreşimli titreşim modu veya "breathing" modu için $r = 0$ radyal manyetik kuvvet yoğunluğu stator çevresine eşit olarak dağıtılır ve zamanla periyodik olarak değişir. Stator çekirdeğinde radyal bir titreşime neden olur [24]. Sonuç, aynı sayıda kutup çifti (aynı dalga uzunluğu) içeren, ancak farklı hızdaki (farklı frekans) iki dalganın girişiminden kaynaklanır. Bu mod, çok sayıda kutupta ve stator akımlarının sinüzoidal seyrinde bile zararlı titreşim ve gürültü üretebilir. F_{mr} , manyetik basıncın genliği olmak üzere;

$$p_0 = F_{mr=0} \cos(\omega_0 t) \quad (4.41)$$

Titreşim modu $r = 1$; denklem 4.42, rotora tek yönde etki eder. Bu gerilme, çevrenin etrafında ω_1 açısal frekansı ile dolaşır ve rezonans noktasında güçlü titreşimlere neden olur. Bu mod, kutup çifti sayısı birden farklıysa, iki dalganın manyetik akı yoğunluğunun karışmasından kaynaklanır.

$$p_1 = F_{mr=1} \cos(\alpha - \omega_1 t) \quad (4.42)$$

Titreşim modu $r = 2, 3, 4$; $r=2$ "Ovalleştirme modu" olarak bilinir. Bu modlarda stator çekirdeğinin sapmaları yükselir. Bahsedilen tüm titreşim modları Şekil 4.5'te gösterilmektedir [60].



Şekil 4.5 : Stator titreşim modları [60].

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu Elemanlar Yöntemi, uygun sınır koşulları altında uzayın belirli bir bölgesinde yer alan mekanik sektörü için mekanik bir problemi, inşaat sektörü için yapısal bir problemi veya elektrik alanı için elektromanyetik bir problemi belirlenmiş belirli koşullar altında modeli sonlu küçük parçalara ayırıp ele alarak denklemler yardımıyla çözüme yakınsamaya çalışır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektrikli makineleri problemleri analitik ve sayısal olarak Maxwell denklemleri aracılığıyla çözülebilmektedir. Analitik yöntemlerle yapılan hesaplamalarda özellikle doymanın etkisi nedeniyle hassas bir hesaplama yapılamayabilir. Sayısal yöntemlerde örneğin, gürültü analizi için elektrikli makinesinin büyük miktarda titreşim kaynağı ve çok sayıda parçadan oluştuğu göz önüne alındığında, yapı mümkün olduğu kadar basit yapıya indirgenerek simülasyon süreci kısaltmaya çalışılır böylece süreden tasarruf sağlanır. Elde edilen sonuçlar uygulama için bu yöntemin uygulanabilirliğinin bir testi olarak düşünülebilir. Bu yöntemin en büyük avantajı, özel aletlere ihtiyaç duymadan sınırsız sayıda iyi tanımlanmış durumu simüle etme yeteneğidir.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Tanımı

5.1.1 Method

Sonlu eleman ayrıklaştırma yöntemi ile bir sürekliliği bir madde gövdesi (katı, sıvı veya gaz) veya basitçe bir uzay bölgesi olarak bölerek ve bilinmeyen alan değişkenini her bir eleman içindeki varsayılan yaklaşık fonksiyonlar cinsinden ifade ederek problemi azaltır. Yaklaşık fonksiyonlar (bazen enterpolasyon fonksiyonları olarak adlandırılır), düğümler veya düğüm noktaları olarak adlandırılan belirli noktalardaki alan değişkenlerinin değerleri cinsinden tanımlanır. Düğümler genellikle bitişik elemanların bağlandığı eleman sınırlarında bulunur. Sınır düğümlerine ek olarak, bir elemanın birkaç iç düğümü de olabilir.

Bu yöntemde bölge içerisinde enerji değeri minimum olacak şekilde çözüm araması yapılır. Sınırlara uygun yapıyı uyarlamak kolay olduğundan enerji fonksiyoneli minimum yapan potansiyel çözüm aranır. $\frac{\partial F}{\partial p} = 0$, F enerji fonksiyoneli, p ise ağ potansiyeli olmak üzere denklemsel ifade edilebilir [61].

Öncelikle uygulamadan bağımsız olarak SEY ile çözülecek durumun 2-B veya 3-B modeli oluşturulur model oluşturulurken mümkün olduğu kadar basit yapı halinde olmasına dikkat edilir. Bu model sonlu sayıda küçük parçalara ayrılır. Modelde kullanılan parçaların malzeme bilgisi, sabit ve hareketli yapısı, gerekli sınır koşulları altında her bir bölge için gerekli matematiksel eşitlikler bir matris formatında çözümlenerek sonuca ulaşılır. Sonlu elemanlar yönteminde enerji denklemleri yardımıyla bilinmeyenleri bulmak için çözüm yöntemi oluşturur.

5.1.2 Maxwell denklemleri

Elektromanyetik bir alanın davranışı Maxwell denklemleri ile açıklanmıştır.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (5.1)$$

$$\partial \cdot B = 0 \quad (5.2)$$

Denklem 5.1 ve 5.2'teki; B manyetik akı yoğunluğu (T), H manyetik alan kuvveti (A/m), J akım yoğunluğu, D elektrik akı yoğunluğunu (C/m^2) ifade etmektedir. Kararlı hal durumunda zamana göre elektrik akısı yoğunluğunun türevi 0'dır. Alan değişkenlerini birleştirmek için malzeme denklemleri;

$$\nabla \times H = J \quad (5.3)$$

$$D = \epsilon \cdot E \quad (5.4)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (5.5)$$

$$J = \sigma \cdot E \quad (5.6)$$

ϵ elektriksel geçirgenlik, E elektrik alan kuvveti, μ manyetik geçirgenliği, σ elektriksel iletkenliği, θ hareketli nesnelerin hızını ifade etmektedir. Yukarıdaki malzeme parametreleri, izotropik malzemeler için skaler, anisotropik bir malzeme olması

durumunda ise tensör olarak ifade edilir. Malzeme parametreleri, bir alan değişkeninin kendi değerine de bağlı olabilir, örneğin, ferromanyetik bir malzemedeki manyetik alan doygunluğa neden olabilir ve bu da geçirgenliği azaltır. Sadeleştirme, aynı zamanda girdap akımı formülasyonu olarak da bilinen yarı-statik Maxwell denklemlerini oluşturur. Manyetik vektör potansiyeli (A) şu şekilde tanımlanır [62,63].

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5.7)$$

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0 \quad (5.8)$$

Kartezyan koordinatlarda, alan potansiyelleri Denklem 5.9, 5.10, 5.11’de ifade edilmiştir.

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \quad (5.9)$$

$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (5.10)$$

$$B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (5.11)$$

3 boyutlu sonlu elemanlar problemi 2 boyutlu olarak incelenmesi durumunda alan potansiyel denklemlerinde z’ye göre türevler sıfırdır ve $B_z = 0$ ’dır.

5.1.3 Ağ (Örgü) yapısı

Modeli sonlu sayıda küçük geometrik parçalar şeklinde bölerek ayrıklaştırmayı sağlayan yapısal parçalara “ağ (örgü)” adı verilir. Alan değişkeninin düğüm değerleri ve elemanlar için enterpolasyon fonksiyonları, elemanlar içindeki alan değişkeninin davranışını tamamen tanımlar. Bir problemin sonlu eleman temsili için alan değişkeninin düğüm değerleri bilinmeyenler haline gelir.

Çözümün doğası ve yaklaşım derecesi sadece kullanılan elemanların boyutuna ve sayısına değil, aynı zamanda seçilen enterpolasyon fonksiyonlarına da bağlıdır. Genellikle fonksiyonlar, alan değişkeni veya türevlerinin bitişik eleman sınırları boyunca sürekli olacağı şekilde seçilir.

Ağ yapılarının sık olması çözümü kompleks hale getirir yüksek hesaplama hızı ve bellek ihtiyacı da gerektirir. Bu durumu engellemek için öncelikle modeli basite indirmek gereklidir. Gerekliyse yoğun ağ yapısı gerekli bölgelerde kullanılmalıdır. Elektrik makineleri için, hava aralığında sık mesh yapısı kullanılabilir burada alan ve potansiyel değişimi meydana gelmektedir. Yapılan işlemlerin doğruluğu ile düzgün bir ağ yapısı doğru orantılıdır.

5.2 Doğal Frekansın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Yapısal analiz için, genel hareket denklemi denklem 5.12 ile ifade edilebilir:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (5.12)$$

$\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ ve $\{u\}$ sırasıyla yer değiştirme vektör matrisi ve onun 1. ve 2. derece diferansiyelidir; $\{F(t)\}$ kuvvet vektörü matrisidir. $[K]$, $[M]$ ve $[C]$ sırasıyla sertlik, kütle ve sönümleme matrisleridir. Hiçbir kuvvet uygulanmadığı ve sönümlenmediği göz önüne alındığında, hareket denklemi denklem 5.13'e indirgenir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (5.13)$$

Denklem 5.13'ün çözümünün aşağıdaki biçime sahip olduğu iyi bilinmektedir: burada $\{0\}$ mod şekli, ω_n doğal açısal frekans ve n mod sırasıdır. Yapısal analiz açısından, genel matematiksel özdeğer problemi denklem 5.16 ile çözülür.

$$\{u\} = \{\emptyset\} \sin \omega_n t \quad (5.14)$$

$$([K] - \omega^2 [M])\{u\} = \{0\} \quad (5.15)$$

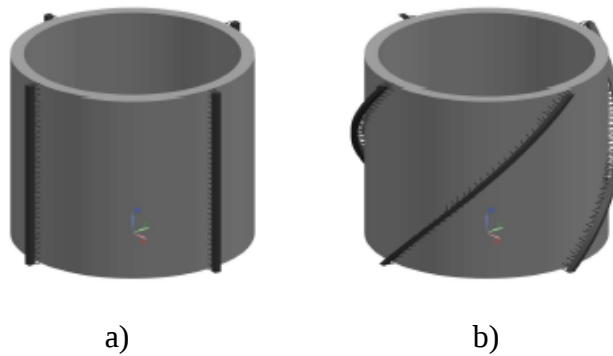
$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (5.16)$$

Özvektör, ω_n özdeğeriyle tanımlanan doğal frekansta yapının serbest titreşim modunu ifade eder [60]. Bu prosedür, FEM yazılımı ANSYS ile gerçekleştirilebilir. Yazılım kullanılarak, herhangi bir motorun titreşim davranışı simüle edilebilir. Malzeme özellikleri young modülü (E), malzeme yoğunluğu (ρ) ve poisson oranı programa işlenerek yapının doğal frekansları elde edilir.

Denklem 5.12’de de görüldüğü gibi modal frekansı etkileyen parametrelerden biri de rijitliktir. Rijitliği etkileyen bir durumda stator yapısına ait sınır koşulları teknikleridir. Stator yapısal bütünlüğü için kullanılan kaynaklama işleminde artık gerilmeler meydana gelmektedir. Eğik kaynak işlemi güçlü anti simetriler gösterecek şekilde seçilerek saf radyal modlar için sönüm artırılabilir. Eğik kaynak işleminin farkı kaynak hattının çarpık dağılımı sayesinde düğüm noktası olmayan noktalara sertlik sağlamasıdır [58].

Kaynak olaylarından kalan artık gerilimler nedeniyle stator geometrisi değişiklikleri etkilerini göz önüne alarak yayılan akustik gürültü üzerindeki etkilerini araştırmıştır [64]. Stator paketinin istiflemesinin üretim proses değişikliğinin etkisini ele almış ve deneysel çalışmasını yapmıştır. Numunelerden birini epoksi yapıştırıcılar diğerini eksenel kaynak kullanarak stator bütünlüğünü oluşturmuştur. Radyal ve kesme modlarında kaynak yöntemi yapıştırmaya göre daha iyi sönümlendiğini görmüştür. Kaynak sayesinde sertlik dağılımındaki değişiklik, paket boyunca getirdiği kısıtlama bazı modları ortadan kaldırmaktadır [58].

Saf radyal modlar düşük frekanslarda meydana gelmesi, manyetik kuvvetler tarafından uyarılmasının daha kolay olması etkenlerinden yüksek gürültü performansına neden olur. Bu modlar enine simetriklerdir. Stator yapısının enine simetrisini değiştirmek için eğrisel kaynak yöntemi ile asimetriklik oluşturulmaya çalışan çalışma mevcuttur. Geleneksel kaynak ve eğrisel kaynak uygulamasına ait stator yapıları Şekil 5.1’de gösterilmiştir [58].



Şekil 5.1 : Kaynak uygulaması a) Geleneksel kaynak b) Eğrisel kaynak [58].

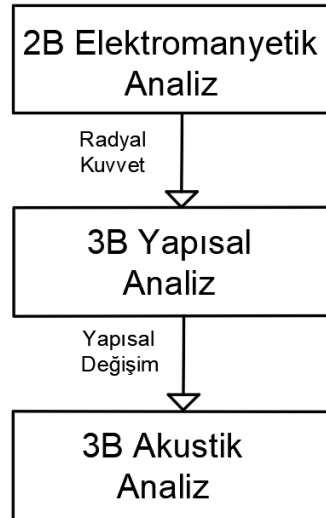
5.3 Elektromanyetik Kuvvetin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözümlerde; hava boşluğunda etkiyen kuvvetler, manyetik devrenin hava ile çevrili yüksek geçirgenlikli kısımlarının düğüm noktalarında hesaplanır. Hesaplama için program da Maxwell Stress Tensor yöntemi kullanılmıştır. Farklı geçirgenliğe sahip iki malzemenin sınır çizgisinde bir kuvvet hesaplaması için kullanılır. Ferromanyetik malzemeye etki eden kuvvetlerin 2D analizi için- hava sınır çizgisi, toplam kuvvet ile ifade edilebilir [65].

$$F = \frac{1}{\mu_0} \int \left\{ \begin{array}{cc} B_x^2 & B_x B_y \\ B_x B_y & B_y^2 - \frac{1}{2} |B|^2 \end{array} \right\} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \end{Bmatrix} dS \quad (5.17)$$

6. TASARIM VE SAYISAL BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde stator yapısı birebir aynı olan 15 adet farklı tipte rotor oluştundan oluşan motorlar üç grup altında sınıflandırılmış ve bir tanesi hiçbir sınıfa dahil edilmeden sonlu elemanlar yöntemi ile çeşitli açılardan incelenmiştir. Klasik tipte damla oluk yapısı referans alınmış ve rotor alanı 74-80 mm² arasında kalacak şekilde değişik geometrilere sahip rotor oluk tasarımları yapılmıştır. Bu sırada stator ve rotor ana boyutları, hava aralığı uzunluğu, stator oluk yapısı ve sargı yapısı değiştirilmemiştir. 15 farklı rotora sahip motor için sabit güç altında SEY ile analizi yapılmıştır. Motorların analitik tasarımı için ANSYS Rmxprt yazılımı kullanılmıştır. Rmxprt yazılımı motor tasarımında kullanılan çok yönlü bir numerik analiz programıdır. ANSYS'in ürünü olan Rmxprt ve Maxwell arasında geçiş yapılabilmesi sayesinde tasarlanan asenkron motorların manyetik analizleri ANSYS Electronics Maxwell ile gerçekleştirildi. Çok yönlü tasarım kabiliyeti olan ANSYS Workbench'e Maxwell'den elde edilen sonuçlar girdi olarak aktararak motorların deformasyon ve akustik incelemesi yapılmıştır. Şekil6.1'de motorun tasarım aşamasından sonra işlem basamaklarını gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Tasarım sonrası işlem basamakları.

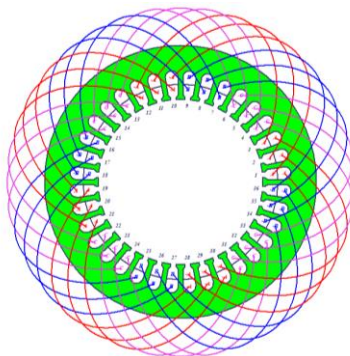
6.1 Asenkron Motor Tasarımı

Çalışmada kullanılan motorun tasarım değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Yüklenme durumu motorun çalışmasını etkilemektedir. Bu yüzden yapılan çalışmalarda yüklenme ile makinanın ses şiddeti seviyesinin arttığı bilindiği için incelemeler nominal yük altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada küçük güçlü bir motor ele alınmıştır.

Çizelge 6.1 : Motor tasarım değerleri.

Açıklama	Gösterim	Değer	Birim
Nominal Güç	P _n	7.5	kW
Nominal Gerilim	V _n	400	V
Nominal Frekans	f	50	Hz
Kutup Sayısı	2p	4	-
Senkron Hız	n _s	1500	rpm
Rotor Hızı	n _r	1460	rpm

Bölüm 2’de anlatılan analitik hesaplama yöntemleri ile makinanın ana boyutları tayin edilmiştir. Makinaya ait ilgili sayısal büyüklükler Çizelge 6.2’de gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan motorlar 36/30 oluk kombinasyonuna sahip asenkron motorlardır. Motor tasarımında numerik hesaplamalar ANSYS RMxprt ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.2’de belirtilen değerler, kullanılan stator, rotor, malzemesi ve sargı yapısı tasarlanan tüm motorlar için sabit tutulmuştur. Şekil 6.2 kullanılan çift tabakalı sargı yapısını göstermekte olup olup faz başına düşen sarım sayısı 34’tür.

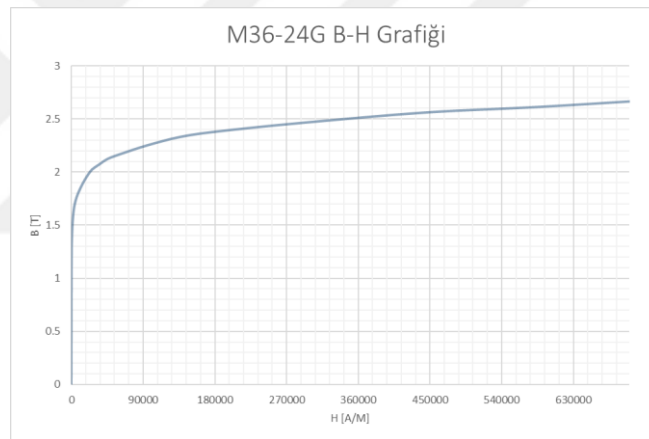


Şekil 6.2 : Stator sargı yapısı.

Çizelge 6.2 : Motorun temel büyüklükleri.

Açıklama	Gösterim	Değer	Birim
Stator Oluk Sayısı	N_s	36	-
Rotor Oluk Sayısı	N_r	30	-
Stator Dış Çapı	D_{so}	200	mm
Stator İç Çapı	D_{si}	125	mm
Rotor Dış Çapı	D_{ro}	124.1	mm
Rotor İç Çapı	D_{ri}	50	mm
Hava Aralığı	g	0.45	mm
Paket Boyu	L	155	mm

Rotor oluklarında ucuz ve işlenmesi kolay olan alüminyum tercih edilmiştir. Stator ve rotor çekirdeklerinde kullanılan malzeme M36-24G'dir. Bu malzemeye ait B-H eğrisi Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3 : M36_24G manyetik malzemenin B-H eğrisi.

15 adet motorun nihai tasarımları bittikten sonra manyetik analizleri gerçekleştirilmek üzere ANSYS Maxwell programına geçiş yapılmıştır. Maxwell sabit güç kriteri altında sınır koşulları belirlenen yapıyı sonlu elemanlar yöntemi ile çözmeye olanak sağlar.

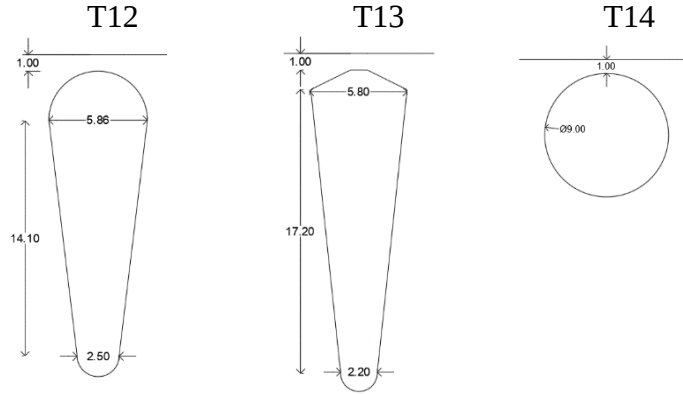
6.2 Rotor Oluk Geometrisinin Belirlenmesi

Rotor oluk ve stator oluk geometrileri motora ait elektriksel ve manyetik özellikleri üzerinde etkisi büyüktür. Literatürde bulunan oluk çalışmaları yalnızca boyut ve geometri açısından ele alınmamaktadır. Tezde kullanılan 14 adet motora ait oluk geometrileri 3 grup altında sınıflandırılmıştır. Tek kafesli (TK), çift kafesli (ÇK) ve

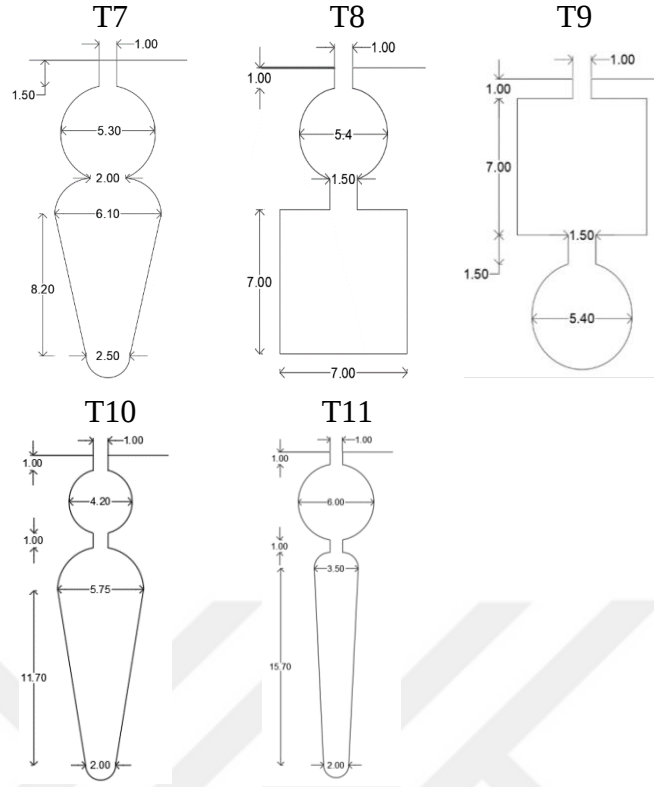
tek kafesli kapalı (TKK) oluklar olarak 3 grup altında 14 oluk incelemesi gerçekleştirilmiştir. 1 adet motor ise referans motorun oluk boyutlarında değişiklik yapılmadan kaykı etkisinin akustiğe etkisini incelemek üzere rotor olukları eksen etrafında 1 oluk kadar kaydırılarak elde edilmiş ve oluk gruplarından herhangi birine dahil edilmemiştir.

Seçilen referans motorun rotor oluk geometrisinde damla oluk tipi (T1) kullanılmıştır. Tasarlanan tüm motorlar için rotor oluk alanı yaklaşık olarak 74-80 mm² arasında tutulmaya çalışılmıştır. Bu durum motorun performans değerlerinde bazı oluk tipleri için iyi bazı oluk tipleri için kötü bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu tezde motorun performansının yanı sıra motorun gürültü performansı üzerine etkisi incelenecektir.

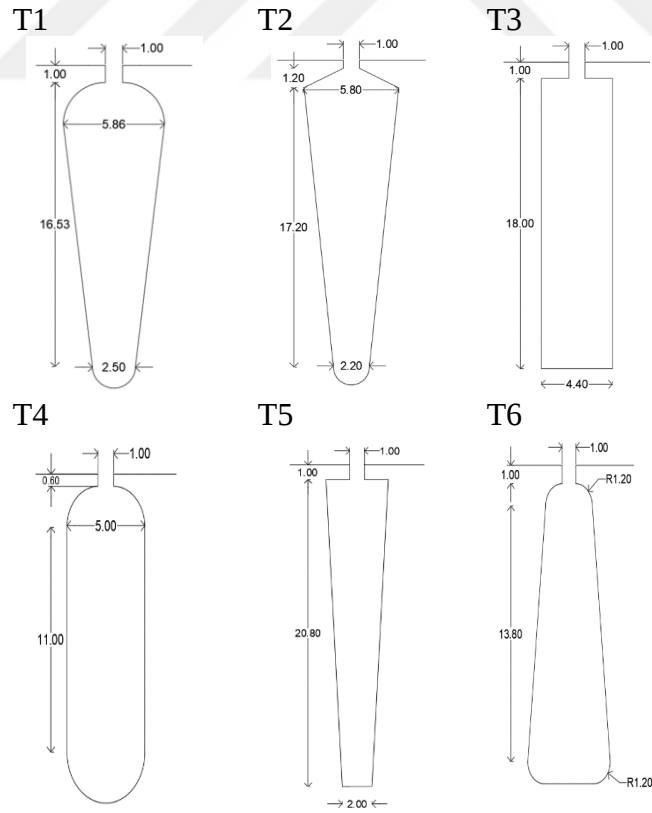
Bölüm 6.1’de bahsedildiği üzere rotor etkisinin incelenmesi için statora ait her bir parametre ve rotor çekirdeğine ait ana boyut değerleri sabit tutulmuştur. Rotor oluk tasarımında ANSYS RMxpert ve ANSYS Maxwell programları kullanılmıştır. 14 adet motorda kullanılan rotor oluk geometrilerine ait boyut bilgileri gruplandırılmış biçimde gösterilmiştir. Şekil 6.4 tek kafesli kapalı (TKK) oluk grubuna ait 3 adet oluk geometrisini, Şekil 6.5 çift kafesli (ÇK) oluk grubuna ait 5 adet oluk geometrisini, Şekil 6.6 tek kafesli (TK) oluk grubuna ait 6 adet oluk geometrisini göstermektedir.



Şekil 6.4 : TKK oluk grubu.



Şekil 6.5 : ÇK oluk grubu.



Şekil 6.6 : TK oluk grubu.

6.3 Moment ve Reaktans Değer Karşılaştırması

14 adet (T1-T14) motorun kalkış anı için moment (M_k), akım (I_k), rotor direnci (R_{rk}) ve kaçak rotor reaktans (X_{rk}) değerleri, devrilme momenti (M_d) Çizelge 6.3’de ve motor verimi Çizelge 6.4’te; nominal çalışma için rotor direnci (R_r) ve reaktansı (X_r) Çizelge 6.5’te rotor oluk geometri sınıflarına göre verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Motorun kalkış ve devrilme anı karakteristikleri.

Oluk Grubu	Oluk Tipi	M_k (Nm)	I_k (A)	R_{rk} (Ohm)	X_{rk} (Ohm)	M_d (Nm)
TK Oluk Grubu	T1	233.02	85.18	1.76	1.73	276.71
	T2	227.66	83.58	1.79	1.82	271.37
	T3	240.41	87.39	1.78	1.73	282.67
	T4	232.11	84.95	1.77	1.77	276.44
	T5	237.41	84.05	1.85	1.77	275.32
	T6	206.59	79.64	1.83	2.19	254.80
ÇK Oluk Grubu	T7	219.01	81.71	1.81	1.95	263.22
	T8	240.58	85.53	1.92	1.85	275.50
	T9	300.21	97.23	1.73	1.06	327.65
	T10	174.22	69.99	2.03	2.90	219.81
	T11	230.30	79.73	2.16	2.15	251.72
TKK Oluk Grubu	T12	223.50	83.55	1.92	1.85	269.45
	T13	259.40	88.75	1.79	1.45	294.88
	T14	329.17	99.56	1.92	0.87	339.96

TK grubundan T3, ÇK grubundan T9 ve TKK grubundan T14 oluk geometrilerinin grup içlerinde maksimum kalkış momenti değerine sahip olduğu görülmektedir. Kalkış akımı için inceleme yapıldığında TK grubundan T3, ÇK T9 ve TKK grubundan T14 oluk geometrilerinin grup içlerinde maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Rotor oluk alanı sabit tutulmaya çalışılırken T14 için kalkış momenti ve kalkış akımının referans değerden momentte 100Nm, akımda 15 A fazladır. Ayrıca kalkış anında tüm oluk tipleri ile kıyaslandığında en büyük akımı çekmektedir. Kalkış anında bir motordan beklenen performans maksimum moment ile kalkış yapıp bu sırada minimum akım çekmesidir. TK grubunda maksimum kalkış momenti rotor oluk

geometrisi düz kesitli dikdörtgen olan T3'e aittir. TK grubunda hava aralığından mile doğru artan ve azalan oluk şekillerine göre yüksektir.

ÇK oluk grubundan T8- T9; T10- T11 yapıları kendi içerisinde bakıldığında alt kafesi üst kafesten geniş olanlar düşük kalkış momenti ve kalkış akımına sahip olduğu görüldü.

Çizelge 6.4'te tasarım sonucu oluk geometrilerine göre elde edilen verim (%) değerleri verilmiştir. Referans motorun (T1) verimi %90,7 olarak hesaplanmıştır. Rotor alanı sabit tutulmaya çalışılırken motor veriminin TK oluk grubunun referansa yaklaşık değerlerde, ÇK oluk grubun da yaklaşık değerde ya da %4 kadar kötüleşme görülmüştür. TKK grubunda T14 %12 kadar belirgin değerde kötüleşirken, T12 ve T13 ise referans değere yakındır.

Çizelge 6.4 : Oluk tipine göre verim değerleri.

TK Oluk Grubu		ÇK Oluk Grubu		TKK Oluk Grubu	
Oluk Tipi	Verim (%)	Oluk Tipi	Verim (%)	Oluk Tipi	Verim (%)
T1	90.7	T7	90.63	T12	90.54
T2	90.76	T8	86.71	T13	90.52
T3	89.48	T9	89.59	T14	78.63
T4	90.5	T10	90.41		
T5	90.51	T11	86.69		
T6	90.14				

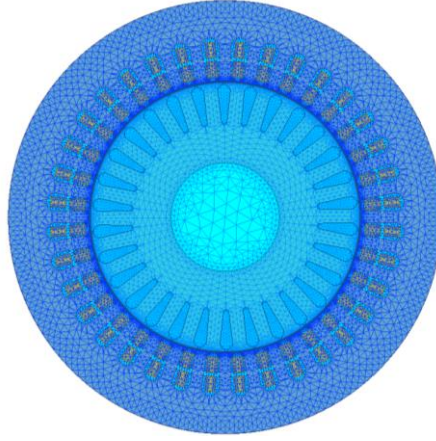
Nominal yük koşullarında rotor reaktansı ve rotor direnç değerleri Çizelge 6.5'te verilmiştir. Rotor oluk alanı sabit tutulmaya çalışıldığından rotor direncine ait değerlerin birbirine yakın değerde olduğu görülmektedir. Kapalı oluk ağzına sahip TKK grubuna yüksek verimle çalışan oluk tiplerinin rotor reaktans değerleri yüksektir. Bu durumda verimi yüksek ve oluk ağzı kapalı olan rotor geometrilerinde yüksek reaktans değeri görüldüğü söylenebilir.

Çizelge 6.5 : Nominal koşullarda karakteristik.

Oluk Grubu	Oluk Tipi	X_r (ohm)	R_r (ohm)
TK Oluk Grubu	T1	3.284	1.669
	T2	3.003	1.673
	T3	2.987	1.594
	T4	2.954	1.676
	T5	3.277	1.669
	T6	3.586	1.668
ÇK Oluk Grubu	T7	3.876	1.685
	T8	2.957	1.685
	T9	2.396	1.684
	T10	4.377	1.674
	T11	3.419	1.602
TKK Oluk Grubu	T12	6.176	1.669
	T13	5.828	1.682
	T14	2.465	1.812

6.4 Manyetik Analiz

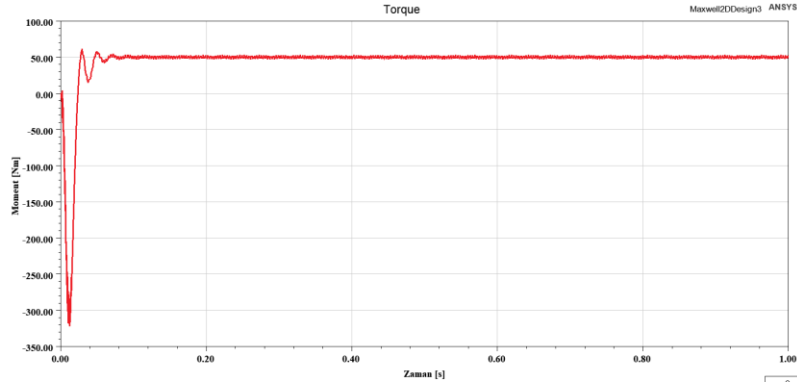
Sonlu elemanlar yöntemi hemen hemen her alanda kullanılmakla beraber elektrik makinalarının tasarımında ve geliştirilmesine yönelik çalışmalarda sıkça tercih edilmektedir. Tez kapsamında yapılacak manyetik analizler içinde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan ANSYS Maxwell kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde ağ yapısı olarak üçgensel yapı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılacak ağ yapısının eleman sayısı önemlidir. Ağ yapısında kullanılan eleman boyutunun büyük olması durumunda simülasyon süresi kısalmır fakat değişimin hızlı olduğu bölgelerde sonuçlarda hassas yaklaşımdan uzaklaşılır. Bu sebeple bu çalışmada değişimin hızlı olduğu hava aralığında küçük boyutlu ağ yapısı kullanımı tercih edilmiştir. Şekil 6.7’de kullanılan ağ yapısı referans motor için gösterilmiş yapılan tüm modeller de aynı ağ yapısı korunmuştur.



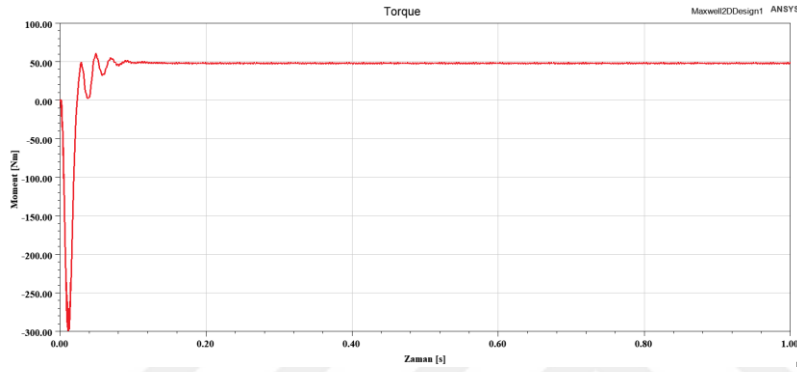
Şekil 6.7 : SEY analizinde kullanılan ağ yapısı.

7.5 kW gücünde dört kutuplu 14 çeşit asenkron motor için manyetik akı yoğunluğu, manyetik akı yolları, hava aralığı manyetik akısının radyal bileşenine ve teğetsel bileşenine ait dalga şekli, hava aralığı akısının radyal bileşen ve teğetsel bileşenin harmonikleri, stator çevresinde meydana gelen radyal ve teğetsel bileşenine ait kuvvet yoğunluğu dalga şekilleri, eksen üzerinde bulunan bir stator dişine etki eden radyal ve teğetsel kuvvet grafikleri sırasıyla verilmiştir. Ayrıca çıkış moment grafiklerine ait dalga şekli referans motor T1 ve kapalı oluk grubuna ait T12 oluk tipi için gösterilmiştir.

Asenkron motorların hava aralığı akısının harmonikleri, akım harmonikleri ve verimliliği üzerine rotor oluk şeklinin etkisi bulunmaktadır. Açık ve kapalı tip olukların kendine has avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Açık tip oluklarda eşdeğer hava aralığı uzunluğu büyük olduğundan daha fazla harmonik indüklenmesi görülürken daha küçük kaçak reaktans değerlerinin olması avantajdır. Üretim açısından bakıldığında kapalı oluk tipi kalıba rahat dökülür ve rotor yüzeyinin işlenmesi daha kolaydır. Ayrıca kapalı oluk yapısı oluk harmoniklerini azaltarak gürültünün azaltılmasına olanak sağlar. Moment dalgalanmalarının azaltılmasına yardımcı olurken düşük güç faktörü ve yüksek kaçak reaktans değerlerinin oluşmasına da neden olur [8-9-10-11]. Kararlı halde çıkış momentinin tüm oluklar için 49-50 Nm değerinde sabitlendiği görülmüştür. TK grubundan T1, TKK grubundan T12 oluk tipi için çıkış moment grafikleri Şekil6.8’de gösterilmiştir. Dalga şekillerinden görüldüğü üzere kapalı oluk tipine ait moment grafiğinde dalgalanma daha azdır.



a)



b)

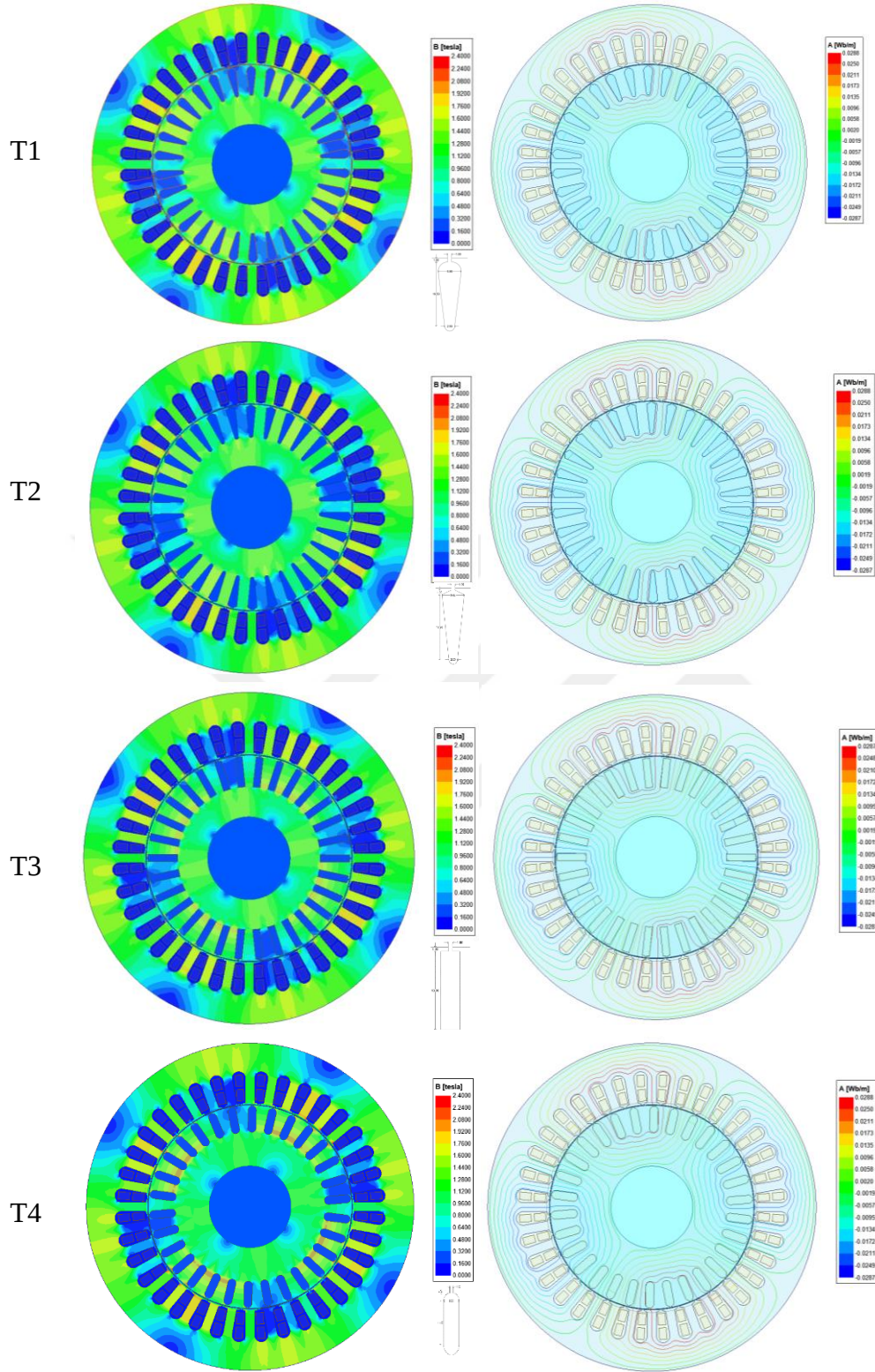
Şekil 6.8 : Çıkış momenti dalga şekli a) T1 b) T12.

Manyetik akı yoğunluk değerleri T1- T14 aralığında bulunan tüm motorlar incelendiğinde stator boyunduruğunda maksimum 1.7 T ve rotor boyunduruğunda maksimum 2.3 T değerleri görülmüştür. Stator ve rotorda kullanılan malzemenin B-H eğrisine bakıldığında bu bölgelerde manyetik zorlanma yaşanmadığı görülmektedir. Makinanın manyetik açıdan zayıf bölgesi olan stator dış bölgelerinde 1.75 T ve rotor dış bölgelerinde bu maksimum değer 2.4 T olduğu görülmüştür. Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'e bakıldığında manyetik akı yolları incelenerek kutuplaşmanın doğruluğu teyit edilebilir. Çizelge 6.6'da oluk gruplarına göre stator, rotor boyunduruğu ve manyetik olarak en çok zorlanma görülen bileşenler olan stator ve rotor dişlerinde görülen ortalama manyetik akı yoğunluğunun ortalama değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.6 : Akı yoğunluğunun bölgelere göre ortalama değerleri.

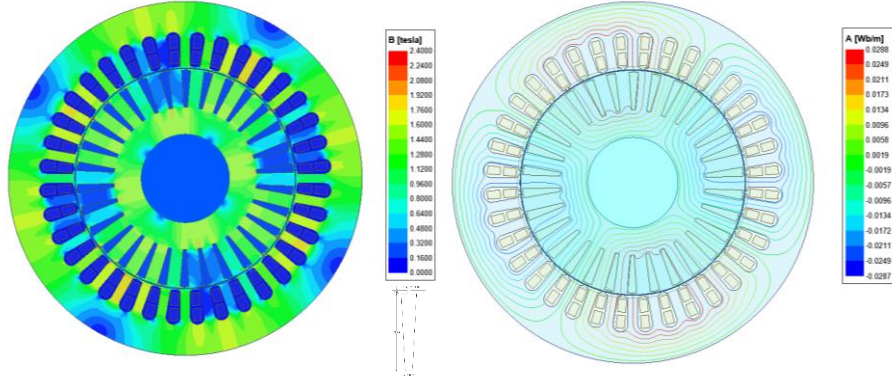
Oluk Grubu	Oluk Tipi	Stator Boyunduruğu (T)	Stator Dişi (T)	Rotor Boyunduğu (T)	Rotor Dişi (T)	Hava Aralığı
TK Oluk Grubu	T1	1.646	1.716	1.675	1.735	0.821
	T2	1.641	1.728	1.748	1.667	0.828
	T3	1.659	1.716	1.696	1.755	0.822
	T4	1.656	1.713	1.451	1.831	0.82
	T5	1.635	1.73	1.986	1.607	0.829
	T6	1.662	1.719	1.532	1.887	0.823
ÇK Oluk Grubu	T7	1.646	1.715	1.653	1.729	0.821
	T8	1.673	1.73	1.378	2.235	0.829
	T9	1.672	1.729	1.349	2.04	0.828
	T10	1.638	1.718	1.938	1.673	0.823
	T11	1.589	1.686	2.25	1.611	0.808
TKK Oluk Grubu	T12	1.643	1.712	1.676	1.733	0.82
	T13	1.64	1.719	1.798	1.684	0.823
	T14	1.628	1.684	1.06	2.3	0.806

Çizelge 6.6’da gösterilen değerlerin model üzerinde dağılımları ANSYS Maxwell programı aracılığı ile çıkarılarak Şekil 6.9’da TK grubuna ait olukların, Şekil 6.10’da ÇK grubuna ait olukların ve son olarak Şekil 6.11’de TKK grubundaki oluklar için manyetik akı yoğunluk dağılımları model üzerinde gösterilmiştir.

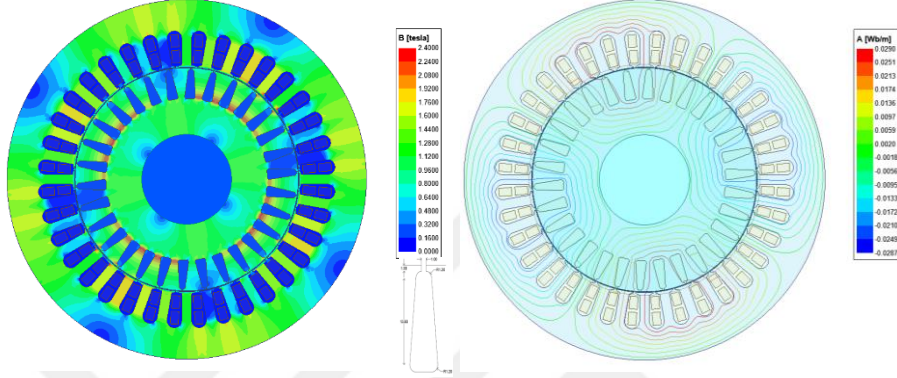


Şekil 6.9 : TK grubunda bulunan motorların manyetik alan yoğunlukları ve akı dağılımları.

T5

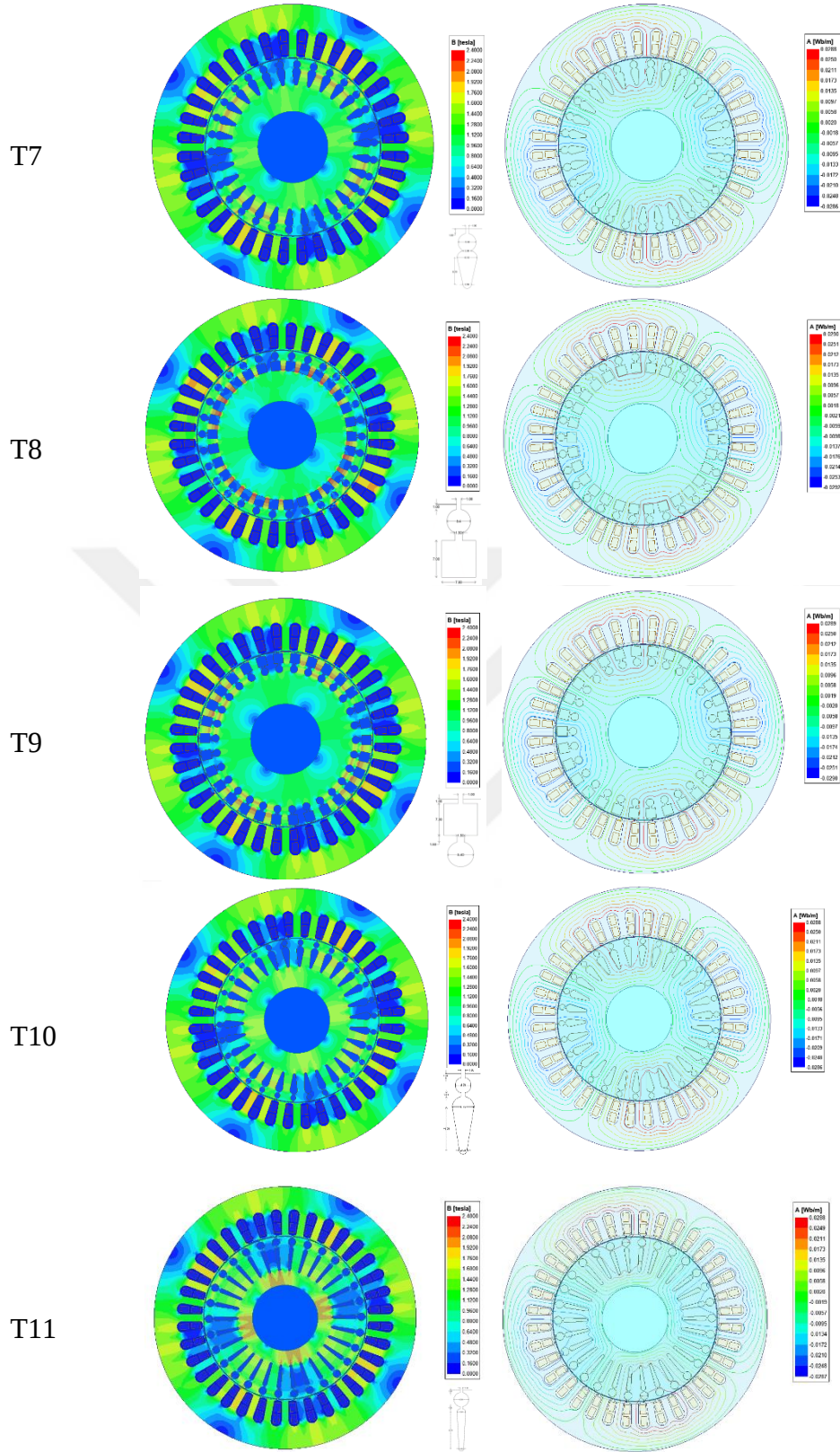


T6



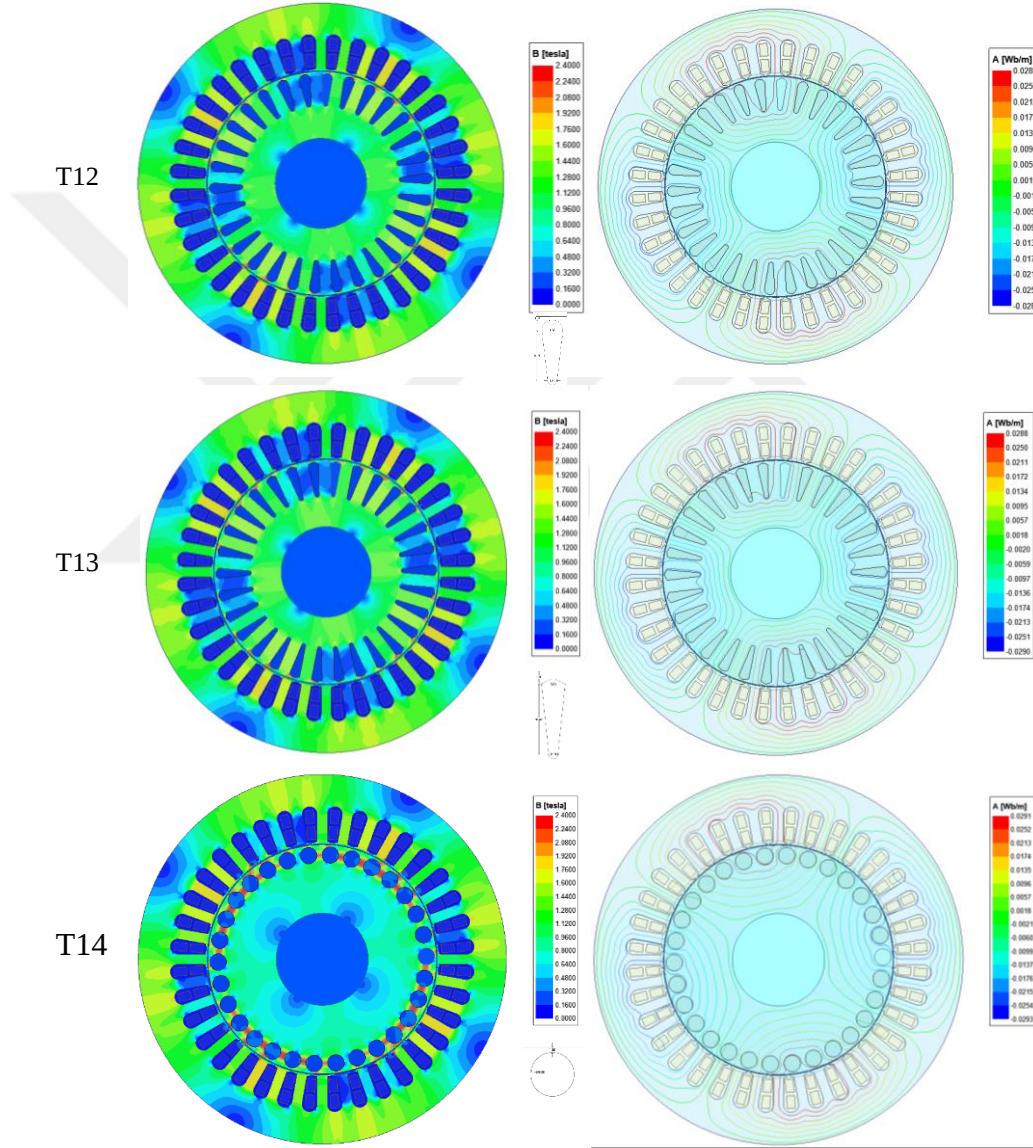
Şekil 6.9 (devam) : TK grubunda bulunan motorların manyetik alan yoğunlukları ve akı dağılımları.

Tek kafesli oluk grubuna ait 6 adet model için manyetik akı dağılımları ve akı yolları gösterimleri Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Bu oluk grubu için ortalama manyetik alan yoğunlukları stator boyunduruğunda 1.6T civarındayken rotor boyunduruğunda 1.4 T ile 1.9T arasında değişmiş; stator dişleri 1.7T civarındayken, rotor dişleri ise 1.7T - 1.9T arasında değişkenlik göstermiştir.



Şekil 6.10: ÇK grubunda bulunan motorların manyetik alan yoğunlukları ve akı dağılımları.

Çift kafesli oluklulara ait 5 adet model için manyetik akı dağılımları ve akı yolları gösterimleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Bu oluk grubu için stator boyunduruğu 1.6T civarındayken rotor boyunduruğu 1.3T ile 2.25T arasında değişmiş; stator dişleri 1.7T civarındayken, rotor dişleri ise 1.6T - 2.25T arasında değişkenlik göstermiştir. ÇK grubunda TK grubuna göre rotor yapısında manyetik değişkenliğin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum alan sabitlemesi yapılırken birbirlerine göre alt ve üst kafes yapılarının boyut farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.11 : TKK grubunda bulunan motorların manyetik alan yoğunlukları ve akı dağılımları.

TKK oluk grubuna ait 3 adet model için manyetik alan dağılımları ve akı yolları gösterimleri Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Bu oluk grubu için stator boyunduruğu 1.6T

civarındayken rotor boyunduruğu 1.0T ile 1.7T arasında değişmiş; stator dişleri 1.7T civarındayken, rotor dişleri ise 1.7T - 2.35T arasında değişkenlik göstermiştir. T14 tipi oluğun aynı grup ve diğer gruplara göre belirgin derecede yüksektir. Oluk alanının sabitliği sağlanmaya çalışılırken bu oluk tipi için optimal değerlerden uzaklaşmıştır. Performans değerlendirme bölümünde bu oluk tipi için alan sabitliği koşullarında diğerlerine göre düşük verimle çalıştığı ve kalkış anında yüksek akım çektiği de görülmektedir.

6.5 Harmonik Spektrum ve Manyetik Kuvvet Analizi

Çeşitli yük koşulları altındaki titreşim eğilimi, manyetik yoğunluk ve elektromanyetik kuvvet dalga şekli ile tutarlı olduğu bilinmektedir [66]. Bu yüzden gerçekleştirilen çalışmada her rotor oluk geometrisi için hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel bileşenlerinin dalga şekilleri, stator çevresince değişen metre kare başına düşen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenlerinin dalga şekilleri son olarak zamana göre değişen eksen üzerinde bulunan bir adet stator dişine ait radyal ve teğetsel kuvvet grafikleri ANSYS Maxwell programı yardımıyla elde edilmiştir. MATLAB programı kullanılarak hava aralığı manyetik akı yoğunluğuna ait radyal ve teğetsel harmonik bileşenleri çıkartılmıştır. ANSYS Maxwell programında yapılan 2B analizlerde özellikle hava aralığı ağ yapısı kalitesine dikkat edilmiştir.

Literatürde bulunan birçok çalışmaya göre teğetsel kuvvetlerin radyal kuvvetlerin yanında ihmal edilebileceği görüşü hakimdir. Bu görüşe ait çalışmalara örnek verilebilir. Stator dişlerine etki eden manyetik kuvvetlerin titreşimlere neden olan elektromanyetik etken olduğunu ve yapısal analizde uyarı olarak kullanılabileceğini anlatmaktadır. Titreşim için radyal kuvveti göz önüne alarak teğetsel kuvvet katkısını ihmal etmiştir. Manyetik düğüm kuvvetler yöntemi ile bir asenkron motorun titreşimlerini SEY yardımıyla incelemiş ve deneysel çalışması ile karşılaştırmıştır. Çalışmada stator yüzeyi boyunca metre kare başına düşen manyetik kuvvet yoğunluğundan yola çıkarak manyetik kuvvet hesabı yapıldığı ve ilgili dalga şekilleri görülmektedir. Bu yöntemin kullanımının elektrikli makinelerin manyeto-mekanik analiz için verimli ve uygun maliyetli bir yöntem sağladığına ulaşmıştır [67].

Büyük güçlü (1 MW) bir asenkron motorun titreşim ve gürültü açısından incelemesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada 1 MW gücünde bir asenkron motor kullanarak statorun

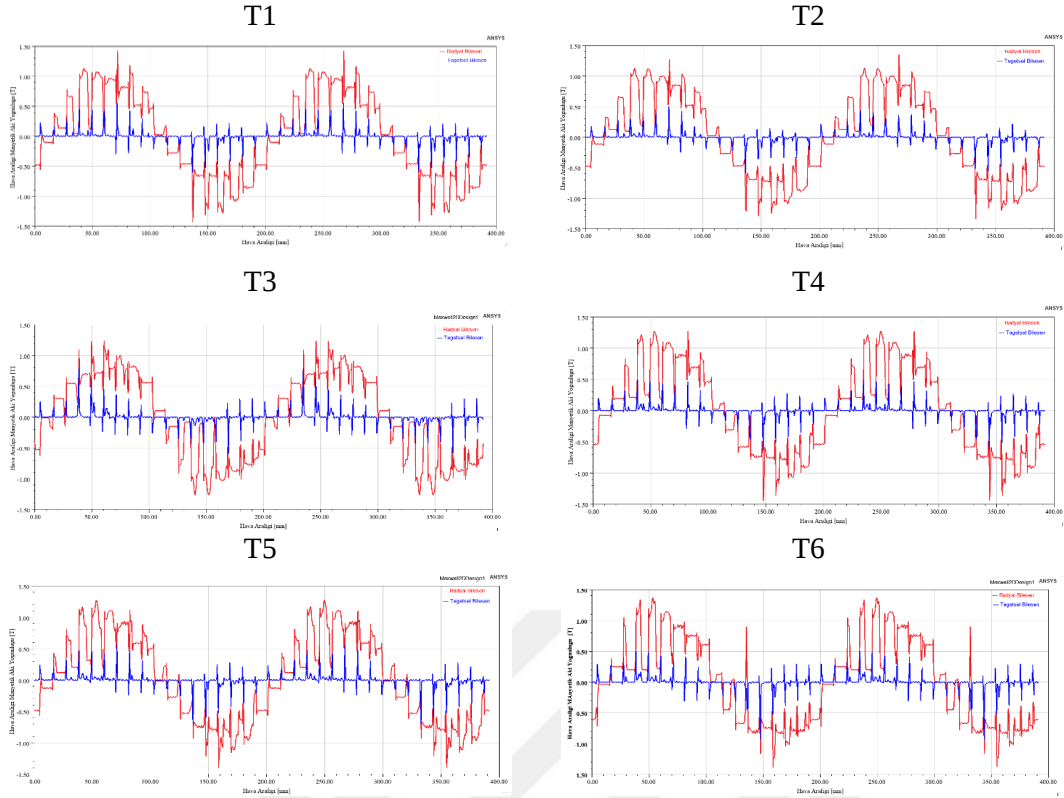
mekanik özelliklerini SEY ile incelemiş, statorun doğal frekansı ve harmonik tepkisini radyal kuvvet etkisi altında ele almıştır [68].

Bir diğer çalışma sincap kafesli asenkron makinanın elektromanyetik titreşiminin yüklenme koşulları altında değişimidir. Çalışmada sadece radyal kuvvet göz önüne alınarak analizler yapılmıştır. Elektromanyetik kuvvet dalgasının genliği analiz edilerek motorların farklı yükler altındaki elektromanyetik titreşimlerinin elde edilebileceğini önermiştir. Yük arttığında, hava aralığı radyal manyetik akı yoğunluğu temel bileşeninin genliği önemli ölçüde artar ve harmonikler daha belirgin hale gelir. Yük arttığında hava aralığı manyetik akı yoğunluğundaki değişimle elektromanyetik kuvvet genliği de artar. Dolayısıyla yük arttığında titreşimin genliği artar [66].

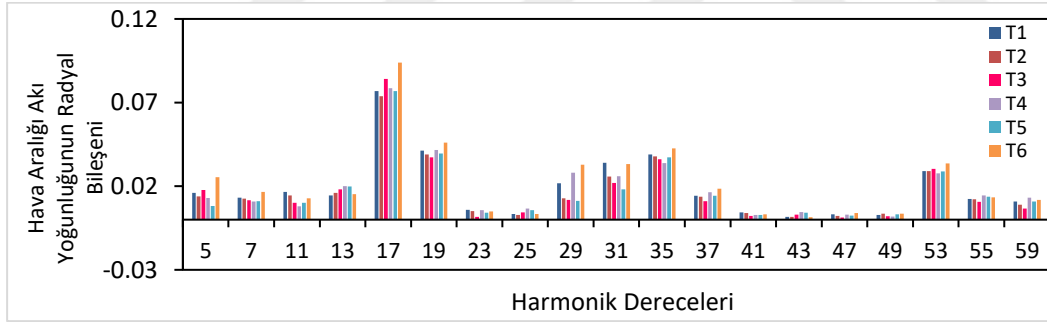
Genel kabulün dışında teğetsel kuvvetin etkisinin radyal kuvvetin yanında ihmal etmeden yükte ve boşta asenkron makina durumları için incelemiştir. Manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeninin teğetsel bileşeni içerip içermemesine göre değişimi ele alınmıştır. Teğetsel akı yoğunluğunun katkısı, radyal kuvvetin frekans içeriğini değiştirmeyeceği fakat radyal kuvvet üzerindeki etkisinin de ihmal edilemeyeceği sonucuna varmıştır [57].

Literatürdeki çalışmalarda göz önüne alınarak tez kapsamında manyetik akı yoğunluğu, manyetik kuvvet, titreşim ve akustik sonuçlarında belirgin etkiyi görmek için motorun incelemesi tam yük koşulları altında incelenmiş teğetsel bileşen etkileri de göz önüne alınarak etkisi incelemelere dahil edilmiştir.

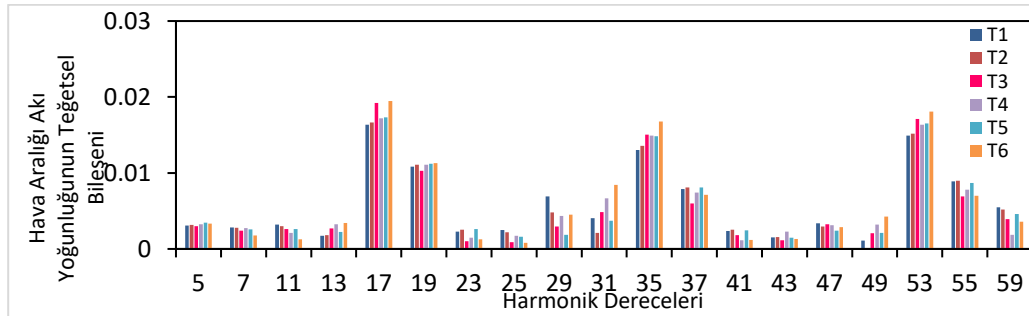
Şekil 6.12, Şekil 6.14 ve Şekil 6.16 TK, ÇK ve TKK oluk gruplarına ait hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni ve teğetsel bileşenine ait dalga şekillerini göstermektedir. ANSYS Maxwell programı ile elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel bileşenin dalga şekillerinden MATLAB yardımı ile FFT dönüşümü gerçekleştirilip harmonik spektrumları çıkartılmış histogram eğrisi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çalışmada radyal bileşene ve teğetsel bileşenin harmonik spektrumları her grup kendi içerisinde Şekil 6.13, Şekil 6.15 ve Şekil 6.17 karşılaştırılmıştır. Tüm oluk tiplerinin harmonik derecelerine göre karşılaştırılması ise Şekil 6.18’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 : TK grubunda bulunan motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğu bileşenleri.



a)

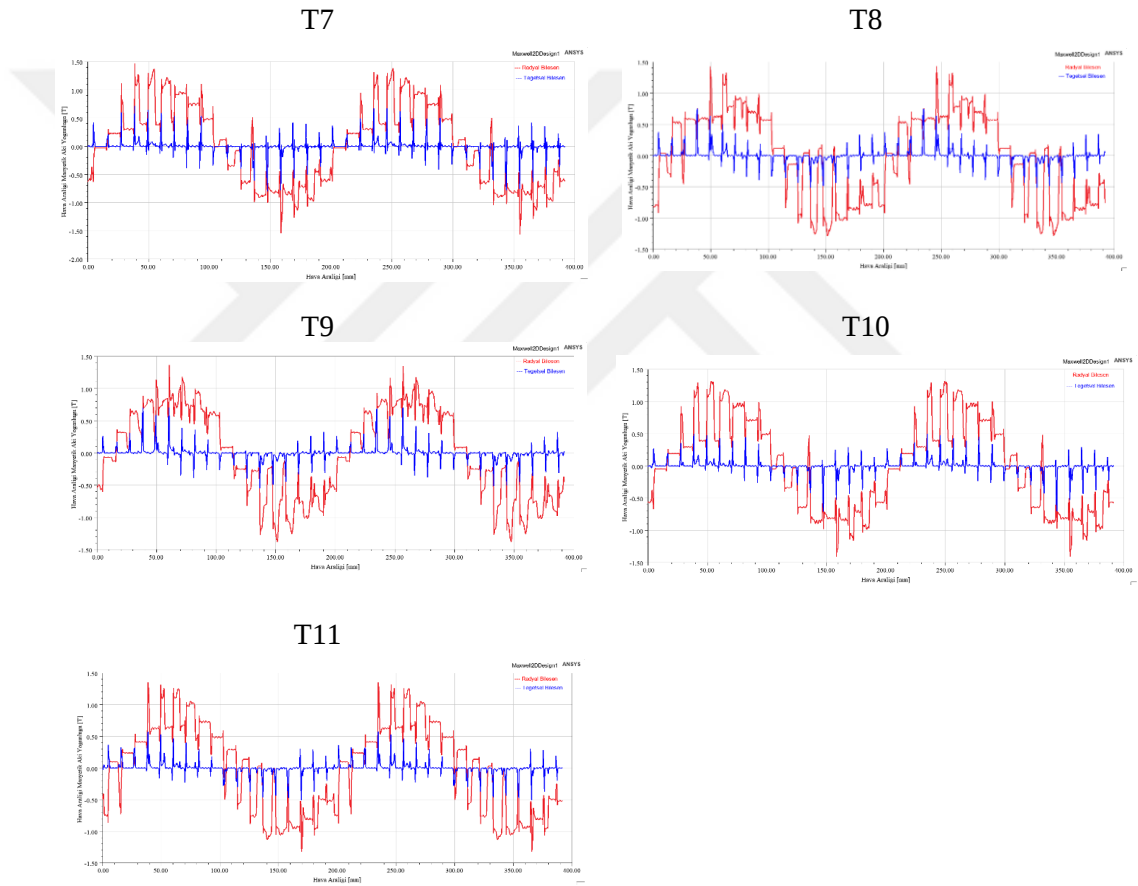


b)

Şekil 6.13 : TK oluk gruplarına ait harmonik bileşenleri a) radyal b) teğetsel.

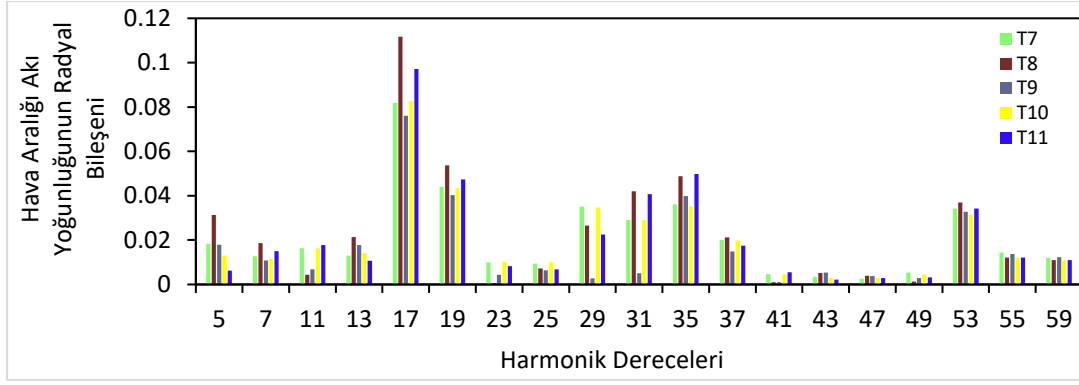
Harmonikler hava aralığı dalga şekli üzerinde bozucu etkisi bulunmaktadır. Çalışmada elde edilen Şekil 6.12'ye bakıldığında dalga şeklinde düzensizlik belirgin olan yapılarda harmonik değerlerinin daha yüksek olduğu Şekil 6.13'te görülmektedir. Manyetik akı yoğunluğu dalga şekli harmonikler açısından ön bilgi vermektedir.

Şekil 6.13'de TK oluk yapılarına ait hava aralığı manyetik akı yoğunlunun radyal ve teğetsel harmonik bileşenleri gösterilmiştir. Şekil 6.12'de T6'ya ait dalga şeklinin diğer TK oluklarına kıyasla daha düzensiz olduğu görülmektedir. FFT analizi sonucunda ise Şekil 6.13(a)'da radyal bileşene ait spektrum değerlerinin en büyük harmonik değerine sahiptir.

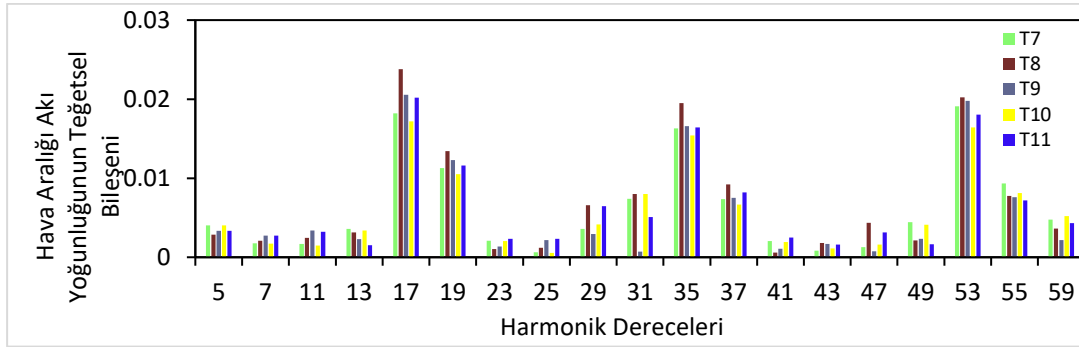


Şekil 6.14 : ÇK grubunda bulunan motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğu bileşenleri.

Şekil 6.14'de ÇK oluk yapılarına ait hava aralığı manyetik akı yoğunlunun radyal ve teğetsel bileşenleri gösterilmiştir. T8 tip oluğa ait radyal dalga şeklinin diğer oluk tiplere kıyasla daha düzensiz dalga şekline sahip olduğu görülmüştür. FFT analizi sonucu Şekil 6.15(a)'da elde edilen radyal bileşene ait spektrum değerlerine bakıldığında ise en büyük harmonik değerine sahiptir.



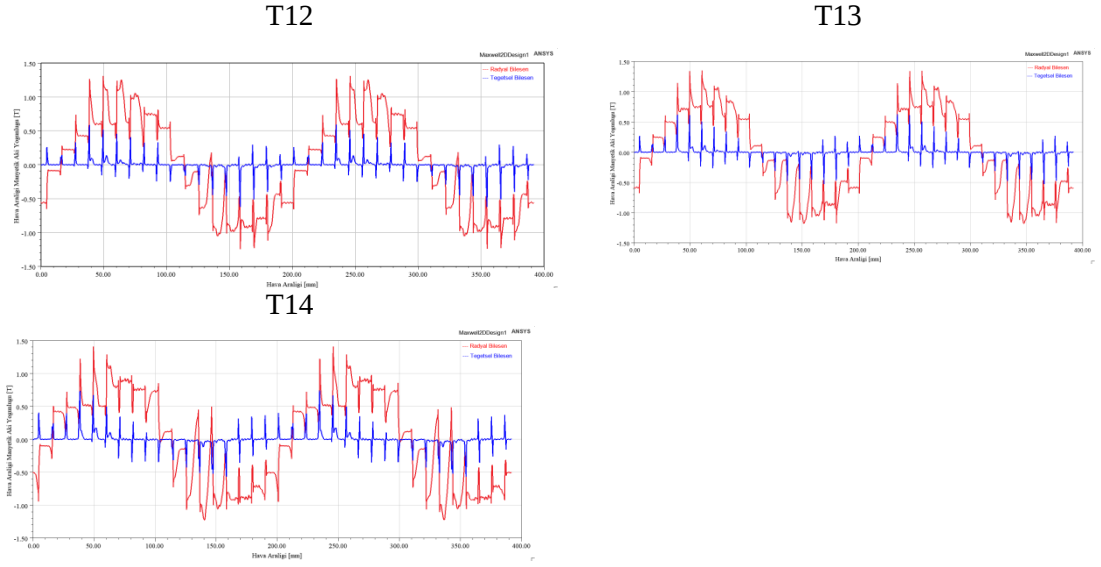
a)



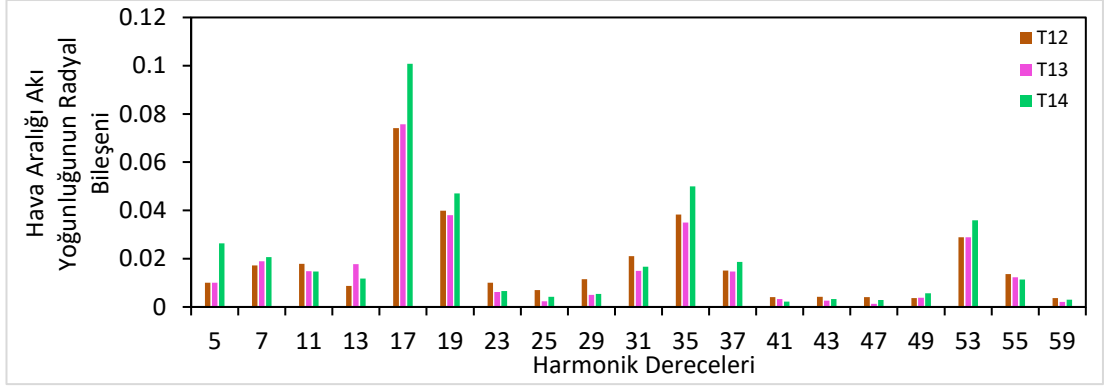
b)

Şekil 6.15 : ÇK oluk gruplarına ait harmonik bileşenleri a) radyal b) teğetsel.

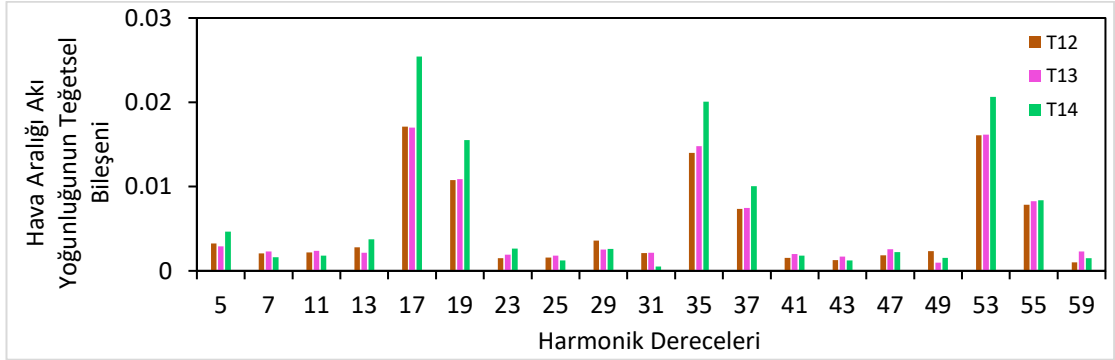
Şekil 6.16’de TKK oluk yapılarına ait hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel bileşenleri gösterilmiştir. FFT analizi sonucu Şekil 6.17(a)’ya ait spektrum değerlerine bakıldığında çoğunlukla en büyük harmonik değerine T14’ün sahip olduğu görülmektedir. Aynı grupta olan diğer iki oluğun T12 -T13 ise harmonik bileşenlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. T14 rotor oluk geometrisinin bölüm 6.3 – 6.4 – 6.5’ten elde edilen verilerde makinanın optimal bir tasarım olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.16 : TKK grubunda bulunan motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğu bileşenleri.



a)



(b)

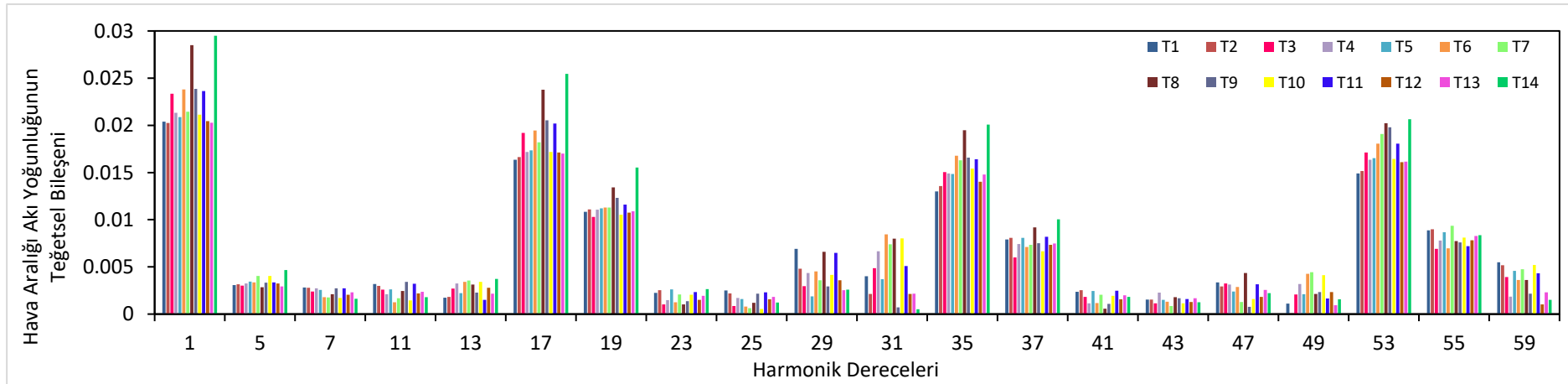
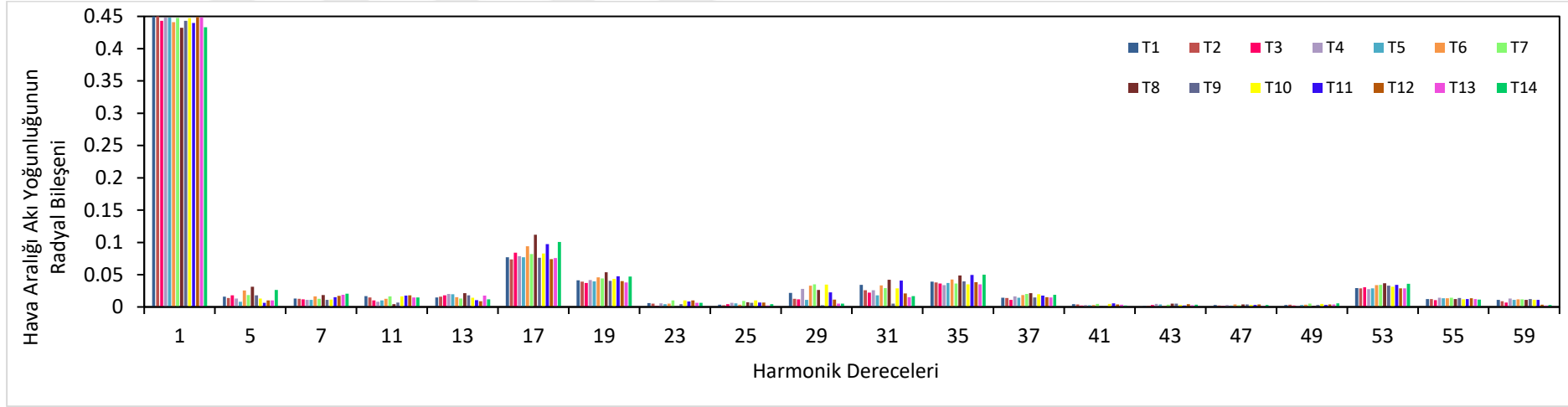
Şekil 6.17 : TKK oluk gruplarına ait harmonik bileşenleri a) radyal b) teğetsel.

Tüm oluk tiplerinin harmonik derecelerine göre karşılaştırılması Şekil 6.18(a) ve Şekil 6.18(b)'de gösterilmiştir. Teğetsel bileşen harmoniklerin radyal bileşen harmoniklere kıyasla daha düşüktür. Şekil 6.18 incelendiğinde genel olarak T6, T8 ve T14'ün

belirgin olduğu 17. harmonikte olduğu gibi bazı harmoniklerde T11’inde değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 6.18 (b) incelendiğinde T8 ve T14 tipi oluklar baskın değere sahip olduğu görülmektedir. Şekil6.18a ve Şekil6.18.b’de temel bileşen değerleri kendi içerisinde büyükten küçüğe doğru sıralaması Çizelge 6.7’de verilmiştir. Harmonikler kuvvet yoğunluğunu etkiler. Manyetik kuvvet ise kuvvet yoğunluğu ile bağlantılıdır. Gürültünün elektromanyetik kaynağı ise manyetik kuvvetlerdir. Bu durumu incelemek için örnek olarak harmoniklerden 5. değer seçilerek Çizelge 6.7’de temel bileşen ve 5. harmonik bileşeninin büyükten küçüğe doğru sıralaması yapılmıştır. Üç gruptan radyal bileşen açısından maksimum değere sahip modeller büyükten küçüğe sırasıyla T8, T6, T14’tür. Ayrıca üç grafikte T6, T8 ve T14 kendi grubu içerisinde 5. harmonik değerinde diğer motorlardan daha belirgin bir farkla; 7. harmonik değerinde daha az bir farkla diğerlerinden büyüktür. 5. harmoniğe benzer belirgin farklılık 17. Harmonik değerinde de görülmektedir. Radyal bileşenin manyetik kuvvet üretimi ve akustik açıdan teğetsel bileşenlere göre daha baskın olduğu bilinmektedir. Bu yüzden gruplar içinden yüksek olan değil bu üç model için teğetsel bileşen karşılaştırması yapılırsa büyükten küçüğe doğru sıralama T14, T6 ve T8 şeklindedir.

Çizelge 6.7 : Tasarlanan motorların harmonik bileşenlerinin karşılaştırılması.

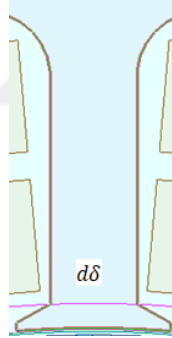
	Radyal Bileşen			Teğetsel Bileşen		
	TK	ÇK	TKK	TK	ÇK	TKK
“Temel Bileşen”	T1	T7	T12	T6	T8	T14
	T2	T10	T13	T3	T9	T12
	T4	T9	T14	T4	T11	T13
	T5	T11		T5	T7	
	T3	T8		T1	T10	
	T6			T2		
“5.Harmonik”	T6	T8	T14	T5	T7	T14
	T3	T7	T12	T6	T10	T12
	T1	T9	T13	T4	T9	T13
	T2	T10		T2	T11	
	T4	T11		T1	T8	
	T5			T3		



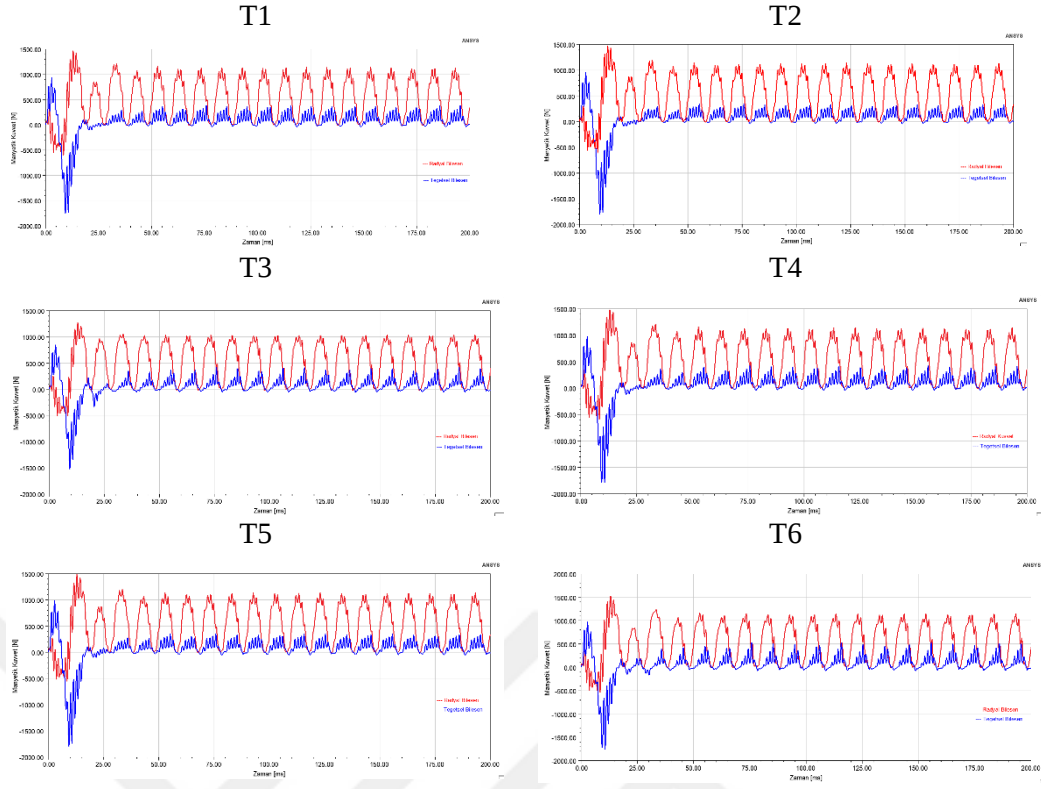
Şekil 6.18 : Tasarlanan motorların harmonik içeriklerinin bileşenlere göre karşılaştırması.

Manyetik akı yoğunluğundan, stator üzerinde etkili olan kuvvet yoğunluğu Denklem 4.26 kullanılarak hesaplanabileceği Bölüm 4.2’de verilmiştir [57]. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğundan metrekare başına düşen manyetik kuvvet yoğunluğu ve sonrasında manyetik kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Manyetik açıdan en çok zorlanan bölge olan stator dişlerinde meydana gelen radyal kuvvet ile teğetsel kuvvet dalga şekilleri ANSYS Maxwell programı ile elde edilmiştir. Denklem 4.30 manyetik akı yoğunluğu ile kuvvet arasındaki ilişki gösterilmiştir. Denklem 4.37’de ifade edilen $d\delta$ manyetik akı yoğunluğunun entegre edildiği mesafedir ve simülasyonlardan alınan örnekle Şekil 6.19’da gösterilmiştir.

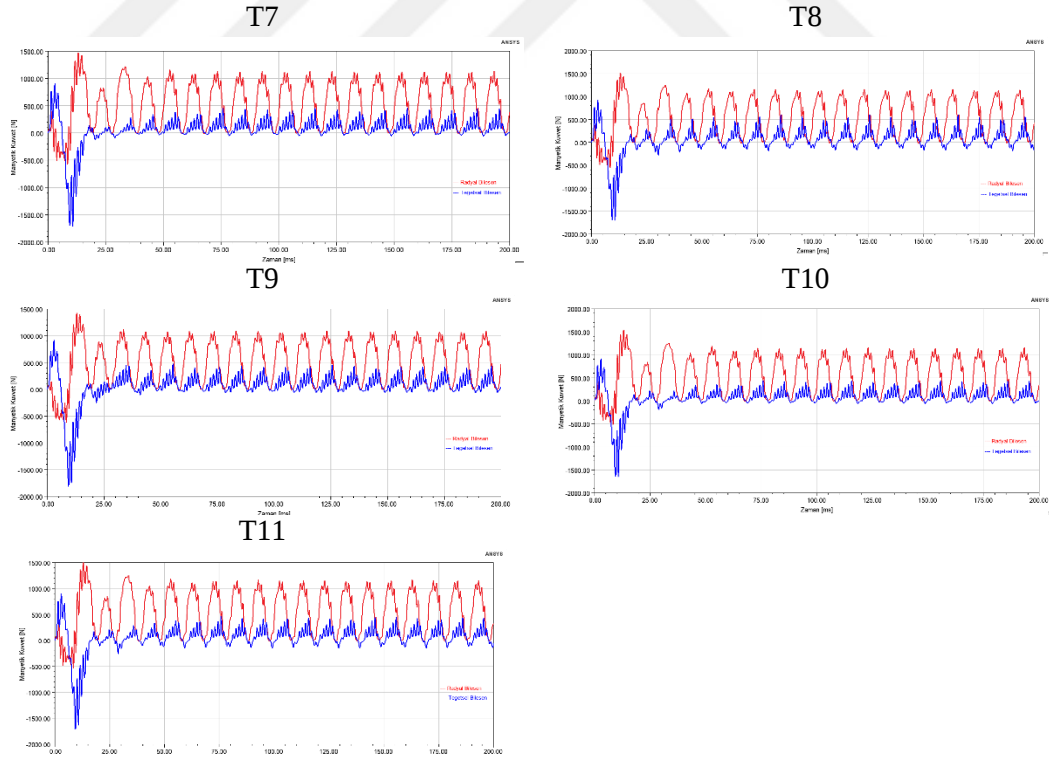
Manyetik kuvvet hem radyal hem de teğetsel bileşenlerden oluşur. Çıkarılan sonuçlardan da görüldüğü üzere radyal kuvvetin büyüklüğü teğetsel bileşenin yanında minimal değerlere sahiptir. Hava aralığında değişen akı demir-hava sınırı olan makinenin dişlerinde yoğunlaşır. Bu sınırlarda yüzey gerilmeleri oluşur ve daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğu için demirde bir gerilim yaşanır. Bu da dişlerin hava aralığına doğru yer değiştirmesine neden olur.



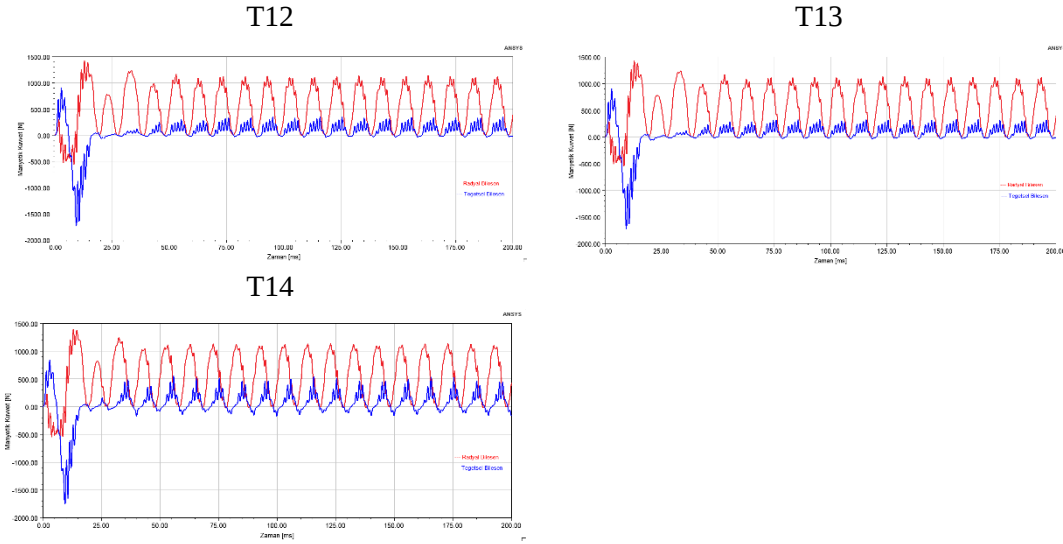
Şekil 6.19 : Eksen üzerinden bir stator dişi için örnek.



Şekil 6.20 : TK grubunda bulunan motorların bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.



Şekil 6.21 : ÇK grubunda bulunan motorların bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.



Şekil 6.22 : TKK grubunda bulunan motorların bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.

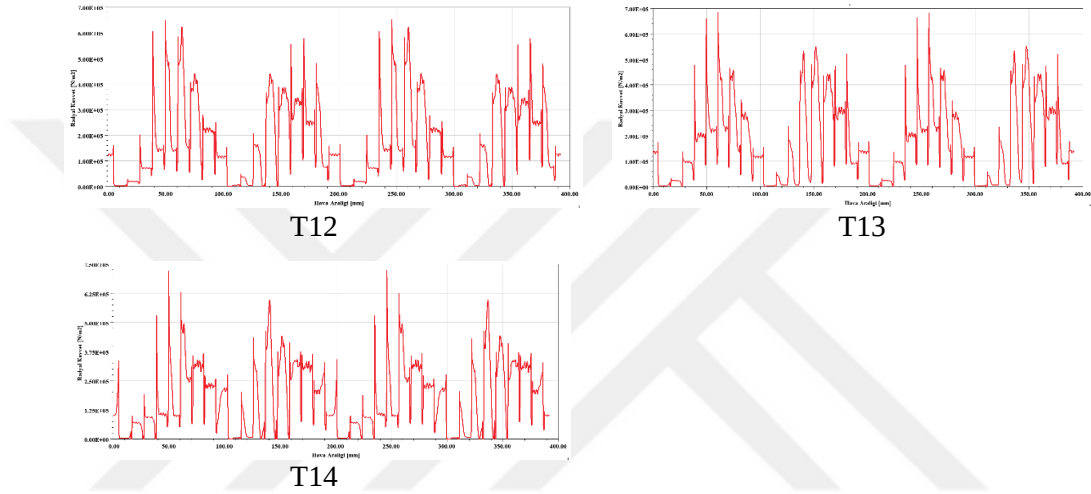
Çizelge 6.8 : Seçilen stator için maksimum ve ortalama manyetik kuvvetler.

Oluk Grubu	Oluk Tipi	Ortalama Radyal Kuvvet (N)	Maksimum Radyal Kuvvet (N)	Maksimum Teğetsel Kuvvet (N)	Ortalama Teğetsel Kuvvet (N)
TK Oluk Grubu	T1	556.7108	1149.4167	388.1765	107.8562
	T2	557.4431	1143.9258	339.7163	102.9133
	T3	534.6506	1036.6565	422.7313	85.4623
	T4	555.2755	1145.2604	424.0394	106.0236
	T5	560.0260	1139.0612	354.1451	100.7938
	T6	560.4447	1151.9734	536.2612	100.8097
ÇK Oluk Grubu	T7	552.8741	1137.6407	457.9663	107.2356
	T8	564.9708	1159.2062	598.2674	91.6061
	T9	541.4680	1096.0971	453.8446	102.0321
	T10	560.7291	1154.9085	439.2569	104.3700
	T11	573.1048	1163.6157	452.7058	91.1935
TKK Oluk Grubu	T12	562.6166	1139.3840	356.5677	98.5477
	T13	563.5418	1135.4557	335.5267	96.9313
	T14	562.9506	1138.6954	545.1537	87.1710

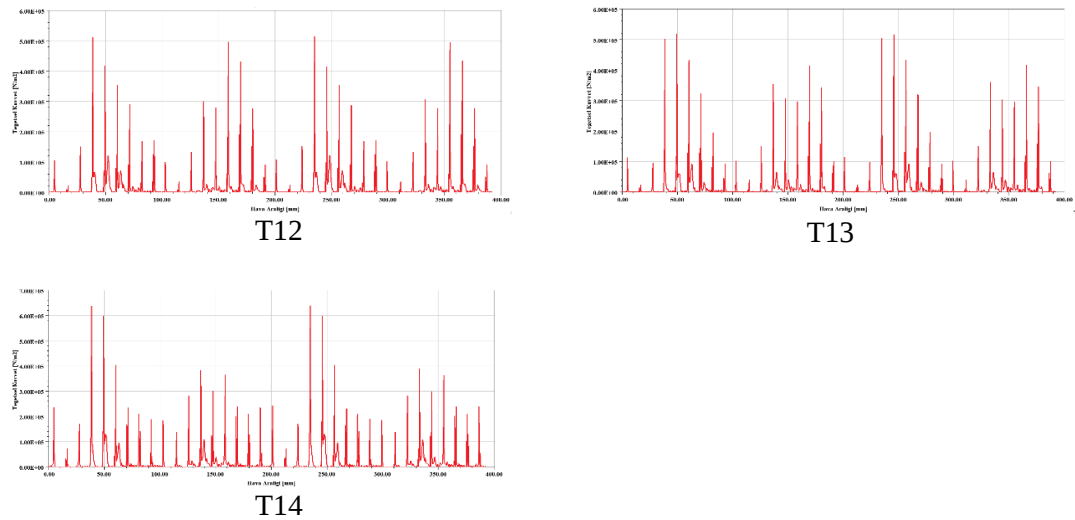
Eksen üzerinde statora ait bir adet diş yüzeyinde meydana gelen radyal ve teğetsel kuvvetin zamana göre değişimi elde edilmiş ve Şekil 6.20, Şekil 6.21 ve Şekil.6.22’de gruplar halinde dalga şekilleri verilmiştir. Dalga şekillerinden hesaplanan ortalama ve maksimum kuvvet büyüklükleri Çizelge 6.8’de verilmiştir. Simülasyon sonucu

incelemede seçilen diş oluk gruplarının kendi içerisinde maksimum radyal kuvvet değerine sahip motorlar T6, T11 ve T12 olduğu gözükmemektedir. Sonuçlardan görüleceği üzere teğetsel kuvvet radyal kuvvetin yanında belirgin miktarda küçüktür.

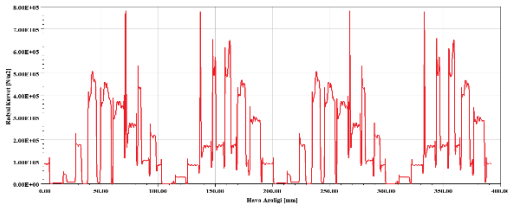
Stator çevresinde metrekaire başına düşen kuvvet yoğunluğu değişimi çıkarılıp diş yüzeyine entegre edilerek manyetik kuvvet elde edilebileceği gösterilmiştir. Kuvvet yoğunlu dalgı şekli hava aralığı boyunca değışmektedir. Bu yüzden dişlere uygulanan manyetik kuvvet değeri de değışken olacaktır. Dişlere uygulanan manyetik kuvvet yukarıda belirtildiği gibi her diş için tekrarlanarak elde edilebilir.



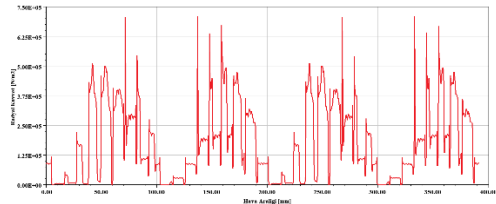
Şekil 6.23 : TKK tipi oluklara ait stator çevresinde değışen metrekaire başına düşen manyetik kuvvetin radyal bileşenine ait dalgı şekilleridir.



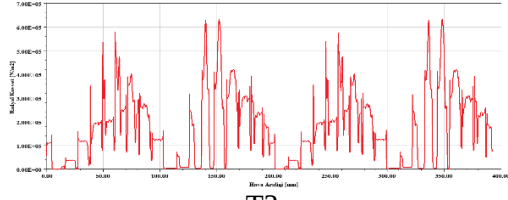
Şekil 6.24 : TKK tipi oluklara ait stator çevresinde değışen metrekaire başına düşen manyetik kuvvetin teğetsel bileşenine ait dalgı şekilleridir.



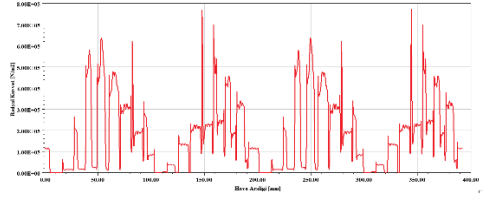
T1



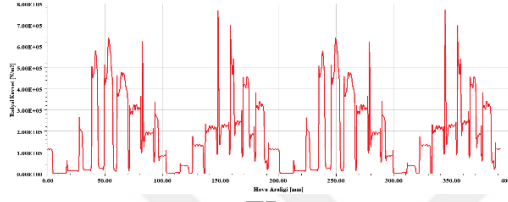
T2



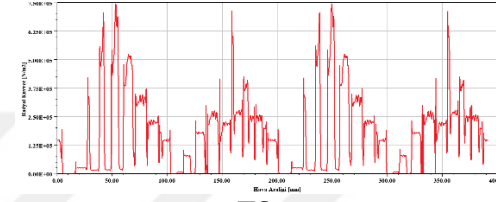
T3



T4

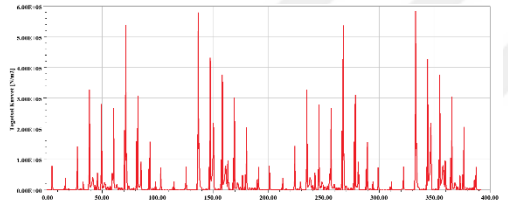


T5

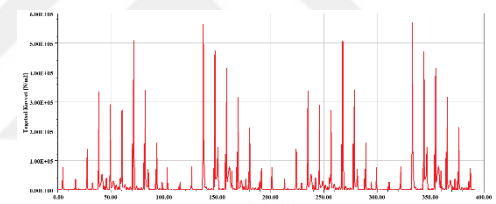


T6

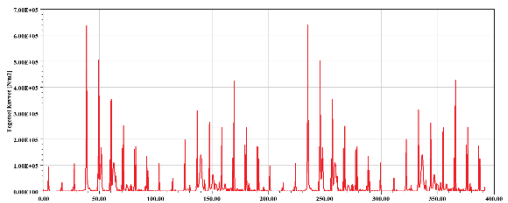
Şekil 6.25 : TK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin radyal bileşenine ait dalga şekilleridir.



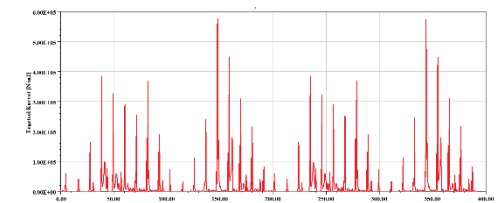
T1



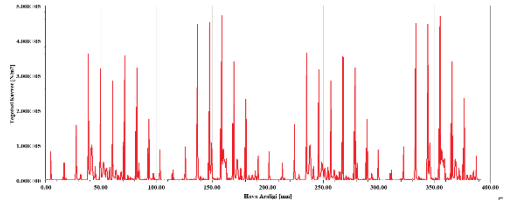
T2



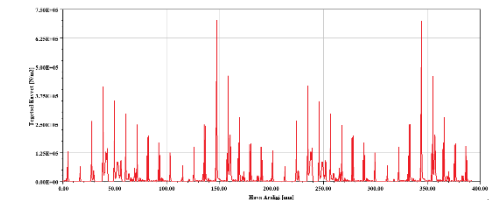
T3



T4

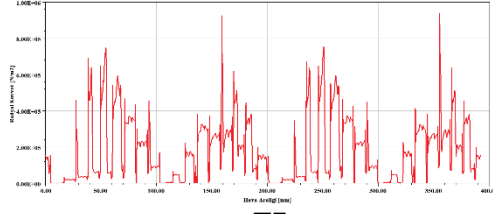


T5

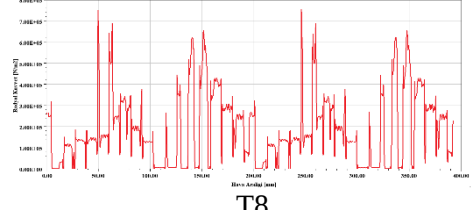


T6

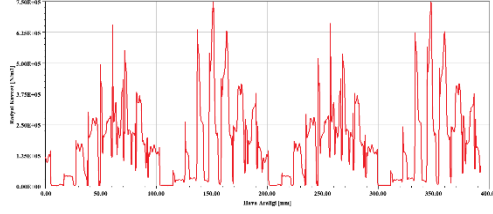
Şekil 6.26 : TK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekare başına düşen manyetik kuvvetin teğetsel bileşenine ait dalga şekilleridir.



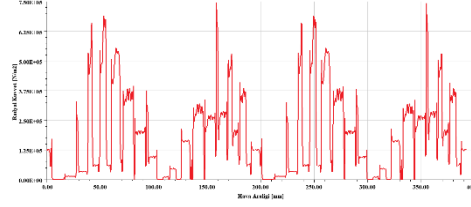
T7



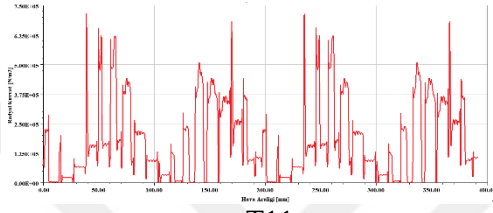
T8



T9

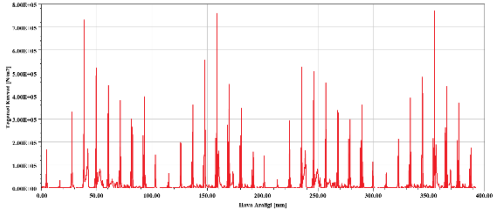


T10

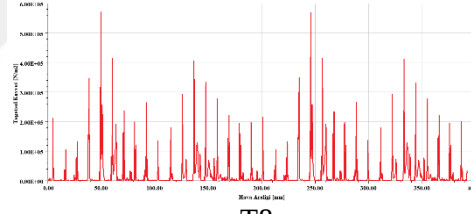


T11

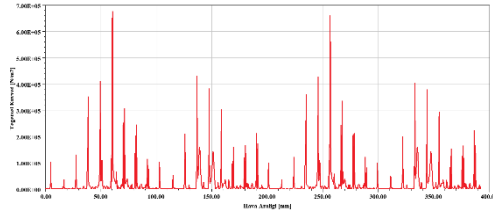
Şekil 6.27 : ÇK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekaire başına düşen manyetik kuvvetin radyal bileşenine ait dalga şekilleridir.



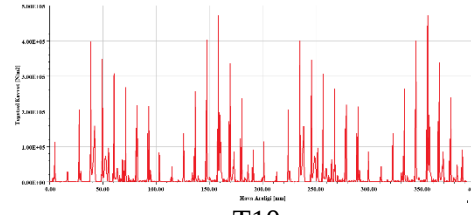
T7



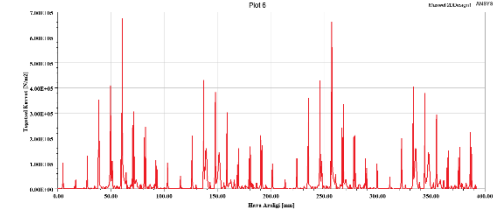
T8



T9



T10



T11

Şekil 6.28 : ÇK tipi oluklara ait stator çevresinde değişen metrekaire başına düşen manyetik kuvvetin teğetsel bileşenine ait dalga şekilleridir.

Hava aralığı boyunca stator çevresinde kuvvet oluşumuna neden olan metrekare başına düşen radyal kuvvet dalga şekilleri Şekil 6.23-6.25-6.27 'de, teğetsel kuvvet dalga şekilleri ise Şekil 6.24-6.26-6.28'de gösterilmiştir. Bu kuvvet yoğunluğunun ortalama ve maksimum değerleri Çizelge 6.9'da verilmiştir. Teğetsel kuvvet yoğunluğun maksimum değeri radyal kuvvet yoğunluğun maksimum değerine yakın gibi gözükse de dalga şekillerinden de görüldüğü üzere yer yer maksimuma gelmiştir fakat ortalama değerinden de anlaşıldığı üzere minimal değerler çoğunlukta olduğundan ortalama değerleri radyal bileşenin %10'u kadardır.

Çizelge 6.9 : Manyetik kuvvet yoğunluğu bileşenlerinin maksimum ve ortalama değerleri.

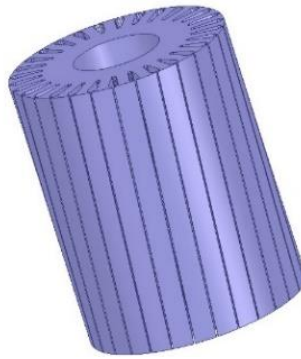
Oluk Grubu	Oluk Tipi	Ortalama Radyal Kuvvet Yoğunluğu $\times 10^5$ (N/m ²)	Maksimum Radyal Kuvvet Yoğunluğu $\times 10^5$ (N/m ²)	Maksimum Teğetsel Kuvvet Yoğunluğu $\times 10^5$ (N/m ²)	Ortalama Teğetsel Kuvvet Yoğunluğu $\times 10^5$ (N/m ²)
TK Oluk Grubu	T1	1,78829	7,81955	5,84744	0,17229
	T2	1,75936	7,09047	5,68745	0,17154
	T3	1,72221	6,32656	6,39347	0,19241
	T4	1,77008	7,71229	5,77063	0,17235
	T5	1,74101	7,43906	4,70831	0,17299
	T6	1,79160	7,43957	7,03620	0,19373
ÇK Oluk Grubu	T7	1,79373	9,37081	7,71250	0,19775
	T8	1,81742	7,55166	5,71890	0,20355
	T9	1,72586	7,48327	6,76274	0,20280
	T10	1,78515	7,45803	4,72652	0,17372
	T11	1,78783	7,15878	5,24739	0,17599
TKK Oluk Grubu	T12	1,73170	6,52252	5,13913	0,16697
	T13	1,72053	6,86088	5,18010	0,16560
	T14	1,73072	7,24950	6,38852	0,20463

Gürültünün elektromanyetik kaynağı olan manyetik kuvvet ses şiddeti seviyesi ile orantılıdır. Tez çalışmasında gürültülü çalışan motorlar incelenmek istenmektedir. Radyal kuvvet yoğunluğu hesabında teğetsel akı yoğunluğu katkısı ihmal edilmesi durumunda oluk grupları arasında T6, T8, T14 oluklarında maksimum radyal kuvvet yoğunluğu görülmesi beklenir. Fakat bu çalışmada stator çevresinde bulunan hava aralığı manyetik kuvvet yoğunluğu elde edilirken teğetsel manyetik akı

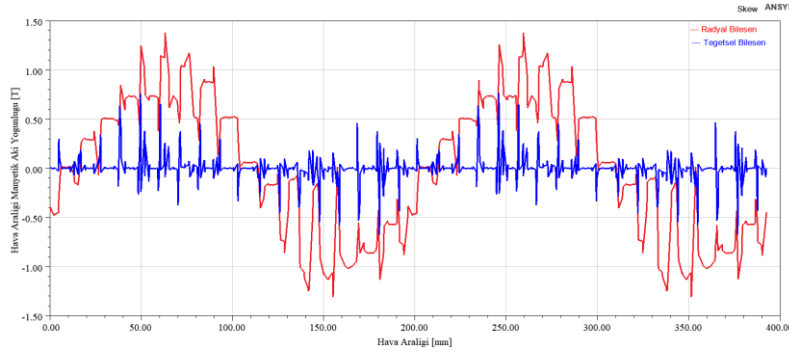
yoğunluğundan gelen etki dikkate alınmıştır. Maksimum radyal kuvveti bulmak için 36 dişe ait radyal kuvvet değerleri çıkarılabilir fakat bu işlem uğraştırıcıdır. Tüm diş yüzeylerinde alınan eğriler özdeş olduğundan radyal kuvvetin denklem 4.37'den radyal kuvvet yoğunluğu ile orantılı olduğu düşünülmüştür. İşlem kolaylığı açısından Çizelge 6.9'dan her gruptan maksimum radyal kuvvet yoğunluğuna sahip motor deformasyon ve akustik inceleme yapılması için seçilmiştir. Bu durumda TK grubundan T1, ÇK grubundan T7 ve son olarak TKK grubundan T14 oluk tipi alınmalıdır. Fakat T14'ün performans ve manyetik özellik açısından yapılan incelemelerde diğer motorlara göre düşük verimli (%78) olduğundan ve onun yerine T12 ele alınmıştır. T12 oluk ağzı kapalı damla tipi oluk olduğu için T1 ile daha rahat karşılaştırabilmek için tercih edilmiştir.

6.5.1 Rotor oluk eğriliğinin etkisi

Bölüm 4.1.4'te kaykı etkisinin teorik incelemesine değinilmişti. Manyetik gürültü kaynağı olan radyal kuvvetin tepe değerini azaltmaya yönelik tekniklerinden biri de kaykı tekniğidir. Eğrilik stator veya rotor oluklarına ya da her ikisine de uygulanabilmektedir. Tez kapsamında rotor yapısının akustik üzerine etkisi incelendiğinden rotor olukları bir oluk kadar eğritilmiştir. Şekil 6.29'da gösterilmiştir. Bu uygulama için T1 oluk tipi seçilmiş ve diğer tüm parametreler sabit kalmak üzere rotor olukları bir oluk kadar eksenel olarak kaydırılmıştır. Bu uygulamada oluşan yeni tip motor T15 olarak adlandırılmıştır. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun değişimi Şekil 6.30'da verilmiştir.

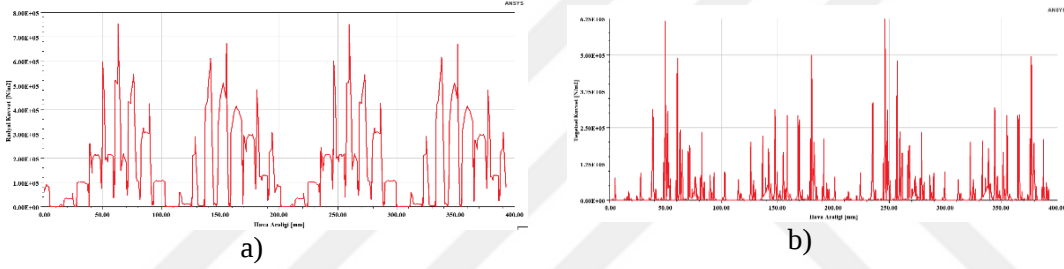


Şekil 6.29 : Rotor oluklarında kaykı uygulaması.

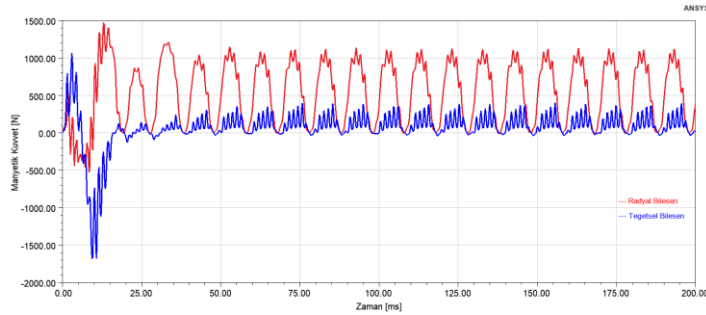


Şekil 6.30 : T15 motorunun hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun dalga şekli.

Şekil 6.31 T15 motorunun metrekaşe başına düşen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenlerini göstermektedir. Şekil 6.31 ise kuvvet yoğunluğunun eksen üzerinde seçilen dişin yüzeyindeki eğriye entegre edilmesi ile elde edilen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenini göstermektedir.



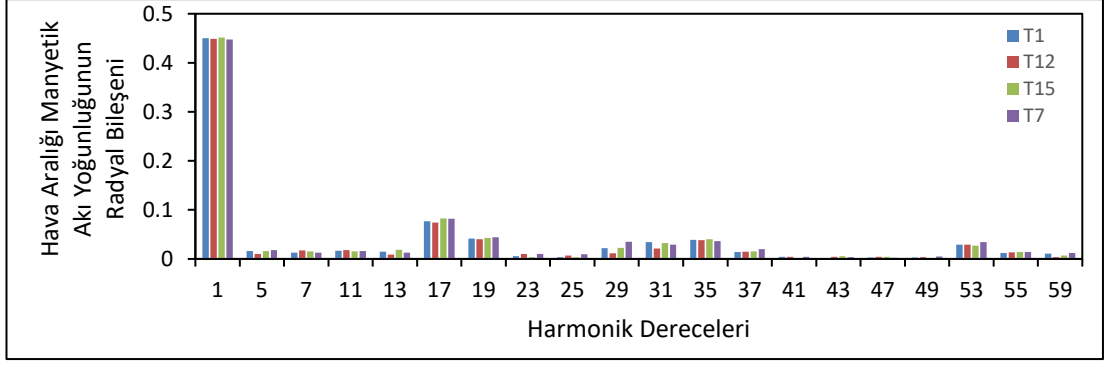
Şekil 6.31 : T15 motorunun stator çevresinde değişen metrekaşe başına düşen manyetik kuvvetin dalga şekilleri a) radyal b) teğetsel.



Şekil 6.32 : T15 motorunun bir adet stator dişine gelen manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenleri.

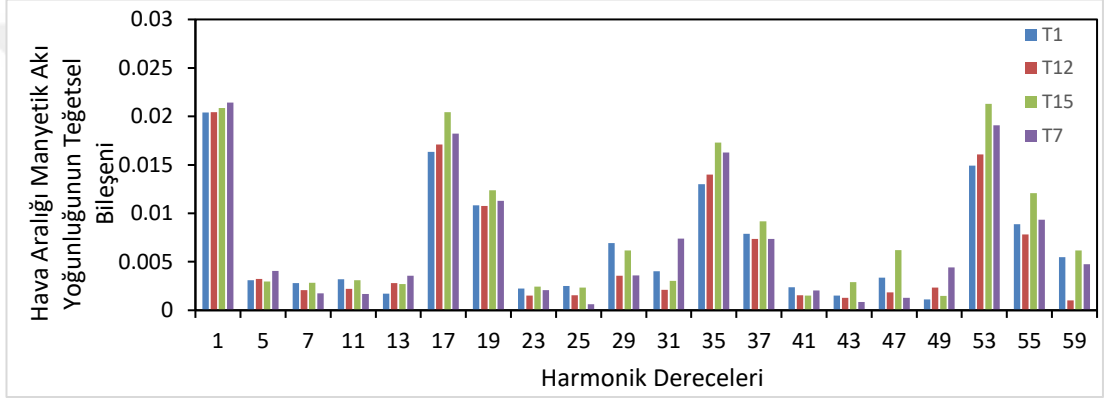
6.5.2 Karşılaştırma

Bu bölümde tüm motorlar için karşılaştırma yapılmamış olup akustik uygulama için seçilen T1- T7- T12- T15 motorları harmonik spektrum ve manyetik kuvvet yoğunluğu açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.33 : Radyal harmonik bileşen karşılaştırması.

Şekil 6.33 ve Şekil 6.34 T1-T7-T12-T15 motorlarının hava aralığı akı yoğunluğunun radyal ve teğetsel bileşenleri açısından karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil 6.34 : Teğetsel harmonik bileşen karşılaştırılması.

Çizelge 6.10 : Manyetik kuvvet karşılaştırması.

Oluk Tipi	Ortalama Radyal Kuvvet (N)	Maksimum Radyal Kuvvet (N)	Maksimum Radyal Kuvvet (N)	Ortalama Teğetsel Kuvvet (N)
T1	556.7108	1149.4167	388.1765	107.8562
T7	552.8741	1137.6407	457.9663	107.2356
T12	562.6166	1139.3840	356.5677	98.5477
T15	558.712	1129.92	399.9485	107.772

Çizelge 6.10'da dört motorlarda aynı eksen üzerinde seçilen dişe gelen manyetik kuvvetin bileşenlerinin maksimum ve ortalama değerlerini göstermektedir. Bu dişe maksimum radyal kuvveti uygulayan T1 motorudur. Maksimum radyal kuvveti maksimum radyal kuvvet yoğunluğu oluşturur. Çizelge 6.11'de 4 motorda kuvvet yoğunluk bileşenleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 6.11 : Kuvvet yoğunluğu karşılaştırması.

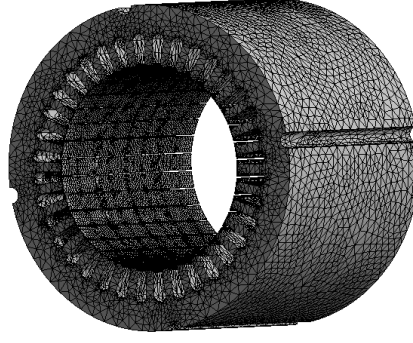
Oluk	Ortalama	Maksimum	Maksimum	Ortalama Teğetsel
Tipi	Radyal Kuvvet	Radyal Kuvvet	Teğetsel Kuvvet	Kuvvet
	Yoğunluğu	Yoğunluğu	Yoğunluğu	Yoğunluğu
	(N/m ²)	(N/m ²)	(N/m ²)	(N/m ²)
T1	1,78829	7,81955	5,84744	0,17229
T7	1,79373	9,37081	7,71250	0,19775
T12	1,73170	6,52252	5,13913	0,16697
T15	1,76485	7,52604	6,23577	0,27180

Radyal manyetik kuvvet yoğunluğunun teğetsel kuvvet yoğunluğunun yanında baskın değere sahiptir. Bu yüzden akustik inceleme için beklenen yaklaşım radyal manyetik kuvvet yoğunluğu ile orantılı olmasıdır. Ses şiddeti seviyesinin T7, T1, T15, T12 olarak beklenmektedir.

Kaykı uygulaması ile yüzeyde dağılan kuvvet yoğunluğu dağıtılarak azaltılmak için yapılan bir yöntem olduğu bilinmektedir. Rotor oluk eğriliği hariç tüm parametreleri aynı olan T15 yapısı karşılaştırılmasında manyetik kuvvet yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Bu farkın belirgin derecede olmaması kullandığımız yapıda bir oluk kadar kaydırmanın optimum değer olmadığını gösterir. Bunun için parametrik çalışma ile uygun kaykı çalışması yapılmalıdır.

6.6 Modal Analiz

Bu çalışmada statora ait doğal frekans değerleri ANSYS Workbench Modal aracı kullanılarak çıkarılmıştır. Stator çekirdeğini oluşturan M36-24G çeliği (M1) için üretici veri sayfası ve literatür araştırmaları ile elde edilen malzeme özellikleri kullanıldı; ANSYS Workbench'e young modülü 200 GPa, kütle yoğunluğu 7700 kg/m³ ve poisson oranı 0,3 olarak işlendi. Modal analiz, yapısal katkıları ortadan kaldırmak için serbest sınır koşulları ile gerçekleştirilebilmekle beraber sınır koşulu uygulanarak gerçekleştirilerek de uygulanabilir. Tez kapsamında iki uygulama için modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz gerçek boyutlarla gerçekleştirilmiş ve kullanılan ağ yapısı Şekil 6.35'te verilmiştir.



Şekil 6.35 : Stator ağ yapısı.

Bölüm 2’de anlatıldığı üzere stator yapısının sabitlenmesi doğal frekansı üzerinde etkisi büyüktür. Bu bilgi doğrultusunda sınır koşulu etkisinin doğal frekansa etkisini incelemek üzere üç çeşit modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar sırasıyla S0, S1 ve S2 olarak adlandırılmıştır. S0 olarak adlandırılan model serbest sınır koşulu uygulamasını temsil etmektedir. S1 modellemesinde 4 adet lehim noktası üzerinden modelde birinci sınır koşulu oluşturulmuş. S2 uygulamasında ise statora dışarıdan bırakılan kulakçık yapıları ile ikinci sınır koşulu oluşturulmuştur. Flanslı yapı uygulaması için Volt Elektrik motorları kataloğundan yararlanılmıştır [69]. Çizelge 6.12 üç tür uygulamanın mod numaralarına göre frekans karşılaştırma tablosu verilmiştir. Şekil 6.36’de üç uygulama için mod numaralarına göre doğal frekans değerleri çizdirilmiştir. Makina da gürültü oluşumunda tehlike oluşturan mod numaralarının düşük modlar olduğu bilindiği için ilk beş mod için inceleme yapılmıştır.

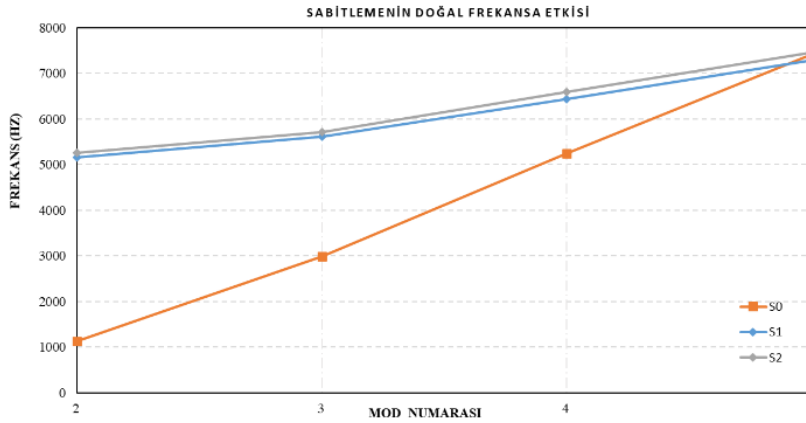
Çizelge 6.12 : Sınır koşullarına göre doğal frekans değerleri.

	Doğal Frekans (Hz)				
	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5
S0	0	1127.7	2989.4	5245.6	7409.4
S1	-	5165.5	5608.8	6441.9	7292.0
S2	-	5254.4	5718.6	6591.1	7455.5

S0 uygulamasında diğer iki uygulamadan farklı olarak “mod 1” görülmüştür. S1 ve S2’de sınır koşulu uygulamasından bu modun gözlenmediği mod numarasının 2’den başladığı görülmüştür.

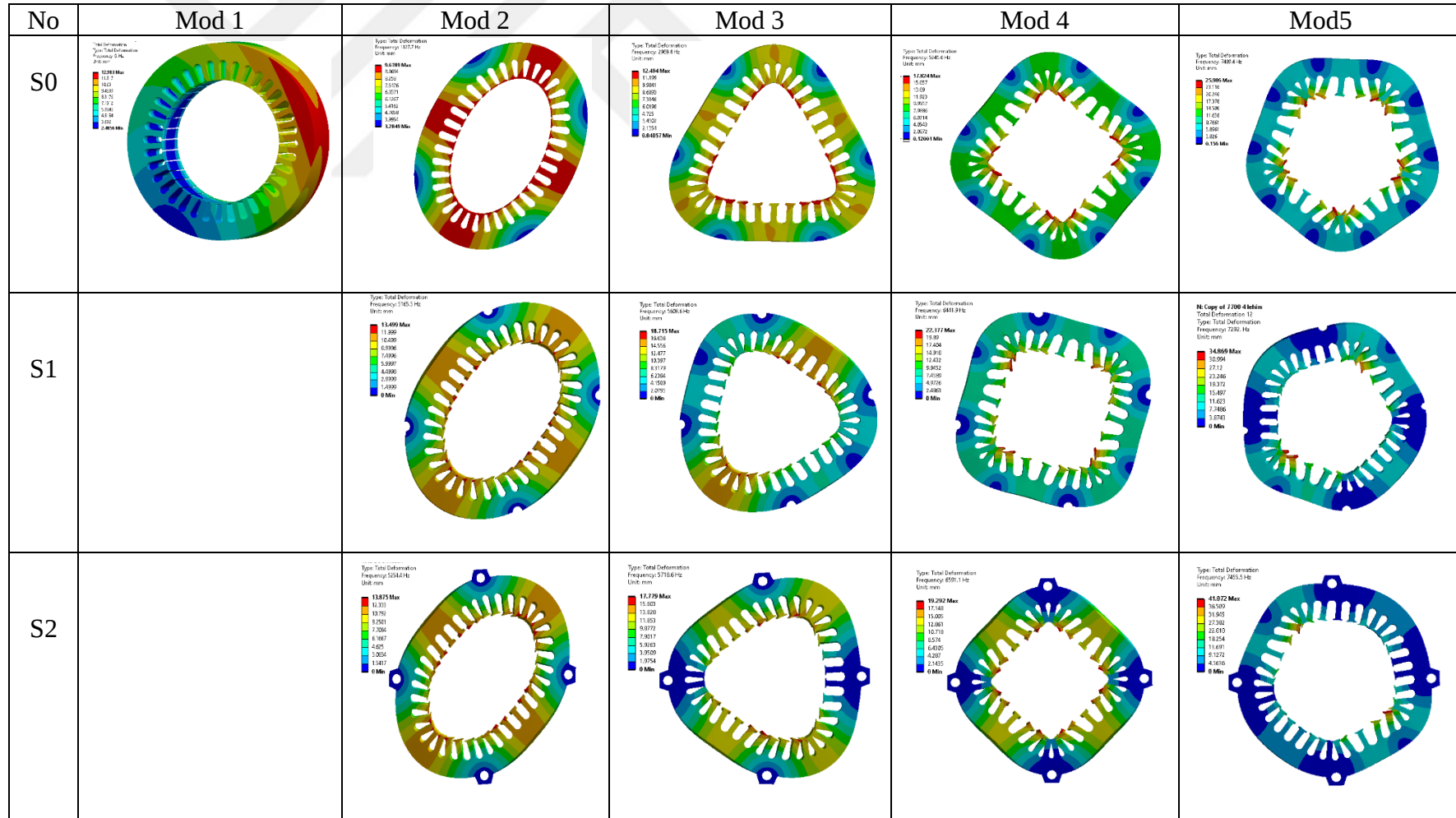
Modal analiz sonucu saf modlar ve antisimetrik modlar elde edilir. Bu çalışmada modal analizden elde edilen saf mod şekilleri verilmiş ve frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 6.37’de doğal frekans ve şekillerini göstermektedir.

Özellikle düşük modlar makinanın akustik açıdan tehlikeli değerleridir. Sınır koşulları farklılığı ile bu düşük modlara ait frekans değerlerinin yükseltilebileceği görülmüştür. Böylece makinanın rezonansa girerek gürültülü çalışması için önlem alınabilmektedir. S1 ve S2 uygulamasına ait doğal frekans değerleri birbirine yakın olmakla beraber en yüksek doğal frekans değeri S2 uygulamasında görülmüştür. S1 ve S2 arasındaki bu farklılığın görülmesinde rijitliğin etkili olduğu söylenebilir. Çalışmanın ileriki aşamasında kullanılmak üzere S1 uygulaması seçilmiş ve buna bağlı olarak simülasyonlar seçilmiştir.



Şekil 6.36 : Doğal frekansın sınır koşullarına göre değişimi.

Serbest sınır koşulları için literatürde bulunan serbest sınır koşulları altında stator modal frekansı için analitik bir yaklaşımı ele almış ve deneysel olarak doğrulamıştır. C_m düzeltme katsayısı, m mod numarası, D ortalama çap, h et kalınlığı, l paket boyu, E elastisite modülü, I eylemsizlik sabiti, ρ kütle yoğunluğu olmak üzere Denklem 6.1 ve 6.2’de silindirik kabuk yaklaşımı ile mod 2 için frekans hesabı verilmiştir [70].



Şekil 6.37 : Modal analiz sonuçları.

m=2 için;

$$f_m = C_m * \frac{2}{\pi * D^2} * \frac{m * (m^2 - 1)}{\sqrt{m^2 + 1}} \sqrt{\frac{E * I}{\rho * l * h}} \quad (6.1)$$

$$C_m = -0.0053m^2 + 0.0192m + 0.3079 \quad (6.2)$$

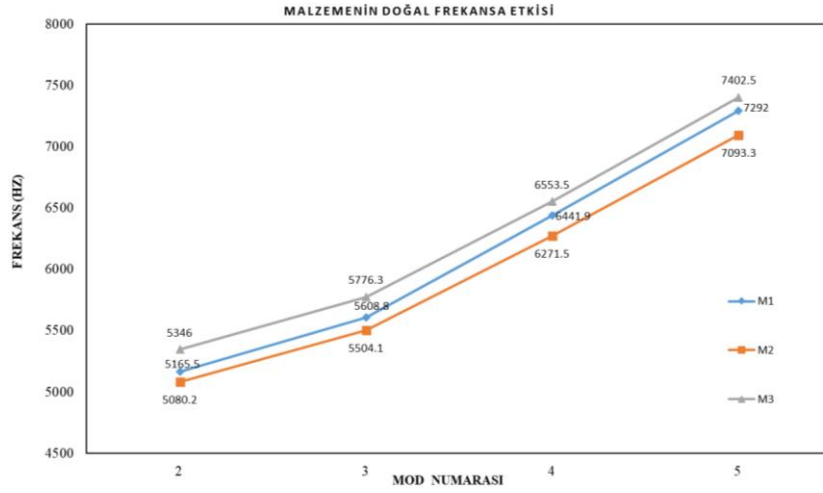
Tez kapsamında mod iki değeri için Denklem 6.1 ve 6.2 kullanılarak hesaplama yapıp FEM sonuçları ile arasındaki ilişki karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım doğrultusunda analitik olarak serbest koşullar altında mod 2 için frekans değeri 1160 Hz hesaplanmıştır. Analitik hesaplamalar ile FEM sonucu arasında %2,78 farklılık görülmüştür.

Modal analiz farklı alanlarda önemli bir konudur. Literatürde [71] kirişler için yapılan modal analizde malzeme özelliklerinin doğal frekans üzerine etkisini incelenmiştir. Sabit elastisite modülü ve poisson oranı altında modların doğal frekanslarının, tüm mod türleri için kütle yoğunluğu ile değişiminin ters orantılı olduğunu göstermiştir. Ayrıca doğal frekans değerleri, düşük mod değerleri için kütle yoğunluğu değişimine karşı daha duyarlıdır [71]. İncelemesi yapılan kiriş yapısı kesit alanı dolu ve sabittir. Tez kapsamında kullanılan yapı ise dişlerin varlığı göz önüne alınıp ihmal edilmediği için düz silindir değildir. Düz bir yapıya göre daha çok zayıf noktası olduğu söylenebilir. Malzemenin bir elektrik motorunun stator doğal frekansı üzerinde etkisini incelemek üzere sınır koşuluna (sabitleme türüne) karar verildikten sonra üç farklı malzeme için modal frekans analizleri gerçekleştirildi.

Çizelge 6.13 : Malzeme özellikleri.

Malzeme No	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	Young Modülü (Gpa)	Poisson Oranı
M2	7850	200	0.3
M3	7305	205	0.27

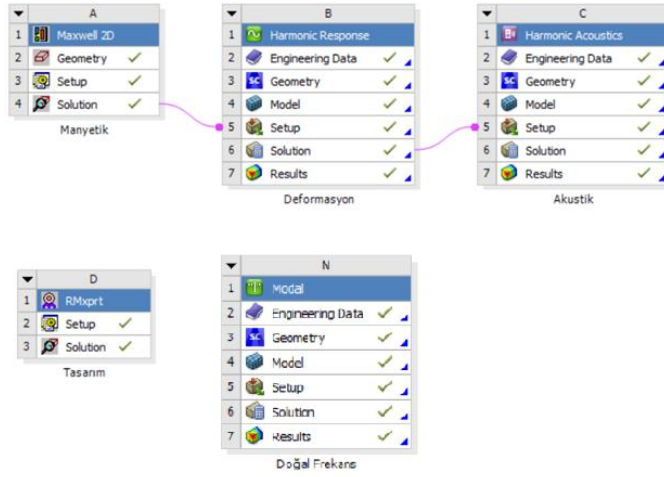
S1 uygulaması seçilip farklı malzeme olarak M2 ve M3'e ait simülasyonda kullanılacak değerleri Çizelge 6.13 verildi. Şekil 6.38'de sınır koşulu sabit tutularak malzemenin doğal frekansa etkisi incelendi malzemenin kütle yoğunluğunun etkisinin baskın olduğu ve doğal frekans ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Şekil 6.38'de eğriler üzerinde doğal frekans değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.38 : Doğal frekansın malzeme ile değişimi.

6.7 Deformasyon ve Akustik İnceleme

Çalışmada ANSYS Electronics Desktop'ın araçları olan Rmxprt ve Maxwell 2D ile motorun tasarımı ve manyetik analizleri gerçekleştirilmiş ardından ANSYS Workbench'te yapısal incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ses ve gürültü oluşumu titreşim hareketine bağlıdır. Bu yüzden yapısal analizin sonuçları akustik analiz için girdi olarak alınmıştır ve ANSYS Workbench üzerinden “Harmonic Acoustics” aracı yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Yapının doğal frekans ve katlarına rastlayan bir etken varlığında makinanın ses şiddeti seviyesinde artış meydana gelmektedir. Bu etkenlerden biri de elektromanyetik etkenlerden biri olan manyetik kuvvettir. Bu tez kapsamında uyarı olarak manyetik kuvvetler kullanılmıştır. Maxwell 2D aracında gerçekleştirilen kuvvet analizi ile yapısal analize geçilmiş kuvvetlerin stator üzerinde neden olduğu deformasyon incelenmiştir. Akustik inceleme için stator havadan oluşan küresel yapı içerisine alınmış ve buradaki ses dağılımı incelenmiştir. Şekil 6.35'te motor tasarımı, manyetik analiz, doğal frekans analizi, yapısal analiz ve akustik analiz için kullanılan ara yüzler içermektedir.



Şekil 6.39 : ANSYS Workbench arayüzü.

Çalışmada kullanılan motorda sabitleme tipi olarak S1, malzeme olarak M1 seçilmiştir. Çalışmada kullanılan stator geometrisi ve ağ yapısı Şekil 6.40'ta görülmektedir. Şekil 6.40(a)'da görülen mavi alanlar sabitleme noktasını göstermektedir. Kullanılan akustik yapı için küresel model seçilmiştir. Şekil 6.40(c)'de görülen akustik yapı havadır ve ilgili parametreleri Çizelge 6.14'te verilmiştir.



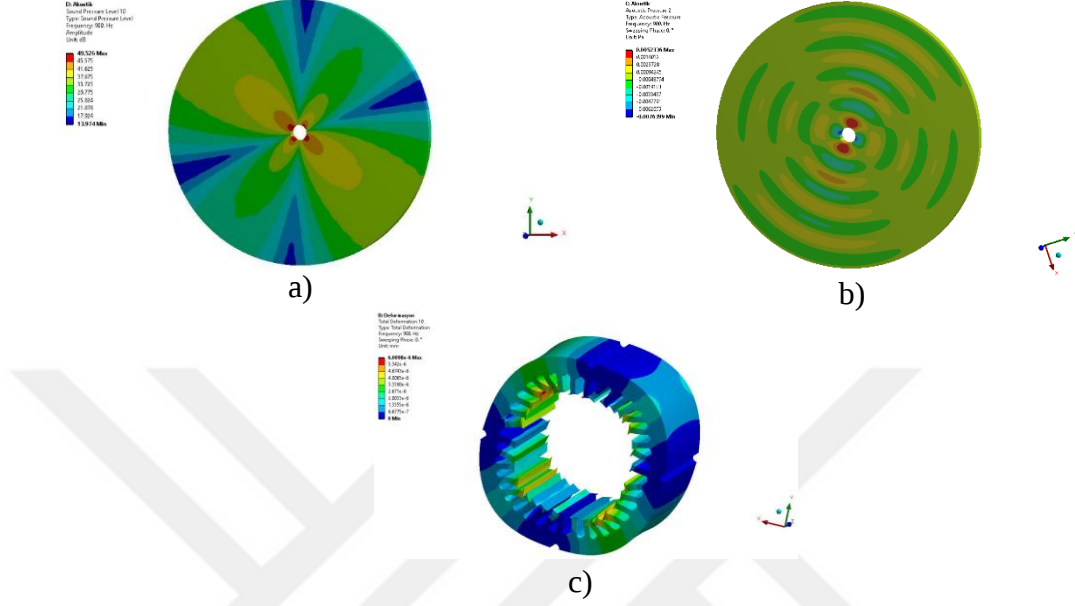
Şekil 6.40 : Stator geometrisi a) sabitleme noktaları b) ağ yapısı c) akustik yapı.

Çizelge 6.14 : Akustik yapı parametreleri.

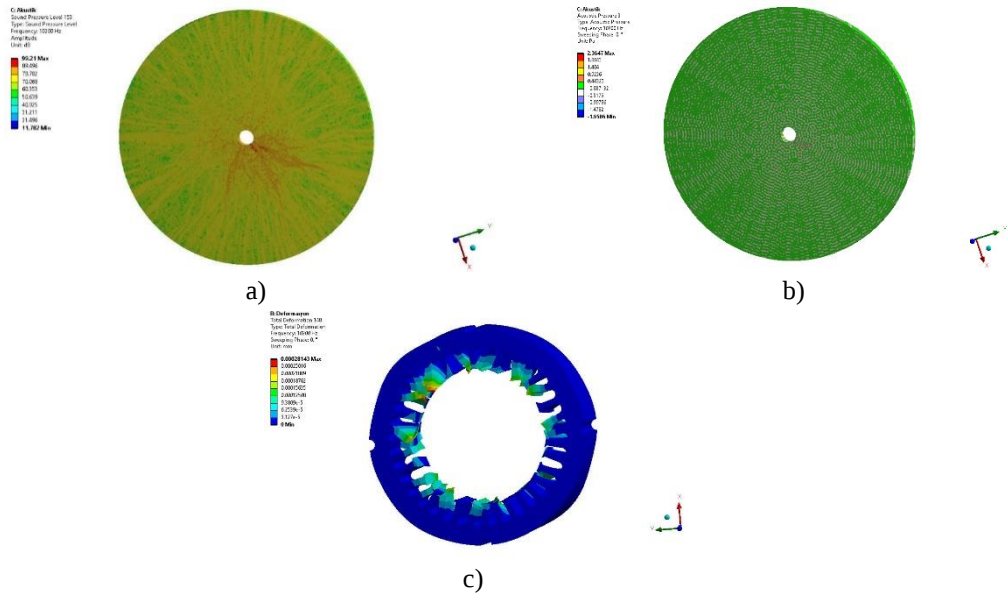
Kütle Yoğunluğu	1.2041E-9 kg/mm ³
Ses Hızı	343240 mm/s

Analizler doğal frekans değerlerini içerecek şekilde 0-10500 Hz arasında 100Hz aralıklı olarak seçilmiştir. 10200 Hz değerinde alınarak inceleme yapılmıştır. Doğal frekans değerleri sadece stator için gerçekleştirildiği için belli mekanik yapıların katma değerleri göz ardı edilmiştir. Literatüre [68] göre radyal kuvvetlerin yapı tepkisini değiştirdiğinden dolayı maksimum yer değiştirmenin meydana geldiği frekans değerlerinin mod frekanslarına karşılık gelmediğini fakat bu değerlere yakın

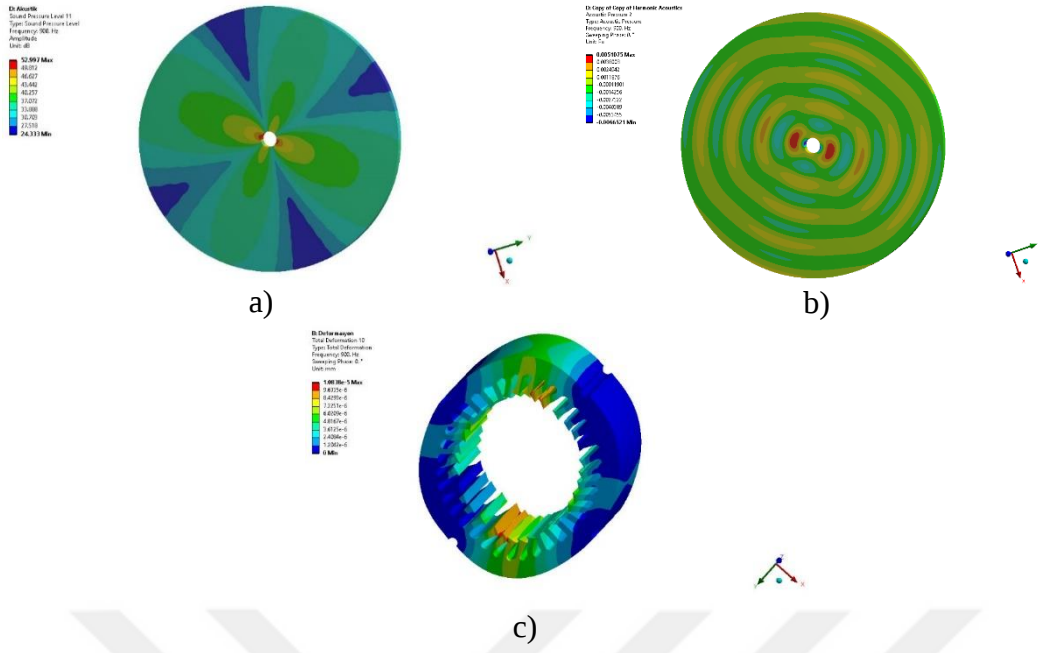
konumlarında olduğunu göstermiştir. Bu yüzden 5165.5 Hz, 5608.8 Hz, 6441.9 Hz ve 7292 Hz civarlarına yakın ve katlarında yüksek ses değerleri beklenmektedir. Yapısal analizden 900Hz ve 10200 Hz değerindeki toplam deformasyon, ses basıncı seviyesi ve ses basıncı dağılımı T1, T7, T12v e T15 için gösterilmiştir.



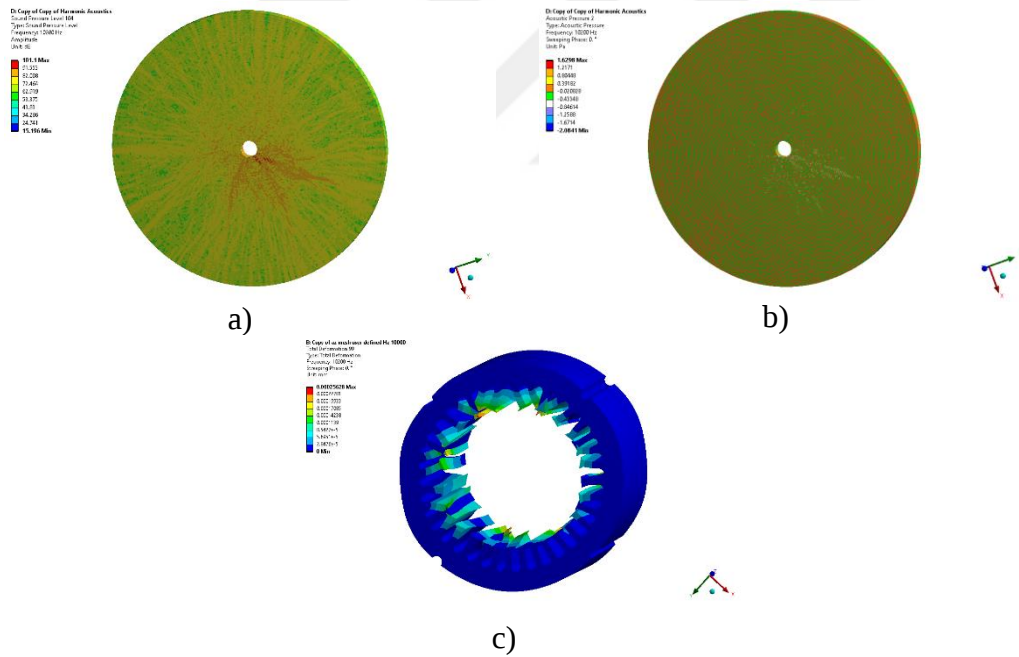
Şekil 6.41 : T1 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.



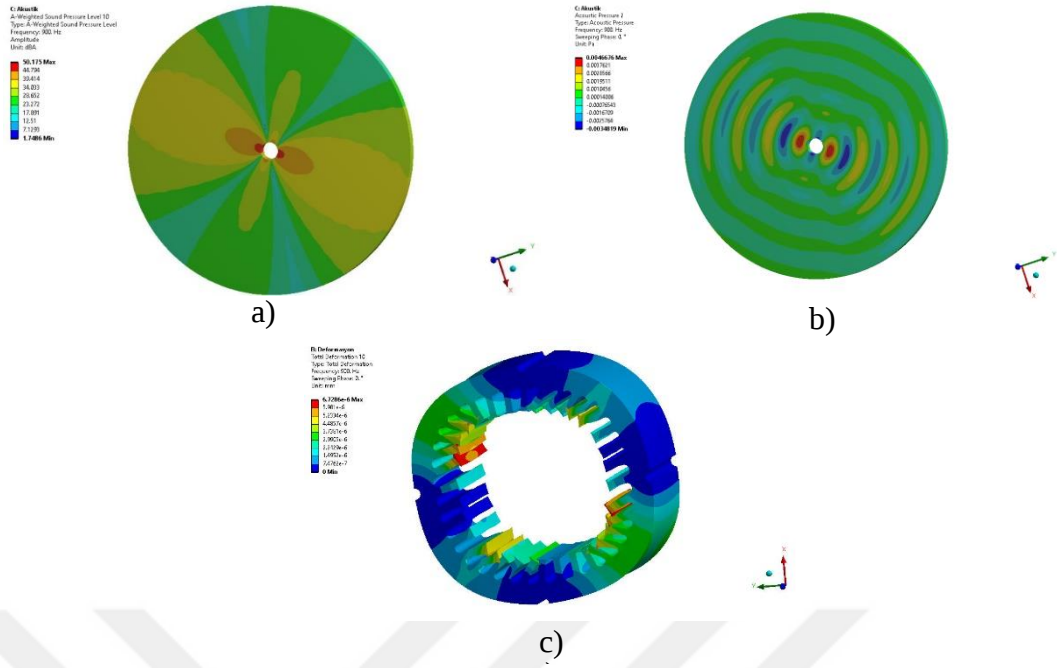
Şekil 6.42 : T1 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.



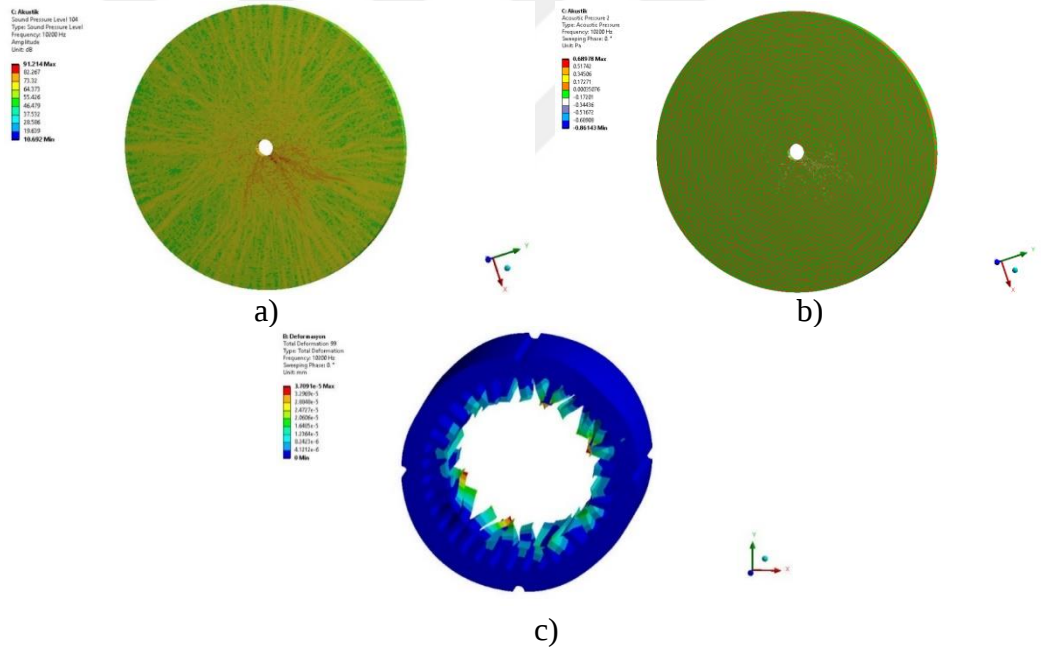
Şekil 6.43 : T7 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.



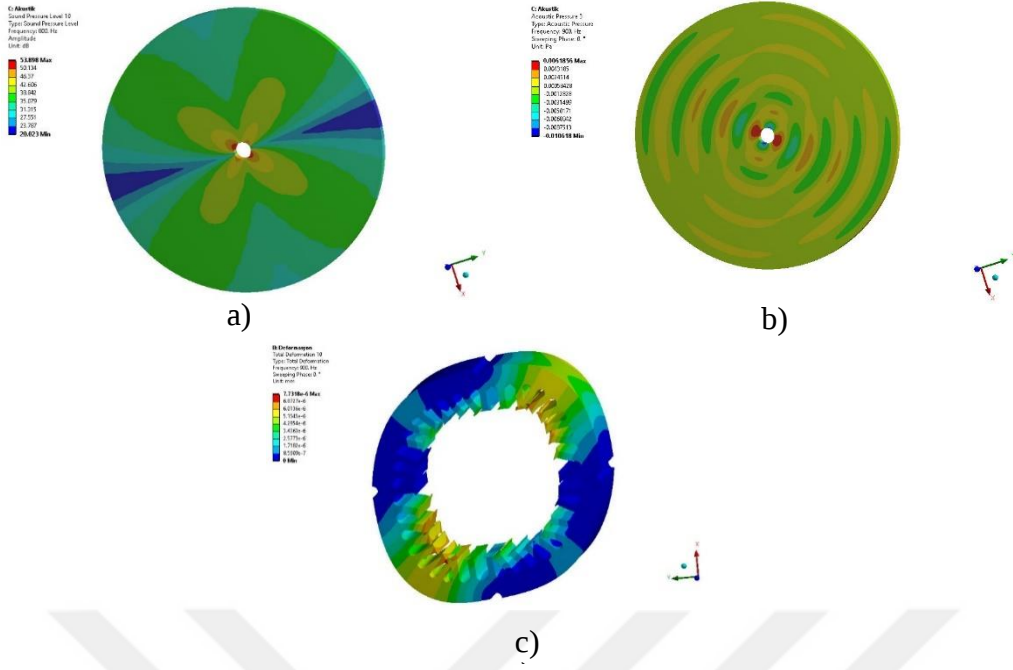
Şekil 6.44 : T7 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.



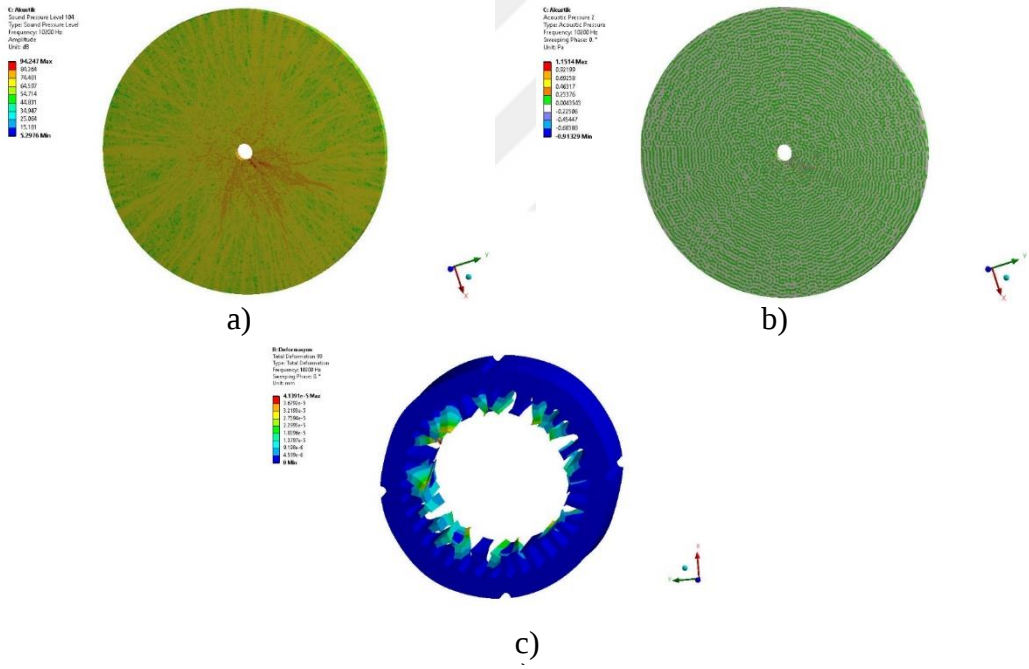
Şekil 6.45 : T12 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.



Şekil 6.46 : T12 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.



Şekil 6.47 : T15 oluk geometrisi için 900 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.

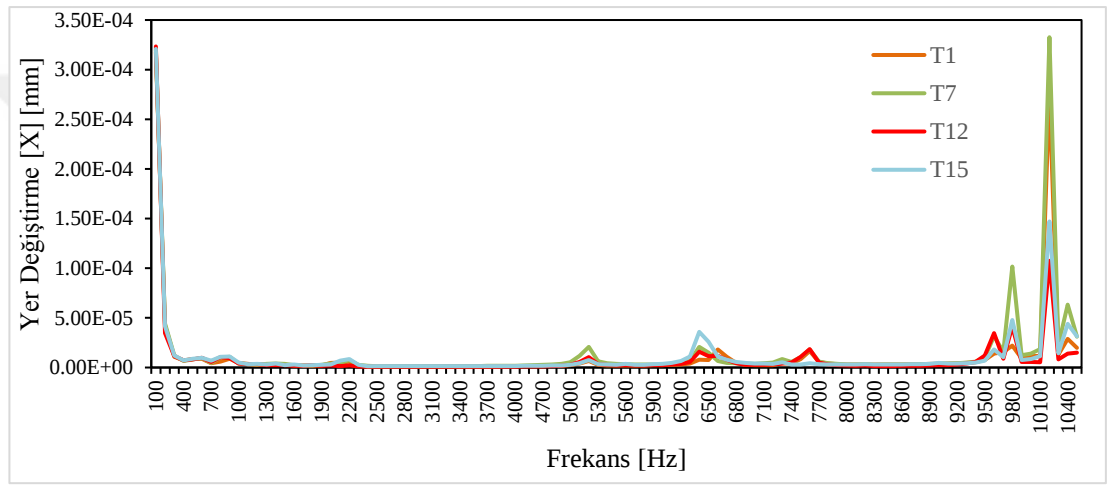


Şekil 6.48 : T15 oluk geometrisi için 10200 Hz değerinde a) ses basınç seviyesi b) akustik basınç c) toplam deformasyon.

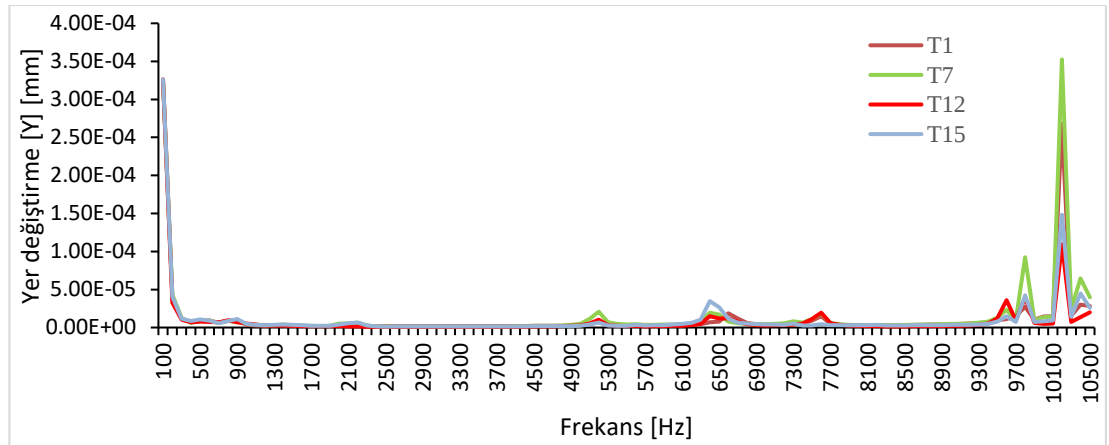
Çalışmada 900 Hz ve 10200 Hz alınmasının ana sebebi 900 Hz’de ses basıncı seviyesinin düzenli bir dağılımı olduğu görülürken yüksek frekans 10200 Hz’de bu dağılımın düzensiz hale geldiği görülür. İki frekans değerinde de gürültü kaynağından uzaklaşıldıkça ses şiddeti seviyesinin azalmaktadır. Düşük frekansta bu durumun daha düzenli olduğu Şekil6.42, Şekil6.44, Şekil 6.46, Şekil 6.48’de görülmektedir.

Düzensiz dağılımın olduğu 10200 Hz frekansa ait şekillere Şekil 6.43, Şekil 6.45, Şekil 6.47, Şekil 6.49'da görülmektedir. T1, T7, T12, T15 motorlarında toplam deformasyon şekillerine bakıldığında en zayıf bölgenin dişler olduğu görülür.

Elektrik makinalarında elektromanyetik kaynaklı gürültüler manyetik kuvvet etkisinden ortaya çıkar. Manyetik kuvvetler yapı üzerinde çeşitli noktalarda özellikle zayıf noktalar üzerinde büyük yer değiştirmelere neden olur. Bu titreşim hareketine bağlı olarak ses şiddeti seviyesi değişkenlik göstermektedir. Deformasyonun yüksek olduğu frekans değerlerinde ses şiddeti seviyesi de yüksektir yani makina gürültülü çalışır.



Şekil 6.49 : Frekansa göre X eksen deformasyon değerleri.

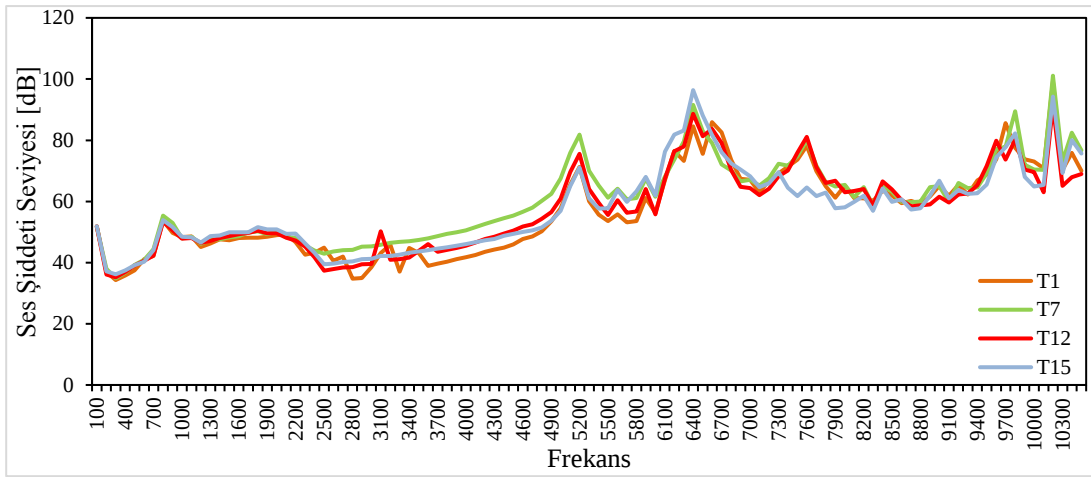


Şekil 6.50 : Frekansa göre Y eksen deformasyon değerleri.

Şekil 6.45 ve 6.46 sırasıyla frekansa göre X ve Y eksenindeki deformasyonları mm cinsinden göstermektedir. Şekil 6.47 ise aynı frekans aralığında ses şiddeti seviyesi değişimini göstermektedir. Ses şiddeti seviyesi ve deformasyon eğrilerine bakıldığında yer yer görülen pik değerlerinin aynı frekans değerlerinde olduğu görülmektedir.

5200, 6400 ve 7400 civarlarında deformasyon eğrilerinde 10200Hz kadar yüksek olmasa da diğer frekans değerlerine kıyasla yüksek yer değiştirmeler mevcuttur. Ses şiddeti seviyesi de bu frekans değerlerinde benzer davranış göstermiştir.

Statora ait gerçekleştirilen doğal frekans değerleri 5165.5, 5608.8, 6441.9 ve 7292 Hz olarak Bölüm 6.6’da SEY ile hesaplanmıştır. Maksimumum yer değiştirmenin ve ses şiddeti seviyesi tam bu değerlere denk gelmese de bu değerlere yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca mod 2 ve mod 4’e karşılık gelen ses şiddeti seviyesi diğer modlara göre daha yüksektir. 10200 Hz değerinin ise mod 2’nin yaklaşık 2 katı olduğu ve ses şiddeti seviyesinin oluk tipine göre 94- 102 dB arasında değişmektedir.



Şekil 6.51 : Akustik inceleme sonuçları

Çizelge 6.15 : Oluk tipine göre ses şiddeti seviyesi.

Oluk Tipi	Ses Şiddeti Seviyesi [dB]
	10200 Hz
T1	99.21
T7	101.1
T12	91.214
T15	94.247

Ses şiddeti seviyesi ile deformasyon arasında yapılan genel çıkarımlardan sonra simülasyonu gerçekleştirilen oluklara bakıldığında 10200 Hz’de ses şiddeti seviyesi büyükten küçüğe T7, T1, T15 ve T12 şeklindedir. Metrekare başına düşen kuvvet yoğunluğuna bakıldığında bu değerlerin beklenen ile tutarlı olduğu görülmüştür. T15’in rotor eğriliği dışındaki tüm parametreler T1 ile aynıdır. T12 oluk geometrisi T1 oluk tipinin kapalı oluk ağzına sahiptir fakat motor performans değerlerini

sağlayabilmek için oluk yüksekliği azaltılmıştır. İncelenen frekans değerinde Şekil 6.46 ve Çizelge 6.15'ten görüleceği üzere rotor eğriliği ve kapalı oluk geometrisi gürültü seviyesini azaltmaktadır. Seçilen motor için rotorun bir oluk kadar eğritilmesinin optimum olmadığı gürültü genliğini daha çok azaltmak için parametrik çözüm yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.





7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında 4 kutuplu 36/30 oluk kombinasyonuna sahip küçük güçlü (7.5kW) bir sincap kafesli asenkron makina tercih edilmiştir. Sincap kafesli asenkron motorlar ucuz, kontrolü kolay ve performans açısından verimli olan motorlardır ve yaygın kullanıma sahip olup geliştirilmesi üzerine birçok çalışma da bulunmaktadır. Makinanın performans değerlerini etkileyen gerek verim gerek moment olmak üzere birçok kriter oluk yapıları ile yakından ilgilidir. Bu yüzden oluk yapılarını çeşitli şekillerde inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur. Tez kapsamında stator oluk yapısı sabit tutularak rotor oluk şeklinin etkisini incelemek üzere çalışma yapılmıştır. İlk olarak tasarım isterleri ve kısıtları belirlenmiş arkasından makinanın ana boyutları analitik olarak hesaplanmıştır. Motorun numerik analizleri için ANSYS RMXprt programı kullanılmıştır. Referans olarak kullanılacak motorun rotorunda damla tipi oluk yapısı seçilmiştir. Tasarım aşamasında;

- Rotor oluk şekli değiştirilirken oluk alanı 75- 80 mm² arasında sabit tutulmaya özen gösterilmiştir. Ayrıca referans motorun rotoruna 1 oluk kadar eğrilik verilerek diğer tüm parametreler sabit kalacak şekilde eğri rotorlu motor tasarlanmıştır. Sonuç olarak rotor oluk alanı sabit kalacak şekilde toplamda 15 adet tasarım yapılmıştır. Rotor oluk geometrik yapılarına literatürden ulaşılmış boyutları üzerine çalışma yapılmıştır.
- Rotor oluk ağzının kapalı olmasının ve rotor eğriliğinin etkisini ayrıntılı olarak görebilmek için referans motorun bir tanesinde (T12) kapalı ağızlı damla oluk tipi bir diğeri ise (T15) motor tipi ise damla tipi eğri rotor olarak tasarlanmıştır.
- 15 adet tasarım içinde kullanılan paket boyu, kullanılan malzeme rotor ana boyutları, stator ana boyutları, stator oluk yapısı, hava aralığı uzunluğu, statorda kullanılan 2 tabakalı iletken yapısı gibi temel büyüklükler sabit tutulmuştur.
- Tasarlanan 14 adet rotor oluk şekilleri kendi içerisinde T1-T6 arası tek kafesli (TK), T7- T11 arası çift kafesli (ÇK), T12- T14 arası tek kafesli kapalı (TKK)

oluk grupları olmak üzere 3 adet sınıflandırma yapılmıştır. Eğri rotorlu yapı T15 ise herhangi bir gruba dahil edilmemiştir.

- Tek kafesli ve Çift kafesli oluk gruplarına ait rotor oluk geometrilerinde oluk ağzı sabit tutulmuştur.
- Rotor şekilleri ile değişen kalkış anında rotor direnci ve kaçak reaktansları bu değerlere bağlı olan kalkış momenti ve akımı, nominal çalışma anında rotor direnç ve reaktans değeri, devrilme moment değeri ve son olarak verim değerleri tablolar halinde verilmiştir.

Oluk geometrileri belirlendikten sonra sabit güç altında 15 motorun ANSYS Maxwell 2D ile tam yükte manyetik analizi gerçekleştirilmiştir.

- T15 hariç diğer tüm motorlar için manyetik akı yoğunluğu dağılımı, manyetik akı dağılımı ve moment eğrileri çıkarılmıştır.
- Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda radyal bileşenin katkısının teğetsel bileşene oranla büyük olmasından dolayı teğetsel bileşenden gelen etkiyi ihmal etmektedir. Bu tez kapsamında teğetsel bileşenden gelen etki dikkate alınmış ihmal edilmemiştir. Tüm motorlar için hava aralığı akı yoğunluğunun hem radyal hem teğetsel bileşenleri, stator çevresindeki metrekaşe başına düşen radyal ve teğetsel kuvvet, eksen üzerinde seçilen bir adet stator dişi için radyal ve teğetsel kuvvet grafikleri elde edilmiştir.
- Makinanın çalışmasını olumsuz etkileyen ve makinanın manyetik kökenli gürültü kaynağı olan harmonikler için ANSYS Maxwell'den elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dalga şekillerinden spektrumlarını elde etmek için MATLAB kullanılmıştır.
- Her oluk grubundan manyetik radyal kuvvet yoğunluğu maksimum olan motorlar akustik inceleme için seçildi. Bir gruba dahil olmayan eğri rotorlu motorda akustik inceleme kısmına dahil edilmiştir.

Literatürde stator yapısının doğal frekans değerleri veya yakınlarında uyarma frekansı denk gelmesi durumunda deformasyon dolayısı ile gürültü seviyesinde artış görüldüğü bilinmektedir. Düşük modlarda bu olayın gerçekleşmesi daha tehlikelidir. Çalışmada kullanılan stator yapısının ilk beş modu için doğal frekansları ANSYS Workbench modülü ile hesaplanmıştır. Bulunan mod 2 değeri için analitik formüller bulunan değerden yaklaşık %2.78 farklılık görülmüştür.

- Statoru serbest ve sınır koşullarının doğal frekansa etkisini incelenmiştir. Stator üzerindeki sınır koşullarının doğal frekansa etkisi incelenmek üzere malzeme sabit tutularak 3 çeşit modelleme yapılmıştır.
- Sınır koşulu seçiminden sonra statorda kullanılan sac malzemesinin doğal frekansa etkisini görebilmek için koşul sabit tutularak analizler gerçekleştirilmiştir.

Akustik inceleme için her oluk grubu içinde metrekaşe başına düşen radyal kuvvet değeri maksimum olan TK grubundan T1, ÇK grubundan T7, TKK grubunda T12 ve son olarak rotor eğriliğinin akustiğe etkisini görebilmek için T15 motorları seçilmiştir. ANSYS Maxwell 2D'den elde edilen manyetik kuvvetler ve modal analizi yapılan stator yapısı ANSYS Workbench modülünde bir araya getirilmiştir. Stator yapısına elde edilen manyetik kuvvetler manyetik uyarı olarak eklenmiştir. Bu uyarım altında stator üzerinde meydana gelen total, X ve Y eksenli deformasyonları sonuçları incelenmiştir. 'Harmonic Acoustic' modülü kullanılarak ses şiddeti seviyesi ve akustik basınçlar değerleri elde edilmiştir. İncelemelere ait görseller 900 Hz ve 10200 Hz için alınmıştır.

Literatür çalışmalarının aydınlatıcı ve bilgilendiriciliği sayesinde tez kapsamında ulaşılan sonuçlar;

- Rotor etkisinin incelenmesi olarak rotor alanının kriter olarak belirlenmesi bazı oluk tipleri için (T14) motor performans değerini yüksek kalkış akımı, düşük verim ve özellikle rotor dişlerinde yüksek manyetik akı yoğunluğu gibi negatif etkilere neden olabilmektedir. Verim yaklaşık %12 düşüş göstermiştir. Rotor alanının sabit olmasından dolayı tüm motorlar nominal koşullarda benzer rotor direnç değerine sahiptir.
- TK oluk grubunda T3 dikdörtgen oluk geometrisinin hava aralığından mile doğru sabit genişliktedir. Bu motorun kalkış momenti ve kalkış akımı hava aralığından mile doğru daralan ve genişleyen oluk şekillerine göre daha yüksektir.
- TKK oluk grubuna bakıldığında T12 ve T13 motorları nominal yük koşullarında açık oluk tipi olan T1 ve T2 oluklarına göre daha yüksek rotor reaktans değerine sahip olduğu ve moment grafiğinde dalgalanmanın daha azdır.

- MATLAB'tan elde edilen hava aralığı manyetik yoğunluğunun radyal bileşenine ait harmonik spektrumu 5. harmonik açısından incelendiğinde oluk gruplarının maksimumları T6, T8 ve T14 olduğu görülür. Radyal kuvvet yoğunluğunun maksimum değerleri teğetsel bileşen ihmal edildiğinde burada görülmesi beklenir. Fakat çalışmada teğetsel bileşenden gelen katkı dahil edildiğinden T1, T7 ve T14'tür.
- Teğetsel kuvvet yoğunluğunun maksimum değeri radyal kuvvet yoğunluğunun değerlerine kıyasla çok küçük değildir. Fakat ortalama değerleri karşılaştırıldığında radyal kuvvet yoğunluğunun yaklaşık %10'u kadardır. Bu durumda çıkarılan grafiklerden de görüldüğü gibi genel olarak minimal değerler alırken nadirde olsa pik noktaları bulunmaktadır. Motorların karşılaştırmasını içeren bir uygulamada radyal kuvvet yoğunluğu için teğetsel katkının göz önüne alınması daha sağlıklı olacaktır.
- Eksen üzerinde bir dişe ait elde edilen radyal ve teğetsel kuvvetin zamana göre değişim grafikleri her diş için çıkartılarak maksimum kuvvet bulunabilir. Fakat bunun yerine kuvvet yoğunluğunun maksimum değerini ele almak işlem kolaylığı sağlayacaktır. Radyal kuvvet stator yüzeyinde metrekare başına düşen radyal kuvvet ile doğru orantılıdır.
- Doğal frekansın serbest koşullar altında mod 2 değerinin SEY yöntemi ile analitik yöntemle hesaplanan değer arasında yaklaşık %2.78 farklılık görülmüştür.
- Doğal frekans üzerinde sınır koşulları etkisi incelenmiştir. Değişik sınır şulları ile bazı mod değerlerinin görülmesi engellenebilir ayrıca rijitlik değeri arttığından mod frekanslarının değeri yüksek frekanslara çekilerek yapının kolay rezonansa girmesi engellenebilir. S2 uygulamasında rijitlik değeri daha yüksek olduğundan mod frekansları daha yüksektir.
- Benzer sabitleme koşulları altında modlara ait frekanslar kütle yoğunluğu ile ters orantılıdır.
- 10200 Hz'de inceleme koşullarında; T12 ve T15 motorları T1 referans motordan daha düşük radyal kuvvet yoğunluğuna, deformasyona ve ses şiddeti seviyesine sahiptir. Kapalı rotor oluk geometrisi ve eğritilmiş rotor oluğu uygulamasının pozitif etkisi vardır. Kaykının belirgin seviyede gürültüyü düşürmesi beklenirken 5dB kadar azaltmıştır. Buradan rotor kaykısı uygulaması

başarılır fakat gürültüyü daha çok bastırmak için eğriliği bir oluk kadar değil parametrik olarak çözülerek optimum değer alınmalıdır.

- Akustik incelemede ses kaynağından uzaklaşıldıkça gürültünün azaldığı görülür. Düşük frekanslarda ses dağılımı düzenliken yüksek frekans değerlerinde bu dağılım düzensizleşir.

T7 çift kafesli oluğun T1 tek kafesli oluktan daha yüksek deformasyon ve ses seviyesine sahiptir. Stator yüzeyinde metrekare başına düşen radyal kuvvet yoğunluğu büyükten küçüğe T7- T1- T15- T12 şeklindedir. Bu sıralama deformasyon ve akustik seviyeyle de orantılıdır.

- Akustik ve deformasyon eğrilerinin pik noktaları stator yapısının doğal frekans değerlerine yakın noktalarda meydana gelmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] **Gundogdu, T., Zhu, Z., ve Mipo, J.** (2017). Influence of rotor slot number on rotor bar current waveform and performance in induction machines, 2017 20th, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, IEEE, s.1–6.
- [2] **Jang, S., Jeon, K. W., Kim, Y-J., Jung, S. Y.** (2013). Numerical Analysis and Optimal Design of Double Squirrel Cage Induction Motor for Electric Vehicle. *School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan Univeristy, Kore.*
- [3] **Gyftakis, K., Kappatou, J., ve Safacas, A.** (2010). *FEM Study of Asynchronous Cage Motors Combining NEMA's Classes A and D Slot Geometry. Rome, XIX International Conference on Electrical Machines -ICEM.*
- [4] **Ünlükaya, E., Yetgin, A.G., Çanakoglu, A. ve Turan, M.** (2014), Rotor Oluk Sekillerinin Asenkron Motor Performansına Etkileri, *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 27- 29.
- [5] **Fireteanu, V., Tudorache, T. ve Turcanu, O.A.** (2007). Squirrel- Cage Type Induction Motors, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 537–542.
- [6] **Zhang, D., Park, C.S. ve Koh, C.S.** (2012). A new optimal design method of rotor slot of three-phase squirrel cage induction motor for NEMA class D speed-torque characteristic using multi-objective optimization algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2), 879–882.
- [7] **Mohamed M. Y., Maksoud S.A. A., Fawzi M. ve Kalas A.E.** (2017). Effect of Poles, Slots, Phases Number and Stack Length Changes on the Optimal Design of Induction Motor, *Industry Applications, Mısır, Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*.
- [8] **Zhou G. ve Shen J.** (2015). Current harmonics in induction machine with closed-slot rotor," *IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, 1-6.
- [9] **Boglietti, A., Bojoi, R. I., Cavagnino, A., Guglielmi, P. ve Miotto A.** (2012). Analysis and Modeling of Rotor Slot Enclosure Effects in High-Speed Induction Motors, *Magnetics, IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(4), 1279-1287.
- [10] **Delaere, K., Belmans, R. ve Hameyer, K.** (2003). Influence of rotor slot wedges on stator currents and stator vibration spectrum of induction machines: A transient finite-element analysis *Magnetics, IEEE Transactions*, 39(3), 1492–1494.

- [11] **Le Besnerais, J., Lanfranchi, V., Hecquet, M., Romary R., ve Brochet, P.** (2009). Optimal Slot Opening Width for Magnetic Noise Reduction in Induction Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(4), 869-874.
- [12] **Flack, T. J. ve Williamson, S.** (1993). Air gap fields and pressure waves in closed-slot cage rotor induction motors. *Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives* (376), 552-557.
- [13] **Shumei, C., Ying, D. ve Liwei, S.** (2006). Rotor Slots Design of Induction Machine for Hybrid Electric Vehicle Drives. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2006,1-3.
- [14] **Laksar, J. ve Veg, L.** (2016). Numerical calculation of the air gap flux density distribution in rotary electrical machines. *17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, 2016, pp. 1-8.
- [15] **Cheraghi, M., Karimi ve Booin, M. B.** (2018). An investigation on acoustic noise emitted by induction motors due to magnetic sources. *9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2018, pp. 104-109.
- [16] **Hilgert, T. G. D., Vandevelde, L. ve Melkebeek, J. A. A.** (2006). Numerical Analysis of the Contribution of Magnetic Forces and Magnetostriction to the Vibrations in Induction Machines. *6th International Conference on Computational Electromagnetics*,1-3.
- [17] **Belahcen, A.** (2006). Vibrations of rotating electrical machines due to magnetomechanical coupling and magnetostriction. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(4), 971-974.
- [18] **Chapman, F. T.** (1922). The production of noise and vibration by certain squirrel-cage induction motors. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 61(313), 39–48.
- [19] **Alger, P. L.** (1954). The magnetic noise of polyphase induction motors. *Electrical Engineering*,73(6), 497-497.
- [20] **Hildebrand, L. E.** (1930). Quiet Induction Motors. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 49(3), 848-852.
- [21] **Qiao, M., Jiang, C., Zhu, Y. ve Li, G.** (2016). Research on Design Method and Electromagnetic Vibration of Six-Phase Fractional-Slot Concentrated-Winding PM Motor Suitable for Ship Propulsion. *IEEE Access*, 4, 8535-8543.
- [22] **Le Besnerais, J.** (2015). Vibroacoustic Analysis of Radial and Tangential Air-Gap Magnetic Forces in Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(6),1-9.
- [23] **Prashanth, S.A., Nekkalapu, S., Dalal A. ve Kumar, P.** (2015). Analytical determination of slot harmonics content of air-gap magnetic field for an induction machine. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1-5.

- [24] **Nau, S. L. ve Mello, H – G - G.** (2000). Acoustic noise in induction motors: causes and solutions. *Record of Conference Papers. Industry Applications Society Forty-Seventh Annual Conference, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (00CH37112)*, 2000, 253-263.
- [25] **Nau, S. L.** (1997). The influence of the skewed rotor slots on the magnetic noise of three-phase induction motors. *Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (444)*, 1997, 396-399.
- [26] **Verma, S. ve Balan, A.** (1994). Determination of radial-forces in relation to noise and vibration problems of squirrel-cage inductionmotors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(2),404–412.
- [27] **Nistor, C. G. ve Cloțea, L. R.** (2017). Determination of frequencies and vibration modes for a three phase induction motor IE3 premium efficiency. *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, 2017, 349-356.
- [28] **Ishibashi, F., Matsushita, M., Noda S. ve Tonoki, K.** (2010). Change of Mechanical Natural Frequencies of Induction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(3), 922-927.
- [29] **Kim, D., Jung, J., Hong, J., Kim K. ve Park, C.** (2012). A Study on the Design Process of Noise Reduction in Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 48, no. 11, pp. 4638-4641, Nov. 2012.
- [30] **Gan, C., Wu, J., Shen, M., Yang, S., Hu, Y. ve Cao, W.** (2015). Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors. *IEEE Trans. Magn.*,51(9), 1–9).
- [31] **Ferkova, Z. ve Kindl, V.** (2017). Influence of Skewed Squirrel Cage Rotor with Intermediate Ring on Magnetic Field of Air Gap in Induction Machine. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 23(1), 26-30.
- [32] **Zhu, H., Zhou, G., Chen, J. ve Liu H.** (2012). Analysis and Study of Skewed Slot Tooth Distance on Low Electromagnetic Noise of Three-Phase Induction Motor with Squirrel Cage Rotor. *Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*, 1-4.
- [33] **Dong, Q., Liu, X. ve Qi, H.** (2019). Analysis and evaluation of electromagnetic vibration and noise in permanent magnet synchronous motor with rotor step skewing. *Sci. China Technol. Sci.*, 62, 839–848.
- [34] **Boldea, I. ve Nasar, S.A.** (2002). *The induction machine handbook*, CRC Press.
- [35] **Yavuz İ., Minaz M., ve Kuncan M.** (2018). Analysis of Efficiency and Torque Effect of 1.1 kW Induction Motor By 2-D Finite elements Method.
- [36] **Mergen, A. F. ve Zorlu S.** (2009). *Elektrik makinalarında II asenkron makineler*, Birsen Yayınevi.
- [37] **Pyrhonen, J., Jokinen, T. ve Hrabovcova, V.** (2014). *Design of rotating electrical machines*, Wiley.
- [38] **Murthy K.M.** (2008). *Computer-Aided Design of Electrical Machines*, BS Publication.

- [39] **Fitzgerald, A.E., Kingsley, C., Umans, S.D. ve James, B.** (2003). *Electric machinery*, cilt 5, McGraw-Hill New York.
- [40] **Chapman, S.J.** (2012). *Electric machinery fundamentals*, McGraw-Hill.
- [41] **Torque Characteristics of NEMA Design A, B, C, D & E Motors.** Erişim: 11.01.2021, <https://www.studocu.com/en-gb/document/university-of-oxford/engineering-science/nema-abcde-torque-curves/19511267>.
- [42] **Kocabaş, D. A.** (2004). Asenkron Makinalarda Uzay Harmoniklerinin Etkilerini Azaltmaya Katkıları. *Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- [43] **Wakileh, G.J.** (2003). Harmonics in rotating machines. *Electr. Power Syst. Res.*, 66, (1), 31–37.
- [44] **Gieras, J.F., Wang, C. ve Lai, J.C.** (2006). Noise of Polyphase Electric Motors.
- [45] **Zwicker, E. & Fastl, H.** (1990). *Psycho-acoustics*, cilt 2, Springer- Verlag Almanyası.
- [46] **Janda, M., Vitek, O. & Hajek, V.** (2012). Noise of Induction Machines, Induction Motors- Modelling and Control, Prof. Rui Esteves Araújo, IntechOpen.
- [47] **Janda, M., Makki, Z. & Konicek, P.** (2014). Calculation of the vibration induction motor using the finite element method. *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics – Mechatronika.*
- [48] **Xueping, X., Han, Q., & Chu, F.** (2018). Review of Electromagnetic Vibration in Electrical Machines. *Energies*, 11(7), 1779.
- [49] **Wang, K. & Wang, X.** (2017). The modal analysis of the stator of the interior permanent magnet synchronous motor. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2017,1-6.
- [50] **Grabner C.** (2009). Acoustic Behavior of Squirrel Cage Induction Motors. *Ao SI., Gelman L. (eds) Advances in Electrical Engineering and Computational Science. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 39, Springer, Dordrecht.
- [51] **Dabrowski, M.** (1971). *Magnetic Field and Circuits of Electrical Machines*, Warsaw, WNT.
- [52] **Cameron, J.R., Tomson, W. T. & Dow, A.B.** (1986). Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors. *IEEE proceedings*, 133, 155-163.
- [53] **Cho, D.H. & Kim, K.J.** (1998). Modeling of electromagnetic excitation forces of small induction motors for vibration and noise analysis. *Proc. IEE, Part B: EPA*, 145(3), 199–205.
- [54] **Shaukat, U.** (2012). Performance Analysis of Unskewed Asymmetrical Rotor for LV Induction Motors.
- [55] **Alger, L. P.** (1960). Intermediate ring squirrel cage rotor”, US Patent 2,944,171, issued June 5, 1960.

- [56] **Tenhunen, A.** (2003). Electromagnetic Forces Acting Between The Stator And Eccentric Cage Rotor.
- [57] **Devillers, E., Hecquet, M., Le Besnerais, J. & Regniez, M.** (2017). Tangential effects on magnetic vibrations and acoustic noise of induction machines using subdomain method and electromagnetic vibration synthesis. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 1-8.
- [58] **Hauvicourt, F.** (2018). Vibro-acoustics of rotating electric machines: Prediction, validation and solution.
- [59] **Han, Z., Liu, J., Gong, C. & Lu, J.,** (2017). Influence mechanism on vibration and noise of PMSM for different structures of skewed stator. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1-5.
- [60] **Bouzek, L. & Pechanek, R.** (2013). Vibration behaviour of the asynchronous machine magnetic core. *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 1-7.
- [61] **Zhou, J., Peng, X., Li, R., Xu, Y., Liu, H. & Chen, D.** (2017). Experimental and Finite Element Analysis to Investigate the Vibration of Oblique-Stud Stator Frame in a Large Hydropower Generator Unit. *Energies*. 10. 2175. 10.3390/en10122175.
- [62] **Arkkio, A.,** (1987). Analysis of Induction Motors Based on the Numerical Solution of the Magnetic Field and Circuit Equations. *Ph. D. Helsinki University of Technology (HUT)*, Espoo.
- [63] **Kanerva, S.,** (2005). Simulation of Electrical Machines, Circuits and Control Systems Using Finite Element Method and System Simulator. *Ph. D. Helsinki University of Technology (HUT)*, Espoo.
- [64] **Tan-Kim, A., Hagen, N., Lanfranchi, V., Clenet, S., Coorevits, T., Mipo, J.-C., Legranger, J., & Palleschi, F.** (2016). Influence of the manufacturing process of a claw-pole alternator on its stator shape and acoustic noise. *XXIIth International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, s. 2273–2279.
- [65] **Sobra, J. & Kindl, V.** (2013). FEM Model of Induction Machine's Air Gap Force Distribution. *Mechatronics*, Springer, Cham.
- [66] **Kong, D., Shuai, Z., Li W. & Wang, D.** (2019). Electromagnetic Vibration Characteristics Analysis of a Squirrel-Cage Induction Motor Under Different Loading Conditions. *IEEE Access*, 7, 173240-173248.
- [67] **Sathyan, S., Belahcen, A., Kataja, J., Vaimann T., & J. Sobra** (2016). Computation of stator vibration of an induction motor using nodal magnetic forces. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2198-2203,
- [68] **Zhang, F., Tong, N., & Wang F.,** (2005). Analysis of vibration modes for large induction motor. *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1, 64-67.

- [69] **Volt Elektrik Motorları Teknik Dökümanlar.** Erişim: 11.01.2021, <https://voltmotor.com.tr/teknik-dokumanlar/>.
- [70] **Shuangshuang, Z. & Shenbo Y.** (2019). Analysis on circumferential natural frequencies of stator in permanent magnet synchronous motor. *Journal of Vibroengineering*, 6.
- [71] **Altintas, G.** (2010). Effect of Material Properties on Vibrations of Nonsymmetrical Axially Loaded Thin-Walled Euler-Bernoulli Beams. *Mathematical & Computational Applications*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Duygu ÇATAL

ÖĞRENİM DURUMU :

- **Lisans** :2017, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi
- **Çift anadal Prog.** : 2019, İnşaat Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi
- **Yüksek Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİM:

- 06.05.2019- 31.07.2019 : İTÜ Araştırma Görevliliği
- 01.08.2019'dan itibaren : ASELSAN A.Ş.