

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPRESÖR UYGULAMASI İÇİN SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON
MOTOR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat GÜNERİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPRESÖR UYGULAMASI İÇİN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON
MOTOR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serhat GÜNERİ
504131040**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ

AĞUSTOS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504131040 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Serhat GÜNERİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KOMPRESÖR UYGULAMASI İÇİN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN

Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Ağustos 2015**

Savunma Tarihi : **31 Ağustos 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Lisans hayatım boyunca kendisinden çok şey öğrendiğim, yüksek lisans eğitimim süresince de hiçbir zaman bilgisini ve desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ'e,

Bu tez çalışması boyunca motor tasarım konusunda bana aktarmış olduğu deneyim, bilgi, tavsiyeleri ve her türlü desteği için çok değerli hocam Dr. Metin AYDIN'a,

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince kendilerinden ders aldığım ve çok şey öğrendiğim İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine,

Lisans ve yüksek lisans eğitimi boyunca her zaman yanımda olan ve her türlü yardımına koşan arkadaşım Ahmet Berkant ECEVİT'e,

Çalışmaya başladığım ilk günden beri üzerimde çok fazla emeği olan, bilgi ve deneyimlerini her zaman bana aktaran, kendisinden çok şey öğrendiğim Yasemin ERTUĞRUL'a,

Motor tasarım konusunda kendimi sürekli geliştirme yönünde bana katkı sağlayan, kendisiyle çalışmanın büyük bir şans olduğu ve tezimi yazma konusunda her türlü sorunumu çözen Gamze TANÇ'a,

Mesleki açıdan her biri son derece kıymetli olan Arçelik Ar-Ge Güç Elektroniği Teknoloji Ailesi'ndeki çalışma arkadaşlarıma ve takım liderim Namık YILMAZ'a,

Motor testlerini yapmama yardımcı olan çalışma arkadaşım Fatih SEREZ'e,

Motor prototip üretimini gerçekleştiren Eskişehir Kompresör İşletmesi'ndeki Erkan ÖZKAN ve Tuğba ÇETİNTÜRK'e,

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde bana çalışma fırsatı veren ve her türlü imkanı sağlayan Arçelik A.Ş.'ye,

En önemlisi de eğitim hayatıma başladığım günden bugüne kadar varlığını hep yanımda hissettiğim annem ve babama; benden hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen, hayatımda yeri çok başka bir yerde olan abim Sertaç GÜNERİ'ye ve eşi Çiğdem GÜNERİ'ye sonsuz teşekkürler.

Ağustos 2015

Serhat GÜNERİ
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Özeti	3
2. MOTOR ÖN TASARIM ÇALIŞMALARI	17
2.1 Oluk/Kutup Kombinasyonunun Belirlenmesi	18
2.2 Motor Geometrisinin Oluşturulması	22
3. REFERANS MOTOR MODELİ	29
3.1 Referans Modelin 2D Modellemesi	29
3.1.1 Referans model 2D vuru mu momenti analizi	32
3.1.2 Referans model 2D zıt-EMK ve toplam harmonik distorsiyon analizleri	35
3.1.3 Referans model 2D moment analizleri.....	43
3.1.4 Referans model 2D kayıp ve verim sonuçları.....	47
3.2 Referans Modelin 3D Modellenmesi	49
3.2.1 Referans model 3D vuru mu momenti analizi	49
3.2.2 Referans model 3D zıt-EMK ve toplam harmonik distorsiyon analizleri	52
3.2.3 Referans model 3D moment analizleri.....	57
3.2.4 Referans model 3D kayıp ve verim sonuçları.....	59
4. ALTERNATİF MOTOR MODELİ	61
4.1 Alternatif Modelin 2D Modellenmesi	63
4.1.1 Alternatif model 2D vuru mu momenti analizi.....	65
4.1.2 Alternatif model 2D zıt-EMK ve harmonik bozunum analizleri	65
4.1.3 Alternatif model 2D moment analizleri	71
4.1.4 Alternatif model 2D kayıp ve verim sonuçları.....	75
4.2 Alternatif Modelin 3D Modellemesi	76
4.2.1 Alternatif model 3D vuru mu momenti analizi.....	76
4.2.2 Alternatif model 3D zıt-EMK ve toplam harmonik distorsiyon analizleri	77
4.2.3 Alternatif model 3D moment analizleri	81
4.2.4 Alternatif model 3D kayıp ve verim sonuçları.....	83
4.3 Alternatif Motor ve Referans Motor Karşılaştırması	84
5. PROTOTİPLEME VE DENEYSEL SONUÇLAR	89
5.1 SMSM Prototip Aşamaları	89
5.2 Deneysel çalışmalar.....	91
5.2.1 Zıt-EMK ölçümleri	91
5.2.2 Moment ölçümleri.....	94
5.2.3 Güç ve verim ölçümleri.....	98

6. SONUÇ	101
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	109

KISALTMALAR

2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu
BLDC	: Brushless Direct Current Motor
ÇTS	: Çift Tabakalı Sargı
EMF	: Electro Motor Force
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
FAAM	: Fırçasız Alternatif Akım Motoru
FEA	: Finite Element Analysis
FDAM	: Fırçasız Doğru Akım Motoru
MMK	: Manyeto Motor Kuvveti
NdFeB	: Neodmium Iron Boron
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
TTS	: Tek Tabakalı Sargı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Tek tabakalı ve çift tabakalı sargı karşılaştırması.	13
Çizelge 1.2 : Oluk açıklığının endüktans değerine etkisinin karşılaştırılması.....	14
Çizelge 1.3 : Rotor kayıpları karşılaştırması.	15
Çizelge 2.1 : Motor tasarım kriterleri.	18
Çizelge 2.2 : Farklı oluk/kutup konfigürasyonları için oluk başına faz-kutup sayısı ve sargı faktörü değerleri.	21
Çizelge 3.1 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.	39
Çizelge 3.2 : Harmonik bileşenler.	42
Çizelge 3.3 : 9/6 motor için moment değerleri.	47
Çizelge 3.4 : Kayıp ve verim değerleri.	48
Çizelge 3.5 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.	55
Çizelge 3.6 : Harmonik bileşenler.	56
Çizelge 3.7 : 9/6 motor 3D analiz moment değerleri.....	59
Çizelge 3.8 : Kayıp ver verim değerleri.....	60
Çizelge 4.1 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.	67
Çizelge 4.2 : Harmonik bileşenler.	70
Çizelge 4.3 : 12/8 motor için moment değerleri.	75
Çizelge 4.4 : Kayıp ve verim değerleri.	75
Çizelge 4.5 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.	80
Çizelge 4.6 : Harmonik bileşenler.	80
Çizelge 4.7 : 12/8 motor için moment değerleri.	83
Çizelge 4.8 : Kayıp ve verim değerleri.	84
Çizelge 4.9 : Hava aralığı momenti ve mil momenti değerleri.....	87
Çizelge 5.1 : Zıt-EMK analiz ve test sonuçları karşılaştırması.	93
Çizelge 5.2 : Rotor ve mıknatıs hava aralığı değişimine göre zıt-EMK değerleri. ...	94
Çizelge 5.3 : Moment-akım değerleri.	97
Çizelge 5.4 : Moment sabiti analiz ve test sonuçları.	98
Çizelge 5.5 : Güç ölçüm sonuçları I.	99
Çizelge 5.6 : Güç ölçüm sonuçları II.	99
Çizelge 5.7 : Verim test sonuçları.	99
Çizelge 6.1 : Referans ve alternatif model karşılaştırması.	104

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Referans motor yapısında yer alan sürekli mıknatıslar.	5
Şekil 1.2 : Farklı mıknatıs yapıları.	6
Şekil 1.3 : Stator dış modelleri.	7
Şekil 1.4 : Farklı mıknatıs yapıları.	8
Şekil 1.5 : Farklı FDAM yapıları.	9
Şekil 1.6 : Kayıklı ve kaykısız mıknatıs yapıları.	10
Şekil 1.7 : Stator sargı konfigürasyonları.	12
Şekil 2.1 : SMSM'a ilişkin moment-hız grafiği.	17
Şekil 2.2 : 12/8 yüzey mıknatıslı motor kesiti ve temel büyüklükler.	23
Şekil 2.3 : Sac laminasyonuna ait B-H değerleri.	24
Şekil 2.4 : 3000 d/d'da statik analiz sonuçları.	25
Şekil 2.5 : 12/8 yüzey mıknatıslı motor sargı şeması.	26
Şekil 2.6 : 12/8 yüzey mıknatıslı motor moment-hız eğrisi.	27
Şekil 3.1 : 9/6 FDAM motor ağ haritası.	30
Şekil 3.2 : 9/6 FDAM ilişkin sınır koşulları.	31
Şekil 3.3 : Vuruntu momenti analizi işlem basamakları.	33
Şekil 3.4 : Döner bölge tanımlama ve açısız hız bilgisi.	34
Şekil 3.5 : 2D referans model vuruntu momenti grafiği.	34
Şekil 3.6 : 9/6 motor sargı modeli.	36
Şekil 3.7 : Sargı atama bilgisi ve programa devre aktarma seçeneği.	37
Şekil 3.8 : 2D referans model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).	38
Şekil 3.9 : 9/6 motor radyal mıknatıslanma.	39
Şekil 3.10 : Boşta çalışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.	40
Şekil 3.11 : Boşta çalışma 1200 d/d için akı çizgileri.	40
Şekil 3.12 : Oluk ağzı bölgesindeki akı yoğunluğu.	41
Şekil 3.13 : Faz gerilimi harmonik bileşenleri (1200 d/d).	42
Şekil 3.14 : Kare dalga akımları.	44
Şekil 3.15 : 1200 d/d için hava aralığı momenti.	45
Şekil 3.16 : 1600 d/d için hava aralığı momenti.	45
Şekil 3.17 : 3000 d/d için hava aralığı momenti.	46
Şekil 3.18 : 4500 d/d için hava aralığı momenti.	46
Şekil 3.19 : 9/6 motor verim-hız eğrisi.	49
Şekil 3.20 : Referans model 3D modeli.	50
Şekil 3.21 : Rotor ve mıknatıs uzunluk farkı.	50
Şekil 3.22 : Döner bölge tanımlama.	51
Şekil 3.23 : 3D model ağ haritası.	51
Şekil 3.24 : 3D referans model vuruntu momenti grafiği.	52
Şekil 3.25 : Referans model 3D sargı şeması.	53
Şekil 3.26 : Referans model radyal mıknatıslanma.	53
Şekil 3.27 : 3D referans model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).	54
Şekil 3.28 : Boşta çalışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.	55
Şekil 3.29 : Faz gerilim harmonik bileşenleri (1200 d/d).	56

Şekil 3.30 : 1200 d/d hızı için hava aralığı momenti.	57
Şekil 3.31 : 1600 d/d hızı için hava aralığı momenti.	58
Şekil 3.32 : 3000 d/d hızı için hava aralığı momenti.	58
Şekil 3.33 : 4500 d/d hızı için hava aralığı momenti.	59
Şekil 3.34 : 9/6 motor hız-verim eğrisi.	60
Şekil 4.1 : Mıknatıs yay açısı ve kalınlığı için vuru mu momenti de ğişimi.	61
Şekil 4.2 : Mıknatıs yay açısı ve kalınlığı için THD de ğişimi.	62
Şekil 4.3 : Mıknatıs yay açısı ve kalınlığı için moment de ğişimi.	63
Şekil 4.4 : 12/8 SMSM'a ilişkin sınır koşulları.	64
Şekil 4.5 : 12/8 SMSM ağ haritası.	64
Şekil 4.6 : 2D alternatif model için vuru mu momenti analizi.	65
Şekil 4.7 : 12/8 motor sargı modeli.	66
Şekil 4.8 : 12/8 motor paralel mıknatıslanma.	67
Şekil 4.9 : 2D alternatif model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).	68
Şekil 4.10 : Boşta alışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.	69
Şekil 4.11 : Boşta alışma 1200 d/d için manyetik akı çizgileri.	69
Şekil 4.12 : Faz gerilim harmonik bileşenleri (1200 d/d).	70
Şekil 4.13 : Sinüs dalga akımları.	72
Şekil 4.14 : 1200 d/d için hava aralığı momenti.	73
Şekil 4.15 : 1600 d/d için hava aralığı momenti.	73
Şekil 4.16 : 3000 d/d için hava aralığı momenti.	74
Şekil 4.17 : 4500 d/d için hava aralığı momenti.	74
Şekil 4.18 : 12/8 motor hız-verim eğrisi.	75
Şekil 4.19 : Alternatif model 3D modeli.	76
Şekil 4.20 : 3D alternatif model vuru mu momenti grafiği.	77
Şekil 4.21 : Alternatif model 3D sargı şeması.	77
Şekil 4.22 : Alternatif model paralel mıknatıslanma.	78
Şekil 4.23 : Boşta alışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.	78
Şekil 4.24 : 3D alternatif model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).	79
Şekil 4.25 : Faz gerilim harmonik bileşenleri (1200 d/d).	81
Şekil 4.26 : 1200 d/d için hava aralığı momenti.	81
Şekil 4.27 : 1600 d/d için hava aralığı momenti.	82
Şekil 4.28 : 3000 d/d için hava aralığı momenti.	82
Şekil 4.29 : 4500 d/d için hava aralığı momenti.	83
Şekil 4.30 : 12/8 motor verim hız eğrisi.	84
Şekil 4.31 : Vuru mu momenti karşılaştırması.	85
Şekil 4.32 : Toplam harmonik distorsiyon karşılaştırması (1200 d/d).	86
Şekil 4.33 : Hava aralığı momenti karşılaştırması (1600 d/d).	86
Şekil 4.34 : Mil momenti ve hava aralığı moment de ğişimi.	87
Şekil 4.35 : Verim karşılaştırması.	88
Şekil 5.1 : Stator sac laminasyonları.	89
Şekil 5.2 : Plastik prototip malzeme.	90
Şekil 5.3 : Rotor göbeği ve mıknatıslar.	90
Şekil 5.4 : 12/8 SMSM prototipi.	91
Şekil 5.5 : Sinyal jeneratörü ve kuplaj mekanizması.	92
Şekil 5.6 : Zıt-EMK ölçümü.	92
Şekil 5.7 : 1200 d/d zıt-EMK ölçümü.	93
Şekil 5.8 : Dinamofren test sistemi.	95
Şekil 5.9 : 1200 d/d yükte alışma.	96
Şekil 5.10 : 1600 d/d yükte alışma.	96

Şekil 5.11 : Moment-akım karakteristiği.....	97
Şekil 5.12 : Verim test ve analiz sonuçları.....	100

KOMPRESÖR UYGULAMASI İÇİN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

ÖZET

Beyaz eşya uygulamalarında kullanılan elektrik motorlarının verimliliğine ilişkin yönetmelik ve standartlar sürekli olarak değişmektedir. Her geçen gün daha da kritik bir durum haline gelen enerji verimliliği günümüzün en güncel konularından birisidir. Dünya pazarındaki rekabetçi ortam ele alındığında şirketlerin yatırım bütçelerinin önemli bir kısmını bu husus için harcadıkları görülmektedir. Performans ve verim açısından bakıldığında sürekli mıknatısların kullanıldığı motor teknolojilerinin günümüzün en popüler konularından birisi konumuna geldiği kolaylıkla söylenebilir.

Buzdolabı kompresör uygulamalarına bakıldığında hala yaygın olarak bir faz asenkron motor kullanıldığı görülmektedir. Bu motorlar herhangi bir sürücü kartı olmadan direkt olarak şebekeden beslenerek sabit bir hızda çalışmaktadır. Sabit hızda çalışıyor olması sistem performansı açısından bir dezavantaj olarak bilinmektedir. Çünkü motor belli bir süreden sonra çalışmasını keser. Buzdolabı soğutma kapasitesi düştüğü anda ise motor tekrardan çalışmaya başlar. Yeniden çalışmaya geçtiği anda şebekeden çekilen akım yüksek olur ve bu tüketim açısından istenmeyen bir durumdur. Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda güç elektroniği motor kontrol devreleri ile kolayca farklı hızlarda kontrol edilebilen sürekli mıknatıslı motorlar buzdolabı uygulamaları için popüler hale gelmiştir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar birim hacimden alınan yüksek moment, yüksek hızlara çıkabilme, düşük hızlarda kolayca kontrol edilebilme, sessiz çalışma yapabilme, yüksek verim ve boyutsal avantajları sayesinde kompresör uygulamaları için cazip hale gelmiştir. Özellikle manyetik malzeme ve mıknatıs teknolojisindeki ilerlemeler ile maliyetlerin giderek düşmesi beyaz eşya uygulamalarında bu motorları tercih sebebi yapmıştır.

İlk olarak literatürde yer alan sürekli mıknatıslı motorlara ilişkin tasarım çalışmaları çok detaylı bir biçimde incelenmiştir. Yapılan akademik çalışmalara bakıldığında tasarım anlamında stator ve rotor kısmı için çok farklı durumların incelendiği görülmüştür. Yapılan her bir tasarım iyileştirmesinin altında yatan temel sebeplerin vuru moment, moment dalgalılığı ve kayıpların minimize edilmeye çalışıldığına altının çizildiği anlaşılmıştır. Stator tarafı için uygun oluk/kutup seçiminin, sargıların oluklara yerleştirilmesinin, kaykırı vermenin, uygun oluk açıklığı belirlenmesinin iyi bir tasarım için olmazsa olmaz parametreler olduğu görülmüştür. Rotor tarafında ise uygun mıknatıs yay açısı tayin etmenin, mıknatısların kenarlarında gerçekleştirilen farklı tasarım modellerinin, mıknatıs kaykırı ve segmentasyonun daha kaliteli bir çıkış momenti elde edilmesindeki önemi birçok çalışmada ayrı ayrı ele alınmıştır. Tüm bu kriterlerden yola çıkarak motor tasarım aşamaları yürütülmüştür.

Yapılan ön çalışmadan sonra tasarlanacak olan modele ilişkin isterler belirlenmiştir. Motorun hız-moment eğrisi, motoru sürececek olan maksimum akım değeri gibi değişkenler belirlendikten sonra referans olarak seçilen modelin bilgisayar ortamında iki boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Referans olarak seçilen motor altı oluk dört kutuplu, yüzey mıknatıslı bir fırçasız doğru akım motorudur. Analiz çıktıları olarak bu motora ilişkin vuruğu momenti, zıt-EMK, çıkış momenti, bakır ve demir kayıpları, moment dalgalılığı değerleri grafik ve tablo çıktısı olarak yer almıştır. Trapezoidal bir zıt-EMK'ya sahip olan bu motor kare dalga akımı ile sürülmüştür. İki boyutlu sonlu eleman analizi gerçekleştirildikten sonra referans motora ilişkin üç boyut sonlu eleman analizleri de bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Mıknatısların stator paket boyundan beş milimetre daha uzun olmasının etkileri üç boyutlu analiz ile net bir biçimde çalışma sonunda görülmüştür.

Referans modele ilişkin çalışmalar tamamlandıktan sonra alternatif motor tasarım süreci başlamıştır. İlk olarak bu motora ilişkin uygun oluk/kutup konfigürasyonu belirlenmiştir. Daha sonra ise bu motorun referans modelde olduğu gibi yüzey mıknatıslı olarak tasarlanacağına karar verilmiştir. Tasarım detayları belirlenen motora ilişkin yapılan ilk çalışma manyetik eş değer devre tabanlı analitik çözüm yapan Speed® programında gerçekleştirilmiştir. Speed® ortamında modeli oluşturulan ve istenilen hız-moment değerlerine çıkabilen motora ilişkin çıktılar incelendiğinde trapezoidal bir zıt-EMK'ya sahip olduğu görülmüştür. Ancak bu tez kapsamında sinüzoidal bir zıt-EMK'ya sahip motor tasarımının gerçekleştirileceği tezin amacı olarak belirlenmiştir. Bu yüzden daha sonraki tasarım ve değişiklik süreçleri sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilen ANSYS Maxwell® programında iki boyutlu ve üç boyutlu olarak tamamlanmıştır. Literatür çalışmalarında sıklıkla rastlanılan yöntemlerden birisi olan pah kırma işlemi klasik tipteki yüzey mıknatıslı yapı ile parametrik olarak çalışılarak en uygun mıknatıslı yapısı belirlenmiştir. Stator tarafında ise toplam harmonik bozulmayı minimum şekilde verecek olan kesirli oluk çift tabakalı sargı yapısı kullanılmıştır. İki boyutlu motor tasarım aşamaları sona erdikten sonra vuruğu momenti, zıt-EMK, çıkış momenti ve motor kayıpları incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. İki boyutlu analiz çalışmaları tamamlandıktan sonra alternatif motor tasarımı üç boyutlu olarak ele alınmıştır. Rotor paketi ve mıknatısların stator paketinden dört milimetre uzun olmasının etkisi üç boyutlu analiz sonucunda daha iyi bir şekilde görülmüştür. Üç boyutlu analizler sonucunda zıt-EMK değerinin tepeden tepeye daha yüksek olduğu, çıkış momentinin de aynı akım değeri ile sürülmesiyle daha yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Tamamlanan analiz çalışmalarından sonra referans olarak ele alınan model ile alternatif motor tasarımı 3D analiz sonuçlarına göre karşılaştırılmıştır. İlk olarak vuruğu momenti karşılaştırılan motorlardan alternatif olarak tasarımı gerçekleştirilen SMSM'un daha iyi olduğu görülmüştür. Hava aralığı momenti analizleri sonucunda referans motor modelinin moment dalgalılığının oldukça yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değer referans model için %57 seviyesindeyken alternatif motor tasarımı için %10 olarak elde edilmiştir. Moment kalitesi anlamında alternatif olarak tasarlanan motorun daha iyi bir tasarım olduğu ortaya konmuştur. Gerilim harmonikleri incelendiğinde de alternatif olarak tasarlanan motorun harmonik distorsiyon seviyesinin %1'in altında olduğu görülmüştür. Verim olarak ise alternatif motor referans motora göre %2-3 daha iyi durumda olduğu çalışma sonucu olarak verilmiştir.

Tasarımı tamamlanan motorun prototip aşamasına gidilmiştir. Motora ilişkin laminasyon ve mıknatıs çizimleri teknik resim olarak hazırlanmıştır. Motorda kullanılan mıknatıslar paralel olarak şoklanmıştır. Motor malzeme teminleri gerçekleştirildikten sonra motor toplanmış ve test için hazır hale getirilmiştir. Üretilen motorun laboratuvar ortamında testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ile analiz çıktıları karşılaştırılmıştır. Zıt-EMK, moment ve güç ölçümleri test ortamında alınan motorun 3D analiz sonuçları ile yakın sonuçlar verdiği çalışma sonucunda görülmüştür.

Tez çalışmasının sonuç bölümünde iyi bir tasarım süreci ile motor boyutlarının ve kullanılan malzeme miktarlarının azaltıldığı, daha küçük ve daha kompakt, verim anlamında daha üst noktalarda olan ve moment kalitesinin daha yüksek olduğu bir motor ortaya konduğunun altı çizilmiştir.

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN FOR COMPRESSOR APPLICATION

SUMMARY

Regulations and standards related to motor efficiency used in white good applications are continuously changing. Energy efficiency is one of the most current topics in present day and has even become more critical day by day. It can be seen that the global companies are spending a significant portion of the capital budget for energy efficiency purpose taking into consideration the competitive world market. The permanent magnet used in motor technology in terms of performance and efficiency comes into prominence in today's world.

Considering the compressor applications, one phase induction motors are being used in a widespread manner. These types of motors directly fed from the alternative current network without any motor drive are working at a constant speed. To be operating at a constant speed is known as an enormous disadvantage with reference to the compressor system performance. The motor interrupts the operation after a certain time. When the refrigerant cooling capacity decreases the rated value, motor runs again. The starting current is high value when the motor operating is in an undesirable situation with regard to energy consumption. By taking all these parameters into consideration, permanent magnet motors can be easily controlled by the power electronics motor drive circuits and are becoming more popular for refrigerator applications from day to day.

Permanent magnet synchronous motors become attractive for refrigerant compressor applications have much precedence such as high torque value per unit volume, to be controlled easily at low speeds, to be able to rise to the high speed, low decibel value, high efficiency, compact structure etc. Particularly, the advances of the magnetic materials and the magnet technology, bringing down the cost of manufacturing and improvement in power electronics are the reason for preference for white good applications.

To begin with, many academic studies in the literature detailed scrutinized about the permanent magnet motors. Electrical motors consist of rotor and stator parts. When analyzed the academic researches, it is seen that there are two main points about the design consideration related to stator and rotor. Each reason concerned the design improvements are to set to zero the cogging torque value, to reduce the torque ripple and the minimization of losses. Choosing a proper match of slots and poles number, skewing armature lamination, selecting the width of slot opening, teeth notching and pairing and the proper winding layout are the design parameters for stator part. Selecting a proper pole arc to pole pitch ratio, magnet skewing, magnet segmentation, changing the magnet profile could be applied for the rotor design improving. The motor design was completed in the light of these design criteria.

Requirements regarding a motor model were determined after the preparatory work. The speed-torque curve of the motor, maximum current value, power value etc. were specified in the beginning of the thesis project. Hereupon, the reference model was chosen and its two dimensional finite element analysis (FEA) was solved by software program. This motor has six slots and four poles and magnets were mounted onto the rotor surface. It is typically brushless direct current (BLDC) motor and has a trapezoidal back-electromotor force (back-EMF), driving by the trapezoidal pulse current. Cogging torque, back-EMF peak-to-peak values, torque output, motor losses were given as graphics and tables after the analysis studying. After two dimensional solution, reference model was also prepared for three dimensional analysis. The length of magnet and rotor stacks are five millimeters longer than the stator stacks. The aim of three dimensional analysis is to see the effect of length of magnets. The peak value of back-EMF and the average electromagnetic torque is higher than the two dimensional analysis result.

The alternative motor design process was started after the completion of the reference model analysis. Firstly, the proper slots and poles configuration were chosen for the permanent magnet motor. After that, the pole type was selected as a surface mounted. The first modeling process was made by using the software program, named as Speed[®], which uses the magnetic equivalent circuit model based on the analytical solution. Then, the model was solved and the results were handled. At the first stage, back-EMF of the motor was attracted notice. It is seen that the back-EMF had trapezoidal wave shape. Since, the purpose of this thesis is to design the motor having a sinusoidal back-EMF waveform. For that reason, next step of the design and changing phases were done by using FEA program ANSYS Maxwell[®]. It is possible to design the motor having a sinusoidal back-EMF wave shape thanks to the changing of the magnet profile. This procedure is known chamfering operation considering the manufacturing process. Fractional slot double layer winding configuration was selected for the best choice to minimize the stator slots harmonics. After the creating the final model, two dimensional FEA simulations were run and results were discussed. The cogging torque, back-EMF, torque output and motor losses were evaluated. It is seen that the back-EMF waveform is pure sinusoidal curve after simulation results. After two dimensional analysis, three dimensional model was created and prepared for simulation. The magnet length and rotor stacks are four millimeters longer than the stator stacks. The difference between two and three dimensional analysis results was shown. The back-EMF value was obtained higher after three dimensional simulation. Both two dimensional and three dimensional motor model were driven by the same current value. The electromagnetic torque in the airgap was gained high value in the three dimensional analysis. These results were related to the length of magnet.

Afterwards, the reference model and the original motor design were compared and 3D analysis results were discussed in detail. First, the cogging torque was handled. It is seen that the original motor model has better cogging torque value. The reference model has very high torque ripple value and its value is %57. The original motor model has only %10 ripple value. In the light of this information, the original model has better electromagnetic torque value. It is seen that the original model total harmonic distortion value is under %1. The motor efficiency for the original motor is two-three percentage higher the reference motor.

Thereafter, the motor was prototyped. The lamination and magnet drawings were prepared as engineering drawing and the order was made. Magnets were shocked directionally. Motor was collected and made available for testing after the material had been obtained. The motor was tested in the laboratory and experimental results were carried out. The thesis was written after the 3D analysis results and the experimental results compared and validated.

Overall, it is shown how to design good motor design process. It is possible to reduce the motor dimensions and the material consumption in order to get more compact motor structure and high efficiency when applying the proper motor design parameters.

1. GİRİŞ

Enerji verimliliği, tüketilen enerji miktarının üretimdeki miktar ve kaliteyi düşürmeden en aza indirilmesidir. Başka bir deyişle enerji verimliliği; gaz, buhar, ısı, hava ve elektrikteki kayıpları önlemek, atıkların geri kazanımı ve değerlendirilmesi veya ileri teknoloji ile üretimi düşürmeden enerji talebinin azaltılması, daha verimli enerji kaynakları, gelişmiş endüstriyel süreçler, enerji geri kazanımları gibi etkinliği arttırıcı önlemlerin bütünüdür [1]. Enerjinin her geçen gün daha da önem kazandığı günümüzde yaşamın bir parçası olan elektrik enerjisinin tüketimi de aynı şekilde kritik bir durum haline gelmiştir. Bu yüzden elektrik enerji verimliliği ile ilgili standartlar ve yönetmelikler güncel olarak değişmektedir.

Elektrik motorları günlük hayatta birçok yerde ve farklı uygulamada kullanılan elektrik makinalarıdır. Dönme hareketi elektrik enerjisi kullanarak gerçekleştirilir. Bu yüzden elektrik motorlarında verimlilik son derece önemli ve kritik bir durumdur.

Verim kıstas olarak ele alındığında en popüler elektrik makinası olarak sürekli mıknatıslı motorlar ön plana çıkmaktadır. Sürekli mıknatıslı motorların statorunda alan sargıları yer alır, rotorunda ise sargı bulunmaz ve motorun dönme hareketini gerçekleştirmesi için gerekli olan rotor akısı sürekli mıknatıslardan elde edilir. Özellikle rotorunda uyarma sargısı olmaması, fırça-kolektör sistemlerinin bulunmamasından dolayı performans anlamında büyük avantajlar sağlamaktadır. Birim hacimden elde edilen yüksek moment ve çıkış gücü, hava aralığında oluşan yüksek manyetik alan yoğunluğu, bazı tip motorlar için maliyetlerin düşük olması, üretim ve bakım kolaylığı, yüksek hızlara çıkabilme, düşük hızlarda kolay kontrol edilebilme, sessiz çalışabilme ve boyutsal avantajları sayesinde tercih edilmektedir ve birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır [2].

Sürekli mıknatıslı motorlar sargılarında endüklenen gerilimin dalga şekline göre sınıflandırılır. Rotor döndürüldüğünde sargılarda endüklenen gerilimin dalga şekli kare dalga olan motorlar fırçasız doğru akım motoru (FDAM) olarak isimlendirilir. FDAM dikdörtgen darbe akımları ile sürülür ve bu durum fırçalı doğru akım motoru ile birebir aynıdır. Eğer endüklenen gerilimin dalga şekli sinüzoidal ise bu motorlar

sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) olarak ifade edilir. SMSM sinüzoidal akım ile sürülür ve fırçasız alternatif akım motoru (FAAM) olarak da literatürde kullanılır [3,4].

Avantajları nedeniyle ön plana çıkan sürekli mıknatıslı motorlar uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur. Kullanılan manyetik malzemelerin kalitesinin artması ve sürekli mıknatıs temininin kolaylaşması ile daha geniş alanlarda ve farklı uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Dünya pazarındaki rekabetçi piyasa ortamı göz önünde bulundurulduğunda performans ve verim açısından birçok avantaja sahip olan bu motorlar ihtiyaçlara kolaylıkla karşılık verecek seviyeye gelmiştir. Bu sebeplerden dolayı motor üreticileri için bu konu büyük bir stratejik hamle olmuş ve atılacak olan teknolojik adımların başını çeker hale gelmiştir. Yapılan birçok bilimsel çalışma ve üretim tekniklerindeki olumlu gelişmeler ile motor standartları ve enerji verimliliği sınıflarındaki düzenlemelere kolaylıkla cevap verecek duruma gelmiştir. Özellikle evlerde tüketilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmını oluşturan beyaz eşya uygulamalarında geleneksel olarak en çok kullanılan asenkron motorun yerini yavaş yavaş sürekli mıknatıslı motorlar almaya başlamıştır.

Sürekli olarak çalışan ve günün her anı elektrik tüketen bir beyaz eşya olan buzdolabı için verimlilik son derece hassas bir konudur. Buzdolabı soğutma işlemini kompresör ile gerçekleştirir ve elektrik motorları kompresörler için güç kaynağı durumundadır. Bu açıdan bakıldığında buzdolabının enerji verimliliği direkt olarak kompresörde kullanılan elektrik motorunun verimi ile doğru orantılıdır.

Günümüzde buzdolabı kompresörlerinde bir faz asenkron motor yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorlar herhangi bir inverter olmadan direkt olarak şebekeden beslenmekte ve sabit bir hızda dönme hareketi sağlamaktadır. Kompresör bir süre çalıştıktan sonra motor termostat üzerinden aldığı bilgi ile dönme hareketini kesmektedir. Buzdolabı belli bir soğutma kapasitesinin altına düştüğü anda ise motor tekrardan dönme hareketini gerçekleştirmektedir. Bir faz asenkron motorlar kalkış anında şebekeden yüksek akım çekerler ve bu tüketim açısından istenmeyen bir durumdur. Sürekli mıknatıslı motorlar bir güç elektroniği devresi üzerinden sürülerek farklı hızlarda kompresör içinde çalışabilmektedir. Değişken hızlarda sabit moment bölgesinde kesintisiz olarak çalışma yapabilmesi bir faz asenkron motora göre en büyük avantajı olarak görülmektedir. Güç elektroniği elemanlarının teknolojik

gelişimi ile ilişkili olarak sürücü devre tarafındaki verimlerin iyi bir hale gelmesi de sürekli mıknatıslı motorları daha da ön plana çıkarmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada buzdolabı kompresör uygulaması için sinüozoidal zıt elektromotor kuvvetine (zıt-EMK) sahip sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun için literatürde yer alan sürekli mıknatıslı motorlar üzerine yapılmış çalışmalar detaylı olarak incelenmiş, en optimum tasarımı sağlayacak kriterler belirlenmiştir. İlk olarak referans olarak seçilen kompresör motorunun bilgisayar ortamında sonlu eleman analizleri (SEA) elektromanyetik çözüm yapan ANSYS Maxwell® programında yapılmıştır. Daha sonra ise kompresör uygulaması için özgün bir SMSM tasarımı çalışması Speed® ve Maxwell® programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmasından sonra motor prototipi üretilmiştir. Üretilen motor laboratuvar ortamında test edilerek analiz çıktıları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak ise referans olarak seçilen motor ile tasarımı gerçekleştirilen motorun analiz sonuçları karşılaştırılarak çalışma tamamlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Sürekli mıknatıslı motorlar üzerine uzun yıllardır birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Yapılan bu araştırmalar analitik çözümlere dayalı, nümerik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen ve deneysel olarak tamamlanan çalışmalar olarak kategorize edilmektedir. Özellikle sonlu eleman analizi gerçekleştirilen tasarımların deneysel sonuçlar ile doğrulandığı literatür çalışmaları detaylı bir şekilde incelendiğinde görülmektedir.

Sürekli mıknatıslı motorların tasarımına ilişkin çalışmalarda çeşitli tasarım parametleri göz önünde bulundurulmaktadır. Yapılan optimizasyon çalışmaları ile daha verimli motor ortaya çıkarılması temel amaç olarak görülmektedir. Bunun için motor verimini etkileyen her bir parametre bir araştırma konusu haline gelmiştir. Motorlarda kullanılan manyetik malzeme özelliklerinden mıknatısların rotor konumu üzerinde yerleşimine, stator sargılarının oluklara yerleştirilmesinden oluk/kutup konfigürasyonuna kadar çok farklı tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak motor tasarımları yapılmaktadır. Yapılan bu bilimsel çalışmaların hepsi motorun sahip

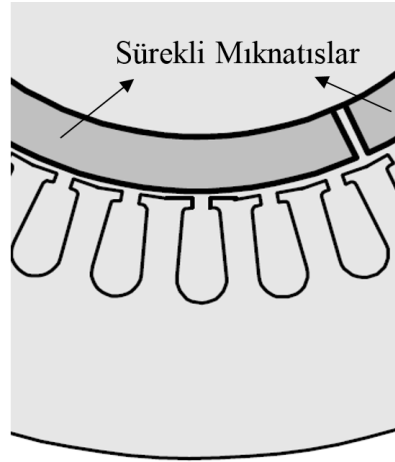
olduğu çıkış momentindeki dalgalanmaları minimize etmek, vuruuntu seviyesini en aza indirmek, toplam harmonik bozulmayı en düşük seviyeye çekmek, motor kayıplarını azaltmaya yöneliktir.

İlk olarak vuruuntu momentini azaltmaya yönelik akademik çalışmalar incelenmiştir. Vuruuntu momenti stator sargılarına herhangi bir akım uygulanmadan stator dişleri ile rotorda yer alan mıknatısların etkileşimi sonucu ortaya çıkan istenmeyen bir durumdur. Vuruuntu momenti bazı step motor uygulamalarında yararlı olmasına rağmen sürekli mıknatıslı senkron motorlar için zarar verici bir durumdur [4].

2012 yılında D. Wang, X. Wang, M. K. Kim ve S. Y. Jung'un yapmış oldukları *"Integrated Optimization of Two Design Techniques for Cogging Torque Reduction Combined With Analytical Method by a Simple Gradient Descent Method"* isimli çalışmada vuruuntu momentinin tanımı ve analitik formüller ile nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir. Vuruuntu momentinin motor kontrolüne olan etkisi vurgulanarak yüksek seviyedeki vuruuntu momentinin gürültü ve titreşimlere neden olacağından bahsedilmiştir. Vuruuntu momenti seviyesinin azaltılmasına ilişkin motor tasarım kriterlerinin 3 ana başlık altında toplandığı ifade edilmiştir. İlk madde olarak uygun bir oluk/kutup kombinasyonu ile moment seviyesinin önemli ölçüde düşük seviyede olacağı belirtilmiştir. Özellikle kesirli oluk sargı yapısının bu durum için en uygun alternatif olduğu söylenmiştir. İkinci madde olarak ise motor tasarım parametleri üzerinde yapılacak olan değişikliklerden söz edilmiştir. Rotorda bulunan mıknatıslarda kaykılı bir yapıya gidilmesi veya mıknatısların parçalara bölünerek geometriye yerleştirilmesinin en optimum çözüm olacağı ifade edilmiştir. Son madde olarak stator tarafında yapılan tasarım çalışmaları yer almıştır. Stator sac laminasyonlarında kaykılı yapıya gidilmesi, oluk açıklığının küçültülmesi ve diş yapısında çentikleme yapılması yöntemleriyle vuruuntu momenti seviyesinin çıkış momentine oranının minimum seviyede olacağı belirtilmiştir. Vuruuntu momenti üzerinde yapılacak olan tasarım çalışmalarının genel olarak 2 ana yaklaşım doğrultusunda yapılabileceği anlatılmıştır. İlk yaklaşım olarak analitik yöntem ele alınmıştır. Bu yöntemin farklı boyutlar ve şekiller için sadece tasarım parametrelerinin kolayca değiştirilerek sonuç verdiği söylenmiştir. Ancak bu yöntem ile saçaklanma etkisinin ve doymanın ihmal edildiği ve vuruuntu momentinin çok iyi bir şekilde minimize edilemeyeceği vurgulanmıştır. Diğer yaklaşımın ise nümerik bir çözüm yöntemi olan sonlu elemanlar analizinin (SEA) olduğu ifade edilmiştir. Kesin ve tam sonuç elde edebilmenin bu yöntem ile

başarılı bir şekilde gerçekleştireleceği belirtilmiştir. Bu çalışmada 3 farklı tipte mıknatıslı motora ilişkin vuruğu momentinin nasıl azaltıldığı nümerik yöntem ile gösterilmiştir. Seçilen motor tipleri yüzey mıknatıslı senkron motor, fırçasız doğru akım motoru ve gömülü tip sürekli mıknatıslı senkron motordur. Her bir motor için iki farklı model farklı kutup açısının kutup ayağına oranı ve oluk açıklıklarının farklı olması durumlarına göre incelenmiştir. Çalışma sonucu olarak belirtilen yöntemlerin optimizasyonu ile en uygun durumlar belirlenerek vuruğu momenti seviyesinin düşürüldüğü gösterilmiştir [5].

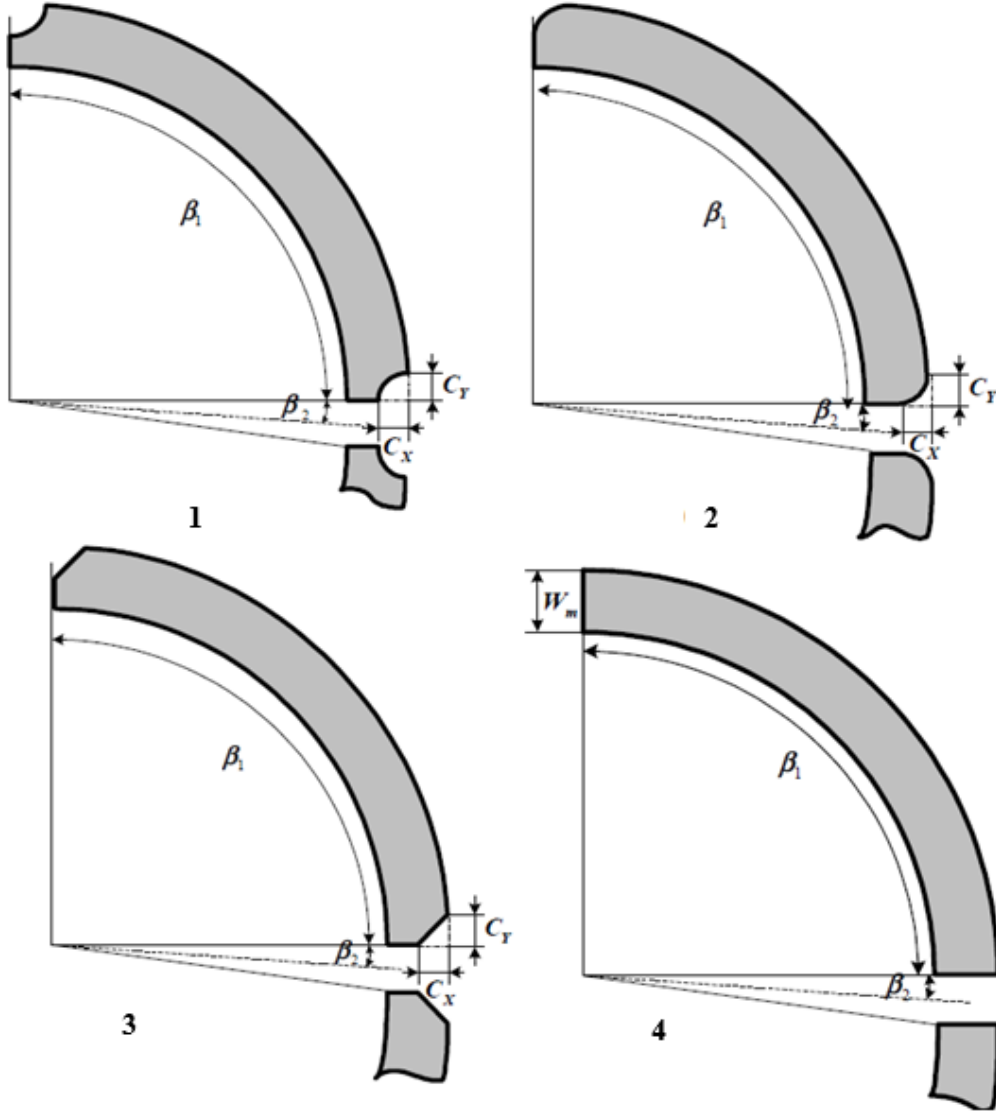
2012 yılında M. Chabchoub ve arkadaşlarının yapmış oldukları “*PMSM Cogging Torque Reduction: Comparison between different shapes of magnet*” isimli çalışmada rotorda yer alan mıknatıs şekillerinin vuruğu momentine olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada referans olarak seçilen motor yüzey mıknatıslı 3 faz bir senkron motordur. Rotorda yer alan sürekli mıknatısların şekli en klasik tip olarak bilinen şekilde seçilmiştir. Aşağıda yer alan Şekil 1.1’de referans motora ilişkin mıknatıs şekli yer almaktadır.



Şekil 1.1 : Referans motor yapısında yer alan sürekli mıknatıslar [6].

Çalışmanın bu noktadan sonraki kısmında sürekli mıknatıslarda 4 farklı şekilde tasarım olarak değişikliğe gidilmiştir. İlk olarak mıknatısların stator oluklarına yakın olan köşeleri içe doğru dairesel bir biçim verilerek yuvarlak bir form haline getirilmiştir. İkinci tipteki mıknatısta ise bu sefer dairesel yapıdaki değişiklik mıknatıs yüzeyinden dışa olacak şekilde yapılmıştır. Üçüncü mıknatıs için statora yakın olan

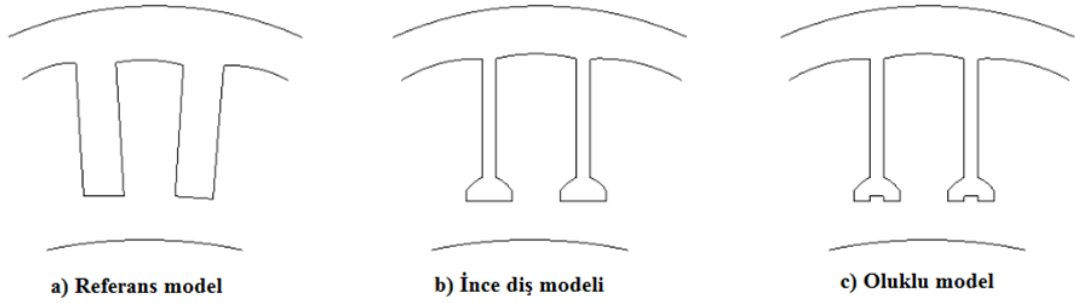
mıknatıs kenarları içe doğru düz olacak şekilde tasarlanmıştır. Son mıknatıs ise düz bir biçimde bırakılmıştır. Şekil 1.2’de mıknatıs şekilleri görülmektedir.



Şekil 1.2 : Farklı mıknatıs yapıları [6].

İlk olarak analizi gerçekleştirilen referans modelin vuruntu momentinin tepeden tepeye değerinin 3.2 Nm olduğu gösterilmiştir. Daha sonra sırasıyla tamamlanan analizlerde motorlara ilişkin vuruntu momenti değerleri sırası ile 0.48 Nm, 0.68 Nm, 0.37 Nm ve 0.97 Nm olarak bulunmuştur. Bu çalışma sonucunda mıknatısların kenarlarında yapılan tasarım değişiklikleri ile yüzey mıknatıslı senkron motorlarda vuruntu momenti seviyesini %90 oranında azaltılabileceği kanıtlanmıştır. 3 numaralı mıknatıs yapısı ise sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı için en uygun seçenek olarak belirlenmiştir [6].

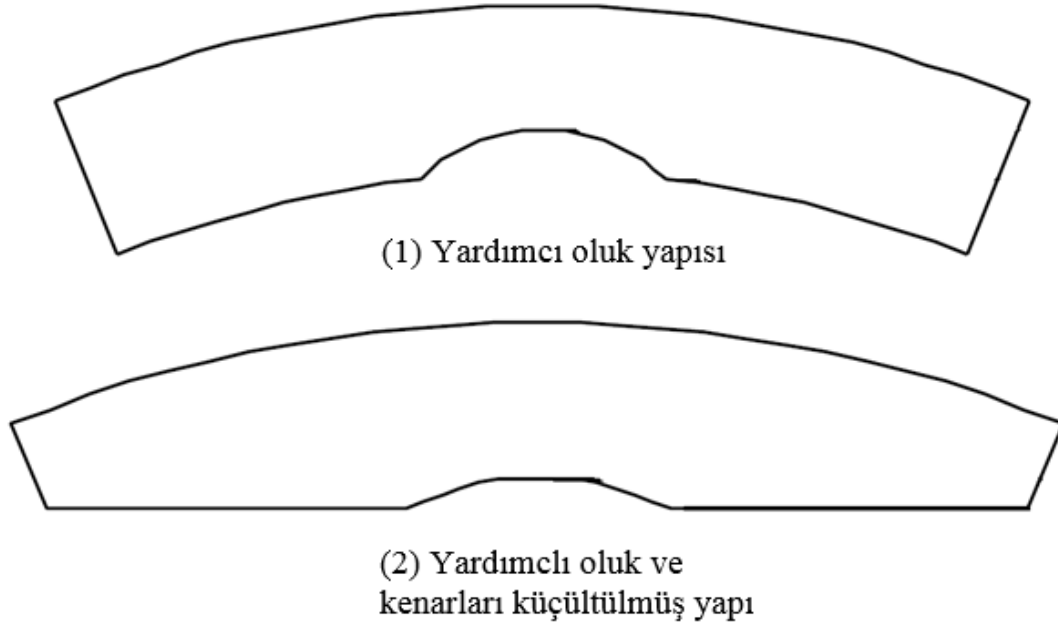
2006 yılında R. Somanatham, P. V. N. Prasad ve A. D. Rajkumar'ın yapmış oldukları “*Reduction of Cogging Torque in PMBLDC Motor with Reduced Stator Tooth Width and Bifurcated Surface Area Using Finite Element Analysis*” isimli çalışmada stator oluklarında yapılan tasarım değişikliğinin vuruğu momenti değeri ne şekilde etkilediği incelenmiştir. Bu çalışma nümerik bir çözüm yöntemi olan sonlu elemanlar analizi ile tamamlanmıştır. İlk olarak referans bir oluk yapısı belirlenmiştir ve ardından bu yapı üzerinde değişiklikler yapılmıştır. İkinci yapıda daha ince diş yapısına gidilip aktif yüzey alanı küçültülmüştür. Daha sonra ise diş ayaklarında oluklu bir yapıya gidilerek son model ortaya konmuştur. Aşağıda yer alan şekil 1.3'te bu yapılar görölmektedir.



Şekil 1.3 : Stator diş modelleri.

Gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinin ardından modellere ilişkin vuruğu momenti değeri tepeden tepeye değeri çalışma çıktısı olarak verilmiştir. Referans olan modelin vuruğu momentinin çıkış momentine oranı %38 olarak hesaplanmıştır. Dişleri inceltilmiş yapıda ise bu değeri %41 olarak bulunmuştur. Oluklu olan modelde ise vuruğu momenti seviyesi %17 olarak elde edilmiştir. Çalışma sonucu olarak stator oluk yapısının vuruğu momentini açıkça etkilediği ve tanım ifadesi ile birebir örtüştüğü ortaya konmuştur [7].

L. Wu, W. Jin, J. Ni ve J. Ying'in 2007 yılında “*A Cogging Torque Reduction Method for Surface Mounted Permanent Magnet Motor*” adlı çalışmasında dış rotorlu bir motor için vuruğu momenti seviyesinin azaltılmasına ilişkin mıknatıslar üzerine oluk açma yöntemi incelenmiştir. Aşağıda yer alan şekilde klasik tip yüzey mıknatıslar üzerinde açılan iki farklı oluk şekil 1.4'te görölmektedir.



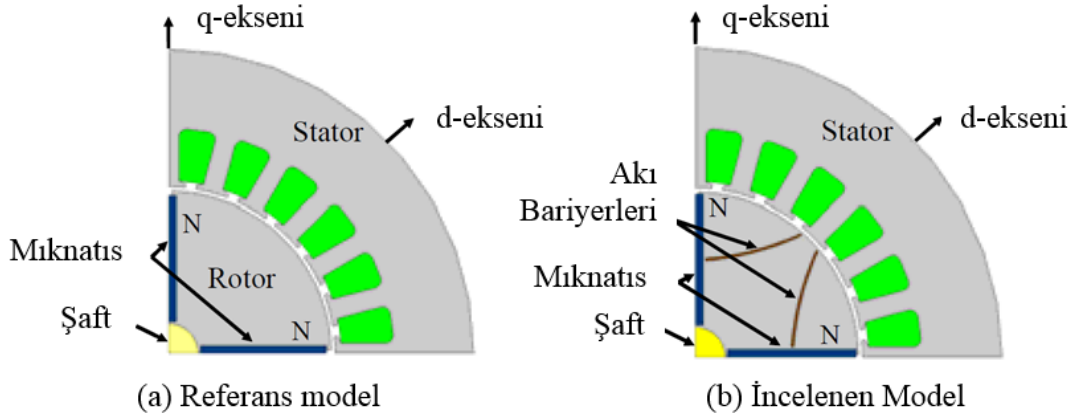
Şekil 1.4 : Farklı mıknatıs yapıları [8].

İkinci mıknatıs yapısında ayrıca mıknatıs kalınlığı küçültülmüş bir seçenek kullanılmıştır. Hazırlanan modellerin ardından sonlu eleman analizleri tamamlanmıştır. Çalışma çıktısı olarak vuru mu momenti değ erindeki iyileş meler yer almıştır. Referans model ile yapılan karşı laştırmalar sonucunda mıknatısta aç ılan oluk yapısının vuru mu momentini düş ürdüğü görülmüştür. Ayrıca mıknatıs kenar kalınlığını azaltma üzerine yapılan parametrik çalış manın da vuru mu momentini iyi bir şekilde düş ürdüğü çalış ma çıktısı olarak verilmiştir [8].

Y. Dönmezer ve L. T. Ergene'nin 2009 senesinde yapmış oldukları “*Cogging Torque Analysis of Interior-Type Permanent-Magnet Brushless DC Motor Used in Washers*” adlı çalış mada vuru mu momenti seviyesinin azaltılmasına ilişkin farklı durumlar detaylı bir biçimde incelenmiştir. Bu çalış mada farklı mıknatıs yay aç ıları, rotorda delik konfigürasyonları, çatallı diş yapıları, farklı oluk açıklıkları ve çatallı diş yapısı ile delik konfigürasyonlarının birlikte yer aldığı farklı modeller için sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalış ma sonunda tasarım parametlerinde yapılan değ iş ikliklerin relüktansı etkileyeceği, dolayısıyla vuru mu momenti değ erinde de değ iş melerin olacağı belirtilmiştir. Her bir tasarım parametresi için en optimum değ er parametrik çalış malar ile bulunmuştur. Vuru mu momenti değ eri azalırken sargılarda endüklenen zıt-EMK değ erinin sabit kaldığı ise ayrıca vurgulanmıştır [9].

2008 yılında S. Ahmed ve P. Lefley “*Study of the Impact of Asymmetrical Stator Pole Arc on the Cogging Torque for Single Phase Permanent Magnet BLDC Motor*” isimli çalışmayı yapmıştır. Bu çalışmada rotor yüzeyinde yer alan mıknatıslar paralel olarak mıknatıslanmıştır. Farklı mıknatıs yay açıları için vuruğu momenti değışimi detaylı bir şekilde incelenmiştir. 11 farklı mıknatıs yay açısı durumu ve 4 farklı stator yapısı için çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan sonlu eleman analizleri ile en optimum tasarımın sağlandığı stator yapısındaki mıknatıs yay açısı değeri 40⁰ olduğu çalışma çıktısı olarak verilmiştir [10].

2006 yılında B. Y. Yang, H. K. Park ve B. I. Kwon’un yapmış oldukları “*Design of Flux Barrier for Reducing Torque Ripple and Cogging Torque in IPM type BLDC Motor*” adlı çalışmada akı bariyerleri kullanılarak vuruğu momenti seviyesinin azaltılacağı gösterilmiştir. Akı bariyerleri kullanılmasının amacının akının doyuma uğrayan kısımlarını önleyerek akıyı konsantre etme yöntemi olduğu ifade edilmiştir. Aşağıda yer alan şekil 1.5’te referans model ve akı bariyerleri olan model yer almaktadır.

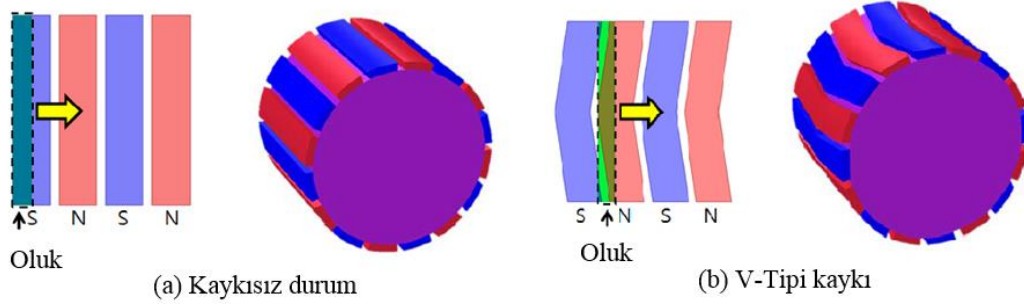


Şekil 1.5 : Farklı FDAM yapıları [11].

Modeller oluşturulduktan sonra yapılan nümerik hesaplamalardan sonra vuruğu momenti değeri karşılaştırılmıştır. Akı bariyerleri bulunan modelde referans modele göre %10.7 daha az vuruğu momenti değeri elde edilmiştir. Bu çalışma çıktısı olarak akı bariyeri kullanmanın akıyı iyi bir şekilde konsantre etme yöntemi olduğu açıkça görülmüştür [11].

2013 yılında J. G. Lee, Y. K. Lee ve G. S. Park’ın hazırlamış oldukları “*Effects of V-Skew on the Cogging Torque in Permanent Magnet Synchronous Motor*” isimli

çalışmada yüzey mıknatıslı rotor yapısı için mıknatıslarda meydana getirilen kaykıkı durumu detaylı olarak ele alınmıştır.



Şekil 1.6 : Kayıklı ve kaykısız mıknatıs yapıları [12].

Rotorda yer alan mıknatıslarda kaykıkı oluşturularak moment titreşimlerini ve gürültüyü azaltabilmenin mümkün olduğu bu çalışmada ifade edilmiştir. Şekil 1.6’da mıknatıslarda v-tipi kaykıkı verilerek kaykıkı olmayan durum ile karşılaştırma yapılmıştır. Daha sonra ise kayıklı durum için mıknatıslara verilen kaykıkı açısı durumu parametrik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucu olarak 90° kaykıkı verildiği durumda vuru mu momenti değeri nin en küçük seviyede olduğu gösterilmiştir [12].

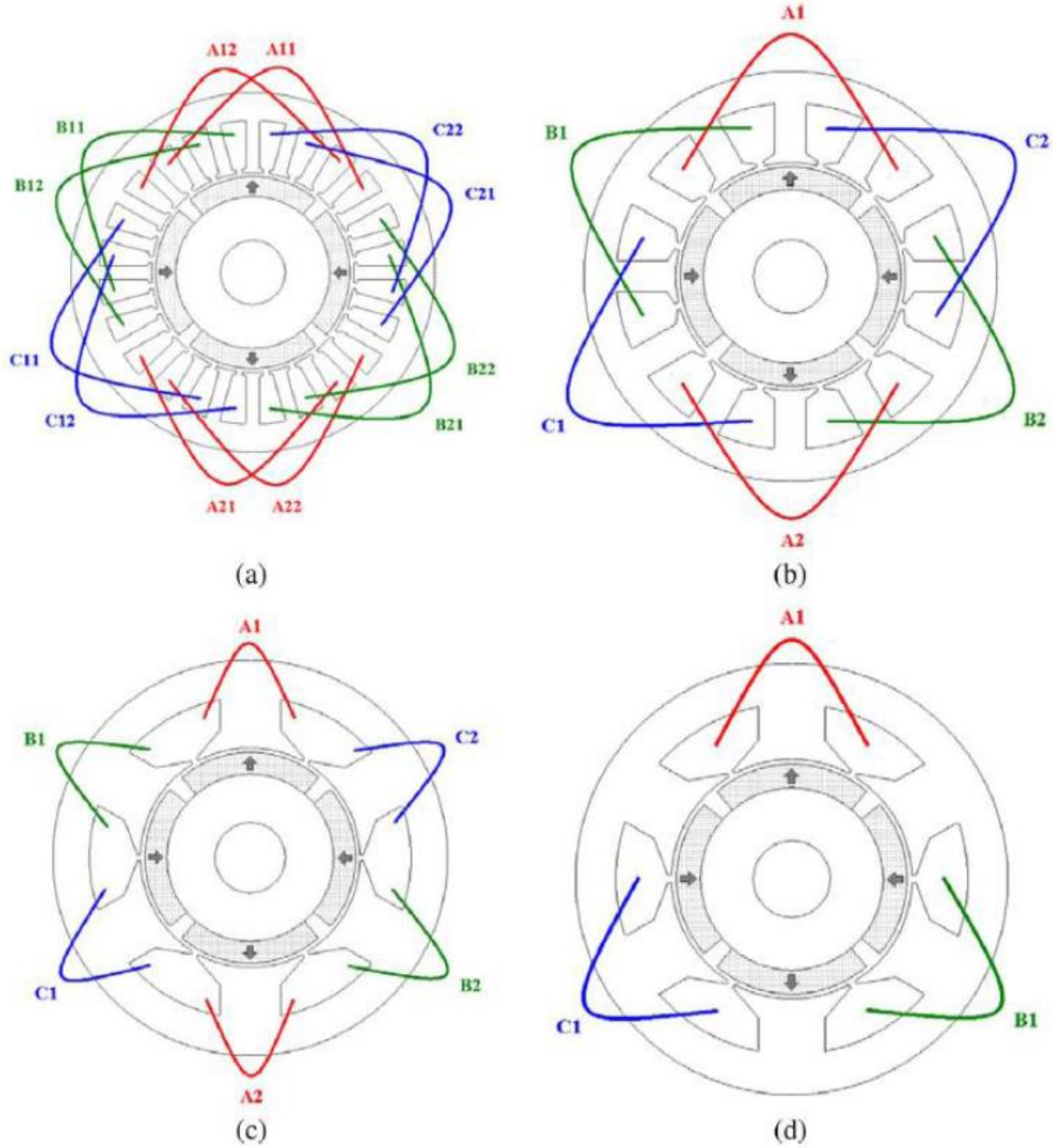
İncelenen vuru mu momenti çalışmalarından sonra stator sargılarında endüklenen zıt-EMK değeri, zıt-EMK’nın dalga şekli ve toplam harmonik bozulmalar ile ilgili akademik çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle stator sargı tipleri, farklı oluk/kutup kombinasyonlarının zıt-EMK dalga şekline olan etkisi, tek tabakalı sargı (TTS) veya çift tabakalı sargı (ÇTS) tasarımları ile ilgili birçok çalışmanın olduğu görülmüştür. Ayrıca rotor tarafında mıknatıslar üzerinde yapılan parametrik tasarım değişikliklerinin zıt-EMK dalga şeklini trapezoidal formdan sinüzoidal forma yaklaştırdığı ve stator uzay harmoniklerini önemli derecede düşürdüğü ilgili çalışmalarda görülmüştür.

M. Farshadnia ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış oldukları “*Analysis of MMF and Back-EMF Waveforms for Fractional-Slot Concentrated-Wound Permanent Magnet Machines*” isimli çalışmada dağıtılmış sargı ve kesirli oluk konsantre sargıların avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Genellikle birçok SMSM’un geleneksel bir yöntem olan dağıtılmış sargı kullanılarak tasarlandığı ifade edilmiştir. Ancak kesirli oluk konsantre sargı kullanmanın SMSM’un performansını arttıracığı, daha ucuz ve daha kolay bir üretim sağlayacağına altı çizilerek vurgulanmıştır. Kesirli oluk konsantre sargı kullanılarak birçok uygulama için kritik bir konu olan sabit güç-hız aralığını sağlayabilmek için gerekli olan yüksek öz endüktans değeri nin elde edileceği

belirtilmiştir. Ayrıca yüksek oluk doluluk oranı, sargı sonlarının kısa olması ve vuru momentine pozitif katkı sağlaması kesirli oluk konsantre sargının diğer avantajları olarak sıralanmıştır. Dağıtılmış sargıdan farklı olarak kesirli oluk konsantre sargı kullanılan motorlarda zıt-EMK'nın yüksek harmonik bileşenler içermesi öz endüktans değerinin yüksek olmasına katkı sağlasa da bu harmonik bileşenlerinin rotor kayıplarını arttırması, dengesiz manyetik doyma ve zıt-EMK dalga şeklinde bozulmalara sebep olduğu da açıklanmıştır. Zıt-EMK'nın stator sargı fonksiyonu ile rotor akı yoğunluğunun etkileşiminin bir sonucu olduğu ifade edilmiştir. SMSM yapılarında rotor akısı dalga şeklinin genellikle sinüzoidal olmaması ve zıt-EMK dalga şeklini belirleyebilmek için tasarım mühendisi açısından stator topolojisi seçiminin önemli bir parametre olduğunun altını çizilerek vurgulanmıştır. Daha sonra aynı rotor yapısı kullanılarak 3 farklı kesirli oluk konsantre sargı konfigürasyonuna sahip motorların nümerik bir yöntem olan sonlu elemanlar ile analizleri yapılarak çalışma sonlandırılmıştır. Rotorunda 14 kutup bulunan motor için sırasıyla 6 oluklu, 12 oluklu ve 18 oluklu stator yapıları kullanılarak zıt-EMK ve harmonik bileşenler karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda 12 oluklu stator yapısının harmonik bileşenler ve toplam harmonik bozulma açısından en optimum seçenek olduğu ortaya konmuştur [13].

A. M. E. Refaie'nin 2010 yılında yayınlamış olduğu "*Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges*" adlı çalışmada sargı konfigürasyonlarının mıknatıslı senkron motorlar üzerinde olan etkisi çok kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. İlk olarak radyal akılı mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan sargı tipleri sınıflandırılmıştır. Şekil 1.7'de SMSMlarda kullanılan sargı tipleri görülmektedir. Bu çalışmada birbiriyle üst üste gelmeyen ve dişe sarılan bir sargı tipi olan kesirli oluk konsantre sargının tek ve çift tabakalı olarak kullanılmasının etkileri incelenmiştir. SMSMlarda kesirli oluk sargı kullanmanın; yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, sargı sonlarının kısa olması, yüksek oluk doluluk oranı, düşük vuru momenti, alan zayıflatma yeteneğinin yüksek olması ve hata toleranslarının düşük olması şeklinde avantajları olduğu belirtilmiştir. Özellikle yüzey mıknatıslı senkron motorlarda alan zayıflatma yapabilmenin zor olduğu ancak kesirli oluk konsantre sargı kullanılarak sabit güç bölgesinde bu duruma pozitif katkı sağlamanın mümkün olduğunun altı çizilmiştir. Çalışmada ele alınan bir başka konu ise farklı sargı kombinasyonlarının yüksek hızlarda rotor kayıplarını ne şekilde

etkilediğini incelemeye yönelik olmuştur. Ayrıca çalışmanın son kısmında yüzey mıknatıslı ve gömülü tip mıknatıslı rotor yapısı için sargı kombinasyonlarının etkisi incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Aşağıda yer alan şekil 1.7’de (a) 24 oluklu dağıtılmış sargı, (b) 20 oluklu konsantre sargı, (c) 6 oluklu tüm dişlere sarılmış konsantre sargı ve (d) 6 oluklu belirli dişlere sarılmış konsantre sargı olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.7 : Stator sargı konfigürasyonları [14].

Çalışmada tek tabakalı ve çift tabakalı stator sargılarının analiz sonuçları detaylı bir şekilde incelenerek karşılaştırılmıştır. ÇTS yapısında elde edilen zıt-EMK dalga

şeklinin daha sinüzoidal olduğu görülmüştür. Çizelge 1.1’de bu iki farklı konfigürasyon için sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 1.1 : Tek tabakalı ve çift tabakalı sargı karşılaştırması [14].

	Tek tabakalı sargı	Çift tabakalı sargı
Sargı sonu	Uzun	Kısa
Faz endüktansı	Yüksek	Düşük
Rotor kayıpları	Yüksek	Düşük
Oluk/kutup kombinasyonu	Az	Çok
Üretim kolaylığı	Kolay	Zor
Sargı faktörü	Yüksek	Düşük
Zıt-EMK	Daha az sinüzoidal	Daha iyi sinüzoidal

TTS yapısında yüksek faz endüktansından dolayı özellikle yüzey mıknatıslı senkron motorlarda alan zayıflatma yapabilmeyenin daha kolay olduğu, ancak elde edilen zıt-EMK dalga şeklinin sinüzoidal formdan biraz uzak kaldığı ve sargı faktörünün yüksek çıktığı gösterilmiştir. ÇTS kullanmanın en büyük avantajlarından bir tanesinin sargı sonlarının daha kısa olduğu ve iyi bir sinüs dalga formuna sahip zıt-EMK’nın sargılarda endüklendiği belirtilmiştir. Aynı çalışma aynı zamanda farklı tipte sinterlenmiş ve sıkıştırılmış mıknatıslar kullanılarak tekrarlanmıştır. Sinterlenmiş mıknatısların yer aldığı motorda moment yoğunluğunun daha yüksek çıktığı, ancak mıknatıs kırılabilirliğinin daha kolay olduğu söylenmiştir. ÇTS yapısında hava aralığı stator manyeto motor kuvvetinin (MMK) harmoniklerinin düşük olmasından dolayı moment titreşimlerinin TTS’ya göre daha az olacağı, ancak stator dişlerinde manyetik doymanın daha kolay gerçekleşeceğinin altı çizilerek vurgulanmıştır.

Çalışmanın bir diğer aşamasında yüzey mıknatıslı ve gömülü tip mıknatıs motorlar için farklı sargı tiplerinin etkisi incelenmiştir. Gömülü tip mıknatıslı motorlarda mıknatıslama işleminin daha kolay yapıldığı söylenmiştir. Titreşim ve gürültü seviyesinin gömülü tip mıknatıslı motorlarda daha yüksek çıktığı ve bunları azaltmanın yüzey mıknatıslı motorlara göre daha zor olduğu belirtilmiştir [14].

A. M. E. Refaie, Z. Q. Zhu, T. M. Jahns ve D. Howe’un 2008 senesinde çıkarmış oldukları “*Winding Inductances of Fractional Slot-Surface-Mounted Permanent Magnet Brushless Machines*” isimli çalışma incelenmiş, motor performansını etkileyen sargı endüktansı değeri farklı oluk/kutup kombinasyonları, farklı oluk

açıklıkları ve farklı sargı tipleri için ele alınmıştır. Sargı endüktans değerinin sürekli mıknatıslı motor performansının belirlenmesi açısından relüktans momenti değeri ve moment titreşimleri gibi çıktılara direkt olarak etki eden bir parametre olduğu ifade edilmiştir. Özellikle yüzey mıknatıslı senkron motorlarda normal şartlarda alan zayıflatma yaparak yüksek hız gerektiren uygulamalara çıkabilmenin zor olduğu, bu durumun kesirli oluk konsantre sargı kullanarak daha kolay gerçekleştirilebileceğinin altı çizilerek belirtilmiştir. Çalışmada faz endüktans değeri tek ve çift tabakalı konsantre sargı, farklı oluk açıklıkları, farklı oluk/kutup kombinasyonları gibi durumlar için incelenmiştir. 12 oluk 10 kutuplu SMSM için 4 farklı oluk açıklığı hem tek tabakalı hem de çift tabakalı konsantre sargı kullanılarak öz ve ortak endüktans değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 1.2’de karşılaştırma sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 1.2 : Oluk açıklığının endüktans değerine etkisinin karşılaştırılması [15].

Sargı tipi	Tasarım 1		Tasarım 2		Tasarım 3		Tasarım 4	
	ÇTS	TTS	ÇTS	TTS	ÇTS	TTS	ÇTS	TTS
L _{öz}	2.51mH	3.94mH	2.62mH	4.08mH	2.68mH	4.16mH	3.08mH	4.70mH
L _{ortak}	0.25mH	3.67μH	0.27mH	3.52μH	0.27mH	3.67μH	0.34mH	4.08μH

TTS kullanılması durumunda harmonik bileşenlerin ve oluk kaçak endüktans bileşenlerinin yüksek olmasından dolayı daha yüksek endüktans değeri çıktığı gösterilmiştir. Farklı oluk açıklıklarının bariz bir şekilde endüktans değerinin etkilediği kanıtlanmıştır [15].

2010 yılında J. Alexandrova, H. Jussila, J. Nerg ve J. Pyrhönen’in yapmış oldukları “*Comparison Between Models for Eddy-Current Loss Calculation in Rotor Surface-Mounted Permanent Magnets*” isimli çalışmada analitik denklemler verilerek hesaplanan mıknatıs kayıpları ile nümerik sonlu eleman analizi yapılarak elde edilen mıknatıs kayıpları karşılaştırılmıştır. Çalışma yürütülürken mıknatıslarda parçalı yapı kullanılmasının da etkileri ve sonuçları çıktı olarak verilmiştir. Neodmium-Iron-Boron (NdFeB) mıknatıslar rotorda 10 ve 20 parçalı olmak üzere 2 farklı şekilde yer almıştır. Daha fazla sayıda parçalara bölünerek segmentasyon işlemi gerçekleştirilen mıknatıs yapılarında mıknatısların daha ince yapıda olmasından dolayı girdap akımlarının azalmasıyla kayıpların da azalacağı çalışma sonunda belirtilmiştir. Ancak mıknatısları çok fazla sayıda parçalara ayırarak rotor yapısında kullanmanın üretim maliyetlerini arttıracığı da özellikle vurgulanmıştır [16].

E. Fornasiero, N. Bianchi ve S. Bolognani'nin 2011 yılında yayınlamış oldukları “*Slot Harmonic Impact on Rotor Losses in Fractional-Slot Permanent-Magnet Machines*” adlı çalışmada oluk harmoniklerinin rotor kayıplarına olan etkisi araştırılmıştır. Kesirli oluk sargı yapısının mıknatıslı senkron motorlarda birçok artışının olmasının yanında hava aralığı MMK dağılımında yüksek uzay harmonik bileşenlerine sahip olduğu çalışmanın başında belirtilmiştir. Bu çalışmada 2 farklı motor yapısının oluk sayısı sabit tutularak farklı kutup kombinasyonları ile faz sayısının değiştirilerek oluk harmoniklerinde meydana gelen değişikliklerin rotor kayıplarına olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Ele alınan ilk motor 30 oluklu bir stator yapısına sahip olup 4, 16 ve 32 kutuplu rotor yapıları ile 3 ve 5 fazlı olarak ayrı ayrı incelenerek rotor kayıpları karşılaştırılmıştır. İkinci motor ise 42 oluklu olup 4, 20 ve 44 kutuplu rotor yapıları için incelenmiştir. Aşağıda yer alan çizelge 1.3'te karşılaştırma sonuçları görülmektedir.

Çizelge 1.3 : Rotor kayıpları karşılaştırması [17].

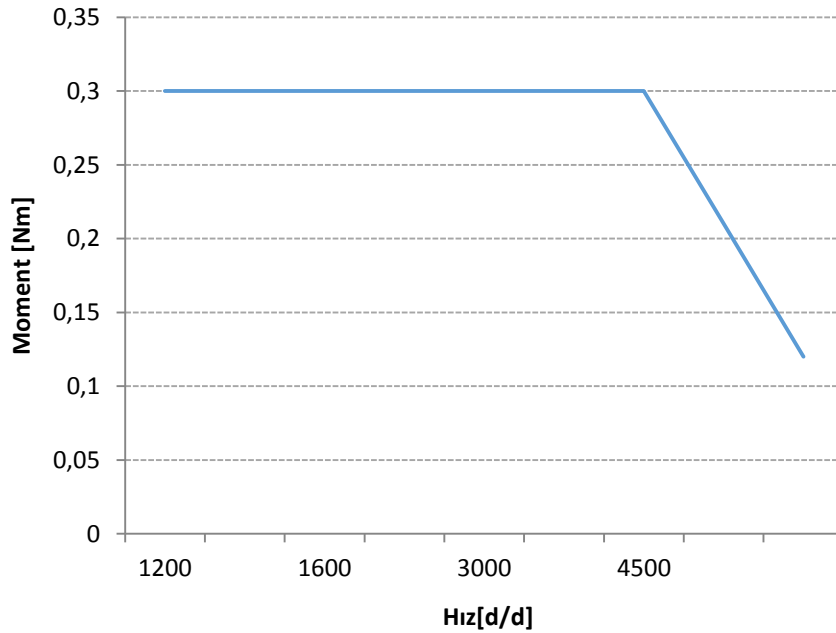
Oluk-Kutup	3 faz	5 faz
	Rotor kayıpları [W]	Rotor kayıpları [W]
30-4	60.9	52
30-16	107.8	88.4
30-32	305.8	294.1
Oluk-Kutup	3 faz	7 faz
	Rotor kayıpları [W]	Rotor kayıpları [W]
42-4	32.1	22.9
42-20	62.6	41.6
42-44	182.5	171.8

Kutup sayısındaki artış ile uzay harmoniklerinde meydana gelen yükselmelerden kaynaklı olarak rotor kayıplarındaki artış gösterilmiştir. Aynı motor yapısının farklı sayıda faza sahip olması durumunda ise rotor kayıplarındaki değişim çalışma sonuçları arasında yer almıştır. Daha fazla faz sayısına sahip motorda kayıpların daha düşük olduğu çalışma sonunda gösterilmiştir [17].

2. MOTOR ÖN TASARIM ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada, kompresör uygulaması için maliyeti düşük, kompakt ve verimi yüksek SMSM tasarımına ulaşılması hedeflenmiştir. Motor tasarım süreci kompresör uygulamasının ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda sabit moment bölgesinde çalışan bir motor tasarımı yapılmıştır.

Tasarım hedefi olarak belirlenen kompresörün, elektriksel ve mekanik kısıtları doğrultusunda tasarım kriterleri ortaya çıkmıştır. Tasarlanacak olan SMSM'un 1200 ve 4500 d/d hızları arasındaki çıkış momentinin ortalama değerinin 0.3 Nm olacağı ve tasarımın bu doğrultuda gerçekleştirileceği belirlenmiştir. 4000 d/d'dan sonra ise motorun 4500 d/d'ya kadar çıkabilmesi hedeflenmiştir. Şekil 2.1'de tasarımı gerçekleştirilecek olan motora ilişkin moment-hız grafiği verilmiştir.



Şekil 2.1 : SMSM'a ilişkin moment-hız grafiği.

SMSM kompresör içerisinde çalışacağından dolayı boyut açısından da kısıtlanmıştır. Mevcut kompresör kiti göz önüne alındığında motorun stator dış çapının maksimum 106 mm ve paket yüksekliğinin maksimum 30 mm olacağı belirlenmiştir. Çizelge 2.1'de SMSM'a ilişkin tasarım kriterleri detaylı bir biçimde verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Motor tasarım kriterleri.

Parametre	Değer
Zıt-EMK dalga şekli	Sinüzoidal
Motor kontrol tipi	Sinüzoidal
Havaaralığı momenti [Nm]	0.3
Çalışma hızı aralığı [d/d]	1200-4500
Maksimum stator dış çapı [mm]	106
Maksimum paket boyu [mm]	30
Mil çapı [mm]	25

Çalışmanın bir sonraki aşaması olarak motora ait uygun oluk/kutup kombinasyonun belirlenmesi gelmiştir. Dünya genelindeki buzdolabı kompresör üreticilerinin üretmiş oldukları motorlara bakıldığında yalnızca 6/4 ve 9/6 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motorların yer aldığı görülmektedir. Motor sürücü devresi açısından kutup sayısının artması kontrolü zorlaştırmaktadır. Kutup sayısı arttığı zaman motor kontrol için elektriksel frekans da artmaktadır. Elektriksel frekans arttığı zaman ise motorun bir turunun süresi daha kısa bir süre tamamlandığı için konum algılama işleminin çok daha kısa bir sürede gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu da işlemci hızını arttırmakla birlikte maliyet açısından da dezavantaj sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı motor sürücü devre açısından moturun sahip olacağı maksimum kutup sayısı 8 olarak sınırlandırılmıştır.

2.1 Oluk/Kutup Kombinasyonunun Belirlenmesi

Literatür çalışmaları detaylı bir biçimde incelendiğinde sargı yapısı ve oluk sayısının moment yoğunluğu, verim gibi motor çıkış parametlerini etkilediği görülmüştür. Günümüzde birçok mıknatıslı motor uygulamasında dağıtılmış sargı yerine konsatre sargı kullanıldığı akademik çalışmalarda sıklıkla görülmüştür. Alışılanın dışında klasik olan dağıtılmış sargı yerine konsatre sargı kullanılmasının en temel sebepleri motor verimini arttırmak ve daha kolay bir üretim sağlamaktır. Konsatre sargıya sahip motorların birim hacminden alınan moment değeri yüksek ve çıkış momentinin dalgalılığı düşüktür. Sargı başı uzunlukları dağıtılmış sargıya göre %33 oranında daha kısadır, bu sayede oluklara yerleştirilen sargı miktarı daha azdır. İletken boylarının kısalmasından dolayı ileletken direnci düşürerek bakır kayıpları azaltılarak motor verimi artırılmış olur. [3, 14, 15, 18, 19].

Konsantre sargıya sahip olan motorlarda faz (m) ve kutup (p) başına düşen oluk sayısı (N_s) olarak ifade edilen N_{spp} oranı birden küçük kesirli bir sayıdır [3].

$$N_{spp} = \frac{N_s}{2pm} \quad (2.1)$$

Bu tip sargı kullanarak aynı kutup sayısı için daha az sayıda oluk sayısına ihtiyaç duyulur. Bu açıdan motor üretim aşamasında avantaj sağlanır ve olukların sarılması için daha az süre harcanır [19].

Denklem (2.2) ve (2.3)'de ifade edilen oluk sayısı ve kutup sayısı arasındaki ilişkiye göre motor akı dağılımlarını ve moment yoğunluğunu maksimum yapabilmek için bu iki parametre mümkün olduğunca birbirine yakın değerde olmalıdır. Denklem (2.2)'de yer alan eşitlik göz önünde alındığında faz başına düşen oluk sayısının tek olması durumunda stator sargılarında asimetrik yerleşim söz konusu olur. Bu durum dengesiz manyetik kuvvetlerin oluşmasına neden olarak makinada gürültü ve titreşimlere yol açar. Faz başına düşen oluk sayısı çift olması durumunda (2.3) motor performans açısından en optimum yapıya sahip olmaktadır [3,18,19].

$$N_s = 2p \pm 1 \quad (2.2)$$

$$N_s = 2p \pm 2 \quad (2.3)$$

Kesirli oluk konsantre sargıya sahip motorlar ÇTS ve TTS olarak üretilebilirler. TTS sahip olan motorlarda öz endüktans değeri yüksektir ve bu sayede motor kısa devre akımı sınırlandırılmış olur. Sabit moment değişken hız gerektiren uygulamalarda öz endüktans değeri yüksek olmasından dolayı TTS daha çok tercih edilir [14,19,20].

Ön tasarım sürecinde uygun oluk/kutup kombinasyonunun belirlenmesinde göz önünde bulundurulmuş bir diğer kıstas ise sargı faktörüdür. Hava aralığı elektromanyetik moment değeri sargı faktörü ile ilişkilidir. Sargı faktörü, faz sargılarındaki etkin olan sarımlar olarak ifade edilmektedir. Temel bileşenin düşük olması istenmeyen bir durumdur. Bu durumu motor açısından istenilir hale getirmek için motor sargılarından geçen akımın değerinin artırılması ya da daha fazla sarımın sarılması gerekmektedir. Denklem (2.4) moment ile sargı faktörünün temel bileşeni arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$T = pk_{w1}N\phi i \quad (2.4)$$

Burada sargı faktörü (k_w) olarak ifade edilmektedir ve denklem (2.5)'te yer aldığı gibi hesaplanmaktadır.

$$k_w = k_p k_d k_s \quad (2.5)$$

Bu denkleme göre sargı faktörü üç temel bileşenden oluşur. Bunlardan birincisi sargının çevreye dağıtılması ve yerleştirilmesiyle ilgili olan (k_p) ile gösterilen dağılma faktörüdür. İkinci bileşen ise bobin adımının kırılganlığı ile ilgili olan (k_d) ile ifade edilen sargı kırılganlık faktörüdür. Son bileşen ise (k_s) ile gösterilen kaykay faktörüdür. Sargı faktörü 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır [3,19,21,22].

Oluk ve kutup sayısı seçimine ilişkin kriterler ele alındığında moment kapasitesi yüksek motor tasarımı gerçekleştirebilmek için göz önünde bulundurulması gereken faktörler şu şekilde sıralanır:

- Oluk başına düşen kutup ve faz sayısı birden küçük kesirli bir sayı olmalıdır ($N_{spp} < 1$).
- Faz başına düşen oluk sayısı çift sayı olmalıdır ($N_s = 2p + 2$).
- Sargı faktörü bire yakın en büyük değerde olmalıdır.

Farklı oluk ve kutup sayılarına ilişkin N_{spp} ve k_w değerleri çizelge 2.2'de verilmiştir. 6 oluk 4 kutup, 9 oluk 6 kutup seçenekleri mevcut kompresör motor uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki amaç daha önce bu uygulamaya yönelik denenmemiş özgün bir motor tasarımı olarak belirlenmiştir. Çizelgede (*) yer alan sargı faktörüne sahip konfigürasyonlar dengesiz manyetik kuvvetlerin meydana geldiği oluk/kutup dizilimine sahiptir. (**) bulunan konfigürasyonlarda ise oluk ve kutup sayısı birbiri ile faz sayısının tam katı olacak şekilde dizilime sahiptir. Bu sebeplerden ötürü bu kombinasyonlar uygun tasarım için göz önünde bulundurulmamıştır. Motor tasarım kriterleri dikkate alındığında 12 oluk ve 8 kutup sayısına sahip seçenek bu çalışma için ön plana çıkmıştır ve tasarım süreci bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.2 : Farklı oluk/kutup konfigürasyonları için oluk başına faz-kutup sayısı ve sargı faktörü değerleri.

N_s \ 2p		4	6	8	10	12	14	16	20	22	24	26
6	k_w	0.866	**	0.866	0.5	**	0.5	0.866	0.866	0.5	**	0.5
	N_{spp}	0.5	**	0.25	0.2	**	0.143	0.125	0.1	0.091	**	0.077
9	k_w		0.866	0.985*	0.985*	0.866	0.643	0.34	0.34	0.643	0.866	0.985
	N_{spp}		0.5	0.375	0.3	0.25	0.214	0.188	0.15	0.136	0.125	0.115
12	k_w			0.866	0.966	**	0.966	0.866	0.5	0.26	**	0.26
	N_{spp}			0.5	0.4	**	0.286	0.25	0.2	0.182	**	0.154
15	k_w				0.866	**	0.995*	0.995*	0.866	0.74	**	0.4
	N_{spp}				0.5	**	0.357	0.313	0.25	0.227	**	0.192
18	k_w					0.866	0.94	0.985	0.985	0.94	0.866	0.77
	N_{spp}					0.5	0.429	0.375	0.3	0.273	0.25	0.231
21	k_w						0.866	0.793	0.953*	0.997*	**	0.93
	N_{spp}						0.5	0.438	0.35	0.318	**	0.269
24	k_w							0.866	0.95	0.991	**	0.991
	N_{spp}							0.5	0.4	0.364	**	0.308

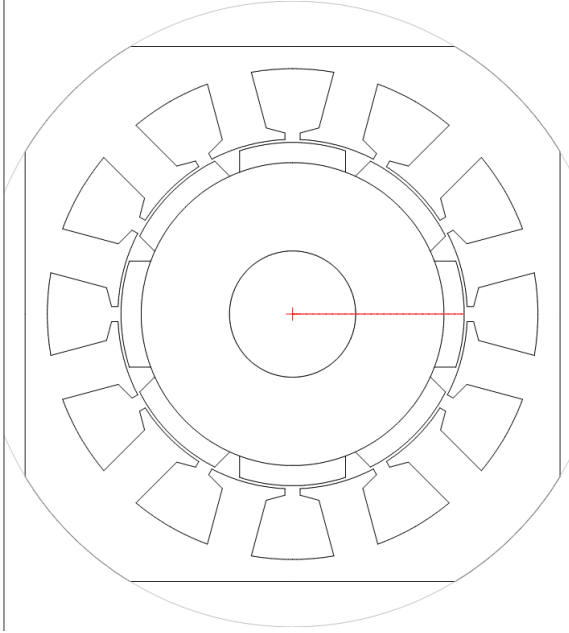
2.2 Motor Geometrisinin Oluşturulması

Oluk ve kutup sayısı seçiminden sonra motor geometrisi bilgisayar ortamında analitik denklem tabanlı çözüm yapan CD-adapco SPEED[®] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım programı ile başlangıç tasarımı hızlı bir şekilde yapılmaktadır. Stator ve rotor geometrisine ilişkin büyüklükler paket programa girilerek tasarım çıktıları kısa süre içinde elde edilir. Bu program sadece motor geometrisinin oluşturulması ve motorun çıkış parametreleri hakkında yorum yapılabilmesi için kullanılmıştır. SPEED[®] programı ile yapılan temel değerlendirme ve gerekli optimizasyonların ardından motor geometrisi sonlu elemanlar ile çözümleme yapan ANSYS Maxwell[®] programına aktarılmıştır. Gerekli parametrik çalışmalar ve final tasarımı Maxwell[®] programından tamamlanmıştır.

Sürekli mıknatıslı motorlar mıknatısların rotorda yerleştirildikleri konumuna göre sınıflandırılabilir. Mıknatısların rotor yüzeyine yapıştırılarak elde edilen motor yüzey mıknatıslı olarak isimlendirilmektedir. Mıknatıslar rotor içine yerleştiriliyorsa bu tip motorlarda gömülü tip olarak literatürde ifade edilmektedir. Her iki motor tipi farklı uygulamalar için tercih sebebi olabilmektedir. Alan zayıflatma yapılarak yüksek hızlara çıkılan uygulamalarda d ve q eksen endüktans değerlerinin birbirinden farklı olması istenir ve bu tip uygulamalar için gömülü tip mıknatıslı motorlar tercih edilmektedir. Çünkü yüzey mıknatıslı motorlarda d ve q eksen endüktans değerleri birbirine çok yakın ya da eşit değerdedir. Diğer bir durumda ise yüzey mıknatıslı motorların seri üretimde getirmiş olduğu üretim kolaylığı büyük bir avantajdır. Aynı zamanda yüzey mıknatıslı motorlarda akıdan daha fazla şekilde faydalanılır ve mıknatıs kaçak akıları aynı uzunluktaki hava aralığına sahip gömülü tip mıknatıslı motora göre daha düşük olmaktadır. Bu sayede gömülü tip mıknatıslı motora göre daha az miktarda mıknatıs kullanılarak aynı hava aralığı momentini elde etme avantajı ön plana çıkmış olur.

Kompresör uygulaması için seri üretim kritleri göz önünde bulundurulduğunda bu çalışma için yüzey mıknatıslı motor tasarımına gidilmesine karar verilmiştir. SPEED[®] ortamında girilen tasarım parametreleri şekil 2.2'de verilmiştir.

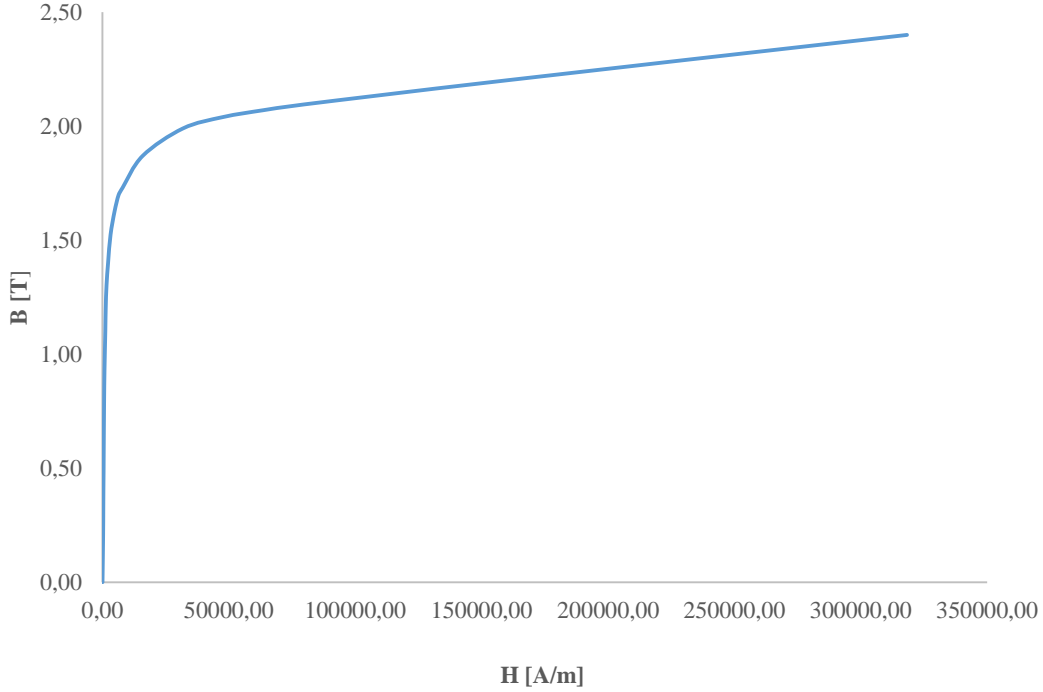
RadSH	12.5000
Rad1	34.0000
Gap	0.6000
LM	4.0000
BetaM	144.0000
Poles	8
Nmbp	1
Slots	12
LamShape	Circ.Chf
LamAlign	Auto
Rad3	62.0000
WX	106.0000
WY	106.0000
S_Slot	Square
SD	14.0000
TWS	9.0000
SO	3.0000
TGD	1.3000
SOang	15.0000
filSO	0.0000
filSB	0.0000
Lstk	28.0000
Embed	Not
RotType	SurfPII



Şekil 2.2 : 12/8 yüzey mıknatıslı motor kesiti ve temel büyüklükler.

Çizelge 2.1'de yer alan motor tasarım kriterlerine göre mevcut veriler SPEED programında girilmiştir. *RadSH* olarak ifade edilen değer mil yarıçapıdır. Mekanik kısıtlardan dolayı izin verilen maksimum çap değeri 25 mm'dir, bu yüzden maksimum *RadSH* değeri 12.5 mm olarak girilmiştir. Bir diğer belli olan tasarım parametresi ise stator dış çap uzunluğudur. 106 mm olarak belirlenen bu değer *WX* stator laminasyon genişliği ve *WY* stator laminasyon yüksekliği olarak ifade edilmektedir. Paket yüksekliği olarak ifade edilen değer *L_{stk}*'dir ve 28 mm olarak girilmiştir. M. Chabchoub ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada yüzey mıknatıslı rotor geometrisi için farklı şekillere sahip mıknatıs yapısı ele alınmıştır [6]. Mıknatıs kenarlarında meydana gelen tasarım değişiklikleri motor zıt-EMK değerine doğrudan etki etmekte, mıknatıslama yönleriyle bu değer tepeden tepeye değeri değişmektedir. Bu çalışmada mıknatıslar paralel olarak yönlendirilecek şekilde tasarlanmıştır. *SurfPII* olarak ifade edilen mıknatıs tipi SPEED üzerinde seçilmiştir. Şekil 2.2'de motor kesitinden mıknatıs şekli görülmektedir. Mıknatıslar üzerindeki detaylı parametrik çalışma SEA ile gerçekleştirilmiştir. Stator ve rotor arasındaki hava aralığı değeri *Gap* 0.6 mm olarak tasarıma girilmiştir. Stator oluklarına ilişkin değerler ise sargı makinasının sahip olduğu özellikler doğrultusunda belirlenmiş olup karesel biçimde seçilmiştir.

Motor tasarımına ilişkin değerler girildikten sonra manyetik malzeme bilgileri programa girilmiştir. Stator ve rotor sac laminasyonları için kullanılan malzemeye ilişkin B-H datası Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Sac laminasyonuna ait B-H değerleri.

Stator ve rotorda kullanılan sacın kalitesi demir kayıplarına etki etmektedir. Bu yüzden kalitesi yüksek sac kullanımına zen gösterilmiştir. Sac laminasyonları 0.5 mm kalınlığa sahiptir ve düşük manyetik alan Őiddetinde yüksek manyetik akı oluşturabilmektedir. Bu yüzden sac laminasyonlarının manyetik geçirgenliği de son derece yüksektir.

Rotorda yer alan mıknatıslar için de sert mıknatıs olan Ferrite tipi mıknatıs tercih edilmiştir. Bu mıknatıs seçimi belirlenirken mıknatısın sahip olduğu remenans değeri göz önünde bulundurulmuştur. Tasarıma motorun çalıştığı ortamın sıcaklık değeri bilindiği için ona karşılık gelen remenans değeri ve koerzif alan Şiddeti değeri girilmiştir. Motor kompresör içerisinde yaklaşık olarak 80⁰ derece sıcaklık altında çalışmaktadır.

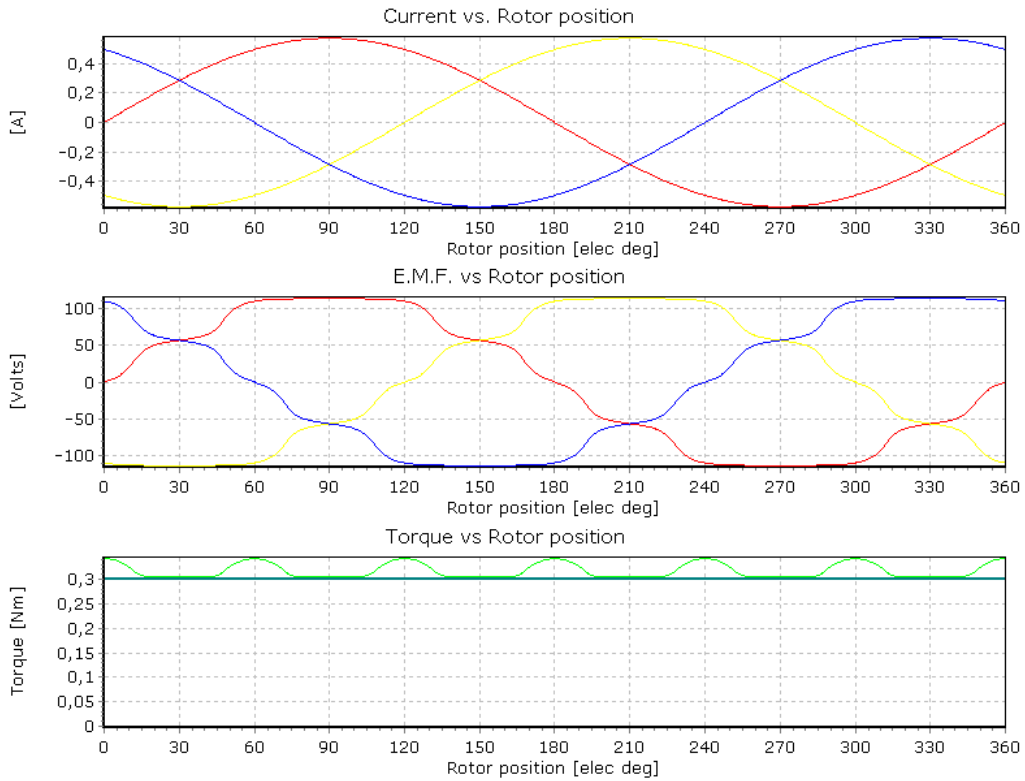
Tasarıma oluklara yerleştirilecek olan sargı ve sargı çapının belirlenmesi ile devam edilmiştir. Bu tasarım için alüminyum tel kullanılmıştır. Tel apı D_s seçiminde stator oluklarının doluluk oranı göz önünde bulundurulması gerekir. Oluk doluluk oranı SF_n bir oluktaki toplam sargı kesitinin A_s oluk alanına oranı olarak tanımlanmış ve

maksimum %75 olarak sınırlandırılmıştır. Oluk doluluk oranı, tel çapı, sarım sayısı N ve sargı kesitine ilişkin eşitlik denklem (2.6)'da verilmiştir.

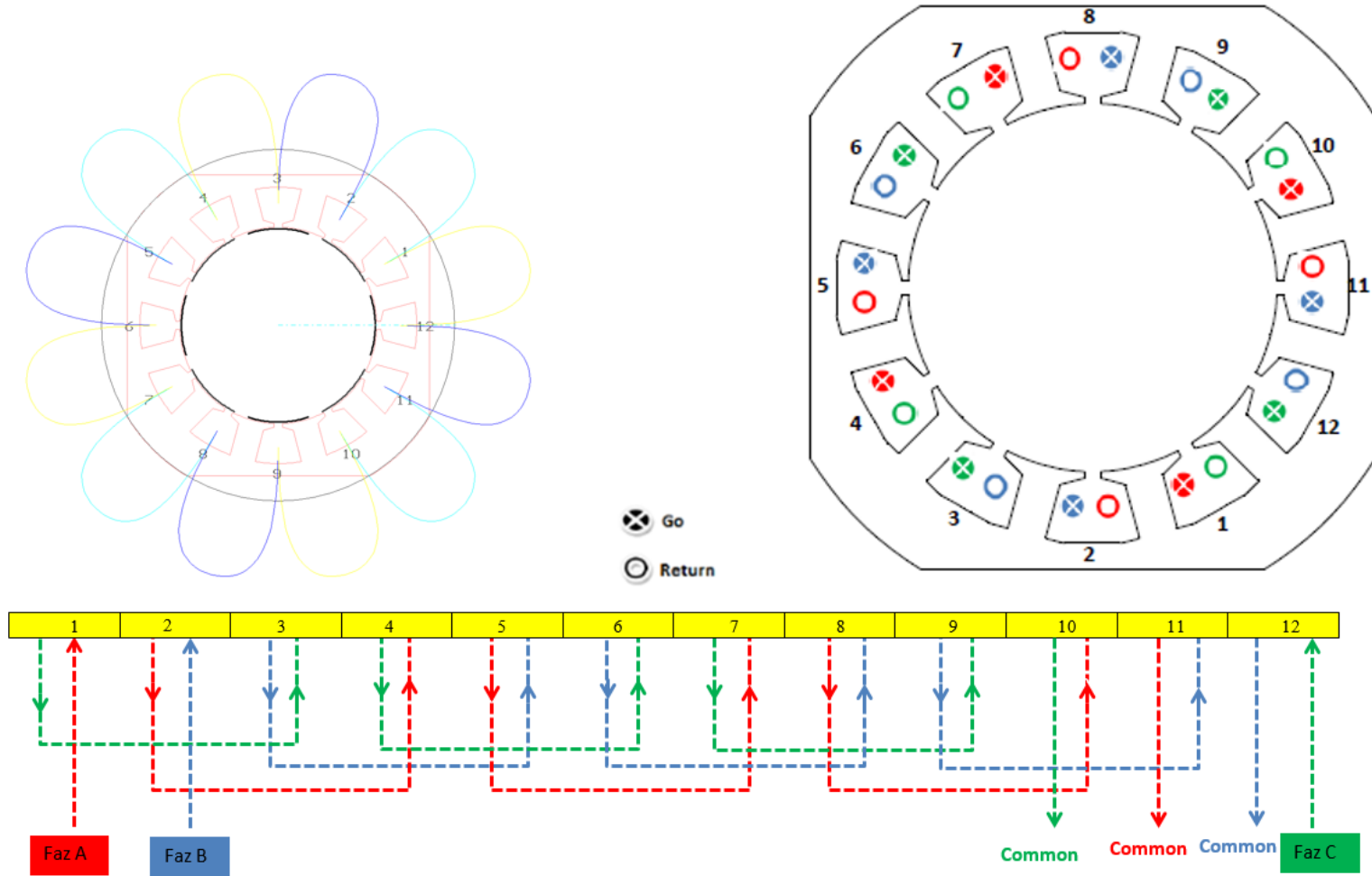
$$D_s = \sqrt{\frac{A_s S F_n}{N}} \quad (2.6)$$

Oluklarda kullanılan tel aynı zamanda motorun verimine doğrudan etki etmektedir. Bakır kayıplarını minimum tutmak için seçilecek olan tel maksimum kalınlıkta olmalıdır. Şekil 2.5'te sargı şeması detaylı bir biçimde verilmiştir. Oluklar sargıların daha iyi ve kolay bir biçimde yerleştirilebilmesi ve sargı makinasının özelliklerinden dolayı karesel olarak tasarlanmıştır. Kullanılan tel çapı 0.55 mm olarak seçilmiş ve her bir oluk için 150 sarım kullanılmıştır. [19,23].

Tasarıma ilişkin tüm değerler girildikten sonra motor statik olarak analiz edilmiştir. Bu analiz sonucu elde edilen verilen akım, zıt-EMK, moment-konum ve moment-hız eğrileridir. Şekil 2.4 ve 2.6'da SPEED® çıktıları verilmiştir. Bu sonuçlar motor performansını istenilen seviyelerde olduğunu anlamak adına fikir verici niteliktedir. Değişen hızlarda, sabit moment elde edilmesi hedefi göz önünde bulundurulmamıştır.

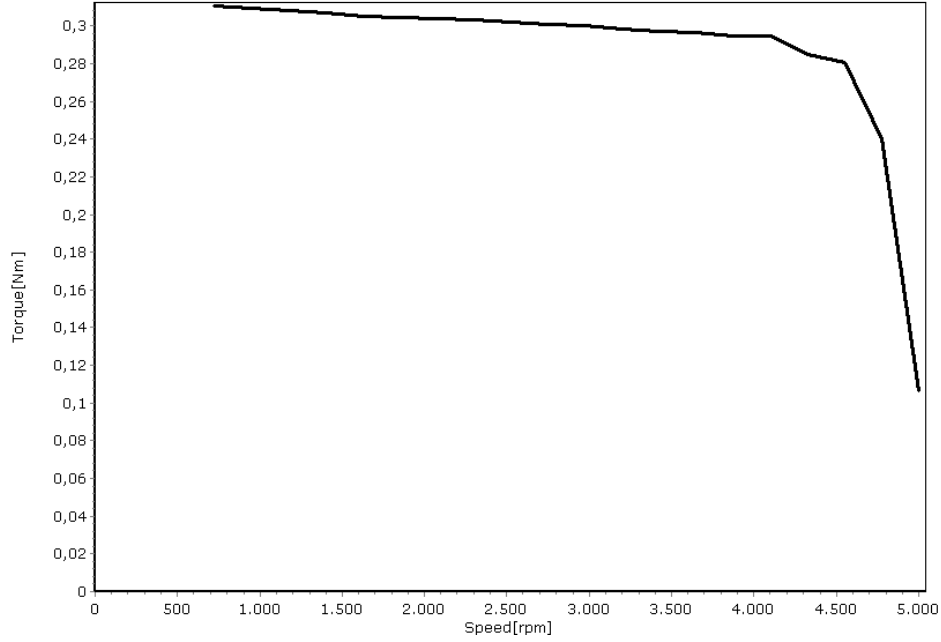


Şekil 2.4 : 3000 d/d'da statik analiz sonuçları.



Şekil 2.5 : 12/8 yüzey mıknatıslı motor sargı şeması.

Şekil 2.4'te görüldüğü üzere motor sinüs dalga biçiminde akım ile sürülmüştür. Ancak endüklenen zıt-EMK'nın dalga formu sinüzoidal formdan biraz uzaktır. Bu tasarım çalışmasının amaçlarından bir tanesi de elde edilen zıt-EMK'nın dalga formunun sinüzoidal olmasıdır. Bu durumda motor tasarımı anlamında geometride yapılması gereken parametrik iyileştirmeler mevcuttur. Bu noktadan sonra gerçekleştirilen her tasarım iyileştirmesi ve parametrik çalışma Maxwell® SEA ile nümerik çözüm yapan programda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6 : 12/8 yüzey mıknatıslı motor moment-hız eğrisi.

Ön tasarım çalışmaları tamamlandıktan sonra motor geometrisi Maxwell® programında kullanılmak üzere dışarıya aktarılmıştır. Tasarım hedefi olarak belirlenen kriterler doğrultusunda elde edilmesi gereken çıktılar için parametrik çalışmalar gerçekleştirilerek verimli bir sürekli mıknatıslı motor elde edilmiştir. İlk olarak iki boyutlu (2D) tasarım gerçekleştirilmiş olup vuru moment, zıt-EMK dalga şekli, toplam harmonik bozulma, farklı hızlarda moment karakteristikleri, bakır ve demir kayıpları ile verim için birçok analiz koşturulmuştur. 2D analizler tamamlandıktan sonra aynı analizler üç boyutlu (3D) olarak da gerçekleştirilerek sonuçlar kıyaslanmıştır.

3. REFERANS MOTOR MODELİ

Özgün motor tasarım çalışmasına başlamadan önce ilk olarak buzdolabı kompresöründe kullanılan bir FDAM referans olarak seçilmiş ve detaylı bir biçimde SEA gerçekleştirilmiştir. Bu motor 9 oluk ve 6 kutuplu yüzey mıknatıslı bir motordur. İncelenen bu modelde de aynı manyetik malzeme özelliklerine sahip 0.5 mm kalınlığında sac kullanılmıştır. Rotorda yer alan mıknatıslar da aynı remenans değerine sahiptir ve çalışma anındaki ortam sıcaklığı 80^0 dir.

Referans model incelemesi 2D ve 3D olmak üzere iki biçimde yapılmıştır. İlk olarak 2D model üzerinde motor analizleri gerçekleştirilmiştir. Motor paket yüksekliği 30 mm'dir. Referans olan modelde mıknatıs ve rotor sac paketi boyu stator paketinden 5 mm daha uzundur. 3D analiz sonuçları ile mıknatısların uzunluk etkisi daha iyi bir biçimde anlaşılacaktır.

Referans model inceleme sonucu olarak vuru moment, zıt-EMK dalga şekli ve tepeden tepeye değeri, toplam harmonik bozulma, çıkış momenti, moment dalgalılığı, bakır ve demir kayıpları ile birlikte verim, kullanılan aktif malzeme ağırlığı, birim hacimden elde edilen moment değeri gibi çıktılar grafik ve çizelgeler halinde verilmiş, 2D ve 3D karşılaştırma tablosu yapılmıştır. Ayrıca motorun yüksüz durumu için manyetik saclarda meydana gelen akı dağılımları ve akı çizgileri de çalışma çıktıları olarak verilmiştir.

3.1 Referans Modelin 2D Modellemesi

İlk olarak referans motor geometrisi Maxwell[®] 2D analiz ortamına aktarılmıştır. Maxwell[®] analiz programı nümerik bir çözüm yöntemi olan sonlu eleman yöntemine dayanarak çalışmaktadır. SEA problemlerin çözümlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Sistem derecesinin küçük parçalara ayrıştırılması, bilinmeyen parametrelerin sonlu sayıda olması bu yaklaşım yönteminin bir sürecidir. Bu sayede SEA düzenli ve sürekli bir düzlemde alt kümeler oluşturarak ve model olarak alınan geometrinin ağ haritasını çıkararak sonuçlar ortaya koyar. Bu noktada temel fikir sürekli fonksiyonların bölgesel sürekli fonksiyonlara olarak temsil edilmesidir. Bunun

anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değeri o elemanın düğüm noktalarındaki değerleri kullanılarak interpolasyon işleminin gerçekleştirilmesiyle elde edilir. Çözümleme gerçekleştirilirken kritik olan nokta sistemin sınır koşullarının tahin edilmesidir. Sınır koşulları, çalışma bölgesinde elektromanyetik alan problemlerine uygulanır. Sisteme verilen sınır koşullarını üç ana başlık altında toplamak mümkündür:

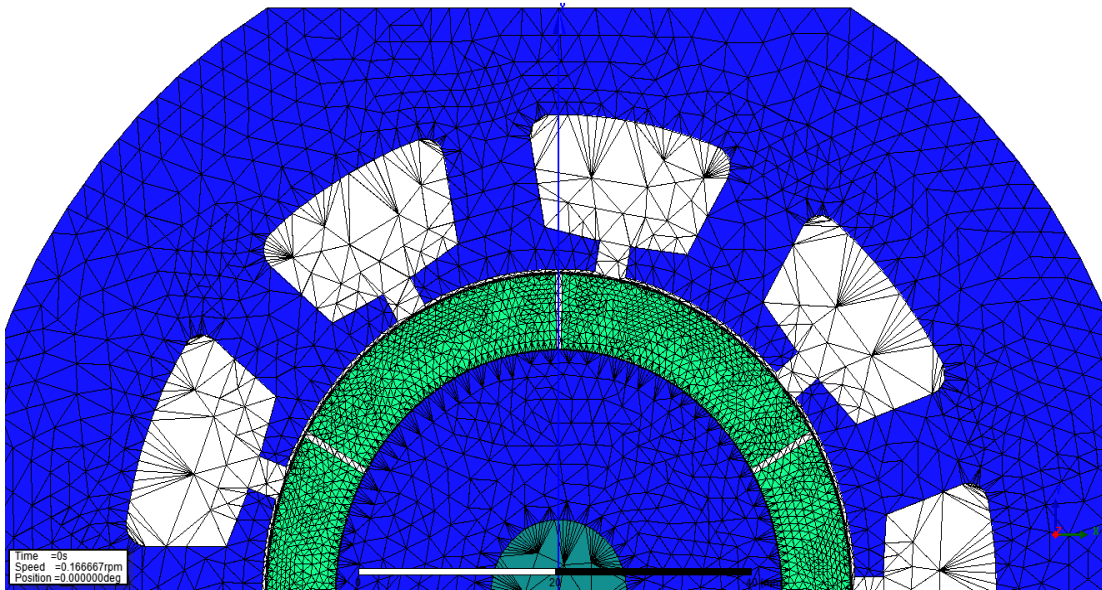
- Dirichlet sınır koşulları
- Neumann sınır koşulları
- Karma sınır koşulları

Dirichlet sınır koşuluna göre belirli noktalara belirlenmiş manyetik vektör potansiyel değeri atanır. Dönen makinada stator sınır koşulu noktasında manyetik vektör potansiyel sıfır olarak atanabilir. Sınır koşulunun sıfır olması homojen bir dirichlet sınır koşuluna sahip olduğu anlamına gelir. Bu yaklaşım göz önünde bulundurulursa stator sac laminasyonu dışında kalacak olan kaçak akılar ihmal edilmiş olur.

Neumann sınır koşullarına göre sınır yüzeyinde manyetik vektör potansiyelin türevi sıfır olarak kabul edilir. Yani akı çizgileri sınır koşullarına dik olarak geçmektedir.

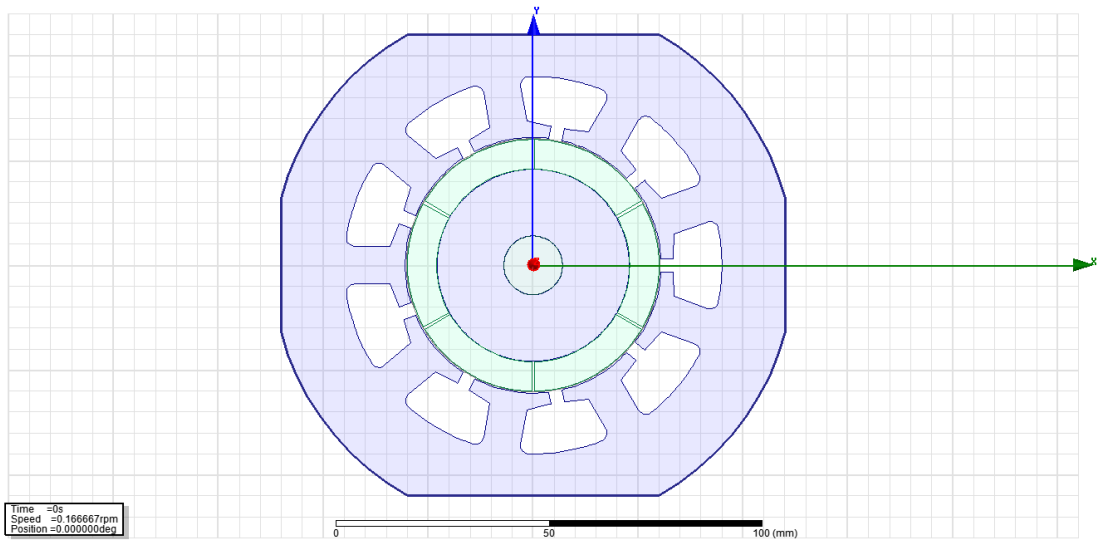
Karma sınır koşulu periyodik sınır ya da dairesel sınır koşulu olarak bilinir. Geometrik anlamda birbiri ile bağımlı olan elemanlar için çözüm gerçekleştirir [24,25].

Aşağıda yer alan şekil 3.1’de referans modele ilişkin motorun ağ haritası verilmiştir.



Şekil 3.1 : 9/6 FDAM motor ağ haritası.

Motor ağ haritasından görüldüğü üzere mıknatıs yüzeylerinde ve hava aralığında ağ yoğunluğu sayısı çok fazladır. Bu durum daha kesin ve doğru çözümler alabilme açısından işlem basamak sayısını arttırmakta ve gerçeğe daha yakın sonuç vermektedir. Bunun için motor tasarım sürecinde model analiz programına aktarıldıktan sonra mıknatısları ve hava aralığını içine alacak ekstra bölgeler tanımlanmaktadır. Sınır koşullarının tahin edilmesi için de stator sac laminasyonunu içine alacak şekilde bir atama gerçekleştirilir. Bu hususta dirichlet sınır koşulları göz önünde bulundurularak sınırdaki manyetik vektör potansiyel sıfır olarak tayin edilir. Aşağıda yer alan şekilde motora ilişkin sınır koşulu gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : 9/6 FDAM ilişkili sınır koşulları.

Şekil 3.2’de stator sac laminasyonunun koyu mavi renk ile seçili kısmı bu motora ilişkin sınır koşullarının belirlendiği bölgeyi göstermektedir.

Motor modeli hazır hale getirilip ağ haritası ve sınır koşulları belirlendikten sonra bu motora ilişkin analizler gerçekleştirilmeye hazır hale gelmiştir. Bu ve bundan sonra incelenecek her motor için sırası ile

- Vuruntu momenti analizi
- Zıt-EMK ve toplam harmonik bozulma
- Moment ve kayıp analizleri

incelenmiştir.

3.1.1 Referans model 2D vurutu momenti analizi

Vurutu momenti, stator sargılarına herhangi bir akım uygulanmadan stator dişleri ile rotorda yer alan mıknatısların etkileşimi sonucu ortaya çıkan istenmeyen bir durumdur. Vurutu momenti motor milinin el ile döndürülmesi sonucu kolay bir biçimde anlaşılabilir. Motor milinin yavaş bir biçimde döndürülmesi sırasında darbeler hissedilir ve bu vurutu momentinin bir sonucudur. Bu değer ne kadar büyük olursa çıkış momentinde titreşim o ölçüde fazla olur. Bu etkinin oluşmasının en büyük sebebi hava aralığı manyetik direnç değerinin sabit olmamasıdır. Relüktans değeri periyodik olarak mıknatısların stator dişlerinin önünden geçmesi durumunda değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden bu titreşimler meydana gelmektedir. Kapalı oluk yapısına sahip motorlarda relüktans değeri mıknatısların konumuna göre değişkenlik göstermediğinden dolayı vurutu momentinin değeri her zaman sıfırdır. Aşağıda yer alan denklem (3.1)'de vurutu momenti ifadesi verilmiştir.

$$T_{vurutu} = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (3.1)$$

Formülde yer alan denklemde ϕ hava aralığı akısı, R hava aralığı manyetik direnci ve θ ise elektriksel açı değeridir. Mekanik olarak rotor konumuna göre mıknatısların akı miktarındaki değişim sonucu vurutu momenti meydana gelir [4]. Formülde yer alan eşitlikler genişletildiğinde denklem (3.1) şu şekilde yazılabilir:

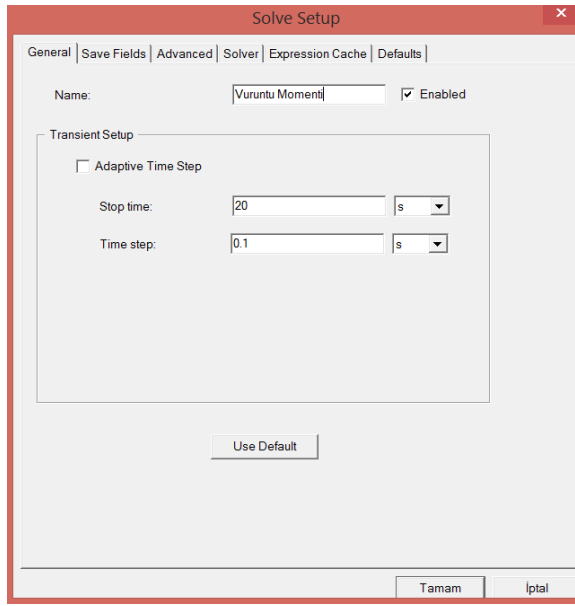
$$T_{vurutu} = \frac{1}{2} B_r \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r} \frac{d\phi_r}{d\theta} \quad (3.2)$$

Formülde yer alan B_r değeri mıknatısların remanans değeri, l_m mıknatıs kalınlığı, ϕ_r mıknatıs akısı, μ_0 havanın manyetik geçirgenlik değeri ve μ_r ise mıknatısın bağlı manyetik geçirgenlik değeridir.

Rotor konumunda meydana gelen değişiklik sonucu ortaya çıkan bu etkinin oluşmasında elektrik açının ve periyodun belirlenmesinde kutup sayısı ve oluk sayısı arasında bir ilişki mevcuttur. Rotorun bir oluk önünden iki kez geçmesi sonucu moment bir periyodunu tamamlar. Bu durumun belirlenmesinde oluk ve kutup sayısının en küçük ortak katlarının bulunmasıyla vurutu momentinin bir periyodu elektriksel açı olarak bulunur. Aşağıda yer alan denklem (3.3)'te bu eşitlik verilmiştir.

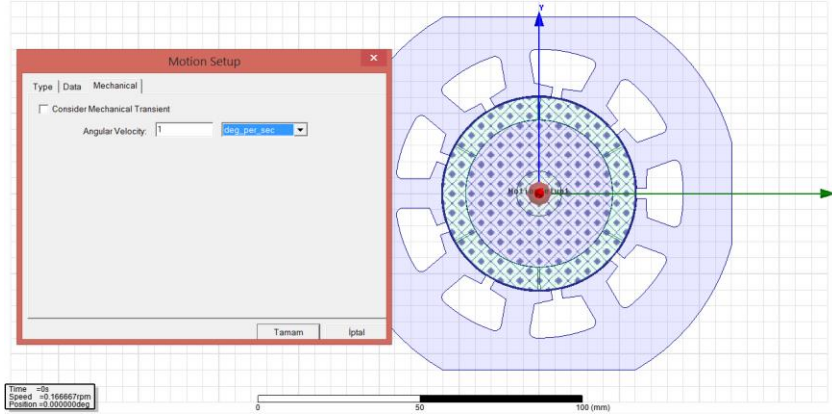
$$\theta_m = \frac{360^0}{EKOK(N_s N_p)} \quad (3.3)$$

Burada N_s motorun oluk sayısını, N_p ise kutup sayısını göstermektedir. Bu bilgi doğrultusunda vuruğu momenti analizi gerçekleştirilecek olan motorun analiz süresi belirlenebilir. Bu sayede daha uzun süre ve fazladan analiz gerçekleştirilmemiş olur. Toplam analiz süresi motor milinin her bir saniyede bir derece döndürülmesi esas olarak bulunur. 9/6 oluk/kutup konfigürasyonuna sahip motorun EKOK değeri 18'dir. Yani bu motorun vuruğu momentine ilişkin bir periyodunu tamamlaması için mekanik olarak 20⁰ tamamlaması gerekmektedir. Maxwell programında analiz süresi girilirken toplamda 20 saniyeyi kapsayacak zamana bağılı bir analiz süresi girilmesi gerekmektedir. Aşağıda yer alan şekil 3.3'te analiz süresine ilişkin işlem süresi ve adım basamakları verilmiştir.



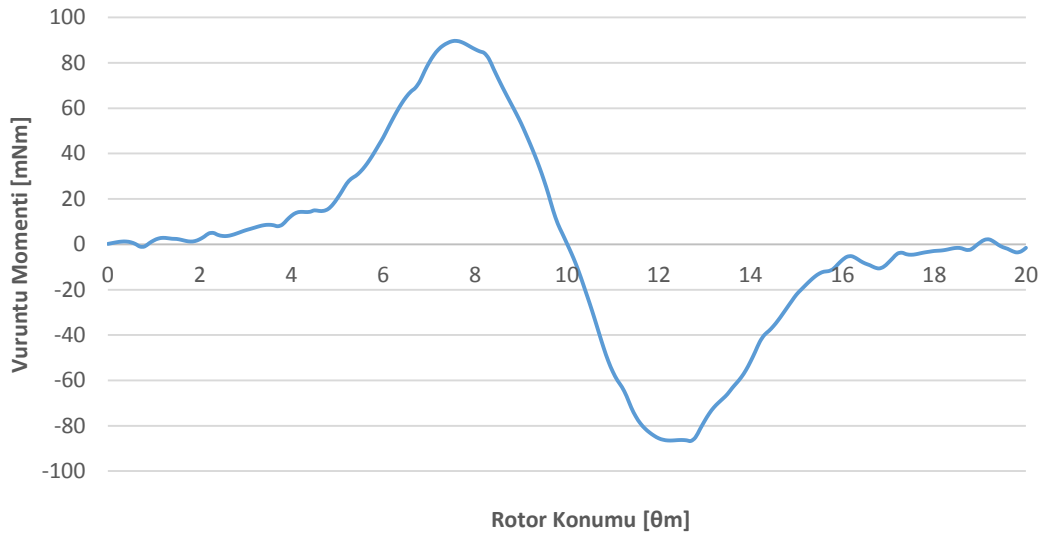
Şekil 3.3 : Vuruğu momenti analizi işlem basamakları.

Toplamda 20 saniye olarak gerçekleşecek olan analiz 0.1 saniyelik adım aralıklarıyla çözülmüştür. Vuruğu momenti analizi çalıştırılmadan önce döner kısımlar için ayrıca bir bölge tanımlayarak dönme hareketi ve hız bilgisi girilmiştir. Şekil 3.4'te döner alan bölgesi ve vuruğu momenti için hız bilgisi girilmiştir.



Şekil 3.4 : Döner bölge tanımlama ve açısal hız bilgisi.

Bütün tasarım aşaması tamamlandıktan sonra analiz koşturularak vuruğu momenti analizi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda yer alan grafikte vuruğu momenti analizi sonucu verilmiştir.



Şekil 3.5 : 2D referans model vuruğu momenti grafiği.

Grafikten görüldüğü üzere 20° mekanik açı boyunca vuruğu momenti bir periyodunu tamamlamıştır. Vuruğu momenti tepe değeri 89.69 mNm değerindedir ve çıkış momentine oranı %29.99'dur. Bir periyot boyunca ortalama değeri sıfırdır. Hava aralığı moment değeri analizlerinden sonra vuruğu momenti tepe değeri kullanılarak yüzde olarak vuruğu momenti değeri hesaplanmıştır. Bu oran ne kadar küçük ise motorun sahip olduğu çıkış momentinin dalgalılığı o ölçüde küçüktür ve kaliteli bir momente sahiptir.

3.1.2 Referans model 2D zıt-EMK ve toplam harmonik distorsiyon analizleri

Rotor üzerinde yer alan mıknatıslar manyetik akı kaynağı durumundadır. Rotor hareket ettirildiğinde stator sargılarında akıdaki değişime göre bir gerilim endüklenir. Bu gerilim zıt-EMK olarak ifade edilmektedir. Bu gerilimin değeri, stator sargılarında akım verilmeden, yani sargı iletkenliklerinin sıfır olduğu durumda sürekli mıknatısların kalıcı mıknatısiyetleri hesaba katılarak bir hesaplama gerçekleştirilir. Zıt-EMK değeri analitik olarak denklem (3.4)'te verildiği şekilde hesaplanır.

$$E = \frac{N_p}{2} w_m 2N \frac{\phi_h}{\pi} \quad (3.4)$$

Burada N_p kutup sayısı, w_m mekanik hız, N faz başına düşen sarım sayısı ve ϕ_h da hava aralığı akısı olarak ifade edilmektedir. Formülden de anlaşılacağı gibi endüklenen gerilim ile motorun açısal hızı arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur. Hesaplama kullanılan analitik formül biraz genişletildiğinde hava aralığı akısı denklem (3.5)'te yer aldığı gibi yazılabilir.

$$\phi_h = \frac{2\pi}{N_p} B_g L_{stk} R_o \quad (3.5)$$

Bu denklemde yer alan B_g değeri hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, L_{stk} paket yüksekliği ve R_o ise mıknatıs yüzeyindeki hava aralığının yarıçap uzunluğudur. Denklem (3.5)'te yer alan hava aralığı akı ifadesi denklem (3.4)'te yerine koyulduğunda aşağıdaki ifade elde edilir.

$$E = \frac{N_p}{2} w_m \frac{2N}{\pi} \left(\frac{2\pi}{N_p} B_g L_{stk} R_o \right) \quad (3.6)$$

$$E = (2N B_g L_{stk} R_o) w_m \quad (3.7)$$

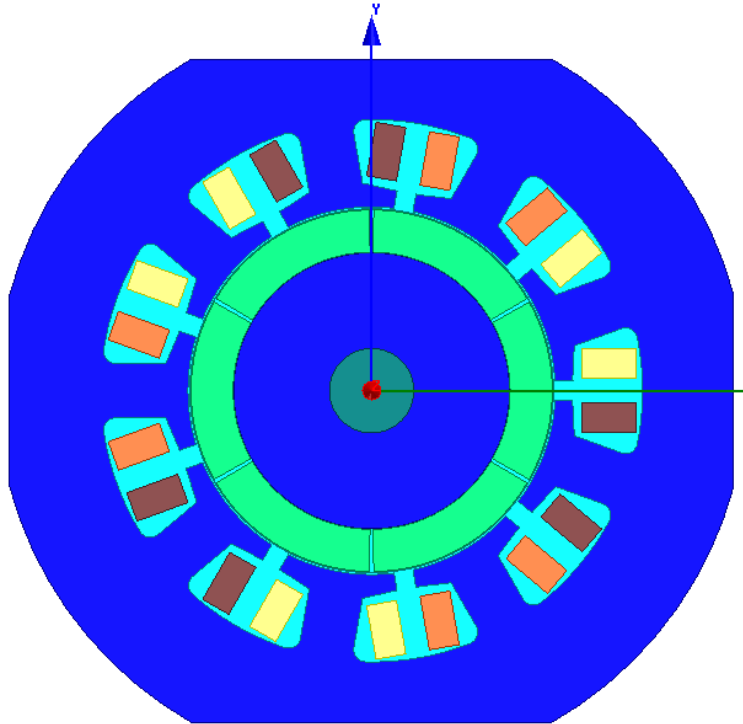
$$E = K_e w_m \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de yer alan K_e ifadesi zıt-EMK sabitidir ve birimi [V.s/rad]'dır. Bu değer her motor için karakteristik bir değerdir ve motor tasarımı ile ilgilidir. Bir motorun zıt-EMK sabiti biliniyor ise farklı hızlarda stator sargılarında endüklenen gerilim değeri kolay bir şekilde hesaplanır. Sargılarda endüklenen zıt-EMK'nın bir periyodu kutup sayısı ile doğrudan ilgilidir. Bir elektriksel frekans boyunca bir periyot

meydana gelir ve bu durum gerilim tepeden tepeye değerini anlamak için yeterlidir. Analizi gerçekleştirilen 9/6 oluk/kutup konfigürasyonuna sahip motor 3 kutup çiftine sahiptir ve 120^0 mekanik açı döndüğünde bir periyodunu tamamlamış olur.

Kompresör uygulaması için zıt-EMK ölçümleri motorun soğuk ortamda test edilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu yüzden analizler gerçekleştirilirken 20^0 ortam sıcaklığına karşılık gelen mıknatıs kalıcı remenans değeri girilmiştir. Mıknatısın kalıcı remenans değeri sıcaklık arttıkça azalan bir karakteristiğe sahiptir. Bu durum hava aralığı akısını doğrudan etkileyerek zıt-EMK'nın değerinde doğru ölçüm ve analiz elde edilememesine sebebiyet verebilir. Bu yüzden ölçümün gerçekleştirildiği ortam sıcaklığındaki manyetik malzeme karakteristiklerinin analiz ortamına doğru bir şekilde aktarılmış olması gerekmektedir.

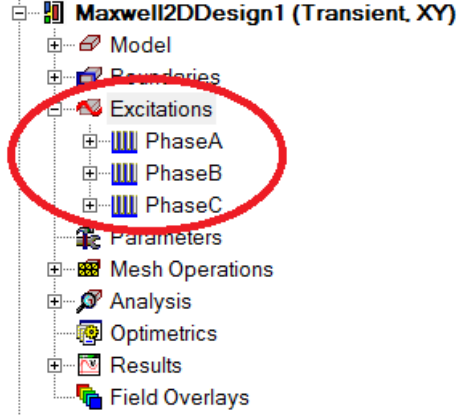
Motor analizi 1200 d/d için gerçekleştirilmiş ve motorun döner kısmı için hız bilgisi ve döner alan bilgisi analiz ortamında tanımlanmıştır. Ardından sınır koşullar tayin edilerek motor fazlarına ait sargılar tanımlanmıştır. Aşağıda yer alan şekil 3.6'da motor sargıları görölmektedir.



Şekil 3.6 : 9/6 motor sargı modeli.

3 faz motora ilişkin sargılar farklı renklerde gösterilmiştir ve analiz ortamına bilgisi girilmiştir. Sargı direnç ve endüktans değer ölçümleri RLC metre ile ölçülerek

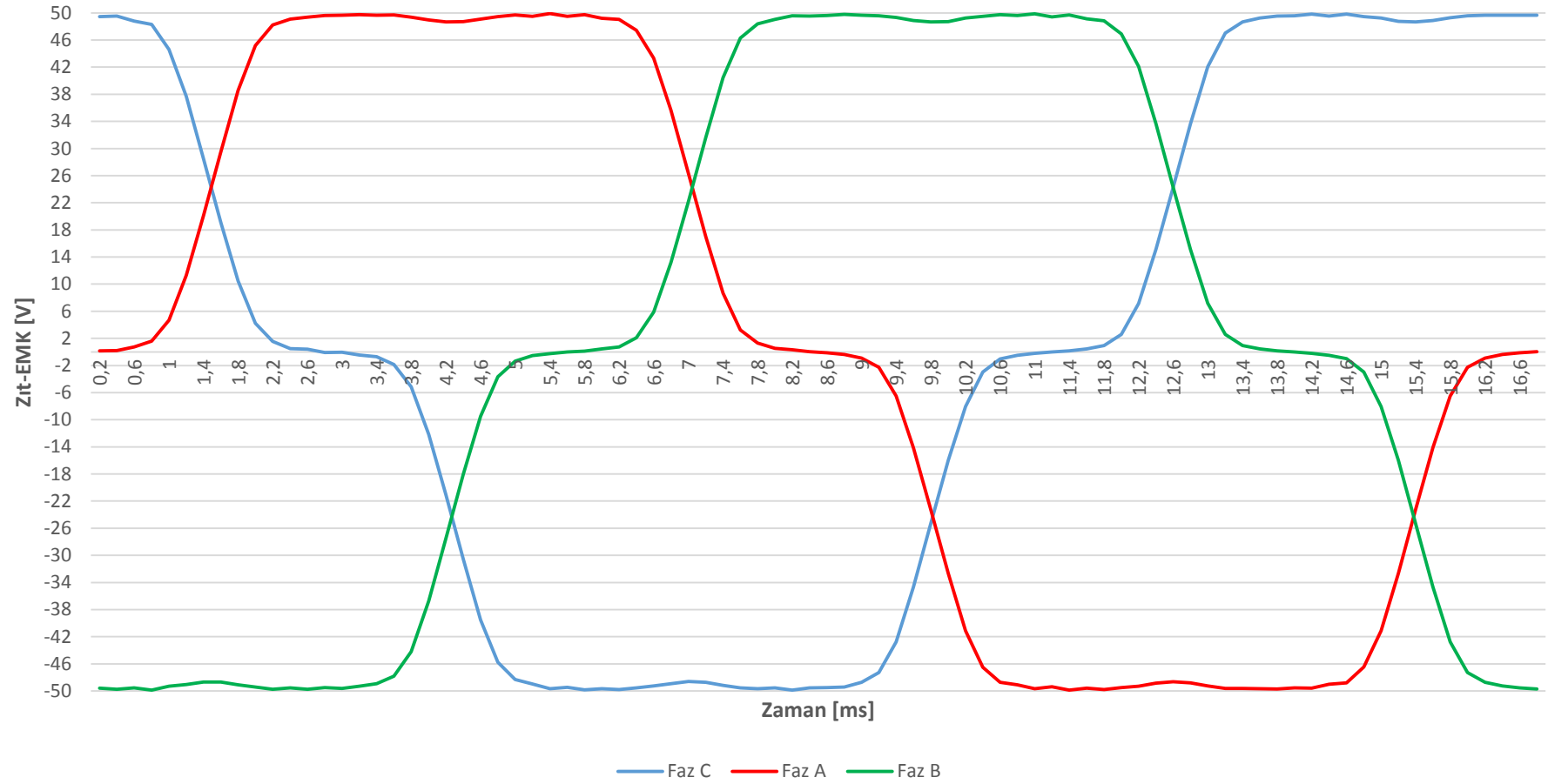
Maxwell[®]'in kendi devre oluşturma programı olan Maxwell Circuit Editor[®]'de çizilen devre modeline girilmiştir. Referans motor modeli için faz-nötr direnci 6.54 Ω Daha sonra oluşturulan devre Maxwell[®]'e aktarılmıştır. Şekil 3.7'de sargıların Maxwell[®]'de girildiği yer ve 3 faz için ayrı ayrı tanımlanan sargı bilgisi görülmektedir.



Şekil 3.7 : Sargı atama bilgisi ve programa devre aktarma seçeneği.

Sargı atama ve devre modeli programa girildikten sonra ağ bilgisi sargılar için özelleştirilmiştir. Sargı olukları için ağ sayısı arttırılarak daha yaklaşık bir çözüm için nümerik işlem sayısı arttırılmıştır. En son olarak ise analiz koşturulmadan önce 120⁰ mekanik açıya karşılık gelecek zaman bilgisi programa girilmiştir. Şekil 3.8'de zıt-EMK grafiği verilmiştir.

Grafikten görüldüğü gibi zıt-EMK'nın dalga biçimi trapezoidal forma sahiptir ve tepeden tepeye değeri 99.7 V'tur. Grafik tam 120⁰ mekanik açıya karşılık gelecek şekilde çizdirilmiştir. 1200 d/d hızda ölçümü yapılan motorun mekanik olarak bir periyot dönme süresi 50 ms'dir. Buna karşılık olarak $50/3=16.67$ ms 120⁰'lik mekanik açıya karşılık gelmektedir. Analiz ortamında statik olarak sıfır değerinden çözüm elde edilememesinden kaynaklı olarak ilk zaman aralığına karşılık gelen 0.2 ms süresinden 16.8 ms süresine kadar zıt-EMK değeri çizdirilmiştir. 1200 d/d süresi için zıt-EMK değeri bilindiği için K_e zıt-EMK katsayısı denklem (3.8)'e göre hesaplanmıştır. Zıt-EMK katsayısının değeri 0.764 V.s/rad olarak bulunmuştur. Çizelge 3.1'de 900-4500 d/d aralığı için zıt-EMK değerleri hesaplanmıştır.

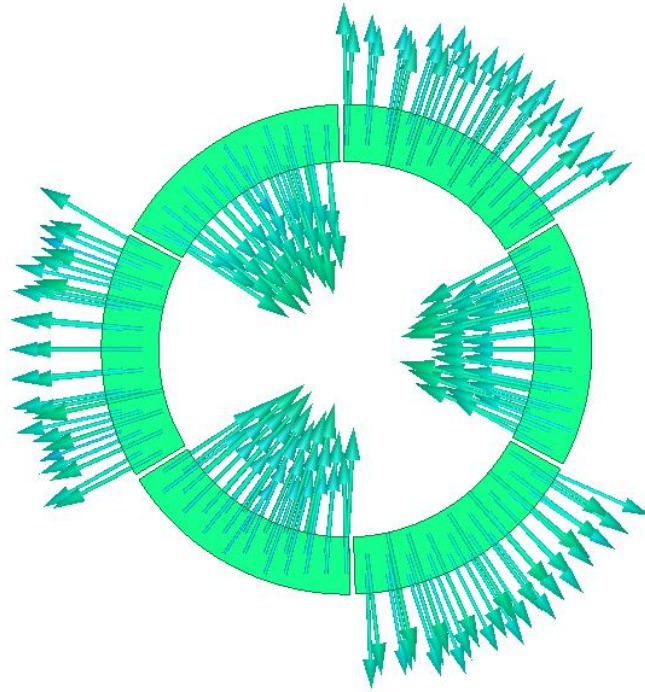


Şekil 3.8 : 2D referans model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).

Çizelge 3.1 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.

Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]	Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]
900	74.79	3000	249.32
1200	99.73	3300	274.25
1500	124.66	3600	299.18
1800	149.59	3900	324.11
2100	174.52	4200	349.04
2400	199.45	4500	373.97
2700	224.38		

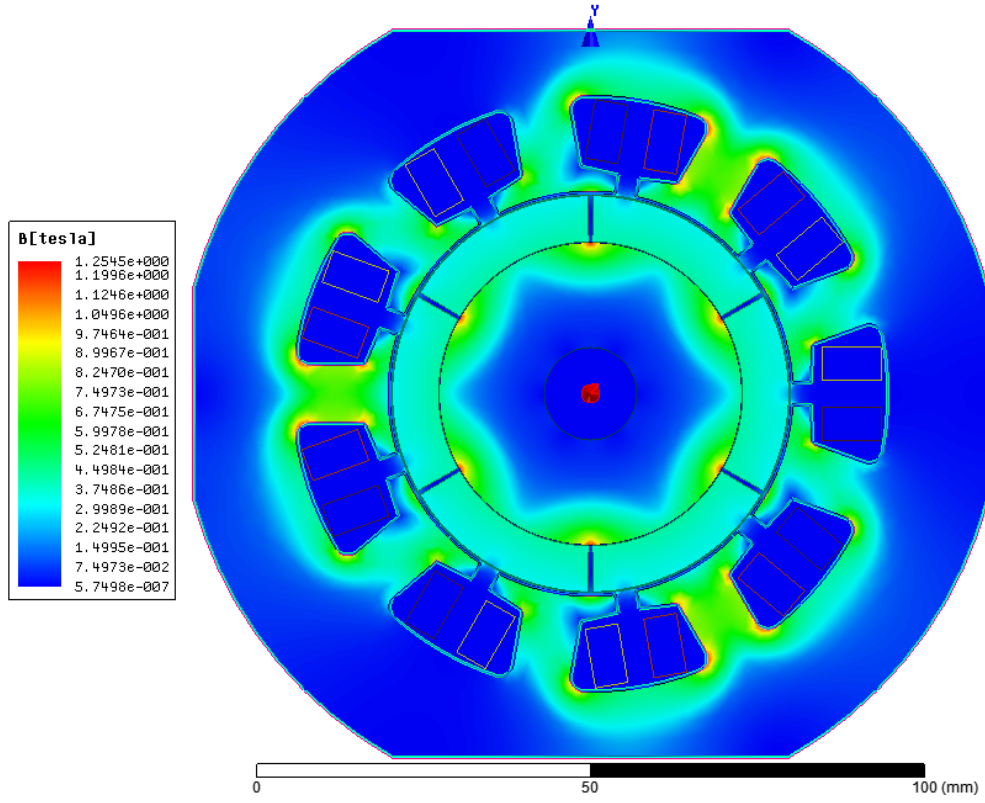
Rotorda yer alan mıknatıslar radyal olarak mıknatıslanmıştır. Şekil 3.9’da mıknatıslanma yönleri çizdirilmiştir.



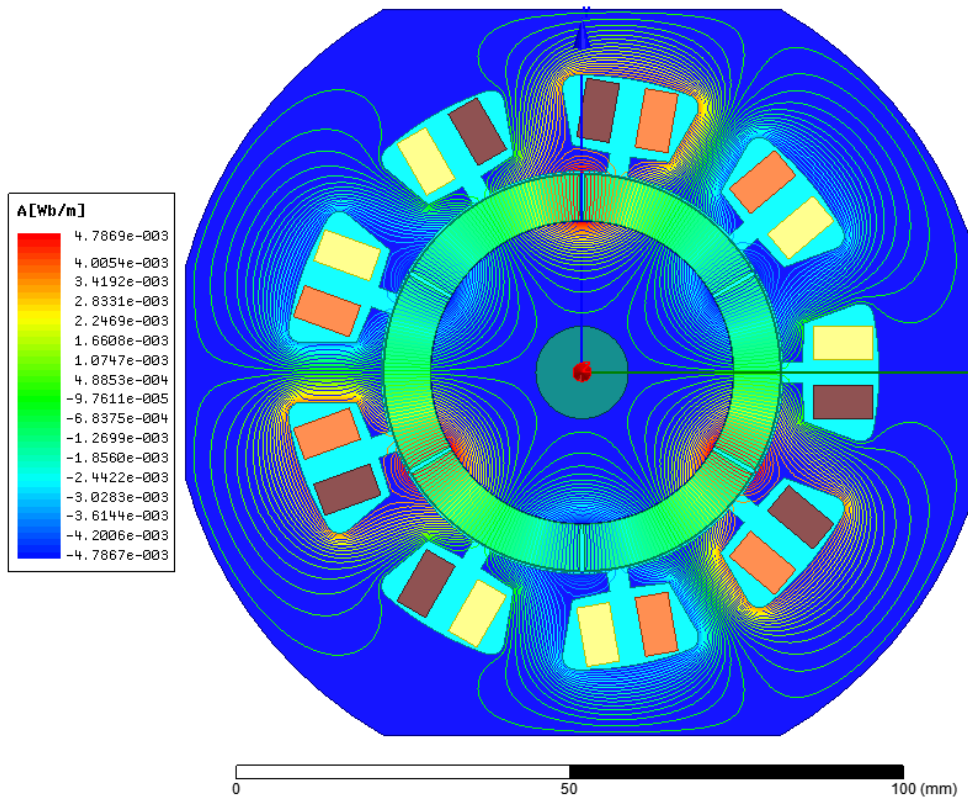
Şekil 3.9 : 9/6 motor radyal mıknatıslanma.

Radyal mıknatıslanmada mıknatıs akısı motor merkez noktasından çıkacak şekilde üretim aşamasında şoklanır. Radyal ve paralel mıknatıslama elde edilecek zıt-EMK değerini etkilemektedir ve motor tasarımı için kritik bir konudur.

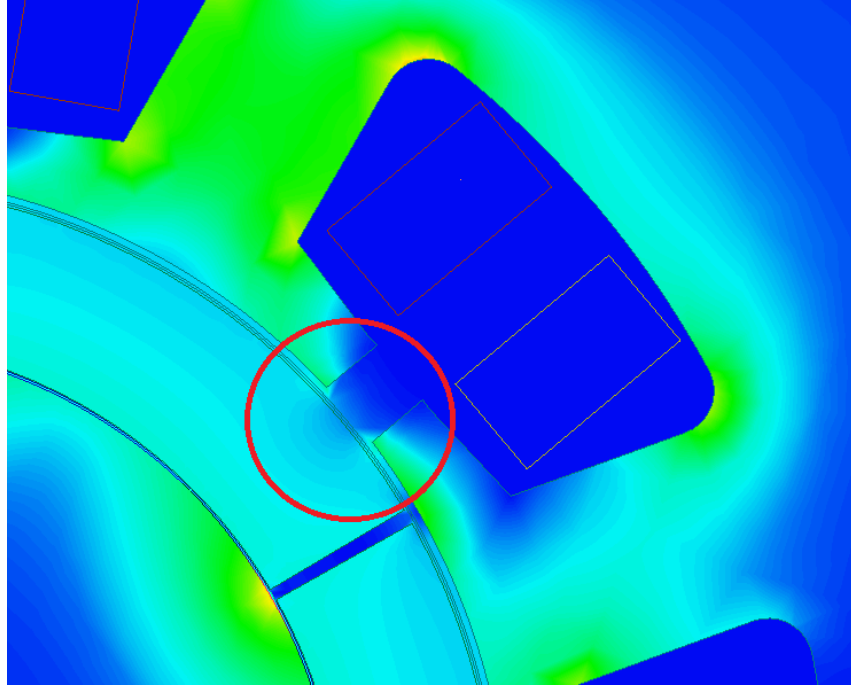
Şekil 3.10 ve 3.11’de laminasyonlar üzerindeki akı yoğunluğu ve akı çizgileri çizdirilmiştir. Zıt-EMK grafiğinde fazlara ait değerlerin tepeye ulaştıkları bölgelerde çöküntüler yapmasının sebebi mıknatısların oluk ağzına karşılık gelen bölgelerindeki manyetik akı yoğunluğunun etkin bir şekilde kullanılamamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.12’de bu durum daha iyi bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Boşta çalışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.



Şekil 3.11 : Boşta çalışma 1200 d/d için akı çizgileri.



Şekil 3.12 : Oluk ağzı bölgesindeki akı yoğunluğu.

Yuvarlak içine alınmış bölgede mıknatıs akısından kaynaklı çöküntüler meydana gelir. Buradan çıkarılan önemli bir sonuç oluk ağzı genişliğinin tasarım açısından kritik olduğu ve mıknatıs akısının verimli bir şekilde kullanılabilmesi açısından mesafenin en optimum şekilde belirlenmesi gerektiğidir. Mıknatıs kenarlarındaki akı kısa devrelerini en aza indirmek için mıknatıs yay açısı ve kenar optimizasyonu parametrik çalışmalar ile gerçekleştirilebilir.

Toplam harmonik distorsiyon, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin tam sinüs dalga şeklinden sapmasını belirlemekte kullanılır. Toplam harmonik distorsiyon harmonik bileşenlerinin efektif değerlerinin temel bileşenin efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde şeklinde gösterilir. Aşağıda yer alan denklem (3.9)'a göre hesaplanır [26].

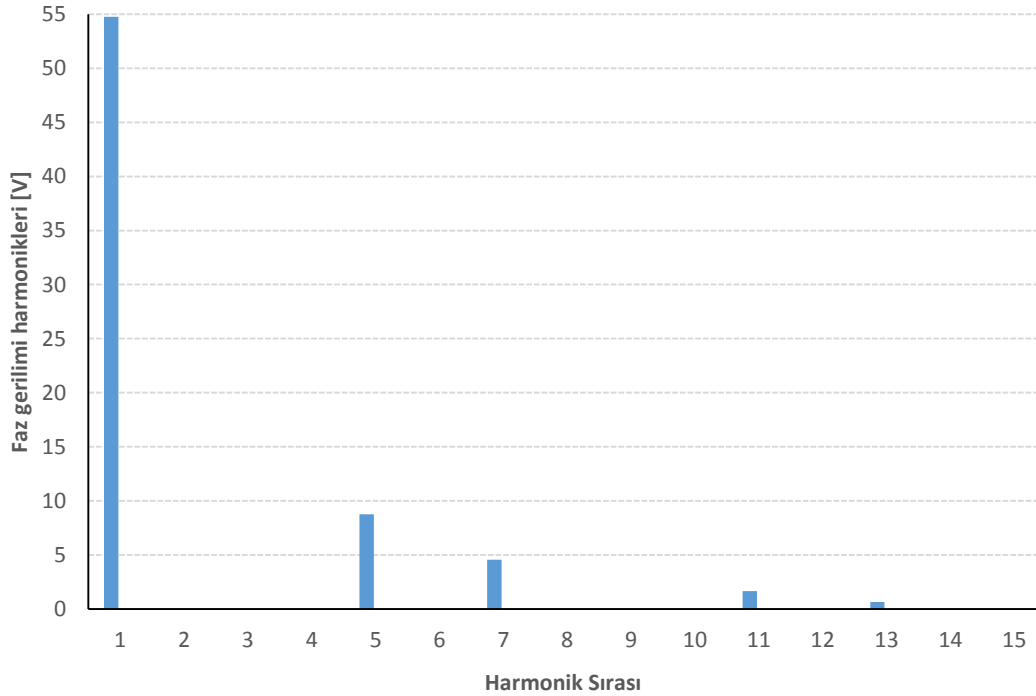
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.9)$$

Trapezoidal bir zıt-EMK'ya sahip olan motorda harmonik bozunum seviyesinin yüksek çıktığı görülmüştür. Gerilim dalga şeklinin ilk 15 harmonik değeri için hızlı fourier dönüşümü kullanılarak spektrum analizi Maxwell® üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu değerler faz arası için hesaplanmıştır. Aşağıda yer çizelgede harmonik bileşenlerin değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Harmonik bileşenler.

Harmonik Sırası	Faz-Nötr [V]
1	54.751
2	0.000
3	0.021
4	0.000
5	8.771
6	0.000
7	4.548
8	0.000
9	0.015
10	0.000
11	1.670
12	0.000
13	0.654
14	0.000
15	0.005

Harmonik bileşen değerlerinden görüldüğü gibi 1., 5. ve 7. harmoniklerin baskın olduğu görülmektedir. Denklem (3.9)'a göre yüzde olarak toplam harmonik bozulma hesaplanmıştır ve değeri %18.35 çıkmıştır. Şekil 3.13'te harmonik bileşenlerin sütun grafik tablosu verilmiştir.



Şekil 3.13 : Faz gerilimi harmonik bileşenleri (1200 d/d).

3.1.3 Referans model 2D moment analizleri

Moment üretimi stator sargılarından akım geçmesiyle gerçekleşir. Denklem (3.10)'da moment formülü verilmiştir.

$$T = \frac{Ei}{w_m} \quad (3.10)$$

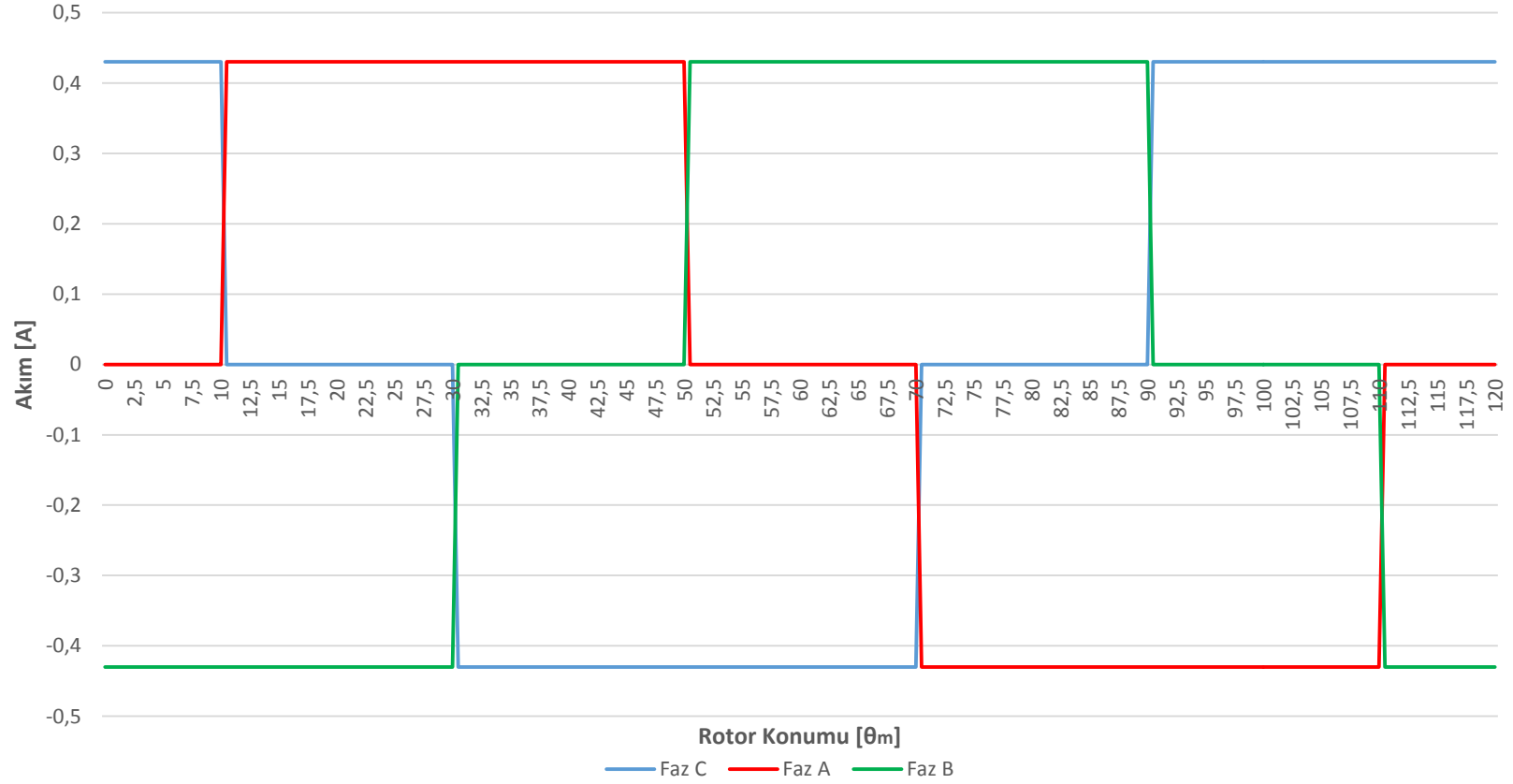
Formülden anlaşılacağı gibi momenti meydana getiren aktif güçtür. Gücün açısal hız ile değişmesi sonucunda moment üretilmiş olur. Denklem (3.12)'de moment sabiti ifadesi verilmiştir.

$$T = \frac{Ei}{w_m} = (2NB_g L_{stk} R_0) i \quad (3.11)$$

$$T = k_t i \quad (3.12)$$

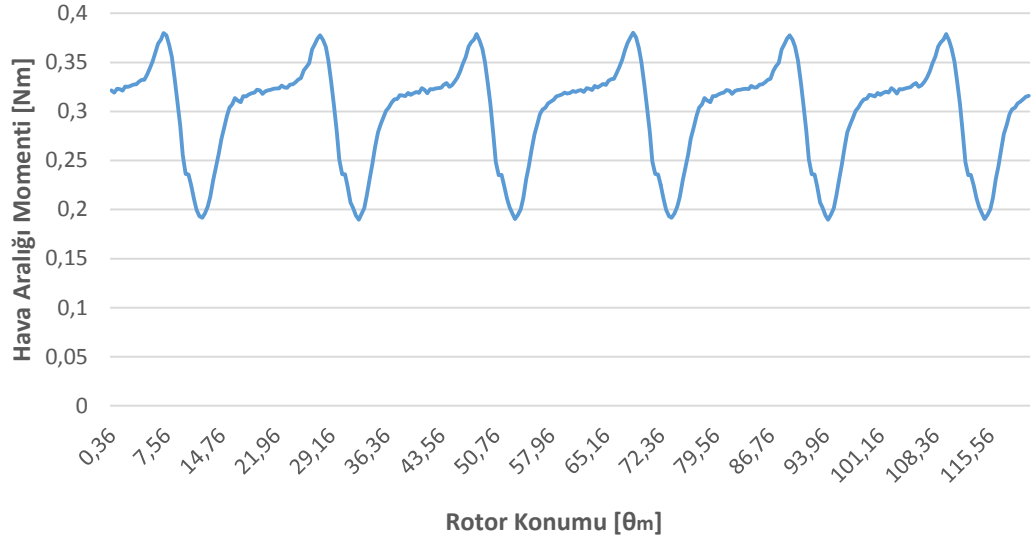
Moment sabitinin birimi [Nm/A]'dir. Maxwell® üzerinde gerçekleştirilen bütün analizlerde hava aralığı momenti hesaplanmıştır.

9/6 oluk/kutup konfigürasyonuna sahip motorun moment analizleri kare dalga akımlar ile sürülerek gerçekleştirilmiştir. Trapezoidal zıt-EMK'ya sahip olan bu motor için anahtarlama zamanları zıt-EMK faz geçişlerinden kontrol edilerek devre modelinde girilmiştir. Bu devre Maxwell Circuit Editor®'de modellenerek Maxwell®'e aktarılmıştır. 3 faz motor için 6 tane anahtar kullanılarak komütasyon zamanları programda girilmiştir. Zıt-EMK faz geçişlerinden akımın pozitif bölge için anahtarlama zamanlarının sırasıyla 10°, 50° ve 90° mekanik açıya karşılık gelen zamanlarda iletme gireceği görülmüştür. Negatif bölge için ise 30°, 70° ve 110° mekanik açıya karşılık gelen zamanlarda iletimde olacağı model üzerinde akım kontrollü anahtarlara girilmiştir. Şekil 3.14'te moment analizi gerçekleştirilmesinde kullanılan devre modelindeki akımların dalga şekilleri yer almıştır. Her fazı süren akımların maksimum değeri 0.43 A olarak verilmiştir. Bu akım değerine karşılık gelen moment değeri 0.3 Nm'yi sağlamaktadır.

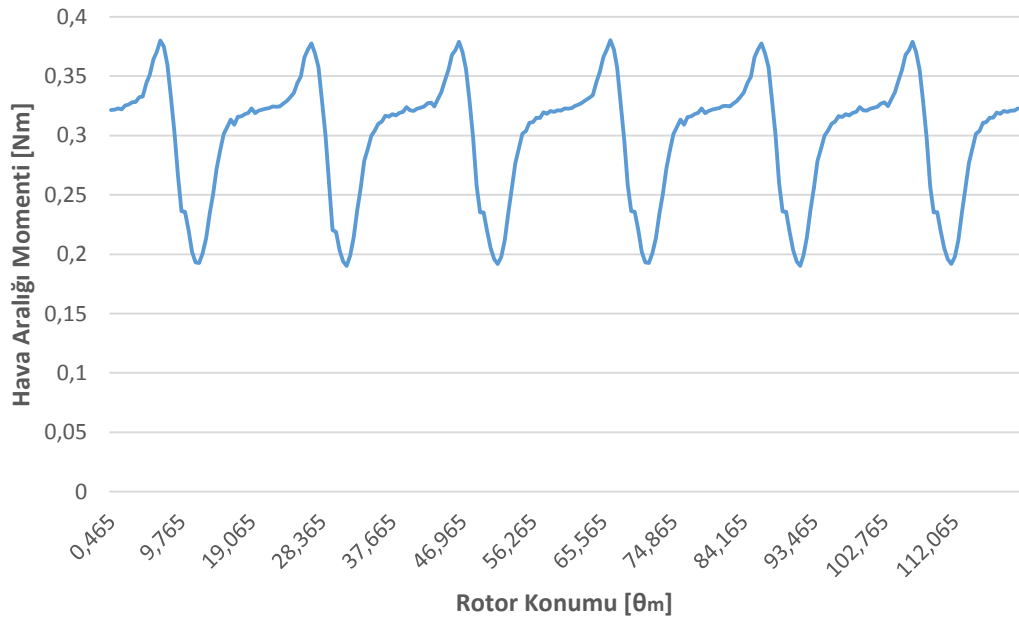


Şekil 3.14 : Kare dalga akımları.

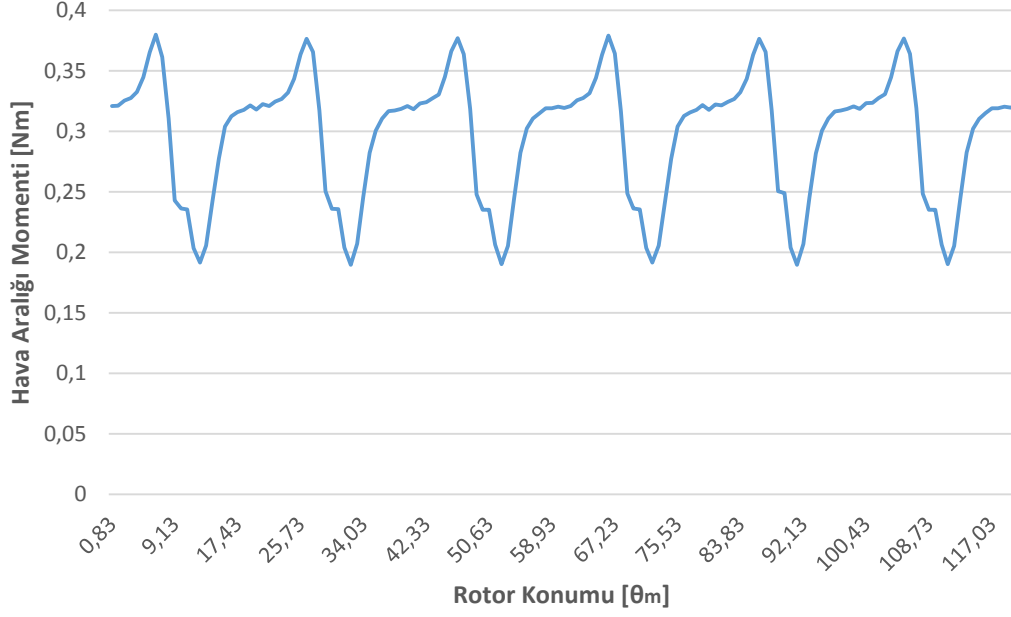
Moment analizleri toplamda dört farklı hız için gerçekleştirilmiştir. 1200, 1600, 3000 ve 4500 d/d hızları için moment dalgalığı ve yüzde vuruğu momenti seviyeleri hesaplanmıştır. Aşağıda yer alan grafiklerde bu hız değerleri için moment grafikleri çizdirilmiştir.



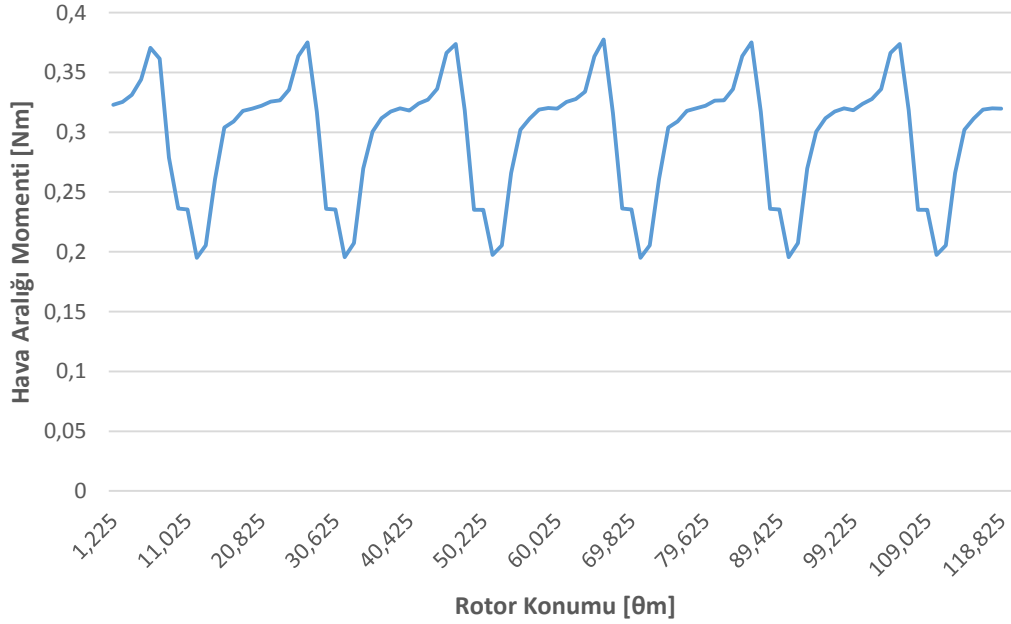
Şekil 3.15 : 1200 d/d için hava aralığı momentini.



Şekil 3.16 : 1600 d/d için hava aralığı momentini.



Şekil 3.17 : 3000 d/d için hava aralığı momenti.



Şekil 3.18 : 4500 d/d için hava aralığı momenti.

Grafiklerden görüldüğü gibi hava aralığı momentinin dalgalılığı çok yüksektir. Moment değerinin dip yaptığı noktalar anahtarların iletimden kesime geçtikleri anda gerçekleşmektedir. Vuruntu momenti seviyesinin yüksek olması moment dalgalılığının yüksek olacağına bir işarettir. Buradan mıknatısların ve olukların düzgün bir şekilde tasarlanmadığı anlamı çıkmaktadır. Moment kalitesi yüksek olan bir motorda titreşimler çok düşük seviyededir. Yüzde olarak moment dalgalılığı denklem (3.13)'te verildiği şekilde hesaplanır.

$$\%T_{dal} = \frac{T_{maks} - T_{min}}{T_{ort}} 100 \quad (3.13)$$

Benzer bir şekilde vurunu momenti yüzdesi denklem (3.14)'te gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\%T_{vurunu} = \frac{T_{vurunu}}{T_{ort}} 100 \quad (3.14)$$

Aşağıda yer alan çizelgede 4 farklı hız durumu için moment karakteristiklerine ilişkin değerler verilmiştir.

Çizelge 3.3 : 9/6 motor için moment değerleri.

Hız [d/d]	1200	1600	3000	4500
T_{ort} [Nm]	0.299	0.300	0.297	0.297
T_{max} [Nm]	0.380	0.380	0.379	0.378
T_{min} [Nm]	0.189	0.190	0.189	0.190
T_{dal} [%]	63.65	63.31	64.00	62.86
T_{vurunu} [%]	29.99	29.89	30.19	30.19

Literatür çalışmalarında iyi bir çıkış momentine sahip motorun vurunu momenti seviyesinin %5-%10 arasında olduğu görüşmüştür. Bu durumda referans olan motorun vurunu momenti seviyesinin çok yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

3.1.4 Referans model 2D kayıp ve verim sonuçları

İncelenen referans motorun demir ve bakır kayıpları Maxwell[®] programında hesaplatılmıştır. Bakır kayıpları hesaplanırken her faz için ayrı ayrı hesap yapılır ve toplamı alınır. Her dört hız için incelenen motorda motoru süren kare dalga akımlarının tepe değeri aynı olduğu için bakır kayıpları hepsi için aynıdır. 9/6 oluk/kutup kombinasyonuna sahip sürekli mıknatıslı motor için bakır kaybı (**p_b**) 7.08 Watt'tır.

Maxwell[®] SEA analiz programında demir kayıpları hesaplaması için ilk olarak manyetik saca ilişkin motorun çalışma frekansındaki watt kayıpları malzeme bilgisi kısmına girilmelidir. Daha sonra demir sacın iletkenliği, laminasyon kalınlığı ve kütle yoğunluğu değerleri malzeme bilgisi ekranında tanımlanır. Demir kayıpları frekans ile doğrudan ilişkili olduğundan 50 Hz çalışma frekansına karşılık gelen watt kayıp değerlerinin doğru bir biçimde girilmesi çok kritik bir konudur. Maxwell[®] demir kayıpları hesaplama prensibi aşağıda yer alan denklemler ile gerçekleştirilmiştir.

$$p_d = p_h + p_c + p_e \quad (3.15)$$

Burada p_h histerezis kayıpları, p_c eddy akımı kayıpları ve p_e ise nüve üzerindeki yüklerin meydana getirdiği sürtünme kayıplarını ifade eder. Bu noktada her bileşen frekans ve manyetik akı yoğunluğuna göre bir katsayıya bağlı olarak değişir. Histerezis kaybı denklem (3.16)'da verildiği şekilde hesaplanır.

$$p_h = k_h f B_g \quad (3.16)$$

Denklem (3.17)'de ise eddy akımı kayıplarının hesaplandığı analitik formül verilmiştir.

$$p_c = k_c f^2 B_g^2 \quad (3.17)$$

Diğer kayıp bileşeni olan p_e ise aşağıda yer aldığı şekilde hesaplanır.

$$p_e = k_e f^{1.5} B_g^{1.5} \quad (3.19)$$

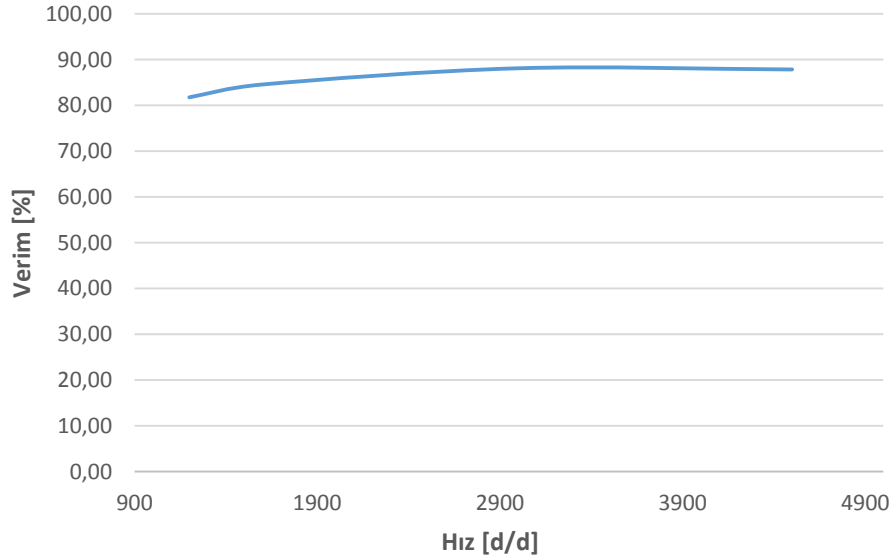
Sac bilgisi sisteme girildiğinde demir kaybı hesaplanması için gerekli olan katsayılar interpolasyon işlemi ile program içinde kendiliğinde otomatik olarak hesaplanmaktadır. Aşağıda yer alan çizelge 3.4'te 9/6 oluk/kutup kombinasyonuna sahip olan referans model için bakır ve demir kayıpları ile birlikte motor verimi hesaplanmıştır. Verim hesaplanırken sürtünme, vantilasyon kayıpları ihmal edilmiştir. Giriş gücü (P_1) ve çıkış gücü olarak alınan hava aralığı gücü (P_2) denklemleri aşağıdaki formül göz önünde bulundurularak verim hesabı gerçekleştirilmiştir.

$$P_1 = P_2 + p_d + p_b \quad (3.20)$$

Çizelge 3.4 : Kayıp ve verim değerleri.

Hız[d/d]	p_b [W]	p_d [W]	T_{ort} [Nm]	P_1 [W]	P_2 [W]	Verim [%]
1200	7.08	1.32	0.3	46.10	37.70	81.78
1600	7.08	2.08	0.3	59.43	50.27	84.59
3000	7.08	5.62	0.3	106.95	94.25	88.13
4500	7.08	12.45	0.3	160.90	141.37	87.86

Hız değişimine göre verim eğrisi şekil 3.19’da çizdirilmiştir.



Şekil 3.19 : 9/6 motor verim-hız eğrisi.

Referans model 9/6 oluk/kutup kombinasyonuna ait motor için 2D tasarım çalışmaları tamamlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde moment titreşimleri ve moment dalgalılığı yüksek, trapezoidal zıt-EMK’ya sahip bir motor olduğu görülmüştür.

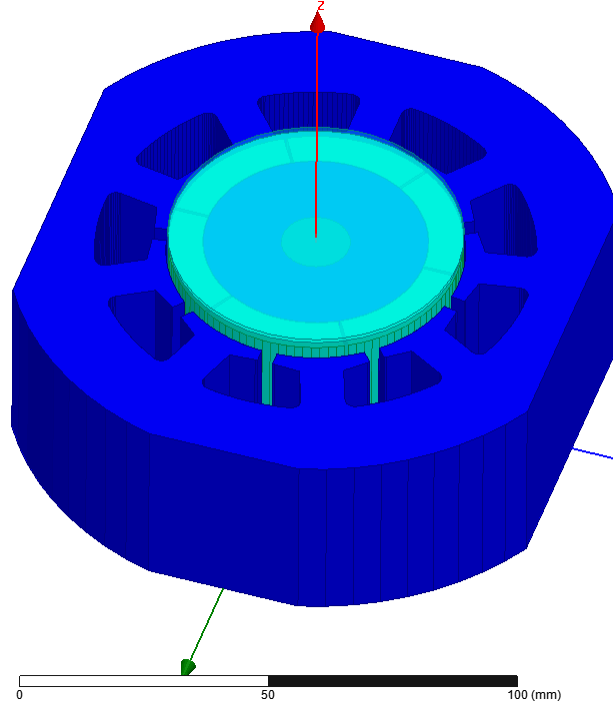
3.2 Referans Modelin 3D Modellenmesi

Referans motor modelinin Maxwell® programında 3D tasarım ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 2D modelde motora ait ve incelenen her bir değer 3D tasarım çalışması için de yapılmıştır.

Referans modelin 3D incelenmek istenmesinin en önemli nedeni rotor ve sürekli mıknatısların stator paket yüksekliğinden 5 mm daha uzun olmasıdır. Mıknatısların uzunluk etkisinin vuru mu momenti, zıt-EMK tepeden tepeye değeri ve momenti ne derece etkilediği çalışma sonucu olarak verilmiştir.

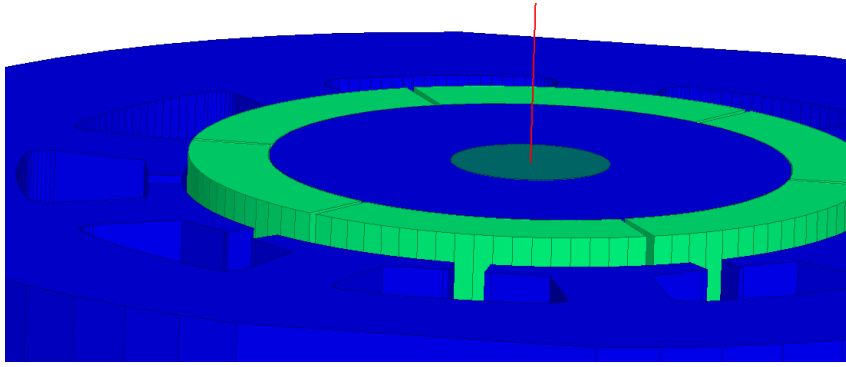
3.2.1 Referans model 3D vuru mu momenti analizi

İlk olarak 2D geometri 3D ortamına aktarılmıştır. 3D ortamında mıknatıs ve rotor paket boy uzunluk farkı stator paket yüksekliğinden alttan ve üstten 2.5 mm olacak şekilde tasarım sağlanmıştır. şekil 3.20’de vuru mu momenti analizi gerçekleştirilmiş olan motorun geometrisi gösterilmiştir.



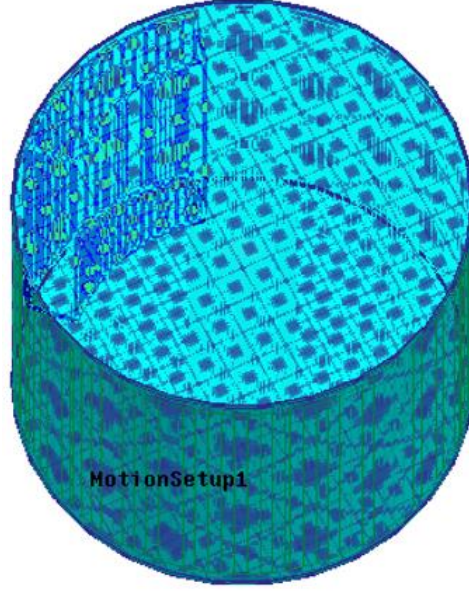
Şekil 3.20 : Referans model 3D modeli.

Geometriden görüldüğü gibi motor sargıları bu analiz çalışması için oluşturulmamıştır. Rotor ve mıknatıslardaki uzunluk etkisinin daha iyi anlayabilmek için şekil 3.21 verilmiştir.



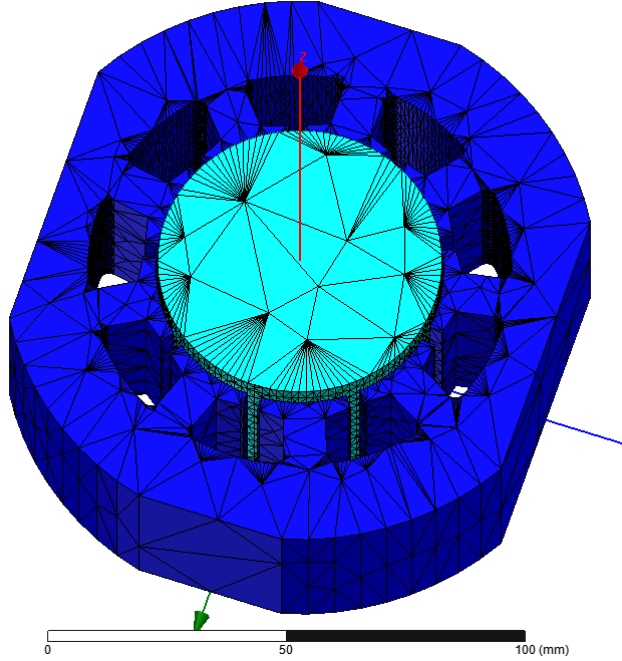
Şekil 3.21 : Rotor ve mıknatıs uzunluk farkı.

Motor geometrisi oluşturulduktan sonra 2D model için yapılan bütün çalışmalar 3D analiz ortamında da gerçekleştirilmiştir. Motor hareketli kısmının tanımlanabilmesi için rotor ve mıknatısları içine alacak bir bölge oluşturulmuştur. Saniyede bir derece dönme hareketi sağlayacak şekilde hareketli kısım tanımlanmıştır ve şekil 3.22’de gösterilmiştir.



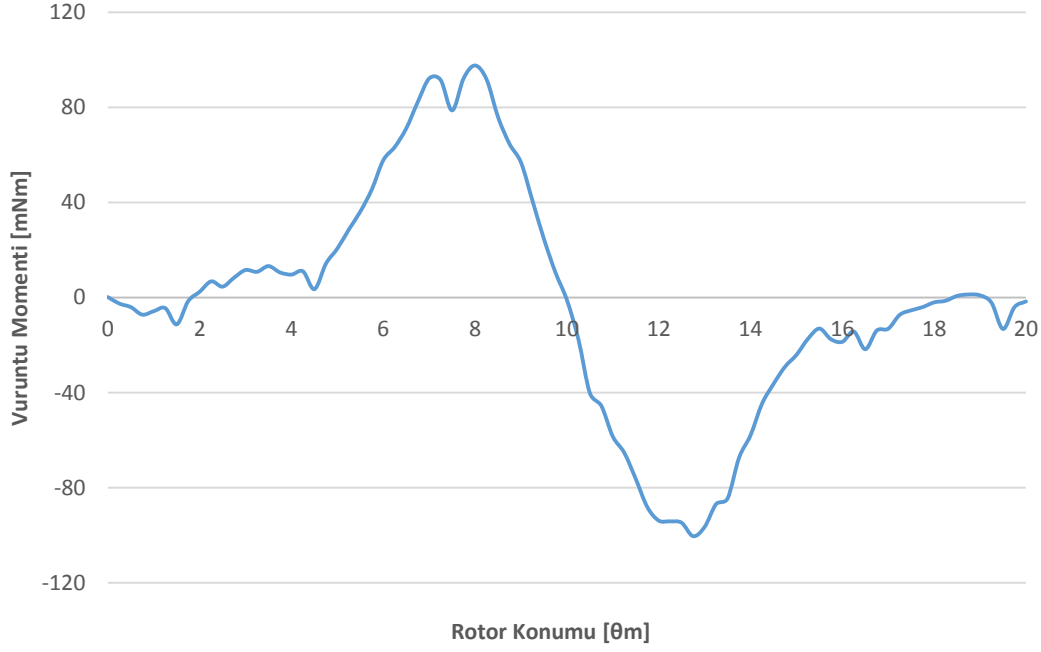
Şekil 3.22 : Döner bölge tanımlama.

Hareketli kısım tanımlandıktan sonra ağ bilgisi özelleştirilmiştir. Hava aralığı bölgesinde ağ sayısı fazla olacak şekilde programa girilmiştir. Şekil 3.23'te motora ilişkin ağ bilgisi gösterilmiştir.



Şekil 3.23 : 3D model ağ haritası.

Tasarım çalışmaları tamamlandıktan sonra analiz gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki grafikte 9/6 motor için 3D vuru mu momenti analizi grafiği çizdirilmiştir.



Şekil 3.24 : 3D referans model vuruñtu momentini grafiği.

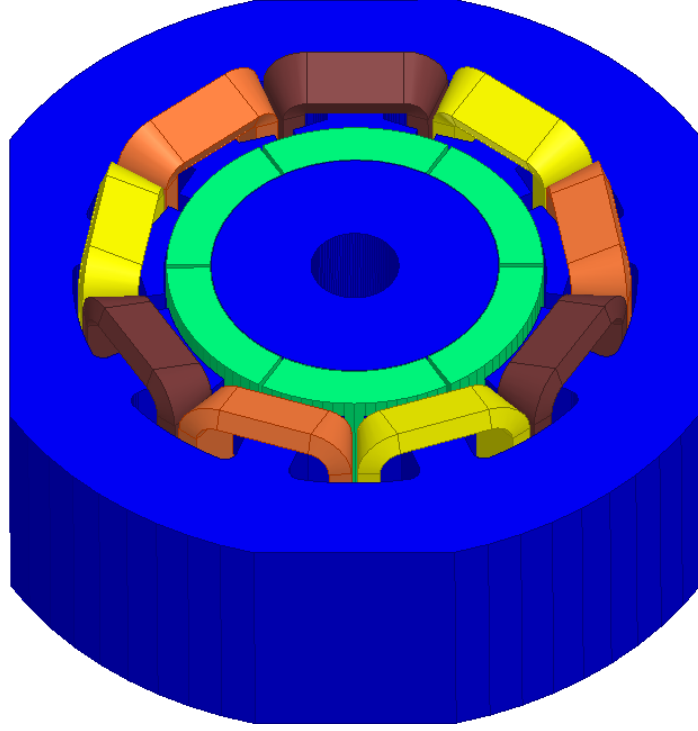
3D analiz sonucunda vuruñtu momentinin maksimum değeri 97.07 mNm olarak bulunmuştur ve çıkış momentine oranı %28.38'dir. 2D analiz sonucu ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir vuruñtu momentini çıkışı olduğu görülmüştür.

3.2.2 Referans model 3D zıt-EMK ve toplam harmonik distorsiyon analizleri

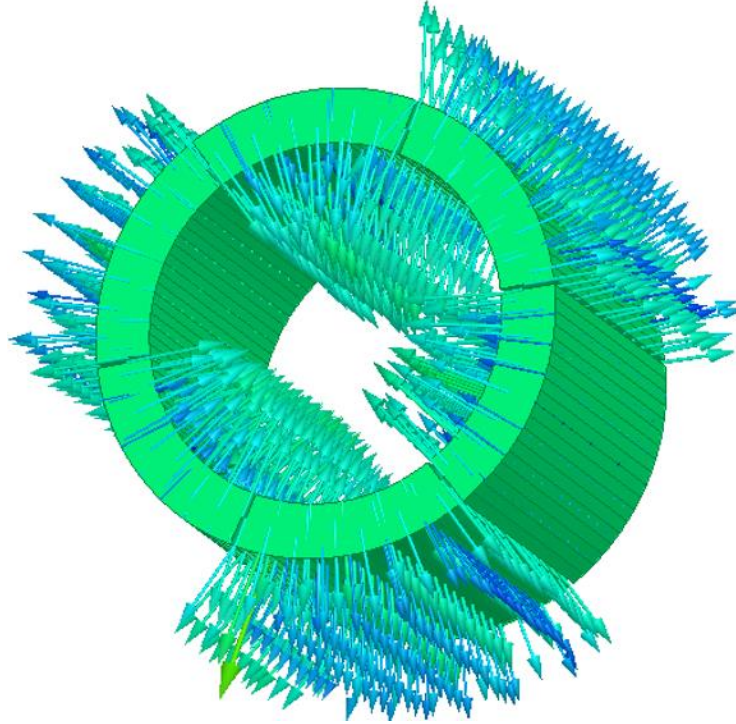
Zıt-EMK analizlerini gerçekleştirmek için vuruñtu momentini analizinde oluşturulan model revize edilmiştir. Çünkü o model üzerinde oluklara yerleştirilen sargılar bulunmamaktadır. Bu analiz gerçekleştirilmeden önce sargı modeli Maxwell® üzerinde oluşturulmuştur. Şekil 3.25'te referans model sargı yapısı gösterilmiştir.

3D zıt-EMK analizi de 2D analizde gerçekleştirildiği Şekilde yapılmıştır. Mıknatlara ait karakteristik değerler dış ortam sıcaklığı baz alınarak programa girilmiştir. Daha sonra üç faza ilişkin sargılar tanımlanıp analiz süresi belirlenerek analiz koşturulmaya hazır hale getirilmiştir.

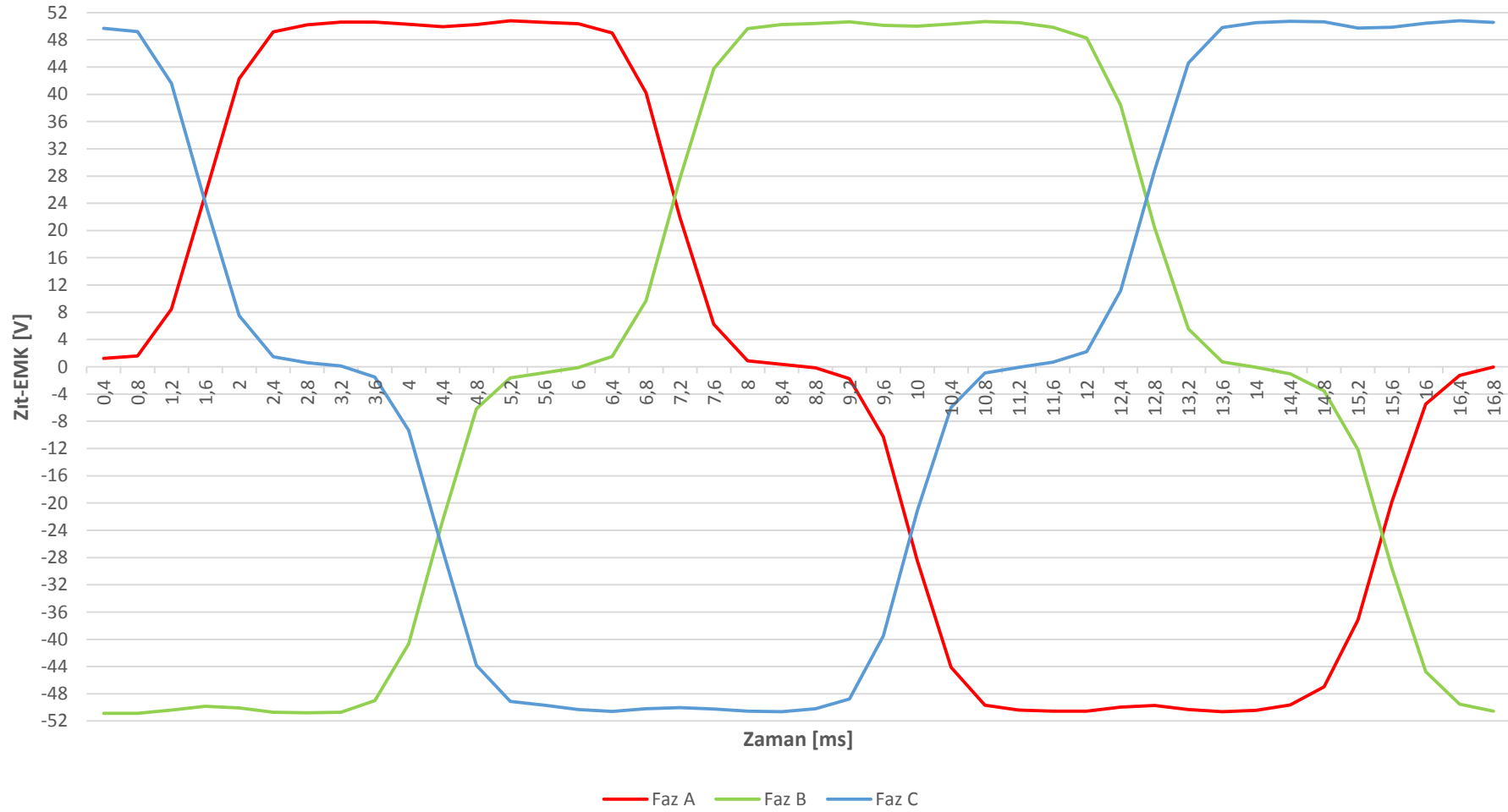
2D modelde olduğu gibi 3D modelde de mıknatıslar radyal olarak mıknatıslanmıştır. Radyal mıknatıslanmaya ilişkin 3D görüntü Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.25 : Referans model 3D sargı şeması.



Şekil 3.26 : Referans model radyal mıknatıslanma.



Şekil 3.27 : 3D referans model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).

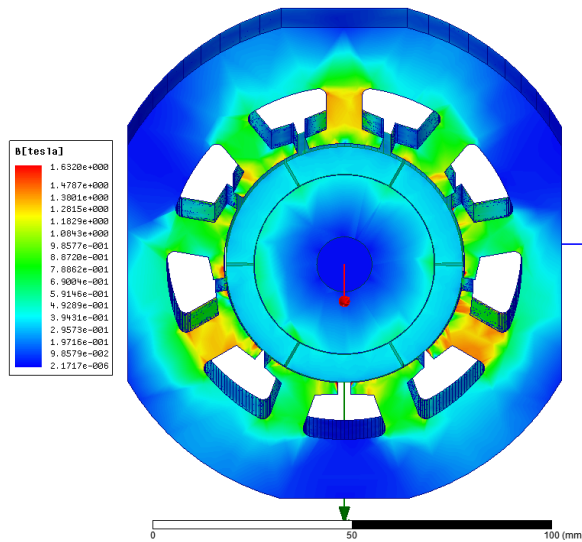
Şekil 3.27’de 3D analiz sonucunda stator sargılarında endüklenen gerilim dalga şekli verilmiştir. Gerilim dalga şekli trapezoidal formundadır ve tepeden tepeye değeri 101.5 V’tur. 2D analiz ile 3D analiz arasında 1.8 V bir fark ortaya çıkmıştır. 2D analiz gerçekleştirilirken bütün motor paket boyu eşit uzunlukta girilebildiği için mıknatısların uzunluk etkisi hesaba katılamamıştır. Aradaki bu fark bundan kaynaklanmaktadır.

Zıt-EMK değerinin tepeden tepeye bulunduktan sonra K_e zıt-EMK katsayısı hesaplanarak farklı hız değerleri için değerler hesaplanmıştır. K_e değeri 0.808 V.s/rad olarak bulunmuştur. Çizelge 3.5’de farklı hızlar için zıt-EMK değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.

Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]	Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]
900	76.07	3000	253.56
1200	101.42	3300	278.91
1500	126.78	3600	304.27
1800	152.13	3900	329.62
2100	177.49	4200	354.98
2400	202.84	4500	380.33
2700	228.20		

Boşta çalışma durumu için akı yoğunluklarına bakıldığında 2D analiz sonuçlarına göre daha yüksek değerler ortaya çıktığı görülmüştür. Özellikle oluk ayağı ve oluk ağzı bölgesinde mıknatıs uzunluğundan kaynaklı akı yoğunluğunun yüksek olması dikkat çekmektedir. Zıt-EMK tepe değerinde meydana gelen çökmeler 3D analizler sonucundan da ortaya çıkmıştır



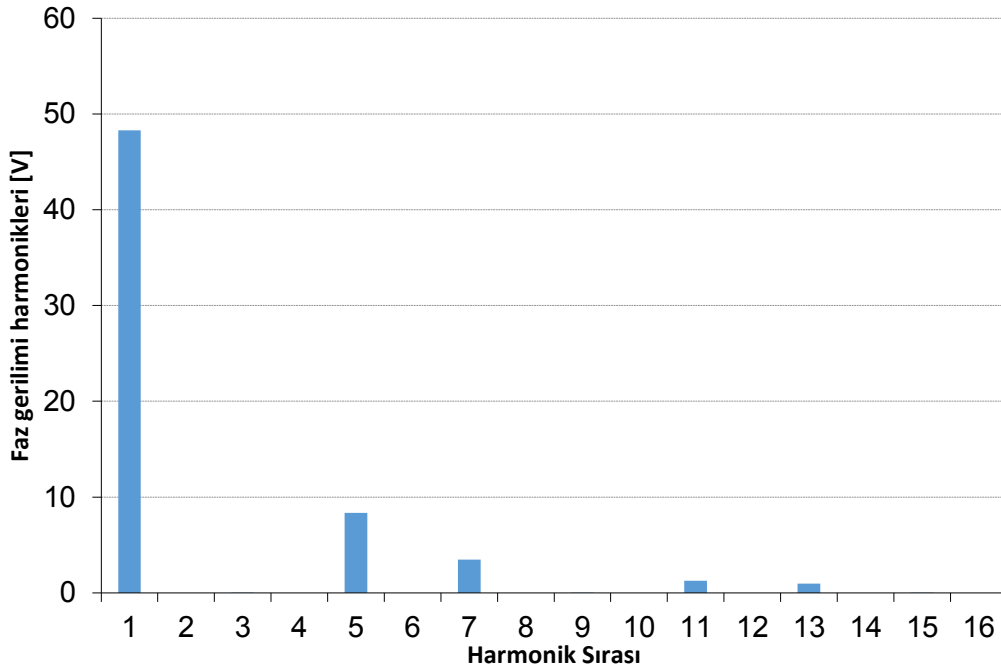
Şekil 3.28 : Boşta çalışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.

3D analizler sonucu stator sargılarında endüklenen gerilim değeri spektrum analizi ile fourier serisine açılarak harmonik bileşenler elde edilmiştir. Toplam harmonik distorsiyon seviyesi % 19.22 olarak hesaplanmıştır. Harmonik bileşen değerleri çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Harmonik bileşenler.

Harmonik Sırası	Faz-Nötr [V]
1	48.303
2	0.000
3	0.032
4	0.000
5	8.362
6	0.000
7	3.464
8	0.000
9	0.002
10	0.000
11	1.283
12	0.000
13	0.953
14	0.000
15	0.007

Şekil 3.29'da ise faz-nötr gerilim harmonikleri sütun grafik olarak verilmiştir.

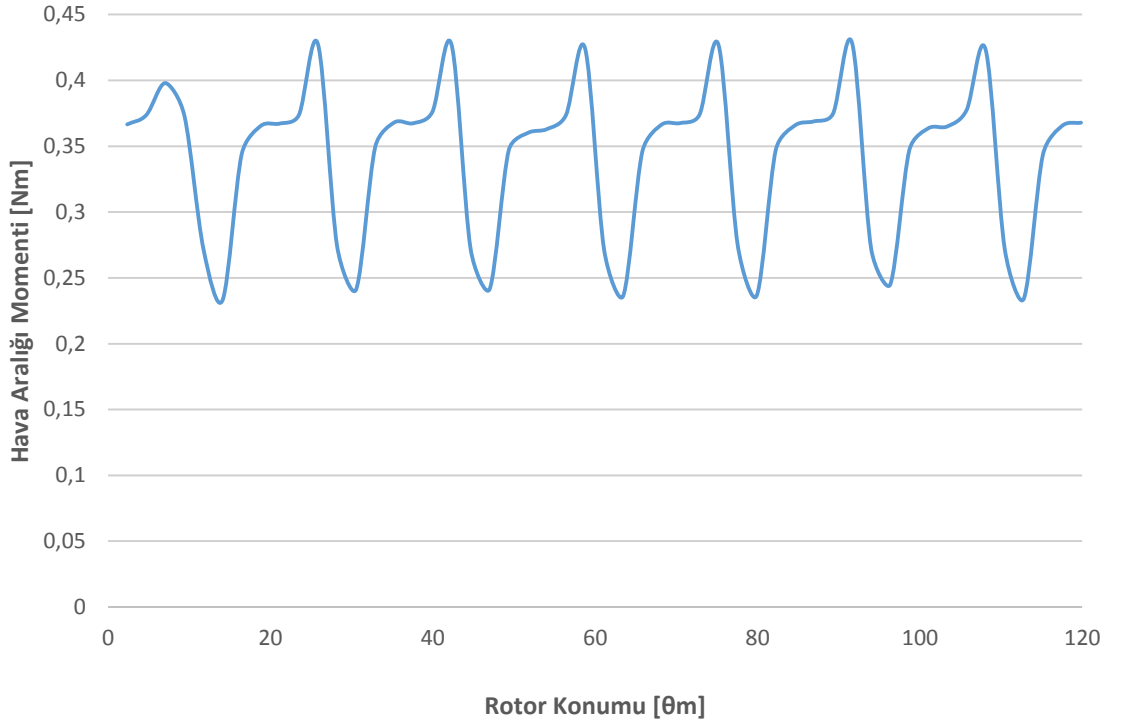


Şekil 3.29 : Faz gerilim harmonik bileşenleri (1200 d/d).

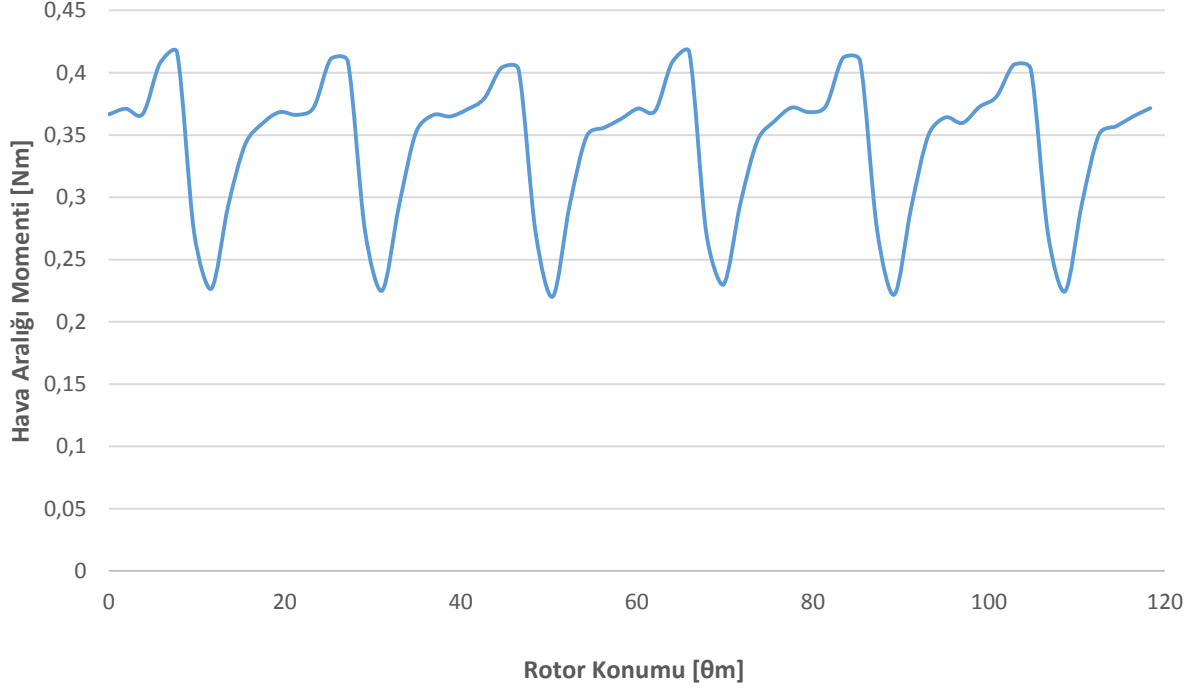
3.2.3 Referans model 3D moment analizleri

9/6 oluk/kutup konfigürasyonuna sahip sürekli mıknatıslı motorun 3D moment analizleri Maxwell[®]’de gerçekleştirilmiştir. 2D ve 3D arasındaki farkın iyi bir şekilde anlaşılması için 3D analizler şekil 3.14’te verilmiş olan tepe değeri 0.43 A olan aynı kare dalga akımlar ile sürülmüştür. 2D analizler sonucunda ortalama 0.3 Nm hava aralığı momentine sahip motorların olduğu ortaya konmuştur. Moment analizlerinde de mıknatıs uzunluk etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için 0.3 Nm’yi sağlayacak akım değeri yerine aynı akım değerine sahip sürücü devre modeli ile analizler koşturulmuştur.

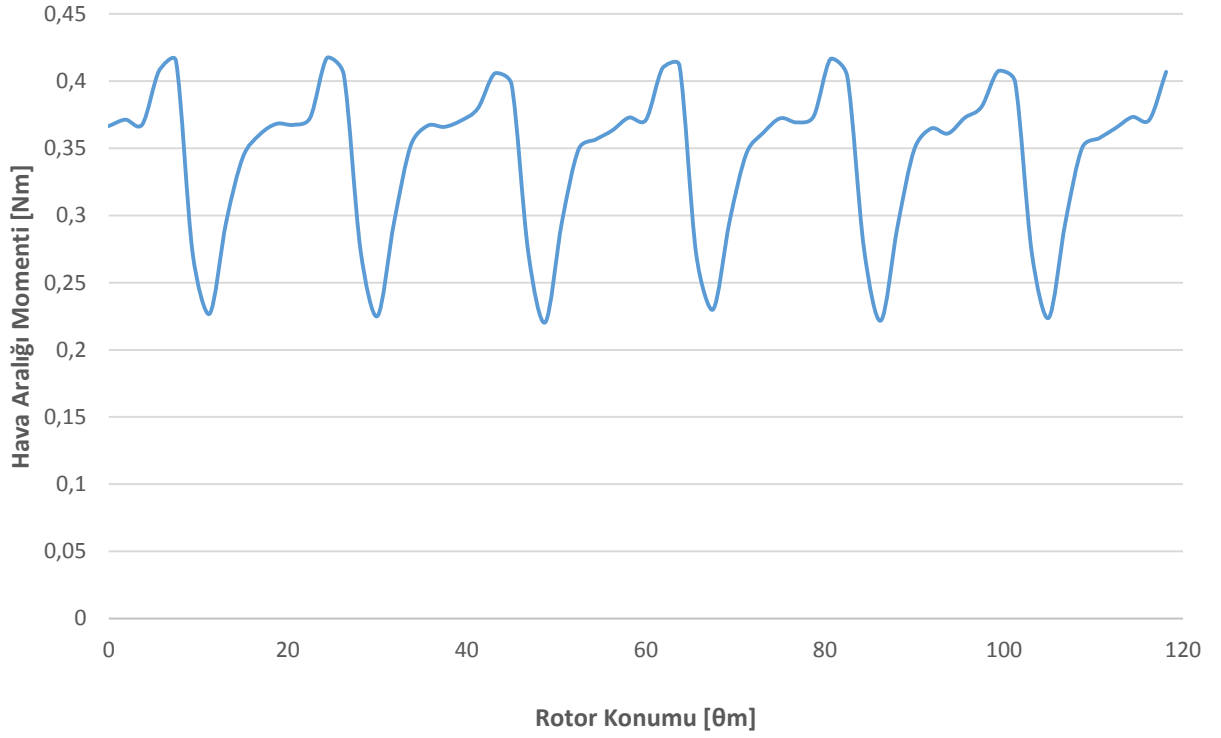
Analizler 1200, 1600, 3000 ve 4500 d/d hızları için gerçekleştirilmiştir. Aşağıda yer alan grafiklerde farklı hızlara sahip motorlar için çıkış momentleri verilmiştir. Analizlerin tamamlanmasının ardından motorlara ilişkin vuru moment seviyesi, moment dalgalılığı gibi değerler hesaplanmıştır. Çizelge 3.7’de moment karakteristiklerine ilişkin değerler verilmiştir.



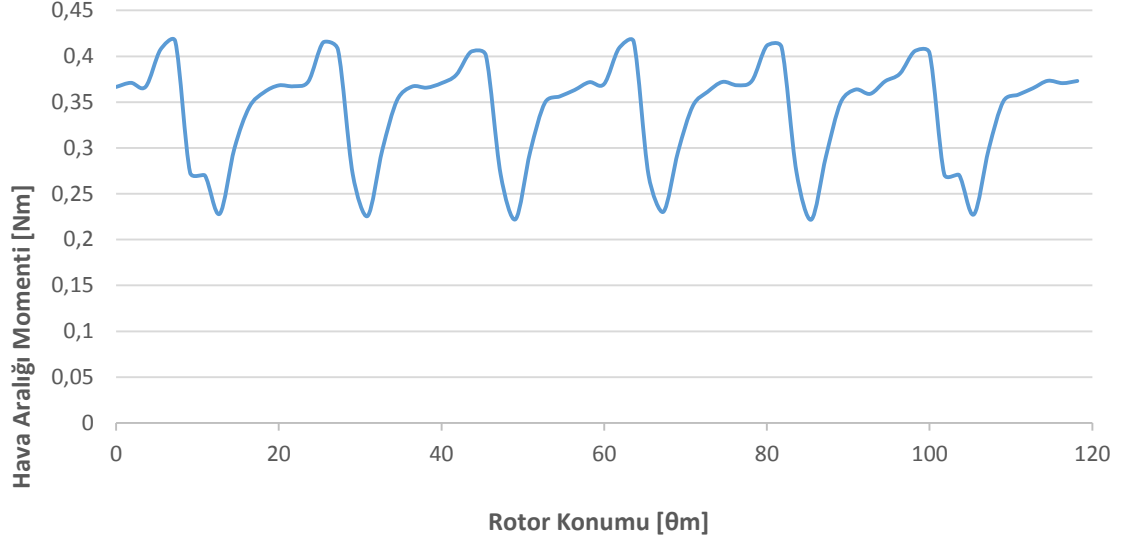
Şekil 3.30 : 1200 d/d hızı için hava aralığı momentini.



Şekil 3.31 : 1600 d/d hızı için hava aralığı momentini.



Şekil 3.32 : 3000 d/d hızı için hava aralığı momentini.



Şekil 3.33 : 4500 d/d hızı için hava aralığı momenti.

Hava aralığı momenti grafiklerinden moment dalgalılığının çok yüksek olduğu görülmektedir. 3D analizler sonucunda 2D analizdeki aynı akım değeri ile sürülen modellerin ortalama moment değerinin daha yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Aşağıda yer alan çizelge 3.7’de motorun dört farklı hızdaki çalışmasına ilişkin moment değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 3.7 : 9/6 motor 3D analiz moment değerleri.

Hız [d/d]	1200	1600	3000	4500
T_{ort} [Nm]	0.342	0.343	0.345	0.342
T_{max} [Nm]	0.423	0.416	0.417	0.416
T_{min} [Nm]	0.233	0.220	0.220	0.222
T_{dal} [%]	57.06	57.01	57.05	56.76
$T_{vuruntu}$ [%]	28.38	28.30	28.13	28.38

Motorun farklı hızlarda daha yüksek moment üretmesinin sebebi rotorda yer alan mıknatısların 2D analizdekine göre 5 mm daha uzun olmasından kaynaklanmaktadır. Zıt-EMK değerinin tepe değerinin yüksek olması da bunu teorik olarak açıklamaktadır. Denklem (3.11) de yer alan moment denkleminde zıt-EMK değerinin artması sonucu üretilecek olan moment değerinin daha yüksek olacağı anlaşılmaktadır.

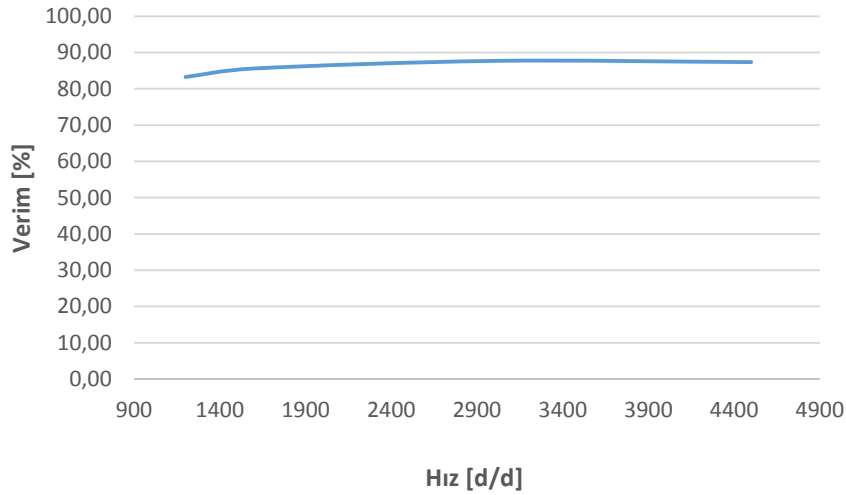
3.2.4 Referans model 3D kayıp ve verim sonuçları

Moment analizleri gerçekleştirildikten sonra 9/6 referans motor için kayıp ve verim hesapları gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.8’de 3D motor analizlerine ilişkin kayıp ve verim değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Kayıp ver verim değerleri.

Hız[d/d]	p_b [W]	p_d [W]	T_{ort} [Nm]	P1 [W]	P2 [W]	Verim [%]
1200	7.08	1.56	0.342	51.62	42.98	83.26
1600	7.08	2.58	0.343	67.13	57.47	85.61
3000	7.08	8.12	0.345	123.58	108.38	87.70
4500	7.08	16.23	0.342	184.47	161.16	87.36

Aşağıda yer alan grafikte hız değişimine göre verim eğrisi çizdirilmiştir.



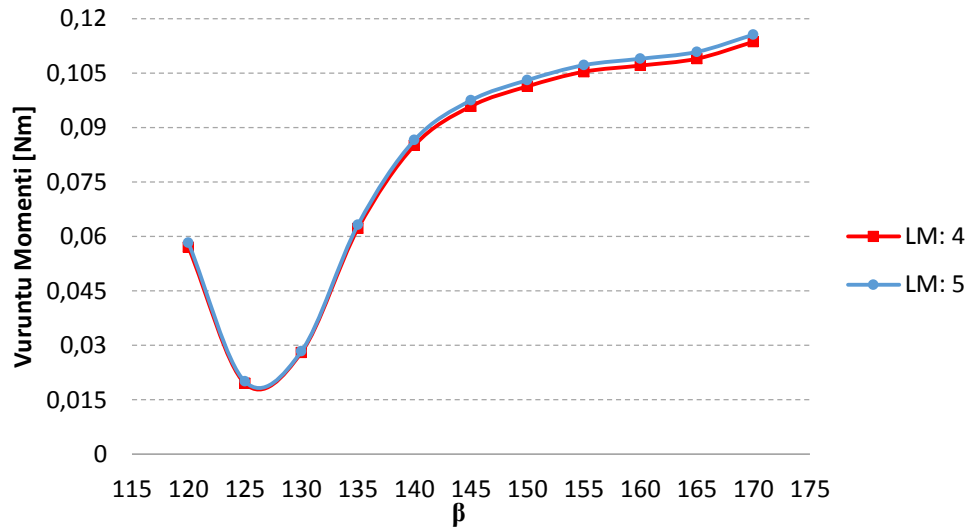
Şekil 3.34 : 9/6 motor hız-verim eğrisi.

Böylelikle 9/6 oluk/kutup kombinasyonuna sahip referans model için 2D ve 3D analizler tamamlanmıştır. Bu motorun trapezoidal bir zıt-EMK'ya sahip olduğu analizler sonucunda anlaşılmıştır. 3D analizler sonucunda mıknatısların uzunluk etkisinin sonuçları ortaya çıkartılmıştır. Özellikle motorun düşük hızlarda verim seviyesinin çok iyi olmadığı görülmüştür. Moment kalitesi açısından da bu motorun iyi bir tasarım olmadığı anlaşılmıştır.

4. ALTERNATİF MOTOR MODELİ

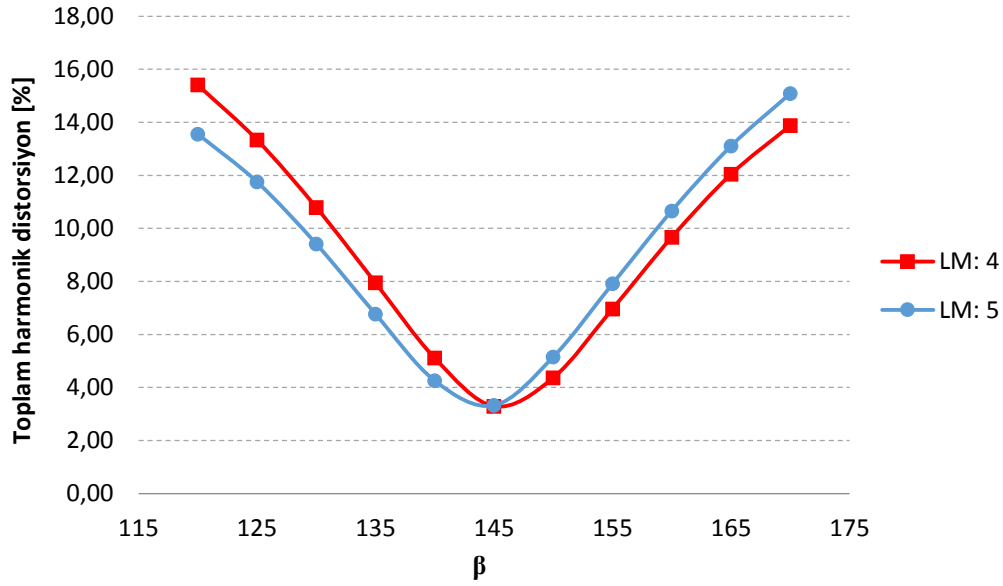
Bu bölümde 12/8 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motorun tasarım ve analiz çalışmaları yürütülmüştür. Ön tasarım çalışmaları sonucunda belirlenen motor geometrisi üzerinde yapılan parametrik çalışmalar ile SMSM tasarım son halini almıştır. Motor boyutlarının ve geometrisinin hazır hale gelmesinden sonra referans motor modelinde gerçekleştirilen bütün aşamalar alternatif motor için de 2D ve 3D olarak tamamlanmıştır.

Motor ön tasarımdan yola çıkılarak başlanan tasarım çalışmalarında iki önemli kriter parametrik olarak SEA ile detaylı bir biçimde incelenmiştir. Mıknatıs yay açısı (β) ve mıknatıs kalınlığındaki (LM) değişime göre motor karakteristiklerinde meydana gelen değişim ve etkiler incelenmiştir. Ön tasarım çalışması sonucu mıknatıs yay açısı 144^0 olarak belirlenmiştir. Yapılan parametrik çalışmalar ile bu değer 120^0 ile 170^0 arası için ele alınmıştır. Mıknatıs kalınlığı ise ön tasarımda 4 mm olarak belirlenmiş, parametrik çalışmalarda 4 mm ve 5 mm olarak incelenmiştir. Üretim toleranslarından dolayı 4 mm'den daha ince bir yapıyla gidilmemesi kararına varılmıştır, bu yüzden 4 mm'den daha küçük değerler ele alınmamıştır. Aşağıda yer alan şekil 4.1'de mıknatıs kalınlığı ve mıknatıs yay açısı değişimine göre motorun sahip olduğu vuruş momenti seviyesinde meydana gelen değişim çizdirilmiştir.



Şekil 4.1 : Mıknatıs yay açısı ve kalınlığı için vuruş momenti değişimi.

Grafikten görüldüğü gibi incelenen mıknatıs kalınlıklarında vuru mu momenti seviyesi açısından bir fark meydana gelmemiştir. Bu yüzden daha ince olan 4 mm kalınlığı seçmek mıknatıs maliyeti açısından avantaj sağlayacak durumdadır. Mıknatıs yay açısı değişiminde ise en iyi noktanın 125^0 olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak sadece vuru mu momenti seviyesindeki en optimum nokta seçim konusunda yeterli olmamıştır. Aşağıda yer alan şekil 4.2’de toplam harmonik distorsiyon seviyesi iki farklı durum için incelenmiştir.

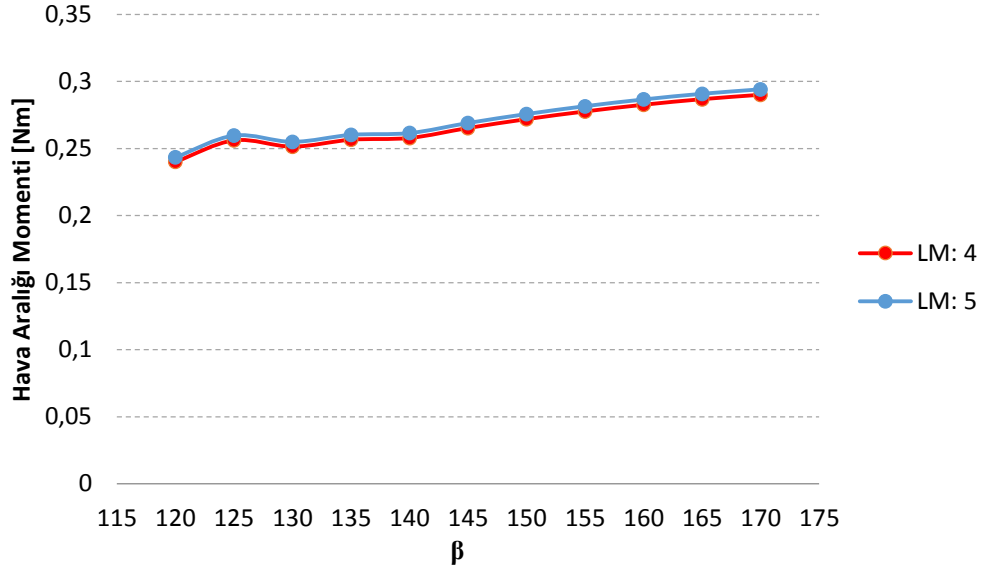


Şekil 4.2 : Mıknatıs yay açısı ve kalınlığı için THD değişimi.

Yukarıdaki grafikten görüldüğü gibi mıknatıs yay açısı değişimi boyunca harmonik bozunum seviyesi 5 mm kalınlığa sahip mıknatıslı motor için daha optimum bir çözüm gibi görülmektedir. Ancak mıknatıs yay açısının 145^0 olduğu durumda her iki kalınlıktaki mıknatıs için gerilim harmoniklerinin seviyesi en düşük ve en optimum durumdadır. Bu yüzden 4 mm kalınlık ve 145^0 ’lik yay açısı sistemin en optimum çözümü olarak görülmektedir. %3-4 seviyelerinde toplam harmonik distorsiyon literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi kabul edilebilir iyi bir değerdir.

En son olarak ise mıknatıs yay açısı ve kalınlık değişimi için hava aralığı momenti durumu incelenmiştir. Şekil 4.3’te bu değişime ilişkin grafik verilmiştir. Tasarımdan beklenen 0.3 Nm hava aralığı moment değeridir. Grafikten görüldüğü gibi bu seviye en yüksek mıknatıs açısı durumu için elde edilebilmiştir. Ancak yüksek mıknatıs yay açısı durumu hem vuru mu momenti seviyesi hem de toplam harmonik distorsiyon seviyesi açısından en kötü senaryo durumundadır. Bu yüzden bu seçimin sağlanması

moment dalgalılığı yüksek bir motor tasarımına sebebiyet verecek düzeydedir. Mıknatıs kalınlık değişiminin ise ortalama moment seviyesine etkisinin çok fazla olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.3 : Mıknatıs yay açısı ve kalınlığı için moment değişimi.

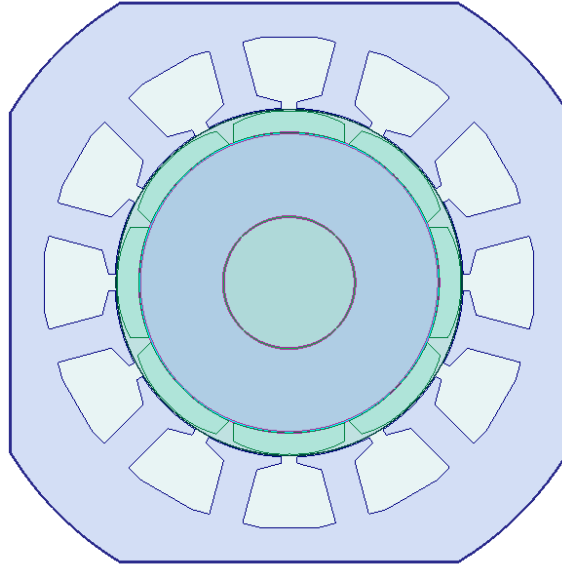
Yapılan parametrik çalışmaların ardından bütün kriterler göz önünde bulundurulduğunda sistemin en optimum durumu 4 mm mıknatıs kalınlığı ve 145^0 mıknatıs yay açısı içindir.

Sonuç olarak paket boyu 28 mm, stator dış çapı 106 mm, mil çapı 25 mm ve rotorda bulunan mıknatıslarının boyutları parametrik çalışmalar sonucu elde edilmiş motor tasarımı için zemin hazırlanmıştır. Stator olukları üretim ve sargı makinası kaynaklı belirli kısıtlamalardan dolayı çok fazla değişikliğe uğramamıştır. Bir oluktan bir oluğa mesafesi 93 mm, oluk ağzı açıklığı 3 mm ve oluk dış kalınlığı 6.3 mm olarak belirlenmiştir. Bu değerler belirlenirken oluk doluluk oranı ve sarım sayısı değeri göz önünde bulundurulmuştur. Rotorda yer alan mıknatıslar stator paket boyundan 4 mm daha uzundur. Bu durum referans modelde olduğu gibi 3D analiz sonuçları ile daha iyi yorumlanmış ve 2D analizler ile karşılaştırması yapılmıştır. Özellikle zıt-EMK analizlerinde bu farkın etkisi iyi biçimde görülmüştür.

4.1 Alternatif Modelin 2D Modellenmesi

Motor geometrisi Maxwell® üzerinde oluşturulduktan sonra 12/8 oluk/kutup konfigürasyonuna sahip motor için analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak

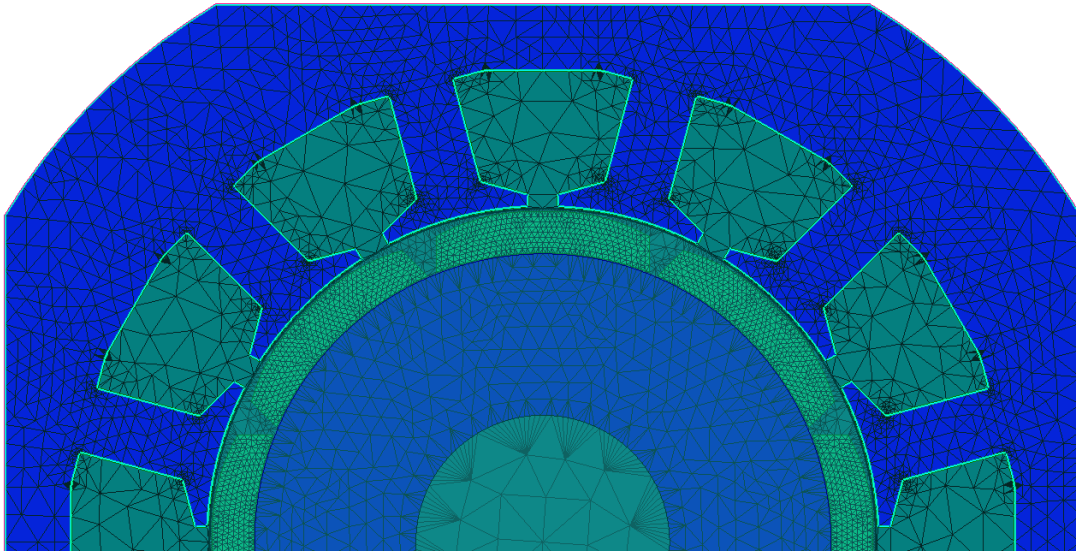
motor geometrisi için sınır koşullar tayin edilmiştir. Aşağıda yer alan şekil 4.4'te 12/8 SMSM için sınır koşulları görülmektedir.



Şekil 4.4 : 12/8 SMSM'a ilişkin sınır koşulları.

Stator dış kısımlarında koyu mavi renk olarak seçili bölge Dirichlet sınır koşulları göz önünde bulundurularak sınırdaki vektör potansiyel değeri sıfır olacak şekilde tayin edilmiştir.

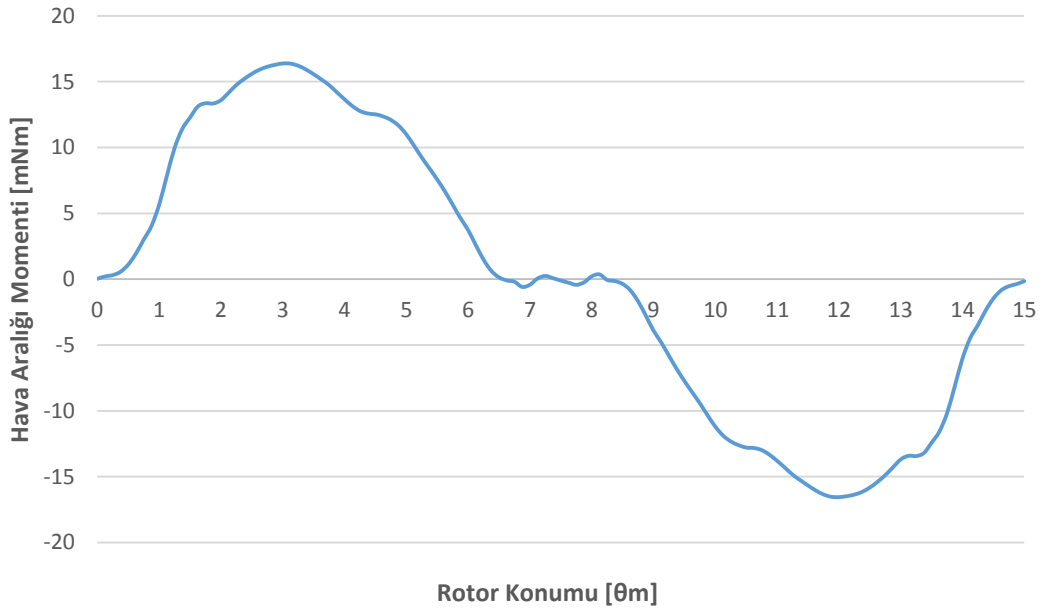
Bir sonraki aşamada ise motora ilişkin ağ bilgisinin özelleştirilmesi olmuştur. Hava aralığında yer alan düğüm noktalarının sayısı özel olarak tanımlanmış ve sayısı arttırılmıştır. Böylece daha kesin ve doğru çözüm elde edilebilmesi anlamında bir tanımlama sağlanmıştır.



Şekil 4.5 : 12/8 SMSM ağ haritası.

4.1.1 Alternatif model 2D vuruntu momenti analizi

Modeli oluşturulan 12/8 SMSM'un stator oluklarına sargılar yerleştirilmemiştir. Çünkü bu analiz gerçekleştirilirken sargılara akım verilmez, motor mili saniyede bir derece hassas bir şekilde döndürülerek torkmetre sistemi üzerinden ölçüm alınır. Analiz gerçekleştirilirken de oluk/kutup kombinasyonuna göre analiz süresi belirlenir. Vuruntu momentinin bir periyodunu kaç derecede tamamlayacağı denklem (3.3)'de ifade edildiği şekilde oluk ve kutup sayısının en küçük ortak katının bulunması şeklinde gerçekleştirilir. 12 oluk ve 8 kutuplu motor için EKOK değeri 24'tür. 360^0 boyunca her 24 mekanik açı 15 kez gerçekleşir. Bu yüzden bu analiz için 15^0 'lık bir değer yeterli olmuştur. Analiz için motorun hareketli bölgesi tanımlanmıştır. Aşağıda yer alan şekil 4.6'da alternatif modele ilişkin vuruntu momenti grafiği verilmiştir.



Şekil 4.6 : 2D alternatif model için vuruntu momenti analizi.

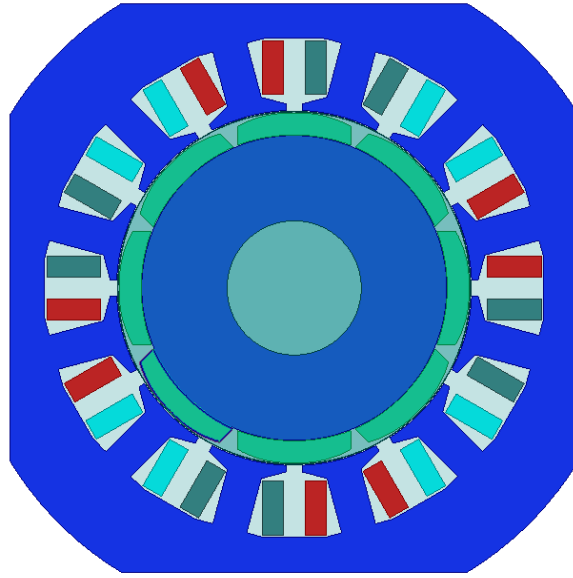
Grafikten görüldüğü gibi 12/8 SMSM için vuruntu momentinin maksimum değeri 16.4 mNm'dir ve çıkış momentine göre oranı yüzde 1200 d/d için %5.33 olarak hesaplanmıştır.

4.1.2 Alternatif model 2D zıt-EMK ve harmonik bozunum analizleri

Vuruntu momenti analizinden sonra alternatif modele ilişkin zıt-EMK ve harmonik bozunum analizleri gerçekleştirilmiştir. Motor tasarım kriterlerindeki en büyük hedef sinüzoidal gerilim dalga şekline sahip bir motor tasarım sürecini gerçekleştirmektir. Motor ön tasarım sürecinde yapılan statik analizler sonucunda motor zıt-EMK dalga

şeklinin sinüs-trap arası olduğu görülmüştür. Bu noktada yapılmış olan en önemli çalışma mıknatıslarda yapılan şekil değişikliği olmuştur. Endüklenen gerilimin dalga şeklinde meydana getirilen değişiklik literatür çalışmalarında da çok fazla çalışmada görülmüştür.

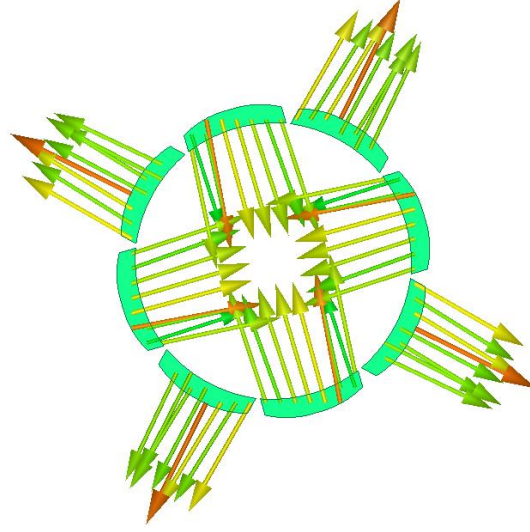
Analiz koşturulmadan önce SMSM'a ilişkin sargılar oluşturulmuş ve fazlar sırasıyla sargılara atanmıştır. Faz-nötr direnci 9.7 ohm ve faz-nötr endüktans değeri 0.86 mH'dir. Motorun sargı şeması ve yapısı şekil 2.5'te verilmiştir. Her bir oluk için sarım sayısı 150'dir ve tel çapı 0.55 mm'dir. Aşağıda yer alan şekil 4.7'de SMSM'a ilişkin Maxwell® modelindeki motor ve sargı yapısı verilmiştir.



Şekil 4.7 : 12/8 motor sargı modeli.

Motor analizi 1200 d/d hızı için soğuk ortam durumu için koşturulmuştur. Bu durum için mıknatısların 20⁰ ortam sıcaklığına karşılık gelecek kalıcı remanans ve koerzif alan şiddeti değeri girilmiştir. Mıknatıslar paralel olarak şoklanmıştır ve analiz ortamında her bir mıknatıs için ayrı ayrı koordinat sistemi tanımlanarak yönlendirmeleri sağlanmıştır. Şekil 4.8'de SMSM motor için mıknatıslanma yönleri gösterilmiştir.

Motor analiz süresi rotorun bir elektriksel periyodu tamamlayacağı süre hesaplanarak analiz ayarlarına girilmiştir. 12/8 oluk/kutup konfigürasyonu için bir kutup çiftinin bir mekanik periyodu tamamlaması için gerekli olan açı değeri 90⁰'dir. 1200 d/d için bir 360⁰ elektriksel açığı tamamlaması için gerekli süre 50 ms'dir. 90⁰'lik periyot ise 12.5 ms'de tamamlanmaktadır.

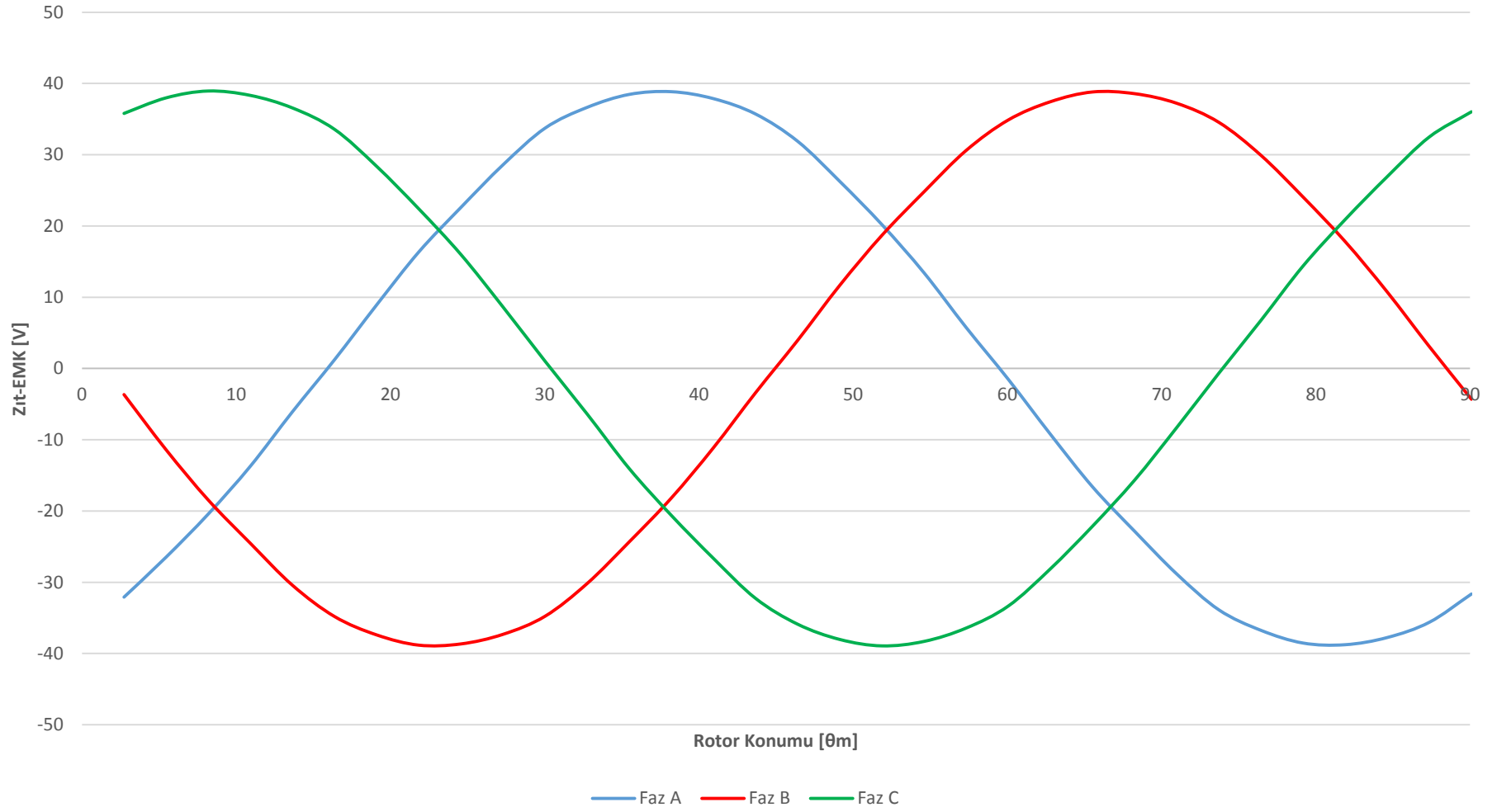


Şekil 4.8 : 12/8 motor paralel mıknatıslanma.

Gerekli olan bütün aşamalar tamamlandıktan sonra motor analizi koşturulmuştur. Analizler sonucunda stator sargılarında endüklenen gerilimin dalga şeklinin sinüs formuna son derece yakın olduğu görülmüştür. Zıt-EMK değerinin tepeden tepeye değeri 77.6 V olarak bulunmuştur. Şekil 4.9’da zıt-EMK dalga şekline ilişkin grafik çizdirilmiştir. Tepeden tepeye değeri bulunan alternatif motor için ilk önce zıt-EMK katsayısı hesaplanarak farklı hızlar için sargılarında endükleneceği gerilim değerleri hesaplanmıştır. K_e sabiti 0.617 V.s/rad bulunmuştur.

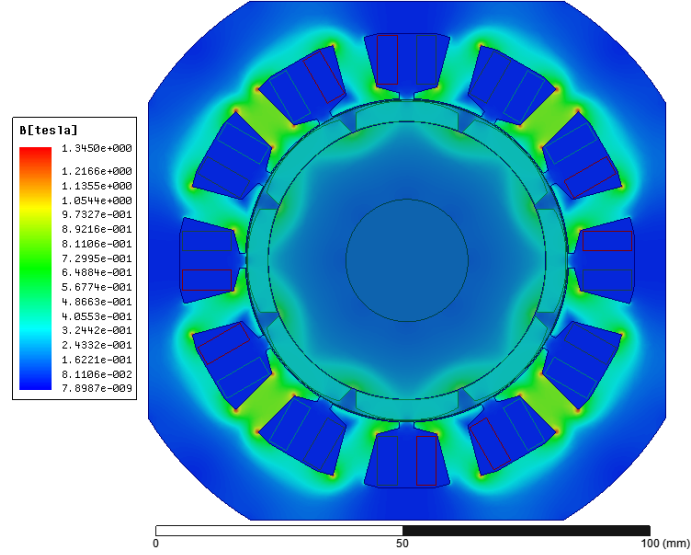
Çizelge 4.1 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.

Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]	Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]
900	58.17	3000	193.90
1200	77.56	3300	213.29
1500	96.95	3600	232.68
1800	116.34	3900	252.07
2100	135.73	4200	271.46
2400	155.12	4500	290.85
2700	174.51		

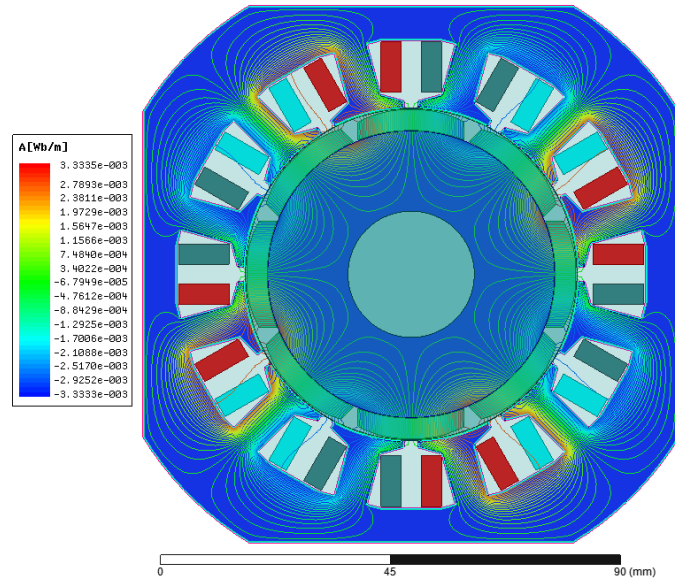


Şekil 4.9 : 2D alternatif model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).

Boşta çalışma durumu için sac laminasyonlarındaki manyetik akı yoğunluklarına analiz sonunda bakılmıştır. Aşağıda yer alan şekillerde akı yoğunluğu ve akı çizgileri verilmiştir.



Şekil 4.10 : Boşta çalışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.



Şekil 4.11 : Boşta çalışma 1200 d/d için manyetik akı çizgileri.

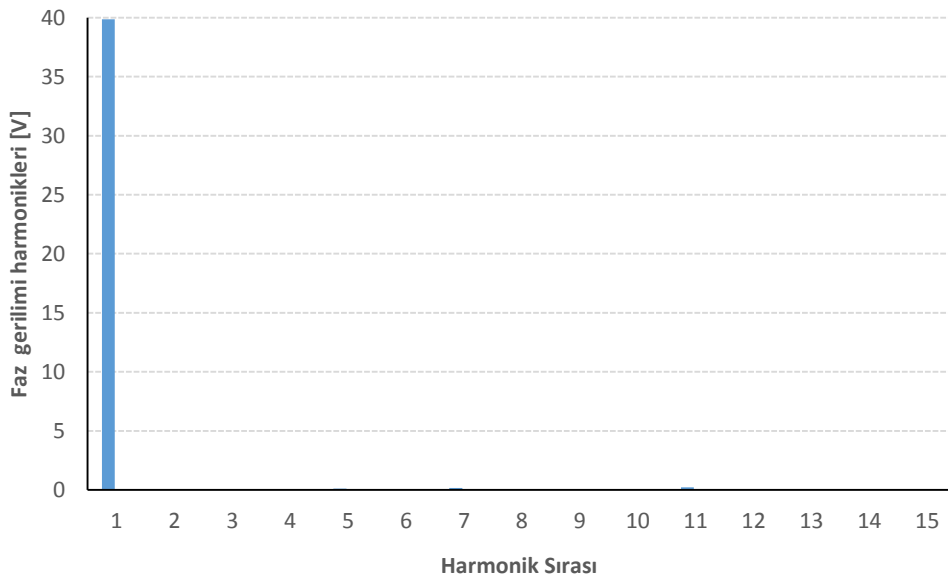
Boşta çalışma durumu için laminasyonlara bakıldığında manyetik doyuma gidilen bir bölge olmadığı anlaşılmaktadır. Mıknatıs akısının verimli bir şekilde kullanıldığı, mıknatıs akısının kısa devre olduğu bölgenin çok küçük bir alan olduğu görülmektedir. Zıt-EMK analizleri tamamlandıktan sonra gerilim harmonikleri incelenmiştir. Zıt-EMK grafiğinden görüldüğü gibi stator sargılarında endüklenen gerilim dalga şekli

sinüs formuna oldukça yakındır. Toplam harmonik gerilim seviyesinin buna bağlı olarak düşük çıkması beklenen bir sonuçtur. Aşağıda yer alan çizelge 4.2’de faz-nötr gerilim harmonik bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Harmonik bileşenler.

Harmonik Sırası	Faz-Nötr [V]
1	39.864
2	0.000
3	0.035
4	0.000
5	0.117
6	0.000
7	0.169
8	0.000
9	0.017
10	0.000
11	0.214
12	0.000
13	0.068
14	0.000
15	0.003

Denklem (3.9)’da yer alan formüle göre 12/8 oluk/kutup konfigürasyonuna sahip SMSM için toplam harmonik distorsiyon seviyesi %0,77’dir. Aşağıda yer alan şekil 4.12’de harmonik bileşenlerin sütun grafiği verilmiştir.



Şekil 4.12 : Faz gerilim harmonik bileşenleri (1200 d/d).

4.1.3 Alternatif model 2D moment analizleri

Zıt-EMK analizleri tamamlandıktan sonra 12/8 SMSM için dört farklı hız durumunda moment analizleri gerçekleştirilmiştir. Sinüzoidal bir dalga şekline sahip olan bu motor sinüs akımı verilerek sürülmüştür. Sürücü devre modeli Maxwell Circuit Editor® de oluşturularak Maxwell® e aktarılmıştır. Her bir faz için bir sinüzoidal akım kaynağı tanımlanarak sargılar beslenmiştir. Sinüzoidal akım kaynağı aşağıda yer alan şekilde Maxwell Circuit Editor® de ifade edilmektedir.

$$I_{(t)} = I_{max} \sin[2\pi I_{frek} t - \gamma] \quad (4.1)$$

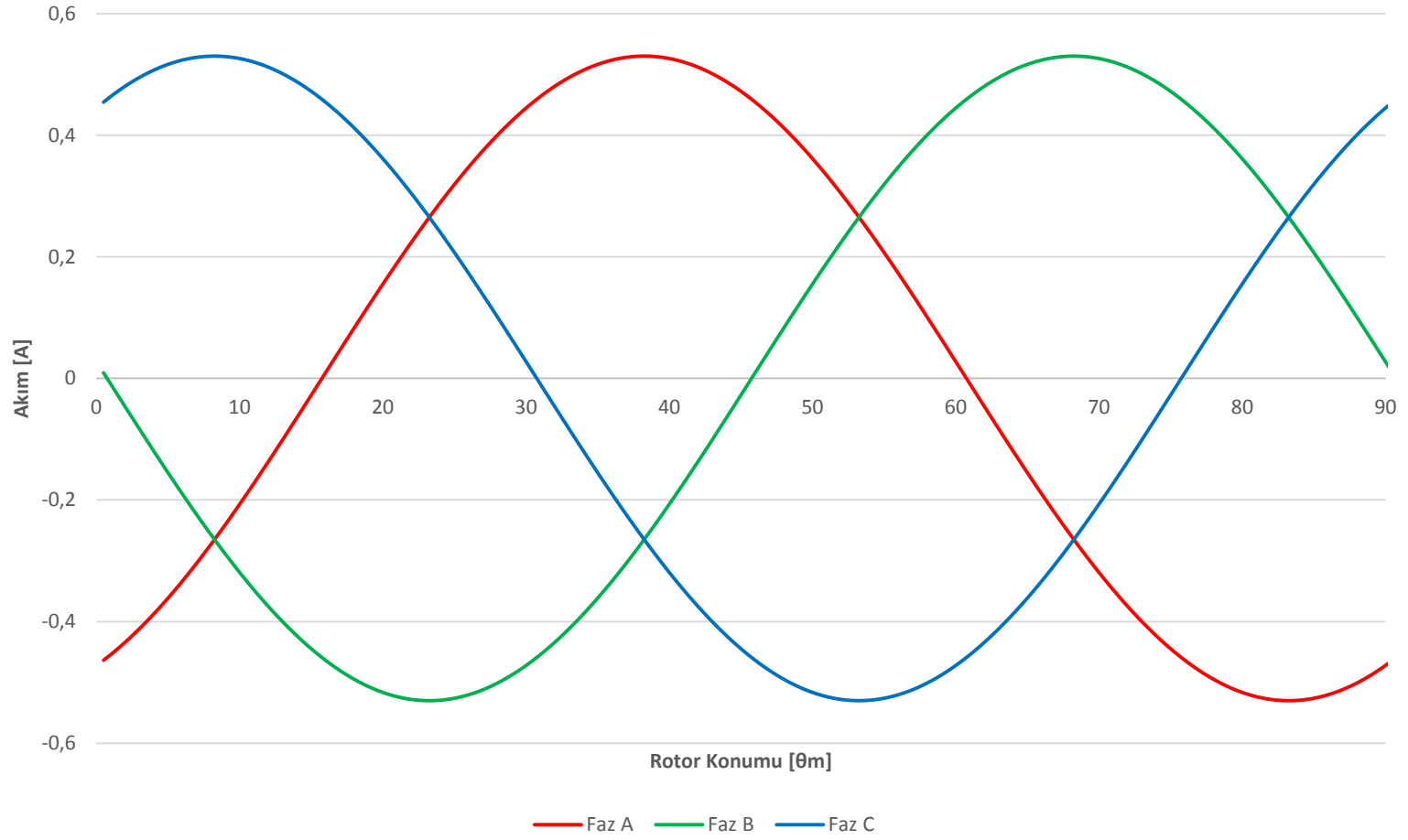
Burada I_{max} verilen sinüs akımının tepe değerini ifade eder. I_{frek} ise motor hangi hızda çalışıyorsa o hıza ilişkin açısal frekans değeridir. Denklem (4.2)'de yer aldığı şekilde hesaplanır.

$$I_{frek} = \frac{N_p n}{120} \quad (4.2)$$

Burada n motorun d/d cinsinden çalışma hızıdır. N_p ise kutup sayısıdır. Örnek olarak 1200 d/d çalışma için bu değer 80 Hz'dir.

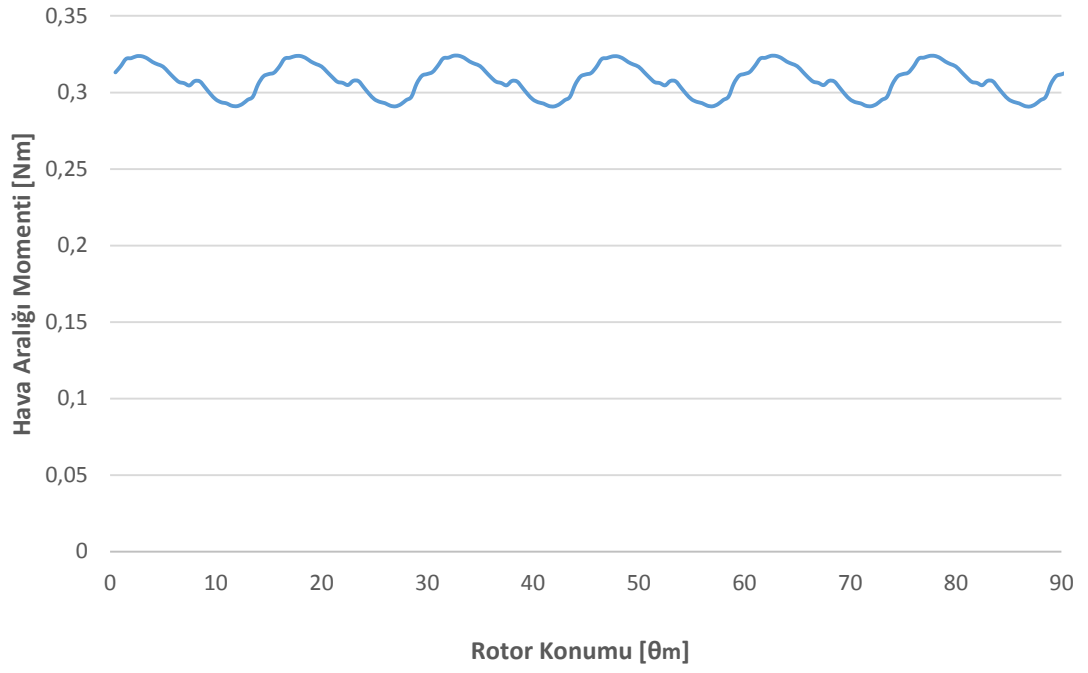
Denklem (4.1)'de yer alan γ ise gamma açısı olarak isimlendirilen faz akımı ile zıt-EMK arasındaki kontrol açısıdır. Elektriksel açı değeri olarak formüle girilir. Zıt-EMK analizi gerçekleştirildikten sonra bu açı değeri bulunmaktadır. Motor sargılarına dengeli üç faz doğru akımlar verilerek maksimum moment noktasını veren nokta kontrol açısı olarak tespit edilir. Üç akım kaynağı için bileşenler girilirken 120^0 faz farkı olacak şekilde kontrol açıları sistemde tanımlanmalıdır.

Aşağıda yer alan şekil 4.13'te motor sargılarından akan akımların grafiği verilmiştir. Akım tepe değeri hava aralığı moment değerini 0.3 Nm verecek şekilde program üzerinde belirlenmiş ve 0.53 A olarak bulunmuştur. Analizler 1200, 1600, 3000 ve 4500 d/d hızları için gerçekleştirilmiştir. Bunun için her analiz için sürücü devre modelindeki açısal frekans değeri güncellenmiştir. Analizler tamamlandıktan sonra moment karakteristiklerine ilişkin değerler hesaplanmıştır.

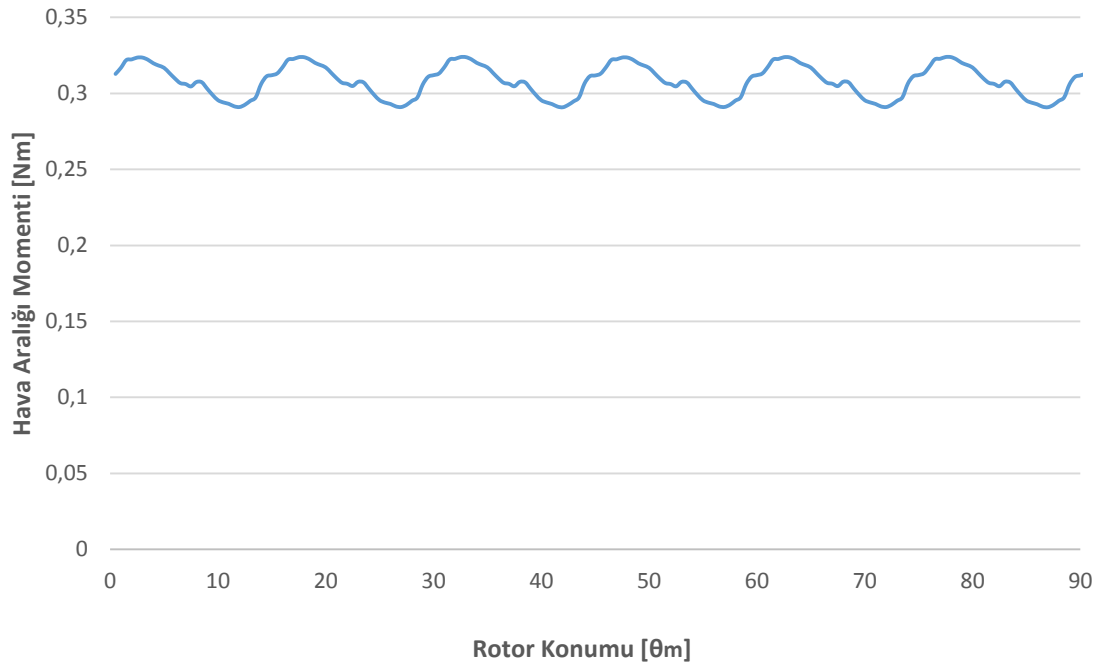


Şekil 4.13 : Sinüs dalga akımları.

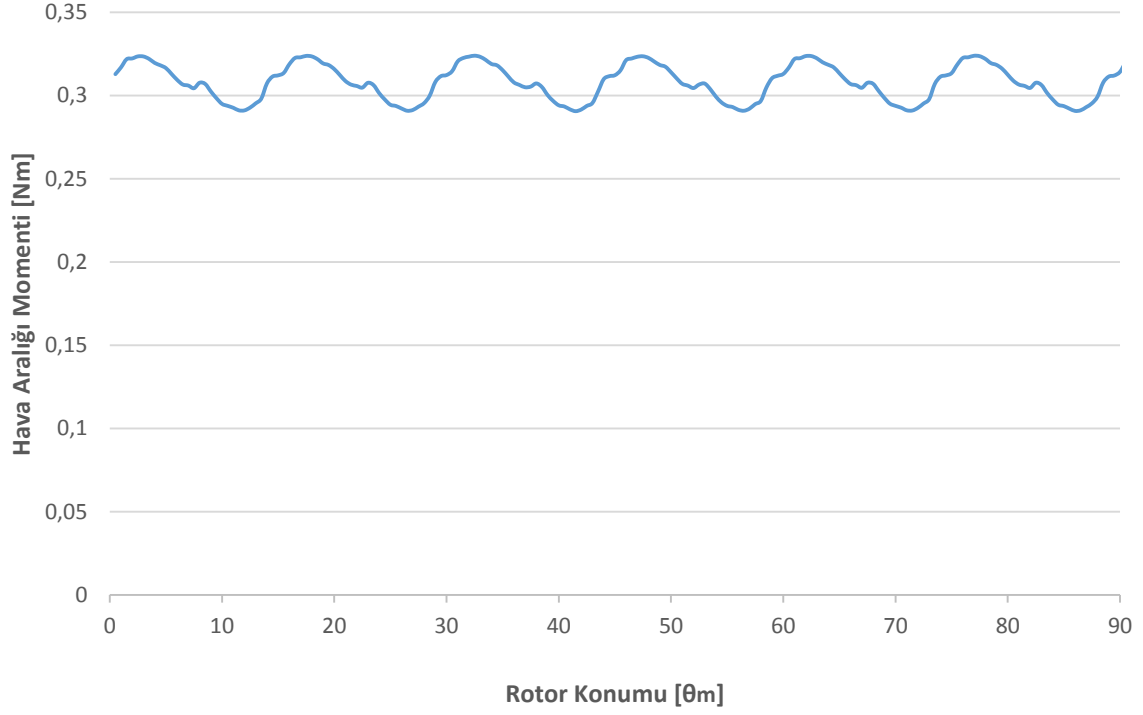
Aşağıda yer ala grafiklerde motorun dört farklı hızda çalışmasına ilişkin moment grafikleri çizdirilmiştir.



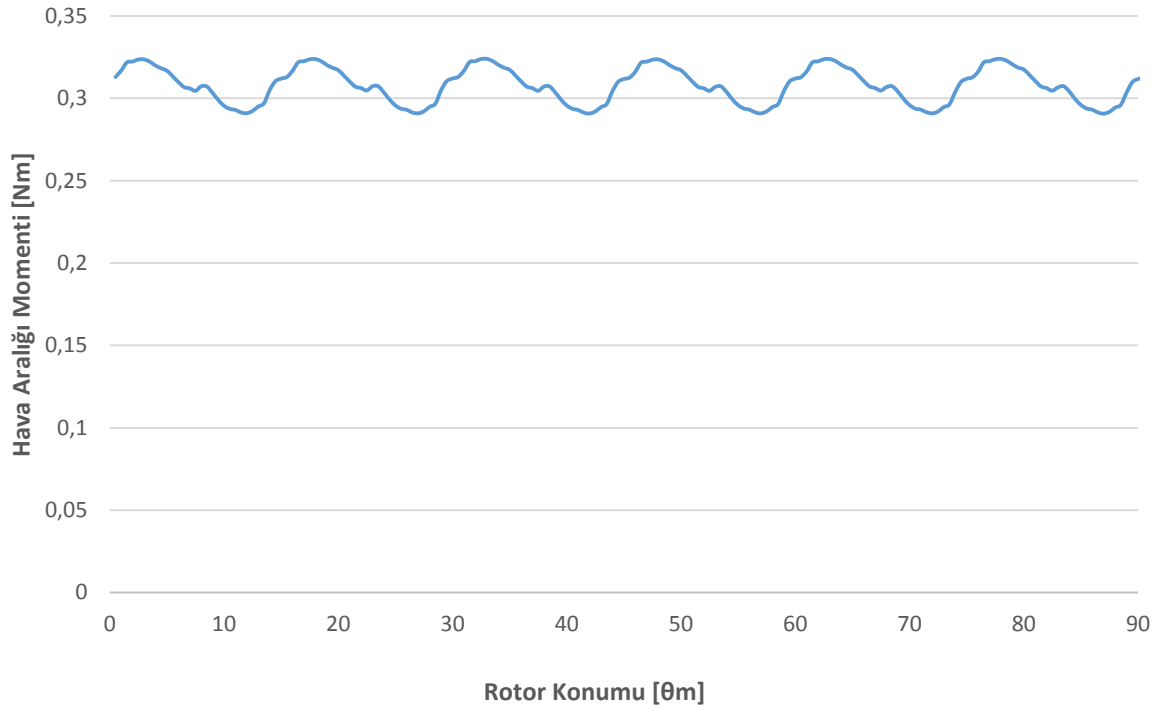
Şekil 4.14 : 1200 d/d için hava aralığı momenti.



Şekil 4.15 : 1600 d/d için hava aralığı momenti.



Şekil 4.16 : 3000 d/d için hava aralığı momentini.



Şekil 4.17 : 4500 d/d için hava aralığı momentini.

Moment analizleri tamamlandıktan sonra denklem (3.13) ve denklem (3.14) kullanılarak yüzde olarak moment dalgalılığı ve vurunu momenti seviyesi hesaplanmıştır. Aşağıda yer alan çizelgede bu değerler verilmiştir.

Çizelge 4.3 : 12/8 motor için moment değerleri.

Hız [d/d]	1200	1600	3000	4500
T_{ort} [Nm]	0.307	0.307	0.307	0.307
T_{max} [Nm]	0.324	0.323	0.324	0.323
T_{min} [Nm]	0.291	0.291	0.291	0.291
T_{dal} [%]	10.78	10.73	10.82	10.80
$T_{vuruntu}$ [%]	5.33	5.32	5.32	5.33

Yukarıda yer alan çizelgeden görüldüğü üzere moment dalgalılığı ve vuruuntu momenti seviyesi literatürde yer alan kabul edilir sınırlar içerisinde.

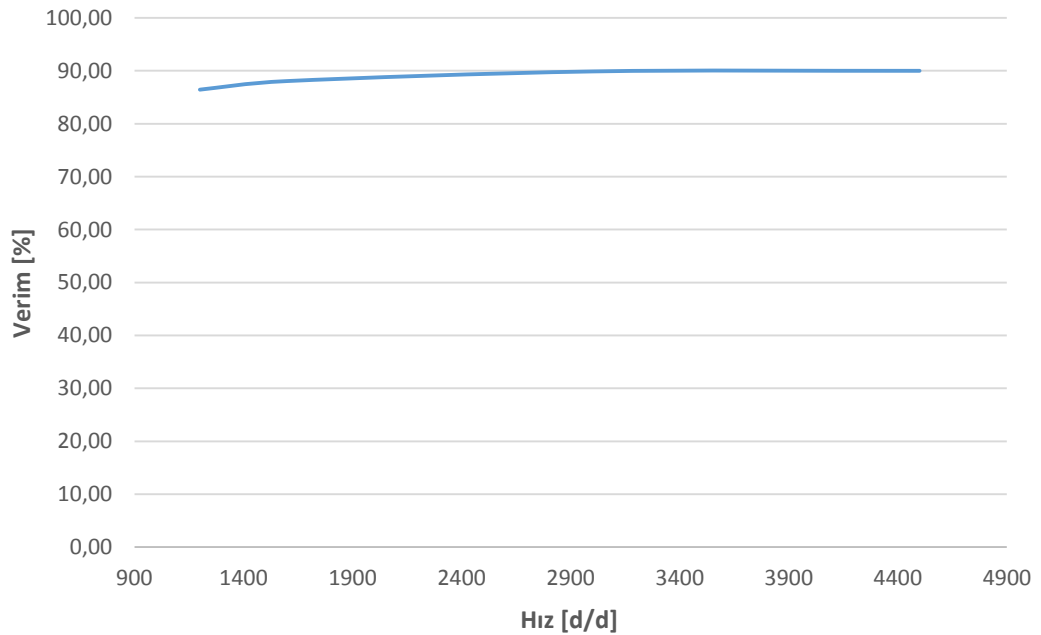
4.1.4 Alternatif model 2D kayıp ve verim sonuçları

Bu kısımda 12/8 oluk/kutup SMSM için bakır ve demir kayıpları hesaplanarak verim elde edilmiştir. Aşağıda yer alan çizelgede bakır ve demir kayıpları ile birlikte verim sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Kayıp ve verim değerleri.

Hız[d/d]	p_b [W]	p_d [W]	T_{ort} [Nm]	P1 [W]	P2 [W]	Verim [%]
1200	4.92	1.13	0.307	44.63	38.58	86.44
1600	4.92	2.05	0.307	58.41	51.44	88.07
3000	4.92	5.93	0.307	107.30	107.30	89.89
4500	4.92	11.15	0.307	160.74	144.67	90.00

Aşağıda yer alan grafikte motora ilişkin hız-verim grafiği çizdirilmiştir.



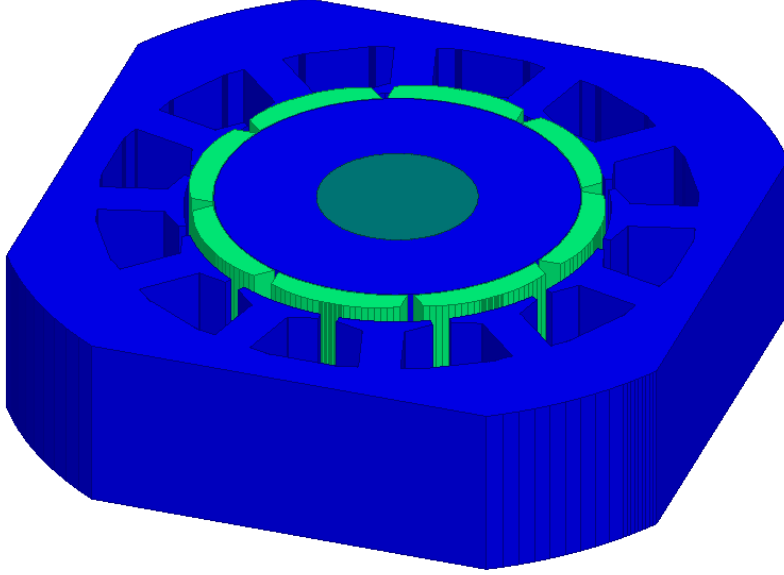
Şekil 4.18 : 12/8 motor hız-verim eğrisi.

4.2 Alternatif Modelin 3D Modellemesi

Bu bölümde 12/8 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM'un 3D modeli oluşturularak analizleri gerçekleştirilmiştir. 2D analizler sonucunda rotor ve rotorda yer alan sürekli mıknatısların uzunluk etkisi görülememektedir. 3D analizler sonucunda bu uzunluk etkisinin motor çıkış değerlerini ne şekilde etkilediği çıktı olarak verilmiştir.

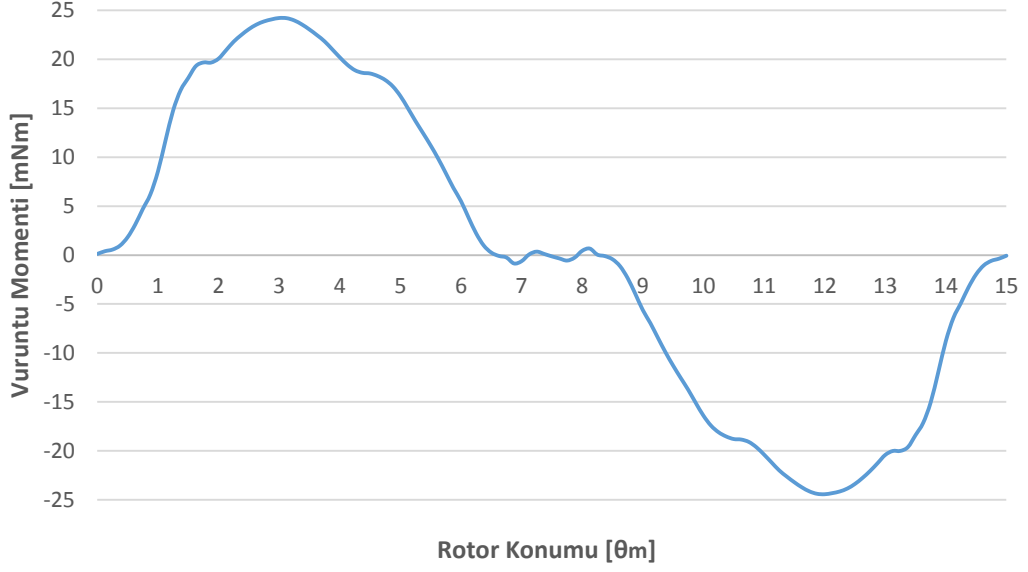
4.2.1 Alternatif model 3D vurutu momenti analizi

İlk olarak 2D model 3D ortama atılarak geometri hazır hale getirilmiştir. Rotor paketi stator paket boyundan alt ve üstten 2 mm olacak şekilde toplamda 4 mm daha uzun olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.19'da 12/8 motorun geometrisi verilmiştir.



Şekil 4.19 : Alternatif model 3D modeli.

Model oluşturulduktan sonra motora ilişkin döner bölge tanımlanarak saniyede bir derece dönecek şekilde vurutu momenti analizi için hız referansı girilmiştir. Ardından model ağ haritası özelleştirilerek ağ bilgisi oluşturulmuştur. En son olarak ise analize ilişkin analiz zamanı bilgisi toplamda 15 saniye girilerek model koşturmaya hazır hale gelmiştir. Şekil 4.20'de alternatif modele ilişkin 3D vurutu moment analiz grafiği çizdirilmiştir.

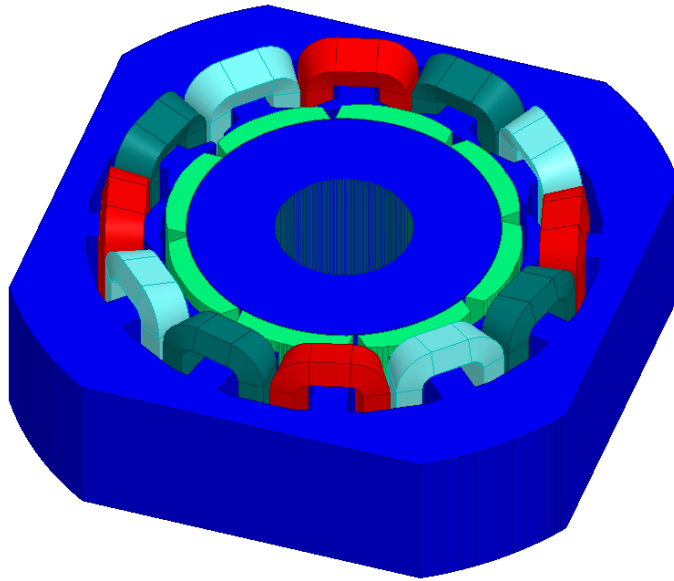


Şekil 4.20 : 3D alternatif model vuruñtu momentini grafiği.

Analiz sonucunda bir periyot boyunca vuruñtu momentinin maksimum değeri 24.22 mNm olarak bulunmuştur ve çıkış momentine oranı 1200 d/d için %7.48 olarak elde edilmiştir. 2D analize göre bu değerin daha yüksek çıktığı grlmştir.

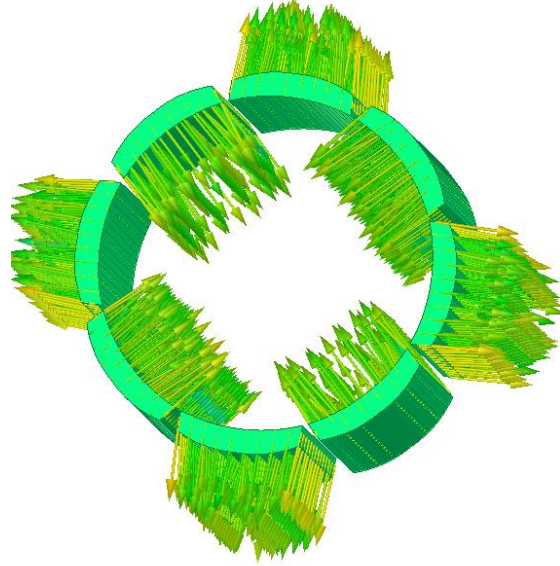
4.2.2 Alternatif model 3D zıt-EMK ve toplam harmonik distorsiyon analizleri

Vuruñtu momentini analiz modelinde stator oluklarına sargılar yerleştirilmemiştir. Bu yüzden bu analize başlanmadan önce bir önceki model revize edilerek simülasyona uygun hale getirilmiştir. Aşağıda yer alan şekilde referans model 3D sargı yapısı ve motor geometrisi verilmiştir.



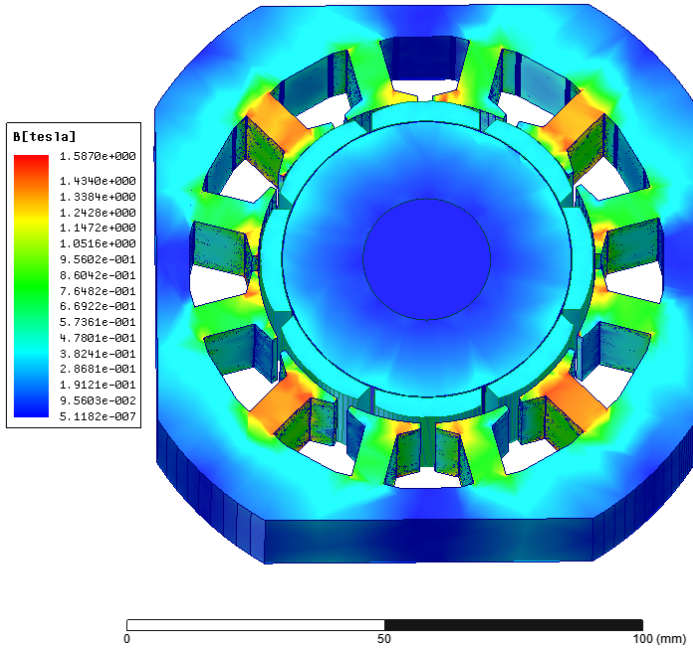
Şekil 4.21 : Alternatif model 3D sargı şeması.

Zıt-EMK analizi motorun kompresör içinde değil de oda sıcaklığındaki durumu için analiz edildiğinde bu sıcaklıktaki mıknatıs karakteristikleri programda malzeme bilgisi kısmına girilmiştir. Mıknatıslar paralel olarak şoklanmış ve aşağıda mıknatıslanma yönleri çizdirilmiştir.

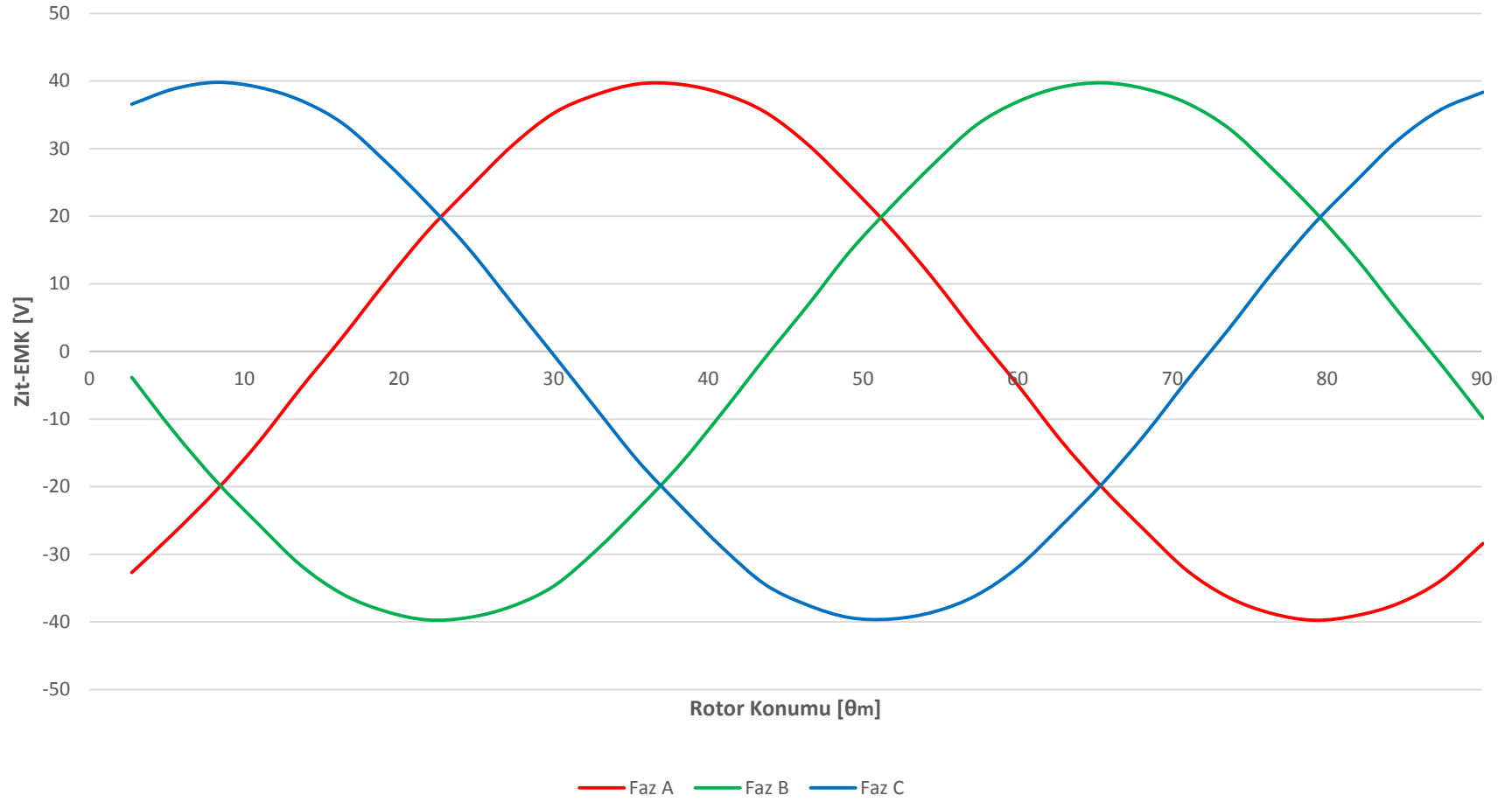


Şekil 4.22 : Alternatif model paralel mıknatıslanma.

Model oluşturulduktan sonra 1200 d/d için analiz koşturulmuştur. Boşta çalışma durumu için stator ve rotor sac laminasyonlarındaki akı yoğunluğu aşağıda yer alan şekilde verilmiştir.



Şekil 4.23 : Boşta çalışma 1200 d/d için manyetik akı yoğunluğu.



Şekil 4.24 : 3D alternatif model zıt-EMK grafiği (1200 d/d).

Zıt-EMK analizi tamamlandığında tepeden tepeye değerinin 79.6 V olduğu görülmüştür. Bu değer 2D analizler sonucunda 77.6 V olarak bulunmuştu. Arada meydana gelen 2 V'luk fark mıknatıs etkisinden kaynaklanmaktadır. Tepeden tepeye değeri bilinen gerilimin zıt-EMK katsayısı hesaplanmıştır. 3D analiz sonucu için K_e sabiti 0.633 V.s/rad olarak bulunmuştur. Aşağıda yer alan çizelge 4.5'te farklı hızlar için stator sargılarında endüklenen gerilim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Farklı hızlar için zıt-EMK değerleri.

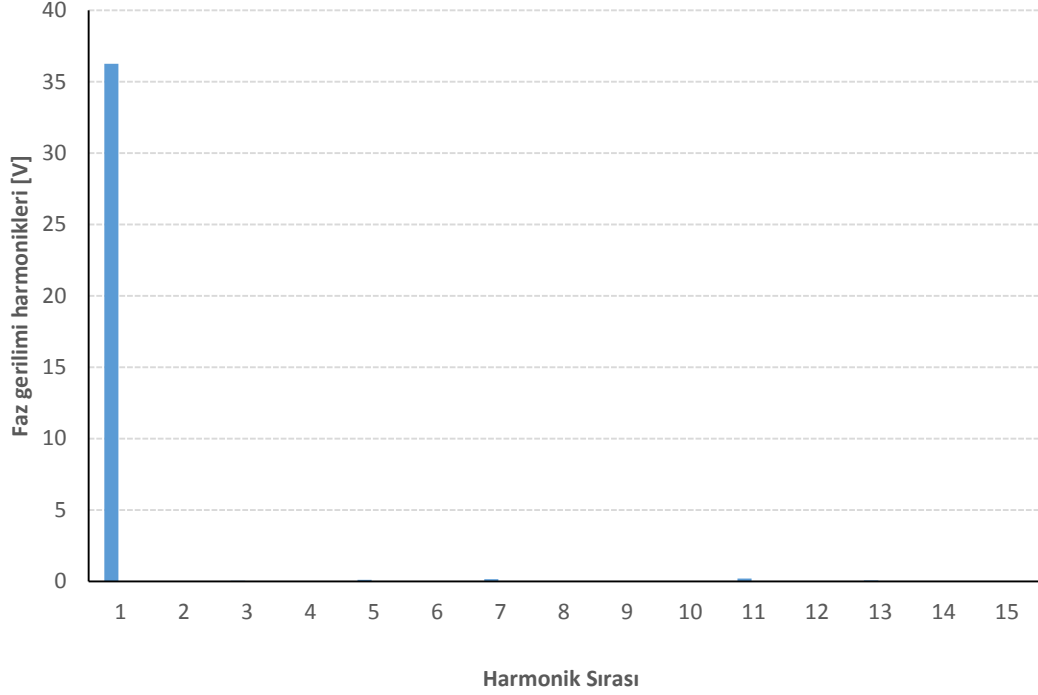
Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]	Hız [d/d]	Zıt-EMK [V]
900	59.66	3000	198.86
1200	79.55	3300	218.75
1500	99.43	3600	238.64
1800	119.32	3900	258.52
2100	139.20	4200	278.41
2400	159.09	4500	298.29
2700	178.98		

Zıt-EMK analizi tamamlandıktan sonra gerilim harmonikleri incelenmiştir. Aşağıda yer alan çizelgede gerilim harmoniklerinin ilk 15 bileşeni verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Harmonik bileşenler.

Harmonik Sırası	Faz-Nötr [V]
1	36.276
2	0.000
3	0.031
4	0.000
5	0.104
6	0.000
7	0.150
8	0.000
9	0.015
10	0.000
11	0.190
12	0.000
13	0.060
14	0.000
15	0.003

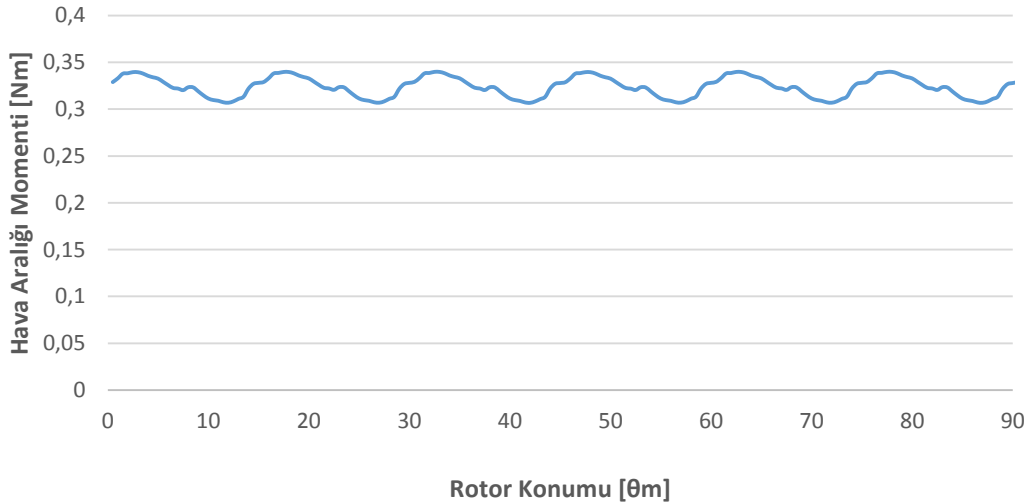
Denklem (3.9)'da toplam harmonik distorsiyon seviyesinin ne şekilde hesaplanacağı verilmiştir. Bu denkleme göre 12/8 oluk/kutup SMSM için toplam harmonik distorsiyon seviyesi %0.75 olarak bulunmuştur. Şekil 4.25'te harmonik bileşenlerin faz-nötr gerilim harmonikleri sütun grafik olarak çizdirilmiştir.



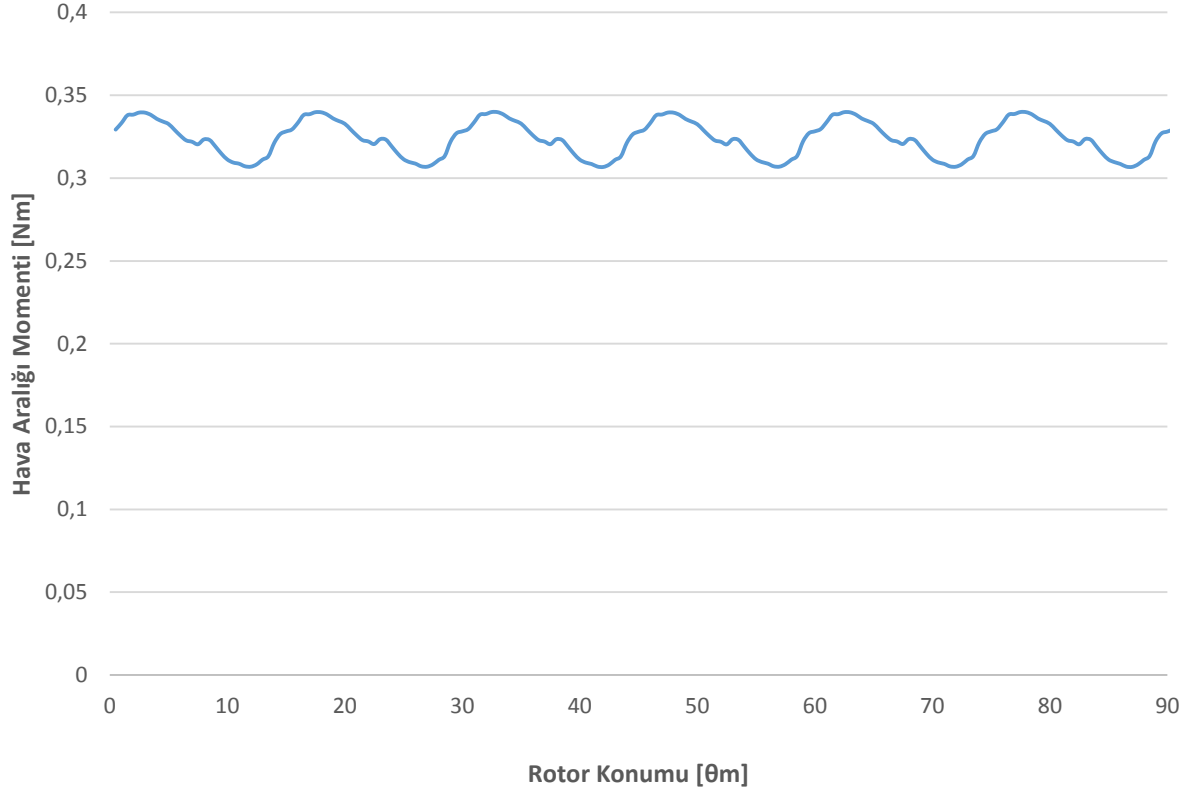
Şekil 4.25 : Faz gerilim harmonik bileşenleri (1200 d/d).

4.2.3 Alternatif model 3D moment analizleri

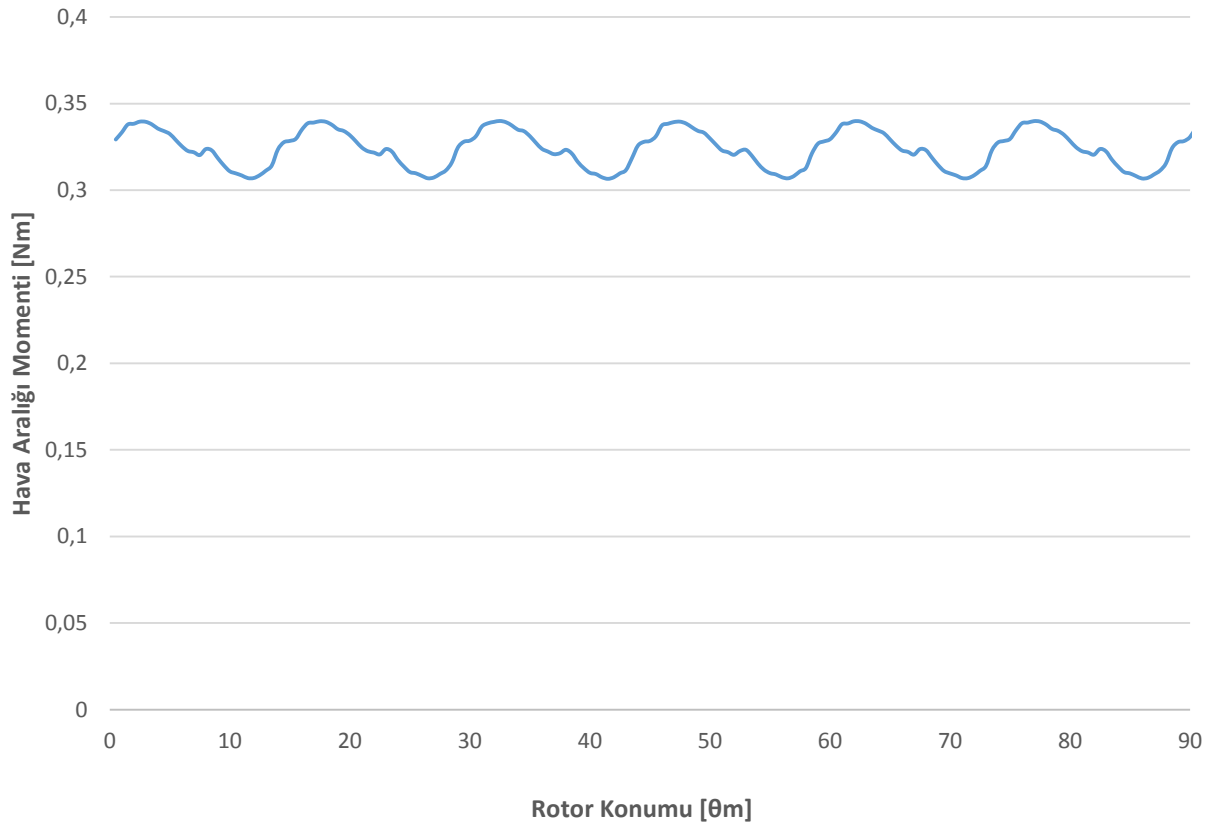
Zıt-EMK analizlerinden sonra SMSM için 3D moment analizleri gerçekleştirilmiştir. 2D analizde olduğu gibi motorlar tepe değeri 0.53 A olan sinüs akımlar ile sürülmüştür. 2D analizler sonucunda ortalama 0.3 Nm hava aralığı momenti değerine sahip motorların olduğu görülmüştür. Mıknatıs etkisinin aynı akım değerine sahip sürücü devre ile 3D analizlerde nasıl sonuç vereceği dört farklı hız için analiz edilmiştir.



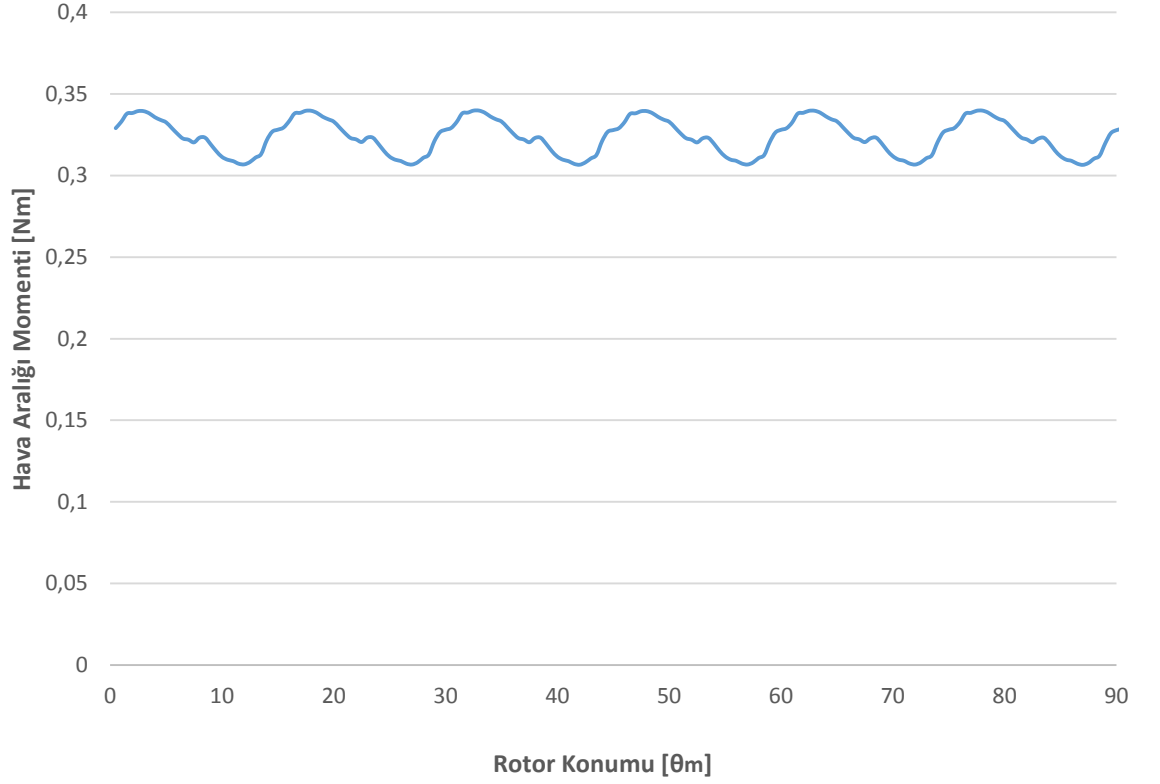
Şekil 4.26 : 1200 d/d için hava aralığı momenti.



Şekil 4.27 : 1600 d/d için hava aralığı momentini.



Şekil 4.28 : 3000 d/d için hava aralığı momentini.



Şekil 4.29 : 4500 d/d için hava aralığı momenti.

Moment analizleri tamamlandıktan sonra moment dalgalılığı ve vuruntu momenti seviyesi hesaplanmıştır. Çizelge 4.7’de bu değerler verilmiştir.

Çizelge 4.7 : 12/8 motor için moment değerleri.

Hız [d/d]	1200	1600	3000	4500
T_{ort} [Nm]	0.324	0.324	0.324	0.324
T_{max} [Nm]	0.340	0.340	0.340	0.340
T_{min} [Nm]	0.307	0.307	0.306	0.306
T_{dal} [%]	10.23	10.24	10.32	10.28
$T_{vuruntu}$ [%]	7.48	7.48	7.48	7.48

Değerler incelendiğinde 2D analizlere göre aynı akım ile sürülen motorlarda daha yüksek hava aralığı momenti elde edilmiştir. Ancak vuruntu momenti seviyesi 3D analizler sonucunda yaklaşık olarak %2 daha yüksek çıkmıştır.

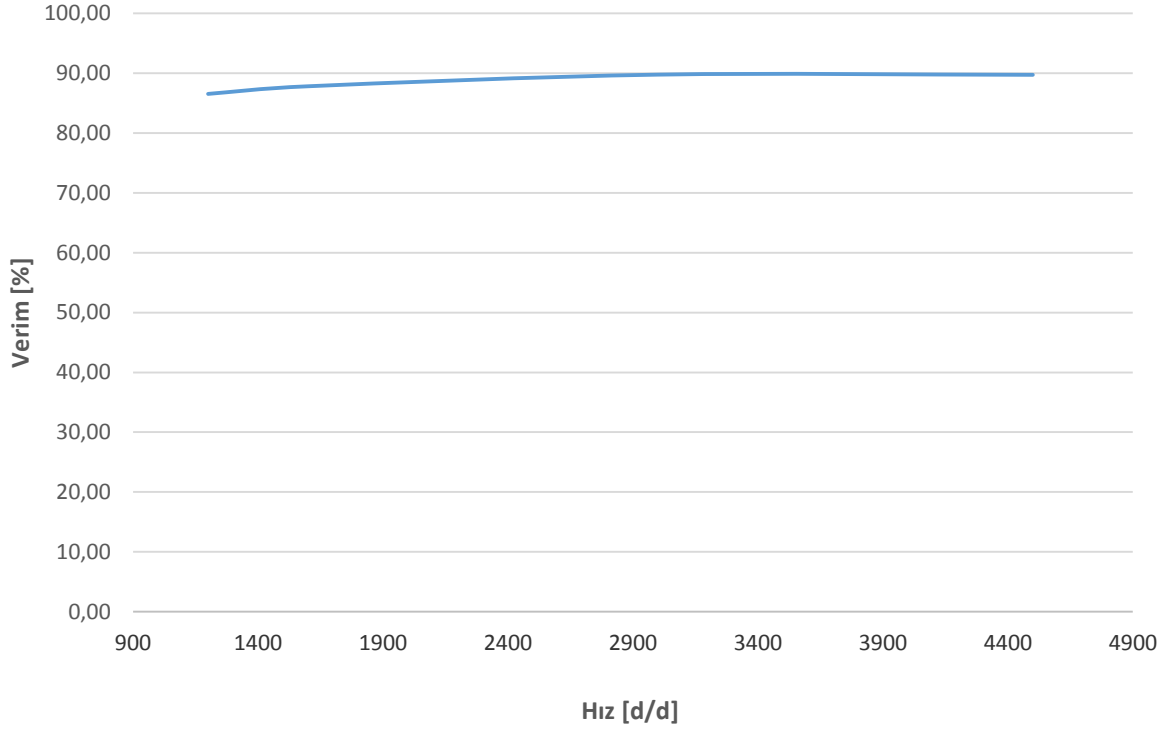
4.2.4 Alternatif model 3D kayıp ve verim sonuçları

Analizler tamamlandıktan sonra 3D sonuçlar göz önünde bulundurularak kayıp ve verim hesaplanmıştır. Aşağıda yer alan çizelge 4.8’de 12/8 motora ilişkin bakır ve demir kayıpları ile birlikte verim sonuçları farklı hızlar için verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Kayıp ve verim değerleri.

Hız[d/d]	p_b [W]	p_d [W]	T_{ort} [Nm]	P1 [W]	P2 [W]	Verim [%]
1200	4.92	1.42	0.324	47.06	40.72	86.53
1600	4.92	2.62	0.324	61.83	54.29	87.80
3000	4.92	6.71	0.324	113.42	101.79	89.75
4500	4.92	12.58	0.324	170.18	152.68	89.72

Aşağıda yer alan şekilde verim hız eğrisi çizdirilmiştir.



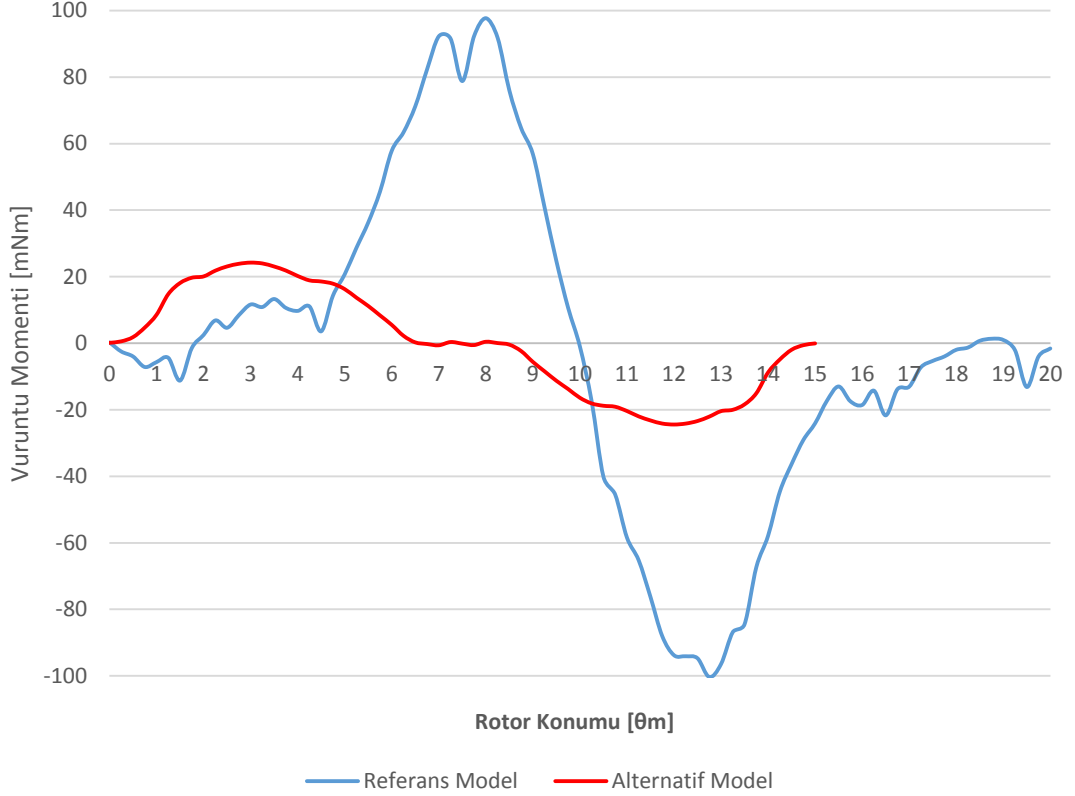
Şekil 4.30 : 12/8 motor verim hız eğrisi.

2D analizler ile bir kıyaslama yapıldığında demir kayıplarının daha yüksek çıktığı görülmektedir. Çünkü rotor paketi 4 mm daha uzun olacak şekilde 3D analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden verim değeri daha düşük olarak 3D analizler sonucunda elde edilmiştir.

4.3 Alternatif Motor ve Referans Motor Karşılaştırması

Bu kısımda alternatif motor modeli ve referans motor modeline ilişkin elde edilen 3D sonuçlar üzerinden karşılaştırmalar verilmiştir. Her iki motor modeli için de rotorda yer alan sürekli mıknatıslar stator paketinden daha uzun olduğu için 3D sonuçlar göz önünde bulundurularak sonuçlar kıyaslanmıştır.

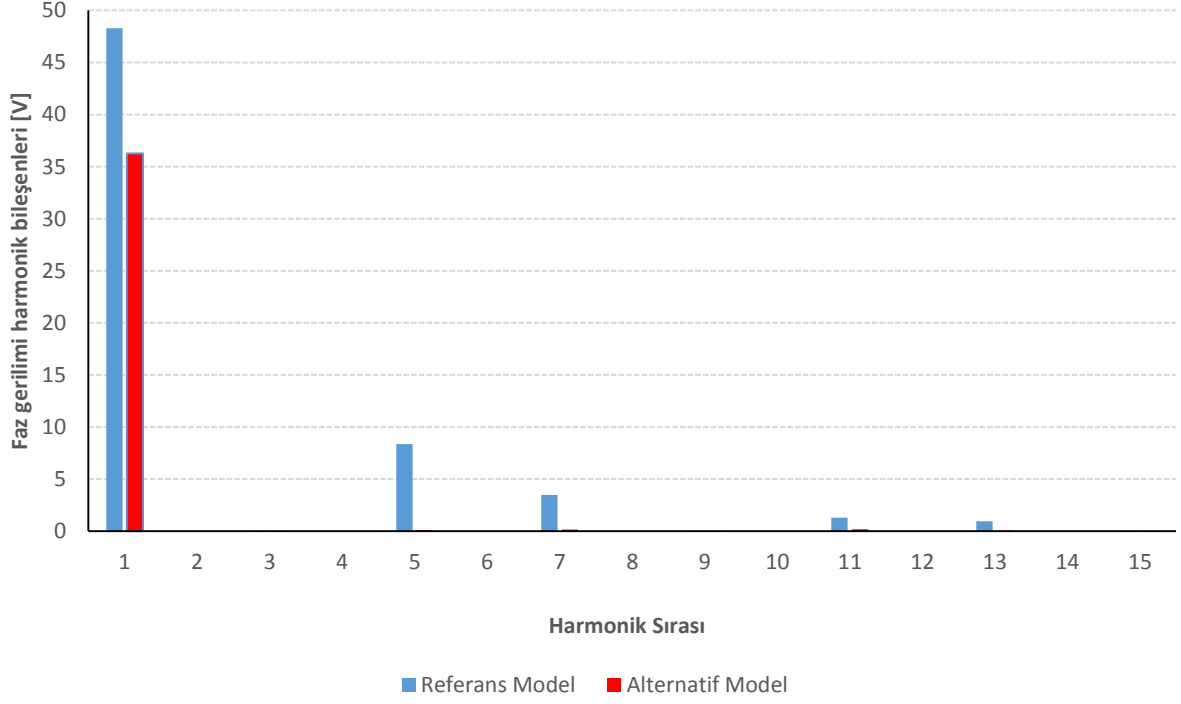
İlk olarak her iki motor için elde edilen vuruuntu momenti grafikleri aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir. Alternatif modelde referans modele göre daha iyi bir vuruuntu momenti sonucu elde edildiği grafik 4.31’de gösterilmiştir. Tepe değeri 97.07 mNm olan referans modele göre %75 daha düşük vuruuntu momenti değerine sahip alternatif motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.31 : Vuruuntu momenti karşılaştırması.

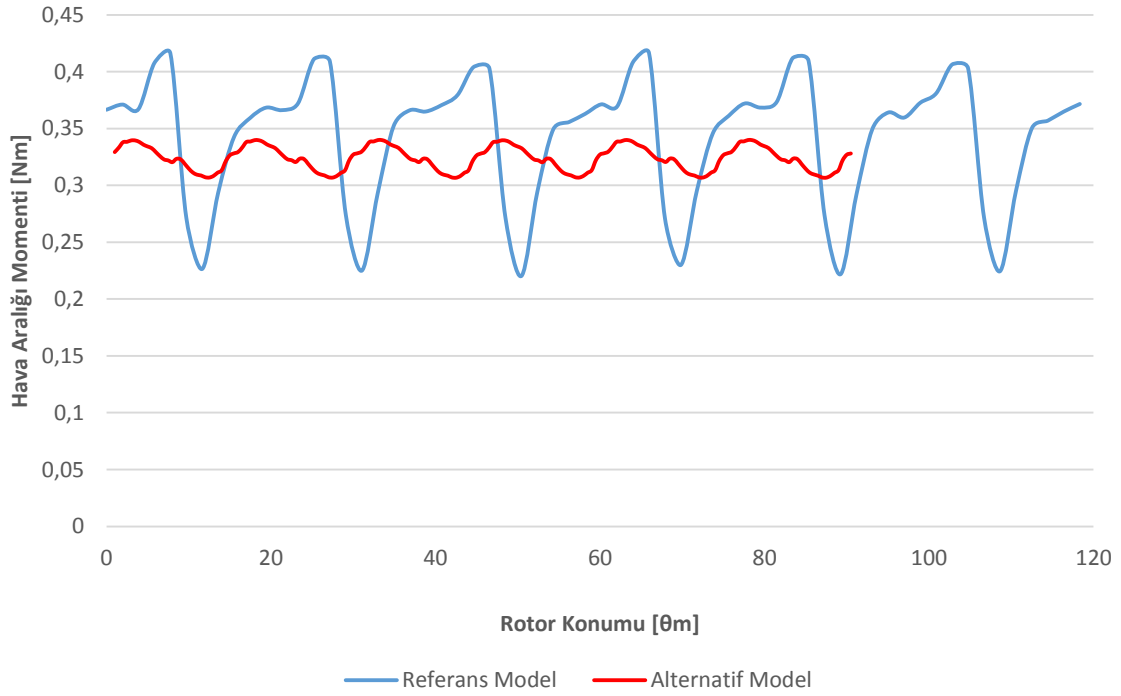
Her iki motorun ortalama hava aralığı momenti 0.3 Nm olacak şekilde tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu durum göz önüne alındığında çizelge 3.7 ve 4.7’de her iki motorun sahip olduğu vuruuntu momenti değerinin çıkış momentine oranı % olarak hesaplanmıştır. Alternatif modelde bu değer %7.48’dir ve literatürde kabul edilebilir sınırlar içerisinde.

Vuruuntu momenti analizlerine ilişkin karşılaştırmadan sonra gerilim harmonikleri iki motor için karşılaştırılmıştır. Referans motor modeli için toplam harmonik distorsiyon seviyesi %19.22 olarak bulunmuştur. Alternatif motor modelinde ise bu değer %0.75 olarak elde edilmiştir. Aşağıda yer alan şekilde iki motora da ilişkin gerilim harmonikleri çizdirilmiştir.



Şekil 4.32 : Toplam harmonik distorsiyon karşılaştırması (1200 d/d).

Grafik incelendiğinde 5. Ve 7. Gerilim harmoniklerinin referans modelde baskın olduğu görülmektedir. Ancak bu durum alternatif motor modelinde meydana gelmemektedir. Yüzde olarak toplam harmonik distorsiyon seviyesinin düşük çıkmasındaki temel sebep harmonik bileşenlerinin ortadan kaldırılmasıdır.



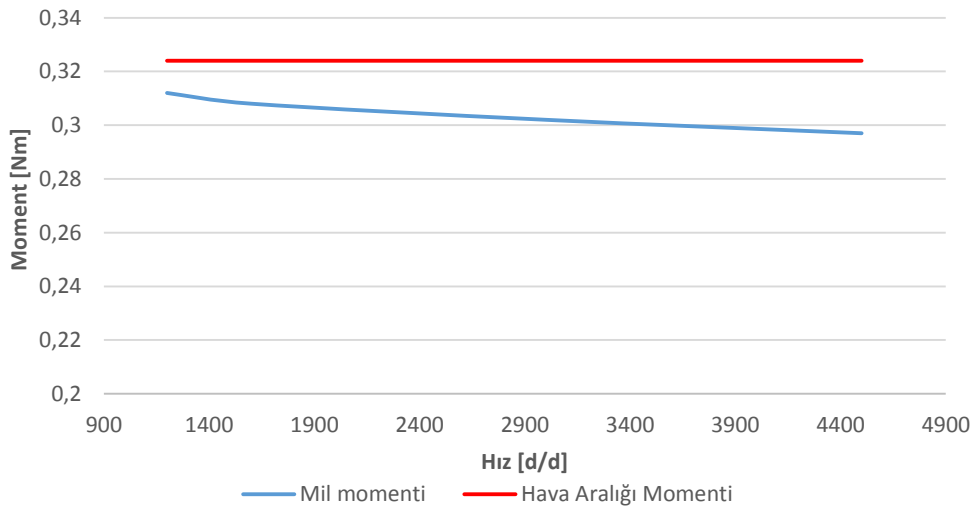
Şekil 4.33 : Hava aralığı momenti karşılaştırması (1600 d/d).

İki motor için de bir sonraki karşılaştırma 1600 d/d durumunda hava aralığı moment çıkışları ile yapılmıştır. Motorlar aynı kutup sayısına sahip olmadığından dolayı referans motor 120⁰ mekanik açı ve alternatif motor da 90⁰ mekanik açı için aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde referans motorun moment dalgalılığının çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu seviye %57 mertebesindedir. Alternatif motor modeli için moment dalgalılığı %10.2'dir. Bu durumda %82.1 daha iyi moment dalgalılığına sahip motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Hem referans motor modeli hem de alternatif motor modeli analizlerinde hava aralığı momenti elde edilmiştir. Aynı akım değeri verilerek farklı hızlarda aynı moment elde edilmesinin sebebi Maxwell[®] programının rotorda meydana gelen demir kayıplarını moment analizi yapılırken hesaba katmamasından kaynaklanmaktadır. Hava aralığı gücünden rotor kayıpları çıkartılırsa motorun mil gücü elde edilir. Alternatif motor modeline ilişkin aynı akım değeri ile sürülen farklı hızlardaki rotor demir kayıpları çıkarılarak aşağıda yer alan mil moment (T_{mil}) değerleri elde edilmiştir. Mil moment değerleri denklem (3.10)'da yer alan moment ve güç ilişkisi kullanılarak farklı hızlar için çizelge 4.9'da yer alan 3D analiz sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Sabit akım uygulanarak yüksek hızlara çıkıldığında moment değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.9 : Hava aralığı momenti ve mil momenti değerleri.

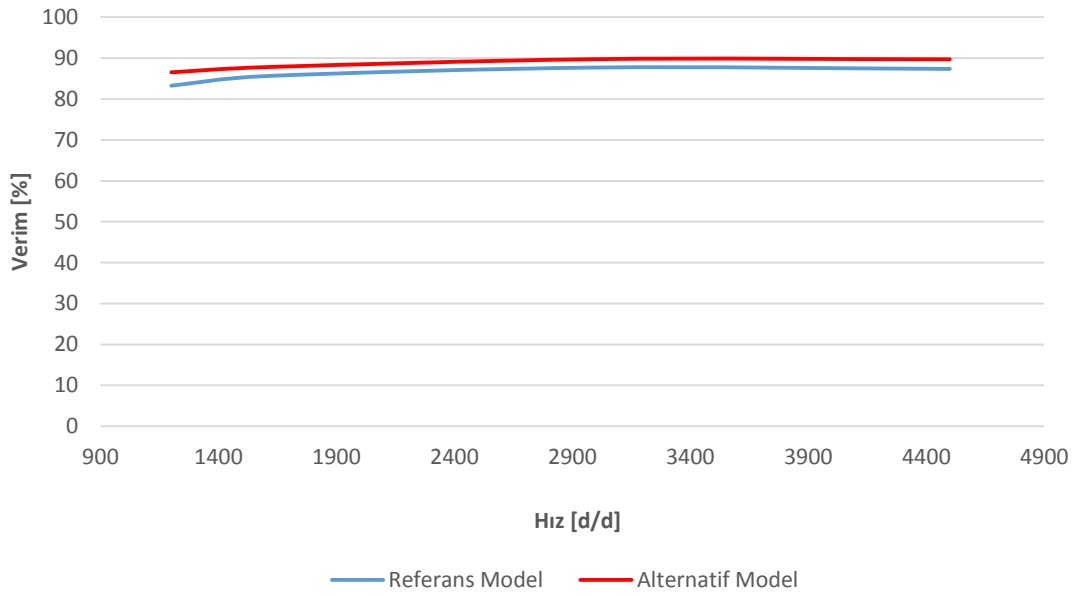
Hız[d/d]	T_{mil} [Nm]	T_{ort} [Nm]
1200	0.312	0.324
1600	0.308	0.324
3000	0.302	0.324
4500	0.297	0.324



Şekil 4.34 : Mil momenti ve hava aralığı moment değişimi.

Şekil 4.34'te 3D alternatif motor modeline ilişkin aynı akım değeri ile sürülmüş mil momentinin hıza bağlı grafiği çizdirilmiştir. Yüksek hızlara çıkıldığında hava aralığı momenti ile mil momenti arasındaki farkın arttığı grafik üzerinden görülmektedir. Yüksek hızlara çıkıldığında rotorda meydana gelen demir kayıpları frekans artışına bağlı olarak karesel olarak artmaktadır.

Motorlara ilişkin son olarak verim ele alınmıştır. Alternatif motor tasarımında ele alınan her hız durumları için motor veriminin %2-3 daha yüksek olduğu görülmüştür. Aşağıda yer alan şekilde verimler çizdirilmiştir.



Şekil 4.35 : Verim karşılaştırması.

Motorlara ilişkin 3D analiz sonuçlarından yola çıkarak karşılaştırmalar yapıldığında alternatif motorun referans motora göre daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle alternatif motor moment anlamında referans motora göre çok daha kaliteli bir çıkış momentine sahiptir. Bu durum motorun gürültü ve titreşim anlamında referans modele göre daha üstün olacağı anlamına gelmektedir. Alternatif motor gerilim harmoniklerinin düşük seviyede olması endüklenen gerilimin saf sinüs formuna yakın bir sonuç verdiğinin göstergesidir. Bu durum motor kontrol ve sürüş anlamında büyük katkı sağlamaktadır. Alternatif motorun referans motora göre verim anlamında daha iyi olduğu görülmektedir.

5. PROTOTİPLEME VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde tasarımı gerçekleştirilen 12/8 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motorun prototip aşamaları yer almıştır. Prototip üretimi gerçekleştirilen motor daha sonra laboratuvar ortamında test çalışmaları yürütülmüştür. Bu motora ilişkin zıt-EMK ölçümleri ve 0.3 Nm yük altında moment sonuçları elde edilmiştir.

5.1 SMSM Prototip Aşamaları

Motor tasarımı tamamlandıktan sonra motor parçalarına ilişkin kısımların teknik çizimleri gerçekleştirilmiştir. Rotor ve stator için hazırlanan iki farklı teknik çizime göre stator sac laminasyonları, rotor göbeği ve mıknatısların üretimi sağlanmıştır. Aşağıda yer alan şekilde stator sac laminasyonları verilmiştir.

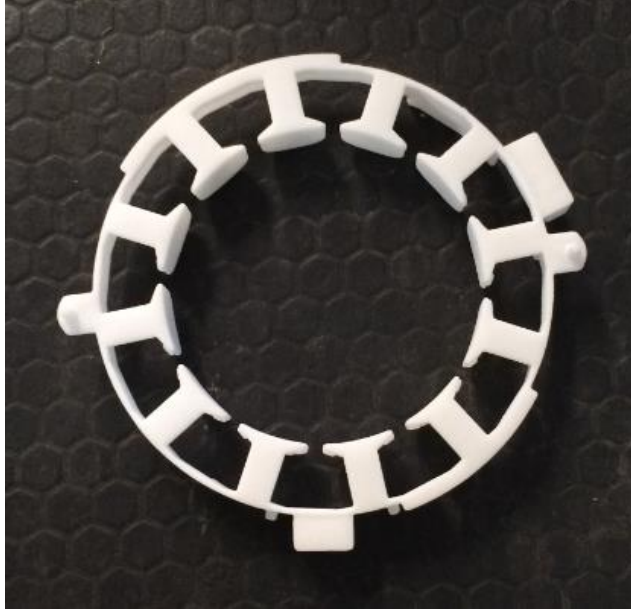


Şekil 5.1 : Stator sac laminasyonları.

Stator sac laminasyonları 0.5 mm kalınlığındadır ve lazer kesim yöntemi ile kesilmiştir. Laminasyonlarda yer alan dört adet delik ile motor kompresör içerisine sabitlenmektedir. Stator sac laminasyonları pim yardımı ile paketlenerek hazır hale getirilmiştir.

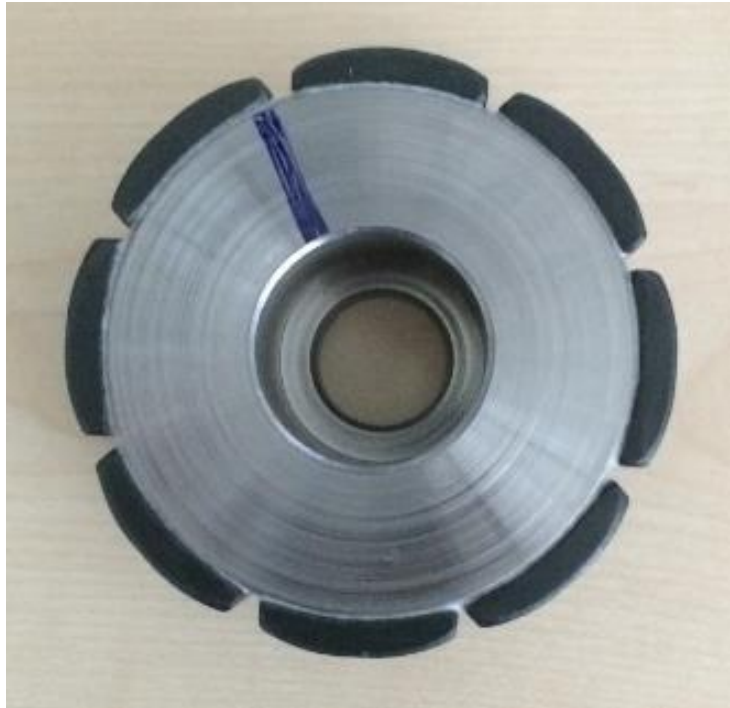
Stator hazır hale geldikten sonra stator sargıları plastik prototip malzeme üzerine sarılmıştır. SMSM için alüminyum sargı her bir faz için 130 sarım sarılacak şekilde

tasarımı yapılmıştır. Daha sonra bu plastik malzeme üzerine yerleştirilen sargılar stator oluklarına yerleştirilmiştir. Aşağıda yer alan şekilde plastik prototip malzemesi verilmiştir.



Şekil 5.2 : Plastik prototip malzeme.

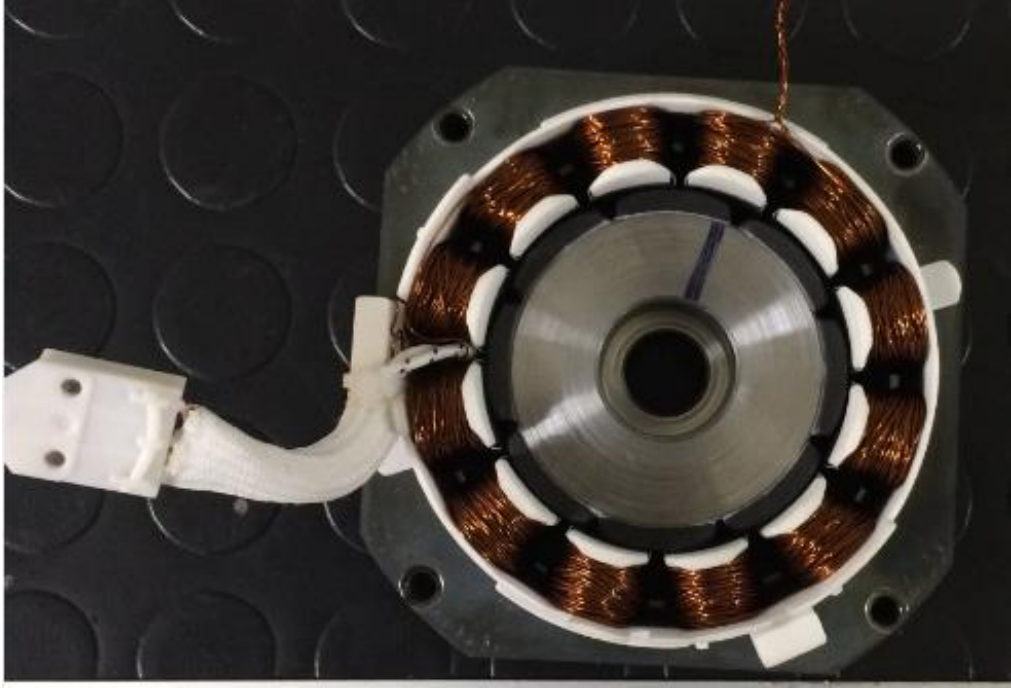
Stator kısmı tamamlandıktan sonra rotor göbeği ve mıknatısların rotor üzerine yapıştırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda yer alan şekilde rotor geometrisinin prototip hali verilmiştir.



Şekil 5.3 : Rotor göbeği ve mıknatıslar.

Rotor göbeği tek parça çelik malzemeden üretilmiştir. Rotor milinin şekil 5.3’de görüldüğü şekilde olmasının sebebi kompresör içinde yerleştirilmesinden kaynaklanan mekanik kısıtlardan dolayıdır. Mıknatıslar rotor göbeği üzerine çok ince bir yapışkan malzeme ile yapıştırılmıştır. Bu yapışkan kalınlığı analizlerde 0.1 mm hava aralığı olarak tanımlanmış ve analizlerde bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Motor kısımları tamamlandıktan sonra motor toplanmıştır. Şekil 5.4’te SMSM prototipi gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : 12/8 SMSM prototipi.

5.2 Deneysel çalışmalar

Tasarımı ve analizleri gerçekleştirilen 12/8 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM’un zıt-EMK ölçümü ve 0.3 Nm yük altında moment ölçümleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

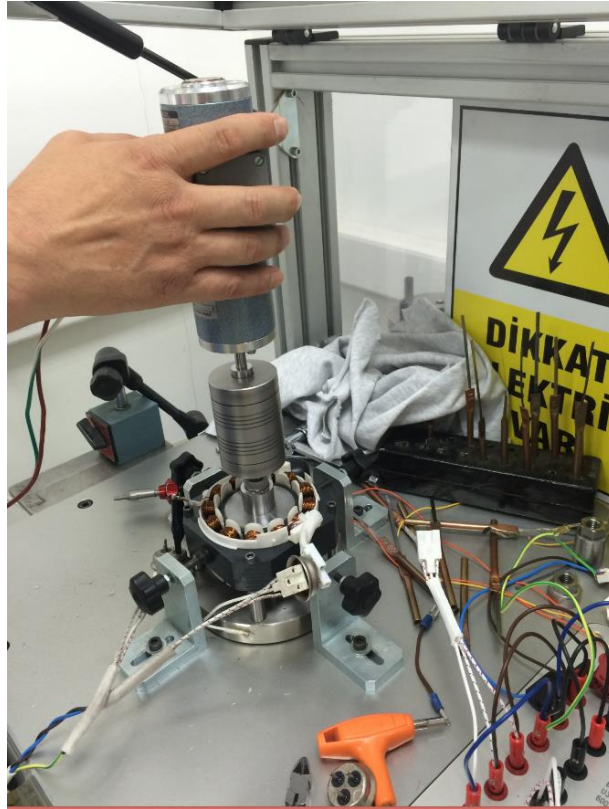
5.2.1 Zıt-EMK ölçümleri

Zıt-EMK ölçümleri sinyal jeneratörü yardımıyla motor miline bağlanan kuplajın motoru boшта döndürmesiyle gerçekleştirilmiştir. İstenilen hız değerine karşılık gelen frekans değeri sinyal jeneratöründen ayarlanmıştır. Aşağıda yer alan şekil 5.4’te sinyal jeneratörü ve kuplaj mekanizması verilmiştir.



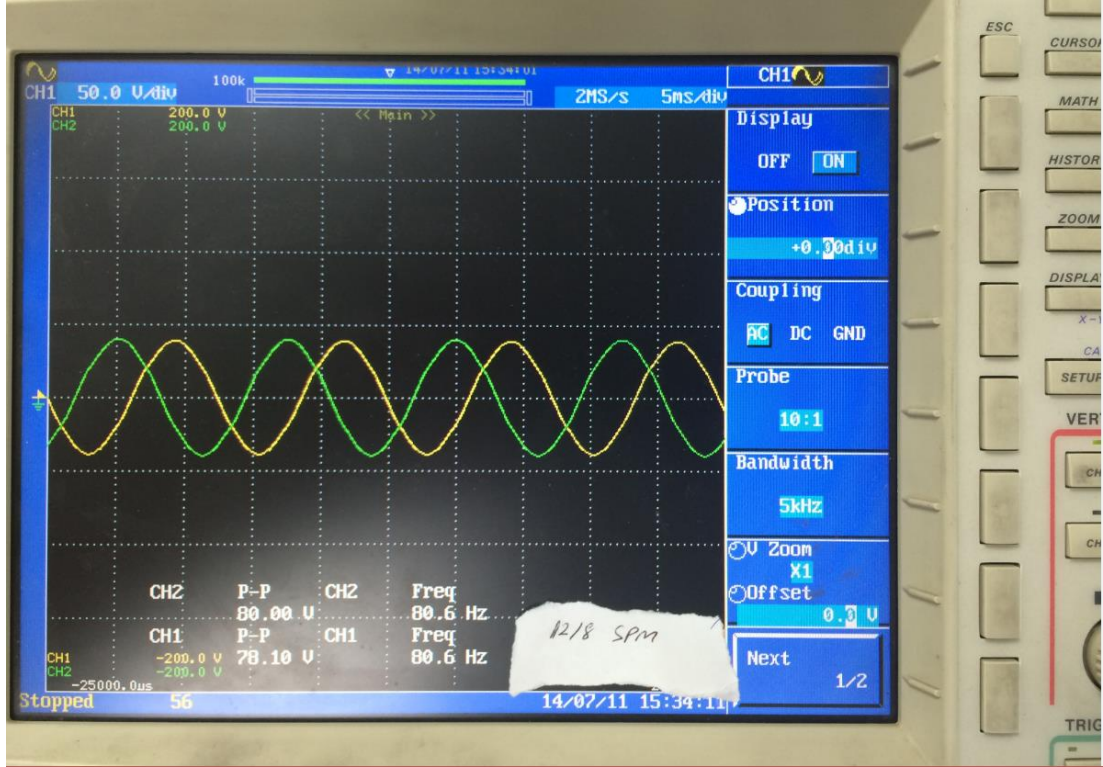
Şekil 5.5 : Sinyal jeneratörü ve kuplaj mekanizması.

Motor daha sonra stator laminasyonunda yer alan dört adet deliklerin olduğu kısımlardan motor test sistemine sabitlenmiştir. Rotor ve stator arasındaki hava aralığı ince metal plakalar ile hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Aşağıdaki şekilde zıt-EMK ölçümü alınmaya hazır hale gelmiş motorun motor test sistemindeki hali verilmiştir.



Şekil 5.6 : Zıt-EMK ölçümü.

Stator sargılarından çıkarılan ortak uçtan osiloskop bağlantısı gerçekleştirilerek gerilim ölçümü yapılmıştır. 1200 d/d için sinyal jeneratörü 80 Hz olacak şekilde ayarlanarak motor mili döndürülmüştür. Aşağıda yer alan osiloskop görüntüsünde motorun sargılarında endüklenen gerilim verilmiştir.



Şekil 5.7 : 1200 d/d zıt-EMK ölçümü.

Test sonucundan görüldüğü üzere motorun 1200 d/d hızında sargılarından endüklenen gerilimin tepeden tepeye değeri 80 V'tur. Deneysel olarak elde edilen veriden motorun zıt-EMK katsayısı hesaplandığında bu değer 0.636 V.s/rad olduğu görülmektedir. Aşağıda yer alan çizelgede hem 2D analiz hem de 3D analiz sonucunda elde edilen zıt-EMK tepeden tepeye değeri ile birlikte test sonucuna ait değer verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Zıt-EMK analiz ve test sonuçları karşılaştırması.

Yöntem	Zıt-EMK [V]	Bağlı Fark [%]
SEA 2D	77.6	3
SEA 3D	79.6 V	0.5
Test	80 V	0

Çizelge incelendiğinde 3D analiz sonucu ile test sonucu arasındaki bağılı farkın %0.5 olduğu görülmektedir. 2D analiz sonucunda bu farkın %3 çıkmaktadır. Buradan 3D analizlerin bu çalışma için gerçeğe daha yakın sonuç verdiği sonucu çıkarılır. Çünkü 2D analizler ile rotorda yer alan mıknatısların uzunluk etkisi hesaba katılamamaktadır.

Analizler gerçekleştirilirken rotor ile mıknatıslar arasında 0.1 mm boşluk bırakılarak analizler tamamlanmıştır. Bunun nedeni motor prototip üretiminde mıknatısların yüzeye yapıştırılmasından kaynaklı olan rotor ile mıknatıslar arasındaki yapıştırı maddedir. Ancak bu hava aralığı tam olarak bu etkiye karşılık gelmemektedir. O nedenle 3D analizler hava aralığı rotor ve mıknatıslar arasında maksimum seviyeden sıfır değerine ulaşacak şekilde parametrik olarak gerçekleştirilmiştir. Maksimum hava aralığı olarak tanımlanan 0.1 mm 0.01 mm işlem basamakları ile çözdürülerek aşağıda yer alan çizelge elde edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Rotor ve mıknatıs hava aralığı değişimine göre zıt-EMK değerleri.

Rotor iç yarıçap [mm]	Zıt-EMK [V]
28,4	79,6
28,41	79,74
28,42	79,96
28,43	80,06
28,44	80,22
28,45	80,54
28,46	80,7
28,47	80,78
28,48	80,86
28,49	81
28,5	81,08

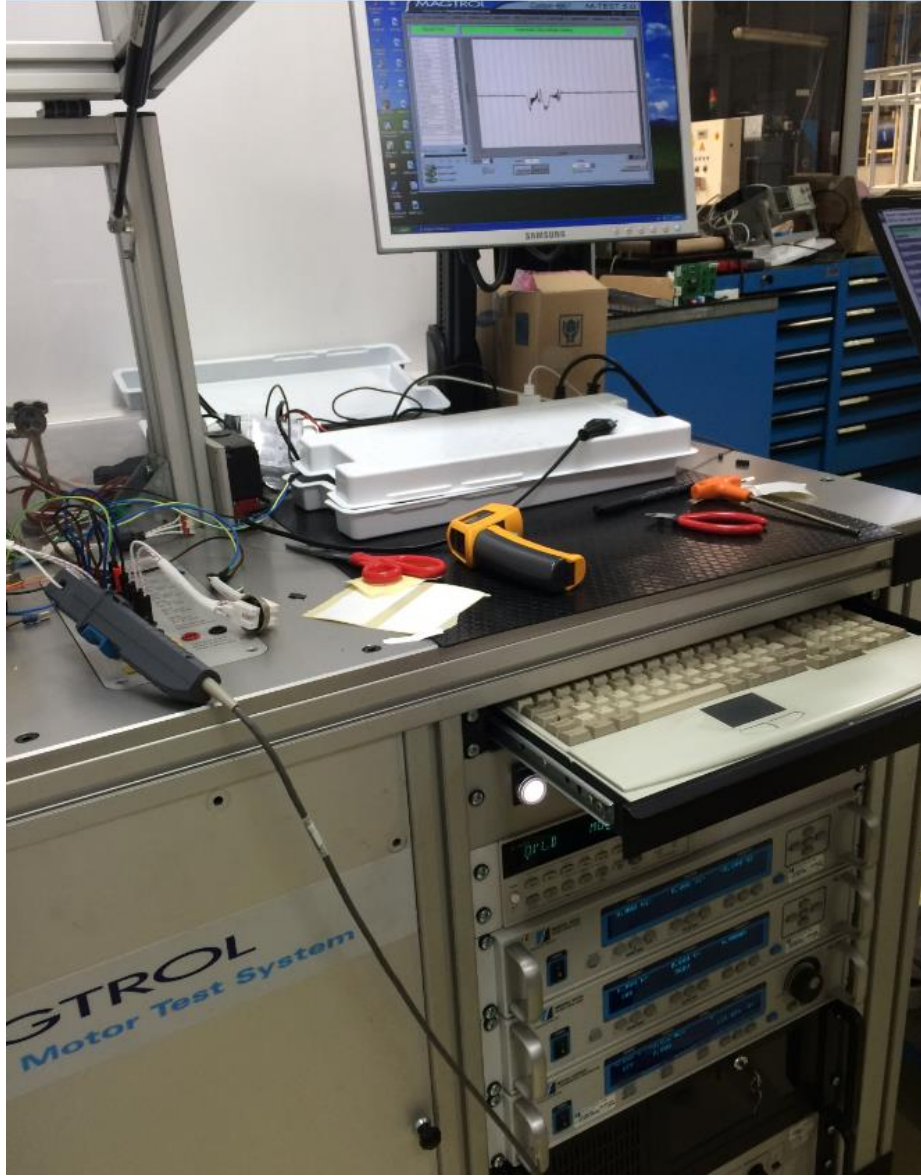
Çizelge incelendiğinde rotor ile mıknatıslar arasında tanımlanan hava aralığı ortadan kaldırıldığında endüklenen gerilimin tepe değeri 81 V olarak elde edilmiştir. Test sonucu ile karşılaştırma yapıldığında analiz sonucunun %1.23 daha yüksek çıktığı ortaya çıkmıştır. Bu durum ile motor modeli üzerindeki en ufak değişikliklerin bile sonucu etkilediği açıkça görülmüştür.

3D analizler sonucunda gerçek motorun tasarımı birebir olarak modellenebildiğinden dolayı test sonuçları ile daha yakın bir sonuç vermiştir. Osiloskop görüntüsünden görüldüğü gibi saf sinüs biçiminde, gerilim harmonikleri olmayan bir zıt-EMK grafiği çalışma çıktısı olarak elde edilmiştir.

5.2.2 Moment ölçümleri

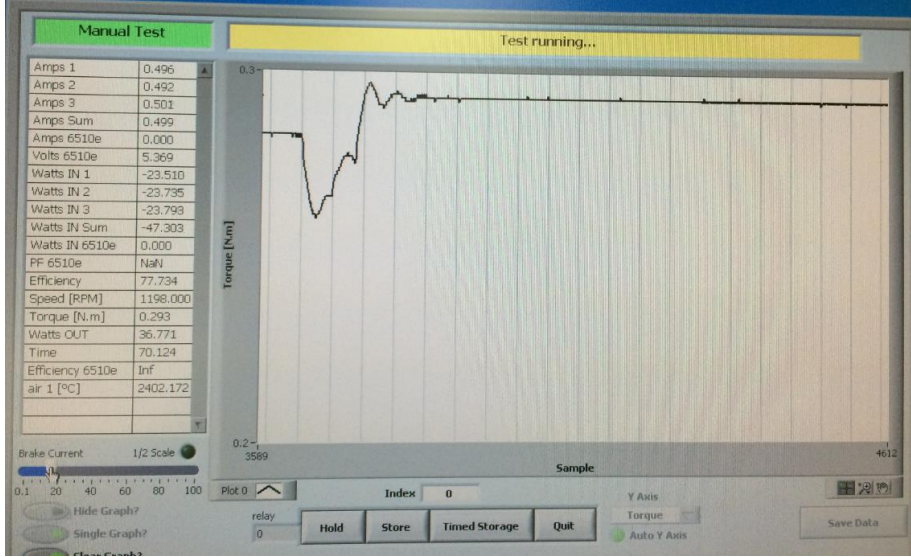
Boşta çalışma zıt-EMK ölçümünden sonra motorun yük altında performans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Motor dinamo fren test sisteminde yaklaşık olarak sabit 0.3 Nm'yi verecek şekilde yüklenmiştir. Sekiz kutup sayısına sahip olan motor için ayrıca bir motor kontrol sürücü kartı tasarlanmadığından dolayı elde var olan hazır bir motor

sürücü kartı ile bu motor sürülmüştür. Sürücü yazılımı SMSM için tam performanslı olarak uyumlaştırılmadığından dolayı ölçümler sırasında bir takım problemler ile karşılaşmıştır. Özellikle 4000 d/d ve daha yüksek hızlara çıkıldığında bu problemler meydana gelmiştir.



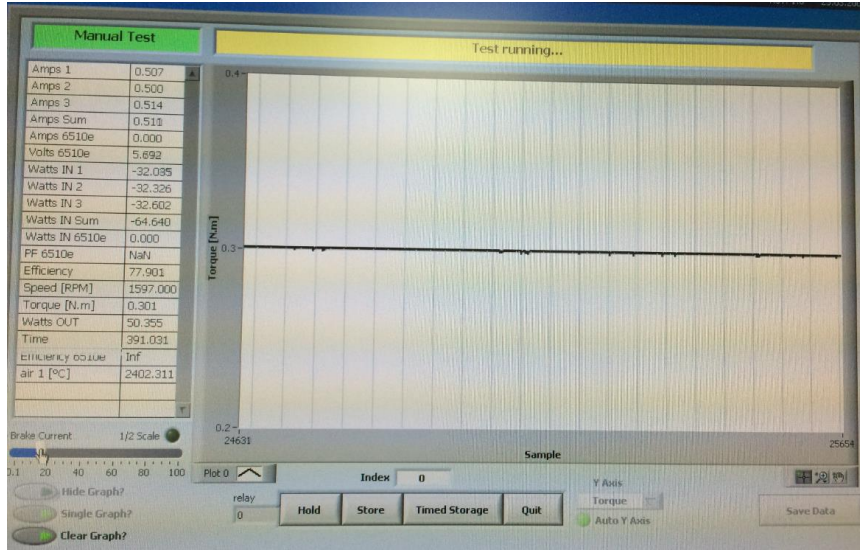
Şekil 5.8 : Dinamofren test sistemi.

Test sistemine monte edilen motor sürücü devre üzerinden enerjilendirilmiştir. Sürücü devre aynı zamanda bilgisayara bağlanarak haberleşme protokolü üzerinden sürücü devre ara yüzü ile kontrol edilmiştir. Hız referans bilgisi motora bilgisayardan verilmiştir. Motor için ayrıca alınan ölçümler ve yük bilgisi dinamo fren sistemi üzerinden kontrol edilmiştir. Aşağıda farklı hızlar için ölçümü alınan moment dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 5.9 : 1200 d/d yükte çalışma.

Yukarıdaki şekilde 1200 d/d için motor performansı görülmektedir. Motor kalkış anında belirli bir süre sonra kararlı hale gelmektedir. Bu hız değeri için 0.293 Nm moment değerini karşılayan akım değeri 0.499 A'dır. Şekil 5.10'da 1600 d/d için motorun kararlı hale geçtikten sonra moment dalga şekli verilmiştir.



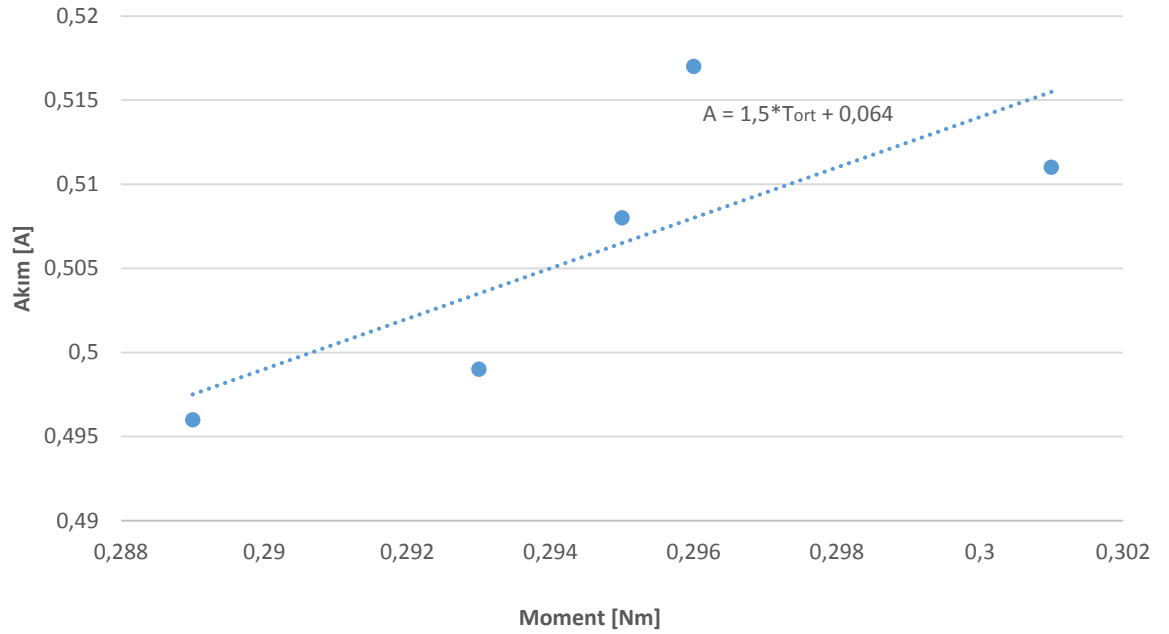
Şekil 5.10 : 1600 d/d yükte çalışma.

Motorun bu hızda 0.301 Nm yükte çalışmasına karşılık gelen akım değerinin 0.511 A olduğu görülmektedir. Sinüs kontrollü motorlarda yüksek hızlara çıkıldığında sürücü devreden çekilen akımın sabit bir değerde kaldığı bilinmektedir. Bu sebepten dolayı aşağıda yer alan çizelgede motor yükte çalışma durumu için alınan tüm değerler verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Moment-akım değerleri.

Hız[d/d]	Moment [Nm]	Akım [A]
1200	0.293	0.499
1600	0.301	0.511
2000	0.289	0.496
2700	0.295	0.508
3600	0.296	0.517

Motor bu sürücü kartı ile 3600 d/d'dan sonrasını sürerken çok yüksek bir gürültü ile çalışmış ve sağlıklı ölçüm alınamamıştır. Bu noktada hem sürücü kartı hem de motor test sisteminin kalibrasyonunun ölçüm sonuçlarını etkileyeceği göz önüne alınmıştır. Bunun için alınan ölçüm sonuçları neticesinde motorun moment-akım karakteristiği aşağıdaki grafikte yer aldığı bir biçimde çıkarılmıştır.



Şekil 5.11 : Moment-akım karakteristiği.

Yukarıdaki grafikte yer alan eğri test sisteminden elde edilen sonuçlar doğrultusunda çizdirilmiştir. Yani bu denklem tasarımı gerçekleştirilen SMSM'un moment-akım ilişkisini doğrudan veren bir doğrudur. Hem 2D hem 3D analizlerinde motor 0.53 A tepe değerine sahip sinüs akımları ile sürülmüştür. 2D ve 3D analizlerdeki farkı görme açısından aynı akım değeri ile sürülen modeller 2D için ortalama 0.307 Nm hava aralığı momenti elde edilirken 3D analizlerde 0.324 Nm hava aralığı momenti elde edilmiştir. Denklem (3.12)'de verilen moment sabiti formülüne göre gerçekleştirilen analizler ve test sonuçlarına göre moment sabiti bulunur. Yüzey mıknatıslı motorlarda zıt-EMK sabiti K_e ve moment sabiti K_t birbirine çok yakın bir değerdedir. Zıt-EMK

ölçümü sonucu K_e katsayısı 0.636 V.s/rad olarak bulunmuştur. 3D analiz sonucu ise %0.5 bağıl farkla 0.633 V.s/rad olarak elde edilmiştir. Buradan anlaşılacağı gibi motorun sahip olduğu moment sabiti K_t yaklaşık olarak 0.64 Nm/A değerine yakın olmak zorundadır. 3D analiz sonucuna göre motorun sahip olduğu K_t değeri 0.611 Nm/A'dır. Şekil 5.11'de yer alan moment-akım eğrisine göre 0.53 A verilerek elde edilen moment değeri test sonucuna göre 0.31 Nm'dir. O halde test sonuçlarına göre motorun sahip olduğu K_t değeri 0.58 Nm/A olarak hesaplanmıştır.

Sonuçlar göz önüne alındığında motor test sisteminden elde edilen sonuçlar neticesinde hesaplanan moment sabiti değerinin %9.375 bağıl fark ile bulunduğu görülmüştür. 3D analiz sonucuna göre ise bağıl fark %4.688'dir. Yükte moment testleri gerçekleştirilen motorun belirli bir hızdan sonrasına çıkamamasını torkmetre kalibrasyonunda meydana gelen problem kaynaklı olduğu çıkarımı yapmak mümkündür. Analiz sonuçlarına göre K_e ve K_t katsayılarının birbiriyle olan yakınlığı ve tutarlılığı torkmetrenin düzgün kalibre edilmediği anlamına gelir. Bu en büyük sebeplerden birisi olarak düşünülebilir. Diğer bir etken ise tasarlanan motor için düzgün olarak uyumlaştırılmamış ve yazılımı tam olarak hazır hale getirilmemiş olan motor kontrol devresidir.

Çizelge 5.4 : Moment sabiti analiz ve test sonuçları.

Yöntem	K_t [Nm/A]	Bağıl Fark [%]
SEA 3D	0.61	4.69
Test	0.58	9.38

5.2.3 Güç ve verim ölçümleri

Moment ölçümleri sırasında yaşanan problemlerden ötürü 3600 d/d üzerindeki hızlar için test sonucu alınamamıştır. Yükte performans testleri gerçekleştirilirken sürücü devre giriş gücü, motor giriş ve çıkış gücü, faz akım değerleri ve sargı sıcaklık ölçümleri iki sefer alınmıştır. Alınan bu değerler doğrultusunda motor verimi test sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Aşağıda yer alan çizelgede motor güç ölçüm sonuçları verilmiştir.

Güç ölçümleri test sistemi üzerinde hem motor giriş tarafından hem de sürücü devre üzerinden alınan giriş gücü değerleri ile ölçülmüştür. Şebekeden beslenen sürücü devre üzerinden motor enerjilendirilmiştir. Verim değerleri laboratuvar ortamında ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.5 : Güç ölçüm sonuçları I.

Hız[d/d]	Motor Giriş Gücü [W]	Motor Çıkış Gücü [W]	Kart Giriş Gücü [W]	Faz Akımı [A]
1197	44.40	37.73	53.90	0.499
1596	59.70	51.48	69.30	0.510
1996	73.20	64.59	84.50	0.497
2695	96.80	85.79	107.70	0.507
3594	127.40	112.91	138.50	0.513

Aşağıda yer alan çizelge 5.5'te ise güç ölçüm sonuçlarına ilişkin ikinci olarak alınan değerler verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Güç ölçüm sonuçları II.

Hız[d/d]	Motor Giriş Gücü [W]	Motor Çıkış Gücü [W]	Kart Giriş Gücü [W]	Faz Akımı [A]
1197	44.71	38.36	55.00	0.500
1597	57.50	50.00	67.85	0.509
1996	73.45	63.75	83.60	0.498
2695	95.82	85.23	107.10	0.511
3594	126.34	112.53	137.50	0.509

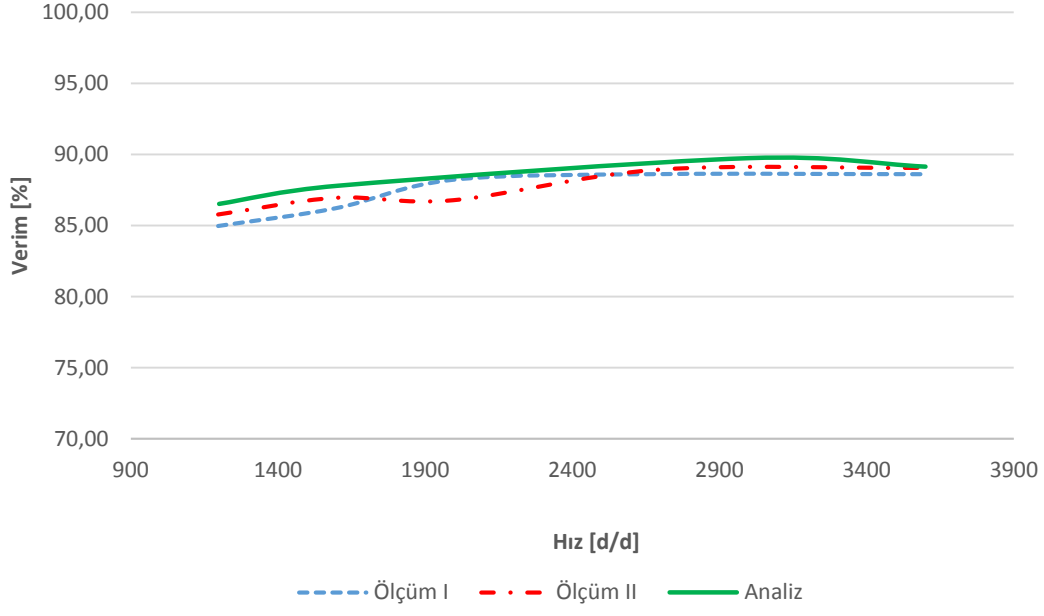
Sonuçlar incelendiğinde her iki ölçüm sonuçları arasında tutarlılık olduğu görülmektedir. Sürücü devre üzerinde her hız seviyesi için yaklaşık olarak 10 W kart kaybı meydana gelmektedir. Daha optimum bir sürücü devre tasarımı ile bu kayıpları azaltmak mümkündür.

Motor giriş ve motor çıkış gücü her iki ölçüm sonuçları kullanılarak motor verimi hesaplanmıştır. Aşağıdaki çizelgede iki ölçüm sonucu için de elde edilen verim sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Verim test sonuçları.

Hız[d/d]	Verim I [%]	Verim II [%]
1197	84.98	85.79
1597	86.23	86.96
1996	88.23	86.80
2695	88.63	88.95
3594	88.62	89.07

Aşağıda yer alan grafikte analiz sonuçlarına göre elde edilen verim değerleri ile birlikte ölçüm sonuçlarının yer aldığı grafik çizdirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre elde edilen değerler 3600 d/d'ya kadar alınmıştır. Verim grafiğinden görüldüğü üzere 3D analiz ve test sonuçları birbirine çok yakın elde edilmiştir.



Şekil 5.12 : Verim test ve analiz sonuçları.

6. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında buzdolabı kompresörü için sinüzoidal zıt-EMK'ya sahip ve sabit moment bölgesinde çalışan yüzey mıknatıslı senkron motor tasarımı ve sonlu eleman analizleri bilgisayar ortamında yapılmış, prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve laboratuvar ortamında boşta ve yükte çalışma durumları için testleri tamamlanmıştır. Dünya genelindeki büyük kompresör motor üreticilerinin yapmış oldukları motorlar detaylı olarak incelenmiş, hepsinin dört ya da altı kutuplu motorlar olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen motor sekiz kutba sahiptir. Bu açıdan bakıldığında buzdolabı uygulaması için daha önceden sekiz kutbun denenmemiş olması bu çalışmanın yenilikçi ve özgün yönünü ortaya koymaktadır. Mıknatısın geometrik yapısında gerçekleştirilen değişiklikler ile saf sinüs dalga şekline sahip gerilim dalga şekli elde edilmiştir.

Motor tasarım süreci ilk olarak oluk ve kutup sayısının bulunması ile başlamıştır. Bunun için detaylı teorik araştırmadan sonra kullanılabilir olan optimum kutup sayısı 8, oluk sayısı ise 12 olarak belirlenmiştir. Bunun ardından kompresör içinde yer alacağından dolayı dış mekanik kısıtları bilinen motorun stator dış çap ölçüsü ve paket boyu bilgileri kullanılarak analitik çözüm gerçekleştiren Speed[®] programı üzerinde motor geometrisi oluşturulmuştur.

Uygun oluk ve kutup sayısının belirlenmesinden sonra buzdolabı uygulamasında kullanılan sürekli mıknatıslı bir motor referans olarak seçilmiştir. Seçilen bu motor 6 oluk ve 4 kutuplu yüzey mıknatıslı fırçasız doğru akım motorudur. Motor boyutları ve malzeme bilgisi bilinen bu motorun SEA programı olan Maxwell[®]'de modeli oluşturularak 2D ve 3D elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 2D analizleri tamamlanan motorda vuru momentini tepe değerine, boşta çalışma durumu için zıt-EMK dalga şekline, yükte farklı hız çalışma durumları için çıkış momentine, kayıp ve verim değerlerine bakılmıştır. 2D analiz sonuçları incelendiğinde moment titreşimleri ve moment dalgalılığı yüksek olan bir tasarım olduğu sonucuna varılmıştır. Vuru moment seviyesi %30 ve moment dalgalılığı %63 olarak elde edilmiştir. Trapezoidal bir zıt-EMK dalga şekline sahip olan bu motorun stator sargılarında 1200

d/d hızında endüklenen gerilim değeri 99.73 V olarak bulunmuştur. Toplam harmonik distorsiyon seviyesi ise %18.35'tir. Verim anlamında ise 1200-4500 hız aralığında %81-87 arasında değişkenlik göstermektedir. 2D analizlerin tamamlanmasından sonra motor modeli Maxwell® 3D'de modellenerek analizleri tamamlanmıştır. 3D analizleri gerçekleştirmedeki temel sebep rotorda yer alan mıknatısların ve rotor paketinin stator paket yüksekliğinden 5 mm daha uzun olmasıdır. 2D analizlerde paket boyu stator, rotor ve mıknatıslar için eşit olarak alınabildiğinden dolayı bu analizlerde mıknatıs etkisi tam anlamıyla incelenememektedir. Sonuçlar incelendiğinde vuruğu momenti tepe değeri 2D analiz sonucunda 89.69 mNm iken 3D analiz sonucunda 97.07 mNm olarak bulunmuştur. Zıt-EMK tepeden tepeye değeri ise 1.72 V daha yüksek elde edilmiştir. 2D analizlerde motor akımı 0.3 Nm verecek şekilde verilmiştir. 3D analizde de motor aynı akım değeri verilerek sürüldüğünde 0.34 Nm çıkış momenti elde edilmiştir. Yani aynı akım değeri ile sürülen 3D analizde %13.3 daha yüksek çıkış momenti elde edilmiştir. Verim değerleri ise 3D analizler sonucunda %83-88 aralığında değişmektedir. Referans model analizleri sonucunda moment dalgalılığı yüksek bir motorun incelendiği ortaya konmuştur.

Ön tasarım süreci Speed® üzerinde gerçekleştirilen sürekli mıknatıslı senkron motorun analitik çıktıları incelendiğinde trapezoidal zıt-EMK dalga şekline sahip olduğu görülmüştür. Tezin amacı olarak sinüzoidal gerilim dalga şekline sahip motor tasarım hedefi ortaya konduğundan dolayı Maxwell® üzerinde gerekli parametrik çalışmalar yapılarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Nihai model tamamlandığında 106 mm stator dış çapına sahip, 28 mm paket yüksekliği olan yüzey mıknatıslı 12 oluk 8 kutuplu motor geometrisi iki boyutlu olarak tamamlanmıştır. İlk olarak SMSM için 2D analizler gerçekleştirilmiştir. Vuruğu momenti analizi incelendiğinde tasarımın 16.4 mNm tepe değerine sahip olduğu görülmüştür. Zıt-EMK analizinden de dalga şeklinin sinüzoidal olduğu ve 1200 d/d hızı için tepeden tepeye değerinin 77.6 V olduğu sonucu elde edilmiştir. Yükte çalışma analizleri için 0.53 A tepe değerine sahip sinüs akım ile beslenen motorun ortalama 0.307 Nm hava aralığı momentine sahip olduğu görülmüştür. Moment dalgalılığı %10.78 ve vuruğu momenti seviyesi %5.3 olarak analiz sonuçları ile elde edilmiştir. 1200-4500 d/d aralığında verim ise %86.5-90 olarak değişkenlik göstermiştir. Alternatif olarak gerçekleştirilen motor tasarımında da rotor paket boyu stator paket boyundan daha uzundur. Stator paketi 28 mm iken rotor paketi ve sürekli mıknatıslar 32 mm olarak belirlenmiştir. Bu etkinin alternatif

motorda da etkisini incelemek amacıyla motor modeli 3D ortama aktarılarak analize hazır hale getirilmiştir. 3D analizler tamamlandıktan sonra motorun vuruğu momenti değerinin 24.22 mNm olduğu görülmüştür. Bu değer 2D analizde elde edilen sonuçtan 7.82 mNm daha yüksektir. Boşta alışma analizi tamamlandığında stator sargılarında endüklenen gerilim değerinin 1200 d/d hızında 79.6 V olarak elde edilmiştir. 2D analiz sonucuna göre 2 V'luk bir fark olduğu analizler sonucunda ortaya konmuştur. Yükte moment analizleri farklı hızlar için gerçekleştirilen motorun 2D analizde olduğu gibi 0.53 A tepe değerine sahip sinüs akım ile beslenmesi ile 0.324 Nm hava aralığı momenti elde edilmiştir. 2D analize göre 0.017 Nm daha yüksek hava aralığı momenti 3D analizler sonucunda elde edilmiştir. Moment dalgalılığı %10.23 olan motorun vuruğu momenti seviyesi ise %7.5 olarak bulunmuştur. Verim ise 1200-4500 d/d hız aralığı için %86.5-90 aralığında çıkmıştır. Hem 2D hem de 3D analiz sonuçlarına göre toplam harmonik distorsiyon seviyesinin %1'in altında olduğu grlmştir. alternatif model için elde edilen analiz sonuçlarına göre 3D analizlerde mıknatıs etkisi açık bir şekilde çalışma çıktısı olarak ortaya konmuştur. Referans model ile karşılaştırıldığında alternatif modelin daha verimli, moment dalgalılığı daha düşük, moment titreşim seviyesi daha az ve daha kompakt bir motor olduğu grlmektedir. Alternatif motor tasarımı daha az malzeme kullanılarak maliyet anlamında daha ucuz bir motor üretim sürecimi tamamlanmaktadır. 40 mm paket boyuna sahip referans motor yerine 28 mm paket boyuna sahip alternatif motor ile g ve moment yoğunluğu daha yüksek bir tasarım ortaya konmuştur.

Referans motor modeli ve alternatif motor modeli birim hacimden alınan moment olarak kıyaslandığında 12/8 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motorun daha iyi bir tasarım olduğu grlmştir. Nm/m³ olarak iki motor karşılaştırılığında 9/6 motorun 766 Nm/m³ ve 12/8 motorun 1249 Nm/m³ değere sahip olduğu hesaplanmıştır. Çalışmanın en büyük hedeflerinden birisi olan daha kompakt yapıda bir motor tasarımı sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda gerçekleştirilmiştir. Bu motor tasarımı ile birim hacimden %38.7 daha fazla moment elde edilmiştir. Altı kutuplu motorda 51 cm³ hacminde mıknatıs kullanılırken 8 kutuplu motorda 20.8 cm³ hacminde mıknatıs kullanılmıştır. Böylece %59.2 daha az mıknatıs kullanılarak maliyet anlamında da önemli bir sonuç elde edilmiştir. Aşağıda yer alan çizelgede referans motor ve alternatif motora ilişkin karşılaştırma değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Referans ve alternatif model karşılaştırması.

		Referans Model		Alternatif Model	
Vuruntu Momenti [mNm]		89,69	97,07	16,4	24,22
Zıt-EMK [V]		99,73	101,5	77,6	79,6
THD [%]		18,35	19,22	0,77	0,75
T_{dal} [%]		63,65	57,06	10,78	10,23
$T_{vuruntu}$ [%]		29,99	28,38	5,33	7,48
Verim [%]	1200 [d/d]	81,78	83,26	86,44	86,53
	1600 [d/d]	84,59	85,61	88,07	87,8
	3000 [d/d]	88,13	87,7	89,89	89,75
	4500 [d/d]	87,86	87,36	90	89,72

Bilgisayar ortamında tasarım ve analizi tamamlanan SMSM'un prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için stator ve rotor laminasyonları ve mıknatıslar için teknik çizimler hazırlanmıştır. Stator sac laminasyonları 0.5 mm kalınlığındadır ve lazer kesim yöntemi ile kullanıma hazır hale getirilmiştir. Saclar daha sonra pimler ile paketlenerek stator hazır hale getirilmiştir. Rotor ise tek parça olarak üretilmiş, mıknatıslar 0.1 mm kalınlığındaki yapışken ile rotor yüzeyine yapıştırılmıştır. Bütün parçalar hazır hale geldikten sonra motor toplanmış ve test edilmeye hazır hale gelmiştir. Laboratuvar ortamında boşta ve yükte çalışma için testler tamamlanmıştır. Alınan zıt-EMK ölçümüne göre 1200 d/d hızı için tepeden tepeye endüklenen gerilimin değeri 80 V olarak ölçülmüştür. 2D analiz sonucunun test sonucuna göre %3, 3D analiz sonucunun test sonucuna göre %0.5 bağıl fark olduğu çıkarımı yapılmıştır. Daha sonra yükte çalışma testleri dinamo fren test sisteminde gerçekleştirilmiştir. Motor test sistemine monte edildikten sonra 0.3 Nm yük altında farklı hızlar için moment ve akım ölçümleri elde edilmiştir. Motor tasarımına uygun bir kart tasarlanmadığı için elde olan bir sürücü devre üzerinden motor kontrol edilmiştir. Motor testleri gerçekleştirilirken 3600 d/d hızın üzerine çıkılmamasındaki etkenlerden birisi budur. Moment ve akım ölçüm sonuçlarından elde edilen değerler doğrultusunda motora ait moment-akım karakteristiği belirlenmiştir. Elde edilen grafiğe göre motorun moment sabiti K_t sabiti hesaplanmıştır. Yüzey mıknatıslı motorlarda K_e ve K_t değerleri birbirine çok yakın değere sahiptir. Zıt-EMK analiz ve test sonuçlarına göre bu değerler 3D analiz için 0.636 V.s/rad, test sonucuna göre ise 0.633 V.s/rad olarak elde edilmiştir. Yani bu motorun sahip olması gereken moment sabiti K_t değerinin de 0.63 V.s/rad değerine yakın bir değerde olması gerekmektedir. Test sonuçlarına göre elde edilen moment-hız eğrisi baz alınarak elde edilen K_t değeri

0.58 Nm/A olarak bulunmuştur. 3D analiz sonucuna göre ise bu değer 0.61 Nm/A'dir. Test sonucundan elde edilen K_t sabitinin saımıklığının fazla olması torkmetre kalibrasyonunda problem olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum da motorun yüksek hızlara çıkamamasında bir etken oluşturabileceği diğer bir husus olarak görölmektedir. Motor giriş ve çıkış güç ölçümlerinden elde edilen verim değerinin 1200-3600 d/d hız aralığı için %86.5-89 aralığında değiştii görölmüştür.

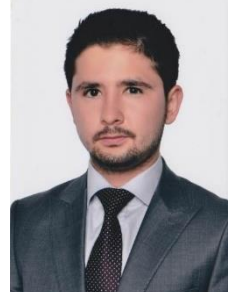
Bu çalışma sadece buzdolabı uygulaması için değil diğer beyaz eşya uygulamalarında kullanılacak motor tasarımlarına altyapı için destek olacak niteliktedir. Sürekli gelişen malzeme teknolojileri ve üretim tekniklerinde meydana gelen ilerlemeler ile daha kompakt ve daha verimli motor tasarımları gerçekleştirilebilir. İleriki bir çalışma olarak motorda kullanılan malzemeler ile gerekli optimizasyonlar sağlanarak daha iyi bir motor tasarım çalışması yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <http://www.emo.org.tr/ekler/7007a4dbe30c874_ek.doc>, alındığı tarih 04.05.2015.
- [2] **Jacek, F. G., Wing, Mitchell.** (1997). *Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications*, Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- [3] **Hendershot J. R., ve Miller, T. J. E.** (1994). *Design of Brushless Permanent Magnet Motors*, Magna Physics Publishing and Oxford University Press, USA.
- [4] **Hanselman, D. C.** (2003). *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, 2nd edition: The Writer's Collective, Magna Physics Publishing, USA.
- [5] **Wang, D., Wang, X., Kim, M. K., Jung, S. Y.** (2012). Integrated Optimization of Two Design Techniques for Cogging Torque Reduction Combined With Analytical Method by a Simple Gradient Descent Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 8.
- [6] **Chabchoub, M., et al.** (2012). PMSM Cogging Torque Reduction: Comparison between different shapes of magnet, *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*.
- [7] **Somanatham, R., Prasad, P.V.N., Rajkumar, A.D.** (2006). Reduction of Cogging Torque in PMSM Motor with Reduced Stator Tooth Width and Bifurcated Surface Area Using Finite Element Analysis, *Power Electronics, Drives and Energy Systems PEDES International Conference*.
- [8] **Wu, L., Jin, W., Ni, J., Ying, J.** (2007). A Cogging Torque Reduction Method for Surface Mounted Permanent Magnet Motor, *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp: 769-773.
- [9] **Dönmezer, Y., Ergene, L.** (2009). Cogging Torque Analysis of Interior-Type Permanent-Magnet Brushless DC Motor Used in Washers, *Advanced Electromechanical Motion System&Electric Drives Joint Symposium*.
- [10] **Ahmed, S., Lefley, P.** (2009). Study of the Impact of Asymmetrical Stator Pole Arc on the Cogging Torque for Single Phase Permanent Magnet BLDC Motor, *International Conference on Electric Power and Energy Conversion System EPECS'09*, pp: 1-4.
- [11] **Yang, B., Park, H., Kwon, B.** (2006). Design of Flux Barrier for Reducing Torque Ripple and Cogging Torque in IPM type BLDC Motor, *12th IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, p. 241.

- [12] **Lee, J. G., Lee, Y. K., Park, G. S.** (2013). Effects of V-Skew on the Cogging Torque in Permanent Magnet Synchronous Motor, *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp: 122-124.
- [13] **Farshadnia, M., et al.** (2014). Analysis of MMF and Back-EMF Waveforms for Fractional-Slot Concentrated-Wound Permanent Magnet Machines, *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp: 1976-1982.
- [14] **EL-Refaie, A. M.** (2010). Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1.
- [15] **EL-Refaie, A. M., Zhu, Z. Q., Jahns, T. M., Howe, D.** (2008). Winding Inductances of Fractional Slot-Surface-Mounted Permanent Magnet Brushless Machines, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS'08*, pp: 1-8.
- [16] **Alexandrova, J., Jussila, H., Nerg, J., Pyrhönen, J.** (2010). Comparison Between Models for Eddy-Current Loss Calculation in Rotor Surface-Mounted Permanent Magnets, *XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM*, pp: 1-6.
- [17] **Fornasiero, E., Bianchi, N., Bolognani, S.** (2012). Slot Harmonic Impact on Rotor Losses in Fractional-Slot Permanent-Magnet Machines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, No.6, pp: 2557-2564.
- [18] **Wang, J., Atallah, K., Zhu, Z. Q., Howe, D.** (2008). Modular Three-Phase Permanent Magnet Brushless Machines for in Wheel Applications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57.
- [19] **Tanç, G.** (2014). *Elektrikli Bisikletler için Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı ve Üretimi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [20] **Salminen, P.** (2004). *Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors for Low Speed Applications*, Lappeenranta University of Technology.
- [21] **Boduroğlu, T.** (1986). *Elektrik Makine Dersleri (Teori, Hesap ve Konstrüksiyon) Cilt III*, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- [22] **Kocabaş, D. A., Mergen, A. F.** (2007). *Elektrik Makinalarında Sargılar*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [23] **CD-adapco Speed Manual.** (2011). *PC-BDC 9.1 User's Manual*.
- [24] **Güneri, S.** (2014). *Transformatörde Kısa Devre Kuvvetleri*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [25] **Dönmezer, Y.** (2010). *Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment Titreşimlerinin Azaltılması*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [26] **Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.** (2003). *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Serhat GÜNERİ
Doğum Yeri ve Tarihi : Kütahya, 1989
E-Posta : serhat.gnr@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Bölümü

YAYIN LİSTESİ:

- Güneri, S., Kömürgöz, G., Gündoğdu, T., Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu. *Transformatörde Kısa Devre Kuvvetleri*, 199-203, 27-29 Kasım 2014, Bursa, Türkiye.