

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK YÖNLÜ HAREKET KABİLİYETİNE SAHİP SABİT
MIKNATISLI KÜRESEL MOTORUN TASARIMI

Umut Yusuf GÜNDOĞAR

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL

Ocak, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK YÖNLÜ HAREKET KABİLİYETİNE SAHİP SABİT MIKNATISLI
KÜRESEL MOTORUN TASARIMI**

Umut Yusuf GÜNDOĞAR tarafından hazırlanan tez çalışması 03.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr.Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ece Olcay GÜNEŞ, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Çok Yönlü Hareket Kabiliyetine Sahip Sabit Mıknatıslı Küresel Motorun Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Umut Yusuf GÜNDOĞAR

İmza

TEŞEKKÜR

Hayatımın her anında yanımda olduklarını karşılıksız hissettiren, üzerimde emeği çok fazla olan ve desteklerini her zaman gösteren anneme, babama, kardeşime, dedeme ve anneaneme çok teşekkür ediyorum. Özellikle, hayatımın her anında ve her alanında emeklerinin çok büyük olduğu annem Fatma PİLAVCI'ya, dedem Hasan PİLAVCI'ya ve anneannem Ayşe PİLAVCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Doktora tez çalışmamın her aşamasında desteklerini koşulsuz gösteren, çalışmalarımın ilerlemesinde çok büyük emekleri olan kıymetli tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Doktora tez çalışmam boyunca çok değerli katkılar sağlayan sayın Prof.Dr. İbrahim ŞENOL'a, Prof.Dr. Ece Olcay GÜNEŞ'e ve Prof.Dr. Yusuf ÖNER'e çok teşekkür ediyorum.

Doktora tez çalışmalarımda her zaman yanımda olan ve ihtiyaç duyduğum her konuda yardımları ile destek olan Numesys İleri Mühendislik AŞ'ye çok teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamda küresel motorun üretiminde destek sağlayan FEMSAN Elektrik Motorları AŞ'ye çok teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamda küresel motorun testlerinin gerçekleştirilmesinde destek sağlayan ADVENS Mühendislik AŞ'ye çok teşekkür ediyorum.

Doktora çalışmalarımda destek sağlayan ve doktora tez çalışmamda küresel motorun test süreçlerinin gerçekleştirilmesinde destek sağlayan FİGES AŞ'ye çok teşekkür ediyorum.

Umut Yusuf GÜNDOĞAR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xx
ÖZET	xxiv
ABSTRACT	xxvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	12
1.3 Hipotez	13
2 KÜRESEL MOTORLAR	14
2.1 Küresel Motorların Çalışma Prensibi	14
2.2 Küresel Motorların Çeşitleri	15
2.2.1 Küresel İndüksiyon Motorlar.....	15
2.2.2 Sabit Mıknatıslı Küresel Motor.....	17
2.2.3 Değişken Relüktanslı Küresel Motor	23
2.2.4 Ultrasonik Küresel Motor	25
2.2.5 Küresel Adım Motorlar	26
2.3 Küresel Motorların Kullanım Alanları.....	27
2.4 Küresel Motorlarda Manyetik Akı, Kuvvet ve Moment.....	28
2.4.1 Elektromanyetik Alanın Temel Denklemleri.....	28
2.4.2 Manyetik Akı ve Enerji.....	29
2.4.3 Kuvvet ve Moment.....	30
2.4.4 Güç Tüketimi	32
3 KÜRESEL MOTORUN TASARIM OPTİMİZASYONU VE ELEKTROMANYETİK ANALİZİ	33
3.1 Küresel Motor Modellerinin Oluşturulması.....	33
3.1.1 Küresel Motor Modellerinin Stator Yapıları	34
3.1.2 Küresel Motor Modellerinin Rotor Yapıları	36
3.1.3 Küresel Motor Modellerinin Mekanik Yapıları.....	38
3.2 Küresel Motor Modellerinin Elektromanyetik Analizleri	39
3.3 Küresel Motor Modellerinin Elektromanyetik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	42

3.3.1	Küresel Motorun Gömülü Düz Mıknatıs Yapısındaki Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizleri.....	42
3.3.2	Küresel Motorun Gömülü V-Tipi Mıknatıs Yapısındaki Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizleri.....	58
3.3.3	Küresel Motorun Yüzey Mıknatıs Yapısındaki Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizleri	74
3.4	Küresel Motorun Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizlerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Prototipi Gerçekleştirilecek Motorun Belirlenmesi	90
4	NİHAİ KÜRESEL MOTOR MODELİ VE ELEKTROMANYETİK ANALİZLERİ	93
4.1	Küresel Motorun Nihai Tasarımının Oluşturulması	93
4.1.1	Nihai Küresel Motorun Tasarımının Stator Yapısı	94
4.1.2	Nihai Küresel Motorun Tasarımının Rotor Yapısı	96
4.1.3	Nihai Küresel Motorun Tasarımının Mekanik Yapısı	98
4.2	Nihai Küresel Motor Modelinin Elektromanyetik Analizleri.....	101
4.2.1	Nihai Küresel Motor Tasarımının Mıknatıs Yapısının Manyetik Akı Yoğunluğu	103
4.2.2	Nihai Küresel Motor Tasarımının Güç Tüketimi	104
4.2.3	Nihai Küresel Motorun Yüksüz Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu	105
4.2.4	Nihai Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu	108
4.2.5	Nihai Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Kuvvet ve Moment Değerleri.....	110
5	KÜRESEL MOTOR PROTOTİPİNİN ÜRETİMİ	113
5.1	Küresel Motorun Statorunun Üretimi	113
5.2	Küresel Motorun Rotorunun Üretimi.....	114
5.3	Küresel Motorun Mekanik Aksamının Üretimi.....	114
6	PROTOTİP KÜRESEL MOTORUN TESTLERİ	117
6.1	Prototip Küresel Motorun Test Düzenegi.....	117
6.2	Küresel Motorun Yüksüz Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu Değerlerinin Ölçülmesi.....	119
6.3	Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu Değerlerinin Ölçülmesi.....	119
6.4	Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Kuvvet ve Moment Değerlerinin Ölçülmesi.....	121
7	SONUÇ VE ÖNERİLER	123
	KAYNAKÇA	128

SİMGE LİSTESİ

J	Akım Yoğunluğu
μ_r	Bağıl Manyetik Geçirgenlik
μ_o	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
r	Dönme merkezinden hareket noktasına olan moment kolu
V_{vol}	Elektromekanik Sistemin Hacmi
V	Gerilim
P	Güç
W	Güç birimi
θ	Hareket açısı değeri
Hz	Hertz
F	Kuvvet
s	Kuvvetin elde edileceği bölgeyi çevreleyen bir sınır yüzeyi
n	Kuvvetin elde edileceği bölgeyi çevreleyen sınır yüzeyinin normali
α	Motorun X eksenine etrafındaki eksenel hareketindeki açı değeri
β	Motorun Y eksenine etrafındaki eksenel hareketindeki açı değeri
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
H	Manyetik Alan Şiddeti
W_m	Manyetik Enerji
F_{mm}	Manyetomotor Kuvveti
A	Manyetik Vektör Potansiyeli
B_i	Mıknatısın içsel manyetik akı yoğunluğu değeri
B_r	Mıknatısın remanans manyetik akı yoğunluğu değeri
H_c	Mıknatısın manyetik zorlayıcı kuvvet değeri
T	Moment
N	Newton
Nm	Newton-metre
N_s	Sarım sayısı
i	Sargılara ve bobinlere tanımlanan akım
I	Statordaki enerjilendirilen sargı akımı
R	Statordaki enerjilendirilen elektromıknatısların direnci
T	Tesla

KISALTMA LİSTESİ

DC	Direct Current (Doğru Akım)
EMK	Elektromotor Kuvvet
FR	Torque Control Based on Frequency (Frekans Tabanlı Moment Kontrolü)
HB	Torque Control Based on Phase Difference and Frequency (Faz Farkı ve Frekans Tabanlı Moment Kontrolü)
NdFeB	Neodyum-Demir-Bor
OLC	Open Loop Controller (Açık Çevrim Kontrolör)
PH	Torque Control Based on Phase Difference (Faz Farkı Tabanlı Moment Kontrolü)
PD	Proportional-Derivative (Oransal-Türevsel)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SMC	Sliding Mode Controller (Kayan Kipli Kontrolör)
SmCo	Samaryum-Kobalt
SMKM1	Her bir stator bloğunda 6 sargı olmak üzere, 3 bloklu 18 sargılı stator yapısındaki sabit mıknatıslı küresel motor
SMKM2	Her bir stator bloğunda 8 sargı olmak üzere 3 bloklu 24 sargılı stator yapısındaki sabit mıknatıslı küresel motor

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Küresel indüksiyon motorunun rotoru ve statoru [24]	15
Şekil 2.2 Küresel indüksiyon motoru [23]	16
Şekil 2.3 İki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip küresel motor [57] ...	16
Şekil 2.4 Sabit mıknatıslı küresel motor [30-34].....	17
Şekil 2.5 Sabit mıknatıslı küresel motor a) Motor b) Küresel rotor c) Eksenel hareket için demir nüveli stator d) Eksenel hareket için ilk stator e) Eksenel hareket için ikinci stator f) Rotasyonel hareket için stator [35]	18
Şekil 2.6 Hareketi sağlayan mekanik elemanlar a) Küresel mafsallık bileşeni b) Küresel yataklama bileşeni [35]	18
Şekil 2.7 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor [39,40].....	19
Şekil 2.8 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor a) Motorun detaylı tüm bileşenleri b) Sabit mıknatısların manyetizasyon yönleri [39,40]	20
Şekil 2.9 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor a) Motorun tüm bileşenleri b) Motorun YZ düzlemindeki kesitte gösterilen X eksenini etrafındaki $\pm 25^\circ$ açı değerindeki eksenel hareketi [41]	20
Şekil 2.10 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor [42]	21
Şekil 2.11 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor ve bileşenleri [42]	21
Şekil 2.12 Radyal olarak yönlendirilmiş halka şeklindeki sabit mıknatıs [42]	22
Şekil 2.13 Küre yapısındaki sabit mıknatıslı küresel aktüatör a) Aktüatör b) Rotor c) Stator [43].....	22
Şekil 2.14 Sabit mıknatıslı küresel motorun prototipi [45-48]	23
Şekil 2.15 Küresel aktüatörün yapısı [49]	23
Şekil 2.16 Değişken relüktanslı küresel motorun detaylı yapısı [50-52].....	24
Şekil 2.17 Değişken relüktanslı küresel motorun birleştirilmiş yapısı [50-52]....	24
Şekil 2.18 Dış rotorlu ultrasonik küresel motor [11].....	25
Şekil 2.19 Küresel ultrasonik motor [12]	25
Şekil 2.20 Küresel adım motorunun tasarımı [59]	26
Şekil 2.21 Küresel adım motoru [60].....	27
Şekil 2.22 Küresel adım motorunun rotoru ve statoru a) Stator b) Rotor [60] ..	27

Şekil 2.23 Küresel motorlarda manyetik alan etkileşimi a) Enerjilendirilmemiş motor b) X eksenini yönünde hareket etmesi için enerjilendirilmiş motor c) Y eksenini yönünde hareket etmesi için enerjilendirilmiş motor	29
Şekil 2.24 Kuvvet değerinin elde edilmesi	32
Şekil 2.25 Moment değerinin elde edilmesi	32
Şekil 3.1 6 kutuplu, üç bloktan oluşan SMKM1 motor modelinin stator yapısı a) Üç bloklu stator b) Statorun ölçüleri c) Stator bloklarının boyutları ...	34
Şekil 3.2 8 kutuplu üç bloktan oluşan SMKM2 motor modelinin stator yapısı a) Üç bloklu stator b) Statorun ölçüleri c) Stator bloklarının boyutları	35
Şekil 3.3 SMKM1 motor modelinin stator sargı yapısı a) Stator sargılarının tümü b) Statorun bir bloğundaki sargılar c) Sargıların ölçüleri	35
Şekil 3.4 SMKM2 motor modelinin stator sargı yapısı a) Stator sargılarının tümü b) Statorun bir bloğundaki sargılar c) Sargıların ölçüleri	36
Şekil 3.5 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorunda Steel-1008 mal SMKM1 tasarımları için pozitif	37
Şekil 3.6 SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin rotorunda bulunan sabit mıknatısların yönleri.....	37
Şekil 3.7 SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinde rotorunun hareketini sağlayan mekanik aksam	38
Şekil 3.8 SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin dış gövdesi.....	39
Şekil 3.9 SMKM1 motor modelinin genel yapısı a) Gömülü düz mıknatıslı yapı b) Gömülü V-tip mıknatıslı yapı c) Yüzey mıknatıslı yapı	39
Şekil 3.10 SMKM2 motor modelinin genel yapısı a) Gömülü düz mıknatıslı yapı b) Gömülü V-tip mıknatıslı yapı c) Yüzey mıknatıslı yapı.....	39
Şekil 3.11 SMKM1 motor modelinin hareket eksenlerine göre enerjilenen stator sargıları ve hareket yönleri a) Pozitif X yönündeki hareketi b) Negatif X yönündeki hareketi c) Pozitif Y yönündeki hareketi d) Negatif Y yönündeki hareketi	40
Şekil 3.12 SMKM2 motor modelinin hareket eksenlerine göre enerjilenen stator sargıları ve hareket yönleri a) Pozitif X yönündeki hareketi b) Negatif X yönündeki hareketi c) Pozitif Y yönündeki hareketi d) Negatif Y yönündeki hareketi	41
Şekil 3.13 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorunda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....	43
Şekil 3.14 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorunda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki	

manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....43

Şekil 3.15 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....44

Şekil 3.16 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....44

Şekil 3.17 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları.....45

Şekil 3.18 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları.....45

Şekil 3.19 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....46

Şekil 3.20 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....46

Şekil 3.21 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....47

Şekil 3.22 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....47

Şekil 3.23 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X

yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....48

Şekil 3.24 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....48

Şekil 3.25 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....49

Şekil 3.26 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....49

Şekil 3.27 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....50

Şekil 3.28 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....50

Şekil 3.29 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....51

Şekil 3.30 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....51

Şekil 3.31 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X

yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....58

Şekil 3.32 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....59

Şekil 3.33 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....59

Şekil 3.34 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....60

Şekil 3.35 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....60

Şekil 3.36 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....61

Şekil 3.37 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....61

Şekil 3.38 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....62

Şekil 3.39 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki

manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....62

Şekil 3.40 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....63

Şekil 3.41 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....63

Şekil 3.42 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....64

Şekil 3.43 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....64

Şekil 3.44 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....65

Şekil 3.45 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....65

Şekil 3.46 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....66

Şekil 3.47 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X

yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....66

Şekil 3.48 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....67

Şekil 3.49 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....74

Şekil 3.50 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....75

Şekil 3.51 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....75

Şekil 3.52 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....76

Şekil 3.53 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....76

Şekil 3.54 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....77

Şekil 3.55 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....77

- Şekil 3.56** Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....78
- Şekil 3.57** Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....78
- Şekil 3.58** Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....79
- Şekil 3.59** Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....79
- Şekil 3.60** Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....80
- Şekil 3.61** Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....80
- Şekil 3.62** Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....81
- Şekil 3.63** Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....81
- Şekil 3.64** Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki

manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....	82
Şekil 3.65 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....	82
Şekil 3.66 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde.....	83
Şekil 3.67 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 ve SMK2 tasarımları için kuvvet değerleri.....	91
Şekil 3.68 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 ve SMK2 tasarımları için moment değerleri	92
Şekil 4.1 Nihai tasarım modeli oluşturulan ve prototip üretimi gerçekleştirilecek olan yüzey mıknatıslı 6 kutuplu stator yapısındaki küresel motor a) Küresel motorun dış ve iç yapısı b) Küresel motorun iç yapısı.....	94
Şekil 4.2 Küresel motorun 6 kutuplu 3 bloktan oluşan stator yapısı a) Stator yapısı b) Statorun ölçüleri c) Üç bloklı statorun boyutları.....	95
Şekil 4.3 Küresel motorun sargıları a) Stator sargılarının tümü b) Statorun bir bloğundaki sargılar c) Sargıların ölçüleri	96
Şekil 4.4 Küresel motorun statorunun genel yapısı	96
Şekil 4.5 Küresel motorun rotoru a) Rotor nüvesi b) Mıknatıslar c) Rotor.....	97
Şekil 4.6 Sabit mıknatısların yönleri	97
Şekil 4.7 Stator tutucularının genel yapısı a) Stator ve stator tutucuları b) Stator tutucuları ölçüleri c) Stator tutucuları	98
Şekil 4.8 Motorun dış gövdesinin genel yapısı a) Motorun dış gövdesi b) Dış gövdenin iç ve dış çapı ölçüleri c) Dış gövdenin yükseliği	99
Şekil 4.9 Motorun alt ve üst kapaklarının genel yapısı.....	99
Şekil 4.10 Hareketi sağlayan eksen sistemi a) Rotor ve hareketi sağlayan mekanik yapı b) Eksen kapağı c) Hareketi sağlayan eksenler	100
Şekil 4.11 Küresel motorun nihai tasarım ve prototip üretim modelinin tüm bileşenleri	100
Şekil 4.12 Küresel motorun nihai tasarım ve prototip modeli	101

Şekil 4.13	Küresel motorun pozitif X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları ve hareketi a) Motorun pozitif X eksen yönündeki $\beta = +45^\circ$ açı değerindeki hareketi b) Motorun X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları	102
Şekil 4.14	Küresel motorun negatif Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları ve hareketi a) Motorun negatif Y eksen yönündeki $\alpha = -45^\circ$ açı değerindeki hareketi b) Motorun Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları	103
Şekil 4.15	Küresel motorun SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C malzemeli yüzey mıknatıslarının manyetik akı yoğunluğu dağılımı	104
Şekil 4.16	Küresel motorun yüksüz çalışma durumundaki a) Manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı b) Manyetik akı yoğunluğunun skaler dağılımı	107
Şekil 4.17	Küresel motorun yüksüz çalışması durumunda hava aralığındaki a) Manyetik akı yoğunluğu dağılımı b) Manyetik akı yoğunluğu değişimi	107
Şekil 4.18	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerlerinde manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) $\alpha = +45^\circ$ açı değerinde motorun manyetik akı yoğunluğu b) $\alpha = -45^\circ$ açı değerinde motorun manyetik akı yoğunluğu	108
Şekil 4.19	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerlerinde manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) $\beta = +45^\circ$ açı değerinde motorun manyetik akı yoğunluğu b) $\beta = -45^\circ$ açı değerinde motorun manyetik akı yoğunluğu	109
Şekil 4.20	Küresel motorun yüklü çalışması durumunda a) Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu b) X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.....	110
Şekil 4.21	Küresel motorun yüklü çalışma durumundaki a) Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketindeki kuvvet değerleri b) X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketindeki kuvvet değerleri	111
Şekil 4.22	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda a) Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde moment değerleri b) X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde moment değerleri	111
Şekil 5.1	Prototip küresel motorun stator yapısı	113
Şekil 5.2	Prototip küresel motorun rotor yapısı	114
Şekil 5.3	Küresel motorun stator tutucuları	115
Şekil 5.4	Küresel motorun alt ve üst kapakları.....	115

Şekil 5.5	Rotorun hareketini sağlayan eksenler ve eksen milleri	116
Şekil 5.6	Prototip üretimi gerçekleştirilen küresel motor	116
Şekil 6.1	Küresel motorun manyetik akı yoğunluğunun ölçüldüğü test düzeneği	117
Şekil 6.2	Küresel motorun prototipinin kuvvet ve moment değerlerinin elde edilmesi için oluşturulan test düzeneği	118
Şekil 6.3	Küresel motorun yüksüz durumdaki manyetik akı yoğunluğu değerlerinin deneysel ve simülasyon sonuçları.....	119
Şekil 6.4	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun simülasyon ve test sonuçları.....	120
Şekil 6.5	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun analiz ve test sonuçları	120
Şekil 6.6	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde kuvvet değerlerinin analiz ve test sonuçları.....	121
Şekil 6.7	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde moment değerlerinin analiz ve test sonuçları.....	121
Şekil 6.8	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde kuvvet değerlerinin analiz ve test sonuçları.....	122
Şekil 6.9	Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde moment değerlerinin analiz ve test sonuçları.....	122

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	52
Tablo 3.2 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	52
Tablo 3.3 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	52
Tablo 3.4 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	53
Tablo 3.5 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	53
Tablo 3.6 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	53
Tablo 3.7 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	54
Tablo 3.8 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	54
Tablo 3.9 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	54
Tablo 3.10 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	55
Tablo 3.11 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	55
Tablo 3.12 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	55
Tablo 3.13 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	56

Tablo 3.14 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	56
Tablo 3.15 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	56
Tablo 3.16 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	57
Tablo 3.17 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	57
Tablo 3.18 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	57
Tablo 3.19 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	67
Tablo 3.20 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	68
Tablo 3.21 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	68
Tablo 3.22 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	68
Tablo 3.23 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	69
Tablo 3.24 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	69
Tablo 3.25 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	69
Tablo 3.26 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	70
Tablo 3.27 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	70

Tablo 3.28	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	70
Tablo 3.29	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	71
Tablo 3.30	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	71
Tablo 3.31	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	71
Tablo 3.32	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	72
Tablo 3.33	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	72
Tablo 3.34	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	72
Tablo 3.35	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	73
Tablo 3.36	Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	73
Tablo 3.37	Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	83
Tablo 3.38	Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	84
Tablo 3.39	Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	84
Tablo 3.40	Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	84
Tablo 3.41	Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	85

Tablo 3.42 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	85
Tablo 3.43 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	85
Tablo 3.44 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	86
Tablo 3.45 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	86
Tablo 3.46 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	86
Tablo 3.47 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	87
Tablo 3.48 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	87
Tablo 3.49 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	87
Tablo 3.50 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	88
Tablo 3.51 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	88
Tablo 3.52 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	88
Tablo 3.53 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	89
Tablo 3.54 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri.....	89
Tablo 4.1 Küresel motorun nihai tasarım modelinin özellikleri.....	94
Tablo 4.2 SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C mıknatısın malzeme özellikleri	106

Çok Yönlü Hareket Kabiliyetine Sahip Sabit Mıknatıslı Küresel Motorun Tasarımı

Umut Yusuf GÜNDOĞAR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL

Robotik, havacılık, savunma, aviyonik, otomotiv ve biyomedikal uygulamalarda, teknolojik gelişmelerle birlikte çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Böyle sistemlerde her bir serbestlik dereceli hareket için ayrı bir elektrik makinası kullanmak yerine, çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motorların kullanılması, bu sistemlerin karmaşıklığını azaltmakta ve boyutlarının küçülmesini sağlamaktadır. Ayrıca yine çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip uygulamalarda bu motorların kullanımıyla, yüksek kuvvet, yüksek moment ve büyük hareket açıları sağlanabilmektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında iki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip, $\pm 45^\circ$ eksenel hareket açısı yapabilen ve yeni bir mekanik yapıya sahip, yüzey mıknatıslı bir küresel bir motor tasarlanmıştır.

Tez çalışmasında tasarlanan küresel motor, 4 kutuplu, yüzey mıknatıslı bir rotordan ve 3 blok yapısında, 18 sargıya sahip bir statordan oluşmaktadır. Motorun mekanik yapısında ise küresel mafsallı, küresel yatak, küresel rulman ve yatak kapakları gibi herhangi bir mekanik parça kullanılmadan, rotoru iki hareketli parça ile çevreleyen ve $\pm 45^\circ$ eksenel hareket açısı sağlayabilen yeni bir mekanik yapı tasarlanmıştır. Bu yeni mekanik yapı sayesinde, motorun eksenel

hareket açısı, moment ve kuvvet değerlerinde, literatürde mekanik yapılarında küresel mafsal, küresel yatak, küresel rulman, yatak kapakları kullanılan motorlara göre daha başarılı sonuçlar elde edilebilmiştir.

Küresel motor tasarımında ilk önce farklı motor modelleri oluşturularak, elektromanyetik analizleri yapılmış ve yapılan tasarım optimizasyonu sonucuna göre nihai tasarım modeline karar verilmiştir. Tasarım ve analiz çalışmaları sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde nihai motor yapısının belirlenebilmesi için farklı stator, rotor, mıknatıs yapıları ve malzemelerinin kullanıldığı, farklı küresel motor modelleri oluşturulmuş ve elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir tasarım için manyetik akı yoğunluğu, kuvvet ve moment değerleri elde edilmiş, rotorun hareket açısı kabiliyeti karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları değerlendirilerek, nihai motor modeline karar verilmiştir. Daha sonra nihai motor tasarımının prototipi üretilmiş ve testleri yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır ve karşılaştırma sonuçları grafiklerle verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Küresel motor, sabit mıknatıs, Ansys Maxwell, elektromanyetik analiz, sonlu elemanlar yöntemi.

Design of a Multi Degree Freedom Permanent Magnet Spherical Motor

Umut Yusuf GÜNDOĞAR

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Sibel ZORLU PARTAL

The need for multi degrees of freedom motion for applications in robotics, aerospace, defense, avionics, automotive and biomedical sectors is increasing with technological developments. Multi degrees of freedom motor can be using instead of an electrical machine for each movement to reduce the size and complexity of the systems. In addition, it provides an advantage in terms of providing force, torque and large movement angle in applications with multi degrees of freedom motion. For this purpose, in this thesis, a two degrees of freedom spherical surface permanent magnet motor with a new mechanical structure and large axial motion angle of $\pm 45^\circ$ was designed.

Spherical permanent magnet motor consist of 4 pole surface permanent magnet rotor and 3 block stator with 18 coils. The new mechanical structure of the prototyped spherical surface permanent magnet motor surrounded the rotor with two moving parts to motion at large axial motion angle of $\pm 45^\circ$ without using any mechanical part such as ball joint, spherical bearing, spherical joint and bearing covers. Thanks to this new mechanical structure, more successful results have been obtained in the axial movement angle, moment and force values of the protoyped motor, compared to the motors in the literature in which using ball

joint, spherical bearing, spherical joint and bearing covers in their mechanical parts.

Firstly, electromagnetic simulations of the spherical motor were performed and the final design model was decided. Design and simulation studies were carried out using Ansys Maxwell software based on the finite element method (FEM). In order to determine the final motor design, different spherical motor models using different stator, rotor, magnet structures and materials were designed and electromagnetic simulations were carried out. Magnetic flux density, force and moment values were obtained for each design, and the motion angle capability of the rotor was compared. The final motor model was decided by evaluating these comparison results. Then the prototype of the final motor design was produced and tested. The obtained test results and the simulation results were compared and the comparison results were given in graphics.

Keywords: Spherical motor, permanent magnet, Ansys Maxwell, electromagnetic simulation, finite element method.

1.1 Literatür Özeti

Teknolojinin zaman içinde hızlı ve sürekli gelişimi çoğu alanda olduğu gibi robotik alanında da farklı uygulama ihtiyaçlarının ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu ihtiyaçlara örnek olarak birden fazla eksenle hareket kabiliyetine sahip uygulamalar verilebilir. Bu uygulamaları gerçekleştirebilmek için hem sistemi oluşturan parçaların azaltılması hem de hareket kabiliyetinin çok fonksiyonlu olması gerekmektedir. Küresel motorlar bu amaç için kullanılmaya uygun, çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motorlardır. Bu sebeple bu motorlara duyulan ilgi her geçen gün artmakta ve bu ilgi literatürde yapılan çalışmaların ilerlemesine de olumlu katkı sağlamaktadır.

Çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motorlarla ilgili çalışmalar 20. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Williams ve Laithwaite, küresel bir indüksiyon motor tasarlamışlardır. Bu indüksiyon motoru boyutta olduğundan, güç tüketimi ve sargılardaki bakır kayıpları da yüksek olmuştur [1].

Motorların boyutlarının ve hareket kabiliyetlerinin iyileştirilmesi için, Vachtsevanos ve arkadaşları küre yapıda rotora sahip, yeni bir küresel motor tasarımı yapmış ve aynı zamanda motorun kontrolünü de gerçekleştirmişlerdir. Hem analitik hesaplamalar hem de simülasyon çalışmaları yaptıkları bu küresel motor ve kontrol uygulamasının, küçük ve büyük yapıdaki sistemlerde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [2].

Li ve arkadaşları, rotoru küre şeklinde olan, çok yüzlü, silindirik yapıda sabit mıknatıslı bir küresel motor tasarlamışlardır. Motorun analitik yöntemle elde ettikleri manyetik alan hesaplamalarını, SEY'in kullanıldığı analiz ve test çalışmaları ile de elde etmişlerlerdir. Manyetik alan hesaplarında kullandıkları analitik yöntemin, çok yüzlü, sabit silindirik mıknatıs yapıları küresel motor tasarımlarında da kullanılabileceğini ve bu çalışmanın daha sonra moment

hesaplamalarına ve parametre optimizasyonu çalışmalarına katkı sağlayacağını ön görmüşlerdir [3].

Hollis ve arkadaşları, çoklu hareket kabiliyetine sahip bir küresel bir motor modellemesi, tasarımı ve kontrolü üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde, tasarlanan PD (Proportional-Derivative, Oransal-Türevsel) kontrolör ile prototipi üretilen küresel motor başarıyla kontrol edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda, kontrol tasarımında daha hızlı bir işlemci kullanılarak daha yüksek bir örnekleme hızı ve daha küçük bir hata ile geliştirilmesi amaçlanmıştır [4,5].

Wang ve arkadaşları, üç eksenli hareket kabiliyetine sahip yeni bir aktüatör tasarlamışlardır. Aktüatör dört kutuplu olarak tasarlanmıştır. Rotordaki sabit mıknatıslar çeyrek küre yapılarındadır. Stator ise dört adet sargıdan oluşmaktadır. Küresel olarak tasarlanan rotor, düşük sürtünmeli bir yüzey kaplaması üzerindeki küresel olarak tasarlanan stator içine yerleştirilmiştir. Tasarımda küre yapıdaki stator ve rotor arasında mekanik sürtünmeler oluşmuştur. Tasarlanan küresel motorun manyetik alan dağılımı, moment ve zıt EMK değerleri analitik olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler ile aktüatörün tasarım optimizasyonu ve kapalı döngü kontrolü için bir kontrol stratejisi çalışmaları gerçekleştirilmiştir [6,7].

Öner, gerçekleştirdiği çalışmada NdFeB malzemeli sabit mıknatıslardan oluşan bir küresel motor tasarlamıştır. Motorun rotoru dört adet çeyrek küre dilimi yapısındaki sabit mıknatıslardan, statoru ise küre şeklinde ve toplam sekiz kutuptan oluşmaktadır. Statordaki kutuplar simetrik olarak küre yapısı şeklindeki statorun yüzeyine dağıtılmıştır. Küre yapısında tasarlanan rotor düşük sürtünmeye sahip teflon yüzey kaplamadan oluşan statorun içine yerleştirilmiştir. Tasarlanan küresel motorun manyetik akı yoğunluklarının ve moment değerlerinin elde edilmesi için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir [8].

Li ve arkadaşları, küresel bir rotor ve küresel kabuk stator yapısından oluşan sabit mıknatıslı bir küresel motor çalışması gerçekleştirmiştir. Halbach dizisindeki NdFeB malzemeli sabit mıknatıslar rotoru oluşturmuştur. Rotorun nüvesi düşük karbonlu çelik malzemeden yapılmıştır. Stator ise katmanlı yapıda sargılardan

oluşturulmuştur. Halbach dizisindeki sabit mıknatısların, kaçak manyetik alana yol açması ile girdap akımları etkisiyle motordaki manyetik alanın bozulmasının incelenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ile analitik yöntemle elde edilen kaçak manyetik alan sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Bu durumun motorun parametreleri üzerindeki etkisinin önemli olduğu belirtilmiştir. [9].

Kaneko ve arkadaşları, üç eksenli hareket kabiliyetine sahip bir DC (Direct Current, Doğru Akım) servo küresel motor tasarlamışlardır. Motorun hareketini sağlaması için küre yapıda mekanik rulman ve yataklama bileşenleri kullanılmıştır. Motor rotasyonel hareketi sürekli gerçekleştirebilmektedir. Aynı zamanda eksenel hareket kabiliyetine de sahiptir. Motor, mekanik aksamda kullanılan rulman ve yataklama bileşenlerinin hareket kabiliyetleri içinde eksenel hareketleri 15° açı değerinde gerçekleştirebilmiştir [10].

Lu ve Aoyagi, dış rotorlu çok eksenli hareket kabiliyetine sahip ultrasonik küresel motor tasarlamışlardır. Ultrasonik motorun çalışma prensibinde piezoelektrik bileşenler kullanılarak ultrasonik dalgalar üretilerek motorun hareketi sağlanmaya çalışılmıştır. Tasarlanan ultrasonik motor, küresel kabuk yapıda bir dış rotordan ve iki blok yapıdaki statordan oluşmaktadır. Dış rotorun üretiminin zor olduğu görülmüştür [11].

Takesue ve arkadaşları, ultrasonik küresel motorun tasarım ve kontrolü üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan motorun PH (Torque Control Based on Phase Difference, Faz Farkına göre Moment Kontrolü), FR (Torque Control Based on Frequency, Frekansa göre Moment Kontrolü) ve HB (Torque Control Based on Phase Difference and Frequency, Faz Farkına ve Frekansa göre Moment Kontrolü) olmak üzere 3 farklı moment kontrolü çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kontrol çalışmalarından PH’de kararlı durum hatasının olduğu gözlemlenmiştir. FR ve HB moment kontrolleri motorda gürültü oluşturmalarına rağmen, PH’ye göre daha hızlı tepki süreleri ve daha düşük hata değerleri elde edilmiştir [12].

Toyama ve arkadaşları, çok eksenli hareket kabiliyetine sahip ultrasonik motor tasarlamışlardır. Ultrasonik motorun statorunun enerjilendirilmesi ile statorda

bulunan piezoelektrik elemanların titreşim gerçekleştirmektedir. Statorda gerçekleşen titreşim hareketi rotorun hareketini sağlamıştır [13,14].

Kang ve arkadaşları, rotorunda dört sabit mıknatıs ve statorunun iç yüzeyine entegre edilmiş on iki bobinden oluşan bir küresel motor tasarlamışlardır. Statorda yer alan her bir bobin 400 sarımdan meydana gelmiştir. Tasarlanan sabit mıknatıslı küresel motorun rotoru eksenel hareket kabiliyetini 18° açı değerinde gerçekleştirebilmektedir. Aynı zamanda kendi eksenini etrafında 160 devir/dakika hız ile dönüş gerçekleştirebilmektedir [15].

Li ve arkadaşları, küre şeklindeki rotordan oluşan çok eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel motor tasarlamışlardır. Motorun sargıları enerjilendirildiğinde stator yapısındaki elektromanyetik rezonans oluşma durumunun incelenmesi için modal analiz çalışmaları gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda motorun elektromanyetik, termal ve yapısal analiz çalışmaları gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen analiz çalışmaları ile motorun performansının iyileştirilebileceği ve farklı fiziklerdeki analiz sonuçları ile oluşabilecek arıza durumlarının önceden öngörülmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [16,17].

Davey ve arkadaşları, küresel indüksiyon motor tasarımının manyetik alan dağılımlarının ve moment değerlerinin elde edilmesi için analiz çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Analiz çalışmaları ile değişen frekans ve motor hızı ile manyetik alanın oluşması ile moment ve kayıp değerleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ile rotor kabuğunun kalınlığı azaldıkça momentin arttığı fakat bunun yanı sıra güç kaybının da arttığı görülmüştür [18].

Bederson ve arkadaşları, kamera uygulamaları için 2 eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel nokta motoru tasarlamışlardır. Stator yapısında 3 sargı mevcuttur. Küresel nokta motorun çalışma prensibi sargılardaki akımlarla oluşan manyetik alan sabit mıknatısı yönlendirmektedir ve böylece motorun hareketi sağlanmaktadır. Motorun hareket doğruluğu rotorun hareketinin yanı sıra mekanik yatakların sürtünmesine de bağlıdır [19].

Joshi ve arkadaşları, çoklu hareket kabiliyetine sahip aktüatörlerin kuvvet etkileşimlerinin elde edilmesi için bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışmada, çok eksenli hareket kabiliyetine sahip aktüatörlerin hareketlerini ve çalışma gücünü

kontrol ederek yumuşak kuvvetlerini elde etmek için bir deney sistemi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem ile robotik bileşenlerin için uygulanabileceği belirtilmiştir [20].

Ahmadi ve arkadaşları, statoru E-tipi nüve yapısından ve rotoru kesikli küre nüve yapısından oluşan üç eksenli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı bir küresel motor tasarlamışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada, rotorunun tamamı laminasyon saclardan veya mıknatıslardan tasarlanan motorlara ve aktüatörlere göre; kesikli bir rotor nüvesi ve nüve üzerine sabit mıknatıslar entegre edilerek yeni bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu yeni tasarım ile kesikli laminasyon saclar ve kesikli nüve yapısı üzerine sabit mıknatıslar entegre edilerek; rotorunun tamamı laminasyon saclardan veya mıknatıslardan oluşan motorlara göre hacim ve kütle bakımından daha iyi bir tasarım elde edilmiştir. Ansys Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlar ile rotorunun tamamı laminasyon saclardan veya mıknatıslardan oluşan motorlara göre, moment 3.5 kat ve rotorun dönüş açıları 2.25 kat arttırılmıştır. Tasarlanan bu motorun statorunun dış çapı ise 225 mm olacak şekilde tasarlanmıştır [21].

Bhatia ve arkadaşları, robotik uygulamalarda kullanılmak üzere küreye benzer stator yapısında 6 adet kutup bulunan küresel asenkron motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Rotor yapısı ise içi boş bir yumuşak çelik çekirdeğe ve bir dış bakır kabuğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Rotorun dış çapı $202.7\text{mm} \pm 0.25\text{ mm}$ değerinde oluşturulmuştur. Küre yapısındaki rotor ile stator arasındaki statik sürtünmeyi ortadan kaldırmak için yataklama elemanlarının değiştirilebileceği çalışmada belirtilmiştir [22].

Dehez ve arkadaşları, iki eksenli hareket kabiliyetine sahip rotoru ve statoru küre şeklinde olan bir küresel indüksiyon motoru tasarlamışlardır. Gerçekleştirilen çalışmalarda motorun moment değerleri 25 Hz frekans değerinde 0.009 Nm ve 75 Hz frekans değerinde 0.0045 Nm olarak elde edilmiştir [23].

Kumagai ve Hollis, üç eksenli hareket kabiliyetine sahip rotoru ve statoru küre yapısında olan bir küresel indüksiyon motorunun tasarımını ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Motorun rotorunun dış çapı 246 mm olarak tasarlanmıştır.

Motorun boyutlarının büyük olması, motorun kullanım alanlarını sınırlandırmıştır [24].

Son ve Lee, çok serbestlik dereceli sabit mıknatıslı küresel aktüatörlerin ve motorları manyetik alanını, momentini ve kuvvet değerlerinin kontrollerinin daha pratik ve kolay şekilde kontrol edilebilmesi için rotor yüzeyine dağıtılmış çok kutuplu modelleri oluşturmak için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Rotorunda 16 sabit mıknatıstan ve statoru 20 elektromıknatıstan oluşan küresel motorda, sürekli dönen bir shaftın yönünü kontrol edebilen OLC (Open Loop Controller, Açık Çevrim Kontrolörü) geliştirmişlerdir. Geliştirilen açık çevrim kontrolörde, dönüş hızını korumak için adım ilkesine dayanan bir anahtarlama kontrolörü ve rotorun eksenel açısını düzenlemek için ters moment modeline ve itme-çekme prensibine dayalı bir eksenel eğim açısı kontrolörü olmak üzere iki farklı kontrol yöntemi geliştirilerek tasarlanan küresel motorun kontrolü gerçekleştirilmiştir [25,26].

Rossini ve arkadaşları, uydu konum kontrolünde kullanılmak üzere 8 kutuplu sabit mıknatıstan oluşan küre şeklinde rotor yapısına ve 20 kutuplu elektromıknatıslardan oluşan küre şeklinde stator yapısına sahip bir küresel aktüatör tasarlamışlardır. Küresel aktüatörün tasarım aşamasından önce motorun kütle, manyetik akı yoğunluğu, dış yarıçapı ve açısal momentumu gibi parametreler göz önüne alınarak rotorun optimizasyon simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Rotorun optimizasyonu için gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde manyetik akı yoğunluğu değerlerinin elde edilmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında optimizasyonu gerçekleştirilen rotorun ve aktüatör tasarımının manyetik akı yoğunluğu değerlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Optimizasyonu ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilen küresel aktüatörün tasarımı gerçekleştirilmiştir [27-29].

Yan ve arkadaşları, statoru iki katmanlı 24 bobinden; küre şeklindeki rotoru 8 adet sabit mıknatıstan oluşan çok eksenli hareket kabiliyetine sahip bir küresel motor tasarlamışlardır. Motorun mekanik kısmında çok yönlü hareket kabiliyetlerinin sağlanması için küresel rulman kullanılmıştır. Motor, eksenel hareketini 11° açı

değerinde gerçekleştirebilmektedir. Motorun statorunun dış yarıçapı ise 112.5 mm olarak tasarlanmıştır [30-34].

Gan ve arkadaşları, rotoru 20 adet sabit mıknatıstan ve statoru 21 adet oluktan oluşan üç eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel motor tasarlamışlardır. Motorun statorunun dış çapı 250 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Motorda eksenel ve rotasyonel hareketleri sağlamak için rotorun merkezinde bir küresel mafsallık yatağı kullanılmıştır. Motorun eksenel hareketini 11.5° açı değerinde gerçekleştirebilmektedir [35].

Cho ve arkadaşları, çok yönlü hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel bir motor tasarlamışlardır. Rotoru, motora entegre etmek ve çok yönlü hareket kabiliyetlerini sağlamak için küresel bir yatak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada, kutup adım açılarının ve faz değişimlerine göre motorun çıkış performansı incelenmiştir. Motorun 4 fazlı çalışma durumunda eksenel hareket açısı 22.5° ve dönüş açısı 0° iken moment değeri yaklaşık olarak 25 mNm değerinde elde edilmiştir [36].

Li ve arkadaşları, tasarımını gerçekleştirdikleri üç eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel bir aktüatörün moment modellemesi ve akım optimizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Küresel aktüatörün farklı akım değerleri ile moment değerlerinin elde edilmesi için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda, gerçek zamanlı geri besleme kontrolünü gerçekleştirmek için küresel aktüatöre bir kontrol algoritması geliştirilmesi ve uygulanması amaçlanmıştır [37].

Kahlen ve arkadaşları, üç eksenli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı bir küresel motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Küre yapısına benzer rotorun yüzeyini kaplayacak şekilde parçalı şekillerde sabit mıknatıslar yerleştirilmiştir. Stator ise 96 adet nüve yapısı ve bobinlerden oluşturulmuştur. Stator yapısı, rotorun belirli bir bölgesini sarmaktadır. Motordaki sargı sayısı arttığından dolayı hareketlerin gerçekleştirilmesi için kontrolünde zorluklar oluşmuştur. Rotorun çapı 275 mm olarak tasarlanmıştır. Aynı zamanda boyut olarak da büyük bir yapıya sahip olmuştur [38].

Hirata ve arkadaşları, üç serbestlik hareket kabiliyetine sahip bir küresel bir motor tasarlamışlardır. Tasarlanan motorun eksenel hareket açısı $\pm 25^\circ$ değerinde ve rotasyonel hareket açısı $\pm 5^\circ$ değerinde elde edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ile motorun eksenel hareket açısı olan $\pm 25^\circ$ değerinde ortalama moment değerinin 7.69 mNm olarak elde edilmiştir. [39,40].

Liu ve arkadaşları, rotorunda 8 adet sabit mıknatıs ve statorunda 8 adet simetrik bobinden oluşan üç serbestlik hareket kabiliyetine sahip bir küresel bir motor tasarlamışlardır. Motorun bulunduğu koordinat sistemine göre X eksenini etrafındaki hareketini sağlayan bobinler 9.6 ohm direnç değerinde 450 sipirden; Y eksenini etrafındaki hareketini sağlayan bobinler 9.6 ohm direnç değerinde 450 sipirden ve Z eksenini etrafındaki hareketini sağlayan bobinler 6.5 ohm direnç değerinde 250 sipirden oluşturulmuştur. Her bobin 0.25 A akım ile enerjilendirilmiştir. Motorun tasarımında güç tüketimi de düşünülmüştür. Rotor ile statorun bağlantıları için mekanik olarak küresel yataklama bileşeni kullanılmıştır. Motorun üç boyutlu SEY ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Motor, X ve Y eksenleri boyunca eksenel hareketi $\pm 25^\circ$ açı değerinde ve Z eksenini boyunca rotasyonel hareketi $\pm 5^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Motorun X ve Y eksenleri boyunca $\pm 25^\circ$ açı değerindeki eksenel hareketlerindeki ortalama moment değeri 7.98 mNm olarak elde edilmiştir [41].

Lin ve arkadaşları, rotoru radyal olarak yönlendirilmiş halka mıknatıstan ve statoru 16 bobinden oluşan üç serbestlik dereceli bir küresel motor tasarlamışlardır. Tasarım çalışmalarının yanı sıra simülasyon çalışmaları da gerçekleştirmişlerdir. Motorun bulunduğu koordinat sistemine göre X eksenini etrafındaki hareketini sağlayan bobinler 500 sarımdan; Y eksenini etrafındaki hareketini sağlayan bobinler 500 sarımdan ve Z eksenini etrafındaki hareketini sağlayan bobinler 450 sarımdan oluşturulmuştur. Her bobin 1 A akım ile enerjilendirilmiştir. Elektromanyetik yapının tasarımında güç tüketimi de göz önünde bulundurulmuştur. Hareketli ve sabit parçaları birleştirmek ve eksenel ile rotasyonel hareketleri gerçekleştirmesinin sağlanması için rotorun merkezinde küresel bir yataklama bileşeni kullanılmıştır. Motor, X ve Y eksenleri boyunca eksenel hareketi $\pm 30^\circ$ açı değerinde ve Z eksenini boyunca rotasyonel hareketi $\pm 360^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarla motorun

X eksenini boyunca 0° ile $+30^\circ$ eğim açısı arasındaki moment değerleri 14.08 mNm ile 19.40 mNm aralığında elde edilmiştir [42].

Takahara ve arkadaşları, rotorunda 16 adet sabit mıknatıs ve statorunda 24 adet bobin bulunan çok eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel motor tasarlamışlardır. Gerçekleştirilen motorun tasarımında, mekanik kısımda bir mil ve küre şeklinde mekanik bileşen kullanılmıştır. Motor eksenel hareketini $\pm 37^\circ$ açı değerinde ve rotasyonel hareketini $\pm 360^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Motorun tüm bobinlerinin direnç değerleri 2 ohm olarak belirlenmiştir ve kayıp 2W değerinde elde edilmiştir [43].

Han ve arkadaşları, iki eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel aktüatör tasarlamışlardır. Gerçekleştirdikleri aktüatör tasarımında kuvvet değerlerinin elde edilmesi konusunda çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. İstenen kuvvetleri elde etmek bir SMC (Sliding Mode Controller, Kayan Kipli Kontrolör) tasarlanmış ve deneysel çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar ile tasarlanan küresel aktüatörün kayan kipli kontrolör ile istenen kuvvetlerin elde edildiği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Aktüatörün eksenel hareketi için 1.08 N kuvvete değeri elde edilmiştir [44].

Li ve arkadaşları, rotoru 4 çeyrek parça sabit mıknatıstan oluşan üç eksenli hareket kabiliyetine sahip motor çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Motorun dış stator yarıçapı 90 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik tasarımında yataklama bileşeni ile mil kullanılmıştır. Motor, X ve Y eksenleri boyunca eksenel hareketi $\pm 30^\circ$ açı değerinde ve Z eksenini boyunca rotasyonel hareketi $\pm 360^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ile motorun eksenel hareketlerinde yaklaşık 0.5 N ve rotasyonel hareketinde yaklaşık 1 N kuvvet değerleri elde edilmiştir [45-48].

El-Khalafawy ve arkadaşları, rotorunda 8 sabit mıknatıs ve statorunda 16 bobinden oluşan üç eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel bir aktüatör tasarlamışlardır. Aktüatörün mekanik yapısında mil bileşeni kullanılmıştır. Motorun eksenel hareket açısı $\pm 11^\circ$ değerindedir ve bu açı değerindeki eksenel hareketinde 30.9mNm değerinde moment değeri elde edilmiştir [49].

Lee ve arkadaşları, değişken relüktanslı adım motor çalışma prensibine göre küresel aktüatör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan değişken relüktanslı küresel motoru, moment modeliyle birlikte tüm motorun dinamik performansını elde etmek için kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Motorun stator ve rotor yapısının yanı sıra kullanılan mekanik elemanlar ile çok fazla bileşene sahip bir tasarım oluşturulmuştur [50-52].

Zhou ve arkadaşları, statorun ve rotorun birbirleriyle olan etkileşimlerindeki oluşan sürtünmelerin daha az seviyelerde olması için çoklu serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip değişken relüktans motor tasarlamışlardır. Çalışmada tasarlanan çoklu serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip değişken relüktans motor istenilen hareketleri gerçekleştirebilmiş ancak çalışmada prototip tasarım aşamasındaki kısıtlamalar ve sınırlamalar da ortaya konulmuştur. Ayrıca ileride değişken relüktanslı küresel motor tasarım çalışmaları yapacak araştırmacılar için tavsiyelerde bulunulmuştur [53].

Li ve arkadaşları, 4 farklı sabit mıknatıs yapısında üç serbestlik dereceli küresel motor tasarım ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Rotorun motora olan bağlantısını sağlamak için mil ve yataklama bileşeni kullanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile 4 farklı mıknatıs yapısı kullanılan rotorun bu tasarımları birbirleriyle karşılaştırıldığında rotasyonel hareketteki momentin %25, eksenel hareketteki momentin %40, kalıcı mıknatısın malzeme tüketiminin %54,72 iyileştirilebileceği görülmüştür [54].

Gündoğar ve arkadaşları, 12 bobin yapısına sahip 2 blok parçadan oluşan stator ve 4 adet sabit mıknatıstan oluşan rotor yapısındaki küresel motorun elektromanyetik ve yapısal simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Motorun simülasyon çalışmaları gerçekleştirildikten sonra tasarlanan sürücü devresi ile motor hareket ettirilmiştir. Motorun rotorunda hareketin gerçekleştirebilmesi için küresel bir yataklama bileşeni ile kullanılmıştır. Elektromanyetik simülasyonlar ile eksenel hareketi $\pm 30^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebildiği görülmüştür [55,56].

Lee ve arkadaşları, kamera uygulamalarında kullanılmak üzere iki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motor tasarlamışlardır. Stator yapısı 12 adet bobinden oluşmaktadır. Motorun hareketini sağlaması için rotor yapısında şaft

bileşeni kullanılmıştır. Motorun stator dış yarıçapı 75 mm ve iç yarıçapı 36 mm değerlerinde; rotorun yarıçapı 35 mm değerinde tasarlanmıştır. Motorun eksenel hareket açısı $\pm 33^\circ$ değerindedir ve bu açı aralığındaki eksenel hareketinde maksimum moment yaklaşık olarak 0.025 Nm değerinde elde edilmiştir [57].

Fernandes ve Branco, elektrikli tekerlekli sandalyede kullanılması için küre yapısında statordan ve rotordan oluşan bir küresel indüksiyon motoru tasarlamışlardır. Rotorun yarıçapı 43 mm olacak şekilde oluşturulmuştur. Rotorun sabitlenmesi ve hareketi için 5 adet küresel yataklama elemanı kullanılmıştır. Prototip gerçekleştirilen tasarımın hesaplanan değerleri ile deneysel sonuçları karşılatırılmıştır ve manyetik akı yoğunluğu için %8 ve elektromanyetik moment için %7 değerlerinde ortalama sapma gösterdiği elde edilmiştir [58].

Um ve arkadaşları, rotorunda 4 kutup çiftinden oluşan sabit mıknatısların yer aldığı ve statorunda 23 adet bobinin bulunduğu bir küresel adım motoru geliştirmişlerdir. Rotorun sabitlenmesi ve hareketi sağlaması için küresel yataklama elemanı kullanılmıştır. Küre yapısındaki statorun yüzeyine bobinler hareketin sağlanması ve moment değerinin yüksek elde edilmesini sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır. Motorun rotasyonel hareketindeki simülasyon çalışmalarındaki maksimum moment yaklaşık olarak 0.02 Nm değerinde ve deneysel çalışmalarındaki maksimum moment yaklaşık olarak 0.015 Nm değerinde elde edilmiştir [59].

Stein ve arkadaşları, küre şeklindeki rotorunda 80 adet silindirik yapıda sabit mıknatıs bulunan üç eksenli hareket kabiliyetine sahip bir küresel adım motoru tasarlamışlardır. Statoru ise demir nüveye sarılı 16 bobinden oluşturulmuştur. Bobinler rotorda olduğu gibi küresel bir kapağın yüzeyine yerleştirilmiştir. Rotorun hareketini ve sabit kalmasını sağlamak için bir halka ve 8 adet küçük yapıda bilyeye benzer mekanik elemanlar kullanılmıştır. Statordaki bobinler enerjilendirilerek oluşan manyetik alan ile motorun hareketi sağlanmıştır. Statordaki bobinler 24 V gerilim ile enerjilendirilmiştir ve 100 W değerine kadar güç elde edilmiştir [60].

1.2 Tezin Amacı

Teknolojik gelişmelerle robotik, havacılık, savunma, otomotiv, biyomedikal gibi birçok alanda, çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine olan ihtiyaç artmaktadır. Genellikle uygulamalarda her bir eksen hareket ihtiyacı için ayrı bir tek serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip elektrik makinaları kullanılmaktadır. Bu durum sistemlerin karmaşık bir yapıda olmasına, boyutların büyümesine ve uygulamalardaki hareket kabiliyetlerinin kısıtlanmasına sebep olmaktadır. Ayrıca uygulamalarda sadece rotasyonel hareketlere değil eksenel hareketlere de gereksinim vardır. Eksenel hareketlerde ise büyük eksenel açı, yüksek moment ve kuvvet değerleri en önemli gereksinimler olmaktadır. Dolayısıyla tüm bu durumlar göz önüne alındığında, çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip küresel motorlar bu duruma bir çözüm sunmaktadır.

Geçmişte yapılan çalışmalara bakıldığında, birçok farklı yapıda ve farklı çalışma prensiplerinde küresel motor tasarımları gerçekleştirilmiştir. Küre şeklindeki rotor ve stator yapılarında tasarlanan küresel motorlarda, mekanik yükler ve sürtünmeler oluşmuştur [6,7]. Bu durum motorların hareket kabiliyetini etkilemiştir. Ayrıca motorların robotik, havacılık, savunma, otomotiv, biyomedikal gibi sektörlerdeki uygulama alanlarında kullanılması için boyutlarının büyük yapılarda olduğu görülmüştür [1,24]. Küre şeklindeki rotor ve stator yapılarının dışında farklı stator ve rotor yapıları ile tasarlanan küresel motorlarda ise küresel yataklama, küresel mafsallık ve küresel rulman gibi mekanik aksamı oluşturan ve motorun hareketini sağlayan mekanik bileşenler kullanılmıştır [39-42]. Kullanılan bu mekanik bileşenlerin eksenel hareketleri gerçekleştirirken sağladıkları açı kapasitelerinin sınırlı olması; küresel motorların eksenel hareketlerindeki açıları da sınırlandırmıştır. Dolayısıyla eksenel hareketlerde oluşan bu açı kısıtlamaları, motorun moment ve kuvvet değerlerini de etkilemiştir [39-42].

Tüm bu durumlar değerlendirilerek, bu tez çalışmasında iki serbestlik dereceli eksenel hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı bir küresel motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motorda herhangi bir küresel yataklama, küresel mafsallık veya küresel rulman gibi mekanik elemanlar kullanmadan; rotoru saran iki hareketli parça ile bir mekanik tasarım ortaya koyulmuştur ve motorun eksenel

hareketlerini $\pm 45^\circ$ değerindeki büyük açıda gerçekleştirebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca tasarımı gerçekleştirilen motorun $\pm 45^\circ$ değerindeki eksenel hareket açılarında moment ve kuvvet değerlerinin iyileştirilmesi de hedeflenmiştir. Son olarak Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak motorun tasarım ve analiz çalışmaları gerçekleştirildikten sonra, prototipinin üretilmesi ve prototip motorun test sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Tez çalışmasında, çok serbestlik dereceli eksenel hareket kabiliyetine sahip küresel motorlarda kullanılan mekanik elemanların, motorun eksenel hareket kabiliyetini sınırlama problemine bir çözüm olarak; küresel yataklama, küresel mafsallara veya küresel rulman gibi mekanik elemanların kullanılmadığı farklı bir mekanik yapı tasarlanması ve böylece daha büyük eksenel aı değerine ulaşılmış bir küresel motor tasarım modeli önerilmektedir. Gerçekleştirilecek motor tasarımı ile daha büyük eksenel açıya ulaşmanın yanında, moment ve kuvvet değerlerinin de arttırılması beklenmektedir.

Ayrıca çok serbestlik dereceli eksenel hareket ihtiyacının olduğu robotik, havacılık, savunma, biyomedikal, otomotiv gibi uygulama alanlarında, her bir eksenel hareket ihtiyacı kadar elektrik makinasının kullanılması yerine, önerilen motor tasarımı sayesinde tek bir motor ile 2 eksenli hareket ihtiyacı karşılanabilecek, böylece daha kompakt yapıda, daha düşük maliyetli bir sistem elde edilmiş olacaktır.

Robotik, biyomedikal, havacılık, savunma, otomotiv gibi eksenel hareket gereksinimi olan uygulamalar, çok yönlü sistemleri içinde barındırdığı ve bu uygulamalarda hassas hareket kabiliyetine sahip çalışmalar yapılabildiği için oldukça önemli bir yere sahiptir. Özellikle teknolojik gelişmelere paralel olarak, bu uygulama alanlarında çok yönlü hareket kabiliyetine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle her bir eksen veya yön için farklı bir elektrik motoru kullanmak gerekir. Oysa küresel motorlar gibi çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motorların bu uygulamalarda kullanımıyla, her yön için sadece bir motor kullanılarak aynı görev yerine getirilebilmektedir. Böylece hem sistemi oluşturan eleman sayısı azalmakta, hem de tek bir küresel motorla tüm işlevler yerine getirilerek maliyet azaltılmaktadır.

2.1 Küresel Motorların Çalışma Prensibi

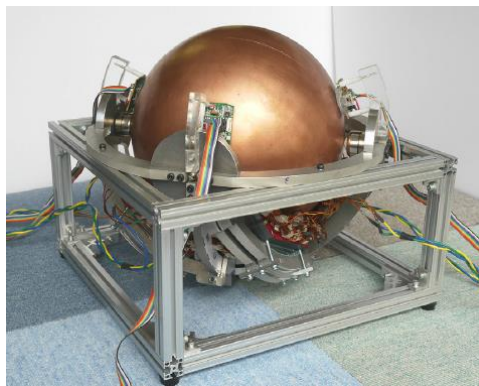
Küresel motorlar çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip, dönme veya eksenel hareket yapan ve bu hareketini adım adım ve çok hassas kontrolle sağlayan elektromekanik yapılardır. Küresel motorlar rotor ve stator yapılarından oluşur. Stator yapıları elektromıknatıs yapıdadır ve motorun eksenel ve rotasyonel hareketi dikkate alınarak tasarlanır. Rotor yapıları ise küresel motorların farklı yapılarına göre sabit mıknatıs, elektromıknatıs ve kutuplardan oluşabilir. Küresel motorun çalışma prensibi, rotorun hareket eksenine karşılık gelen stator sargılarına enerji verilerek oluşan manyetik alanın itme ve çekme kuvveti ile rotorun hareketinin sağlanması şeklinde açıklanabilir. Stator ve rotor arasında manyetik alandan dolayı oluşan bu kuvvet ile motorun hareketi rotasyonel veya eksenel yönde gerçekleştirilebilmektedir. Stator kutuplarındaki sargıların polaritesi, rotorun kutbuna ve hareket yönüne göre değiştirilir. Motorun ne kadar dönmesi isteniyorsa bobinlere sırasıyla o kadar enerji verilir. Stator sargılarındaki akım arttıkça, manyetik alan ve buna bağlı olarak da moment artar.

2.2 Küresel Motorların Çeşitleri

Çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip olacak şekilde farklı yapılarda, boyutlarda ve eksenel hareket açılarında birçok küresel motor ve aktüatör tasarımları vardır. Literatürdeki küresel motor tasarımlarına bakıldığında yapı olarak küresel indüksiyon motorlar, sabit mıknatıslı küresel motorlar, değişken relüktanslı küresel motorlar, ultrasonik küresel motorlar ve küresel adım motorları gibi çalışmalara yer verildiği görülmektedir.

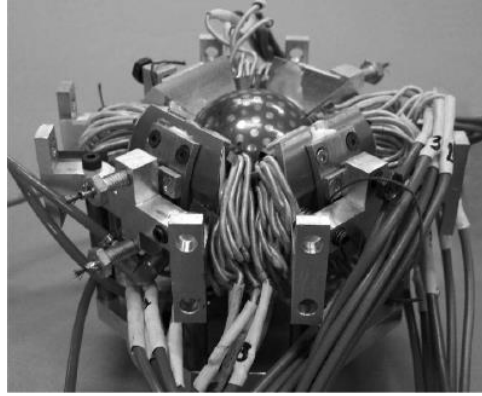
2.2.1 Küresel İndüksiyon Motorlar

Küresel indüksiyon motorları, klasik indüksiyon motorlarda olduğu gibi stator ve rotor yapılarından oluşmaktadır. Küresel motorların statoru elektromıknatıslardan oluşmaktadır. Rotoru ise sargılı yapıdadır ve hareketlidir. Literatürde yer alan küresel indüksiyon motor çalışmalarına bakıldığında, farklı boyutta ve farklı yapılarda tasarımlar gerçekleştirildiği görülmektedir [1,24]. Bu küresel indüksiyon motoru tasarımlarına bakıldığında boyutlarının çok büyük olduğu görülmektedir. Bu durum ise bu motorlarda stator sargılarında oluşan bakır kayıplarının fazla olmasına ve güç kaybının yüksek olmasına neden olmaktadır. Güç tüketiminin yüksek değerlerde olması, motorun veriminin de düşük olmasına sebep olmuştur. Ayrıca bu indüksiyon motorların boyutlarının büyük olması uygulama alanındaki kullanımlarını da sınırlandırmaktadır. Şekil 2.1’de bu çalışmalara bir örnek olarak büyük boyutlu küresel bir indüksiyon motoru görülmektedir [24]. Motorun rotorunun dış çapı 246 mm’dir. Motorda, sabit çalışma durumunda 200 W ve maksimum çalışma durumunda 1 kW değerinde güç tüketimi vardır ve dolayısıyla motorun verimi de düşüktür.



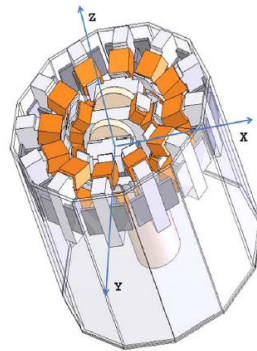
Şekil 2.1 Küresel indüksiyon motorunun rotoru ve statoru [24]

Küresel indüksiyon motorlarda boyutların büyük olmasının uygulama alanında yarattığı kısıtlama sebebiyle, boyutlarının küçültülmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Dehez ve arkadaşları, iki eksenli hareket kabiliyetine sahip rotoru ve statoru küre şeklinde olan bir küresel indüksiyon motoru tasarlamışlardır [23]. Bu küresel indüksiyon motorun moment değerleri, 25 Hz frekans değerinde 0.009 Nm ve 75 Hz frekans değerinde 0.0045 Nm olarak elde edilmiştir [23]. Şekil 2.2’de tasarlanan küresel indüksiyon motoru görülmektedir.



Şekil 2.2 Küresel indüksiyon motoru [23]

Bir başka çalışmada ise, rotorunda ve statorunda sargılar kullanılan iki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motor tasarlanmıştır. Stator yapısı 12 adet bobinden oluşmaktadır. Motorun stator dış yarıçapı 75 mm ve iç yarıçapı 36 mm değerlerinde; rotorun yarıçapı 35 mm değerinde tasarlanmıştır [57]. Bu motorun eksenel hareket açısı $\pm 33^\circ$ değerindedir ve bu açı aralığındaki eksenel hareketinde maksimum moment yaklaşık olarak 0.025 Nm değerinde elde edilmiştir [57]. Şekil 2.3’te tasarlanan iki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip küresel motor görülmektedir.



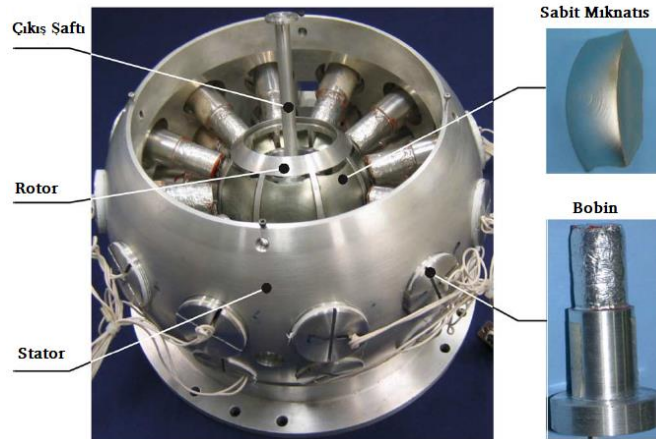
Şekil 2.3 İki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip küresel motor [57]

2.2.2 Sabit Mıknatıslı Küresel Motor

Sabit mıknatıslı küresel motorlar, rotorlarında farklı sayı ve yapılarda sürekli mıknatıs bulunan, statorlarında ise rotorun hareketini sağlamak için elektromıknatıs yapısının kullanıldığı motorlardır. Bu motorlarda eksenel hareketlerin sağlanması için küresel yataklama, küresel mafsal ve küresel rulman gibi mekanik bileşenler kullanılmıştır.

Literatürde yer alan sürekli mıknatıslı küresel motor çalışmalarında farklı şekil ve geometrilerde tasarlanmış rotor ve stator yapıları mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları şöyledir; Wang ve arkadaşları, dört kutuplu bir aktüatör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Üç eksenli hareket kabiliyetine sahip olan bu motorun küre şeklindeki rotoru 4 adet çeyrek küreye benzer sabit mıknatıstan oluşmaktadır. Küre şeklindeki stator ise 4 adet sargı bulunmaktadır. Küre yapısındaki rotor yine küre şeklinde tasarlanan statorun içine konumlandırılmıştır. Motorun hareket etmesiyle, birbiriyle temas halinde olan küre yapısındaki rotor ve stator arasında sürtünmeler ve mekanik yükler meydana gelmiştir. [6,7].

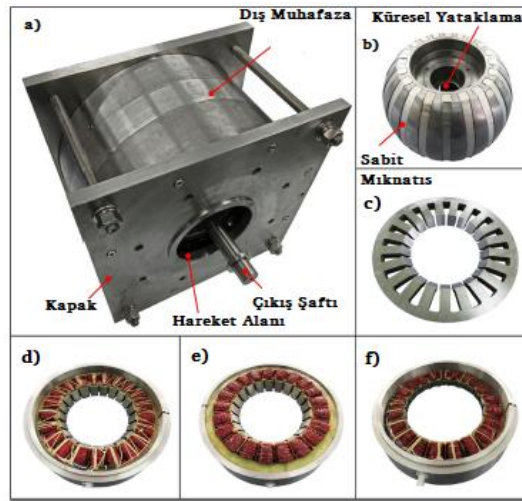
Küre yapıdaki stator ve rotor çalışmalarında bu sürtünmeleri azaltmak ve hareket açılarını iyileştirmek için, farklı yapılarda küresel rulman, küresel mafsal, küresel yataklama elemanları gibi mekanik bileşenler kullanılarak küresel motor tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yan ve arkadaşları, statoru iki katmanlı 24 bobinden, küre şeklindeki rotoru 8 adet sabit mıknatıstan oluşan çok eksenli hareket kabiliyetine sahip bir küresel motor tasarlamışlardır [30-34]. Şekil 2.4'te sabit mıknatıslı küresel motor görülmektedir.



Şekil 2.4 Sabit mıknatıslı küresel motor [30-34]

Şekil 2.4'te resmi verilen küresel motorun mekanik kısmında çok yönlü hareket kabiliyetlerinin sağlanması için küresel rulman kullanılmıştır. Motor, eksenel hareketini 11° açı değerinde gerçekleştirebilmektedir. Motorun statorunun dış yarıçapı ise 112.5 mm olarak tasarlanmıştır [30-34].

Bir başka çalışmada, küre yapısındaki rotorunda 20 adet küre dilimli sabit mıknatıs olan ve statoru 21 oluk-3 bloktan oluşan, üç eksenli hareket kabiliyetine sahip bir küresel motor tasarlanmıştır [35]. Şekil 2.5'te tasarlanan bu sabit mıknatıslı küresel motor ve bileşenleri görülmektedir.



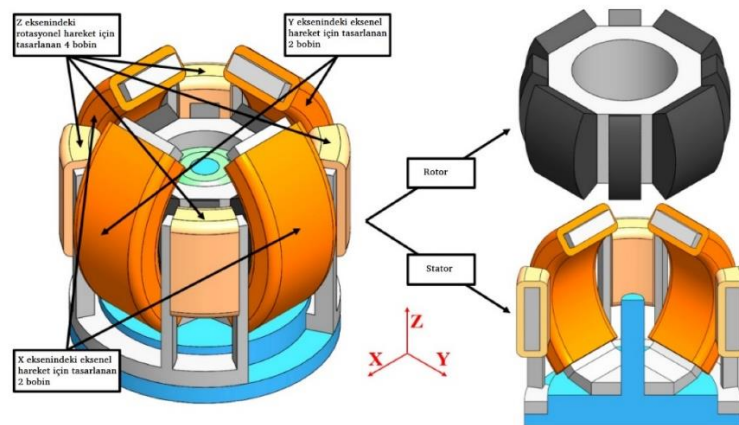
Şekil 2.5 Sabit mıknatıslı küresel motor a) Motor b) Küresel rotor c) Eksenel hareket için demir nüveli stator d) Eksenel hareket için ilk stator e) Eksenel hareket için ikinci stator f) Rotasyonel hareket için stator [35]

Şekil 2.5'teki motorun statorunun dış çapı 250 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Statorundaki alt ve üst bloklar eksenel hareket için ve ortadaki blok ise rotasyonel hareket için tasarlanmıştır. Motorda eksenel ve rotasyonel hareketleri sağlamak için rotorun merkezinde 2 farklı küresel mekanik eleman kullanılmıştır ve karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 2.6'da bu mekanik elemanlar olarak seçilen küresel mafsallı ve küresel yataklama bileşenleri görülmektedir.

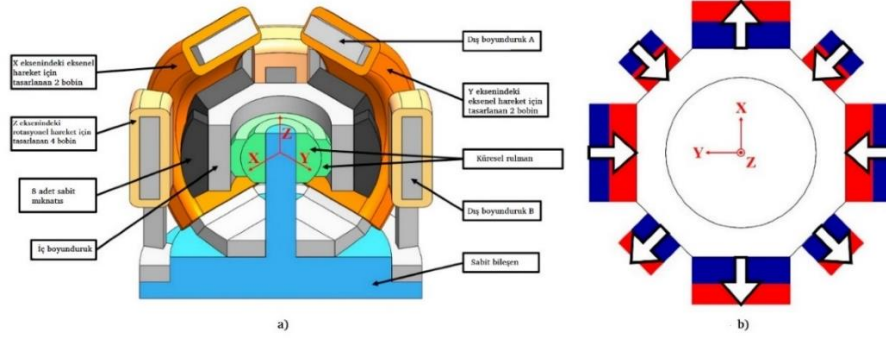


Şekil 2.6 Hareketi sağlayan mekanik elemanlar a) Küresel mafsallı bileşeni b) Küresel yataklama bileşeni [35]

Küresel motorların mekanik yapılarında küresel rulman, küresel mafsallık ve küresel yataklama elemanları kullanılarak, bu motor yapılarının boyutlarının küçültülmesine çalışılmıştır. Böyle bir çalışma Hirata ve arkadaşları tarafından yapılmış ve üç serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip bir küresel bir motor tasarlanmıştır. Motorun stator dış yarıçapı 18.6 mm olacak şekilde kompakt bir tasarım yapısı ortaya konulmuştur. Motor, X ve Y eksenleri boyunca eksenel hareketi $\pm 25^\circ$ açı değerinde ve Z eksenini boyunca rotasyonel hareketi $\pm 5^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Motorun X ve Y eksenleri boyunca $\pm 25^\circ$ açı değerindeki eksenel hareketlerindeki ortalama moment değeri 7.69 mNm olarak elde edilmiştir [39,40]. Yataklama elemanı olarak küresel rulmanın kullanıldığı bu sabit mıknatıslı küresel motor ve bileşenleri Şekil 2.7’de ve Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

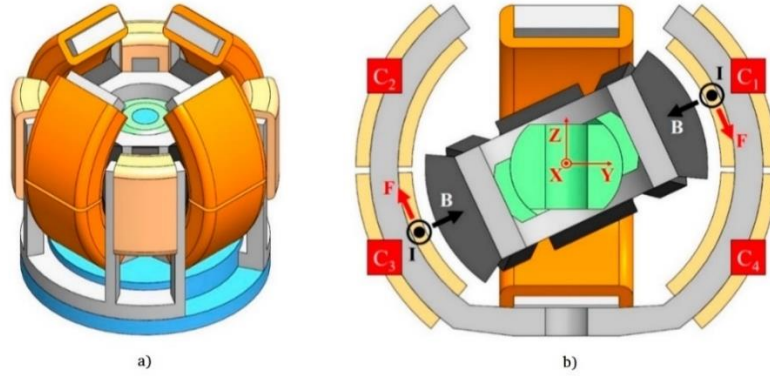


Şekil 2.7 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor [39,40]



Şekil 2.8 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor a) Motorun detaylı tüm bileşenleri b) Sabit mıknatısların manyetizasyon yönleri [39,40]

Bir başka çalışmada, Şekil 2.7’de ve Şekil 2.8’de gösterilen sabit mıknatıslı motor geliştirilerek, kamera uygulamalarında kullanılmaya uygun ve moment değerlerinde iyileşmenin sağlandığı yeni bir sabit mıknatıslı motor tasarlanmıştır [41]. Tasarlanan bu yeni sabit mıknatıslı motorda, Şekil 2.7’de verilen motordan farklı olarak, motor yapısında 4 simetrik bobin yerine, farklı kombinasyona sahip 8 simetrik bobin kullanılmıştır. Yeni tasarlanan motor Şekil 2.9’da gösterilmiştir [41].

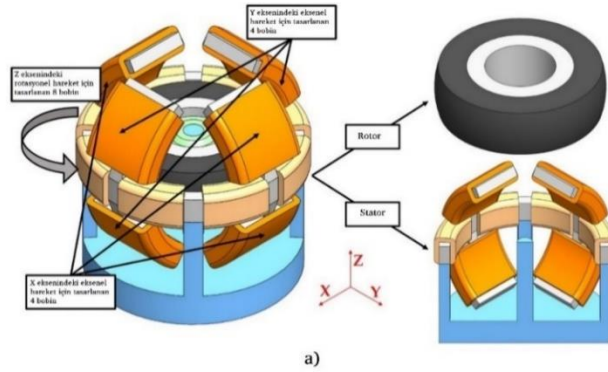


Şekil 2.9 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor a) Motorun tüm bileşenleri b) Motorun YZ düzlemindeki kesitte gösterilen X eksenini etrafındaki $\pm 25^\circ$ açı değerindeki eksenel hareketi [41]

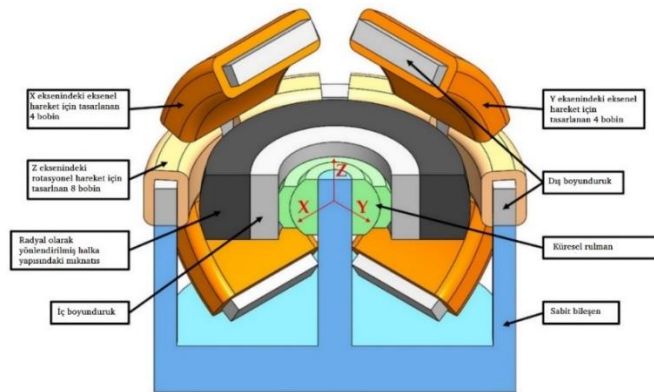
Motorun bulunduğu koordinat sistemine göre X eksenini etrafındaki hareketi sağlayan bobinler 9.6 ohm direnç değerinde 450 sarımdan; Y eksenini etrafındaki hareketi sağlayan bobinler 9.6 ohm direnç değerinde 450 sarımdan ve Z eksenini etrafındaki hareketi sağlayan bobinler 6.5 ohm direnç değerinde 250 sarımdan oluşmaktadır. Her bobin 0.25 A akım ile enerjilendirilmiştir. Rotor ile statorun

bağlantısı için mekanik olarak, Şekil 2.11’de gösterildiği gibi küresel rulman bileşeni kullanılmıştır. Motorun üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Motor, X ve Y eksenleri boyunca aksel hareketi $\pm 25^\circ$ açı değerinde ve Z eksenini boyunca rotasyonel hareketi $\pm 5^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Motorun X ve Y eksenleri boyunca $\pm 25^\circ$ açı değerindeki aksel hareketlerindeki ortalama moment değeri 7.98 mNm olarak elde edilmiştir [41]. Tasarlanan motorun [41] $\pm 25^\circ$ açı değerindeki aksel hareketlerindeki ortalama moment değeri, daha önce tasarlanan motorun [39,40] ortalama moment değerinden 5.22% daha yüksek elde edilmiştir.

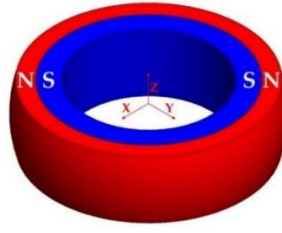
Bir diğer çalışmada, rotoru radyal olarak yönlendirilmiş halka şeklindeki mıknatıstan ve statoru 16 bobinden oluşan üç serbestlik dereceli bir küresel motor tasarlanmıştır [42]. Şekil 2.10’da ve Şekil 2.11’de tasarlanan sabit mıknatıslı küresel motor ve Şekil 2.12’de radyal olarak yönlendirilmiş halka şeklindeki mıknatıs gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor [42]



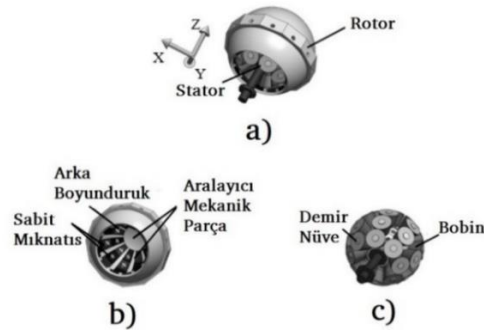
Şekil 2.11 Üç eksenli serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip sabit mıknatıslı küresel motor ve bileşenleri [42]



Şekil 2.12 Radyal olarak yönlendirilmiş halka şeklindeki sabit mıknatıs [42]

Bu çalışmada motorun bulunduğu koordinat sistemine göre X eksenini etrafındaki hareketi sağlayan bobinler 500 sarımdan; Y eksenini etrafındaki hareketi sağlayan bobinler 500 sarımdan ve Z eksenini etrafındaki hareketi sağlayan bobinler 450 sarımdan oluşmaktadır. Her bobin 1 A akım ile enerjilendirilmiştir. Hareketli ve sabit parçaları birleştirmek ve eksenel ile rotasyonel hareketleri gerçekleştirebilmek için rotorun merkezinde küresel bir yataklama bileşeni kullanılmıştır. Motor, X ve Y eksenleri boyunca eksenel hareketi $\pm 30^\circ$ açı değerinde ve Z eksenini boyunca rotasyonel hareketi $\pm 360^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Çalışmalarda motorun X eksenini boyunca 0° ile $+30^\circ$ eğim açısı arasındaki moment değerleri 14.08 mNm ile 19.40 mNm aralığında elde edilmiştir [42].

Diğer bir çalışmada, rotorunda 16 adet sabit mıknatıs ve statorunda 24 adet bobin bulunan çok eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel aktüatör tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen motorun tasarımında, mekanik kısımda bir mil ve küre şeklinde mekanik bileşen kullanılmıştır. Motor eksenel hareketini $\pm 37^\circ$ açı değerinde ve rotasyonel hareketini $\pm 360^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Motorun tüm bobinlerinin direnç değerleri 2 ohm olarak belirlenmiştir ve kayıp 2W değerinde elde edilmiştir [43].



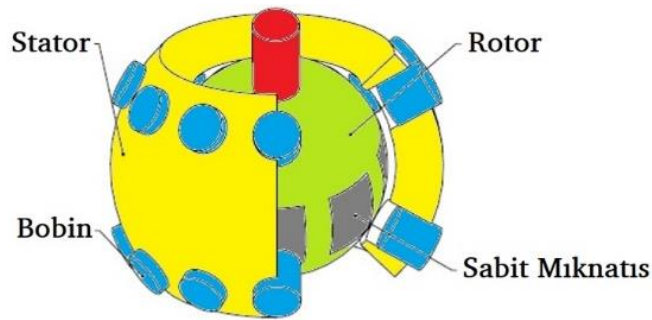
Şekil 2.13 Küre yapısındaki sabit mıknatıslı küresel aktüatör a) Aktüatör b) Rotor c) Stator [43]

Başka bir çalışmada, rotoru 4 çeyrek parça sabit mıknatıstan oluşan, üç eksenli hareket kabiliyetine sahip motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motorun dış stator yarıçapı 90 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik tasarımında yataklama bileşeni ile mil kullanılmıştır. Motor, X ve Y eksenleri boyunca eksenel hareketi $\pm 30^\circ$ açı değerinde ve Z eksenini boyunca rotasyonel hareketi $\pm 360^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ile motorun eksenel hareketlerinde yaklaşık 0.5 N ve rotasyonel hareketinde yaklaşık 1 N kuvvet değerleri elde edilmiştir [45-48].



Şekil 2.14 Sabit mıknatıslı küresel motorun prototipi [45-48]

Bir diğer çalışmada, rotorunda 8 sabit mıknatıs ve statorunda 16 bobinden oluşan üç eksenli hareket kabiliyetine sahip küresel bir aktüatör tasarlanmıştır. Aktüatörün mekanik yapısında mil bileşeni kullanılmıştır. Motorun eksenel hareket açısı $\pm 11^\circ$ değerindedir ve bu açı değerindeki eksenel hareketinde 30.9mNm değerinde moment değeri elde edilmiştir [49].



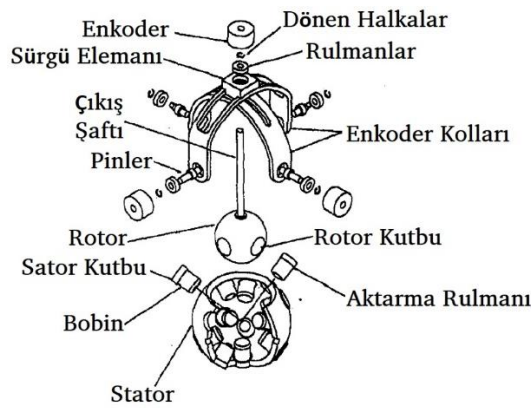
Şekil 2.15 Küresel aktüatörün yapısı [49]

2.2.3 Değişken Relüktanslı Küresel Motor

Değişken relüktanslı küresel motorların rotorunda ve statorunda kutuplar bulunmaktadır. Sabit mıknatıslı küresel motorların rotorunda mıknatıslar mevcutken; değişken relüktanslı küresel motorların rotoru ise mıknatıslanma

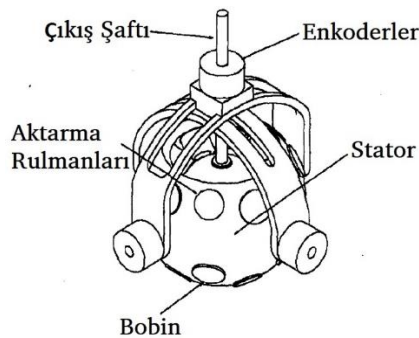
özelliği olmayan ve kutuplara sahip demir malzemeden oluşmaktadır. Statordaki ve rotordaki kutup sayıları, motorun gerçekleştirilmesi istenilen hareketine göre dağıtılmaktadır. Stator kutuplarındaki sargılar enerjilendirildiğinde oluşan manyetik alan ile rotorun hareketi sağlanmaktadır.

Bir değişken relüktanslı küresel motor çalışmasında, değişken relüktanslı adım motorların çalışma prensibini referans alarak, küresel bir aktüatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motor, stator ve rotor yapısının yanı sıra mekanik aksamında kullanılan mekanik elemanlar ile çok fazla bileşenden oluşmaktadır [50-52]. Şekil 2.16'da tasarlanan değişken relüktanslı motor görülmektedir.



Şekil 2.16 Değişken relüktanslı küresel motorun detaylı yapısı [50-52]

Değişken relüktanslı motor modelinde, stator kutuplarındaki bobinler statorun yüzeyinde yer alacak şekilde tasarlanmıştır. Rotor ise yataklama elemanları ile desteklenerek statorun ortasına yerleştirilmiştir. Değişken relüktanslı motorun statoru ve rotoru mekanik rulman elemanları ile birleştirilmiştir. Şekil 2.17'de değişken relüktanslı motorun birleştirilmiş yapısı görülmektedir.

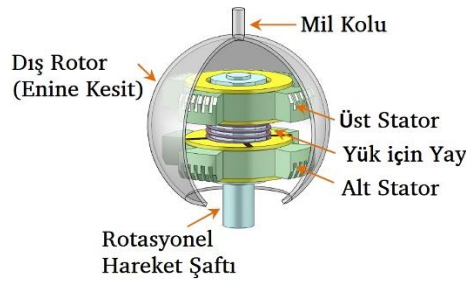


Şekil 2.17 Değişken relüktanslı küresel motorun birleştirilmiş yapısı [50-52]

2.2.4 Ultrasonik Küresel Motor

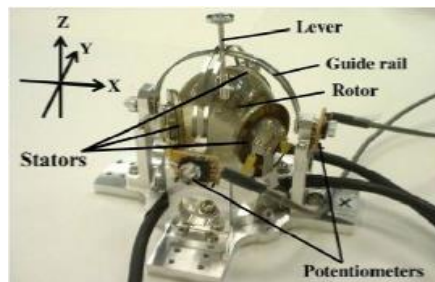
Ultrasonik motorlarda, piezoelektrik bileşenler kullanılıp, ultrasonik dalgalar üretilerek motorun hareketi sağlanır. Ultrasonik küresel motorlarda da statordan enerjilendirilmesi ile statorda bulunan piezoelektrik elemanlar titreşimi gerçekleştirir ve statorda gerçekleşen bu titreşim ile oluşan enerjilenme sayesinde rotorun hareketi sağlanır. Ultrasonik küresel motorların yüksek moment çıkışı ve hızlı çalışma gibi avantajları olsa da titreşim hareketinden kaynaklı sürtünme ve mekanik yükler oluşabilmektedir [11-14].

Dış rotorlu, çok eksenli hareket kabiliyetine sahip bir ultrasonik küresel motor Şekil 2.18’de gösterilmektedir. Bu ultrasonik motor, küresel kabuk yapısında bir dış rotordan ve iki blokluk bir statordan oluşmaktadır. Ancak bu motor modelindeki dış rotor yapısı, üretim hassasiyeti gerektiren ve üretilmesi zor bir yapıdır [11].



Şekil 2.18 Dış rotorlu ultrasonik küresel motor [11]

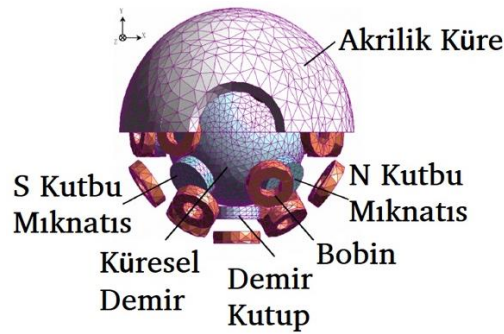
Şekil 2.19’da farklı bir yapıdaki ultrasonik küresel motor tasarımı görülmektedir [12]. Bu motorun rotoru küre şeklinde tasarlanmıştır. Statorda 3 adet silindirik şekilde sargılar ve piezoelektrik elemanlar kullanılmıştır. Stator sargıları enerjilendirildiğinde piezoelektrik elemanların titreşimi sağlanmıştır. Oluşan titreşim ile rotor hareket ettirilmiştir. Ayrıca tasarlanan bu motorun 3 farklı moment kontrolü çalışması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.19 Küresel ultrasonik motor [12]

2.2.5 Küresel Adım Motorlar

Küresel adım motorlarında, statorda bulunan sargıların veya bobinlerin enerjilendirilmesi ile oluşan manyetik alan ve manyetik kuvvetler sayesinde rotorun hareketi sağlanmaktadır [59,60]. Literatürde yer alan küresel adım motoru çalışmalarından birinde, rotorunda 4 kutup çiftinden oluşan sabit mıknatısların yer aldığı ve statorunda 23 adet bobinin bulunduğu bir küresel adım motoru geliştirilmiştir [59].

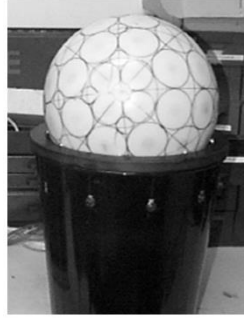


Şekil 2.20 Küresel adım motorunun tasarımı [59]

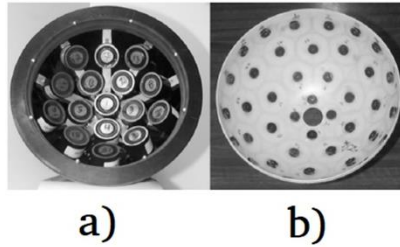
Rotorun sabitlenmesi ve hareketin sağlanması için küresel yataklama elemanı kullanılmıştır. Küre yapısındaki statorun yüzeyine bobinler, hareketin sağlanması ve moment değerinin daha yüksek elde edilmesini sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır. Motorun rotasyonel hareketinde simülasyon çalışmalarında maksimum moment yaklaşık 0.02 Nm değerinde ve deneysel çalışmalarda maksimum moment yaklaşık 0.015 Nm değerinde elde edilmiştir [59].

Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’de ise küre şeklindeki rotorunda 80 adet silindirik yapıda sabit mıknatıs bulunan ve üç eksenli hareket kabiliyetine başka bir küresel adım motoru gösterilmiştir. Motorun statoru demir nüveye sarılı 16 bobinden oluşmaktadır. Bobinler rotorda olduğu gibi küresel bir kapağın yüzeyine yerleştirilmiştir. Rotorun hareketini ve sabit kalmasını sağlamak için bir halka ve 8 adet küçük yapıda bilyeye benzer mekanik elemanlar kullanılmıştır. Statordaki bobinler enerjilendirilerek oluşan manyetik alan ile motorun hareketi sağlanmaktadır. Statordaki bobinler 24 V gerilim ile enerjilendirilmiştir ve 100 W değerine kadar güç elde edilmiştir [60].

Şekil 2.21’de bu küresel adım motoru ve Şekil 2.22’de küresel adım motorunun statoru ve rotoru görülmektedir.



Şekil 2.21 Küresel adım motoru [60]



Şekil 2.22 Küresel adım motorunun rotoru ve statoru a) Stator b) Rotor [60]

2.3 Küresel Motorların Kullanım Alanları

Küresel motorlar genel yapıları itibariyle statorun ya da rotorun hareketli olduğu, doğrusal ve üç eksenli hareketleri yapabilen elektromekanik sistemler olarak tanımlanabilir. Bu çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetleri sayesinde robotik, savunma, havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi endüstriyel uygulama alanlarındaki çok yönlü hareket gereksinimi için avantaj sağlamaktadır. Çok yönlü hareket gereksiniminin yanı sıra, bu hareketlerin büyük açı, yüksek moment ve yüksek kuvvet değerlerinde gerçekleşebilmesi, bu sistemlerde diğer ihtiyaç duyulan özelliklerdir.

Küresel motorların çok eksenli uygulama alanlarında kullanıma örnek olarak robotik, biyomedikal ve savunma sanayi gibi alanlar verilebilir. Örnek olarak robot kollarında veya robotik göz yapılarındaki kamera uygulamalarında eksenel hareket açısı özellikle önem arz etmektedir. Biyomedikal ve tıp alanında, özellikle ameliyatlarda kullanılan kameralı ekipmanlarda bu motorlar başarılı bir şekilde kullanılabilir. Savunma, havacılık ve aviyonik uygulamalarında, özellikle füze güdüm sistemlerindeki elektromekanik bileşenlerin harekete geçirilmesi veya

yönlerinin ayarlanmasında da yine küresel motorlar kullanılabilir. Radar ve uydu sistemlerinde ise antenlerin yönlendirilmesinde büyük eksenel açı gereksiniminin yanı sıra, bu eksenel hareketlerin uygun kuvvet ve moment değerlerinde olması da önem kazanmaktadır. Bu sebeple bu alanlarda da küresel motorlar başarılı şekilde kullanılmaktadır.

2.4 Küresel Motorlarda Manyetik Akı, Kuvvet ve Moment

Küresel motor tasarımında kuvvet, moment ve manyetik akı dağılımı değerleri, tasarımda dikkate alınan önemli parametrelerdir. Çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motorlarda, rotor ile stator arasındaki manyetik alandan dolayı oluşan enerji ile kuvvet ve moment değerleri oluşur. Dolayısıyla küresel motor tasarımında stator ve rotor yapılarının doğru modellenmesi ile moment ve kuvvet parametrelerinin istenen değerlerde elde edilmesi sağlanabilmektedir.

2.4.1 Elektromanyetik Alanın Temel Denklemleri

Küresel motorlarda çok serbestlik dereceli hareketler, motorun yapısına ve çalışma prensibine bağlı olarak; rotorun yapısında bulunan kutuplar, mıknatıslar ile stator yapısında bulunan sargılar arasında oluşan elektromanyetik alan etkileşimi ile gerçekleşmektedir.

Elektromanyetik alan, Denklem 1.1'de ve Denklem 1.2'de verilen Maxwell denklemleri ile açıklanabilmektedir [62].

$$\nabla \times H = J \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.2)$$

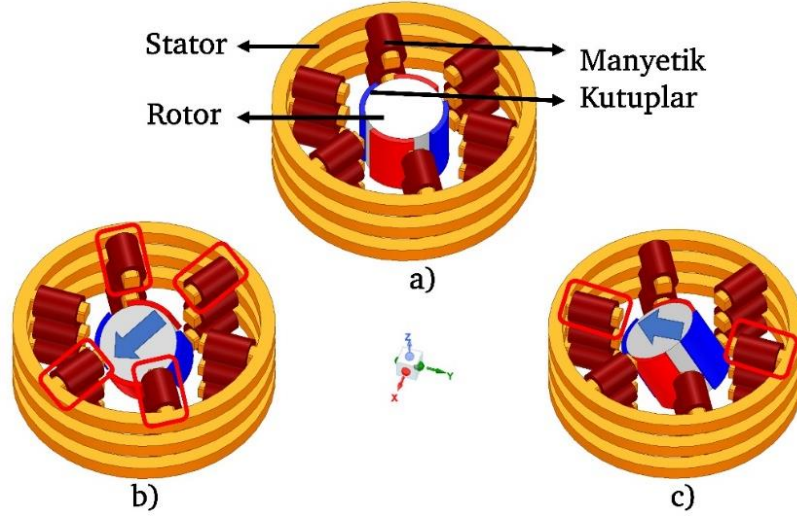
Denklemlerde verilen H , manyetik alan; J , akım yoğunluğu; B , manyetik akı değerleridir.

Malzemelerin ve ortamların manyetik özellikleri ile manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan ifadeleri aşağıda verilen Denklem 1.3'teki gibi açıklanabilir [61,62].

$$B = \mu_r \mu_o H \quad (1.3)$$

Denklem 1.3'te verilen μ_o , boşluğun manyetik geçirgenliğidir ve $4\pi 10^{-7} H/m$ değerindedir. μ_r , bağıl manyetik geçirgenliktir ve malzemenin veya ortamın manyetik özelliğine göre değişmektedir.

Küresel motorlarda stator ve rotor arasındaki manyetik alan etkileşimi ile Şekil 2.23'te gösterilen hareketler gerçekleşir.



Şekil 2.23 Küresel motorlarda manyetik alan etkileşimi a) Enerjilendirilmemiş motor b) X ekseninde hareket etmesi için enerjilendirilmiş motor c) Y ekseninde hareket etmesi için enerjilendirilmiş motor

2.4.2 Manyetik Akı ve Enerji

Manyetik akı değeri elektrik makinalarındaki manyetik kuvvetin ve hareketin oluşmasında dikkate alınması gereken önemli bir kavramdır. Elektrik makinalarının statorundaki sargılar enerjilendirildiğinde manyetik alan ve dolayısıyla manyetik akı meydana gelir. Statorda oluşan bu manyetik akının rotor ile etkileşiminden de manyetik kuvvet meydana gelir ve bu kuvvet ile motorun hareketi sağlanmış olur. Bu hareket gerçekleştirilirken rotor ve stator yapılarında kullanılan elektrik sac malzemelerde maksimum manyetik akı değerinin aşılmaması çok önemlidir. Bu sebeple küresel motor tasarımında da stator veya rotorda manyetik doyum probleminin olmaması, tasarımda özellikle incelenmesi gereken bir konudur. Ayrıca, motorda oluşan manyetik akı dağılımı kuvvet ve moment değerlerini doğrudan etkileyeceğinden, küresel motorun özellikle tasarım aşamasında yapılan elektromanyetik analizlerinde, manyetik akı dağılımı önemle dikkate alınıp, incelenmelidir.

Elektromekanik sistemdeki elektromanyetik etkileşim ile oluşan manyetik enerji aşağıda verilen Denklem 1.4'teki gibi ifade edilebilmektedir [61].

$$W_m = \int_{V_{vol}} \left(\int_0^H (B \cdot dH) \right) dV_{vol} \quad (1.4)$$

Denklem 1.4'te verilen W , manyetik enerji; B , manyetik akı; H , manyetik alan; V_{vol} , elektromekanik sistemin hacim değerleridir.

Elektromekanik sistemdeki manyetik enerji, akım yoğunluğu ve manyetik vektör potansiyeli değerleri kullanılarak, aşağıda verilen Denklem 1.5'teki gibi yazılabilir [62].

$$W_m = \int_{V_{vol}} (A \cdot J) dV_{vol} \quad (1.5)$$

Denklem 1.5'te verilen A , manyetik vektör potansiyeli, J , akım yoğunluğu değerleridir.

2.4.3 Kuvvet ve Moment

Elektromekanik sistemdeki kuvvet ve moment değerleri Lorentz kuvvetleri, Maxwell kuvvetleri ve zahiri iş yöntemleri ile elde edilmektedir.

2.4.3.1 Lorentz Kuvvet Denklemi

Lorentz kuvvet denklemi, akım taşıyan iletkenler ile harici bir manyetik alanın birbiriyle etkileşimi ile oluşan kuvvetin ve momentin hesaplanmasında kullanılır. Lorentz kuvvetleri yöntemiyle elde edilen kuvvet ve moment değerleri sırasıyla aşağıda verilen Denklem 1.6'da ve Denklem 1.7'de verildiği gibi ifade edilir [61,62].

$$F = \int_{V_{vol}} (J \times B) dV_{vol} \quad (1.6)$$

$$T = \int_{V_{vol}} r \times (J \times B) dV_{vol} \quad (1.7)$$

Denklem 1.7'de verilen r , dönme merkezinden hareket noktasına olan moment kolunu; F , kuvvet değerini; T , moment değerini temsil etmektedir.

2.4.3.2 Maxwell Kuvvetleri

Kuvvet ve moment değerleri manyetik enerji değeri kullanılarak aşağıda verilen Denklem 1.8 ve 1.9'da verildiği gibi ifade edilir [62].

$$F = \nabla W_m \quad (1.8)$$

$$T = \nabla W_m \quad (1.9)$$

Kuvvet, Denklem 1.4 kullanılarak, Maxwell kuvvetleri yöntemine göre aşağıda Denklem 1.10'daki gibi ifade edilebilir [62].

$$F = \oint_s \Gamma ds = \oint_s \left(\frac{1}{\mu_o} \left(B(B \cdot n) - \frac{1}{2} |B|^2 n \right) \right) ds \quad (1.10)$$

Denklem 1.10'da verilen s , kuvvetin elde edileceği bölgeyi çevreleyen bir sınır yüzeyi; n , s değerinin normal değerleridir.

2.4.3.3 Zahiri İş Kuvvetleri

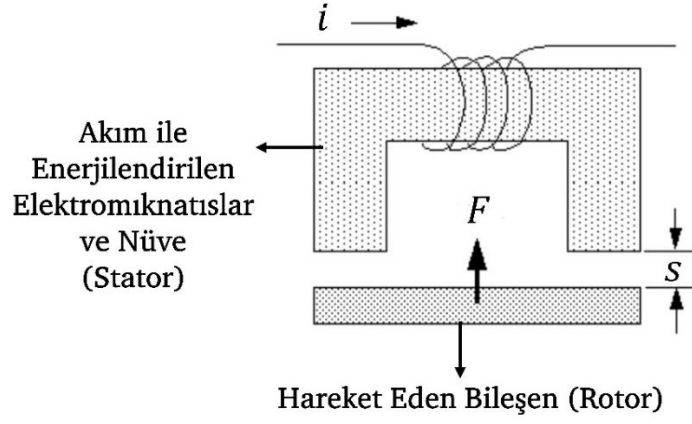
Kuvvet ve moment değerleri, Denklem 1.4, Denklem 1.8 ve Denklem 1.9 kullanılarak, Zahiri iş kuvvetleri yöntemi ile sırasıyla Denklem 1.11 ve Denklem 1.12'deki gibi ifade edilebilir [61].

$$F = \left| \frac{dW_m(s, i)}{ds} \right|_i = \frac{\partial}{\partial s} \left[\int_{V_{vol}} \left(\int_0^H B * dH \right) dV_{vol} \right] \quad (1.11)$$

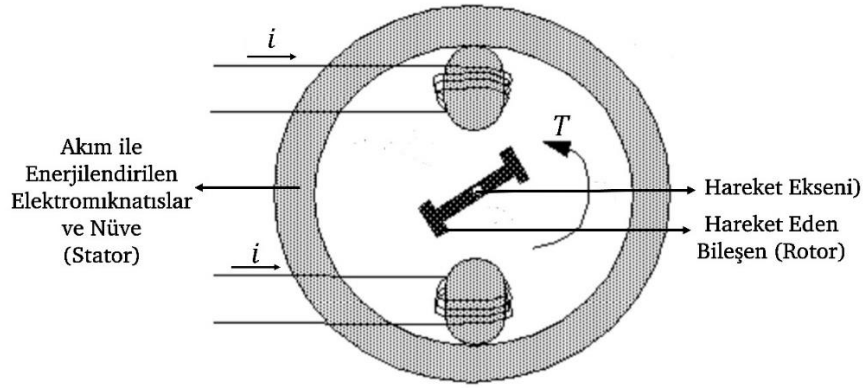
$$T = \left| \frac{dW_m(\theta, i)}{d\theta} \right|_i = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\int_{V_{vol}} \left(\int_0^H B * dH \right) dV_{vol} \right] \quad (1.12)$$

Denklem 1.11 ve Denklem 1.12'de verilen i , sargı veya bobinlere tanımlanan akım; θ , hareket açısı değerlerini temsil etmektedir.

Denklem 1.11'de verilen kuvvet ve moment değerleri, statordaki sargının enerjilendirilmesi ve rotordaki kutup veya mıknatıslar arasında elektromanyetik etkileşimle oluşan manyetik enerji ile elde edilmektedir. Şekil 2.24'te ve Şekil 2.25'te sırasıyla oluşan bu kuvvet ve moment değerlerinin nasıl elde edildikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.24 Kuvvet değerinin elde edilmesi



Şekil 2.25 Moment değerinin elde edilmesi

2.4.4 Güç Tüketimi

Motorların özellikle stator yapılarında kullanılan sargıların enerjilendirilmesi ile güç tüketimi meydana gelir. Güç tüketimi, statorda enerjilenen sargıların direnci ve sargılardan geçen akım değeri kullanılarak, aşağıda verilen Denklem 1.13'teki gibi hesaplanır [41,42].

$$P = I * V = I^2 * R \quad (1.13)$$

Denklem 1.13'te verilen P , güç; I , statordaki enerjilendirilen sargı akım; V , gerilim; R , statordaki enerjilendirilen sargının direnç değerlerini temsil etmektedir.

KÜRESEL MOTORUN TASARIM OPTİMİZASYONU VE ELEKTROMANYETİK ANALİZİ

Küresel motorun nihai prototip tasarımının belirlenebilmesi için birçok parametre göz önünde bulundurularak; farklı stator yapıları, farklı mıknatıs yapıları, farklı mıknatıs türleri ve farklı stator ile rotor malzemeleri için motor modelleri oluşturulmuştur. Tüm tasarımlarda manyetik akı yoğunluğu dağılımları, kuvvet ve moment değerleri, bu tez çalışmasında hedeflenen $\pm 45^\circ$ hareket açısını sağlayacak şekilde elde edilmiş ve elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir [63].

Nihai motor modelini elde etmek için yapılan optimizasyon çalışmasında, temelde 2 motor modeli referans alınmıştır. Bu motorlar; her bir stator bloğunda 6 sargı olmak üzere, 3 bloklu 18 sargılı stator yapısındaki sabit mıknatıslı küresel motor (SMKM1) ile her bir stator bloğunda 8 sargı olmak üzere 3 bloklu 24 sargılı stator yapısındaki sabit mıknatıslı küresel motor (SMKM2) yapılarıdır [63]. Bu motorlar ayrıca kartezyen koordinat sistemindeki konumuna göre pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerindeki $\pm 45^\circ$ hareket açısını sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır.

SMKM1 ve SMKM2 tasarımları; gömülü düz, gömülü V-tipi ve yüzey mıknatıs yapıları için ayrı ayrı modellenmiştir. Mıknatıslar için NdFe30, NdFe35, SmCo28 malzemeleri ve stator ile rotor yapıları için ise Steel-1008, M43-24G ve JFE-Steel-50JNE300 malzemeleri kullanılmıştır. Böylece küresel motorun bu farklı yapıları dikkate alınarak, toplamda 54 farklı tasarımı ele alınmış ve 216 adet elektromanyetik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir [63]. Tüm tasarım modelleri için yapılan elektromanyetik analiz çalışmalarında, manyetik akı yoğunluğu dağılımları, moment ve kuvvet değerleri elde edilmiştir. SMKM1 ve SMKM2 motorlarının tasarımları ve elektromanyetik analizleri Ansys Maxwell yazılımında SEY kullanılarak yapılmıştır [61].

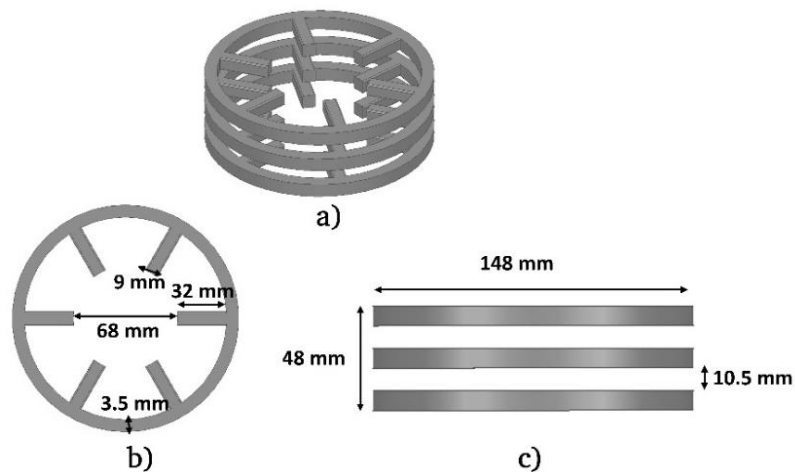
3.1 Küresel Motor Modellerinin Oluşturulması

Farklı stator yapılarına sahip SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin rotorları için; yüzey, gömülü düz ve gömülü V tipi olmak üzere üç farklı mıknatıs yapısı referans

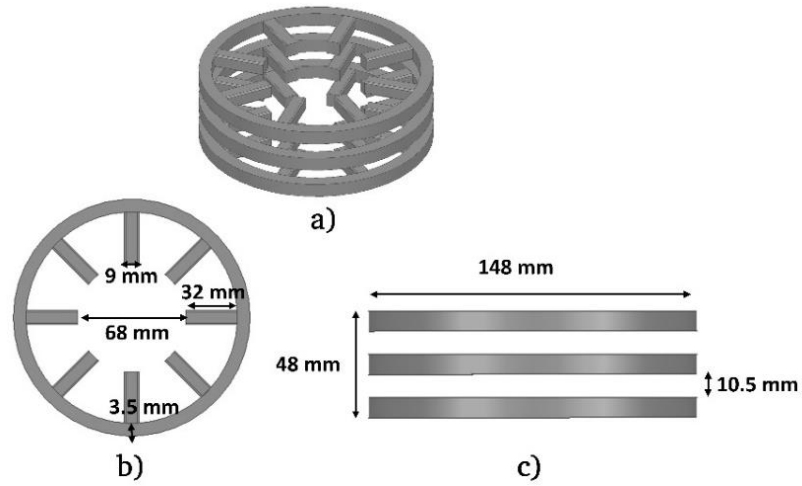
alınarak, analizler gerçekleştirilmiştir. Bu iki motor modelinin stator ve rotorlarında kullanılacak sac malzemesi için ise; Steel-1008, M43-24G ve JFE-Steel-50JNE300 malzemeleri seçilmiştir. Bu malzemeler özellikle hem bu malzemelerin manyetik özelliklerinden dolayı, hem de prototip aşamasında malzeme tedariki, üretilebilirlik ve maliyet gibi durumlar göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Ayrıca SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin rotorlarında mıknatıs malzemesi olarak NdFe30, NdFe35 ve SmCo28 malzemeleri kullanılmıştır.

3.1.1 Küresel Motor Modellerinin Stator Yapıları

SMKM1'in statorunda 6 kutup, SMKM2'nin statorunda 8 kutup vardır. Her iki motorun statoru da 3 stator bloğundan oluşmaktadır. Dolayısıyla SMKM1'in statoru 18 sargıdan, SMKM2'nin statoru 24 sargıdan oluşmaktadır. Küresel motor modellerinin statoru, 3 katlı blok yapısından oluştuğundan, stator için kullanılacak malzeme miktarı artacak olmasına rağmen, statorun orta bloğunun olması, küresel motorun hareket ettiği yönde sabit kalması adına avantaj sağlayacaktır. Stator blokları 19 mm mesafe aralığında tasarlanmıştır. Böylece stator kutuplarına sarılacak sargılar için yeterli yer bırakılmıştır. Stator kutupları ile rotor arasındaki hava aralığının, her kutup için eşit olmasına dikkat edilmiştir. Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak oluşturulan SMKM1'in ve SMKM2'nin stator yapıları sırasıyla Şekil 3.1'de ve Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

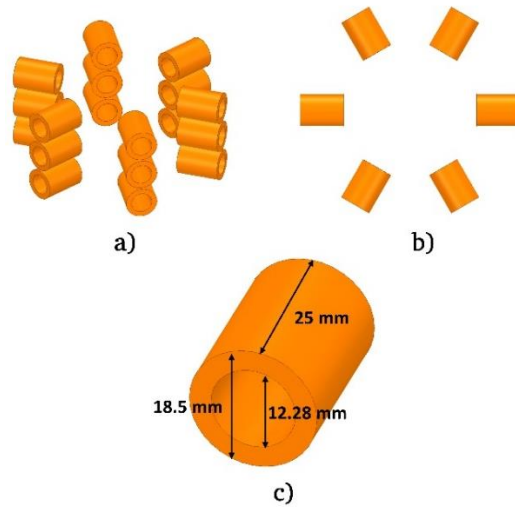


Şekil 3.1 6 kutuplu, üç bloktan oluşan SMKM1 motor modelinin stator yapısı a) Üç bloklulu stator b) Statorun ölçüleri c) Stator bloklarının boyutları

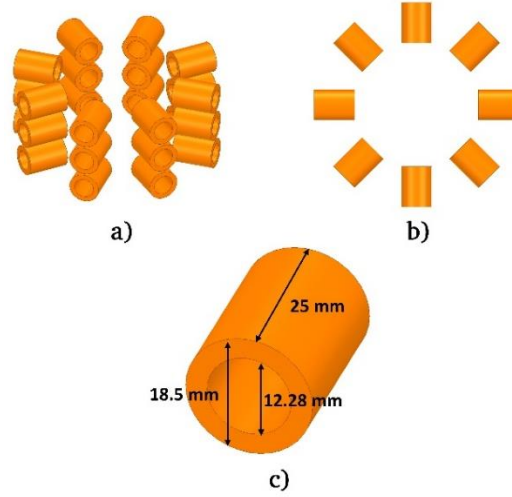


Şekil 3.2 8 kutuplu üç bloktan oluşan SMKM2 motor modelinin stator yapısı a) Üç bloklu stator b) Statorun ölçüleri c) Stator bloklarının boyutları

SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin statorlarında bulunan sargıların her biri 90 sarımdan oluşmaktadır. Sargılarda 0.81 mm çapında bakır iletken kullanılmıştır. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının sargı yapıları sırasıyla Şekil 3.3'te ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 SMKM1 motor modelinin stator sargı yapısı a) Stator sargılarının tümü b) Statorun bir bloğundaki sargılar c) Sargıların ölçüleri

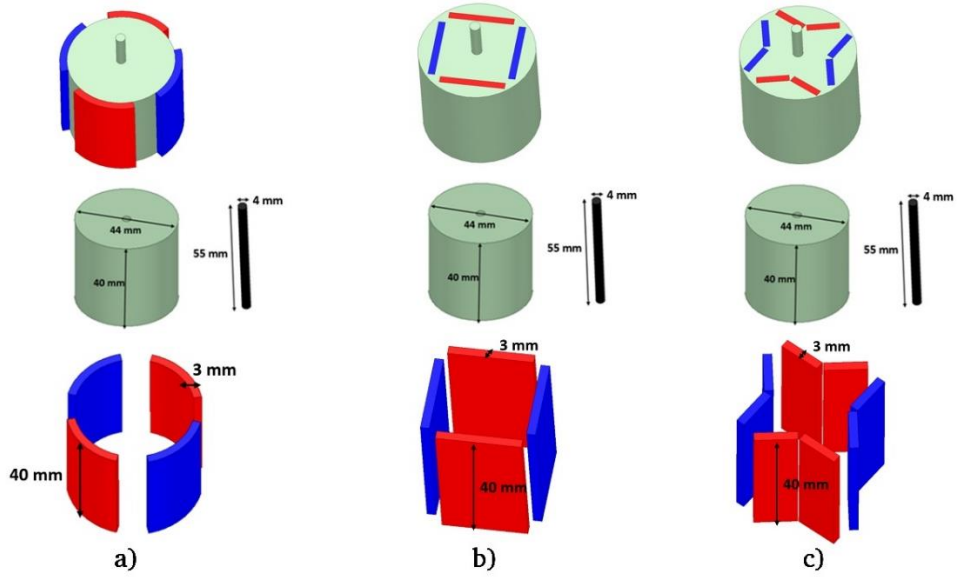


Şekil 3.4 SMKM2 motor modelinin stator sargı yapısı a) Stator sargılarının tümü b) Statorun bir bloğundaki sargılar c) Sargıların ölçüleri

Küresel motorun stator ve rotor yapılarında Steel-1008, M43-24G ve JFE-Steel-50JNE300 malzemeleri kullanılmıştır. Steel_1008 malzemesinin iletkenliği 2000000 Siemens/m, M43-24G malzemesinin iletkenliği 2500000 Siemens/m, JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin iletkenliği 2127660 Siemens/m değerlerindedir. Steel_1008 malzemesinin manyetik doyum noktası 2.5 T, M43-24G malzemesinin manyetik doyum noktası 2 T, JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin manyetik doyum noktası 2.1 T değerlerindedir.

3.1.2 Küresel Motor Modellerinin Rotor Yapıları

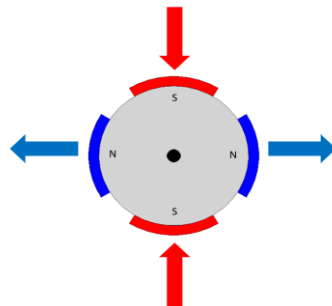
SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının rotorları 4 kutuplu ve aynı yapıya sahiptir. Tasarım optimizasyonu için rotorda kullanılan mıknatıslar yüzey, gömülü düz ve gömülü V-tipi yapılarında seçilerek, rotorda konumlandırılmışlardır. Rotorun merkezi referans alınıp, sabit mıknatıslar birbirleriyle 90° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Rotorda sabit mıknatıslar karşılıklı olarak N kutbu ve S kutbu olacak şekilde konumlandırılmıştır. Böylece sargılardaki akımın oluşturduğu manyetik alan kuvvetine göre rotor hareketi sağlanmış olacaktır. Ayrıca motorun hareket eksenine bağlı olarak yön tayinini yapabilmek için, 40 mm uzunluğundaki kısmı rotorun içinde kalacak şekilde, 55 mm uzunluğunda bir motor mili modellenmiştir. Şekil 3.5'te sabit mıknatıslar, rotor ve mil gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 mal SMKM1 tasarımları için pozitif SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin rotor yapıları a) Yüzey mıknatıslı rotor yapısı ve ölçüleri b) Gömülü düz mıknatıslı rotor yapısı ve ölçüleri c) Gömülü V tipi mıknatıslı rotor yapısı ve ölçüleri

SMKM1 ve SMKM2 motor tasarımlarının rotorlarında NdFe30, NdFe35 ve SmCo28 malzemeleri kullanılmıştır. NdFe30 malzemesinin manyetik geçirgenliği 1.044, NdFe35 malzemesinin manyetik geçirgenliği 1.1 ve SmCo28 malzemesinin manyetik geçirgenliği 1.038 değerlerindedir.

Küresel motordaki sabit mıknatıslar 2 adet N kutbu ve 2 adet S kutbu olmak üzere rotora yerleştirilmişlerdir. Sabit mıknatısların manyetik alan yönleri küresel rotorun merkezinden yarıçapına doğru yönlendirilmiştir. Şekil 3.6'da küresel rotordaki sabit mıknatısların ve rotorun manyetik alan yönleri gösterilmektedir.

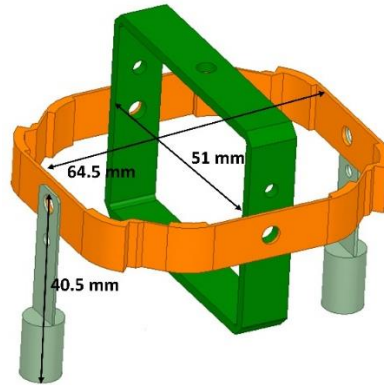


Şekil 3.6 SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin rotorunda bulunan sabit mıknatısların yönleri

3.1.3 Küresel Motor Modellerinin Mekanik Yapıları

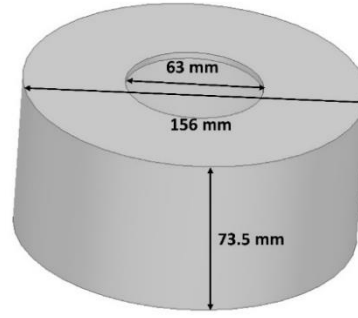
SMKM1 ve SMKM2 motor tasarımlarının eksenel hareketlerini $\pm 45^\circ$ açı değerinde gerçekleştirebilmeleri için mekanik yapıları, herhangi bir küresel rulman, küresel mafsal, küresel yatak elemanları gibi mekanik bileşenler kullanmadan tasarlanmıştır. Rotoru saran iki hareketli parça, motorun bulunduğu kartezyen koordinat sistemindeki X ve Y eksenlerindeki hareketlerini sağlaması için tasarlanmıştır. Bu hareketli iki parça pinler ile birbirlerine entegre edilmiştir. Hareketli iki parça ve rotor, iki adet sabit parça ile motorun gövdesine sabitlenmiştir.

Hareketli parçalardan birinin çapı 64.5 mm ve diğerinin çapı 51 mm uzunluğundadır. Hareketli iki parçayı motorun gövdesine sabitleyen iki parçanın uzunluğu 40.5 mm olarak modellenmiştir. Motorun mekanik aksamında Stainless Steel malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.7’de rotorun hareketini sağlayan hareketli ve sabit parçalardan oluşan mekanik aksam gösterilmiştir.



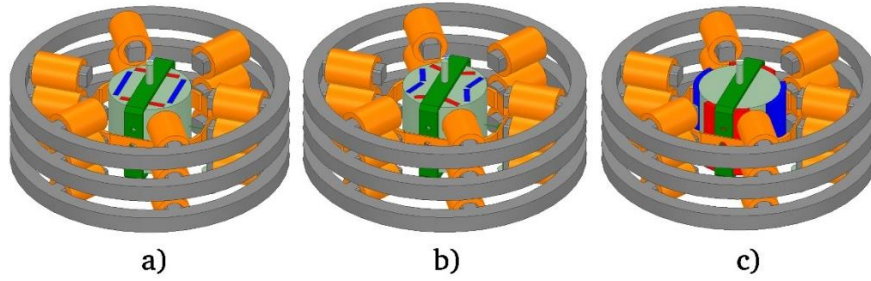
Şekil 3.7 SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinde rotorunun hareketini sağlayan mekanik aksam

Motorun dış gövdesi ise statoru, rotoru ve tüm mekanik aksamı içine alacak şekilde tasarlanmıştır. Dış gövdenin uzunluğu 73.5 mm, çapı 156 mm ve rotorun hareketini sağlayacağı kısımdaki boşluğun çapı 63 mm olarak belirlenmiştir. Motorun dış gövdesinde Stainless Steel malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.8’de motorun dış gövdesi verilmiştir.

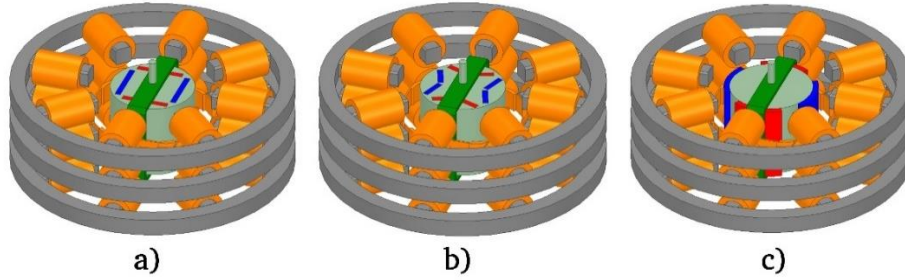


Şekil 3.8 SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinin dış gövdesi

Statoru, sargıları, rotoru, mıknatısları, mekanik aksamı ve dış gövdesi ayrı ayrı Ansys Maxwell yazılımında modellenen SMKM1 ile SMKM2 tasarımlarının genel yapıları sırasıyla Şekil 3.9’da ve Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 SMKM1 motor modelinin genel yapısı a) Gömülü düz mıknatıslı yapı b) Gömülü V-tip mıknatıslı yapı c) Yüzey mıknatıslı yapı

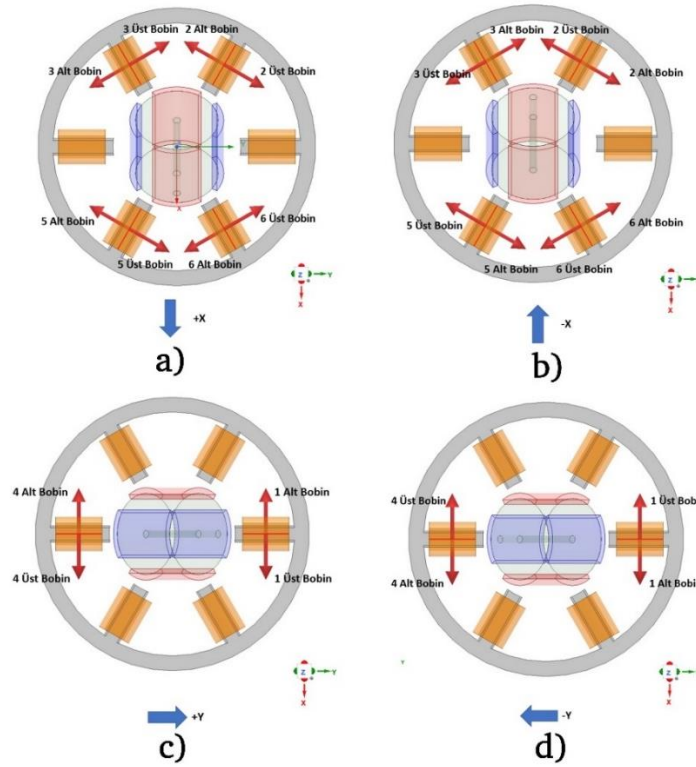


Şekil 3.10 SMKM2 motor modelinin genel yapısı a) Gömülü düz mıknatıslı yapı b) Gömülü V-tip mıknatıslı yapı c) Yüzey mıknatıslı yapı

3.2 Küresel Motor Modellerinin Elektromanyetik Analizleri

Statik elektromanyetik analizde, enerjilendirme için sargılara amper-sarım cinsinden değerler tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple SMKM1 ve SMKM2 modellerinin statorunda yer alan tüm sargılar için 90 sarım değeri tanımlanmış ve daha sonra istenen hareket yönüne bağlı olarak belirli sargılara 1A’lık akım verilerek enerjilendirme yapılmıştır.

Küresel motor üç boyutlu hareket kabiliyetine sahiptir. Bu sebeple motorun rotorunun koordinat sisteminde orjinde yer aldığı düşünülerek, motorun X ve Y eksenlerinin pozitif ve negatif yöndeki hareket açılarının değişimlerine göre, 45° lik açısal hareketler yaptırılmış ve her eksenel hareket için de elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik analizlerle, hareket açısının değişimlerine göre küresel motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımları ve moment değerleri elde edilmiştir. Küresel motorun konumunun kartezyen koordinat sistemindeki konumuna göre, pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerindeki hareketlerini yapmadan önce, küresel motorun statik olarak konumlandığı 0° olan ilk durumu ve 45° olan son durumunun analizleri gerçekleştirilmiştir.

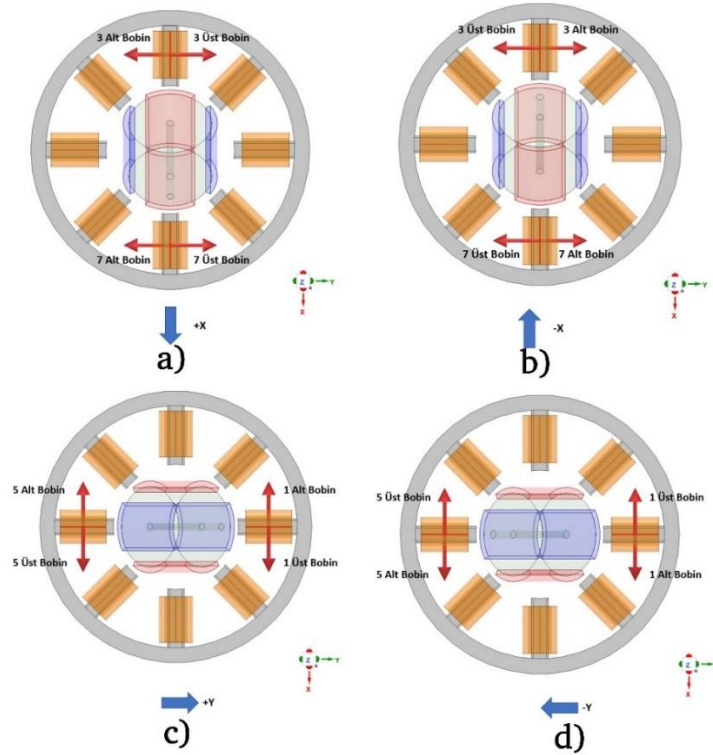


Şekil 3.11 SMKM1 motor modelinin hareket eksenlerine göre enerjilenen stator sargıları ve hareket yönleri a) Pozitif X yönündeki hareketi b) Negatif X yönündeki hareketi c) Pozitif Y yönündeki hareketi d) Negatif Y yönündeki hareketi

SMKM1 motor modelinin bulunduğu koordinat sistemi referans alındığında, pozitif X yönünde hareketini sağlamak için 2 Alt, 3 Alt, 5 Alt, 6 Alt ve 2 Üst, 3 Üst, 5 Üst, 6 Üst sargıları enerjilendirildiğinde; 2 Alt, 3 Alt, 5 Üst, 6 Üst sargıları karşısındaki S kutbunu itecek ve 5 Alt, 6 Alt, 2 Üst, 3 Üst sargıları karşısındaki S

kutbunu kendi eksen doğrultusuna çekmek isteyeceklerdir. Böylece itme ve çekme kuvvetleri ile küresel motor maksimum 45° lik açı ile hareket edecektir. Küresel motorun kartezyen koordinat sistemindeki konumuna göre pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerindeki hareketlerinin sağlanması için enerjilendirilmesi gereken stator sargıları ve hareket yönleri Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

SMKM2 motor modelinin bulunduğu koordinat sistemi referans alındığında pozitif X yönünde hareketini sağlamak için 3 Alt, 7 Alt ve 3 Üst, 7 Üst sargıları enerjilendirildiğinde; 7 Üst, 3 Alt sargıları karşısındaki S kutbunu itecek ve 7 Alt, 3 Üst sargıları karşısındaki S kutbunu kendi eksen doğrultusuna çekmek isteyeceklerdir. Böylece itme ve çekme kuvvetleri ile küresel motor maksimum 45° lik açı ile hareket edecektir. Küresel motorun kartezyen koordinat sistemindeki konumuna göre pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerindeki hareketlerinin sağlanması için enerjilendirilmesi gereken stator sargıları ve hareket yönleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 SMKM2 motor modelinin hareket eksenlerine göre enerjilenen stator sargıları ve hareket yönleri a) Pozitif X yönündeki hareketi b) Negatif X yönündeki hareketi c) Pozitif Y yönündeki hareketi d) Negatif Y yönündeki hareketi

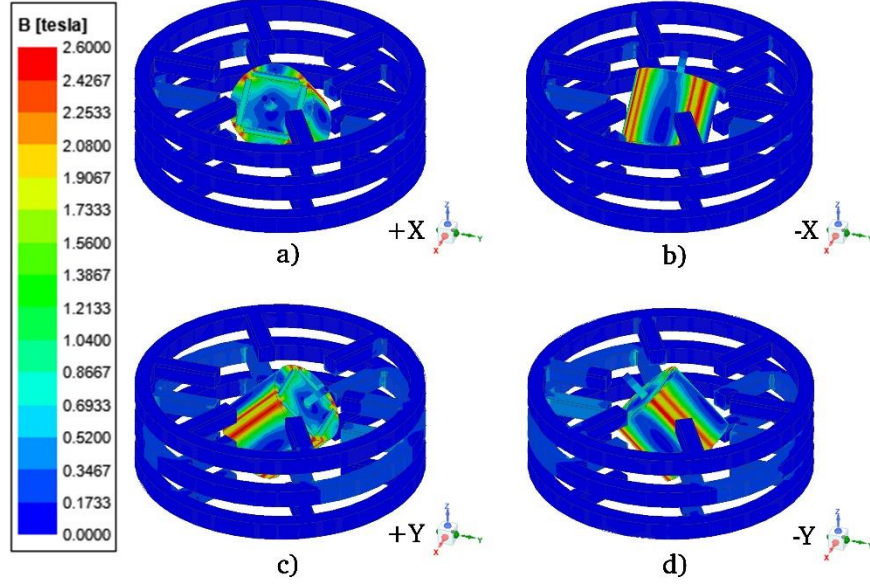
3.3 Küresel Motor Modellerinin Elektromanyetik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Küresel motor iki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahiptir. Bu sebeple rotorun koordinat sisteminin orijininde yer aldığı düşünülerek, motorun X ve Y eksenlerinin pozitif ve negatif yöndeki hareketinin açılarının değişimlerine göre 45°'lik açısal hareketler yaptırılmış ve her eksenel hareket için de elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir.

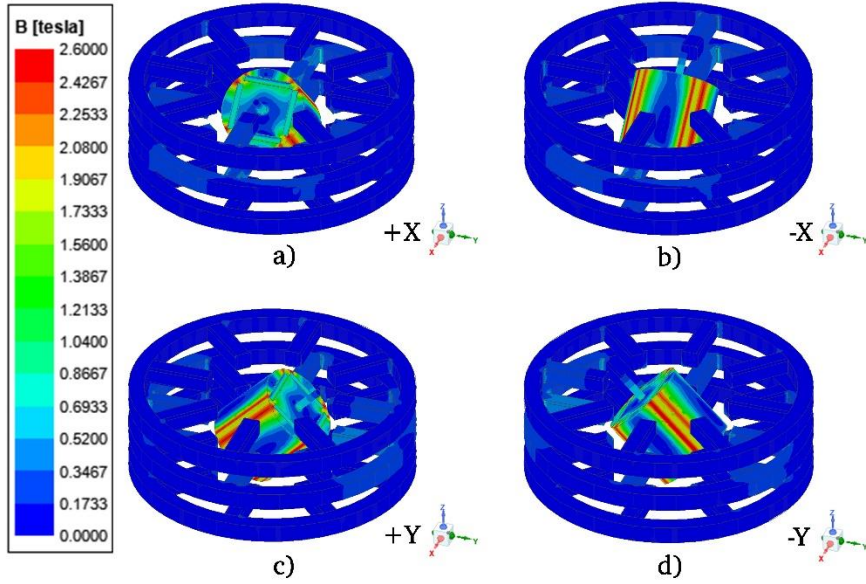
SMKM1 ve SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde; mıknatısların NdFe30, NdFe35, SmCo28 malzemelerden oluştuğu ve mıknatıs yapısının gömülü düz mıknatıs, gömülü V-tipi mıknatıs, yüzey mıknatıs olduğu; stator ve rotor yapılarının Steel-1008 , M43-24G, JFE-Steel-50JNE300 malzemelerden oluştuğu modellerin 45° açı değerindeki hareket pozisyonlarındaki elektromanyetik analizleri gerçekleştirilerek manyetik akı yoğunluğu dağılımları, kuvvet değerleri ve moment değerleri elde edilmiştir.

3.3.1 Küresel Motorun Gömülü Düz Mıknatıs Yapısındaki Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizleri

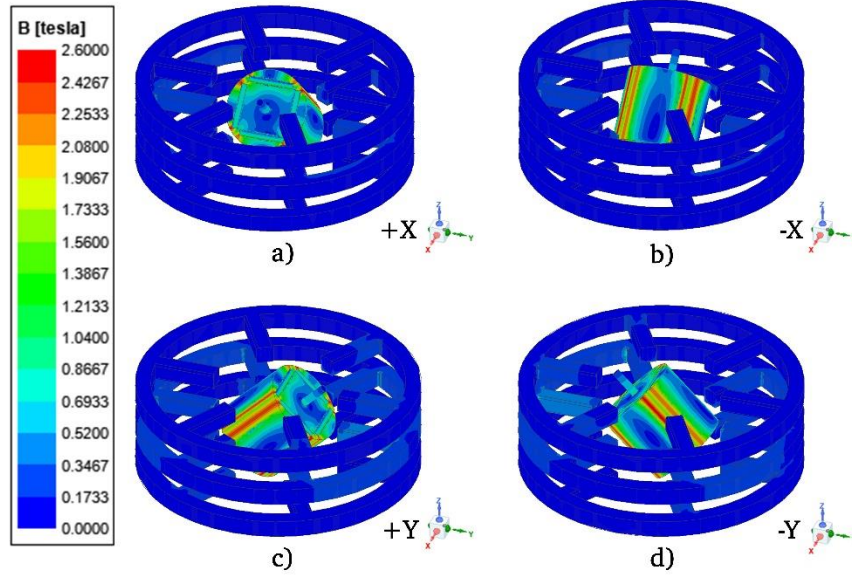
Elektromanyetik analizde küresel motor pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde ve 45° açı değerindeki konumundadır. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının gömülü düz mıknatıs yapısı için 45° açı değerindeki hareket pozisyonlarındaki pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde; mıknatısların NdFe30, NdFe35, SmCo28 ve stator ile rotor yapılarının Steel-1008, M43-24G, JFE-Steel-50JNE300 malzemelerden oluştuğu modellerin elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının gömülü düz mıknatıs yapısı için mıknatıs, stator, rotor yapılarında kullanılan malzemelere göre manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 3.13-Şekil 3.30 arasında verilmiştir.



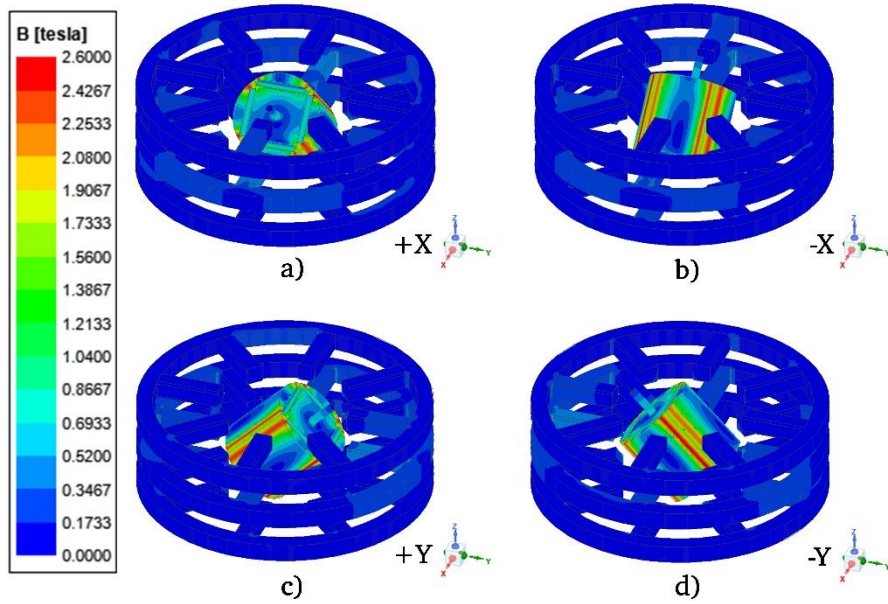
Şekil 3.13 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



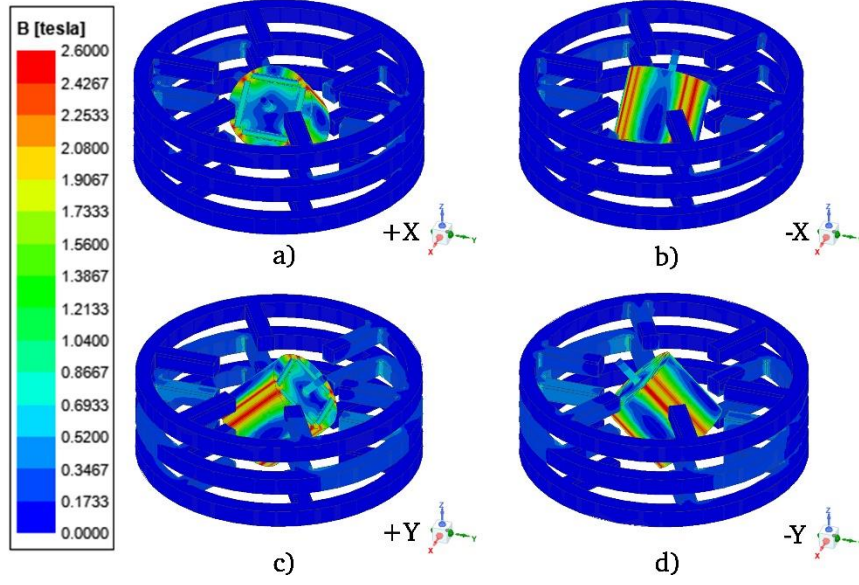
Şekil 3.14 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



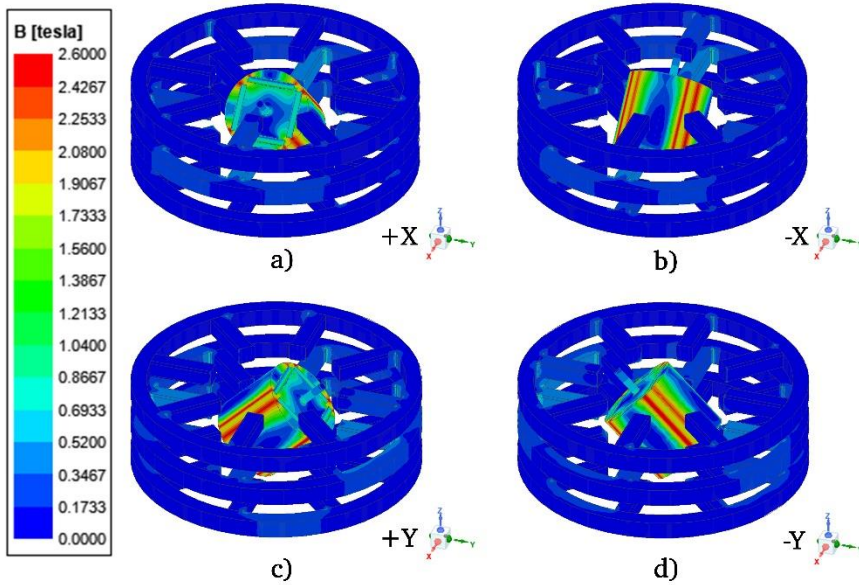
Şekil 3.15 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



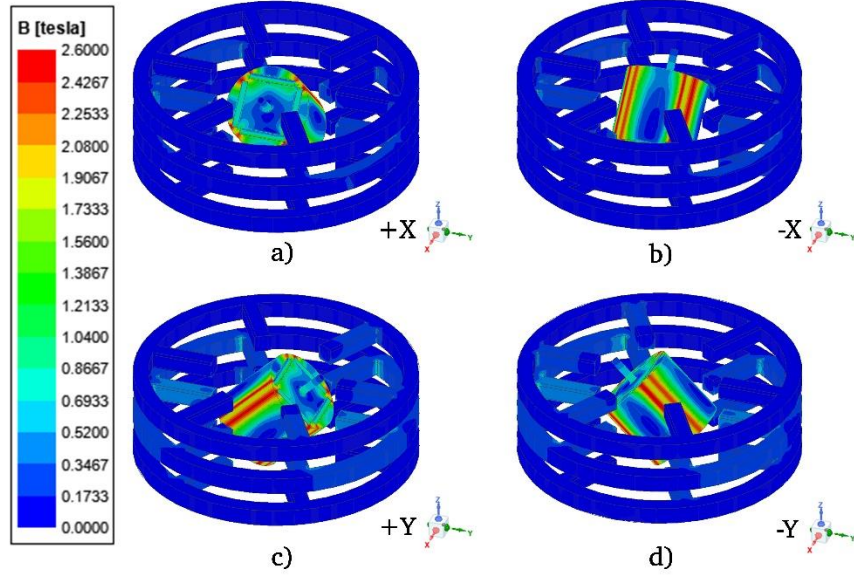
Şekil 3.16 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



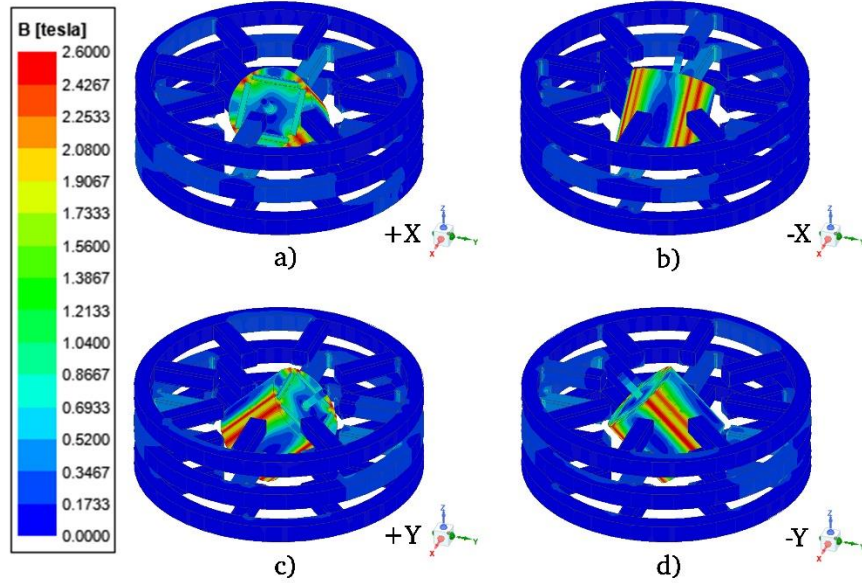
Şekil 3.17 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



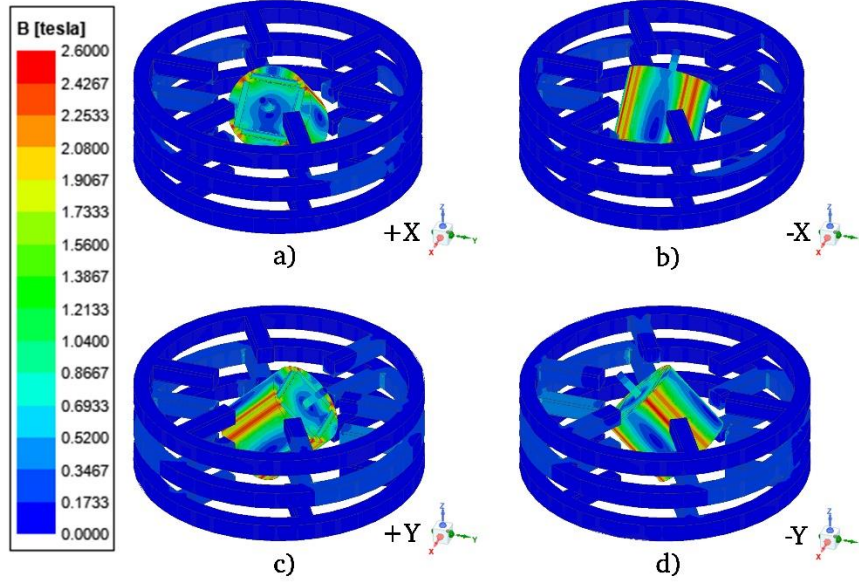
Şekil 3.18 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



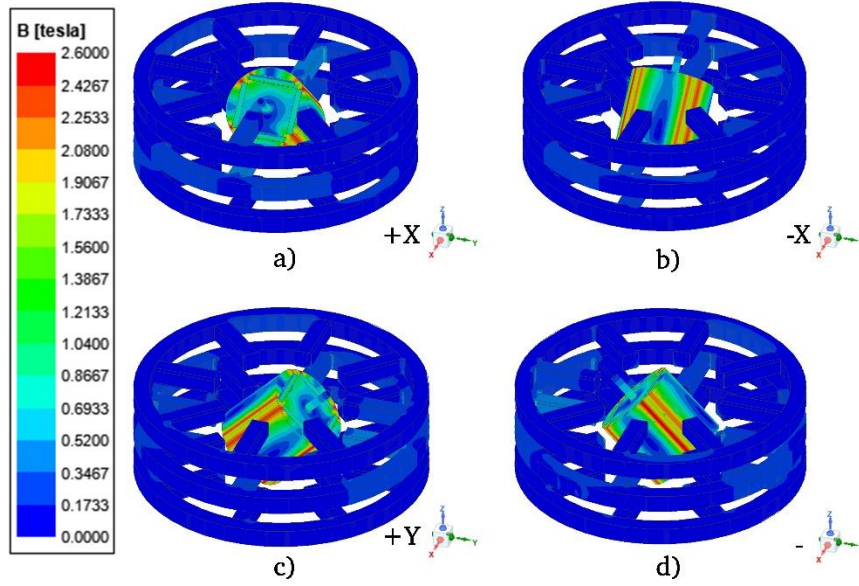
Şekil 3.19 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



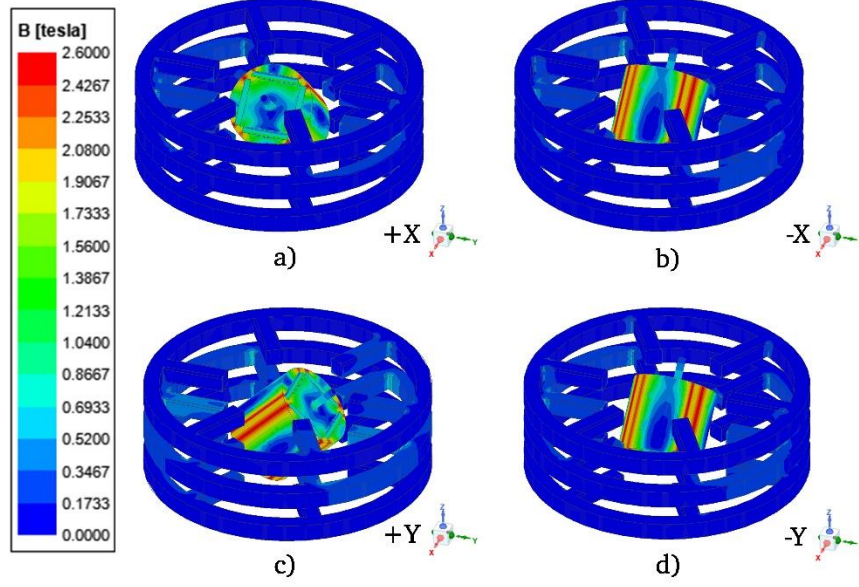
Şekil 3.20 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



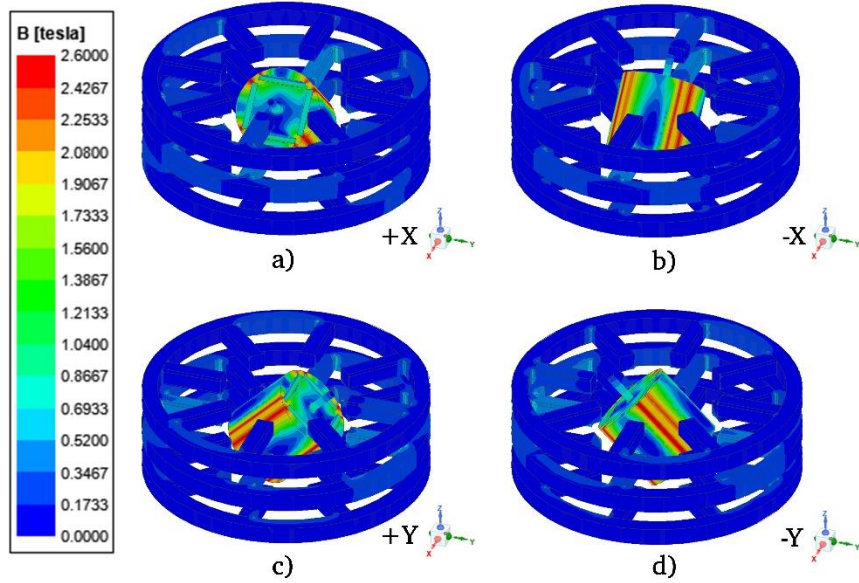
Şekil 3.21 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



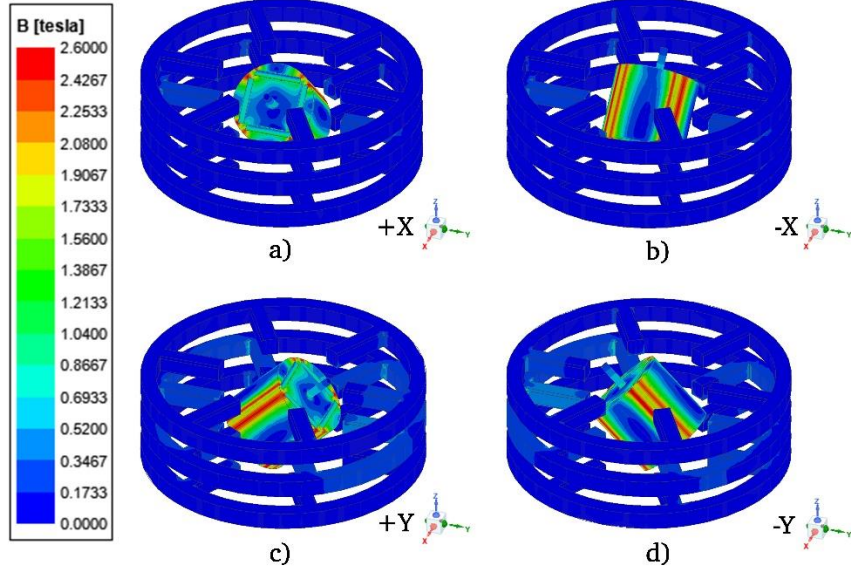
Şekil 3.22 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



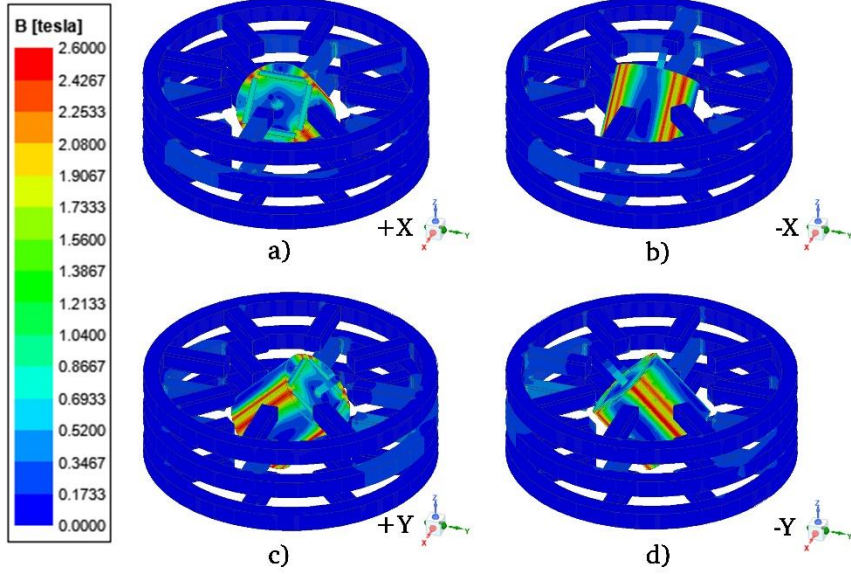
Şekil 3.23 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



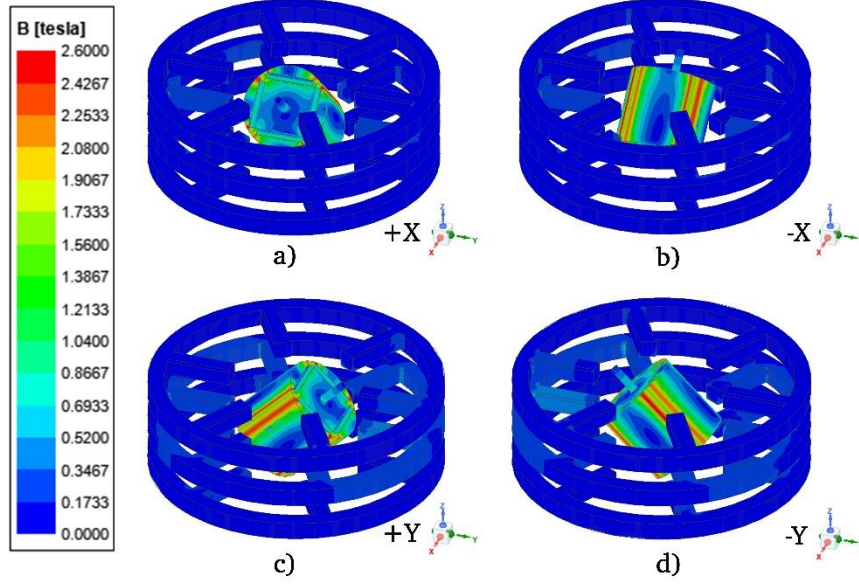
Şekil 3.24 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



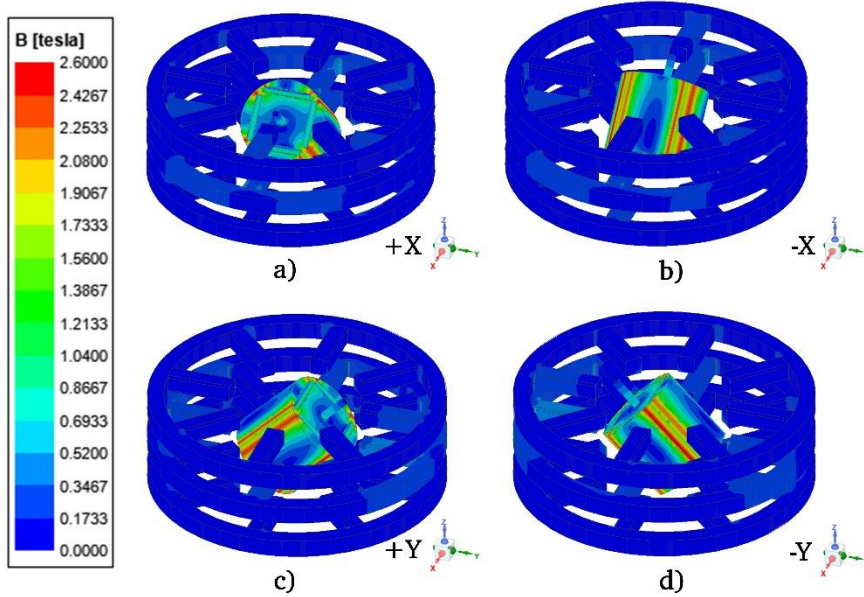
Şekil 3.25 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



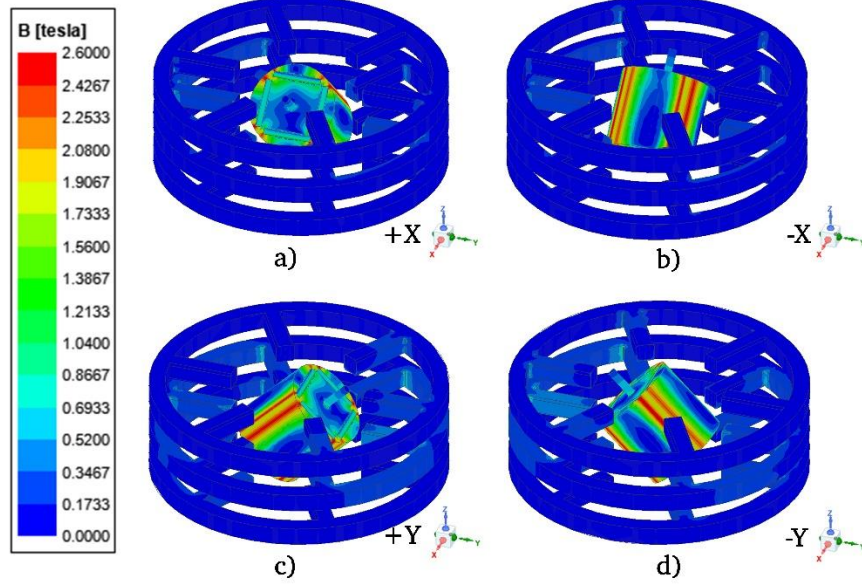
Şekil 3.26 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



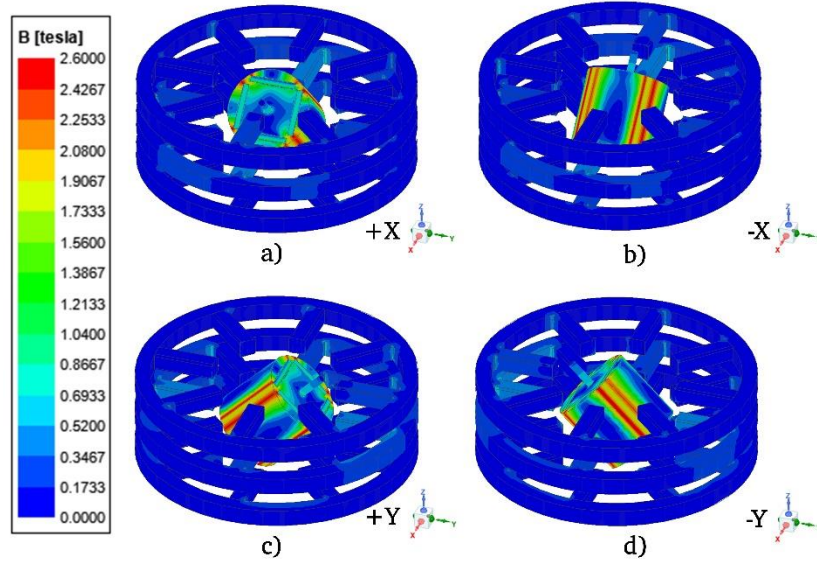
Şekil 3.27 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.28 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.29 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.30 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde

Elektromanyetik analizleri gerçekleştirilerek yukarıda Şekil 3.13'ten Şekil 3.30'a kadar manyetik akı yoğunluğu dağılımları verilen SMK1 ve SMK2'nin tasarımlarının her biri için elde edilen kuvvet ve moment değerleri Tablo 3.1-Tablo 3.18 arasında verilmiştir.

Tablo 3.1 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1092	0.0435	0.1863	0.1539
Moment (mNm)	15.7460	15.2589	8.2652	5.9487

Tablo 3.2 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0539	0.0990	0.1347	0.1974
Moment (mNm)	8.1898	9.0707	9.1116	7.2927

Tablo 3.3 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1180	0.0541	0.1895	0.1592
Moment (mNm)	17.0834	16.8055	8.2746	6.0132

Tablo 3.4 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0631	0.1047	0.1460	0.1996
Moment (mNm)	9.1623	9.2044	9.9437	7.5337

Tablo 3.5 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1139	0.0491	0.1938	0.1612
Moment (mNm)	16.5436	15.9820	8.6692	6.2959

Tablo 3.6 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0570	0.1043	0.1362	0.1989
Moment (mNm)	8.8241	9.6526	9.6260	7.8355

Tablo 3.7 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1425	0.0660	0.2493	0.2106
Moment (mNm)	20.4858	19.9533	10.5532	7.8264

Tablo 3.8 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0738	0.1302	0.1840	0.2564
Moment (mNm)	10.9297	11.9418	11.8545	9.6548

Tablo 3.9 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1405	0.0590	0.1972	0.1678
Moment (mNm)	19.9916	18.2123	8.6321	6.2118

Tablo 3.10 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0667	0.0939	0.1492	0.2373
Moment (mNm)	9.4217	7.8682	10.0695	8.6757

Tablo 3.11 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1221	0.0664	0.2276	0.1649
Moment (mNm)	17.1802	19.7248	9.7597	6.0724

Tablo 3.12 Gömülü düz mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0718	0.1121	0.1602	0.2364
Moment (mNm)	10.7976	9.5814	10.7914	8.7617

Tablo 3.13 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1009	0.0383	0.1708	0.1403
Moment (mNm)	14.5516	14.0754	7.6714	5.4771

Tablo 3.14 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0492	0.0916	0.1228	0.1828
Moment (mNm)	7.5085	8.3475	8.4184	6.7049

Tablo 3.15 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1108	0.0479	0.1744	0.1461
Moment (mNm)	16.0870	15.5090	7.7470	5.6066

Tablo 3.16 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0586	0.0977	0.1336	0.1927
Moment (mNm)	8.5746	8.5983	9.2748	7.5793

Tablo 3.17 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1054	0.0436	0.1780	0.1477
Moment (mNm)	15.3016	14.7414	8.0598	5.8382

Tablo 3.18 Gömülü düz mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

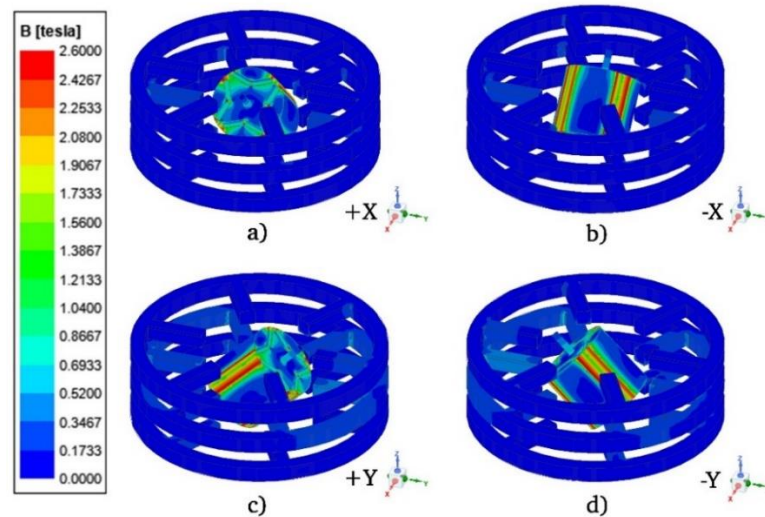
Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0586	0.0975	0.1251	0.1846
Moment (mNm)	8.0725	9.0340	8.9533	7.2277

Gömülü düz mıknatıs yapısındaki SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının gerçekleştirilen elektromanyetik analizleri incelendiğinde; SMKM1 tasarımlarının moment değerleri 5.4771 mNm-20.4858 mNm aralığında ve kuvvet değerleri 0.0383 N-0.2493 N aralığında elde edilmiştir. SMKM2 tasarımlarının moment

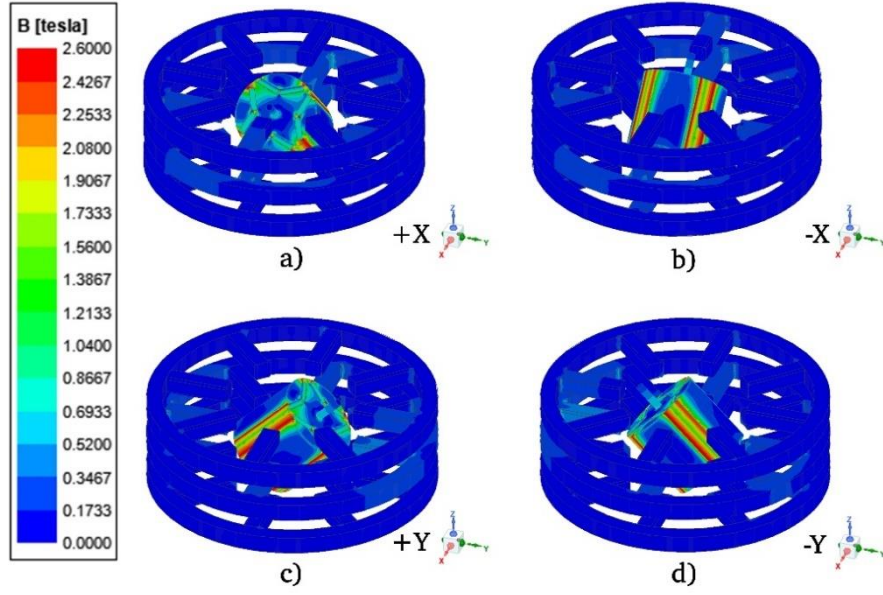
değerleri 6.7049 mNm-11.9418 mNm aralığında ve kuvvet değerleri 0.0492 N 0.2564 N aralığında elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da görülmektedir ki SMKM1 ve SMKM2 modellerinin kuvvet ve moment değerleri birbirine yakın elde edilmiştir. SMKM1 ve SMKM2 modellerinin manyetik akı yoğunluğu dağılımlarına bakıldığında; her iki motor modeli tasarımlarında, rotorlarda maksimum manyetik akı değerlerine ulaşılabilirdiği ve manyetik doyum probleminin oluşabileceği görülmüştür.

3.3.2 Küresel Motorun Gömülü V-Tipi Mıknatıs Yapısındaki Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizleri

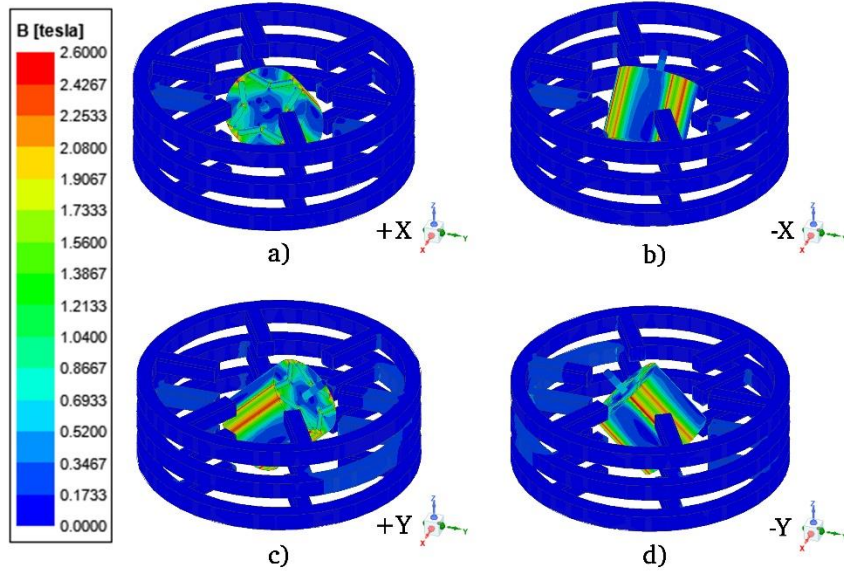
Analizde küresel motor pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde ve 45° açı değerindeki konumundadır. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının gömülü V-tipi mıknatıs yapısı için 45° açı değerindeki hareket pozisyonlarındaki pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde; mıknatısların NdFe30, NdFe35, SmCo28 ve stator ile rotor yapılarının Steel-1008, M43-24G, JFE-Steel-50JNE300 malzemelerden oluştuğu modellerin elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının gömülü V-tipi mıknatıs yapısı için mıknatıs, stator, rotor yapılarında kullanılan malzemelere göre manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 3.31'den Şekil 3.48'e kadar verilmiştir.



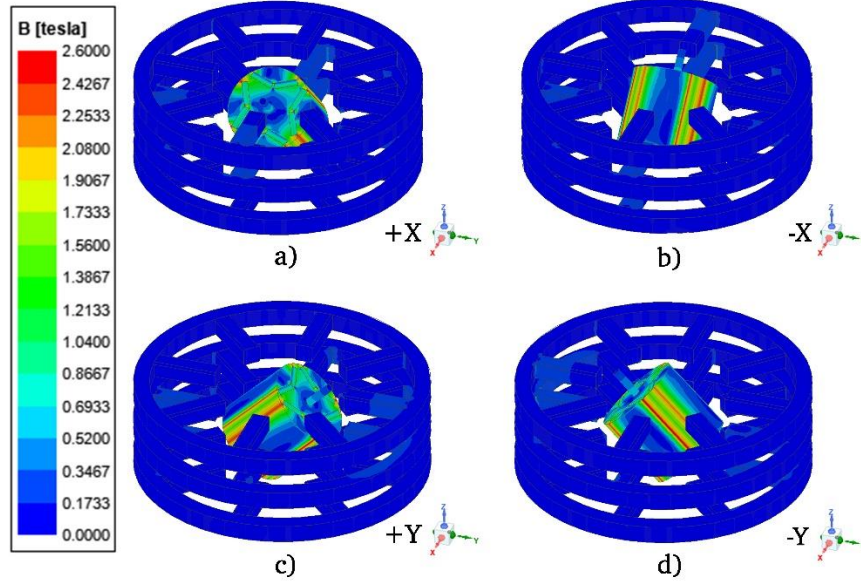
Şekil 3.31 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



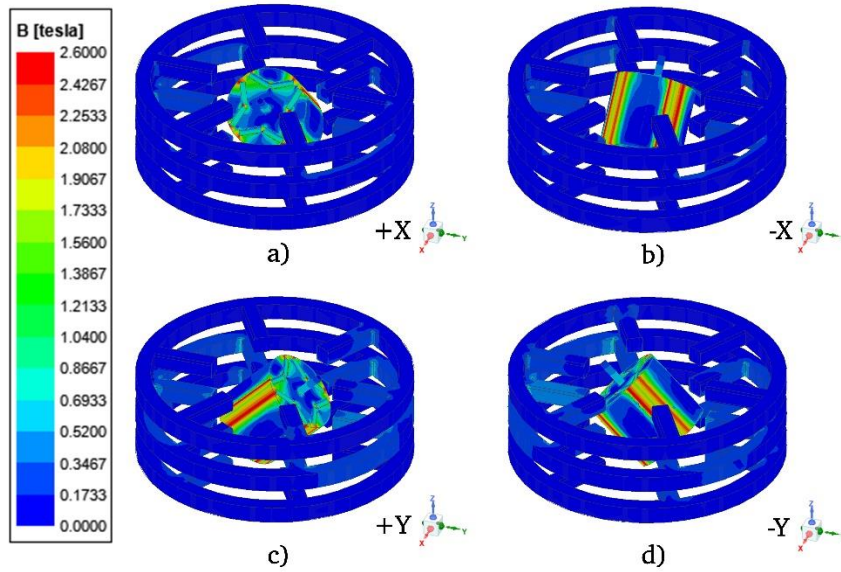
Şekil 3.32 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



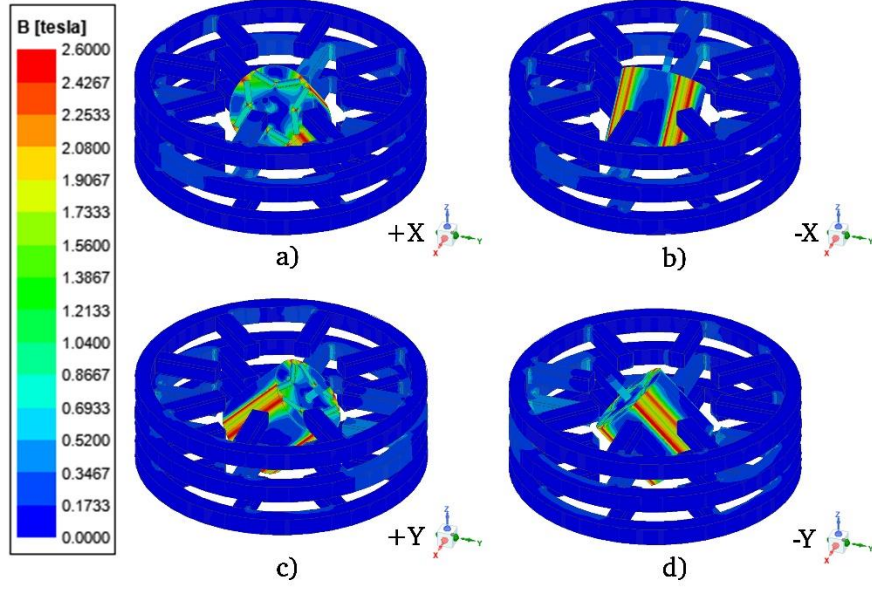
Şekil 3.33 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



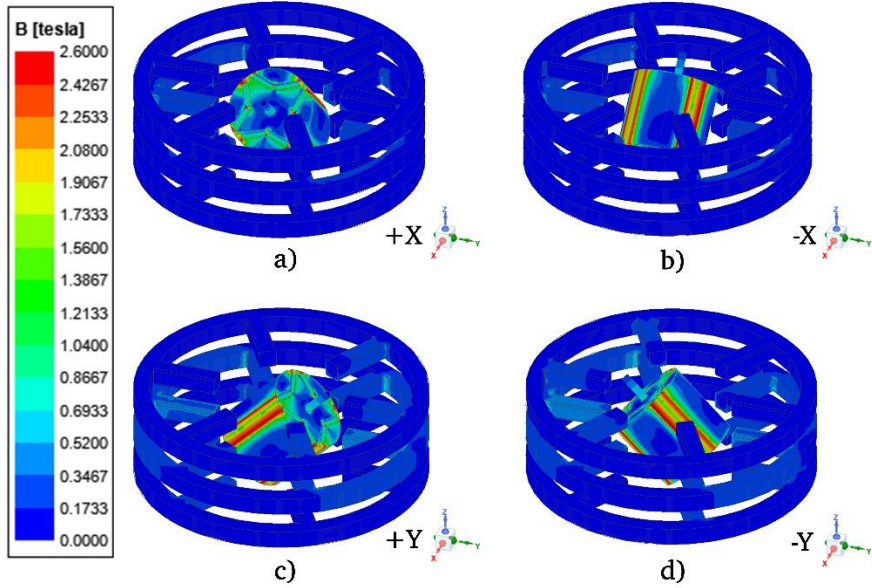
Şekil 3.34 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



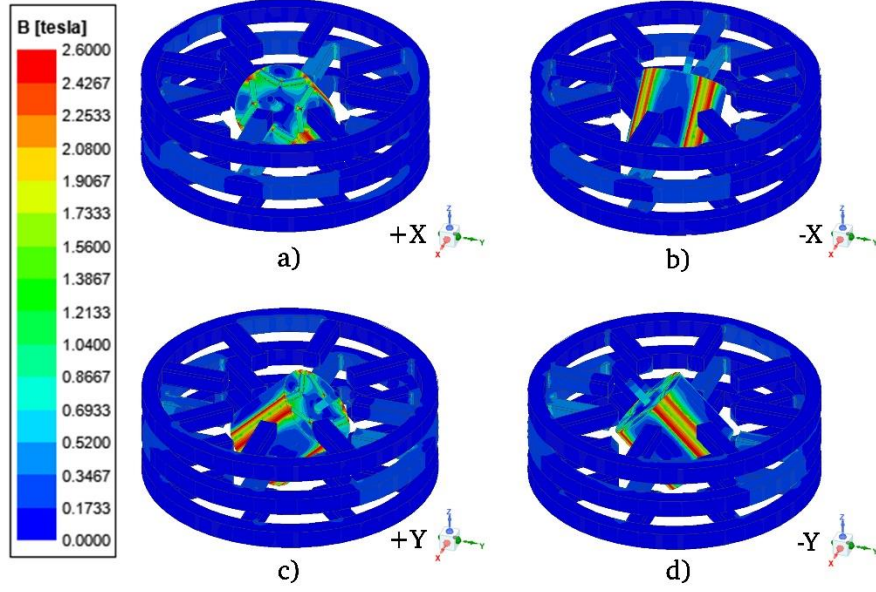
Şekil 3.35 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



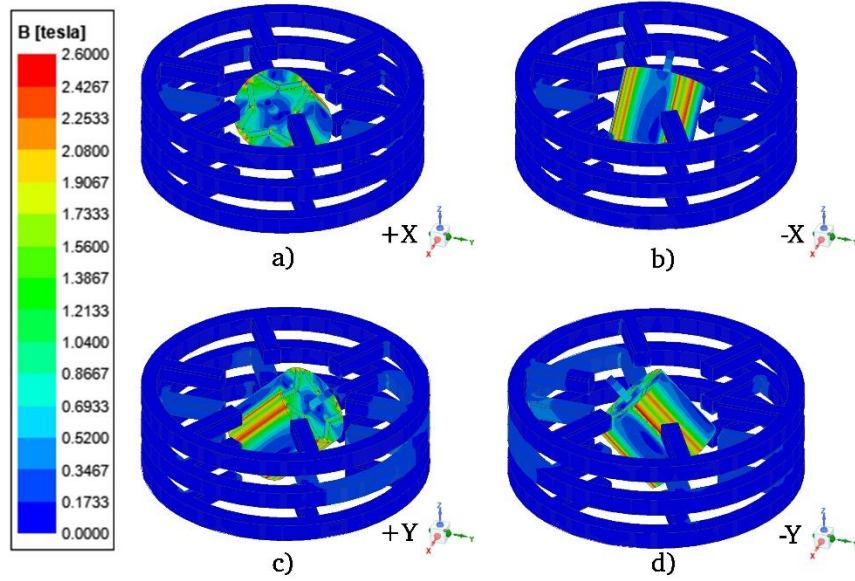
Şekil 3.36 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



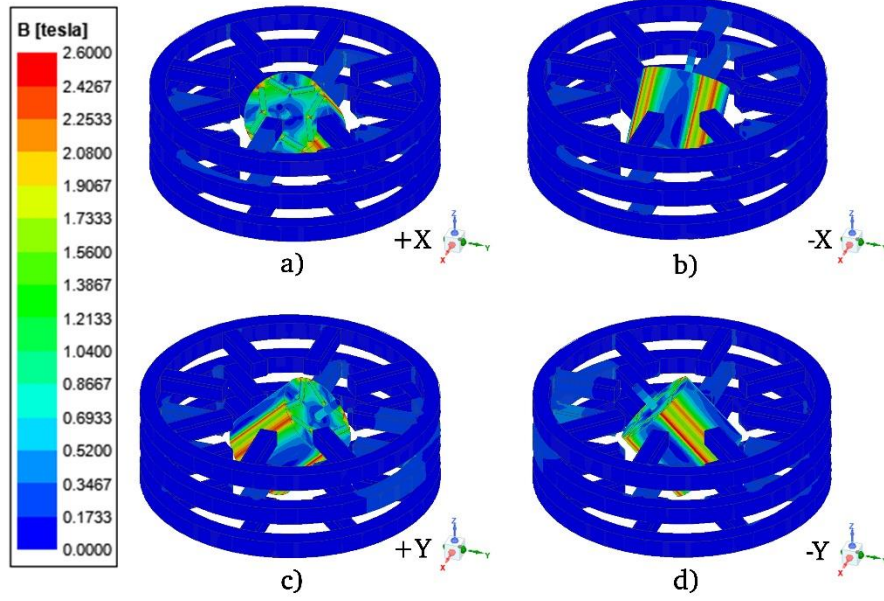
Şekil 3.37 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



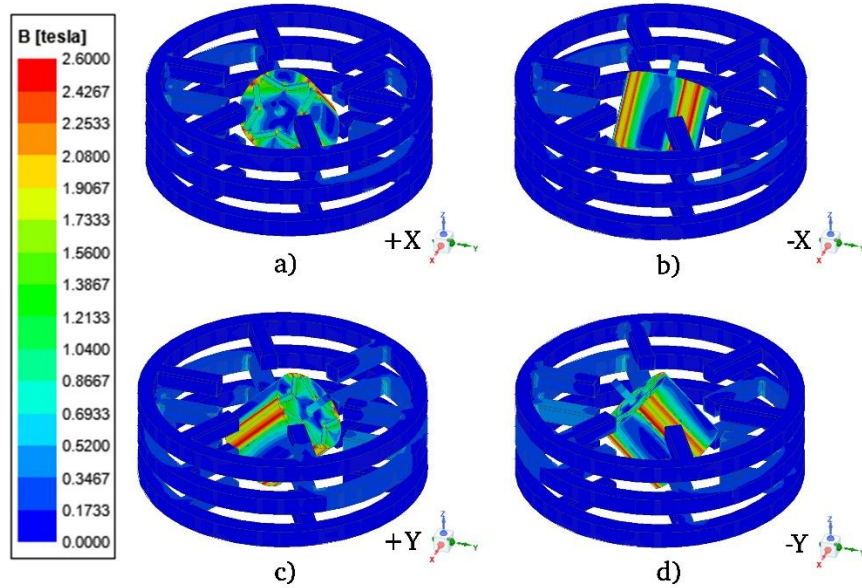
Şekil 3.38 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



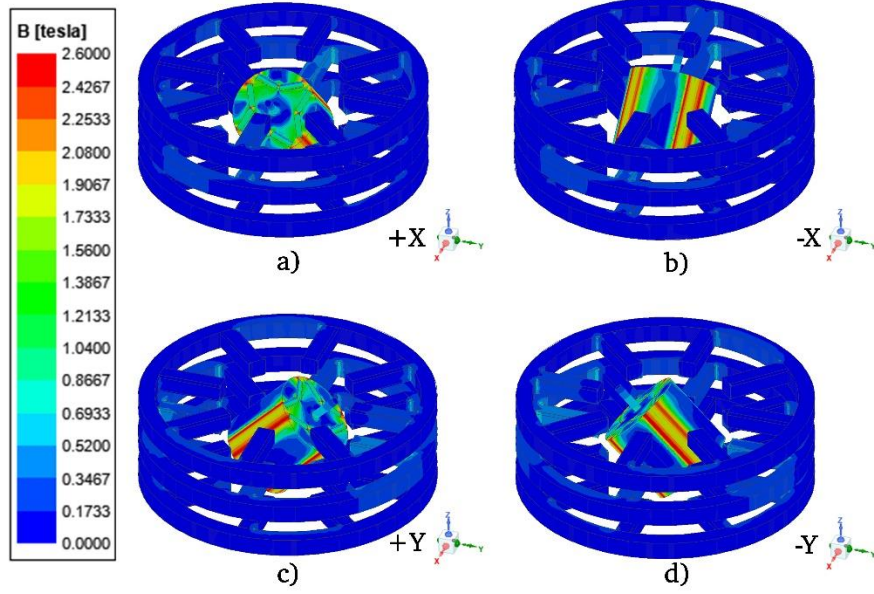
Şekil 3.39 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



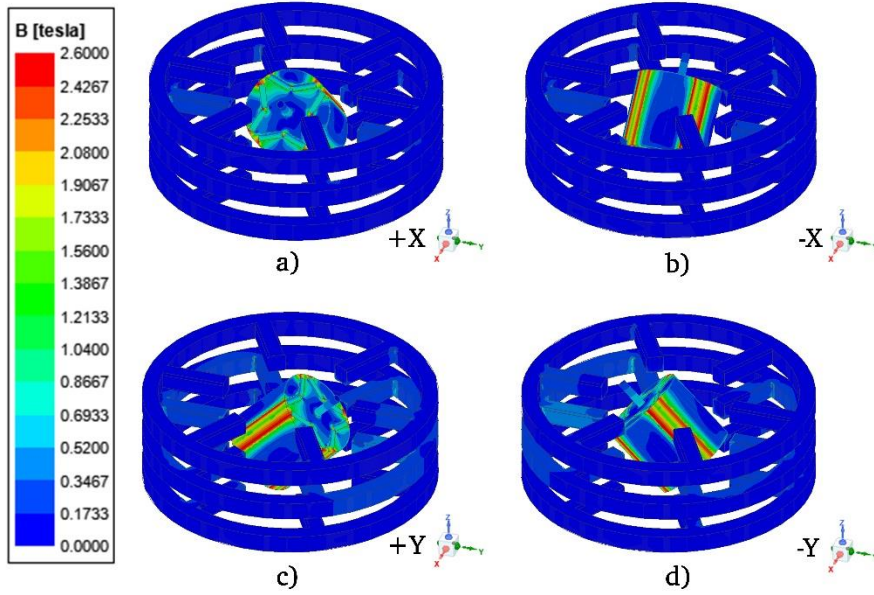
Şekil 3.40 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



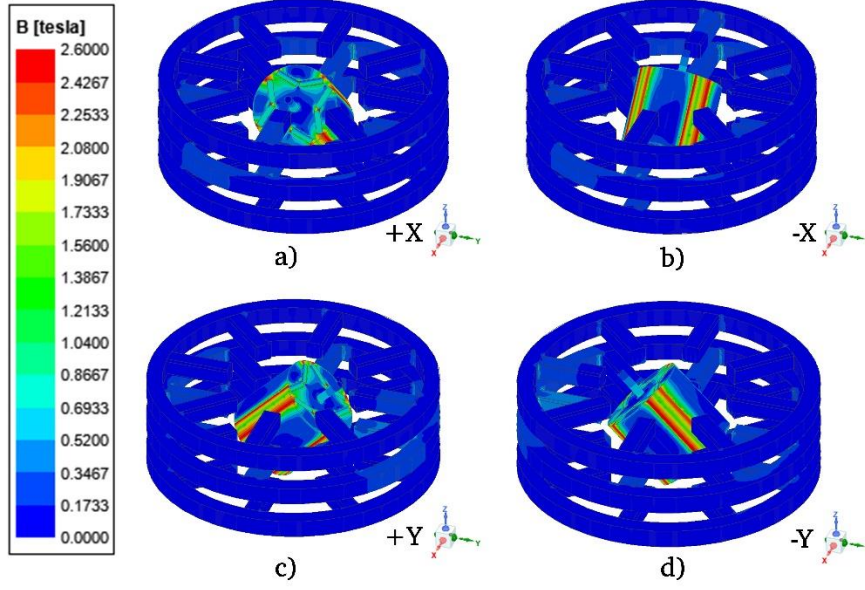
Şekil 3.41 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



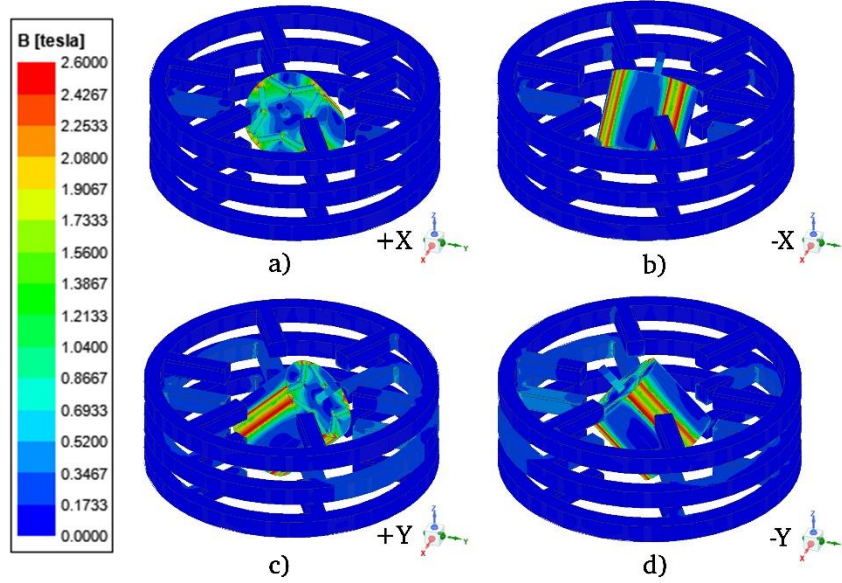
Şekil 3.42 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



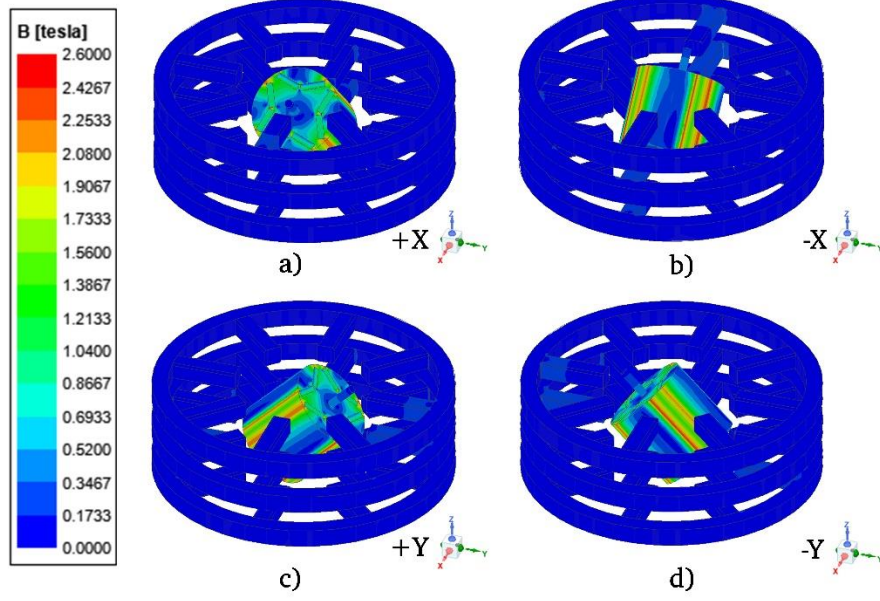
Şekil 3.43 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



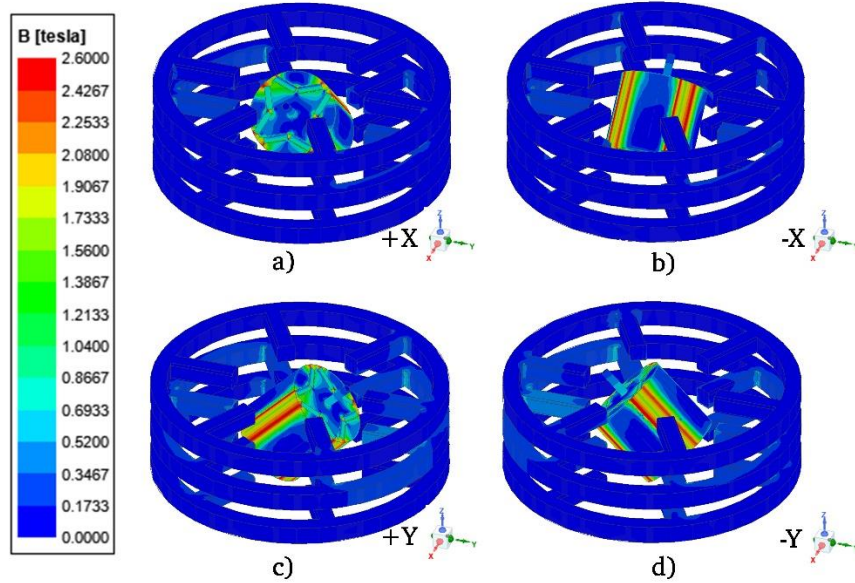
Şekil 3.44 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



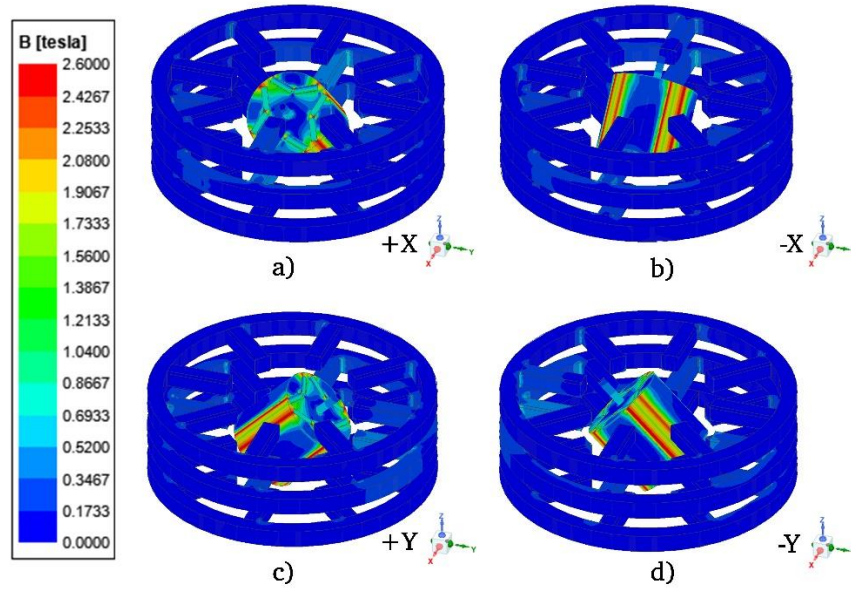
Şekil 3.45 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.46 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile stator da M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.47 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile stator da JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.48 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde

Elektromanyetik analizleri gerçekleştirilerek yukarıda Şekil 3.31-Şekil 3.48 arasında manyetik akı yoğunluğu dağılımları verilen SMKM1'in ve SMKM2'nin tasarımlarının her biri için elde edilen kuvvet ve moment değerleri Tablo 3.19-Tablo 3.36 arasında verilmiştir.

Tablo 3.19 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0948	0.0839	0.1712	0.1038
Moment (mNm)	15.1148	14.8956	5.4490	6.4035

Tablo 3.20 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1026	0.1159	0.1158	0.1403
Moment (mNm)	8.7671	8.5851	7.2612	6.6722

Tablo 3.21 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0672	0.0567	0.1018	0.0454
Moment (mNm)	10.2651	9.5268	3.1918	4.0034

Tablo 3.22 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0823	0.0793	0.0507	0.0677
Moment (mNm)	5.7789	5.3371	4.2108	3.5261

Tablo 3.23 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0957	0.0872	0.1665	0.0985
Moment (mNm)	15.5637	15.1416	5.6778	6.6242

Tablo 3.24 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1025	0.1139	0.1105	0.1362
Moment (mNm)	9.4116	8.9826	7.5573	6.9798

Tablo 3.25 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1219	0.1072	0.2228	0.1449
Moment (mNm)	18.7195	18.4811	6.6302	7.7032

Tablo 3.26 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1262	0.1457	0.1599	0.1863
Moment (mNm)	10.5462	10.4868	8.7417	8.1040

Tablo 3.27 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0806	0.0702	0.1274	0.0601
Moment (mNm)	12.3807	11.8596	3.8677	4.8614

Tablo 3.28 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0988	0.0993	0.0718	0.1057
Moment (mNm)	7.1666	6.6598	5.5911	5.1782

Tablo 3.29 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1183	0.0885	0.1596	0.07
Moment (mNm)	18.8499	15.1026	5.1344	5.6093

Tablo 3.30 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.1019	0.1051	0.1455	0.1794
Moment (mNm)	8.0240	7.5553	9.0768	8.5680

Tablo 3.31 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0833	0.0783	0.1585	0.0946
Moment (mNm)	14.2126	13.9919	5.1454	6.0600

Tablo 3.32 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0965	0.1083	0.1058	0.1293
Moment (mNm)	8.3018	8.0938	6.8684	6.2926

Tablo 3.33 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0620	0.0253	0.0746	0.0370
Moment (mNm)	9.4449	4.8368	2.4285	3.4202

Tablo 3.34 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0646	0.0695	0.0285	0.0320
Moment (mNm)	3.6478	4.5223	2.8018	2.1868

Tablo 3.35 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0892	0.0815	0.1536	0.0888
Moment (mNm)	14.5661	14.2419	5.3294	6.2140

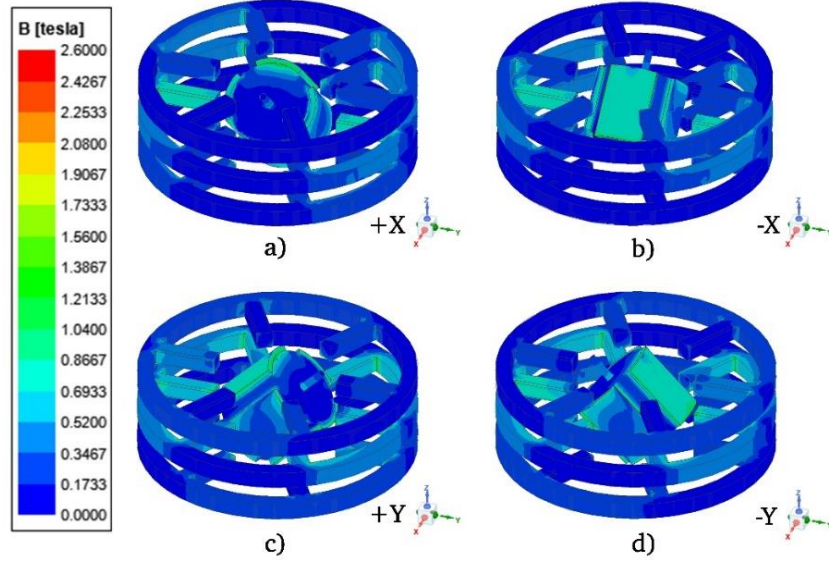
Tablo 3.36 Gömülü V-tipi mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.0968	0.1067	0.1024	0.1262
Moment (mNm)	8.9175	8.4431	7.1654	6.5784

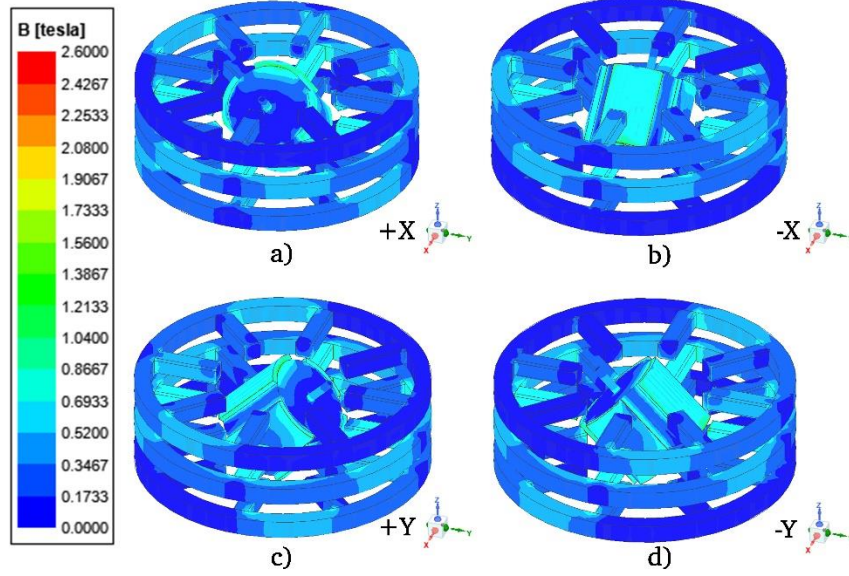
Gömülü V-tipi mıknatıs yapısındaki SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının gerçekleştirilen elektromanyetik analizleri incelendiğinde; SMKM1 tasarımlarının moment değerleri 2.4285 mNm-18.8499 mNm aralığında ve kuvvet değerleri 0.0253 N-0.1712 N aralığında elde edilmiştir. SMKM2 tasarımlarının moment değerleri 2.1868 mNm-14.5661 mNm aralığında ve kuvvet değerleri 0.0285 N-0.1863 N aralığında elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da görülmektedir ki, SMKM1 ve SMKM2 modellerinin kuvvet ve moment değerlerinin aralığı birbirine yakın elde edilmiştir. SMKM1 ve SMKM2 modellerinin manyetik akı yoğunluğu dağılımlarına bakıldığında; her iki motor modelinin referans alındığı tasarımlarda, rotorlarda maksimum manyetik akı değerlerine ulaşılabilirdiği ve manyetik doyum probleminin oluşabileceği görülmüştür.

3.3.3 Küresel Motorun Yüzey Mıknatıs Yapısındaki Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizleri

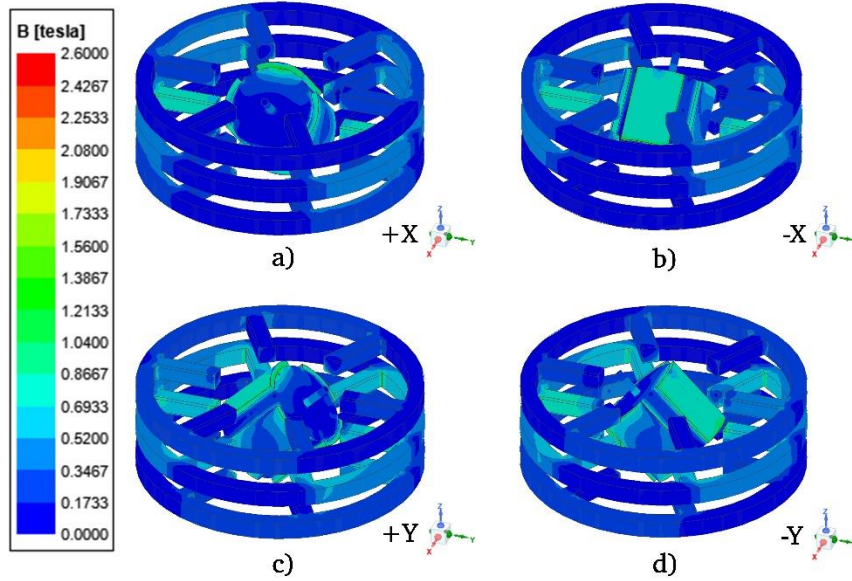
Küresel motor pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde ve 45° açı değerindeki konumundadır. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının yüzey mıknatıs yapısı için 45° açı değerindeki hareket pozisyonlarındaki pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde; mıknatısların NdFe30, NdFe35, SmCo28 ve stator ile rotor yapılarının Steel-1008, M43-24G, JFE-Steel-50JNE300 malzemelerden oluştuğu modellerin elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının yüzey mıknatıs yapısı için mıknatıs, stator, rotor yapılarında kullanılan malzemelere göre manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 3.49'dan Şekil 3.66'ya kadar verilmiştir.



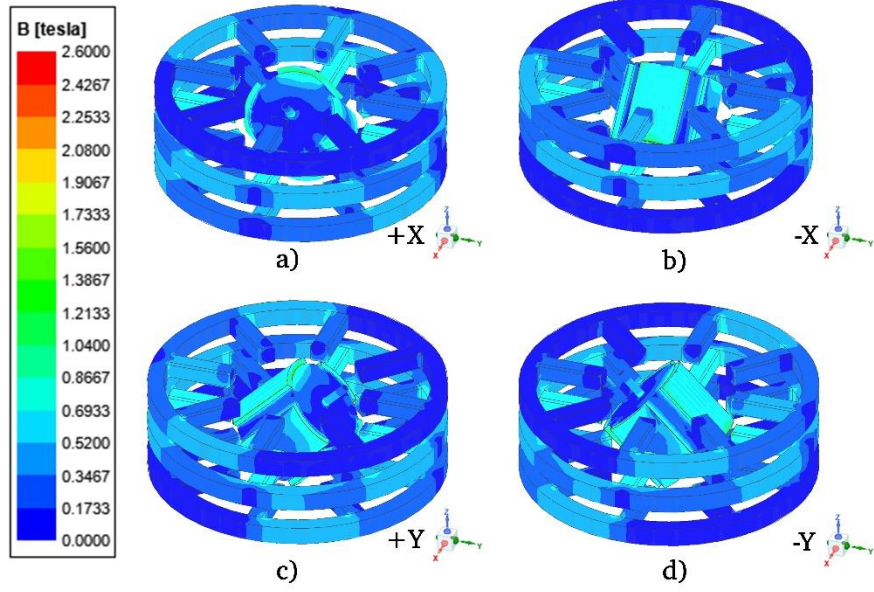
Şekil 3.49 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorunda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



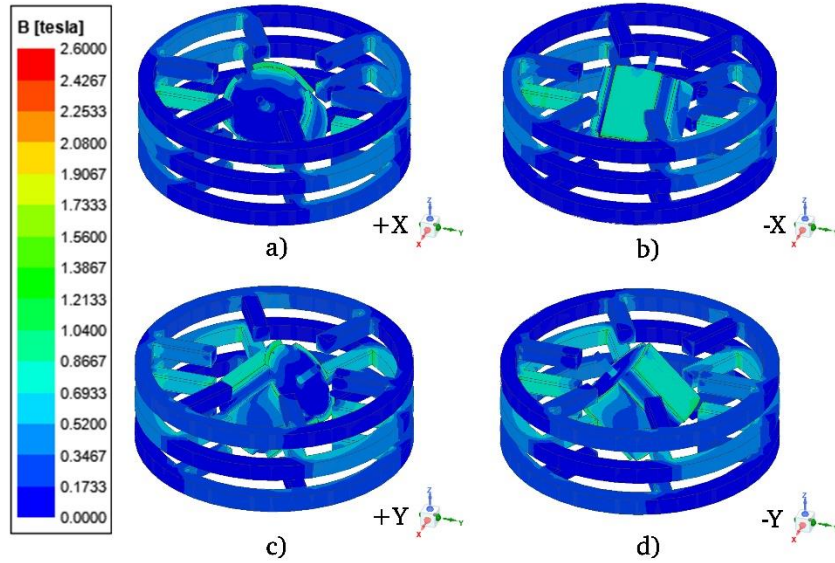
Şekil 3.50 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



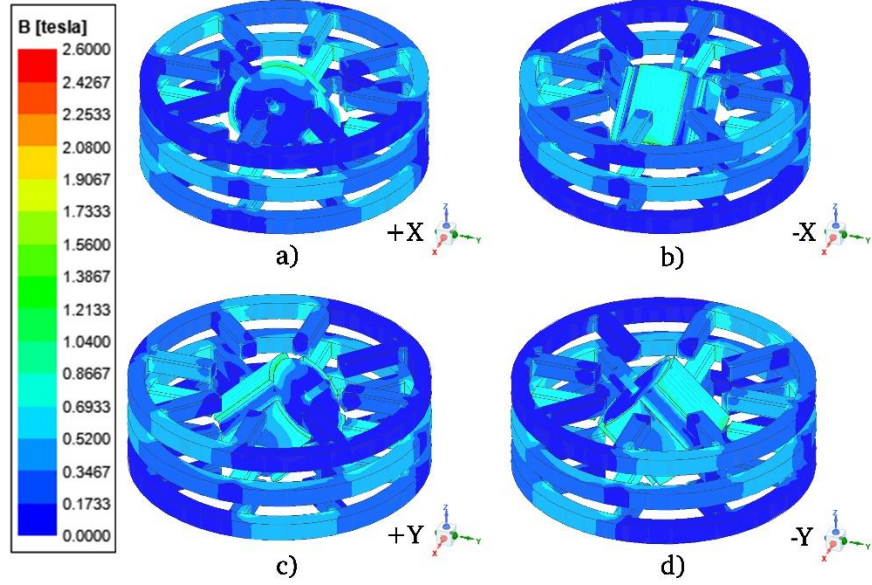
Şekil 3.51 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



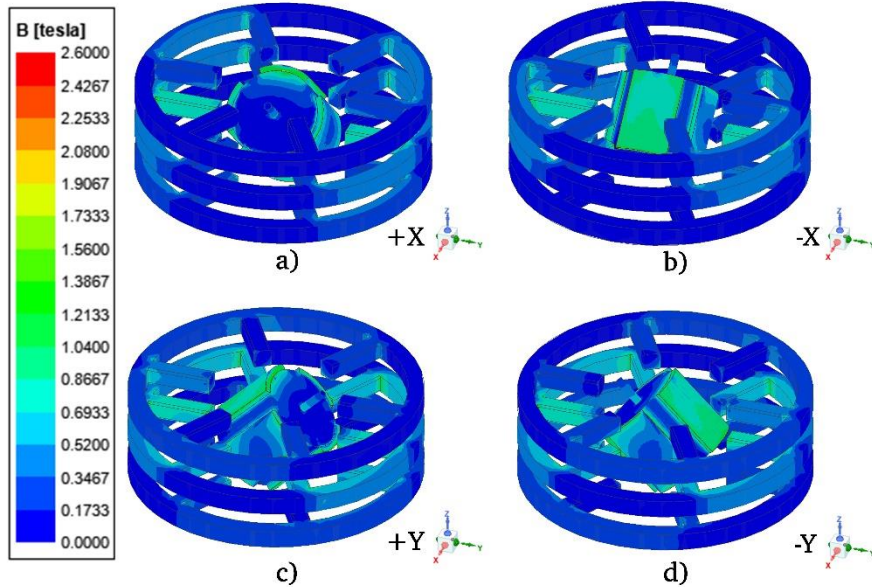
Şekil 3.52 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



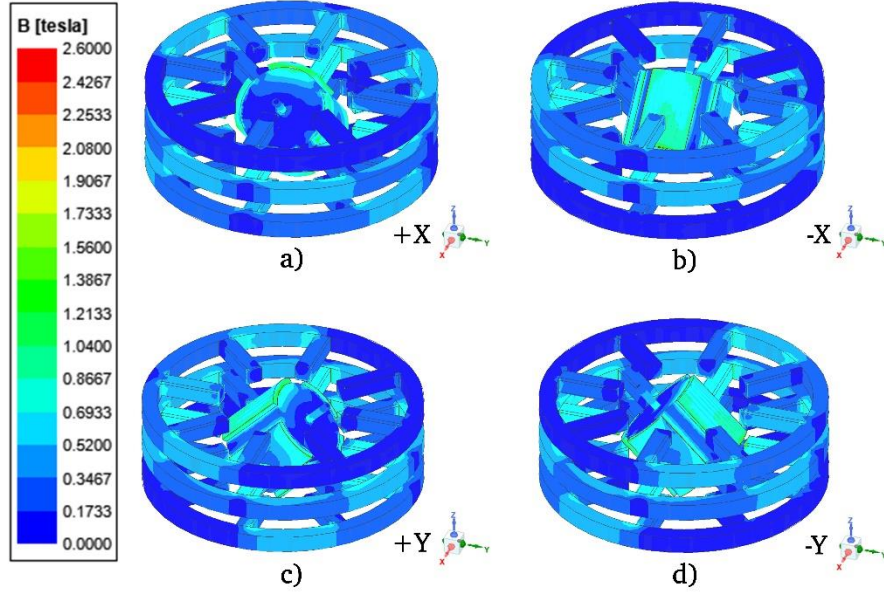
Şekil 3.53 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



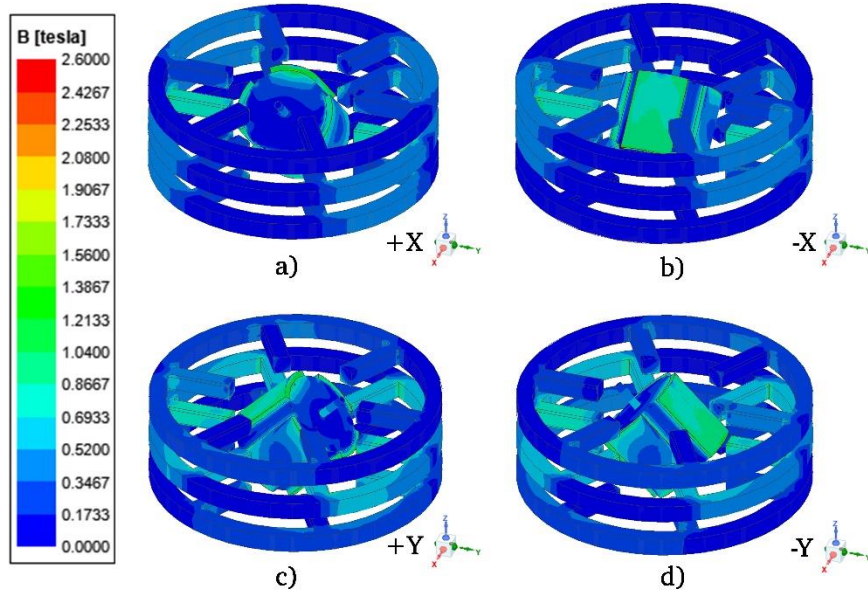
Şekil 3.54 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



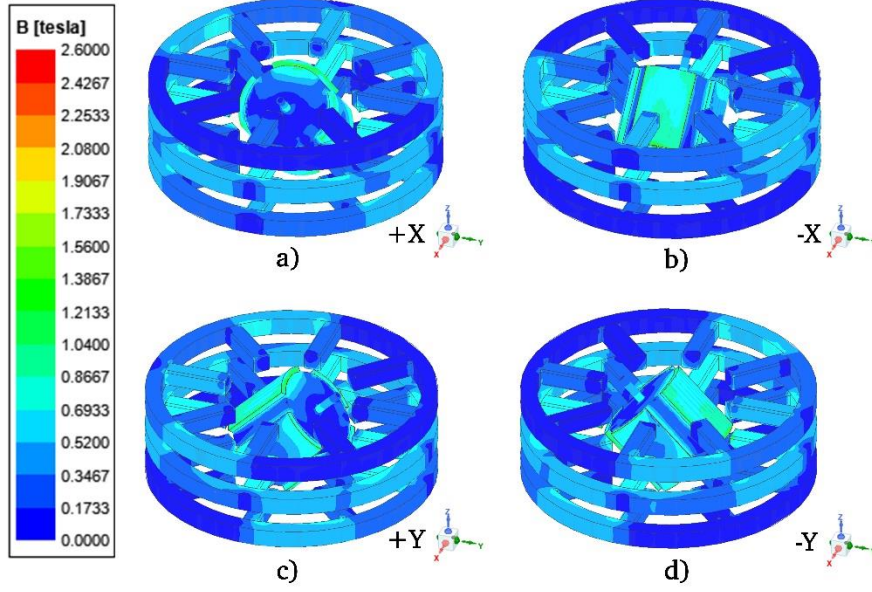
Şekil 3.55 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



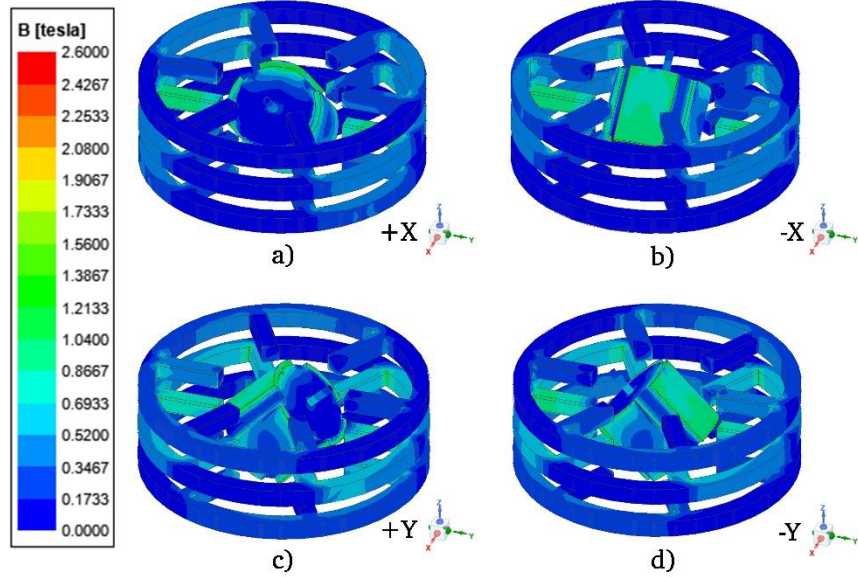
Şekil 3.56 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



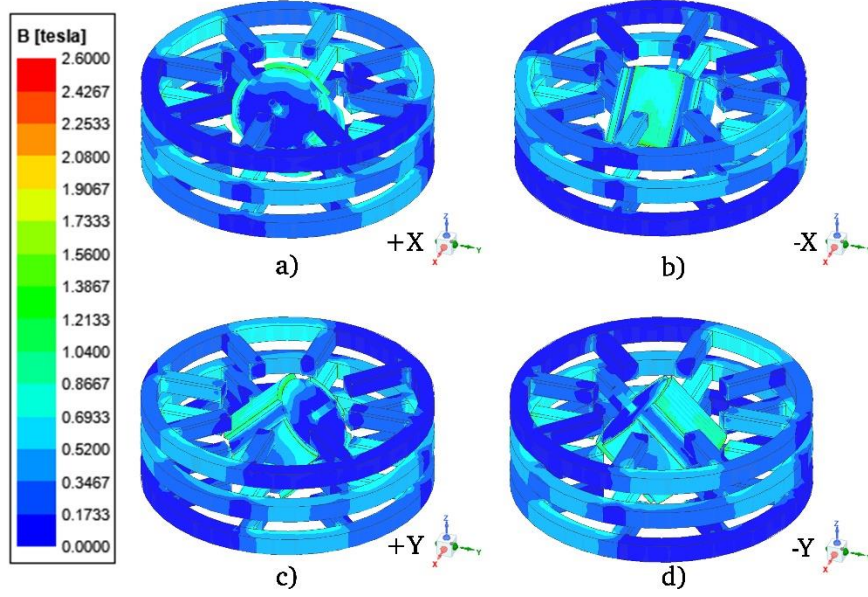
Şekil 3.57 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



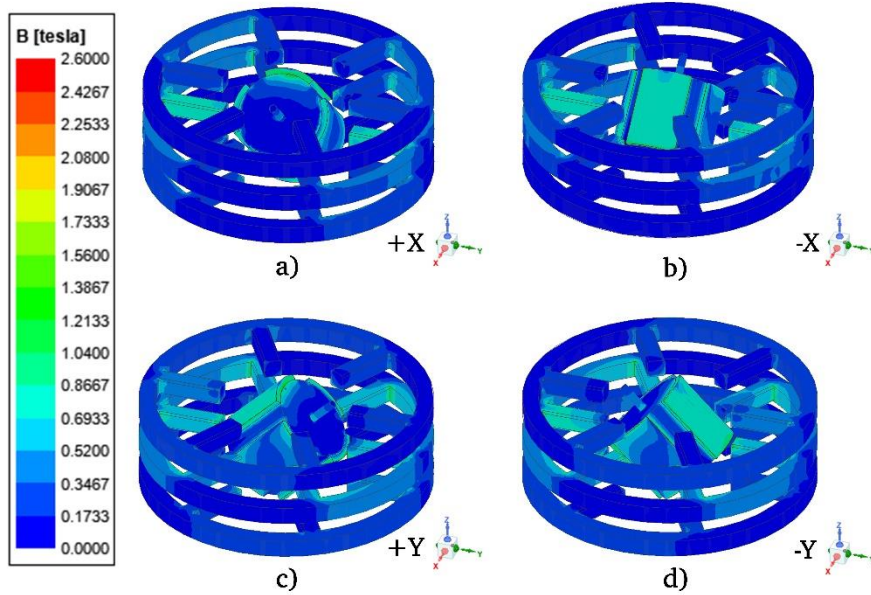
Şekil 3.58 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



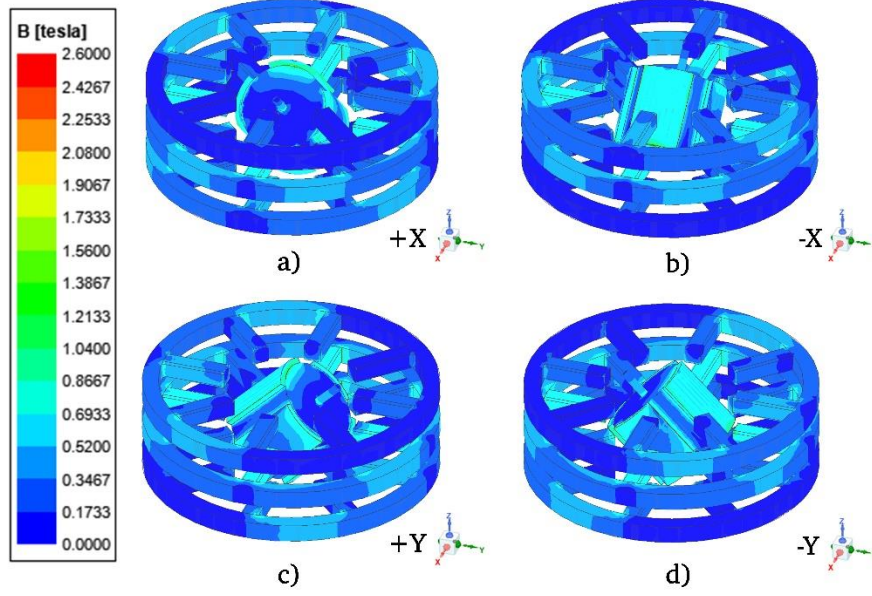
Şekil 3.59 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



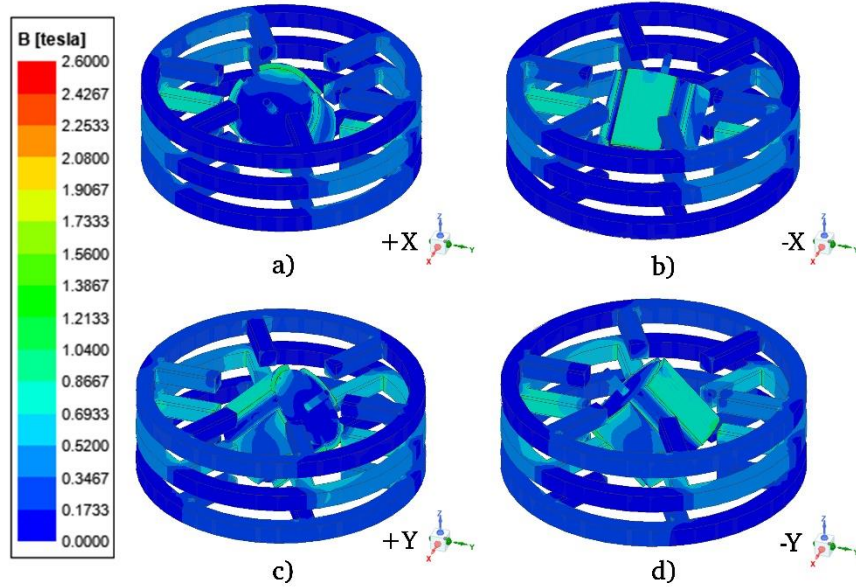
Şekil 3.60 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



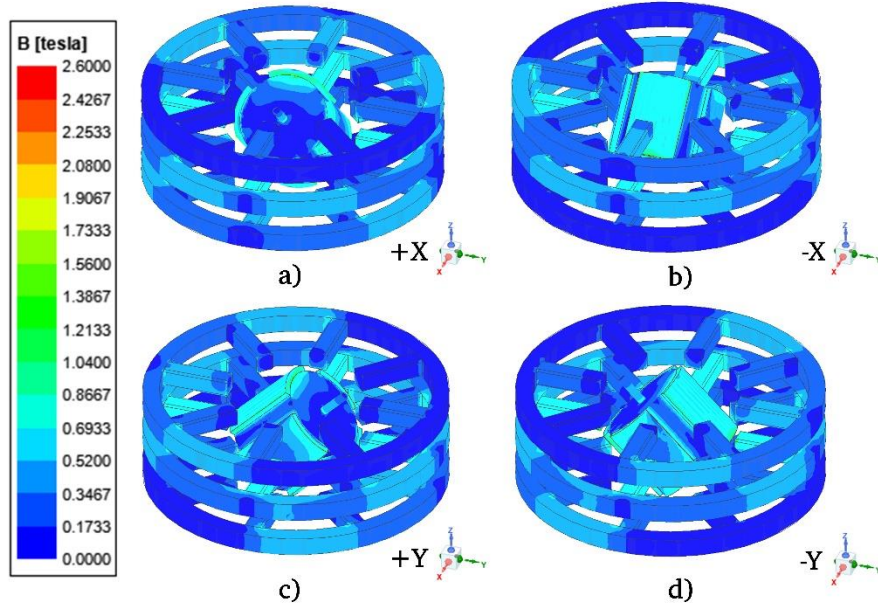
Şekil 3.61 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



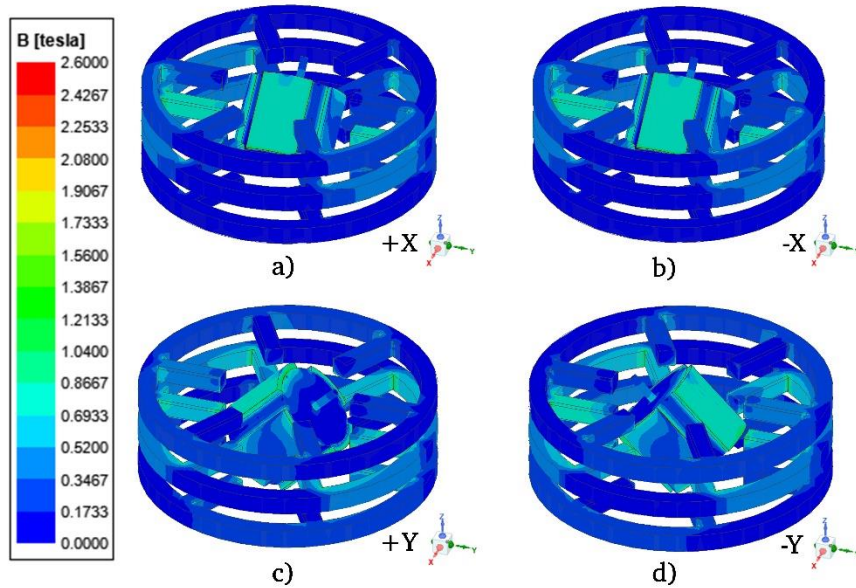
Şekil 3.62 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



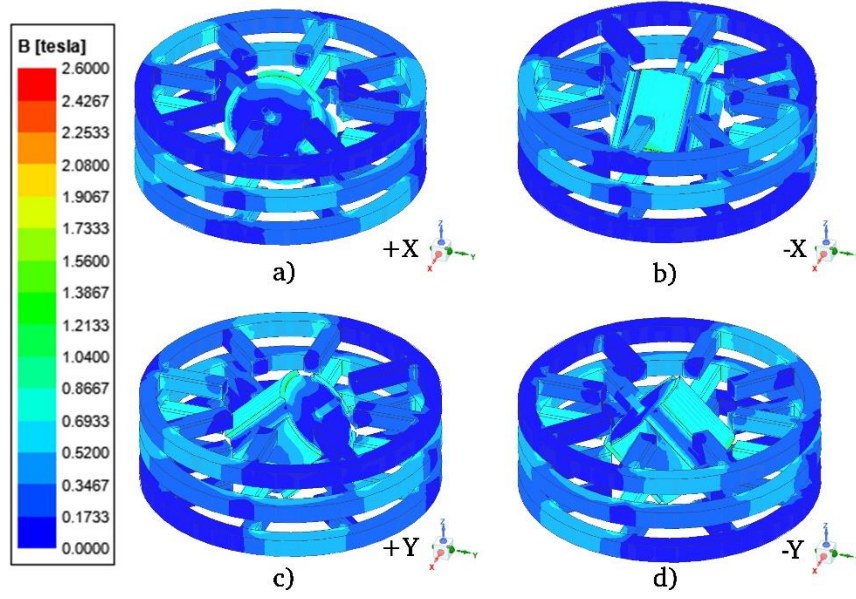
Şekil 3.63 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.64 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.65 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde



Şekil 3.66 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımları için pozitif X ve Y ile negatif X ve Y yönlerinde, 45° hareket konumlarındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımları a) Pozitif X yönünde b) Negatif X yönünde c) Pozitif Y yönünde d) Negatif Y yönünde

Elektromanyetik analizleri gerçekleştirilerek yukarıda Şekil 3.49'dan Şekil 3.66'ya kadar manyetik akı yoğunluğu dağılımları verilen SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının her biri için elde edilen kuvvet ve moment değerleri Tablo 3.37-Tablo 3.54 arasında verilmiştir.

Tablo 3.37 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6748	0.6366	1.1735	1.2904
Moment (mNm)	106	107.1	87.7	85.7

Tablo 3.38 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6384	0.5816	1.0655	1.1762
Moment (mNm)	147.3	147	117.4	118.5

Tablo 3.39 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.7006	0.6615	1.2890	1.3504
Moment (mNm)	108.4	109.4	88.9	86.9

Tablo 3.40 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6504	0.5891	1.1554	1.2543
Moment (mNm)	150.9	150.6	119.5	120.8

Tablo 3.41 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.7056	0.6678	1.2	1.3587
Moment (mNm)	108.7	109.8	90	86.9

Tablo 3.42 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe30 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6583	0.5982	1.1587	1.2582
Moment (mNm)	151.7	151.4	119.8	121.1

Tablo 3.43 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.7592	0.7138	1.3652	1.4851
Moment (mNm)	124	125.4	104.6	102.1

Tablo 3.44 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.7227	0.6545	1.2391	1.3048
Moment (mNm)	172.9	172.3	138.4	139.8

Tablo 3.45 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.7968	0.7518	1.4930	1.57
Moment (mNm)	126.6	127.9	105.8	103.4

Tablo 3.46 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.7443	0.6736	1.3411	1.4358
Moment (mNm)	176.7	176.4	140.8	142.2

Tablo 3.47 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.8018	0.7595	1.3969	1.57
Moment (mNm)	127.1	128.4	107.2	103.4

Tablo 3.48 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.7536	0.6838	1.2618	1.4291
Moment (mNm)	177.7	177.4	142.4	142.5

Tablo 3.49 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6493	0.6130	1.13	1.2421
Moment (mNm)	101.1	102.1	83.3	81.4

Tablo 3.50 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda Steel-1008 malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6129	0.5816	1.0220	1.1437
Moment (mNm)	140.5	147	111.7	112.8

Tablo 3.51 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6725	0.6351	1.2361	1.2936
Moment (mNm)	103.4	104.4	84.6	82.6

Tablo 3.52 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6227	0.5891	1.1091	1.2076
Moment (mNm)	143.9	150.6	113.8	115

Tablo 3.53 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM1 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6770	0.6406	1.2408	1.3091
Moment (mNm)	103.7	104.8	84.5	82.5

Tablo 3.54 Yüzey mıknatıs yapısında, SmCo28 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorda JFE-Steel-50JNE300 malzemesinin kullanıldığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet ve moment değerleri

Parametreler/Motorun Hareket Yönleri	Pozitif X Yönü	Negatif X Yönü	Pozitif Y Yönü	Negatif Y Yönü
Kuvvet (N)	0.6302	0.5982	1.1098	1.2145
Moment (mNm)	144.7	151.4	114.1	115.3

Yüzey mıknatıs yapısındaki SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının gerçekleştirilen elektromanyetik analizleri incelendiğinde; SMKM1 tasarımlarının moment değerleri 81.4 mNm-128.4 mNm aralığında ve kuvvet değerleri 0.6130 N-1.57 N aralığında elde edilmiştir. SMKM2 tasarımlarının moment değerleri 111.7 mNm-177.7 mNm aralığında ve kuvvet değerleri 0.5816 N-1.4358 N aralığında elde edilmiştir. Moment değerleri incelendiğinde SMKM2 tasarımlarının moment aralığı SMKM1 tasarımlarının moment aralığından daha yüksek elde edilmiştir. Eksenel hareketler için önemli olan kuvvet değerleri incelendiğinde, SMKM1 tasarımlarının kuvvet aralığı SMKM2 tasarımlarının kuvvet aralığından daha yüksek elde edilmiştir. SMKM1 ve SMKM2 modellerinin manyetik akı yoğunluğu dağılımlarına bakıldığında; her iki motor modelinin referans alındığı tasarımlarda, rotorlarında, mıknatıslarında ve statorunda düzgün bir manyetik akı dağılımı sağlandığı görülmüştür. Ayrıca rotordaki ve statordaki manyetik değerlerin,

kullanılan sac malzemelerin maksimum manyetik akı değerlerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. SMKM1 ve SMKM2 modellerinin tasarımlarının statorlarındaki manyetik akı değerleri karşılaştırıldığında; SMKM1 tasarımlarında ortalama manyetik akı 0.5 T değerinde, SMKM2 tasarımlarında ortalama manyetik akı 0.7 T değerinde elde edildiği görülmüştür.

3.4 Küresel Motorun Farklı Tasarımlarının Elektromanyetik Analizlerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Prototipi Gerçekleştirilecek Motorun Belirlenmesi

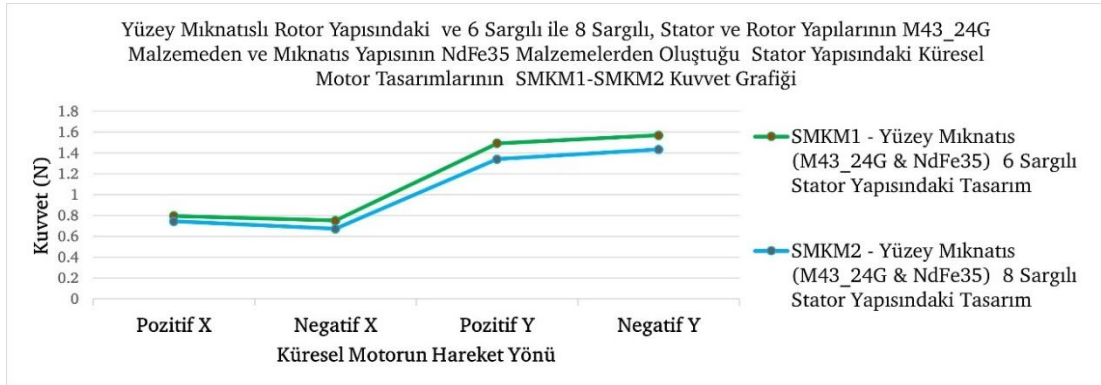
Küresel motor iki serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahiptir. Bu sebeple rotorun koordinat sisteminin orijininde yer aldığı düşünülerek, motorun X ve Y eksenlerinin pozitif ve negatif yöndeki hareketinin açılarının değişimlerine göre 45°'lik açısal hareketler yaptırılmış ve her eksenel hareket için de elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında her bir stator bloğunda 6 adet olmak üzere, toplamda 18 adet sargının kullanıldığı (SMKM1) ve her bir stator bloğunda 8 adet olmak üzere, toplamda 24 adet sargının kullanıldığı (SMKM2) farklı tasarımlar ele alınmıştır. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının rotor kısmında mıknatıs olarak NdFe30, NdFe35 ve SmCo28 malzemeleri kullanılmış ve mıknatıs yapısı olarak da gömülü düz, gömülü V-tipi ve yüzey mıknatıs yapıları ele alınmıştır. Stator ve rotor yapıları için de Steel-1008, M43-24G ve JFE-Steel-50JNE300 sac malzemeler kullanılarak farklı modeller oluşturulmuştur. Her bir model için, $\alpha=45^\circ$ alınarak elektromanyetik analizler yapılmış, manyetik akı yoğunluğu dağılımları, kuvvet değerleri ve moment değerleri elde edilmiştir.

SMKM1 ve SMKM2 motor modellerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu değerleri incelendiğinde yüzey mıknatıs yapısındaki rotorda manyetik doyum probleminin olmadığı görülmüştür. Düz mıknatıs ve gömülü V-tipi mıknatıs yapılarındaki rotorlarda meydana gelen manyetik akı dağılımı, sac malzemelerin manyetik doyum değerinin aşılmasına sebep olabileceği için, manyetik doyum probleminin olabileceği kanaatine varılmıştır. Rotordaki mıknatısların yerleşim durumuna göre gerçekleştirilen elektromanyetik analizlerin sonuçlarına göre, yüzey mıknatıslı yapının daha düzgün bir manyetik akı dağılımı sağladığı görülmüştür. Yüzey mıknatıslı küresel motorda kaçak akı azaltılabilmüş ve gömülü

düz ile gömülü V-tipi mıknatıs yapılarından farklı olarak, her ekseninde ortalama kuvvet ve moment elde edilebilmiştir. Ayrıca bu kuvvet ve moment değerleri birbirine çok yakın olarak bulunmuştur.

Yapılan analiz çalışmaları değerlendirilerek SMK1 ve SMK2 motor modelleri karşılaştırıldığında, manyetik akı yoğunluğu dağılımları, kuvvet ve moment değerleri açısından yüzey mıknatıslı yapının, gömülü düz ve gömülü V-tipi mıknatıs yapılarındaki motor tasarımlarına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. SMK1 ve SMK2 tasarımlarının yüzey mıknatıslı motor modelleri karşılaştırıldığında ise; yüzey mıknatıslı SMK1 tasarımının; rotorunda NdFe35 mıknatıs malzemesinin kullanıldığı ve stator ile rotorunda M43-24G malzemesinin kullanıldığı küresel motorun tasarımının en başarılı sonuçları verdiği görülmüştür.

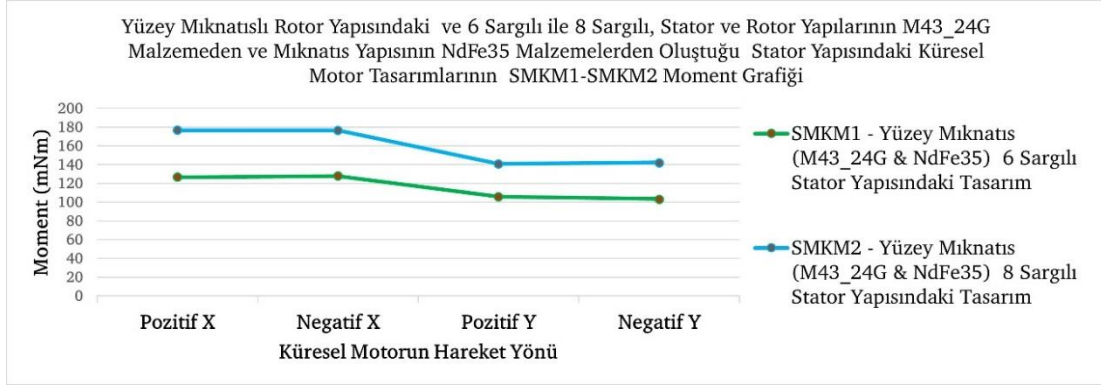
SMK1 ve SMK2 tasarımlarının Şekil 3.57’de ve Şekil 3.58’de gösterilen statorlarındaki ortalama manyetik akı değerleri karşılaştırıldığında; SMK1 tasarımının SMK2 tasarımına göre statordaki ortalama manyetik akı değerleri bakımından %28 daha az değerde elde edilmiştir. Dolayısıyla, SMK1 tasarımı SMK2 tasarımına göre ortalama manyetik akı yoğunluğu değeri bakımından daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 3.67 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorunda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMK1 ve SMK2 tasarımları için kuvvet değerleri

SMK1 ve SMK2 tasarımları için en iyi sonuçların alındığı modellere ait kuvvet ve moment değerleri sırasıyla Şekil 3.67’de ve Şekil 3.68’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. SMK1 ve SMK2 tasarımlarının Şekil 3.67’deki kuvvet değerleri karşılaştırıldığında; SMK1 tasarımının SMK2 tasarımına göre kuvvet değerleri

açısından %10 daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. SMKM1 ve SMKM2 tasarımlarının Şekil 3.67'deki kuvvet değerleri ve Şekil 3.68'deki moment değerleri karşılaştırıldığında; SMKM2 tasarımının SMKM1 tasarımına göre moment değerleri açısından %37 daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 3.68 Yüzey mıknatıs yapısında, NdFe35 mıknatıs malzemeli, rotor ile statorunda M43-24G malzemesinin kullanıldığı SMKM1 ve SMKM2 tasarımları için moment değerleri

Yapılan tüm analiz çalışmaları değerlendirildiğinde, motorun eksenel hareketlerini mekanik yapısı ile gerçekleştirebilmesi için kuvvet değerleri öncelikli olarak göz önünde bulundurulması gerektiği görülmüştür. Ayrıca motor eksenel hareketlerini gerçekleştirirken manyetik akı yoğunluğu değerleri bakımından doyum probleminin de olmaması gerekmektedir. Sonuç olarak SMKM1 ve SMKM2 tasarımları için gerçekleştirilen elektromanyetik analiz sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, statoru 3 blok ve 18 sargıdan oluşan SMKM1 motor tasarımlarından, rotorunda NdFe35 mıknatıs malzemesinin kullanıldığı, yüzey mıknatıslı, rotor ile stator yapılarında M43-24G elektriksel çelik malzemesinin kullanıldığı küresel motor modeli nihai motor modeli olarak belirlenmiş ve prototipinin üretilmesine karar verilmiştir.

NİHAİ KÜRESEL MOTOR MODELİ VE ELEKTROMANYETİK ANALİZLERİ

Nihai küresel motor modelini elde etmek için, farklı küresel motor modelleri oluşturularak, elektromanyetik analizler yapılmış ve yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, statoru 3 blok ve 18 sargıdan oluşan, yüzey mıknatıslı, mıknatıs malzemesi olarak NdFe35'in kullanıldığı, stator ve rotor yapısında M43-24G elektriksel sac malzemesinin kullanıldığı sabit mıknatıslı küresel motor (SMKM1) modeli ile en başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Belirlenen bu motorun daha sonra prototipinin üretilmesine karar verilmiştir. Motor prototipinin üretilmesi öncesinde, mekanik aksamının tasarlanması, kullanılacak malzemelerin tedariki, üretim koşullarının oluşturulması, prototip üretim süresinin uygunluğu ve üretim maliyeti gibi durumlar değerlendirilerek, üretim planı oluşturulmuştur. Bu plan kapsamında yapılan üretim öncesi hazırlık çalışmalarında, özellikle malzemelerin yurtdışından getirilmesinde sorunlar yaşanmış ve bu sebeple üretimi yapacak firmanın da desteğiyle analizlerde kullanılan malzemelerin yerine, daha kolay temin edilebilecek muadillerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Nihai motor modelinde kullanılmasına karar verilen NdFe35 mıknatıs malzemesi yerine SmCo ve yine rotor ile stator yapılarında kullanılması öngörülen M43-24G elektrik sac malzemesi yerine; rotorda Steel-1010 malzemesi ve statorda NO20- JFE Steel 35JN270 elektrik sac malzemelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu sebeple daha önce yapılan elektromanyetik analizler, bu malzemeler kullanılarak tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılarak, analiz edilmiştir. Motorun tasarımında, modellenmesinde ve elektromanyetik analizlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin kullanıldığı Ansys Maxwell yazılımı kullanılmıştır [61].

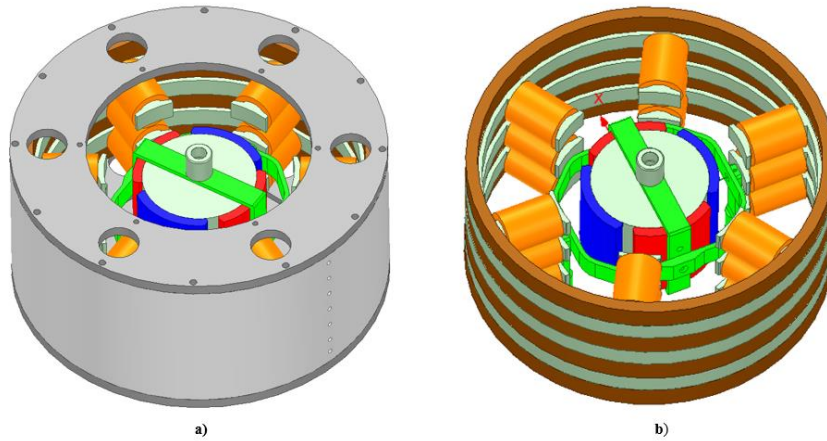
4.1 Küresel Motorun Nihai Tasarımının Oluşturulması

Prototip üretimi için nihai motor tasarım modeli olarak belirlenen, 4 kutuplu, statoru 3-blok ve 18 sargıdan oluşan, yüzey mıknatıslı küresel motora (SMKM1) ait özellikler Tablo 4.1'de ve bu motorun 3 boyutlu şematik gösterimi de Şekil

4.1’de verilmiştir. Motorun stator ve rotor yapısı ile mekanik sistemi aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır:

Tablo 4.1 Küresel motorun nihai tasarım modelinin özellikleri

Stator		Rotor			Mekanik Aksam	
Stator yapısı	Elektrik sac malzeme	Mıknatıs sayısı ve yapısı	Mıknatıs türü	Elektrik sac malzeme	Malzeme	Eksenel hareket açısı
3 blok ve 18 sargılı	NO20-JFE Steel 35JN270	4-Yüzey	SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C	Steel-1010	Stainless Steel	$\pm 45^\circ$

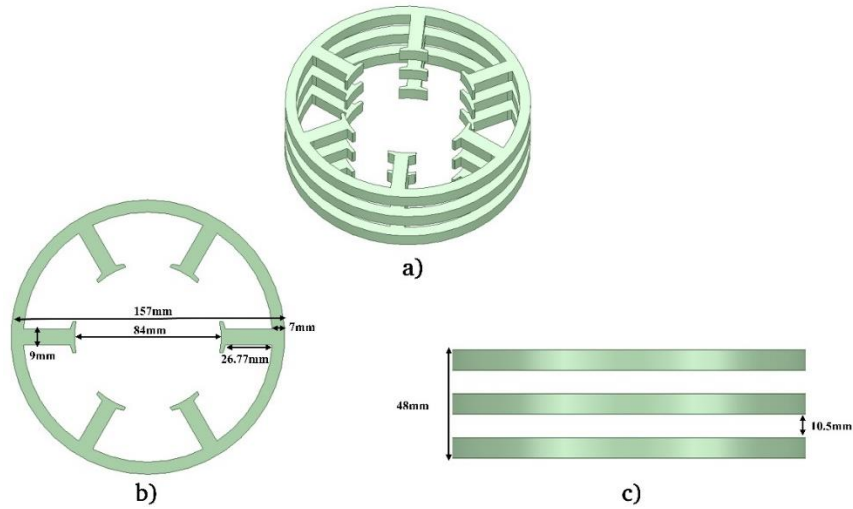


Şekil 4.1 Nihai tasarım modeli oluşturulan ve prototip üretimi gerçekleştirilecek olan yüzey mıknatıslı 6 kutuplu stator yapısındaki küresel motor a) Küresel motorun dış ve iç yapısı b) Küresel motorun iç yapısı

4.1.1 Nihai Küresel Motorun Tasarımının Stator Yapısı

Küresel motorun statoru 3 blok ve 6 kutuptan oluşmaktadır ve 3 bloğa ait toplamda 18 sargısı vardır. Bu stator blokları arasındaki mesefa, kutup ayaklarına sarılacak sargılar için yeterli alan bırakılacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımda stator kutupları ile küresel rotor arasındaki hava aralığı, her kutup ayağı için aynı mesafe olacak şekilde belirlenmiştir. Stator sargıların herhangi bir şekilde stator kutbundan çıkmaması ve manyetik akının devresini daha iyi tamamlayabilmesi için, stator kutup ayakları yay şeklinde modellenmiştir.

Protoipi üretilecek motorun nihai tasarımında boyut da göz önünde bulundurulmuştur. Statorun dış çapı, rotorun eksenel yönlerdeki hareketini yeni mekanik aksamı ile $\pm 45^\circ$ büyük açı değerinde kolaylıkla yapabilmesi için 157 mm değerinde tasarlanmıştır. Literatürdeki eksenel hareket açıları $\pm 11^\circ$ ile $\pm 37^\circ$ arasında olan çok eksenli hareket kabiliyetine sahip motorların ve aktüatörlerin [30,35,39-42,45,48] stator dış çapı değerleri incelendiğinde, bu değer 28mm ile 300 mm arasında olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, prototip üretimi gerçekleştirilecek motorun hareket açısının, literatürde yer alan motorların ve aktüatörlerin eksenel hareket açılarından daha yüksek değerde olmasına rağmen; stator dış çapı değerinin literatürde yer alan motorların ve aktüatörlerin stator dış çapları aralığında yer aldığı görülmektedir. Yani bu tez çalışmasında tasarlanan motor ile motor boyutu büyümeden daha büyük hareket açısı elde edilebilmiştir. Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak oluşturulan stator nüve yapısı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

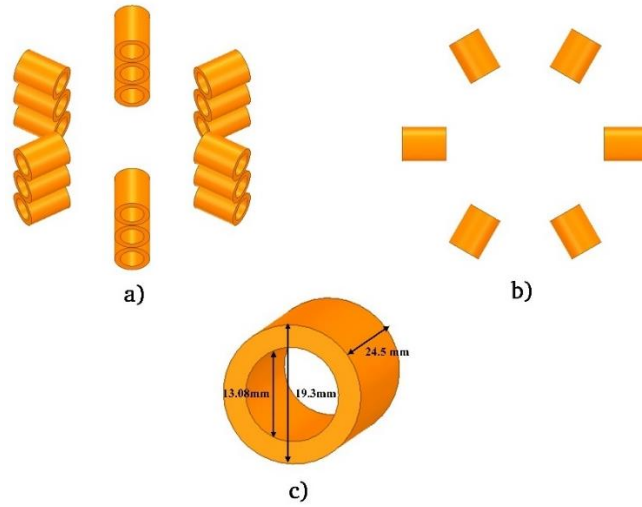


Şekil 4.2 Küresel motorun 6 kutuplu 3 bloktan oluşan stator yapısı a) Stator yapısı b) Statorun ölçüleri c) Üç blokluluk statorun boyutları

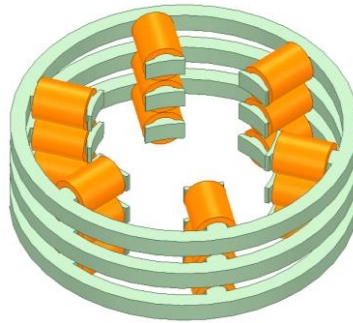
Stator nüvesi oluşturulduktan sonra, stator ayaklarında sargılar için bırakılan mesafeye uygun olacak şekilde, alt, orta ve üst stator bloklarının kutuplarına yerleştirilecek 18 adet sargı oluşturulmuştur. Şekil 4.3’te motorun sargıları gösterilmiştir.

Sargıların sarım sayısı 90’dır ve sargı için 0,81 mm çapındaki bakır iletkenler kullanılmıştır. İstenilen hareket yönüne bağlı olarak sargılara 1 A değerinde akım

tanımlanarak enerjilendirilmiştir. Statik elektromanyetik analizde elektriksel enerji olarak sargılara amper-sarım ($N \cdot I$) cinsinden değerler tanımlanmıştır. Sargılar oluşturulduktan ve stator nüvelerindeki ayaklara yerleştirildikten sonra, statorun modellenmesi tamamlanmıştır. Son olarak hem stator nüvelerinin hem de sargıların malzemeleri seçilmiştir. Stator nüvelerine iletkenlik değeri 1851852 Siemens/m ve maksimum manyetik akı yoğunluğu 2.094 T olan NO20-JFE Steel 35JN270 elektrik sac malzeme, sargılara ise bakır malzeme tanımlanmıştır. Şekil 4.4'te statorun genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Küresel motorun sargıları a) Stator sargılarının tümü b) Statorun bir bloğundaki sargılar c) Sargıların ölçüleri

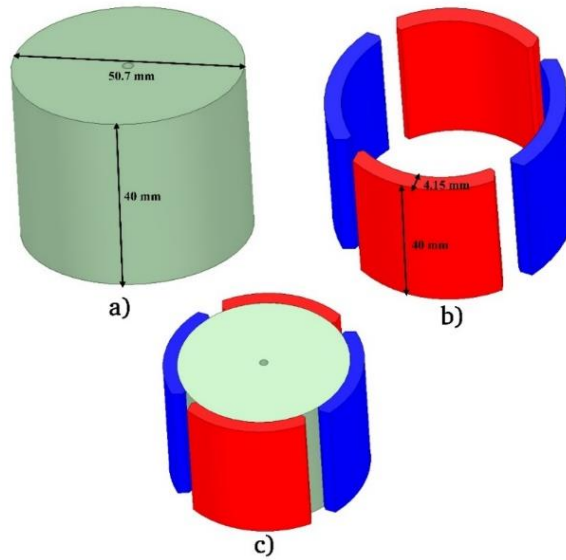


Şekil 4.4 Küresel motorun statorunun genel yapısı

4.1.2 Nihai Küresel Motorun Tasarımının Rotor Yapısı

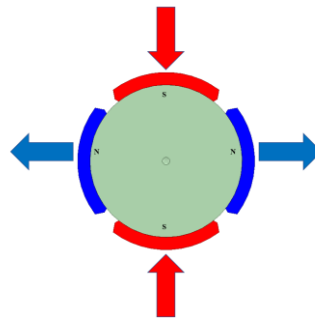
Küresel motorun rotoru dört kutuplu bir yapıya sahiptir. Küresel olarak tasarlanan rotorda 4 adet sabit mıknatıs rotorun yüzeyinde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Küresel rotorun merkezi referans alınıp, sabit mıknatıslar birbirleriyle 90° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Küresel rotorda sabit

mıknatıslar karşılıklı olarak 2 adet N kutbu ve 2 adet S kutbu olacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece sargılardan geçirilecek akımların oluşturduğu manyetik alan kuvvetine göre rotor hareketi sağlanmış olacaktır. Rotoru Steel-1010 malzeme, mıknatıslara ise SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C malzeme tanımlanmıştır. Steel-1010 malzemesinin iletkenliği 2000000 Siemens/m ve maksimum manyetik akı yoğunluğu 2.5 T değerindedir. SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C malzemesinin manyetik geçirgenliği ise 1.12 T değerlerindedir. Şekil 4.5'te rotor ve sabit mıknatıslar, gerçek boyutlandırılmalarıyla birlikte üç boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Küresel motorun rotoru a) Rotor nüvesi b) Mıknatıslar c) Rotor

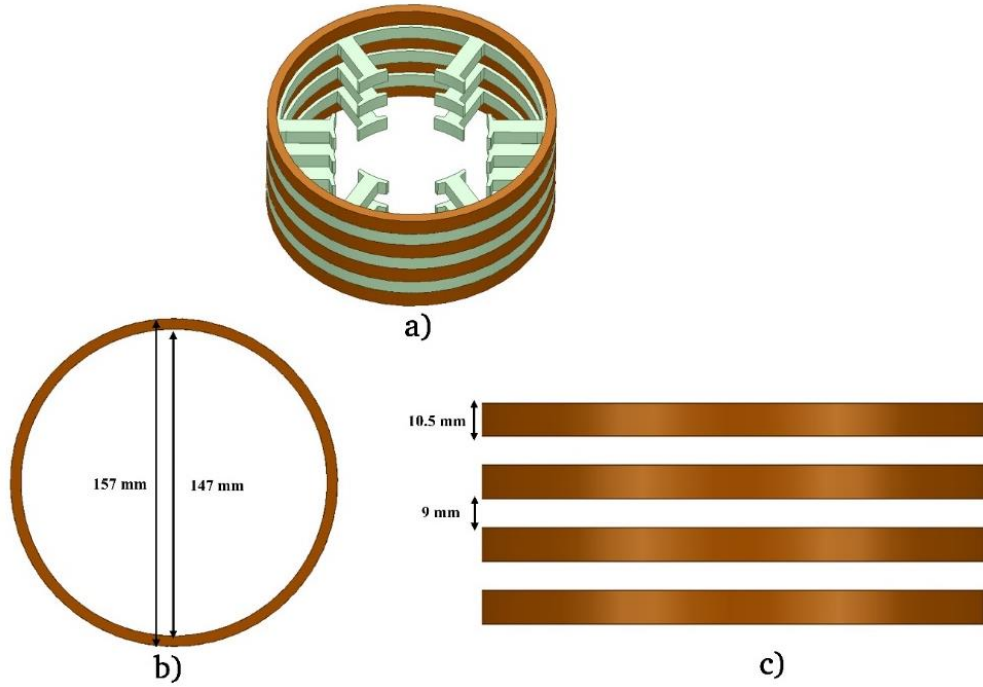
Küresel motordaki sabit mıknatıslar 2 adet N kutbu ve 2 adet S kutbu olmak üzere rotorun yüzeyine yerleştirilmişlerdir. Sabit mıknatısların manyetik alan yönleri küresel rotorun merkezinden yarıçapına doğru yönlendirilmiştir. Şekil 4.6'da rotordaki sabit mıknatısların ve rotorun manyetik alan yönleri gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Sabit mıknatısların yönleri

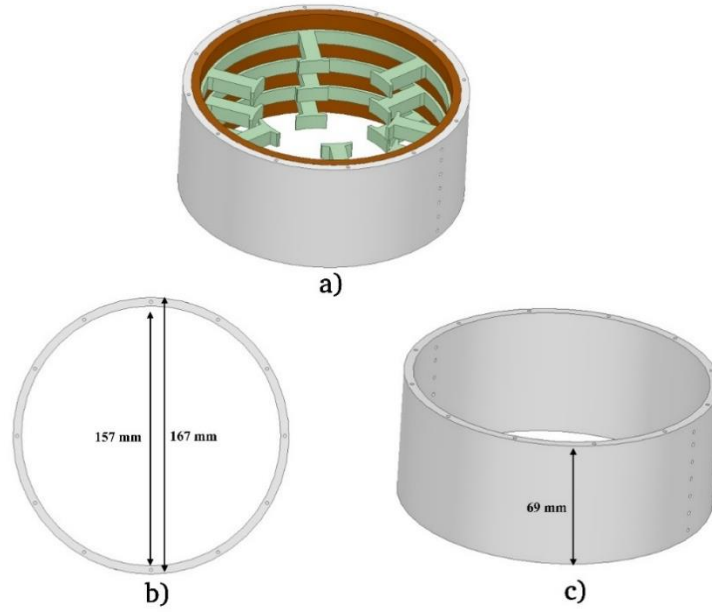
4.1.3 Nihai Küresel Motorun Tasarımının Mekanik Yapısı

Statoru, rotoru ve sargıları ayrı ayrı modellenen küresel motorun, mekanik aksamı da bu motora özgün olacak şekilde modellenmiştir. Stator nüvelerinin birbirleriyle olan bağlantılarının sağlanması için Şekil 4.7’de görüldüğü gibi stator tutucuları modellenmiştir. Stator tutucularına Stainless Steel malzeme tanımlanmıştır.

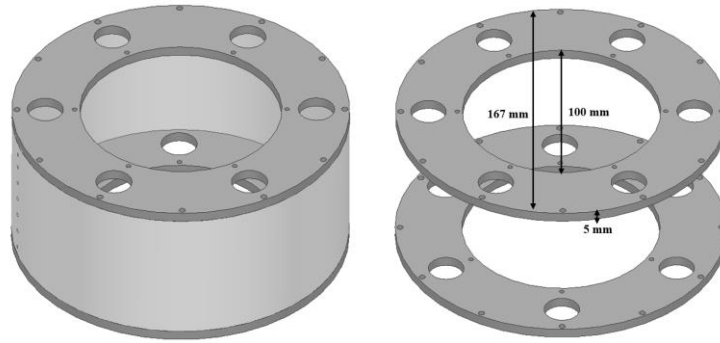


Şekil 4.7 Stator tutucularının genel yapısı a) Stator ve stator tutucuları b) Stator tutucuları ölçüleri c) Stator tutucuları

Motorun dış gövdesi ile alt ve üst kapaklar, stator nüvelerinin hareket etmemesi ve sabit kalması için Şekil 4.8’de ve 4.9’da verildiği gibi modellenmiştir. Dış gövde ile alt ve üst kapaklara Stainless Steel malzeme tanımlanmıştır. Stainless Steel malzemesinin iletkenliği 1100000 Siemens/m değerinde ve manyetik geçirgenliği de 1 değerindedir.

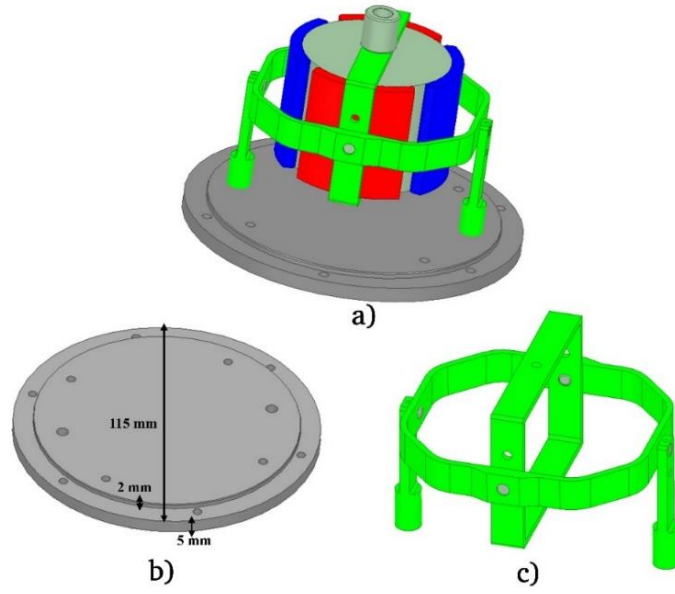


Şekil 4.8 Motorun dış gövdesinin genel yapısı a) Motorun dış gövdesi b) Dış gövdenin iç ve dış çapı ölçüleri c) Dış gövdenin yükseliği



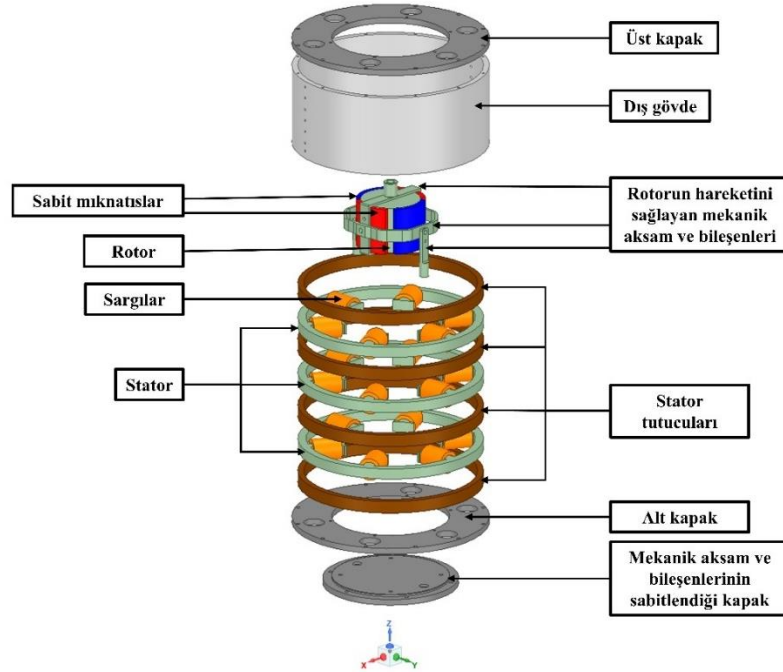
Şekil 4.9 Motorun alt ve üst kapaklarının genel yapısı

Rotorun hareketini sağlayan iki hareketli eksen, eksenleri sabitlemeyi sağlayan eksen milleri, rotordaki konnektör bileşeni, hareketi sağlayan eksenlerin birleşim bölgelerine yerleştirilecek pim yapısı ve tüm hareketi sağlayan eksen yapısının eksen milleriyle sabitlendiği eksen kapağı Şekil 4.10'daki gibi modellenmiştir. Hareketi sağlayan eksenlere, eksen millerine ve eksen kapağına Stainless Steel malzeme tanımlanmıştır.

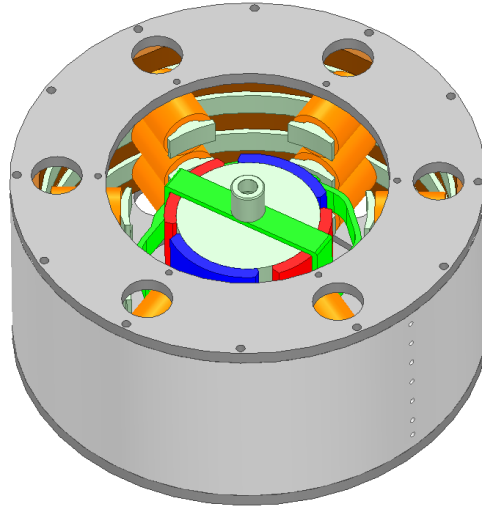


Şekil 4.10 Hareketi sağlayan eksen sistemi a) Rotor ve hareketi sağlayan mekanik yapı b) Eksen kapağı c) Hareketi sağlayan eksenler

Statoru, rotoru, mıknatısları, sargıları, mekanik aksamı ayrı ayrı modellenen küresel motorun, tüm parçalarının birleştirildiği genel yapısı Şekil 4.11’de görülmektedir. Tasarımı gerçekleştirilen küresel motorun daha sonra, sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı Ansys Maxwell yazılımı ile üç boyutlu elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11 Küresel motorun nihai tasarım ve prototip üretim modelinin tüm bileşenleri



Şekil 4.12 Küresel motorun nihai tasarım ve prototip modeli

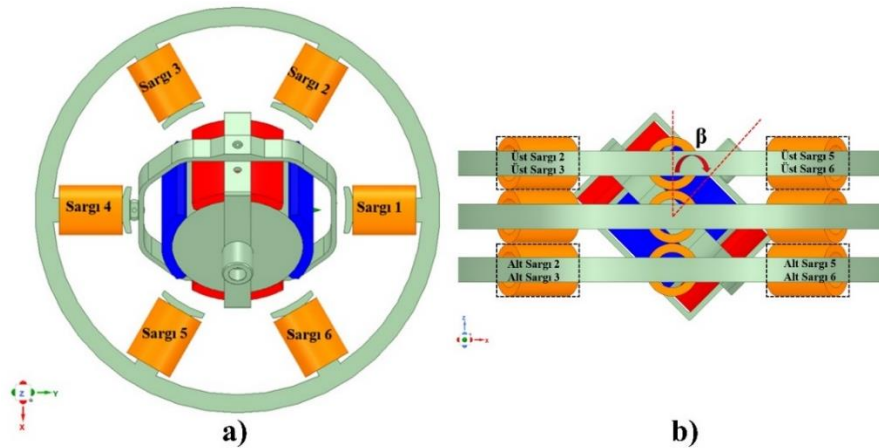
4.2 Nihai Küresel Motor Modelinin Elektromanyetik Analizleri

Prototip üretim için nihai tasarımı belirlenen küresel motorun, manyetik akı dağılımları, kuvvet ve moment değerlerinin belirlenmesi için elektromanyetik analizleri yapılmak üzere, analiz modelleri oluşturulmuştur. Statik elektromanyetik analizde uyarma olarak sargılara amper-sarım cinsinden değerler tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple küresel motorun statorunda yer alan tüm sargıların 90 sarımdan oluştuğu tanımlanmış ve daha sonra istenen hareket yönüne bağlı olarak belirli sargılara 1A'lık akım verilerek uyarmaları sağlanmıştır.

Küresel motorun rotorunun koordinat sisteminde orijinde yer aldığı düşünülerek, motorun X ve Y eksenlerinin pozitif ve negatif yöndeki hareketinin açılarının değişimlerine göre, $\pm 45^\circ$ lik açısal hareketler yaptırılmış ve her eksenel hareket için de elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yer alan β değeri, küresel motorun X eksen yönündeki, Y eksen etrafındaki eksenel hareketlerindeki açı değerini tanımlamaktadır. Analizlerde yer alan α değeri, küresel motorun Y eksen yönündeki, X eksen etrafındaki eksenel hareketlerindeki açı değerini tanımlamaktadır. Motorun hareketi $\alpha = \pm 45^\circ$ ve $\beta = \pm 45^\circ$ arasında değişmektedir. Elektromanyetik analizlerle, açı değişimlerine göre motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımları, kuvvet ve moment değerleri elde edilmiştir.

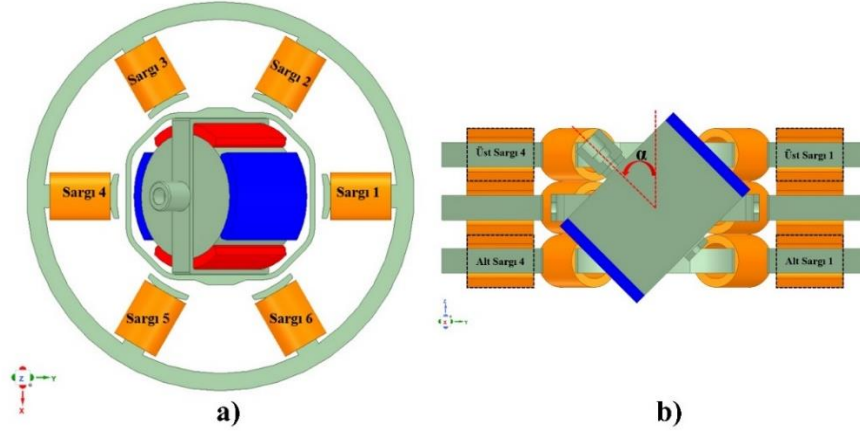
Statoru 3 bloklu ve her bir bloğunda 6 sargısı bulunan nihai küresel motorun bulunduğu koordinat sistemi referans alındığında, pozitif X yönünde $\beta = +45^\circ$ açı değerinde hareketi sağlamak için 2 Alt, 3 Alt, 5 Alt, 6 Alt ve 2 Üst, 3 Üst, 5 Üst, 6 Üst sargıları enerjilendirildiğinde, 2 Alt, 3 Alt, 5 Üst, 6 Üst sargıları karşısındaki S kutbunu itecek ve 5 Alt, 6 Alt, 2 Üst, 3 Üst sargıları karşısındaki S kutbunu kendi eksen doğrultusuna çekmek isteyeceklerdir. Böylece itme ve çekme kuvvetleri ile küresel motor maksimum 45° ’lik açı ile hareket edecektir. Motorun negatif X yönünde $\beta = -45^\circ$ açı değerindeki hareketi, akım yönü ters olacak şekilde belirlenen sargılar enerjilendirilerek gerçekleştirilebilmektedir. Küresel motorun kartezyen koordinat sistemindeki konumuna göre X eksen yönündeki, Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerlerinde enerjilendirilecek stator sargıları ve hareket yönleri Şekil 4.13’te gösterilmiştir.

Statoru 3 bloklu ve her bir bloğunda 6 sargısı bulunan nihai küresel motorun bulunduğu koordinat sistemi referans alındığında, negatif Y yönünde $\alpha = -45^\circ$ açı değerinde hareketi sağlamak için 1 Alt, 4 Alt ve 1 Üst, 4 Üst sargıları enerjilendirildiğinde, 1 Alt, 4 Üst sargıları karşısındaki N kutbunu itecek ve 4 Alt, 1 Üst sargıları karşısındaki N kutbunu kendi eksen doğrultusuna çekmek isteyeceklerdir. Böylece itme ve çekme kuvvetleri ile küresel motor maksimum 45° ’lik açı ile hareket edecektir.



Şekil 4.13 Küresel motorun pozitif X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları ve hareketi a) Motorun poiztif X eksen yönündeki $\beta = +45^\circ$ açı değerindeki hareketi b) Motorun X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları

Motorun negatif Y yönünde $\alpha = -45^\circ$ açı değerindeki hareketi, akım yönü ters olacak şekilde belirlenen sargılar enerjilendirilerek gerçekleştirilebilmektedir. Küresel motorun kartezyen koordinat sistemindeki konumuna göre Y eksen yönünde, X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek stator sargıları ve hareket yönleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



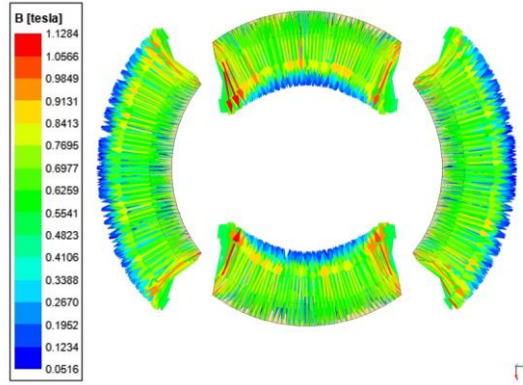
Şekil 4.14 Küresel motorun negatif Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları ve hareketi a) Motorun negatif Y eksen yönündeki $\alpha = -45^\circ$ açı değerindeki hareketi b) Motorun Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki enerjilendirilecek sargıları

Prototip üretimi için nihai tasarımı oluşturulan motorun Şekil 4.13'te ve Şekil 4.14'te gösterilen hareketlerindeki elektromanyetik analizlerinin gerçekleştirilmesi için analiz modelleri oluşturulmuş ve motorun manyetik akı dağılımları, kuvvet ve moment değerleri elde edilmiştir. Yapılan elektromanyetik analizlerde, motorun yüksüz çalışma durumunda yani sadece mıknatısların manyetik enerjisi ile manyetik akı dağılımları elde edilmiş, daha sonra da, motorun nominal çalışma durumunda manyetik akı dağılımları, kuvvet ve moment değerleri elde edilmiştir.

4.2.1 Nihai Küresel Motor Tasarımının Mıknatıs Yapısının Manyetik Akı Yoğunluğu

Küresel motorun rotorunda kullanılan SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C malzemeli mıknatısların yapısı yüzey mıknatıs olarak tasarlanmıştır. Motorun elektromanyetik analizlerinde, rotordaki SmCo mıknatısların manyetik alan yönleri izlenebilmektedir. Bu mıknatısların elektromanyetik analizler ile elde

edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları vektörel olarak Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Küresel motorun SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C malzemeli yüzey mıknatıslarının manyetik akı yoğunluğu dağılımı

4.2.2 Nihai Küresel Motor Tasarımının Güç Tüketimi

Nihai küresel motor tasarımında, elektromanyetik analiz çalışmalarının yanında, güç tüketimi de dikkate alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Güç tüketimi Denklem 1.13'te verilen formüle göre hesaplanmıştır. Motorun sargıları 1 A değerinde akım ile enerjilendirilmiştir. Motorun her bir sargı direnci ise 0.167 ohm değerindedir.

Motorun negatif Y eksenı yönündeki X eksenı etrafındaki $\alpha = -45^\circ$ açı değerindeki hareketindeki güç tüketimi aşağıda verilen Denklem 1.14'e göre hesaplanmıştır [41,42].

$$P_X = I_{\dot{U}S1}^2 * R + I_{AS4}^2 * R + I_{\dot{U}S4}^2 * R + I_{AS1}^2 * R \quad (1.14)$$

Denklem 1.13'te verilen P_X , motorun negatif Y eksenı yönündeki X eksenı etrafındaki $\alpha = -45^\circ$ açı hareketindeki güç ve R , statordaki enerjilendirilen sargıların direnç değerlerini temsil etmektedir. Ayrıca $I_{\dot{U}S1}$, I_{AS4} , $I_{\dot{U}S4}$, I_{AS1} , sırasıyla 1 Üst, 4 Alt, 4 Üst ve 1 Alt sargılara tanımlana akım değerlerini temsil etmektedir.

Motorun pozitif X eksenı yönündeki Y eksenı etrafındaki $\beta = +45^\circ$ açı değerindeki hareketindeki güç tüketimi aşağıda verilen Denklem 1.15'e göre hesaplanmıştır [41,42].

$$P_Y = I_{\dot{U}S2}^2 * R + I_{\dot{U}S3}^2 * R + I_{AS5}^2 * R + I_{AS6}^2 * R + I_{\dot{U}S5}^2 * R + I_{\dot{U}S6}^2 * R + I_{AS2}^2 * R + I_{AS3}^2 * R \quad (1.15)$$

Denklem 1.13'te verilen P_Y , motorun pozitif X eksenini yönündeki Y eksenini etrafındaki $\beta = +45^\circ$ açılı hareketindeki güç ve R , statordaki enerjilendirilen sargıların direnç değerlerini temsil etmektedir. Ayrıca $I_{\dot{U}S2}$, $I_{\dot{U}S3}$, I_{AS5} , I_{AS6} , $I_{\dot{U}S5}$, $I_{\dot{U}S6}$, I_{AS2} , I_{AS3} , sırasıyla 2 Üst, 3 Üst, 5 Alt, 6 Alt, 5 Üst, 6 Üst, 2 Alt ve 3 Alt sargılara tanımlanan akım değerlerini temsil etmektedir.

Motorun sargılarına tanımlanan akım değeri ve sargı direnç değerleri aynı olduğu için Denklem 1.14 ve Denklem 1.15 sırasıyla aşağıda verilen Denklem 1.16 ve Denklem 1.17'deki gibi ifade edilebilir [41,42].

$$P_X = 4 * I^2 * R \quad (1.16)$$

$$P_Y = 8 * I^2 * R \quad (1.17)$$

Motorun pozitif X eksenini yönündeki Y eksenini etrafındaki $\beta = +45^\circ$ açılı hareketindeki güç değeri Denklem 1.16 kullanılarak 1.336 W olarak elde edilmiştir. Motorun negatif Y eksenini yönündeki X eksenini etrafındaki $\alpha = -45^\circ$ açılı hareketindeki güç değeri Denklem 1.17 kullanılarak 0.667 W olarak elde edilmiştir.

Toplam güç tüketimi ise aşağıda verilen Denklem 1.18 ile hesaplanmıştır [41,42].

$$P_T = P_X + P_Y \quad (1.18)$$

Denklem 1.18'de verilen P_T , motorun pozitif X eksenini yönündeki Y eksenini etrafındaki $\beta = +45^\circ$ açılı hareketindeki güç değeri ile negatif Y eksenini yönündeki X eksenini etrafındaki $\alpha = -45^\circ$ açılı hareketindeki güç değerlerinin toplamını temsil etmektedir. Toplam güç değeri, Denklem 1.18'den 2.003 W olarak elde edilmiştir.

4.2.3 Nihai Küresel Motorun Yüksüz Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu

Motorda kullanılan SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C malzemeli mıknatıs yapısı ve manyetizasyon yönleri Bölüm 4.1.2'de sırasıyla Şekil 4.5'te ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Sabit mıknatıstaki akı yoğunluğu, hava boşluğundaki akı ve içsel manyetik indüksiyondan oluşmaktadır. Sabit mıknatıstaki akı yoğunluğu aşağıda verilen Denklem 1.19'daki gibi ifade edilebilir [15,36]:

$$B = B_i + \mu_0 * H \quad (1.19)$$

Denklem 1.19'da verilen B_i , mıknatısın içsel manyetik indüksiyon değerini temsil etmektedir. Sabit mıknatısın remenans manyetik akı yoğunluğu aşağıda verilen Denklem 1.20'deki gibi ifade edilebilir [15,36].

$$B_r = \mu_0 * \mu_r * H_c \quad (1.20)$$

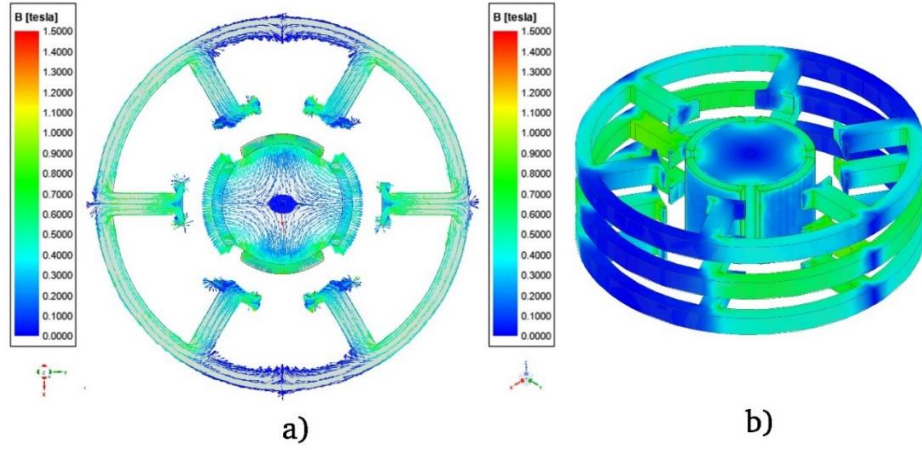
Denklem 1.20'de verilen B_r , mıknatısın remenans manyetik akı; H_c , mıknatısın manyetik zorlayıcı değerlerini temsil etmektedir.

Motorda kullanılan SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C mıknatısın malzeme özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

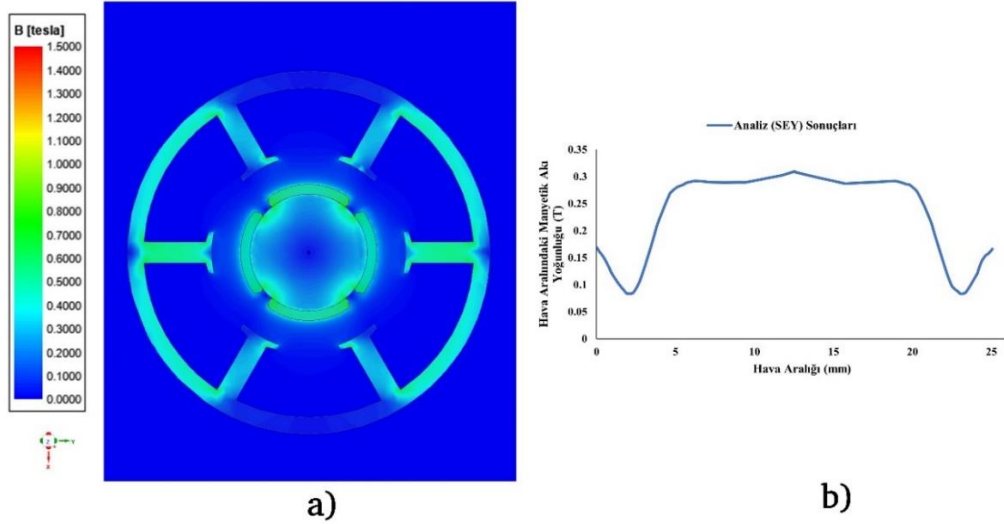
Tablo 4.2 SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C mıknatısın malzeme özellikleri

Parametreler	Değer
Remenans manyetik akı (B_r)	1.12 T
Manyetik geçirgenlik (μ_r)	1.08
Manyetik zorlayıcılık (H_c)	814.567 kA/m

Küresel motorun rotorunda kullanılan SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C mıknatısların manyetik enerjisi ile yüksüz çalışma durumunda motordaki manyetik akı dağılımları elektromanyetik analizler ile Şekil 4.16'da ve Şekil 4.17'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.16 Küresel motorun yüksüz çalışma durumundaki a) Manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı b) Manyetik akı yoğunluğunun skaler dağılımı



Şekil 4.17 Küresel motorun yüksüz çalışması durumunda hava aralığındaki a) Manyetik akı yoğunluğu dağılımı b) Manyetik akı yoğunluğu değişimi

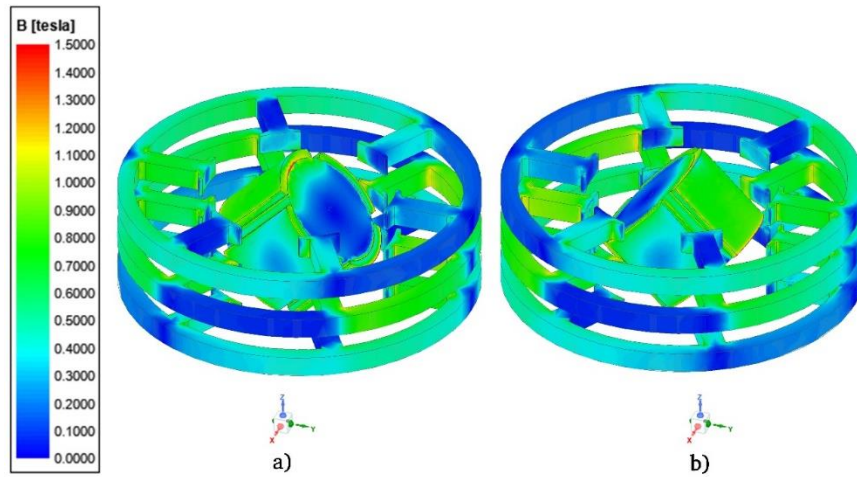
Motorun yüksüz çalışma durumundaki elektromanyetik analizleri incelediğinde, Şekil 4.16'dan görülebileceği gibi, motor yüksüz durumdayken manyetik akı yoğunluğu düzgün bir dağılım göstermiştir. Ayrıca statordaki ortalama manyetik akı yoğunluğu dağılımı 0.67 T olarak elde edilmiştir. Motor yüksüz durumdayken hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değerleri ise Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu 0.309 T, ortalama manyetik akı yoğunluğu 0.237 T olarak elde edilmiştir.

4.2.4 Nihai Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu

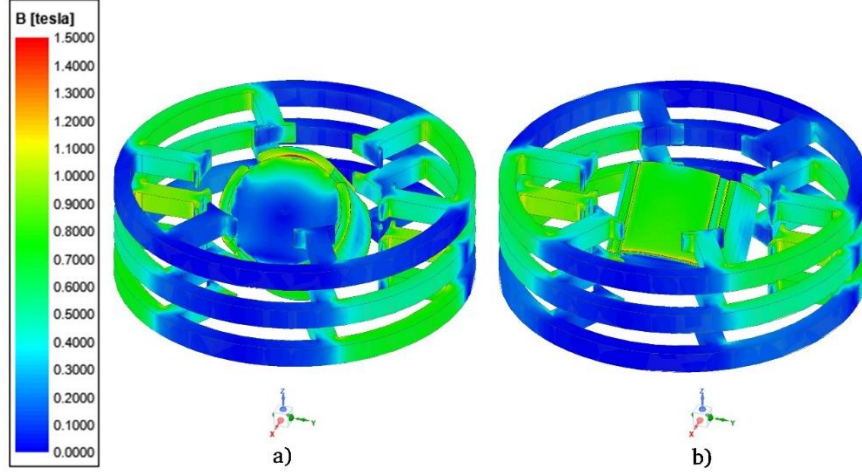
Motorun nominal yüklü çalışmasında X eksen ve Y eksen etrafında $\pm 45^\circ$ açı değerlerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları elektromanyetik analizlerle hesaplanmıştır. Motorun X eksen ve Y eksen etrafındaki hareketleri için sargılara 1 A akım tanımlanmıştır. Statordaki sargıların her biri 90 sarımdan oluşmaktadır. Elektromanyetik analizlerde sargılar 90 Amper-sarım değerinde manyetomotor kuvvet uygulanmıştır. Manyetomotor kuvvet Denklem 1.21'deki gibi ifade edilir [36]. Burada F_{mm} , manyetomotor kuvvet; N_s , sarım sayısı; I , sargılara tanımlanan akım değerlerini temsil etmektedir.

$$F_{mm} = N_s * I \quad (1.21)$$

Motor yüklü çalışma durumundayken Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı ve X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerlerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları sırasıyla Şekil 4.18'de ve 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerlerinde manyetik akı yoğunluğu dağılımları
a) $\alpha = +45^\circ$ açı değerinde motorun manyetik akı yoğunluğu b) $\alpha = -45^\circ$ açı değerinde motorun manyetik akı yoğunluğu



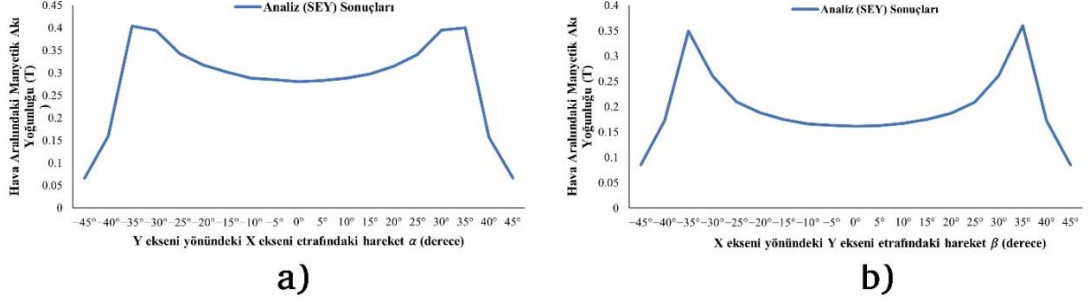
Şekil 4.19 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksenî yönündeki Y eksenî etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açî değerlerinde manyetik akî yoğunluğu dağılımları
a) $\beta = +45^\circ$ açî değerinde motorun manyetik akî yoğunluğu b) $\beta = -45^\circ$ açî değerinde motorun manyetik akî yoğunluğu

Motorun yüklü çalışma durumundaki elektromanyetik analizleri incelediğinde, Şekil 4.18’de ve Şekil 4.19’da görüldüğü gibi manyetik akî yoğunluğu düzgün dağılım göstermiştir. Motorda manyetik doyum problemi görülmemiştir. Statordaki ortalama manyetik akî yoğunluğu yaklaşık 1.1 T olarak elde edilmiştir.

Optimizasyon analizleri sonucunda nihai prototip üretim modeli olarak belirlenen rotorunda NdFe35 mıknatıs malzemesinin kullanıldığı, rotor ile stator yapılarında M43-24G elektriksel çelik malzemesinin kullanıldığı SMKM1 yüzey mıknatıslı motor tasarımının statorundaki ortalama manyetik akî yoğunluğu değeri 0.7 T elde edilmiştir.

Prototip için belirlenen nihai motor modelinin analizler sonucundaki statordaki ortalama manyetik akî yoğunluğu değeri ve optimizasyon analizleri ile nihai model olarak belirlenen SMKM1 yüzey mıknatıslı motor modelinin analizler sonucundaki statordaki ortalama manyetik akî yoğunluğu değeri incelendiğinde her iki motor modelinin de herhangi bir manyetik doyum probleminin olmadığı görülmüştür.

Motor $\pm 45^\circ$ konumunda iken X eksenî ve Y eksenî etrafında hareket ettirildiğinde, rotor ve statorun birbirine yaklaştığı durumlarda manyetik akî yoğunluğunun arttığı görülebilmektedir.



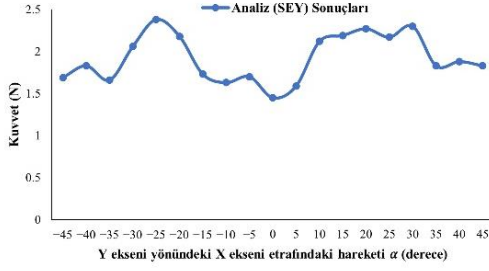
Şekil 4.20 Küresel motorun yüklü çalışması durumunda a) Y eksenini yönündeki X eksenini etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu b) X eksenini yönündeki Y eksenini etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu

Motor yüklü durumdayken, Y eksenini yönündeki X eksenini etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu 0.403 T ve ortalama manyetik akı yoğunluğu 0.283 T olarak elde edilmiştir.

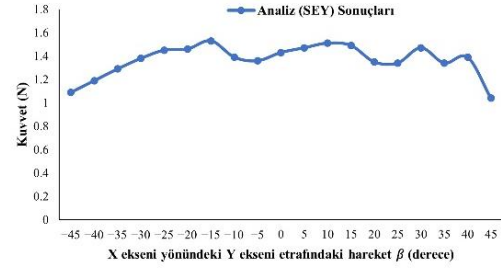
Motor yüklü durumdayken, X eksenini yönündeki Y eksenini etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu ise 0.36 T ve ortalama manyetik akı yoğunluğu 0.195 T olarak elde edilmiştir.

4.2.5 Nihai Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Kuvvet ve Moment Değerleri

Motorun nominal yükünde çalışmasında X eksenini ve Y eksenini etrafında $\pm 45^\circ$ açısı değerlerindeki kuvvet ve moment değerleri elektromanyetik analizlerle hesaplanmıştır. Motor yüklü çalışma durumundayken Y eksenini yönündeki X eksenini etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerlerinde ve X eksenini yönündeki Y eksenini etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açısı değerlerinde elde edilen kuvvet ve moment Şekil 4.21'de ve 4.22'de gösterilmiştir.

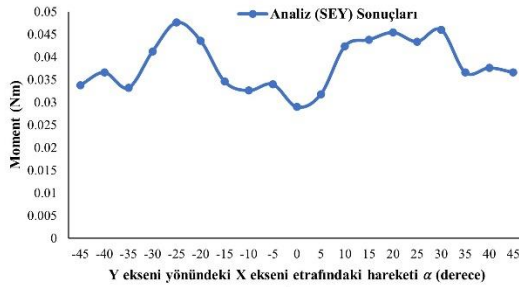


a)

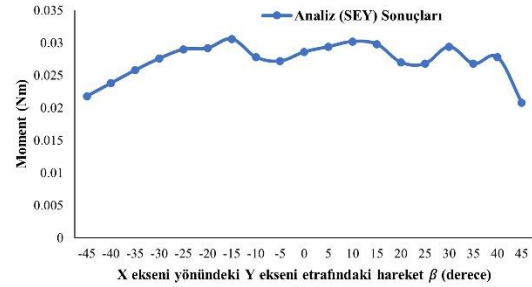


b)

Şekil 4.21 Küresel motorun yüklü çalışma durumundaki a) Y eksenî yönündeki X eksenî etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketindeki kuvvet değerleri b) X eksenî yönündeki Y eksenî etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketindeki kuvvet değerleri



a)



b)

Şekil 4.22 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda a) Y eksenî yönündeki X eksenî etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde moment değerleri b) X eksenî yönündeki Y eksenî etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde moment değerleri

Motorun yüklü çalışma durumu için yapılan elektromanyetik analizlerde, Şekil 4.21'de ve Şekil 4.22'de verildiği gibi kuvvet ve moment değerleri elde edilmiştir. Bu grafikler incelediğinde; Y eksenî yönündeki X eksenî etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde ortalama kuvvet 1.92 N ve ortalama moment 0.038 Nm olarak elde edilmiştir. X eksenî yönündeki Y eksenî etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde ise ortalama kuvvet 1.36 N ve ortalama moment 0.027 Nm olarak elde edilmiştir.

Optimizasyon analizleri sonucunda nihai prototip üretim modeli olarak belirlenen rotorunda NdFe35 mıknatıs malzemesinin kullanıldığı, rotor ile stator yapılarında M43-24G elektriksel çelik malzemesinin kullanıldığı SMK11 yüzey mıknatıslı

motor tasarımının moment ve kuvvet değerleri ile nihai motor tasarımının moment ve kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır.

Motorun mekanik yapısı ile eksenel hareketlerini sağlanmasında önemli olan kuvvet değerleri karşılaştırıldığında; prototip için belirlenen nihai motor modelinin analizler sonucundaki ortalama kuvvet değerleri, optimizasyon analizleri ile nihai model olarak belirlenen SMKM1 yüzey mıknatıslı motor modelinin analizler sonucundaki kuvvet değerlerinden Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki ve X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki hareketlerde sırasıyla 0.58 N ve 0.4 N daha yüksek değerde elde edilmiştir.

Moment değerleri karşılaştırıldığında; prototip için belirlenen nihai motor modelinin analizler sonucundaki ortalama moment değerleri, optimizasyon analizleri ile nihai model olarak belirlenen SMKM1 yüzey mıknatıslı motor modelinin analizler sonucundaki moment değerlerinden Y eksen yönündeki X eksen etrafındaki ve X eksen yönündeki Y eksen etrafındaki hareketlerde sırasıyla 66.6 mNm ve 100.25 mNm daha düşük değerde elde edilmiştir.

KÜRESEL MOTOR PROTOTİPİNİN ÜRETİMİ

Nihai motor modeli olan, statoru 3 blok ve 18 sargıdan oluşan, yüzey mıknatıslı, mıknatıs malzemesi olarak SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C'nin kullanıldığı, statorunda NO20-JFE Steel 35JN270 ve rotorunda Steel-1010 elektriksel sac malzemelerinin kullanıldığı, dış gövdenin, alt ile üst kapakların, hareketi sağlayan eksenlerin, eksen millerinin, eksen kapağının, konnektörün Stainless Steel malzemeden yapıldığı küresel motorun daha sonra prototipi üretilmiştir.

5.1 Küresel Motorun Statorunun Üretimi

Küresel motorun statoru 3 bloktan oluşmaktadır. Her stator bloğunda 6 sargı olduğundan, toplamda 18 sargıdan oluşmaktadır. Statorunda elektriksel sac malzeme olarak NO20-JFE Steel 35JN270 kullanılmıştır. Bu özelliklerde üretilmiş stator yapısı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Prototip küresel motorun stator yapısı

5.2 Küresel Motorun Rotorunun Üretimi

Küresel motorun rotoru yüzey mıknatıslı ve 4 mıknatıstan oluşmaktadır. Mıknatıs malzemesi olarak SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C ve rotorda Steel-1010 elektriksel sac malzemesi kullanılmıştır. Küresel motorun bu özelliklerde üretilmiş rotor yapısı Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Prototip küresel motorun rotor yapısı

5.3 Küresel Motorun Mekanik Aksamının Üretimi

Küresel motorun mekanik yapısı, küresel motorun $\pm 45^\circ$ açı değerinde hareket etmesini kolaylaştıracak bir yapıda ve bu motor için özel olarak tasarlanmıştır. Mekanik yapı stator tarafında, stator tutucular, dış gövde, alt ve üst kapaklardan oluşmaktadır. Rotor tarafında ise, rotorun hareketini sağlayan 2 eksen, eksenleri sabitlemeyi sağlayan eksen milleri, rotordaki konnektör bileşeni, hareketi sağlayan eksenlerin birleşim bölgelerine yerleştirilecek pim yapısı ve tüm hareketi sağlayan eksen yapısının eksen milleriyle sabitlendiği eksen kapağından oluşmaktadır. Tüm bu yapılarda Stainless Steel malzeme kullanılmıştır. Şekil 5.3’te stator tutucuları , Şekil 5.4’te alt ve üst kapaklar, Şekil 5.5’te hareketi sağlayan eksenler ve eksen milleri gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Küresel motorun stator tutucuları

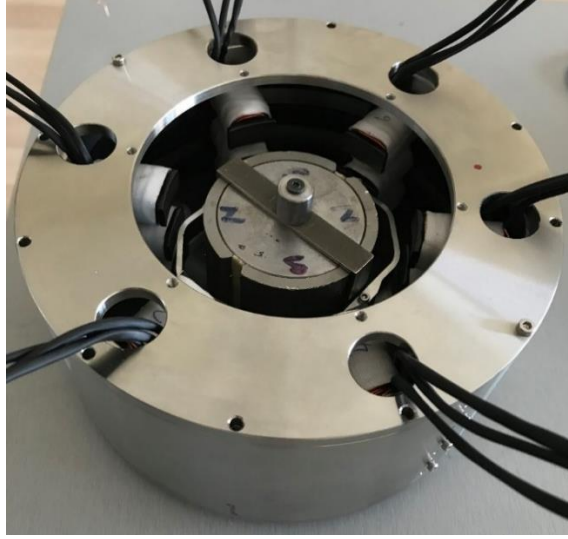


Şekil 5.4 Küresel motorun alt ve üst kapakları



Şekil 5.5 Rotorun hareketini sağlayan eksenler ve eksen milleri

Küresel motorun ayrı ayrı üretilmiş yukarıda açıklanan parçaları birleştirilerek, Şekil 5.6’da verilen nihai motor yapısı elde edilmiştir.



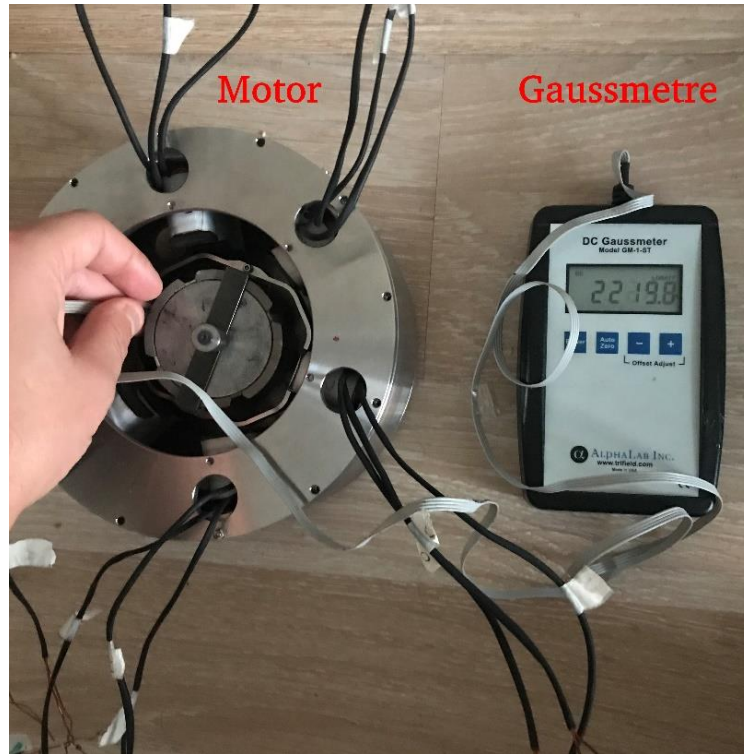
Şekil 5.6 Prototip üretimi gerçekleştirilen küresel motor

PROTOTİP KÜRESEL MOTORUN TESTLERİ

Prototipi üretilmiş statoru 3 bloklı, 18 sargılı, rotoru 4 kutuplu, yüzey mıknatıslı küresel motorun, daha sonra testleri yapılmış ve elektromanyetik analizlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu testlerin yapılabilmesi için Şekil 6.1 ve 6.2’de verilen test düzenekleri kurulmuş ve manyetik akı yoğunluğu, kuvvet ve moment değerleri ölçülmüştür. Test çalışmasında elde edilen sonuçlar ile elektromanyetik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar grafiklerle verilmiştir.

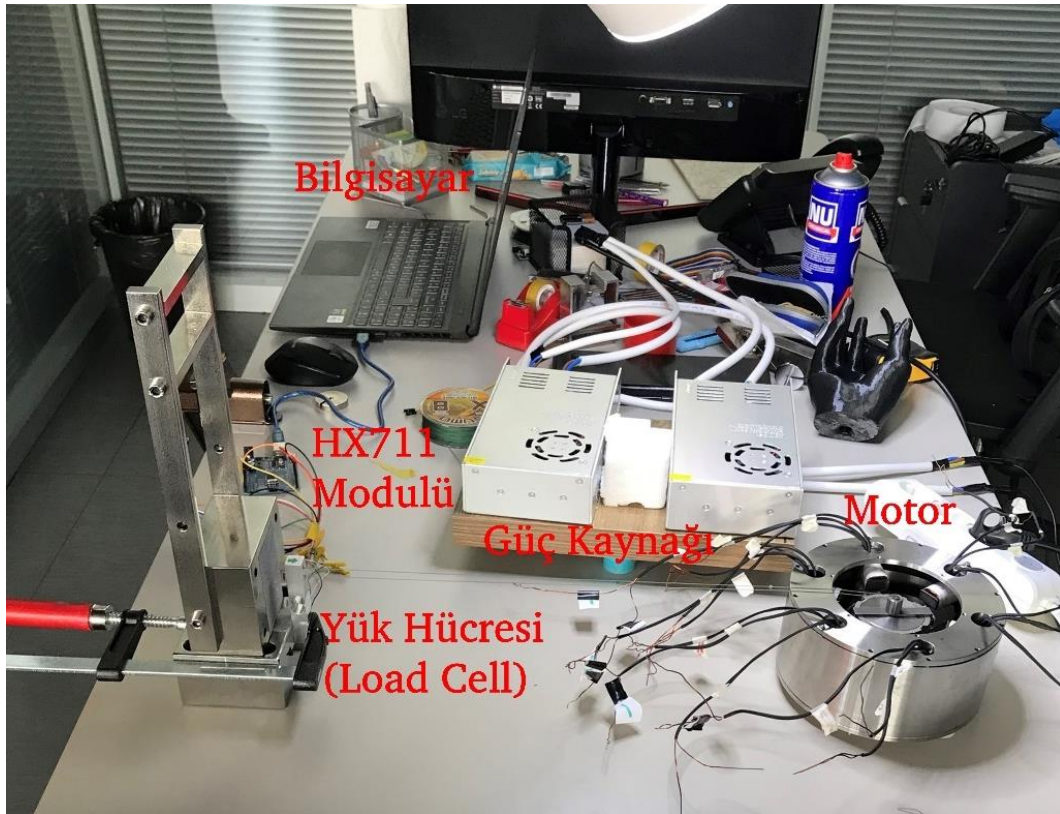
6.1 Prototip Küresel Motorun Test Düzeneği

Prototip küresel motorun, manyetik akı yoğunluğu, kuvvet ve moment değerlerinin ölçülmesi ve Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak yapılan elektromanyetik analiz sonuçları ile karşılaştırmak 2 farklı test düzeneği kurulmuştur. Motorun hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değerleri, yüklü ve yüksüz çalışma durumları için bir gaussmetre kullanılarak ölçülmüştür. Manyetik akı yoğunluğu değerlerinin ölçüldüğü bu test düzeneği Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Küresel motorun manyetik akı yoğunluğunun ölçüldüğü test düzeneği

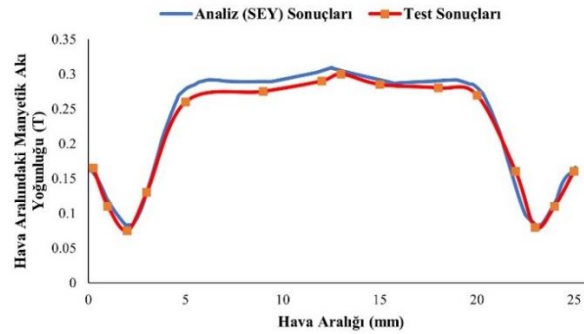
Motorun kuvvet değerlerinin elde edilmesi için gerçekleştirilen testlerde, kuvvet ölçer yük hücresi (load cell) [8,64-67] kullanılmıştır. Yük hücresinin ölçüm kapasitesi 50 N değerindedir. Kuvvet ölçümlerinde hata hassasiyeti %1 olan yük hücresi test öncesi kalibre edilmiştir. Yük hücresine bir ağırlık yerleştirilmiş ve kalibrasyon faktörü belirlenmiştir. Test öncesinde yük hücresindeki başlangıç değerleri belirlenmiş ve ardından tüm testler gerçekleştirilmiştir. Test çalışmasında, sargılar her defasında 1A ile enerjilendirilmiştir. Bu durumda uygulanan gerilim 5V değerindedir. Motorun bu çalışmasındaki elektriksel gücü ise yaklaşık olarak 5W değerinde elde edilmiştir. Güç kaynağı ile enerjilendirilen motorda, yük hücresi ile ölçülen kuvvetler HX711 modülünün sinyal yükselticisi ile belirlenerek bilgisayara aktarılmıştır. Moment değerleri ise kuvvet ile kuvvetin uygulandığı yerin hareketin merkezine olan uzaklık değeri (0,02m) ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır [8,64,65]. Motorun kuvvetini ve momentini ölçmek için oluşturulan deneysel test düzeneği Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Küresel motorun prototipinin kuvvet ve moment değerlerinin elde edilmesi için oluşturulan test düzeneği

6.2 Küresel Motorun Yüksüz Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu Değerlerinin Ölçülmesi

Küresel motorun yüksüz durumda iken mıknatısların manyetik enerjisi ile hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu değerleri Şekil 6.1’de verilen test düzeneği ile ölçülmüş ve bu değerler ile simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, Şekil 6.3’te verilmiştir.

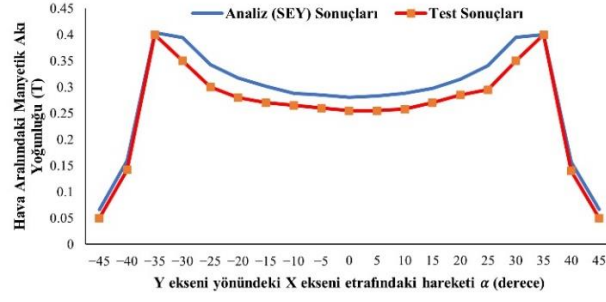


Şekil 6.3 Küresel motorun yüksüz durumundaki manyetik akı yoğunluğu değerlerinin deneysel ve simülasyon sonuçları

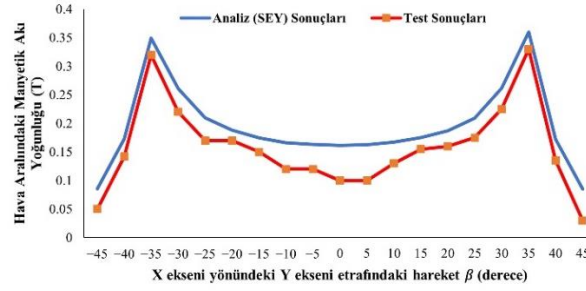
Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, Şekil 6.3’te görüldüğü gibi motor yüksüz durumda iken hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğunun simülasyon ve test sonuçları sırasıyla 0.309 T ve 0.29 T değerlerinde elde edilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar incelendiğinde; motorun hava aralığında ortalama manyetik akı yoğunluğu değeri, analiz çalışmalarında 0.237 T ve test çalışmalarında 0.229 T olarak elde edilmiştir. Hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğunun analiz ve deneysel sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbirine %97 yakınsaklık gösterdiği görülmüştür.

6.3 Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Manyetik Akı Yoğunluğu Değerlerinin Ölçülmesi

Bulunduğu koordinat sisteminde X eksenini (α) ve Y eksenini (β) etrafında hareketini gerçekleştiren motorun 0° ile $\pm 45^\circ$ arasındaki hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun deneysel çalışma ve simülasyonlardan elde edilen değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 6.4’te ve Şekil 6.5’te verildiği gibidir.



Şekil 6.4 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksenini çevreleyen X eksenini çevreleyen $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun simülasyon ve test sonuçları



Şekil 6.5 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksenini çevreleyen Y eksenini çevreleyen $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun analiz ve test sonuçları

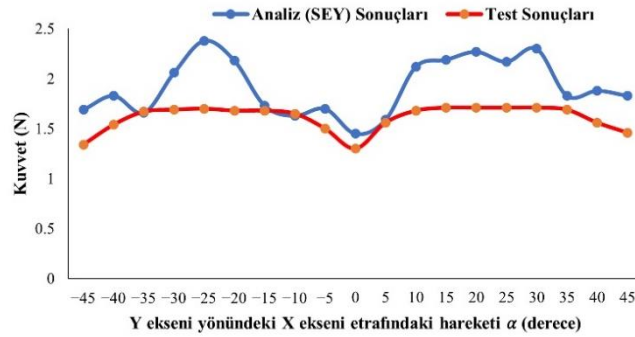
Gerçekleştirilen test çalışmaları neticesinde Şekil 6.4'te görüldüğü gibi, motorun yüklü durumda, Y eksenini çevreleyen X eksenini çevreleyen $\alpha = 0^\circ$ 'den $\alpha = \pm 45^\circ$ 'ye kadar hareketinde, hava aralığındaki elde edilen maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,4 T ve ortalama manyetik akı yoğunluğu 0,256 T'dir. Bu değerler simülasyon çalışmalarında, maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,403 T ve ortalama manyetik akı yoğunluğu 0,283 T olarak elde edilmiştir. Ortalama manyetik akı yoğunluğu değerlerinin analiz sonuçları ve test sonuçları karşılaştırıldığında aralarında %90 yakınsaklık olduğu görülmüştür.

Yapılan test çalışmalarında motor yüklü durumda iken, X eksenini çevreleyen Y eksenini çevreleyen $\beta = 0^\circ$ 'den $\beta = \pm 45^\circ$ 'ye kadar olan hareketinde, hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,33 T ve ortalama manyetik akı yoğunluğu 0,158 T olarak ölçülmüştür. Bu değerler simülasyon çalışmasında, maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,36 T ve ortalama manyetik akı yoğunluğu 0,195 T olarak elde edilmişti. Ortalama manyetik akı yoğunluğu değerlerinin analiz

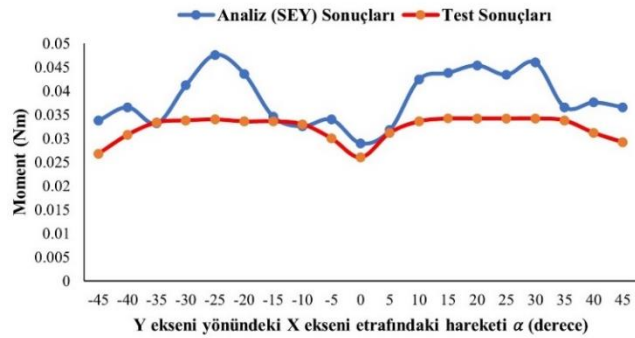
sonuçları ve test sonuçları karşılaştırıldığında %81'e yakın benzerlik olduğu görülmüştür.

6.4 Küresel Motorun Yüklü Çalışma Durumundaki Kuvvet ve Moment Değerlerinin Ölçülmesi

Koordinat sisteminde X eksenini (α) ve Y eksenini (β) etrafında hareketini gerçekleştiren motorun, 0° ile $\pm 45^\circ$ arasındaki moment ve kuvvet değerleri deneysel olarak ölçülmüş ve bu test sonuçları aynı durum için elde edilmiş analiz sonuçları karşılaştırılmış ve Şekil 6.6'da, Şekil 6.7'de, Şekil 6.8'de ve Şekil 6.9'da gösterildiği gibi verilmiştir.



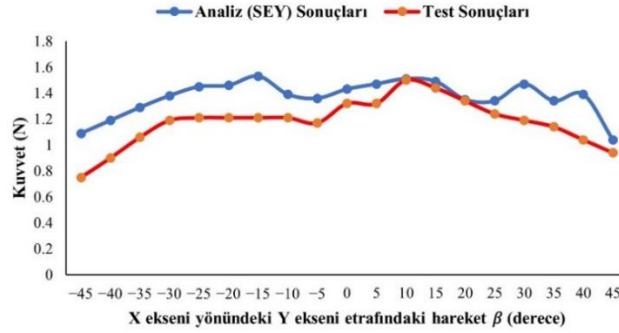
Şekil 6.6 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksenini yöndeki X eksenini etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde kuvvet değerlerinin analiz ve test sonuçları



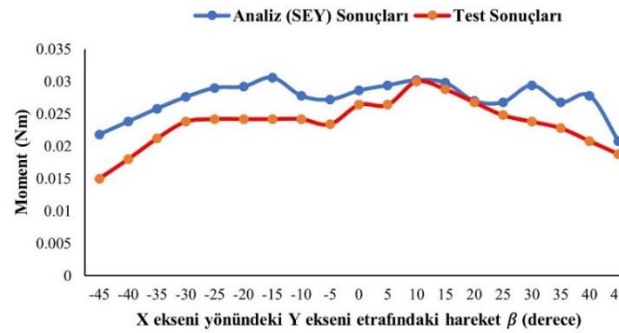
Şekil 6.7 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda Y eksenini yöndeki X eksenini etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açısı değerindeki hareketinde moment değerlerinin analiz ve test sonuçları

Gerçekleştirilen test çalışmaları neticesinde Şekil 6.6'da ve Şekil 6.7'de görüldüğü gibi, motorun Y eksenini yönde X eksenini etrafında $\alpha = 0^\circ$ 'den $\alpha = \pm 45^\circ$ 'ye kadar yüklü durumdaki hareketinde; test sonuçlarında ortalama kuvvet 1.6 N ve

ortalama moment 0.032 Nm olarak elde edilmiştir. Daha önce elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında ise, ortalama kuvvet 1.92 N ve ortalama moment 0.038 Nm olarak elde edilmiştir. Motorun Y eksenine yönündeki X eksenine etrafındaki $\alpha = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde elde edilen ortalama kuvvet ve moment değerleri incelendiğinde; analiz sonuçları ve test sonuçları arasında %83'e yakın benzerlik olduğu elde edilmiştir.



Şekil 6.8 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksenine yönündeki Y eksenine etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde kuvvet değerlerinin analiz ve test sonuçları



Şekil 6.9 Küresel motorun yüklü çalışma durumunda X eksenine yönündeki Y eksenine etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde moment değerlerinin analiz ve test sonuçları

Motorun X eksenine yönündeki Y eksenine etrafında $\beta = 0^\circ$ 'den $\beta = \pm 45^\circ$ 'ye kadar yüklü durumdaki hareketinde, test sonuçlarında Şekil 6.8'den ve Şekil 6.9'dan görüldüğü gibi ortalama kuvvet 1,17 N ve ortalama moment 0,0236 Nm olarak elde edilmiştir. Bu değerler daha önce yapılan simülasyon çalışmasından, ortalama kuvvet 1.36 N ve ortalama moment 0.027 Nm olarak elde edilmiştir. Motorun X eksenine yönündeki Y eksenine etrafındaki $\beta = \pm 45^\circ$ açı değerindeki hareketinde elde edilen ortalama kuvvet ve moment değerleri incelendiğinde; analiz sonuçları ve test sonuçları arasında %86 yakınsaklık olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, robotik, havacılık, savunma, otomotiv ve biyomedikal gibi çok serbestlik dereceli hareket ihtiyacı olan uygulamalar için, 2 serbestlik dereceli hareket kabiliyeti olan bir küresel motor tasarlanmıştır. Tasarlanan küresel motor, 3 blok ve 18 sargılı stator ile 4 kutuplu, yüzey mıknatıslı rotordan oluşmaktadır. Motorun mekanik yapısı ise küresel rulman, küresel yatak ve küresel mafsalları gibi mekanik elemanların kullanılmadığı, rotoru iki hareketli parça ile çevreleyen ve $\pm 45^\circ$ eksenel hareket açısı yapabilen özgün bir yapıda tasarlanmıştır. Bu özgün motor tasarımında amaç, motorun iki eksenli hareketini, literatürde yer alan benzer yapıdaki motorlara göre yüksek kuvvet, yüksek moment ve büyük eksenel hareket açılarında yapabilmesini sağlamaktır. Motor tasarımında ayrıca, motorun boyutu ve güç tüketimi konuları da ele alınmıştır.

Motorun nihai modelini belirleyebilmek için 2 aşamalı bir çalışma yapılmıştır. Birinci aşamada Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak farklı motor modelleri oluşturulmuş ve elektromanyetik analiz ortamında optimizasyon çalışması yapılmıştır. 2. aşamada ise optimizasyon sonucunda elde edilen motor modelinin, üretim kriterleri de dikkate alınarak prototipi üretilmiş ve testleri yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında 6 ve 8 stator kutbu olan 2 motor modeli referans alınmış ve bu referans modellerin rotorlarında gömülü düz, gömülü V-tipi ve yüzey mıknatıslı yapıları kullanılarak farklı tasarımlar oluşturulmuştur. Ayrıca bu tasarımlarda mıknatıs olarak NdFe30, NdFe35 ve SmCo28, stator ile rotor yapılarında ise Steel 1008, M43-24G ve JFE-Steel-50JNE300 malzemeleri kullanılarak, optimizasyon çalışmaları genişletilmiş ve toplamda 54 farklı tasarım için 216 adet elektromanyetik analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Tüm tasarım modelleri için yapılan elektromanyetik analiz çalışmalarında, Ansys Maxwell yazılımı ve SEY kullanılarak manyetik akı yoğunluğu dağılımları, moment ve kuvvet değerleri elde edilmiştir.

Küresel motorun tasarım optimizasyonu çalışmalarında; her bir stator bloğunda 6 sargı olmak üzere toplam 18 sargılı stator yapısı olan, NdFe35 mıknatıslı malzemesinin kullanıldığı, yüzey mıknatıslı rotor yapısı olan ve rotor ile

statorunda M43-24G sac malzemesinin kullanıldığı küresel motor, nihai motor modeli olarak belirlenmiş ve prototip motor üretimi aşamasına geçilmiştir. Elektromanyetik analizlerde en başarılı sonuçları veren bu motor modelinin prototip üretimi öncesinde; üretilebilirlik, malzeme tedariki, mekanik aksamının oluşturulması, üretim süresi ve maliyet gibi üretim kriterleri göz önüne alınmış ve bu defa da üretime yönelik nihai tasarımı oluşturmak için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda, malzeme tedariki, üretim süresi ve üretilebilirlik göz önüne alındığında, simülasyon çalışmalarında elde edilen motor modelinde bazı değişiklikler yapılması gerekmiş ve bu kapsamda bazı malzemelerin muadilleri kullanılmıştır. Yapılan değişiklikler şu şekildedir; NdFe35 mıknatıs yerine SmCo-Arnold Magnetics Recoma 30 20C malzemesi ve rotor ile stator yapılarında M43-24G elektrik sac malzemesi yerine, rotorda Steel-1010 malzemesi, statorda ise NO20-JFE Steel 35JN270 elektrik sac malzemesi kullanılmıştır.

Nihai motor modeli olarak belirlenen; rotorunda NdFe35 mıknatıs malzemesinin kullanıldığı, rotor ile stator yapılarında M43-24G elektriksel çelik malzemesinin kullanıldığı SMKM1 yüzey mıknatıslı motorun daha sonra muadil malzemeler kullanılarak tekrar manyetik akı yoğunluğu dağılımları, kuvvet ve moment değerlerini kapsayan elektromanyetik analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde, statordaki ortalama manyetik akı yoğunluğu değerleri incelendiğinde herhangi bir manyetik doyum probleminin olmadığı görülmüştür. Yine muadil malzemeler kullanılarak yapılan analizlerde, eksenel hareketlerdeki moment değerleri incelendiğinde, ortalama olarak 83.4 mNm daha düşük ve kuvvet değerleri bakımından da 0.49 N daha yüksek değerler elde edilmiştir. Motorun mekanik yapısı ile eksenel hareketleri gerçekleştirebilmesi için kuvvet değerleri, moment değerlerinden daha öncelikli olarak göz önünde bulundurulacağından, muadil malzemeler kullanılarak yapılan analizler sonucunda, daha önceki nihai motor modeli olarak belirlenen SMKM1 yüzey mıknatıslı motor modelinden daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Belirlenen bu malzemelerle motorun prototipi üretilmiş ve testleri yapılmıştır. Daha sonra analiz sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar grafiklerle verilmiştir.

Motorun yüklü ve yüksüz çalışma durumları için elektromanyetik analiz ve test çalışmalarından elde edilen manyetik akı yoğunluğu değerleri incelendiğinde; yüksüz çalışma durumunda, analiz sonuçlarından elde edilen hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğunun, test çalışmasında elde edilen manyetik akı yoğunluğundan %3 daha yüksek olduğu görülmüştür. Motorun yüklü çalışmasında ise, X eksenı etrafında $\alpha=0^\circ$ 'den $\alpha=\pm 45^\circ$ 'ye kadar hareketinde, hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu test çalışmasında 0,4 T olarak elde edilmiştir. Test çalışmasındaki bu değer, analiz sonuçlarından %1 daha düşük olarak elde edilmiştir. Motorun yüklü çalışmasında, Y eksenı etrafında $\beta=0^\circ$ 'den $\beta=\pm 45^\circ$ 'ye kadar hareketinde ise, hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu test sonuçlarında 0,33 T olarak elde edilmiştir. Bu test sonucu, analiz sonuçlarından %8 daha düşük olarak elde edilmiştir. Ayrıca test ve analiz çalışmalarında, motorun yüksüz ve yüklü çalışma koşullarındaki manyetik akı yoğunlukları incelendiğinde manyetik doyum probleminin olmadığı görülmüştür.

Motorun X eksenı etrafındaki hareketinde, analiz ve test sonuçlarından elde edilen kuvvet ve moment değerleri incelendiğinde, test sonuçlarında ortalama kuvvetin 1,6 N ve ortalama momentin 32 mNm olarak ve analiz sonuçlarında ise ortalama kuvvetin 1.9 N ve ortalama momentin 38 mNm olarak elde edildiği görülmüştür. Kuvvet ve moment değerlerinin test sonuçları, analiz sonuçlarına göre yaklaşık %17 daha düşük değerde elde edilmiştir. Motorun Y eksenı etrafındaki hareketinde, analiz ve test sonuçlarından elde edilen kuvvet ve moment değerleri incelendiğinde, test sonuçlarında ortalama kuvvet 1,17 N ve ortalama moment 23,6 mNm olarak elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında, ortalama kuvvet 1.36 N ve ortalama moment ise 27.8 mNm olarak elde edilmiştir. Test çalışmasında kuvvet ve moment değerlerinin, analiz sonuçlarına göre yaklaşık %14 daha düşük olduğu görülmektedir. Moment ile kuvvet arasında doğrusal bir ilişki olduğu için, motorun X ve Y eksenlerindeki hareketinde, test ve analiz sonuçları karşılaştırmasında, bu iki büyüklük için aynı yakınsaklık değerleri elde edilmiştir. Kuvvet ve moment değerleri için analiz ve test çalışmaları arasında ortaya çıkan bu fark, motorun hareketini sağlayan bağlantı noktalarındaki mekanik kuvvetler ve sürtünmeden kaynaklanmaktadır.

Motorun $\pm 45^\circ$ eksenel hareket açısında, X ve Y eksenleri etrafındaki hareketlerinden elde edilen ortalama kuvvet ve moment değerleri incelendiğinde; test çalışmalarında X ve Y eksenleri için ortalama kuvvet değerleri sırasıyla 1.6 N ve 1.17 N ve ortalama moment değerleri de sırasıyla 32 mNm ve 23.6 mNm olarak elde edildiği görülmüştü. Motorun bu hareketinde her iki eksen için elde edilen bu kuvvet ve moment değerlerinin ortalaması alındığında, kuvvet için 1.38 N ve moment için 27.8 mNm değerleri elde edilmiştir. Literatürde mekanik yapılarında eksenel açı değerini kısıtlayan mekanik bileşenler kullanan çok serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip motorlarda, ortalama moment değeri 7.98–19.40 mNm aralığında [39-42] ve ortalama kuvvet değeri de 0.5-1.08 N aralığında [44-48] bulunmuştur. Bu çalışmada tasarlanan prototip motorun ortalama kuvvet ve moment değerleri, bu motorlarla karşılaştırıldığında, bu tez çalışmasında daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Bu tez çalışmasında prototip üretimi gerçekleştirilen motorun mekanik yapısı, literatürde bu motorla benzer çalışma prensibi ve yapısına sahip olanlardan farklı bir yapıda tasarlanmıştır. Literatürde mekanik yapılarında küresel mafsallı, küresel yatak, küresel rulman, yatak kapakları gibi bileşenler kullanılan çok serbestlik dereceli motorların eksenel hareket açılarının $\pm 11^\circ$ ve $\pm 37^\circ$ arasında değiştiği görülmektedir [39-42,44-49], Mekanik yapılarında eksenel açı kabiliyetleri sınırlı mekanik bileşenlerin kullanılması, küresel motorların hareket açılarını sınırlamakta ve bu da kuvvet ve moment değerlerini etkilemektedir. Bu tez çalışmasında bu sebeple, eksenel hareket açısını iyileştirmek için rotoru iki hareketli parça ile çevreleyen yeni bir mekanik yapı tasarlanmış ve bu mekanik yapı yardımıyla motor, $\pm 45^\circ$ eksenel açı yapabilmektedir. Bu açı değeri, literatürdeki sınırlı eksenel açı kabiliyetine sahip mekanik bileşenlerin kullanıldığı motorların $\pm 11^\circ$ - $\pm 37^\circ$ arasında olan hareket açıları ile karşılaştırıldığında, %21 daha başarılı olduğu görülmektedir.

Prototip motorun tasarımında, tasarım kriterlerinden boyut ve güç tüketimi değerleri de dikkate alınmıştır. Statorun dış çapı, yeni mekanik yapıda rotorun kolayca hareket etmesini sağlamak ve $\pm 45^\circ$ gibi yüksek bir eksenel açı değerini elde etmek için 157 mm olarak tasarlanmıştır. Literatürde eksenel hareket açıları $\pm 11^\circ$ ile $\pm 37^\circ$ arasında olan çok eksenli hareket kabiliyetine sahip motorların

[30,35,39-42,45,48] stator dış çaplarının, 28 mm-300 mm aralığında olduğu görülmüştür. Prototip motorun stator dış çapının ise, literatürdeki çalışmalar için verilen bu aralıkta kaldığı görülmektedir. Çalışmada ayrıca motorun güç tüketimi de dikkate alınmıştır. X ve Y eksenleri etrafında, $\pm 45^\circ$ eksenel hareket açısı ile hareket eden motorun güç tüketimi 2.003 W olarak hesaplanmıştır. Prototip küresel motorun güç tüketimi, diğer benzer yapıdaki ve çalışma prensibindeki çok eksenli hareket kabiliyetine sahip motorlarla [41-43] karşılaştırıldığında, daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Motorun stator dış çapı boyutu ve güç tüketimi değerlerinin, literatürde verilen aralık değerlerinde olmasına rağmen, bu tez çalışmasında literatürdeki çalışmalardan daha büyük bir eksenel hareket açısı ve daha yüksek kuvvet ve moment değerlerinin elde edilmesi, çalışmanın başarılı sonuçlarındandır.

Bu çalışma farklı malzemeler ve mekanik yapılar kullanılıp geliştirilerek, motorun eksenel hareket açısı, kuvvet ve moment değerlerinde daha başarılı sonuçlar elde edilebilir. Robotik, havacılık, savunma, otomotiv ve biyomedikal gibi uygulama alanlarında daha geniş kullanım alanları sağlanabilir. Ayrıca bu motorun stator orta bloğundaki sargılar üç serbestlik dereceli hareket kabiliyetine uygun olarak tasarlanmıştır. Böylece, prototipi gerçekleştirilen motorun mekanik yapısı geliştirilerek üç serbestlik dereceli hareket kabiliyetine sahip olması sağlanabilir ve motorun daha çok serbestlik dereceli hareket kabiliyeti gereksinimi olan uygulamalarda ve sistemlerde kullanılması sağlanabilir.

-
- [1] Williams, F.; Laithwaite, E.; Eastham, G.F. "Development of design of spherical induction motor." IEEE Proc. 1959, 3036U, 471–484.
- [2] G. Vachtsevanos, K. Davey and Kok-Meng Lee, "Development of a novel intelligent robotic manipulator," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 7, no. 3, pp. 9-15, June 1987.
- [3] B. Li, Z. Li and G. Li, "Magnetic Field Model for Permanent Magnet Spherical Motor With Double Polyhedron Structure," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 12, pp. 1-5, Dec. 2017.
- [4] R. L. Hollis, S. E. Salcudean and A. P. Allan, "A six-degree-of-freedom magnetically levitated variable compliance fine-motion wrist: design, modeling, and control," in IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 320-332, June 1991.
- [5] S. Salcudean and R. L. Hollis, "A magnetically levitated fine motion wrist: kinematics, dynamics and control," Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, pp. 261-266 vol.1.
- [6] Jiabin Wang, Weiya Wang, G. W. Jewell and D. Howe, "A novel spherical permanent magnet actuator with three degrees-of-freedom," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, no. 4, pp. 2078-2080, July 1998.
- [7] Wang, J., Jewell, G.W., Howe, D., "Analysis, design and control of a novel spherical permanent-magnet actuator," IEE Proceedings- Electric Power Applications, 1998, 145, (1), p. 61-71.
- [8] Öner, Y., "Sabit Mıknatıslı Küresel Motorun Bilgisayar Destekli Üç Boyutlu Manyetik Analizi, Tasarımı ve Uygulaması", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.
- [9] H. Li and T. Li, "End-Effect Magnetic Field Analysis of the Halbach Array Permanent Magnet Spherical Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 4, pp. 1-9, April 2018.
- [10] Kaneko, K. & Yamada, I., Itao, K., "A Spherical DC Servo Motor with Three Degrees of Freedom. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control." 111. 398-402, 1989.
- [11] B. Lu and M. Aoyagi, "Examination of an outer-rotor-type multidegree-of-freedom spherical ultrasonic motor," 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012, pp. 1-5.
- [12] N. Takesue et al., "Position control methods of spherical ultrasonic motor," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, pp. 3061-3066.
- [13] T. Shigeki, S. Shigeru, Zhang Guoqiang, M. Yasutaro and N. Kazuto, "Multi degree of freedom spherical ultrasonic motor," Proceedings of IECON'94- 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 1994, pp. 900-905 vol.2.

- [14] S. Toyama, S. Hatae and M. Nonaka, "Development of multi-degree of freedom spherical ultrasonic motor," Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments, 1991, pp. 55-60 vol.1.
- [15] D. Kang et al., "Method of Current Compensation for Reducing Error of Holding Torque of Permanent-Magnet Spherical Wheel Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 6, pp. 2819-2822, June 2009.
- [16] Z. Li, Q. Chen, F. Yue and Y. Zhang, "Modal Analysis of Electromagnetic Resonance for Multi-Degree-of-Freedom Spherical Motor," 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018, pp. 1847-1852.
- [17] Z. Li, Q. Chen and Q. Wang, "Analysis of Multi-Physics Coupling Field of Multi-Degree-of-Freedom Permanent Magnet Spherical Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 6, pp. 1-5, June 2019.
- [18] K. Davey, G. Vachtsevanos and R. Powers, "The analysis of fields and torques in spherical induction motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 23, no. 1, pp. 273-282, January 1987.
- [19] B. B. Bederson, R. S. Wallace and E. L. Schwartz, "A miniature pan-tilt actuator: the spherical pointing motor," in IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, no. 3, pp. 298-308, June 1994.
- [20] S. Joshi and J. Paik, "Multi-DoF Force Characterization of Soft Actuators," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 4, pp. 3679-3686, Oct. 2019.
- [21] S. Ahmadi, J. S. Moghani and M. Mirsalim, "Simulation and analysis of a novel PM spherical 3-DOF actuator with E-shaped stator and blade-shaped rotor structure," 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2018, pp. 59-64.
- [22] A. Bhatia, M. Kumagai and R. Hollis, "Six-stator spherical induction motor for balancing mobile robots," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 226-231.
- [23] B. Dehez, G. Galary, D. Grenier and B. Raucent, "Development of a spherical induction motor with two degrees of freedom," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 8, pp. 2077-2089, Aug. 2006.
- [24] M. Kumagai and R. L. Hollis, "Development and control of a three DOF spherical induction motor," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, pp. 1528-1533.
- [25] H. Son and K. Lee, "Distributed Multipole Models for Design and Control of PM Actuators and Sensors," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 13, no. 2, pp. 228-238, April 2008.
- [26] H. Son and K. Lee, "Open-Loop Controller Design and Dynamic Characteristics of a Spherical Wheel Motor," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3475-3482, Oct. 2010.
- [27] L. Rossini, O. Chetelat, E. Onillon and Y. Perriard, "Force and Torque Analytical Models of a Reaction Sphere Actuator Based on Spherical Harmonic

- Rotation and Decomposition,” in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 18, no. 3, pp. 1006-1018, June 2013.
- [28] L. Rossini, E. Onillon, O. Chételat, Y. Perriard, “Closed-loop magnetic bearing and angular velocity control of a reaction sphere actuator.” *Mechatronics* 30, 214–224, 2015.
- [29] L. Rossini, S. Mingard, A. Boletis, E. Forzani, E. Onillon and Y. Perriard, “Rotor Design Optimization for a Reaction Sphere Actuator,” in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 3, pp. 1706-1716, May-June 2014.
- [30] Liang Yan, I-Ming Chen, Chee Kian Lim, Guilin Yang, Wei Lin and Kok-Meng Lee, “Design and analysis of a permanent magnet spherical actuator,” 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005, pp. 691-696.
- [31] Liang Yan, I-Ming Chen, Guilin Yang and Kok-Meng Lee, “Analytical and experimental investigation on the magnetic field and torque of a permanent magnet spherical actuator,” in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 11, no. 4, pp. 409-419, Aug. 2006.
- [32] L. Yan, I. Chen, C. K. Lim, G. Yang, W. Lin and K. Lee, “Design and Analysis of a Permanent Magnet Spherical Actuator,” in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 13, no. 2, pp. 239-248, April 2008.
- [33] L. Yan, I.-M. Chen, C.K. Lim, G. Yang, W. Lin, K.-M. Lee, “Hybrid torque modeling of spherical actuators with cylindrical-shaped magnet poles,” (in English) *Mechatronics* 21,1, 85–91, 2011
- [34] L. Yan, I.-M. Chen, C.K. Lim, G. Yang, K.-M. Lee, Design, modeling and experiments of 3-DOF electromagnetic spherical Actuators, (Springer, Reading, MA), 2011.
- [35] L. Gan, Y. Pei and F. Chai, “Tilting Torque Calculation of a Novel Tiered Type Permanent Magnet Spherical Motor,” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 1, pp. 421-431, Jan. 2020.
- [36] S. Cho, J. Lim, Y. J. Oh, G. Jeong, D. Kang and J. Lee, “A Study on Output Characteristics of the Spherical Multi-DOF Motor According to the Number of Phases and Pole Pitch Angles,” in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2018.
- [37] X. Li, S. Bai, W. Chen and J. Liu, “Torque modelling and current optimization of a spherical actuator built as an electro-magnets driven spherical parallel manipulator,” 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2017, pp. 626-631.
- [38] K. Kahlen and R. W. De Doncker, “Current regulators for multi-phase permanent magnet spherical machines,” Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129), 2000, pp. 2011-2016 vol.3.

- [39] A. Heya, K. Hirata, S. Ezaki and T. Ota, "Dynamic Analysis of a New Three-Degree-of-Freedom Actuator for Image Stabilization," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017.
- [40] Heya, A., Hirata, K. "Experimental Verification of Three-Degree-of-Freedom Electromagnetic Actuator for Image Stabilization" *Sensors*, 2020, 20, 2485.
- [41] Liu, C.-S., Lin, Y.-H., Yeh, C.-N. "Analytical Investigation on Torque of Three-Degree-of-Freedom Electromagnetic Actuator for Image Stabilization" *Appl. Sci.*, 2021, 11, 6872.
- [42] Lin, Y.-H.; Liu, C.-S.; Yeh, C.-N. "Design and Simulation of Novel 3-DOF Spherical Voice Coil Motor" *Actuators*, 2021, 10, 155.
- [43] K. Takahara, K. Hirata, N. Niguchi, Y. Nishiura and Y. Sakaidani, "Experimental Evaluation of the Static Characteristics of Multi-Degree-of-Freedom Spherical Actuators," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2017.
- [44] Han, Y.M., Choi, S.B. "Force-feedback control of a spherical haptic device featuring an electrorheological fluid." *Smart Materials and Structures*, 2006, 15, 1438–1446.
- [45] Li, Z. "Magnetic-field computation of a novel 3-DOF deflection-type PM motor with analytical and finite-element methods." *Elektrotehniški Vestn.* 2014, 81, 51–56.
- [46] Li, Z., Zhang, L., Lun, Q., Jin, H., "Optimal Design of Multi-DOF Deflection Type PM Motor by Response Surface Methodology." *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 10. 965-970, 2015.
- [47] Li, Z., Lun, Q-Q., "Analysis of magnetic field and levitation force characteristics for 3-DOF deflection type PM motors," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39:6, 704-712, 2016.
- [48] Li, Z. and Wang, Q., "Levitation Mechanism and Improvements of 3-DOF Deflection Type PM Actuator," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, pp. 1-5, Oct. 2016.
- [49] K. El-Khalafawy and N. H. El-Amary, "Spherical actuator design and operation based on magnetic profile," 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2017, pp. 1-6.
- [50] Lee, K., Sosseh, R.A., & Wei, Z., "Effects of the torque model on the control of a VR spherical motor." *Control Engineering Practice*, 12, 1437-1449, 2002.
- [51] Roth., R. Lee., K. M. "Design optimisation of a three degrees of freedom variable reluctance spherical wrist motor." *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry* 117, 378-388, August 1995.
- [52] K. Lee and X. Wang, "Dynamic Modeling and Control of a Ball-Joint-Like Variable-Reluctance Spherical Motor," 1992 American Control Conference, 1992, pp. 2463-2467.
- [53] Zhi Zhou and Kok-Meng Lee, "Real-time motion control of a multi-degree-of-freedom variable reluctance spherical motor," *Proceedings of IEEE*

International Conference on Robotics and Automation, 1996, pp. 2859-2864 vol.3.

- [54] Li, Z., Yu, X., Xue, Z., Sun, H., “Analysis of Magnetic Field and Torque Features of Improved Permanent Magnet Rotor Deflection Type Three-Degree-of-Freedom Motor.” *Energies*, 2020, 13, 2533.
- [55] U. Y. Gündoğar, S. Z. Partal and Y. Öner, “3D Electromagnetic and Structural Analysis of A Doubly Excited Spherical Motor for Robotic Applications,” 2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), 2020, pp. 1-8.
- [56] Gündoğar, U.Y., “Magnetics, Mechanical Analysis and Implementation of Double Excited Spherical Motor.” Master’s Thesis, University of Pamukkale, Denizli, Turkey, 2015.
- [57] J. Lee, D. Kim, S. Baek, S. Rhyu and B. Kwon, “Newly Structured Double Excited Two-Degree-of-Freedom Motor for Security Camera,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4041-4044, Nov. 2008.
- [58] J. F. P. Fernandes and P. J. C. Branco, “The Shell-Like Spherical Induction Motor for Low-Speed Traction: Electromagnetic Design, Analysis, and Experimental Tests,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 7, pp. 4325-4335, July 2016.
- [59] Yongsu Um and T. Yano, “Characteristic of torque on spherical stepping motor based on hexahedron-octahedron structure,” 2009 International Conference on Mechatronics and Automation, 2009, pp. 170-175.
- [60] Stein, D., Chirikjian G.S., “Experiments in the commutation and motion planning of a spherical stepper motor.” *Proceedings of DETC’00 ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 1–7, Baltimore, MD, USA, September 2000.
- [61] Ansys Maxwell 2021 R2, Ansys, Inc., Canonsburg, PA, USA, 2021.
- [62] Kun Bai and Kok-Meng Lee, *Permanent Magnet Spherical Motors: Model and Field Based Approaches for Design, Sensing and Control*, Springer, 2018.
- [63] U. Y. Gündoğar, S. Zorlu Partal, “Farklı Mıknatıs Yapıları ve Farklı Mıknatıs Malzemeleri Kullanımının Küresel Motorun Tasarımına Etkisi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı. 19, ss. 946-959, Ağu. 2020.
- [64] Diep, B.T., Nguyen, N.D., Tran, T.T., Nguyen, Q.H., “Design and Experimental Validation of a 3-DOF Force Feedback System Featuring Spherical Manipulator and Magnetorheological Actuators.” *Actuators*, 2020, 9, 19.
- [65] Wen, Y.; Li, G.; Wang, Q.; Tang, R.; Liu, Y.; Li, H., “Investigation on the Measurement Method for Output Torque of a Spherical Motor.” *Appl. Sci.*, 2020, 10, 2510.
- [66] Rossini, L., Chételat, O., Onillon, E., Perriard, Y., “Analytical and experimental investigation on the force and torque of a Reaction Sphere for satellite attitude control.” In *Proceedings of the 2011 IEEE/ASME*

International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Budapest, Hungary, 3–7 July 2011; pp. 487–492.

- [67] Omura, M.; Shimono, T.; Fujimoto, Y., “Development of semicircular tubular core-less linear motor and its motion control.” IEEJ Trans. Ind. Appl. 2015, 135, 246–257.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Uluslararası Makaleler

1. Gündoğar, U. Y., & Zorlu Partal, S. (2021). Design, 3D FEM Simulation and Prototyping of a Permanent Magnet Spherical Motor. *Actuators*, 10(11), 305. doi:10.3390/act10110305 (SCI-E)

Ulusal Makaleler

1. Gündoğar, U. Y. & Zorlu Partal, S. (2020). Farklı Mıknatıs Yapıları ve Farklı Mıknatıs Malzemeleri Kullanımının Küresel Motorun Tasarımına Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 946-959. DOI: 10.31590/ejosat.770998 (ULAKBİLİM TR Dizin Dergi)