

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**VURUNTU MOMENTİ AZALTILMIŞ EKSENEL AKILI SÜREKLİ MİKNATISLI
SENKRON MOTOR TASARIMI**

ENGİN AYÇİÇEK

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. NUR BEKİROĞLU**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VURUNTU MOMENTİ AZALTILMIŞ EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI
SENKRON MOTOR TASARIMI

Engin AYÇİÇEK tarafından hazırlanan tez çalışması 7 Şubat 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ece Olcay GÜNEŞ

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nurettin UMURKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Metin AYDIN

Kocaeli Üniversitesi

Bu tez çalışması Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2010-04-02-KAP02 ve 2011-04-02-KAP01 numaralı projeler ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında ve akademik hayatımın her aşamasında benden yardımını hiç bir zaman esirgemeyen, destek ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım, danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Yine tez çalışması süresince kendilerinden büyük destek gördüğüm ve fikirleriyle çalışmalarına değerli katkılarda bulunan hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim ŞENOL'a, ve hocam Sayın Yrd. Doç Dr. Metin AYDIN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca her türlü desteklerinden dolayı çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Selin ÖZÇİRA ve Arş. Gör. Yasemin ÖNER'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında verdikleri katkılardan dolayı Araş. Gör. Mehmet GÜLEÇ ve Mekatronik Müh. Oğuzhan Ocak'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan anneme ve babama, çalışmalarım sırasında bana gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı sevgili eşime ve canım oğluma teşekkürü bir borç bilirim.

Şubat, 2012

Engin AYÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|----------|
| ÖNSÖZ | |
| SİMGE LİSTESİ | viii |
| KISALTIMA LİSTESİ | x |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | xi |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | xiv |
| ÖZET..... | xv |
| ABSTRACT..... | xvii |
| BÖLÜM 1 | |
| GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Literatür Özeti | 2 |
| 1.2 Tezin Amacı | 6 |
| 1.3 Orijinal Katkı..... | 7 |
| BÖLÜM 2 | |
| SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR..... | 8 |
| 2.1 Giriş | 8 |
| 2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sınıflandırılması | 9 |
| 2.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Avantaj ve Dezavantajları | 11 |
| 2.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Kullanım Alanları..... | 13 |
| 2.5 Sürekli Mıknatıs Malzemeler | 15 |
| 2.5.1 Histeresiz Çevrimi ve B-H Eğrileri..... | 17 |
| 2.5.2 Magnetizma ve Sürekli Mıknatıslanma..... | 19 |
| 2.6 Sürekli Mıknatıslı Motorun Matematiksel Modeli..... | 19 |
| 2.6.1 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun dq Eşdeğer Devresi ve Devre Denklemleri..... | 20 |
| 2.6.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun dq Eşdeğer Devresine Göre Elektromagnetik Moment İfadesi | 21 |

BÖLÜM 3

| | |
|---|----|
| EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLAR | 24 |
| 3.1 Giriş | 24 |
| 3.2 Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Motorların Avantaj ve Dezavantajları | 25 |
| 3.3 Sürekli Miknatıslı Eksenel Akılı Motorların Kullanım Alanları..... | 26 |
| 3.4 Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Motorların Genel Yapısı ve Çeşitleri..... | 27 |
| 3.4.1 Tek- Kenar Yapılı Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar | 27 |
| 3.4.2 Stator Dengeli Tek Kenarlı Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar..... | 28 |
| 3.4.3 Rotor Dengeli Tek Kenarlı Eksenel Akılı Makine Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar..... | 29 |
| 3.4.4 Çift Kenar Yapısına Sahip Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar..... | 29 |
| 3.4.5 Çift Stator Oluklu Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar | 30 |
| 3.4.6 Çift Rotor Oluklu Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar | 31 |
| 3.5 Eksenel Akılı Motorlarda Rotor ve Stator Yapıları | 31 |
| 3.6 Tezde Kullanılan TORUS NN Tipi Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar..... | 32 |

BÖLÜM 4

| | |
|--|----|
| SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ ve MODELLENMESİ | 34 |
| 4.1 Sonlu Elemanlar Analizinin Teorisi..... | 35 |
| 4.2 Ritz Yöntemi | 36 |
| 4.3 Sınır Koşulları | 37 |
| 4.4 Poisson Denklemlerinin Elde Edilmesi | 38 |
| 4.5 Kaynak Fonksiyonlarının Girilmesi ve Çözüm | 39 |
| 4.6 Sonlu Elemanlar Analizi ile Vuruntu Momenti Analizi | 40 |
| 4.6.1 Vuruntu Momentinin Teorisi | 40 |
| 4.6.2 Vuruntu Momentinin Azaltılması için Kullanılan Analitik ve Nümerik Yöntemler | 43 |
| 4.7 Maxwell ile Vuruntu Momentinin Analizi | 44 |
| 4.8 Eksenel Akılı Makinenin Modellenmesi ve Maxwell Kullanarak Vuruntu Momenti Tespit Aşamaları..... | 45 |

BÖLÜM 5

| | |
|---|----|
| EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORDA VURUNTU MOMENTİNİ AZALTMAK İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER VE 3D SEA ÇALIŞMALARI | 49 |
| 5.1 Vuruntu Momentinin Kaynağı ve Hesaplanması | 49 |
| 5.2 Geleneksel Vuruntu Momenti Hesabı | 50 |
| 5.2.1 Akı-MMF Metoduna Dayalı Vuruntu Momenti Hesabı | 51 |
| 5.3 Sürekli Miknatıslı Motorlarda Vuruntu Momenti Minimizasyon Yöntemleri | 55 |
| 5.4 Stator Tarafında Uygulanan Teknikler | 55 |
| 5.4.1 Stator Dışlerinde Yardımcı Oluklar Açmak..... | 56 |

| | | |
|---|--|-----|
| 5.4.2 | Farklı Oluk Açıklıkları ya da Oluk Açıklığının Kaydırılması..... | 57 |
| 5.5 | Rotor Tarafında Uygulanan Teknikler | 60 |
| 5.5.1 | Mıknatıs Adımının Değiştirilmesi | 60 |
| 5.5.2 | Bir Rotorun Diğerine Göre Dairesel Olarak Döndürülmesi..... | 67 |
| 5.5.3 | Mıknatıs veya Kutup Kaydırması (Gruplama Tekniği)..... | 69 |
| 5.6 | Rotor Tarafında Uygulanan Tekniklerin Sonuçları | 71 |
| BÖLÜM 6 | | |
| VURUNTU MOMENTİNİ AZALTMAK AMACIYLA KULLANILAN TEKNİKLERİN ORTALAMA MOMENT ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN 3D SEA KULLANARAK ANALİZİ | | |
| | | 73 |
| 6.1 | Fan Tipi Mıknatısların Moment Analizleri..... | 73 |
| 6.2 | Üçgen Kayıklı Tipteki Mıknatıs Yapılarının Moment Analizleri | 77 |
| 6.3 | Oval Kayıklı Tipteki Mıknatıs Yapılarının Moment Analizleri | 80 |
| 6.4 | Rotorun Dairesel Döndürülmesi Tekniğinin Ortalama Momente Etkisi..... | 83 |
| 6.5 | Moment Analizlerinin Sonuçları | 85 |
| BÖLÜM 7 | | |
| EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI DİSK MOTORUN ÜRETİM AŞAMALARI ve 3D SEA SONUÇLARININ DENEYSEL ÇALIŞMA İLE DOĞRULANMASI | | |
| | | 87 |
| 7.1 | Mıknatıs Çizimleri ve Resimleri | 88 |
| 7.2 | Disk Rotorların Çizimleri ve Üretilmesi | 89 |
| 7.3 | Eksenel Akılı Disk Motor Statorunun Çizimleri ve Üretilmesi..... | 90 |
| 7.4 | Motor Gövdesi ve Milin Üretilmesi..... | 92 |
| 7.5 | EASM Motorun Deney Düzenegi | 95 |
| 7.6 | Vuruntu Momentinin Deneysel Yolla Ölçülmesi ve SEA İle Karşılaştırılması | 96 |
| 7.6.1 | Üçgen Kayıklı Rotor Kullanılarak Vuruntu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi | 96 |
| 7.6.2 | Üçgen Kayıklı Yapıda Bir Rotorun Diğerine Göre 4 Derece Kaydırıldığı Durumdaki Vuruntu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi | 97 |
| 7.6.3 | Fan Tipi Yapıda (126 derece mıknatıs adımlı) Vuruntu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi..... | 98 |
| 7.6.4 | Fan Tipi (126 Derece mıknatıs adımlı) Yapıda Bir Rotorun Diğerine Göre 2 Derece Döndürüldüğü Durumdaki Vuruntu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi..... | 99 |
| BÖLÜM 8 | | |
| SONUÇ ve ÖNERİLER..... | | 101 |
| KAYNAKLAR..... | | 105 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | | 110 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|---------------|---|
| A | magnetik vektör potansiyeli |
| B | magnetik akı yoğunluğu |
| B_i | mıknatısın doğal bileşeni |
| BH_{max} | maksimum enerji yoğunluğu |
| B_r | kalıcı akı yoğunluğu |
| B_{sat} | doyma noktasındaki magnetik akı yoğunluğu |
| B_{PM} | mıknatıs akı yoğunluğu |
| $Beta$ | kaykı açısı |
| d, q | rotasyonel sistem |
| F | eksen dönüşümlerinde akı, akım veya gerilim değişkeni |
| F_m | mıknatıs MMF'i |
| g | hava aralığı |
| H | magnetik alan şiddeti |
| H_{cB} | koersif kuvvet |
| H_m | mıknatısın magnetik alan şiddeti |
| H_{sat} | doyma noktasındaki magnetik alan şiddeti |
| \bar{i}_r | rotor akımı uzay vektörü |
| i_s | stator akımı |
| \bar{i}_s | stator akımı uzay vektörü |
| $i_{s\alpha}$ | sabit referans sisteminde akımın α bileşeni |
| $i_{s\beta}$ | sabit referans sisteminde akımın β bileşeni |
| i_{sd} | d eksen akımı |
| i_{sq} | q eksen akımı |
| i_{sx} | stator akı referans sisteminde akımın x bileşeni |
| i_{sy} | stator akı referans sisteminde akımın y bileşeni |
| J | akım yoğunluğu |
| \bar{k} | birim vektörü |
| K_{sk} | kaykı faktörü |
| L | stator uzunluğu |
| l_m | mıknatıs kalınlığı |
| L_s | stator endüktansı |

| | |
|------------------|---|
| L_{sd} | d eksenli stator endüktansı |
| L_{sq} | q eksenli stator endüktansı |
| N_c | oluk sayısı ile kutup sayısının en küçük ortak katı |
| p | çift kutup sayısı |
| R_s | stator faz direnci |
| S_m | magnetizasyon yönüne dik olan mıknatıs alanı |
| t | zaman |
| T_{cog} | vuruntu momenti |
| T_e | elektromagnetik moment |
| T_p | kutup açısı |
| T_m | mıknatıs açısı |
| u_{sd} | d eksenli gerilimi |
| u_{sq} | q eksenli gerilimi |
| v | magnetik direnç |
| x, y | stator akı referans sistemi |
| α, β | stator ortogonal koordinat sistemi |
| α_{sk} | toplam çembersel kaykının oluk adımına oranıdır. |
| μ | magnetik geçirgenlik |
| μ_0 | boşluğun magnetik geçirgenliği |
| W | enerji |
| ω | açısal hız |
| ω_e | elektriksel açısal hız |
| ω_m | Mekaniksel dönme hızı |
| ω_r | rotor açısal hızı |
| ψ_M | rotor magnetik akısı |
| ψ_s | stator magnetik akısı |
| $\bar{\psi}_s$ | stator magnetik akı uzay vektörü |
| $ \psi_s $ | stator magnetik akı genliği |
| ψ_{sd} | d eksenli magnetik akısı |
| ψ_{sq} | q eksenli magnetik akısı |
| $\psi_{s\alpha}$ | α eksenli magnetik akısı |
| $\psi_{s\beta}$ | β eksenli magnetik akısı |
| λ_{rel} | magnetik iletkenlik |
| Φ_r | mıknatıs kalıcı akısı |
| θ_e | elektriksel açı |
| θ | mekaniksel rotor açısı |
| θ_m | rotor pozisyonu |
| Q_s | oluk sayısı |
| δ | yük açısı |
| $2p$ | kutup sayısı |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|--------|----------------------------------|
| AC | Alternatif Akım |
| AFIR | İç Stator Dış Rotorlu EASM |
| Alnico | Alüminyum-Nikel-Kobalt |
| BLDC | Fırçasız Doğru Akım Motoru |
| DC | Doğru Akım |
| EASM | Eksenel Akılı Senkron Motor |
| EMF | Elektromagnetik kuvvet |
| NI | National Instruments |
| NdFeB | Neodmiyum Demir Bor |
| RASM | Radyal Akılı Senkron Motor |
| SMSM | Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor |
| SEA | Sonlu Elemanlar Analizi |
| SM | Sürekli Mıknatıs |
| SmCo | Samaryum Kobalt |
| TORUS | Dış Rotor İç Statorlu EASM |

ŞEKİL LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1 Sürekli mıknatıslı senkron motor türleri [23] | 10 |
| Şekil 2.2 Histeresiz çevrimi | 17 |
| Şekil 2.3 Sürekli mıknatıslı senkron motorun dq eşdeğer devresi | 20 |
| Şekil 2.4 Farklı referans sistemlerinde stator ve rotor magnetik akıları | 21 |
| Şekil 3.1 Temel aksel akılı motor konfigürasyonları | 25 |
| Şekil 3.2 Aksel akılı motorların elektrikli taşıtta kullanımı | 26 |
| Şekil 3.3 Tek-kenarlı aksel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor | 28 |
| Şekil 3.4 Stator dengeli tek kenarlı aksel akılı motor [57] | 28 |
| Şekil 3.5 EASM yapıları (a,b) oluksuz ve oluklu TORUS (c,d) oluksuz ve oluklu AFIR [54] | 29 |
| Şekil 3.6 EASM TORUS tip motorların akı yolları (a) TORUS-NN (b) TORUS-NS [11] ... | 30 |
| Şekil 3.7 Çift statorlu aksel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor [57] | 30 |
| Şekil 3.8 Yüzeye monteli mıknatıslı rotor ve stator | 31 |
| Şekil 3.9 Çeşitli yapılardaki aksel akılı motor yapıları | 32 |
| Şekil 3.10 Referans yapıların vuruğu momenti değişimleri | 33 |
| Şekil 4.1 Vuruğu momentinin dalga formu | 41 |
| Şekil 4.2 Yardımcı diş ve oluğun gösterimi a) yardımcı diş b) yardımcı oluk | 42 |
| Şekil 4.3 TORUS NN tipi makinenin Maxwell 3D kullanılarak modellenmesi | 46 |
| Şekil 4.4 Maxwell programının çözüm ekranı | 46 |
| Şekil 4.5 Vuruğu momenti değerinin adım sayısına bağlı değişimi | 47 |
| Şekil 4.6 Vuruğu momenti tespitinde adım sayısına bağlı eleman sayısının değişimi | 47 |
| Şekil 4.7 EASM motorun (a)SEA modeli (b)3D eleman yapısı (c)mıknatıs eleman yapısı | 48 |
| Şekil 4.8 EASM motorun rotor akı yönü ve stator akı yoğunluğunun değişimi | 48 |
| Şekil 5.1 B-H diagramı ve enerji yoğunluğu eğrisi [65] | 52 |
| Şekil 5.2 Sürekli mıknatısın akı-MMF diagramı [65] | 53 |
| Şekil 5.3 Stator tarafında uygulanan teknikler | 56 |
| Şekil 5.4 Referans yapı ile yardımcı oluk açılmış yapının karşılaştırılması | 56 |
| Şekil 5.5 Farklı oluk açıklıkları ile çizilmiş motor yapıları | 57 |
| Şekil 5.6 Referans yapı ile farklı oluk açıklıklı yapıların karşılaştırılması | 57 |
| Şekil 5.7 Referans yapı ile oluk açıklıkları kaydırılmış yapıların karşılaştırılması | 58 |
| Şekil 5.8 Beş farklı mıknatıs adımında fan tipi mıknatısın vuruğu momenti eğrileri .. | 61 |
| Şekil 5.9 Altı farklı mıknatıs adımında fan tipi mıknatısın vuruğu momenti eğrileri .. | 61 |
| Şekil 5.10 Fan tipi mıknatıs yapıları için vuruğu momenti tepe değerleri | 62 |
| Şekil 5.11 Kayık açısının tanımlanması a) Üçgen kayık b) Oval kayık | 63 |
| Şekil 5.12 Üçgen kayıklı tipteki mıknatıs için vuruğu momenti eğrileri | 64 |

| | | |
|------------|---|----|
| Şekil 5.13 | Üçgen kaykılı mıknatıs yapılarının vuruşu momenti tepe değerleri | 65 |
| Şekil 5.14 | Oval kaykılı mıknatıs yapılarının vuruşu momenti eğrileri | 65 |
| Şekil 5.15 | Oval kaykılı mıknatıs yapılarının vuruşu momenti tepe değerleri..... | 66 |
| Şekil 5.16 | Fan tipli mıknatıs yapılarının rotor döndürme tekniği sonuçları | 67 |
| Şekil 5.17 | Üçgen kaykılı mıknatıs yapılarının rotor döndürme tekniği sonuçları..... | 68 |
| Şekil 5.18 | Oval kaykılı mıknatıs yapılarının rotor döndürme tekniği sonuçları..... | 68 |
| Şekil 5.19 | EASM motorlarda mıknatıs kaydırma tekniği | 69 |
| Şekil 5.20 | Fan tipi 126 derece mıknatıs adımlı yapının ikili gruplama grafikleri..... | 69 |
| Şekil 5.21 | Üçgen kaykılı 156 derece mıknatıs adımlı yapının ikili gruplama grafikleri.. | 70 |
| Şekil 5.22 | Fan tipi 126 derece mıknatıs adımlı yapının dörtlü gruplama grafikleri | 70 |
| Şekil 5.23 | Üçgen kaykılı 156 derece mıknatıs adımlı yapının dörtlü gruplama grafikleri | 71 |
| Şekil 6.1 | Referans motor yapısının moment analiz grafiği..... | 74 |
| Şekil 6.2 | Fan tipi 126 derecelik mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği | 74 |
| Şekil 6.3 | Fan tipi 122 derecelik mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği | 75 |
| Şekil 6.4 | Fan tipi 128 derecelik mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği | 75 |
| Şekil 6.5 | Fan tipi yapıların moment grafikleri | 76 |
| Şekil 6.6 | Fan tipi yapıların ortalama moment değerlerinin karşılaştırılması | 77 |
| Şekil 6.7 | Fan tipi yapıların moment dalgalanmalarının karşılaştırılması..... | 77 |
| Şekil 6.8 | Üçgen kaykılı 156 derece mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği..... | 78 |
| Şekil 6.9 | Üçgen kaykılı 160 derece mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği..... | 78 |
| Şekil 6.10 | Üçgen kaykılı 162 derece mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği..... | 79 |
| Şekil 6.11 | Üçgen kaykılı yapıların moment grafikleri | 79 |
| Şekil 6.12 | Üçgen kaykılı mıknatıs yapıların moment değerlerinin karşılaştırılması..... | 80 |
| Şekil 6.13 | Üçgen kaykılı mıknatıs yapılarının moment dalgalanmasının karşılaştırılması | 80 |
| Şekil 6.14 | Oval kaykılı 137 derece mıknatıs adımdaki yapının moment analiz grafiği | 81 |
| Şekil 6.15 | Oval kaykılı 139 derece mıknatıs adımdaki yapının moment analiz grafiği .. | 81 |
| Şekil 6.16 | Oval kaykılı yapıların moment grafikleri..... | 82 |
| Şekil 6.17 | Oval kaykılı mıknatıs yapıların moment değerlerinin karşılaştırılması..... | 82 |
| Şekil 6.18 | Oval kaykılı mıknatıs yapılarının moment dalgalanmalarının karşılaştırılması | 83 |
| Şekil 6.19 | 126 derece mıknatıs adımlı fan yapıdaki mıknatıslar için rotor kaydırma moment grafikleri | 84 |
| Şekil 6.20 | 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaykılı yapıdaki mıknatıslar için rotor kaydırma moment grafikleri | 84 |
| Şekil 6.21 | Kullanılan tekniklerin optimum moment değerlerinin karşılaştırılması..... | 85 |
| Şekil 6.22 | Kullanılan tekniklerin optimum moment dalgalanmalarının karşılaştırılması | 86 |
| Şekil 7.1 | Fan tipi 140 derece mıknatıs..... | 88 |
| Şekil 7.2 | Fan tipi 126 derece mıknatıs..... | 88 |
| Şekil 7.3 | Üçgen kaykılı 156 derece mıknatıs | 88 |
| Şekil 7.4 | EASM motorun a) hareketli disk b) rotor çizimleri | 89 |
| Şekil 7.5 | EASM motorun a) Özel tasarım rotor disk b) rotorun döndürme işlemleri..... | 89 |
| Şekil 7.6 | EASM disk motorun stator çizimleri | 90 |
| Şekil 7.7 | EASM disk motor statorunun üretim aşamaları | 90 |
| Şekil 7.8 | EASM motorun sargı düzeni | 91 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Şekil 7.9 | EASM motorun sargı düzeni detayları | 91 |
| Şekil 7.10 | Sargı bağlantı terminali..... | 92 |
| Şekil 7.11 | EASM disk motorun gövdesinin resmi..... | 92 |
| Şekil 7.12 | EASM disk motor milinin resmi | 92 |
| Şekil 7.13 | EASM disk motorun detaylı çizimi | 93 |
| Şekil 7.14 | Rotor yapıları a) 126 derece fan b) 156 derece üçgen c) 140 derece fan | 94 |
| Şekil 7.15 | EASM motorun rotor montajı aşamaları a) Rotor montajı yapılmamış motorun resmi b) Rotor montajının yapılma işlemi | 94 |
| Şekil 7.16 | Açık oluk yapılı EASM motor..... | 94 |
| Şekil 7.17 | Vuruntu momenti deney seti ve ölçüm sisteminin blok diyagramı | 95 |
| Şekil 7.18 | EASM motorun deney düzeneği | 96 |
| Şekil 7.19 | Üçgen kaykılı (156 derece mıknatıs adımlı) yapının deneysel çalışmasının vuruntu momenti -zaman grafiği | 97 |
| Şekil 7.20 | Üçgen kaykılı (156 derece mıknatıs adımlı) yapının SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruntu momenti grafiği | 97 |
| Şekil 7.21 | Üçgen kaykılı (156 derece mıknatıs adımlı) yapıda rotor döndürme tekniği (4 derece) ile yapılan deneysel çalışmanın vuruntu momenti-zaman grafiği.. | 98 |
| Şekil 7.22 | Üçgen kaykılı (156 derece mıknatıs adımlı) yapıda rotor döndürme tekniğinde SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruntu momenti grafiği karşılaştırması | 98 |
| Şekil 7.23 | Fan tipli (126 derece mıknatıs adımlı) yapının deneysel çalışmasının vuruntu-zaman grafiği..... | 99 |
| Şekil 7.24 | Fan tipli (126 derece mıknatıs adımlı) yapının SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruntu momenti grafiği karşılaştırılması..... | 99 |
| Şekil 7.25 | Fan tipli (126 derece mıknatıs adımlı) yapıda rotor döndürme tekniği (2 derece) ile yapılan deneysel çalışmanın vuruntu momenti-zaman grafiği.. | 100 |
| Şekil 7.26 | Fan tipli (126 derece mıknatıs adımlı) yapıda rotor döndürme tekniğinde SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruntu momenti grafiği karşılaştırması | 100 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 3.1 EASM Referans Motorun Parametreleri..... | 33 |
| Çizelge 4.1 Kullanılan mıknatıs yapısının datası..... | 45 |
| Çizelge 5.1 Stator tarafında uygulanan tekniklerin referans ile karşılaştırılması | 59 |
| Çizelge 5.2 Fan tipi mıknatıs yapılarının vurutu momenti değerlerinin referans yapı ile kıyaslanması | 62 |
| Çizelge 5.3 Üçgen kaykılı tipteki mıknatıs yapıların vurutu momenti değerlerinin referans motorla kıyaslanması..... | 64 |
| Çizelge 5.4 Oval tip mıknatıs yapıların vurutu momenti değerlerinin referans motorla kıyaslanması | 66 |
| Çizelge 6.1 Fan 126 derece mıknatıs adımlı yapıdaki rotor kaydırma sonuçları..... | 83 |
| Çizelge 6.2 Üçgen kaykılı 156 derece mıknatıs adımlı yapıdaki rotor kaydırma sonuçları | 84 |
| Çizelge 7.1 Laboratuar ortamında vurutu momentleri incelenecek rotor yapıları | 87 |

VURUNTU MOMENTİ AZALTILMIŞ EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

Engin AYÇİÇEK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU

Sürekli mıknatıslı motorların, uyarım akımının mıknatıslar tarafından sağlanması nedeniyle verimlerinin yüksek oluşu, bu motorlara olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu sebeple özellikle son yıllarda sürekli mıknatıslı senkron motorların çeşitli tipleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Sürekli mıknatıslı motorlarda Radyal Akılı ve Eksenel Akılı olmak üzere iki temel yapı mevcuttur.

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlar, yapılarından kaynaklanan avantajlarından dolayı, elektrik motorları arasında oldukça dikkat çekicidir ve üzerine son zamanlarda artan oranda çalışmalar yapılan önemli bir konu haline gelmiştir. Ancak bu tip motorlarda, moment dalgalanmasının önemli nedenlerinden biri olan ve motorun doğal yapısından kaynaklanan vuruş momenti, birçok özel uygulama için kritik sorun oluşturmaktadır.

Literatür incelendiğinde, radyal akılı sürekli mıknatıslı motorlarda vuruş momentini azaltmak için, stator oluklarına ya da mıknatıslara kayk vermesi, mıknatıslara özel şekiller verilmesi, yardımcı olukların ya da dişlerin kullanılması, mıknatıs kutbunun optimizasyonu gibi birçok tekniğin uygulandığı görülmektedir. Bu tekniklerin bazıları doğrudan eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlara uygulanabilir. Ancak özellikle bu motorlarda stator tarafında uygulanan tekniklerin, maliyet açısından olumsuz yönleri bulunmaktadır. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlarda maliyeti arttırmayacak ve

vuruntu momentini istenilen seviyelere indirecek tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında vuruntu momentini azaltmak üzere rotor tarafında düşük maliyetli teknikler önerilmiş, bu tekniklerin vuruntu momenti ve moment dalgalanmasına etkileri, 3D sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Tez çalışmasında, vuruntu momentini en aza indiren iki farklı rotor yapısı kullanılarak prototip motor üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca vuruntu momentini ölçmek için özel olarak kurulan deney düzeneği ile üretilen motorun testleri yapılmış ve elde edilen sonuçların 3D SEA değerleri ile karşılaştırmaları yapılarak önerilen tekniklerin etkinlikleri deneysel yol ile doğrulanmıştır. Üretilen prototip ile tasarlanan rotor yapılarının vuruntu momenti değerlerinin uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sürekli Mıknatıs, Eksenel Akılı Motorlar, Vuruntu Momenti, Optimizasyon

**DESIGN of AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR
WITH REDUCED COGGING TORQUE**

Engin AYÇİÇEK

Department of Electrical Engineering
PhD. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Nur BEKİROĞLU

High yield of permanent magnet motors, made possible via the supply of excitation current by magnets, makes them highly popular. Consequently, a large number of studies have been carried out on various types of permanent magnet synchronous motors. Radial and axial flux are two basic structures in permanent magnet motors.

Because of their structural advantages, axial flux permanent magnet motors are highly remarkable and nowadays are subject to many studies. However, cogging torque caused by the natural structure of the motor and an important reason of torque ripple presents a critical problem for a number of specific applications.

A literature review reveals that a wide array of techniques, such as skewing magnets or stator slots, shaping magnets specifically, using commutating slots or teeth or optimization of magnet poles are applied in order to reduce cogging torque in radial flux permanent magnet motors. Some of these techniques can be applied for axial flux permanent motors. However, techniques applied on stator dramatically increase the costs. Techniques that do not cause an increase in costs and that reduce cogging torque are hence needed.

This present thesis suggests low cost techniques for rotor side in order to reduce cogging torque and the effects of these techniques on cogging torque and torque ripple are analyzed separately by 3D finite elements method. Two different rotor structures that minimize cogging torque are used to construct a motor prototype. Suggested techniques are verified experimentally by comparing 3D SEA values with

test results obtained from constructed motor. It is confirmed that constructed prototype and designed rotor structure cogging torque values are similar.

Key Words: Permanent Magnet, Axial Flux Motors, Cogging Torque, Optimization

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlar uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir model olmasına rağmen imalat zorlukları ve yüksek maliyetleri nedeniyle bu motorların uygulama alanları günümüze kadar sınırlı kalmıştır.

Malzeme alanındaki araştırmalarda özellikle 1980'lerden bu yana önemli gelişmeler olmuştur. Bunlardan en önemlisi nadir toprak elementi mıknatısların gelişmesi ve elektrik makinelerinde yaygın olarak kullanılır olmasıdır.

Uyartım elemanı olarak sürekli mıknatısların kullanımı, özellikle doğru akım makineleri ile senkron makineler için oldukça elverişlidir. Sürekli mıknatıs kullanılmasıyla bu makinelerde ayrı bir uyartım devresine gerek kalmamıştır. Bunun yanında özellikle yüksek enerjili sürekli mıknatısların tercih edilmesi durumunda geleneksel makinelere göre daha yüksek güç ve moment yoğunluğu elde edilebilmektedir.

Yapılan literatür taramasında ülkemizde eksenel akılı motorlar konusunda yeterli bir kuramsal çalışma ve üretimin olmadığı, ilgili yayınların birkaç tanesi hariç neredeyse tamamının yabancı olduğu görülmüştür.

İşte bu gerekçe ile eksenel akılı makinelerin genel bir incelemesi yapıp tasarımları üzerine yeni bir yaklaşım getirilmek amaçlanmıştır. Burada mıknatıslar konusunda son gelişmelerin ortaya konmasına, eksenel akılı modellerin tasarım ayrıntılarının incelenmesine, gelişen sonlu eleman yazılımlarının bu makineler üzerinde denenmesine ve bu türden motorların yapısından kaynaklanan ve motorun performansına olumsuz yönde etki eden vuru mu momentinin azaltılmasına çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında rotor ve stator yapısındaki değişikliklerin, vuru mu momenti ve moment dalgalanmasına etkisi de incelenmiştir.

Giriş bölümünde konu ile ilgili gerekçe ve amaçlar özetlenmiş, konu yüzeysel olarak açıklanmış ve literatür taraması sunulmuştur.

İkinci bölümde, sürekli mıknatıs teknolojisi ve sürekli mıknatıslı motorların yapıları ve kullanım alanları ile ilgili bilgilendirme yapılmıştır.

Üçüncü bölümde, eksenel akılı motorların yapısı, avantaj/dezavantajları ve çeşitleri hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, sürekli mıknatıslı senkron motorun sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi ve modellenmesiyle birlikte vuru mu momentinin azaltılması için kullanılan analitik ve nümerik yöntemler aktarılmıştır. Ayrıca bu bölümde eksenel akılı makinenin modellenmesi ve vuru mu momenti tespit aşamaları detaylı olarak verilmiştir.

Beşinci bölümde, eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlar için vuru mu momentinin kaynağı ve bu momenti azaltmak için kullanılan yöntemler ile sonuçları verilmiştir. Vuru mu momentini azaltmada kullanılan tekniklerin birbirlerine göre avantajları da bu bölümde tartışılmıştır.

Altıncı bölümde, vuru mu momentini azaltmak için bulunan optimum tekniklerin ortalama moment üzerine etkileri detaylı incelenmiş ve tekniklerin etkinliği karşılaştırılarak sunulmuştur.

Yedinci bölümde, eksenel akılı sürekli mıknatıslı disk motorun prototip üretim aşamaları verilmiştir. Bu bölümde mıknatıs yapıları, rotor ve stator çizimleri ile üretim aşamaları ve sargı yapıları anlatılmıştır. Üretilen prototip motor ile önerilen tekniklerin deneysel olarak verilerinin alınması ve analiz sonuçlarının karşılaştırılmalarına yer verilmiştir.

Sekizinci bölüm; tartışma, sonuç ve gelecekteki bilimsel çalışmalar için önerilerden oluşmuştur.

1.1 Literatür Özeti

İlk eksenel akılı makine 1831 yılında M. Faraday tarafından sunulmuş ve Faraday'ın disk makinesi olarak adlandırılmıştır. Ancak bu makine uzun bir süre yapısındaki karışıklık nedeniyle kullanılmamıştır. Bu makinelerin uzun süre rafa kaldırılmalarına neden olan etkenleri; stator ve rotor diskleri arasında güçlü bir magnetik çekim, oluk yapımı ve

lamine çekirdek üretimi gibi fabrikasyon güçlükleri, laminasyon çekirdeğin yapımının pahalı oluşu ve düzgün bir hava aralığı sağlamanın güçlüğü olarak sıralayabiliriz.

Campbell [1]'de verilen çalışmasında, eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinenin prensiplerini vermiş ve motoru fan sürücüsü olarak sunmuştur. Faraday'ın diski olarak adlandırılan eksenel akılı makinenin, özellikle sürekli mıknatıslardaki gelişmelere rağmen sınırlı olarak kullanıldığı belirtilmiştir.

Campbell vd. [2]'de verilen çalışmada, maksimum güç yoğunluğu için bilgisayar yazılımı gerçekleştirmiştir. Ayrıca eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineler için geniş çaplı yeni uygulama alanları aktarılmıştır.

Spooner ve Chalmers [3] "TORUS" olarak adlandırılan oluksuz, eksenel akılı senkron makineyi tasarlamışlardır.

D'Angelo vd. [4] 3D sonlu elemanlar çözümlemesini bu makineler için sunmuştur ve detaylarını aktarmıştır.

Özellikle son yıllarda eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinelerin performanslarının iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Caricchi vd. [5] yaptıkları çalışma ile çok bölümlü, su soğutmalı ve nüvesiz statora sahip bir eksenel akılı motor tasarlamışlardır. Motorda, rotorun karşılıklı kutupları; N ve S olarak konumlandırılmış ve bu motorda magnetik akı yolu, statoru eksenel olarak geçip devresini rotor diski üzerinden tamamlamıştır. Böylece stator nüvesiz yapılarak demir kayıpları azaltılmıştır.

Zhilichev [6] çalışmasında, üç boyutlu çözümsel modeli bu makineler için geliştirmiştir. 2D ve 3D çözümlemesi arasında karşılaştırma yapmış ve hassas sonuçlar elde etmiştir.

Profumo vd. [7] yumuşak magnetik malzemedan yaptıkları eksenel akılı gömülü sürekli mıknatıslı motorla magnetik relüktansı azaltmışlardır. Ayrıca mıknatısların gömülü olması ile de daha kuvvetli bir rotor yapısı sağlanmıştır. Bu yeni tasarım magnetik relüktansı küçülterek daha fazla alan zayıflatma imkanı sağlamıştır.

Muljadi vd. [8] rüzgar türbin uygulamaları için toroidal sargılı eksenel akılı sürekli mıknatıslı generatör tasarlamışlardır. Bu generatör doğrudan sürmeli "direct-drive" olarak yapılmıştır.

Parviainen vd. [9] aksel akılı iç rotora sahip sürekli mıknatıslı senkron motor önermişlerdir. Önerdikleri tasarımda mıknatısların şeklini değiştirerek ters elektromotor kuvvetin daha sinüzoidal olmasını sağlamaya çalışmışlar ve böylece vuru momentini de azaltmayı başarmışlardır. Bununla birlikte bu yöntemin dezavantajı mıknatıs hacmindeki azalmanın sebep olduğu moment düşmesidir.

Aydın vd. [10] oluklu ve oluksuz statorlu torus tip aksel akılı yüzey montajlı sürekli mıknatıslı disk makinelerin tasarım ve elektromagnetik alan çözümlemesini yapmışlardır.

Aydın vd. [11] önerdikleri yüzey yerleştirmeli sürekli mıknatıslı aksel akılı motor yapısında çift rotor kullanılmış ve rotor yapısı mıknatıslardan ve yumuşak demir malzemedan oluşmuştur. Statoru ise oluklu bir yapıda olmakla beraber statorun tam orta noktasında bir dc sargı mevcuttur. Bu sargı sayesinde bir magnetik alan üretilmekte ve rotordaki yumuşak demir malzemeye magnetik özellik kazandırılmaktadır. Bu sayede istenilirse pozitif katkı sağlayacak şekilde magnetik alan arttırılmakta, istenilirse de negatif yönde magnetik alan azaltılabilmektedir. Yapılmış olan bu çalışmada, demagnetizasyon tehlikesi olmaksızın ve motora d aksel akımı verilmeksizin magnetik alan zayıflatılması mümkün olmaktadır.

Yang vd. [12] elektrikli araçlar için aksel akılı sürekli mıknatıslı motorun tasarımını ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Alınan en önemli sonuç moment dalgalanmalarının tasarladıkları 4 fazlı motorda 3 fazlı motora göre %18,9 dan %2,7'ye inmiş olmasıdır.

Muljadi ve Green [13] vuru momentinin makinenin performansını etkilediğini ve gürültü ile mekanik titreşime neden olduğunu belirtmiştir. Vuru momentini azaltmak için hava aralığı, kutup genişliği ve asimetri düzenlemesi yöntemlerini denemiş ve stator dizinin eğimi veya mıknatıs kutbunun eğimi ile vuru momentinin azaltılabileceğini ortaya koymuştur.

Gieras, J. ve Gieras I. [14] tasarladıkları nüvesiz tip aksel akılı motorun performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Tasarımda kullandıkları Halback mıknatıs dizilimi sayesinde magnetik akının tepe değeri yükselmiştir.

Mendrela ve Jagieła [15] önerdikleri çıkıntı kutuplu aksel akılı bir fazlı motorda ilk kalkış momentinin yüksek olması için mıknatıs dizilimini asimetric olarak

gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı yapılan bu motor su pompası olarak kullanılmıştır. Ayrıca yüksek momente sahip olması, küçük yapısı ve düşük fiyatı ile de önemli uygulama alanlarında kullanılabilirliği açıklanmıştır.

Tapia vd. [16] yaptıkları çalışmada rotor yapısında mıknatıs ve yumuşak demir malzeme kullanarak alan zayıflatma imkanı sağlamışlardır. Rotorun iç yarıçapa yakın olan kısımları yumuşak demir malzemedен yapılmıştır. Üst kısma ise mıknatıs konulmuştur. Böylece rotorun üst kısmının relüktansı yükseltilmiş, alt kısmının relüktansı azaltılmıştır. Alan zayıflatma tekniği olarak bu çalışmada d eksen akımı kontrol edilmiş, önerilen tasarımla da mıknatısların demagnetizasyon riski azaltılmıştır.

Locment vd. [17] yedi fazlı eksenel akılı bir motor geliştirmişlerdir. Bu motorda, yumuşak magnetik malzeme kullanmışlar ve vuruğu momentini önlemek için iki rotorun birbirine göre kaydırılması tekniğini denemişlerdir. Sonuç olarak 3 fazlı motorlara göre daha iyi performans elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Aydın vd. [18] yaptıkları çalışmada alan zayıflatması sağlayarak moment kontrolü elde etmişler ve demagnetizasyon riskini sıfıra indirmişlerdir. Yumuşak demir ve dc sargı kullanılarak d -eksen akımının kontrolüne ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilmiştir.

Lindh vd. [19] yaptıkları çalışmada hidroelektrik santrallerde kullanıldığında şebekeye doğrudan bağlanan sürekli mıknatıslı generatörlerde tork gereksiniminin kalkış akımının üst limitine göre ayarlanmasını ortaya koymuşlardır.

Aleksashkin ve Mikkola [20] yaptıkları çalışmada sabit mıknatıslı generatörlerin mekanik problemlerinin çözümü için sonlu elemanlar metodunun uygulanmasının avantajlarını ortaya koymuşlardır.

Bu motor üzerine tasarımsal olarak yapılan çalışmaların haricinde kontrolü ile ilgili de çalışmaların özellikle son zamanlarda oldukça fazla yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda ana hedef elektrikli araçların viraj kontrolü ve kayma kontrolü gibi konulardır. Bu motorların özellikle elektrikli araçlarda kullanılmalarının ana nedeni, düşük hızlarda yüksek moment elde edilebilmesidir.

Lidozzi vd [21] eksenel akılı motor kontrolünde kullanılan lineer kontrol yöntemlerine alternatif olarak nonlineer kontrol yöntemi önermişlerdir. Önerdikleri yöntem vektör

kontrollü sürekli mıknatıslı motorun yüksek dinamik kontrolüne dayanmaktadır. Böylelikle lineer bölge dışında da motorun kontrolü gerçekleştirilebilmektedir.

Hredzak ve Gair [22] tasarladıkları vektör kontrolörü ile elektrikli araçta kullanılan aksel akı motorun yol şartlarından dolayı meydana gelen moment dalgalanmalarını gidermişlerdir. Bunun için durum uzay gözlemleyicisinden aldıkları akı değişimini kullanarak giriş akımını düzenlemişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Uyartım elemanı olarak sürekli mıknatısların kullanımı özellikle doğru akım makineleri ile senkron makineler için oldukça elverişlidir. Böylece ayrı bir uyartım devresine gerek kalmamıştır. Bunun yanında özellikle yüksek enerjili sürekli mıknatısların tercih edilmesi durumunda geleneksel olan makinelere göre daha yüksek güç ve tork yoğunluğu elde edilebilmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda üç ana tork bileşeni mevcuttur. Bunlar; rotor alanı ve stator akımlarının etkileşimiyle ortaya çıkan ortak moment, rotor yapısına bağlı olan relüktans momenti ve sürekli mıknatıslar ile oluklardan kaynaklanan vuruş momentidir. Bu moment bileşenlerinden vuruş momentinin ortalama momente bir katkısı olmadığı gibi özellikle düşük hızlarda, hız dalgalanmalarına ve titreşime neden olmaktadır.

İşte bu gerekçe ile bu tezde aksel akı makinelerin genel bir incelemesi yapıp, tasarımları üzerine yeni bir yaklaşım getirilmek amaçlanmıştır. Burada mıknatıslar konusunda son gelişmelerin ortaya konmasına, aksel akı modellerin tasarım ayrıntılarının incelenmesine, gelişen sonlu eleman yazılımlarının bu makineler üzerinde denenmesine ve bu türden motorların yapısından kaynaklanan ve motorun performansına olumsuz yönde etki eden vuruş momentinin azaltılmasına çalışılmıştır.

Bu hedef doğrultusunda motor dinamiklerinin artırılması için vuruş momentinin azaltılmasını sağlayacak ve dolayısıyla titreşimi azaltmış, tork dalgalanması en aza indirilmiş yapının üretilmesi ve test edilip sonuçların doğrulanması amaçlanmıştır.

Bu amaca ilaveten; yapılan literatür taramasında ülkemizde bu konuda yeterli çalışma ve üretimin olmadığı, ilgili yayınların neredeyse tamamının yabancı olduğu ve bu tür

motorun birçok avantajlarına rağmen sanayide yeterli ilgiyi bulamadığı görülmüştür. Çalışmamız sonucunda bu tür motorların ülkemizde tanınması, sanayimizde kullanılması ve ülkemiz bilimsel literatürüne katkı yapması amaçlanmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlar uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir model olmasına rağmen imalat zorlukları ve düşük güç yoğunlukları nedeniyle uygulama alanları günümüze kadar sınırlı kalmıştır.

İşte bu gerekçe ile bu tez çalışmasında eksenel akılı motorların genel bir incelemesi yapıp tasarımları üzerine yeni bir yaklaşım getirilmiştir. Üzerine çalışılan ve üretimi yapılarak simülasyon sonuçları ile test verilerinin doğrulandığı motor yapısı ile vuru mu momenti bileşeni, endüstriyel uygulamalar için kritik değer olan % 2-5 sınırına indirilmiştir. Bu işlem yapılırken kullanılan tekniklerin ortalama momente etkileri incelendiğinde çok küçük değerlerde düşüş sağlandığı gözlemlenmiş ve dolayısıyla motor performansından ödün verilmediği görülmüştür.

Ayrıca tez kapsamında tasarlanan, üretilen ve kontrol edilen motor; Türkiye'nin açık oluk yapısı kullanılan ve üretimi yapılan ilk disk motoru olma özelliğini taşımaktadır. Laboratuvar çalışmaları ve elde edilen sonuçlar sayesinde Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Disk motorlarda gelecekte yapılacak çalışmalar için kapsamlı bir alt yapı sunulmuştur.

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR

2.1 Giriş

1950'li yıllarda yüksek enerji yoğunluklu sürekli mıknatısların yaygın olarak kullanılmaya başlanması ile sürekli mıknatıs uyarımalı makinelerin gelişmesinin önü açılmıştır. Sürekli mıknatısların kullanılmasıyla, uyarım için harici bir kaynağa ihtiyacın ortadan kalkması, daha kompakt makinelerin üretilmesini ve gelişmesini sağlamıştır. Sürekli mıknatıslı senkron makine, geleneksel senkron makinenin rotor sargıları yerine mıknatısların yerleştirildiği ve dolayısıyla sabit bir uyarma akımı ile uyarılan bir motor türü olarak görülebilir. Nitekim, sürekli mıknatıslı senkron makineye sabit frekanslı sinüzoidal besleme uygulanması durumunda geleneksel senkron makineye oldukça benzer davranış gösterir. SMSM rotorunda sargı bulunmaması, geleneksel senkron makinedeki uyarım kayıplarını ortadan kaldırır ve bu sayede makinenin soğutulması da kolaylaşır.

Mıknatısların kullanılması, çalışma prensibi ve tasarım açısından senkron makineler için çok elverişlidir. Rotoru sargılı senkron motora göre dinamik performansı daha da artmış olur. Senkron motorların statorunda indüksiyon motordaki gibi üç fazlı sargı bulunur. Rotorda sargı yerine sürekli mıknatısın kullanılmasıyla fırça ve kollektörden kaynaklanan sakıncalar da giderilmiş olur. Bunun yanı sıra, uyarma kayıpları ortadan kalktığı için termik sınırlar genişlemekte ve aynı hacimli bir makineden daha büyük güçler alınabilmektedir. Rotorda SmCo veya NdFeB gibi yüksek enerjili sürekli mıknatıs kullanılması, hava aralığı indüksiyonunu sargılı makinelerden daha yüksek değerlerde tutar ve rotor sargılarında meydana gelen bakır kayıplarını ortadan kaldırarak verimin

aynı güçteki senkron makineden daha yüksek olmasını sağlar. Ayrıca motor boyutları da oldukça küçülür [23],[24].

2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sınıflandırılması

Sürekli mıknatıslı alternatif akım motorlarında, mıknatıslar rotor içerisine veya rotor yüzeyine yerleştirilirler. Bu motorlar, kollektör ve fırça bulunmadığından dolayı çok basit yapıdadır ve bu sebeple sorunsuz kabul edilmektedir.

Sürekli mıknatıslı alternatif akım motorları iki grupta incelenebilir. Bunlardan ilkinde hava aralığı alan şiddeti trapezoidal, diğerinde sinüzoidaldir. Trapezoidal sürekli mıknatıslı alternatif akım motorları fırçasız doğru akım (BLDC) motoru, konvansiyonel senkron makinelerle olan ilişkisi sebebiyle sinüzoidal sürekli mıknatıslı alternatif akım motorları ise, sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) olarak adlandırılır. Trapezoidal makine kontrol yapısı basit olması nedeniyle ilk geliştirilendir. Fakat, moment dalgalanmalarının varlığı bu makinenin yüksek performanslı uygulamalarda kullanılmasına izin vermemektedir. Daha sonra vektör kontrol yöntemlerinin de kullanılabildiği, yüksek performanslı sinüzoidal makine geliştirilmiştir. Sinüzoidal makine, pek çok uygulamada asenkron makine ile yarışabilecek en uygun motor olarak görülmektedir.

Mıknatıslı senkron motorlar uygulama alanlarına göre farklı tiplerde tasarlanabilmektedir. Sinüzoidal akım ve gerilimlerle çalışmak üzere tasarlanan tiplerde genellikle stator sarımları, asenkron motor gibi stator oyuklarına yerleştirilmiş üç fazlı sargıdan meydana gelmektedir. Bu tip motorlarda sargılar iki tabakalı, dağıtılmış ve kırılganmış olarak sarılarak, sargı magnetomotor kuvvetleri ve hareket gerilimleri sinüs biçimine yaklaştırılmaktadır.

Rotorda kullanılan mıknatısın özelliği ve mıknatısın rotora yerleştiriliş şekli motorun performansını etkilediğinden motor performansını artırmak için çeşitli tasarım şekilleri yapılmaktadır. Sürekli mıknatısların boyutlarının belirlenmesi ve makineye yerleştirilmesinde önemli olan iki kriter vardır.

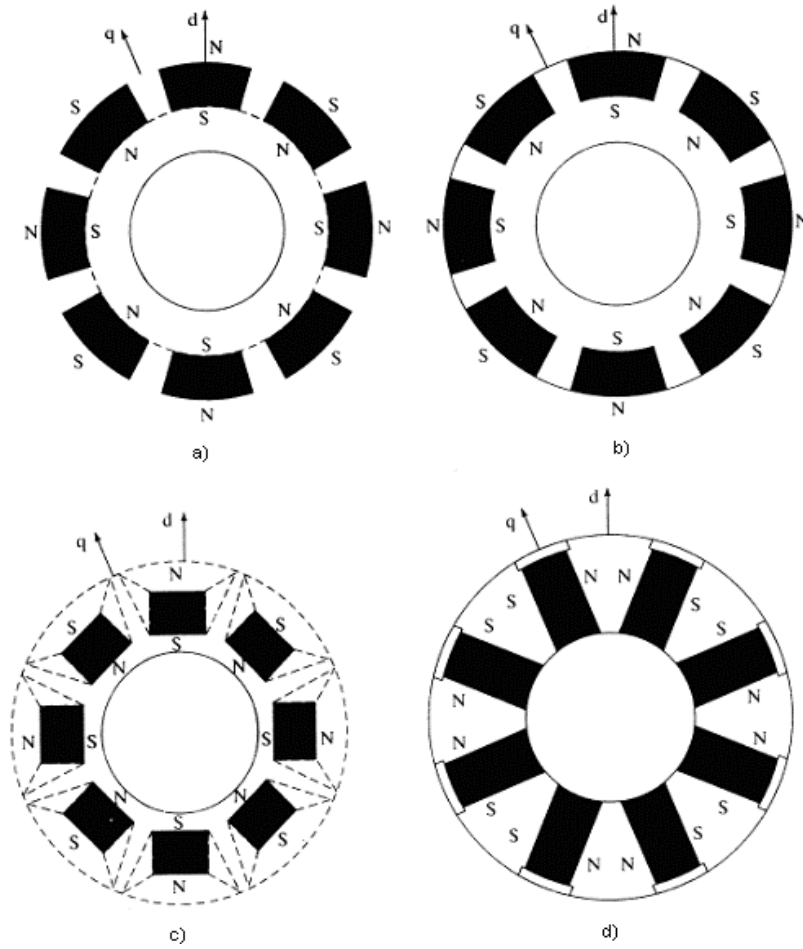
1) Hava aralığındaki akı yoğunluğunun değeri makinede kullanılan demir ve bakırın en iyi şekilde kullanılmasını sağlayacak büyüklükte olmalıdır.

2) Sürekli mıknatıslar, stator sargılarının magnetik etkilerinden etkilenmeyecek ve mıknatısietlerini kaybetmeyecek şekilde yerleştirilmelidir.

Farklı rotor şekilleri arasında en çok rastlanan ve diğer tasarımlara da temel oluşturan iki farklı tasarım aşağıda incelenmiştir:

- 1) Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi
- 2) Mıknatısların rotorun içine yerleştirilmesi
 - a) Radyal yerleştirilmiş mıknatıs yapısı,
 - b) Dairesel yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı.

Şekil 2.1'de mıknatısların temel yerleştiriliş biçimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sürekli mıknatıslı senkron motor türleri [23]

Şekil 2.1 a'da rotor laminasyonlarının dış yüzeyine yapıştırılmış sürekli mıknatıs tasarımı görülmektedir. Bu tasarım en yüksek hava aralığı akı yoğunluğu sağlamaktadır, fakat diğer tasarımlara göre daha zayıf bir yapısal bütünlük göstermektedir ve mekanik dayanıklılığı da zayıftır. Rotoru bu şekilde tasarlanan makineler "dış yüzeye yapıştırılmalı SMSM" olarak adlandırılırlar. Mekanik dayanıklılık açısından 3000 d/d'dan daha yüksek hızlar için tercih edilmezler [25],[26],[27].

Şekil 2.1 b'de sürekli mıknatısların rotor laminasyonlarının dış yüzeyinin altına yerleştirildiği tasarım görülmektedir. Bu tasarım, düzgün silindirik bir rotor yüzeyi elde edilmesine ve dolayısıyla daha yüksek bir mekanik dayanıklılığa olanak sağlamaktadır. Bu şekilde tasarlanan makineler "iç yüzeye yapıştırılmalı SMSM" olarak adlandırılırlar.

Şekil 2.1 c ve 2.1 d'de ise mıknatısların rotor laminasyonlarının içerisine radyal ve çevresel olarak yerleştirildiği tasarımlar görülmektedir. Bu yapı mekanik olarak en dayanıklı yapıdır ve yüksek hız uygulamaları için de oldukça uygundur. Öte yandan bu tasarımın üretilmesi daha karmaşık ve pahalıdır. Bu makinelere de "içe gömülmüş SMSM" adı verilmektedir.

2.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Avantaj ve Dezavantajları

Sürekli mıknatıs malzemelerde ve yarı iletken elemanlardaki yeni gelişmeler, SMSM'ü klasik doğru akım motorunun üstünlükleri ile alternatif akım motorların sağlamlık ve güvenilirlik özelliklerini sağlayabilecek duruma getirmiştir. Mıknatıslı senkron motor ve diğer tahrik motorları ile tasarlanan sistemler karşılaştırıldığında aşağıdaki avantaj ve dezavantajlar sıralanabilir:

Avantajları:

- Rotorunda sargı yerine mıknatısların bulunması verimini artırmaktadır. Rotorda sürekli mıknatıs bulunduğundan dolayı uyarma akısına gerek yoktur. Bu nedenle harici bir uyarma kaynağına ve uyarma gücüne gerek kalmamaktadır. Uyarma kayıpları söz konusu değildir. Böylece motorun verimi artmaktadır.
- Özellikle doğru akım motorlarındaki fırça ve kollektör sistemi SMSM'da olmadığından bakım maliyeti azalmakta, ayrıca fırçalarda kayıplar meydana gelmediğinden verim artmaktadır.

- Kollektör bulunmaması rotor boyunun kılmasına, rotorda sargıların olmaması da ağırlığının dolayısıyla rotor ataletinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle atalet momenti düşük ve dinamik performansı iyidir.
- Hava aralığı endüksiyonu arttığı için stator sargıları azaltılarak makinenin dış çapı küçültülebilmekte böylece aynı nominal güçteki ve nominal devir sayısındaki doğru akım ve asenkron motorlara göre daha küçük hacimde ve ağırlıkta olmaktadır.
- Rotorda sargılar bulunmadığı için SMSM'un soğutulması daha kolay sağlanabilmektedir.
- Asenkron motora göre güç faktörü yüksektir. İnverterden beslenen sistemlerde güç katsayısının yüksek olması inverterin gücünden verimli olarak faydalanabilmek açısından önem taşımaktadır.
- Vektör kontrollü asenkron motor sistemlerine göre denetimi daha basit ve parametre değişimlerinden etkilenmeyen bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Dezavantajları:

- Mıknatıs malzemelerin ısı sınırlamaları ve demagnetizasyon riski sistem güvenilirliğini azaltmaktadır.
- Kullanılan mıknatıs malzemelerin, uygun seçilmemesi durumunda uzun vadede mıknatısların, çeşitli atmosferik ve termik etkilerin de sonucu mıknatısietliğini kaybetmeleri makine için olumsuz bir etkidir.
- Yüksek enerjili mıknatısların fiyatlarının ve üretim giderlerinin yüksek olması nedeniyle mıknatıslı senkron motorlar, doğru akım ve asenkron motorlara oranla daha pahalıdır.
- Mıknatısların rotor yüzeyinde olduğu tasarımlarda yüksek hızlarda mıknatısların rotor yüzeyine tutturulması oldukça zordur ve her zaman kopma riski vardır.
- Bakım esnasında rotorun statordan çıkarılması durumunda eski çalışma noktası kayabilir.

2.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Kullanım Alanları

Sürekli mıknatıslı motorların çok çeşitli kullanım alanları ve uygulamaları mevcuttur. Bu motorlar genel olarak elektrik makinelerinin yer aldığı her alanda kullanılmakta olup, güç yoğunluğu ve verimlilik gibi avantajlarından dolayı, diğer geleneksel elektrik motorlarının giremediği alanlara da girmekte ve birçok yeni teknolojinin gelişmesine ve geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Aşağıda en yaygın kullanım ve uygulama alanları verilmiştir.

Endüstriyel uygulamalar:

- Endüstriyel tahrik: pompalar, fanlar, vantilatörler, kompresörler, santrifüjler, vinçler
- Servo sistemler
- Otomasyon sistemleri
- Dahili taşıma sistemleri
- Endüstriyel robotlar

Toplumsal yaşamdaki uygulamalar:

- Havalandırma sistemleri
- Yiyecek-içecek hazırlama gereçleri
- Bozuk para ile çalışan araçlar
- ATM'ler
- Bilet otomatları
- Barkod okuyucular
- Lunapark araçları

Evsel uygulamalar:

- Mutfak aletleri: Buzdolapları, mikrodalga fırınlar, mikserler ve bulaşık makineleri
- Çamaşır makineleri ve kurutucular
- Isıtma ve klima (iklimlendirme) sistemleri
- Elektrikli süpürgeler

- im biçme makineleri

Otomotiv sekt6r6

- Geleneksel otomobiller: yol verme motorları, silecek motorları, cam açma motorları, klima motorları, fan motorları, bagaj kapısı motorları, kapı kilitleme sistemleri,
- Elektrikli araçlar

Taşıma ve ulaşım:

- Asans6rler ve y6r6yen merdivenler
- Y6r6yen bantlar
- Hafif metrolar ve tramvaylar
- Uçuő kontrol ve kumandası
- Elektrikli gemi ve botlar

Savunma sistemleri:

- Tanklar
- F6ze sistemleri
- Radar sistemleri
- Denizaltılar
- Torpidolar

Havacılık:

- Roketler
- Uzay araçları
- Uydular

Tıp ve sağlık uygulamaları - biyomedikal:

- Diőçilik araçları
- Elektrikli tekerlekli sandalyeler
- Rehabilitasyon cihazları

- Yapay kalp motorları

Araştırma ve keşif araçları

- Deniz altı araştırma sistemleri
- Meteorolojik araştırma araçları
- Uydu sistemleri
- Uzay keşif, tanıma araçları

2.5 Sürekli Mıknatıs Malzemeler

Elektrik makinelerinde sürekli mıknatıslı uyarma sisteminin ilk kullanımı 19. yüzyılda gerçekleştirilmiştir. Bu malzemeler ile ilgili birçok bilim adamı tarafından deneyler yapılmış fakat kullanılan malzemelerin, magnetik özelliklerinin çok yetersiz oluşu nedeniyle Alnico'nun icat edilmesine kadar sürekli mıknatıslı uyarma fikri rafa kaldırılmıştır [28], [29].

Günümüz elektrik makinelerinde kullanılan sürekli mıknatısları üç grupta inceleyebiliriz
Bunlar:

Alnico: Modern sürekli mıknatıslı makineler, 1930'larda Bell laboratuvarı tarafından Alnico mıknatısların geliştirilmesiyle kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek akı yoğunluğu ve enerji üretimine sahip ticari uygulamalar için üretilen Alnico mıknatıslar, birkaç kW'lık sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu mıknatısların düşük koersif güçleri, özellikle sabit akım gerektiren uygulamalarda kullanılmasını engellemiştir. Alüminyum, Nikel, Kobalt ve Demir alaşımlarından oluşan bu malzemenin kalıcı akı yoğunluğu (B_r) oldukça yüksek ve en yüksek çalışma sıcaklığı 520°C 'dir. Sıcaklık katsayısı küçük yani ısıl kararlılığı yüksektir (B_r için sıcaklık katsayısı $\%0.02/^{\circ}\text{C}$). Fakat mıknatıslama eğrisi doğrusal değildir ve koersif kuvvet oldukça küçük olduğundan sürekli mıknatıslı makine tasarımı için yetersizdir. 1960 yıllarına kadar kullanılmış olup ticari ömrünü doldurmuştur.

Ferritler (Seramikler): Baryum içerikli (BaOx6Fe2O3) ve stronyum içerikli (SrOx6Fe2O3) ferrit olarak ikiye ayrılırlar. Stronyum ferritin koersif kuvveti daha büyüktür. Sürekli mıknatısların yaygın olarak kullanılması 1950'lerde seramik veya sert ferrit

mıknatısların bulunmasıyla mümkün olmuştur. Seramik mıknatıslar baryum veya stronyum demir tuzu oksitleri olarak tanımlanırlar. Ferrit mıknatısların akı yoğunluğu, alnico mıknatıslara göre daha düşük olmasına rağmen, yüksek koersif güce sahip olmaları, sürekli mıknatıslı motorlara uyumunu sağlamıştır. En yüksek çalışma sıcaklıkları 400°C'dir. Mıknatıslama eğrileri doğrusaldır. Alnico'ya göre daha yüksek kuvvete sahipken kalıcı akı yoğunlukları düşüktür, bu da boyutlarının daha büyük olması demektir. Sıcaklık katsayısı B_r için %0.2/°C H_{CB} için %0.27/°C'dir. Doğada çok bulunan malzemeler olduklarından maliyetleri ucuzdur. Elektriksel dirençlerinin çok büyük olması sebebiyle sürekli mıknatısta eddy akımı kayıpları olmaz.

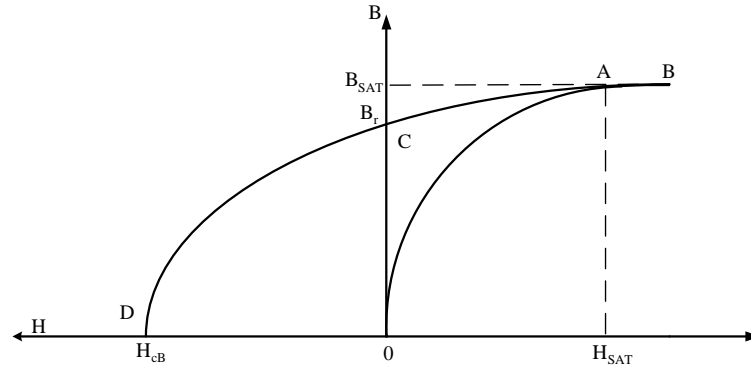
Nadir toprak malzemeler (rare-earth materials): Sürekli mıknatıslı makineleri etkileyen en büyük gelişim 1960'larda bulunan nadir toprak sürekli mıknatıslardır. Bu isimle tanımlanmalarının nedeni, doğada az bulunur olmaları değil çok karışık bileşimler halinde bulunmaları, dolayısıyla ayrıştırma işleminin zor ve pahalı olmasıdır. Samaryum veya neodmiyum içeriklidirler.

Samaryum-kobalt: 1970 yılından itibaren kullanılmaktadır ve demir, nikel, kobalt ve samaryum ihtiva etmektedir. Kalıcı akı yoğunluğu, enerji yoğunluğu ve koersif kuvveti yüksektir. Doğrusal mıknatıslama eğrisine sahiptir. En yüksek çalışma sıcaklığı 400°C'dir. Isıl kararlılığı çok iyidir (B_r için %0,03-0,045/°C ve H_{CB} için %0,14-0,4/°C'dir.). Güç/ağırlık oranı yüksek, düşük eylemsizliğe sahip makine tasarımı için çok uygundur. Fakat hem samaryum hem de kobalt pahalı malzemelerdir. Samaryum kobalt sürekli mıknatıslar Alnico sınıfının sunduğu kadar yüksek akı yoğunluğuna sahip, aynı zamanda sert Ferrit sürekli mıknatısların sahip olduğu koersif güçten daha fazla bir koersif güce sahiptirler. Ancak kobaltın dünyanın birkaç yerinde bulunması ve bu nedenle pahalı olması bu mıknatısların kullanımını sınırlandırmıştır.

Neodmiyum-demir-bor (NdFeB): Nadir toprak sürekli mıknatıslardaki en son gelişme neodmiyum-demir-bor alaşımları olup, bu mıknatıslar 1983 yılında icat edilmiş ve halen, özellikle ısıl özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. NdFeB mıknatıslar bugün bilinen en yüksek güç yoğunluğuna sahip, elektrik makineleri uygulamalarında kullanılan mıknatıslardır. Koersif kuvveti çok büyüktür. Fakat sıcaklık katsayısının yüksek oluşu (B_r için %0,095-0,15/°C ve H_{CB} için %0,4-,07/°C'dir.) en yüksek çalışma

sıcaklığını 150°C ile sınırlamaktadır. Önlem alınmazsa paslanma olabilir. Magnetik özelliklerinin çok iyi olması sebebiyle günümüzde, muhtemelen gelecekte de, eğer yüksek verimlilik isteniyorsa en iyi seçimdir [30].

2.5.1 Histeresiz Çevrimi ve B-H Eğrileri



Şekil 2.2 Histeresiz çevrimi

Şekil 2.2'den görüldüğü gibi başlangıçta magnetik olarak nötr durumda bulunan malzeme dış alan şiddeti etkisiyle OA yolunu izleyerek mıknatıslanmaktadır. A noktasından itibaren malzeme tamamen doymuş ve magnetik özelliğini kaybetmiştir. B noktasından A noktasına doğru, alan şiddeti azaltıldığında histeresiz görülmez ve iniş çıkış doğruları çakışıktır. Bu noktadaki magnetik alan şiddeti H_{sat} , magnetik akı yoğunluğu ise B_{sat} olarak adlandırılır. H_{sat} ve B_{sat} değişik mıknatıs malzemeler için farklı değerler alabilir. Örneğin Ferrit bir mıknatıs için $H_{SAT} = 560$ kA/m, $B_{SAT} = -0.707$ T düzeyindedir.

A noktasından itibaren histeresiz etkisi görülmeye başlar. Alan şiddeti azaltılmaya devam edilirse B-H değişimi A-C yolunu izleyecektir. Nihayet dış alan tamamen ortadan kalktığında malzeme B_r ile gösterilen bir artık mıknatıslık kalmıştır ve B_r yine magnetik malzemelere göre farklı değerlerde olabilir. Örnek olarak; Ferrit mıknatısta 0,4 T değerinde iken NdFeB mıknatıslarda 1,2 T civarındadır. Mıknatıslanma eğrisinin 2. bölgesindeki değişimin izlenmesi için dış alan şiddeti ters yönde uygulanırsa bu kez değişim C-D yolunu izler. Bu bölge mıknatıslığı yok etme ya da demagnetizasyon bölgesi olarak adlandırılır. Normal olarak mıknatıslı bir magnetik devrede çalışma noktası bu bölgede bulunur. D noktasına gelindiğinde uygulanan dış alan şiddetinin

etkisiyle mıknatıs malzeme tamamen demagnetize olmuş yani mıknatıslık özelliğini tümüyle kaybetmiştir. Artık mıknatıslığı tamamen yok etmek için malzemeye uygulanması gereken alan şiddetine koersif kuvvet adı verilir ve H_{CB} sembolü ile gösterilir. Bu değer, mıknatısın dış alanlardan ne kadar etkileneceğini belirleyen bir büyüklüktür. Örnek olarak, bir Ferrit mıknatısta H_{CB} değeri 165 kA/m iken, bir NdFeB mıknatısta 1000 kA/m düzeyindedir.

Mıknatıslık özelliği gösteren malzemeler, sert magnetik malzemeler olarak da adlandırılır. Tüm ferromagnetik malzemeler gibi sürekli mıknatıslar da B-H düzleminde histeresiz eğrisi ile tanımlanabilirler. İdeal bir sürekli mıknatıs malzemenin, kalıcı akı yoğunluğunun yüksek olması ve mıknatıslık giderme kuvvetinin büyük olması gerekir. Bu da, dik ekseni kalıcı akı yoğunluğu ve yatay ekseni mıknatıslık giderici kuvvet olarak tanımlanan B-H düzleminde, dikdörtgene yakın ve geniş bir histeresiz eğrisine sahip olması anlamına gelir. Sürekli mıknatıslar büyük B-H eğrilerine, yüksek kalıcı akı yoğunluğuna (B_r) ve yüksek koersitif kuvvete (H_{CB}) sahiptirler. Kalıcı akı yoğunluğunun yüksek olması mıknatısın, magnetik devrenin hava aralığından daha yüksek bir magnetik alanı desteklemesini sağlar.

Faraday'ın temel akı yoğunluğu tanımına göre, bir sürekli mıknatıstaki magnetik akı yoğunluğu eşitlik (2.1)'de verildiği gibi iki bileşenin aritmetik toplamından oluşmaktadır. Bileşenlerden bir tanesi, bir dış magnetik alanın varlığı nedeni ile oluşmaktadır ve mıknatısa etki eden gerçek mıknatıslanma kuvvetidir. Diğer bileşen ise mıknatısın ferromagnetik doğası gereği oluşan doğal bileşeni B_i 'dir. Bu bileşen magnetik malzemenin ortamdaki magnetik alana katkısıdır [63].

$$B = \mu_0 H + B_i \quad (2.1)$$

Birçok magnetik büyüklüğün sıcaklıkla değişmesinden dolayı sürekli mıknatısların da mıknatıslığı giderme karakteristiği sıcaklıkla değişir. Yüksek sıcaklıklarda, uzun süre belli bir sıcaklık düzeyinin üstünde bulunma durumunda, mıknatıs malzemenin mıknatıslanmasını engelleyebilecek metalürjik değişimler oluşabilir. Sürekli olarak mıknatıslanabilen malzemelerin bu özelliklerini kaybettikleri sıcaklığa Curie sıcaklığı denir. Curie sıcaklığı, ferromagnetik ve ferroelektrik malzemelerde kalıcı polarizasyonun termal değişim dolayısıyla ortadan kalktığı sıcaklık olarak tanımlanır.

2.5.2 Magnetizma ve Sürekli Mıknatıslanma

Magnetik malzemelerin en önemli özelliklerinden biri malzemede oluşan akı yoğunluğu B ile magnetik alan şiddeti H arasındaki bağıntının doğrusal olmamasıdır. Doğrusal olmayan bu eğrinin bilinmesi, magnetik malzemelerin karşılaştırılması ve kullanımı açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle her malzemenin $B=f(H)$ mıknatıslanma eğrisinin çok büyük bir doğrulukla elde edilmesi gerekmektedir. Birçok mühendislik uygulamasında bu eğri de yeterli bulunmayarak doğal akı yoğunluğuna ilişkin $B_i=f(H)$ eğrisine ihtiyaç duyulmaktadır. Doğal akı yoğunluğuna ilişkin bu eğri eşitlik (2.1) ve $B=f(H)$ eğrisi yardımıyla belirlenmektedir. Sürekli veya sert magnetik malzemeler ile bu malzemelere magnetik alan uygulanmasına gerek duyulmadan magnetizma veya artık mıknatıslanma elde edilir ve büyük bir iç koersif kuvvet (zorlayıcı alan şiddeti) oluşur. Yumuşak magnetik malzemelerde ise bir dış alan uygulanması istenir ve genellikle küçük koersif etkiler oluşur.

Sürekli mıknatıslardan beklenen özellikler,

- Yüksek koersif kuvvet (H_{cB})
- Doyma noktasında yüksek magnetik akı yoğunluğu (B_{sat})
- Yüksek kalıcı akı yoğunluğu (B_r)
- Yüksek enerji yoğunluğu $(BH)_{max}$

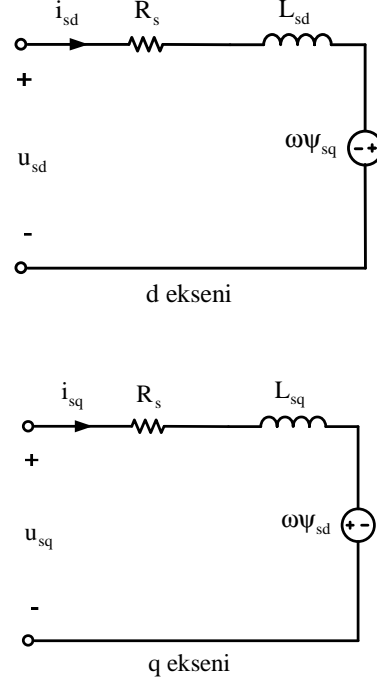
2.6 Sürekli Mıknatıslı Motorun Matematiksel Modeli

Bu modelde;

1. Doyma etkisi ihmal edilmiştir.
2. Açık devre stator faz gerilimlerinin yaklaşık sinüzoidal olacak şekilde tasarlandığı düşünülmüştür.
3. Stator akımlarının etkisi ile sürekli mıknatısların mıknatıslanma özelliklerini kaybetmeyecekleri düşünülmüştür.

2.6.1 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun dq Eşdeğer Devresi ve Devre Denklemleri

Sürekli mıknatıslı senkron motorun geçici rejim davranışlarını bulmak için kullanılan iki eksen yöntemine göre eşdeğer devresi Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

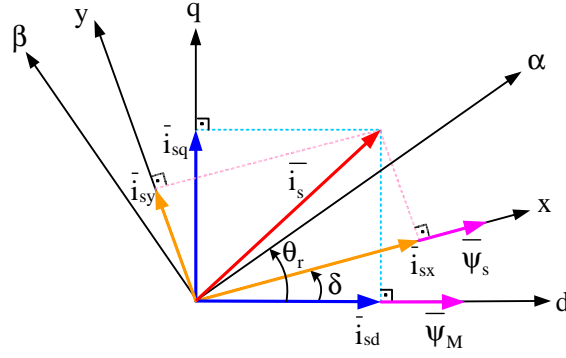


Şekil 2.3 Sürekli mıknatıslı senkron motorun dq eşdeğer devresi

dq dönüşümü makine değişkenlerine uygulandıktan ve dq eşdeğer devresine göre rotor parametreleri statora indirgendikten sonra makine modeli için gerilim ve akı denklemleri aşağıdaki gibidir.

Stator magnetik akı vektörü ψ_s ve rotor magnetik akı vektörü ψ_M , Şekil 2.4’de görüldüğü gibi rotor akısı (dq), stator akısı (xy) referans sistemlerinde çizilebilir.

Stator ve rotor magnetik akılarının arasındaki açı (δ) yük açısıdır. δ sabit bir yük momentini için sabittir. Bu durumda stator akısı da rotor akısı da senkron hızda döner. Ancak farklı yüklerde δ değişir. Burada, stator akımının dönüş hızı ya da δ ’deki değişiklik kontrol edilerek, momentteki artışın kontrol edilebileceği gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Farklı referans sistemlerinde stator ve rotor magnetik akıları

Stator magnetik akı, gerilim ve elektromagnetik momentin dq referans sistemindeki denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

Gerilim denklemleri:

$$\left. \begin{aligned} u_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \frac{d\theta_r}{dt} \\ u_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \frac{d\theta_r}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Akı denklemleri Şekil 2.4 yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_M \quad (2.3)$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \quad (2.4)$$

2.6.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun dq Eşdeğer Devresine Göre Elektromagnetik Moment İfadesi

Bir akım makinesinin momenti T_e 'nin hesabı vektörel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\bar{T}_e = \frac{3}{2} p \bar{\psi}_s \times \bar{i}_s \quad (2.5)$$

burada p çift kutup sayısıdır.

Eğer stator magnetik akısı ve stator akımı $\alpha\beta$ -düzleminde dikkate alınırsa;

$$\bar{\Psi}_s = \Psi_{s\alpha} + j\Psi_{s\beta} \quad (2.6)$$

$$\bar{i}_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \quad (2.7)$$

olur ve xy-düzleminde dikey olan moment ise;

$$\bar{T}_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \bar{k} \quad (2.8)$$

olur. Burada \bar{k} birim vektördür. Genellikle $\bar{\Psi}_s$ ve \bar{i}_s kompleks değer vektörleri olarak dikkate alınır. Ancak z-düzleminin bir anlama sahip olmadığı düşünülürse, moment skaler olarak kabul edilebilir. Matematiksel olarak bu söylenenler ifade edilecek olunursa;

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (2.9)$$

elde edilir. Yukarıdaki ifade, momentin stator koordinat sistemindeki denklemidir. En yaygın referans sistemi, rotor referans sistemidir. Buna göre moment denklemi d-q rotor referans koordinat sistemine göre;

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}) = \frac{3}{2} p [\Psi_M i_{sq} - (L_{sq} - L_{sd}) i_{sd} i_{sq}] \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (2.11)'de ki dönüşüm ve Şekil 2.4 yardımıyla elde edilen (2.12) ifadesi ile denklem (2.10), denklem (2.13)'de görüldüğü şekle dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Burada F; gerilim, akım ve magnetik akıyı temsil etmektedir. Şekil 2.4'den;

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \frac{\Psi_{sq}}{|\Psi_s|} \\ \cos \delta &= \frac{\Psi_{sd}}{|\Psi_s|} \end{aligned} \quad (2.12)$$

olduğu bulunur. Burada ifade edilen $|\Psi_s|$; stator magnetik akısının genliğini gösterir. Şekil 2.4 yardımıyla (2.12)'deki ifadeler yerine yazılırsa eşitlik 2.13'deki moment ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
T_e &= \frac{3}{2} p \left[\psi_{sd} (i_{sx} \sin \delta + i_{sy} \cos \delta) - \psi_{sq} (i_{sx} \cos \delta - i_{sy} \sin \delta) \right] \\
&= \frac{3}{2} p \left[i_{sx} \frac{\psi_{sd} \psi_{sq}}{|\psi_s|} + i_{sy} \frac{\psi_{sd}^2}{|\psi_s|} - i_{sx} \frac{\psi_{sd} \psi_{sq}}{|\psi_s|} + i_{sy} \frac{\psi_{sq}^2}{|\psi_s|} \right] \quad (2.13)
\end{aligned}$$

Eşitlik (2.13) ifadesinde gerekli sadeleştirmeler yapılırsa eşitlik (2.14) ifadesi elde edilir.

$$T_e = \frac{3}{2} p |\psi_s| i_{sy} \quad (2.14)$$

Buradan, stator akımının y-eksen bileşeniyle momentin doğru orantılı olduğu anlaşılmaktadır [32].

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLAR

Bu bölümde eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorların yapıları, çalışma ilkeleri ve çeşitleri incelenecek, birbirlerine göre farklılıkları anlatılacaktır.

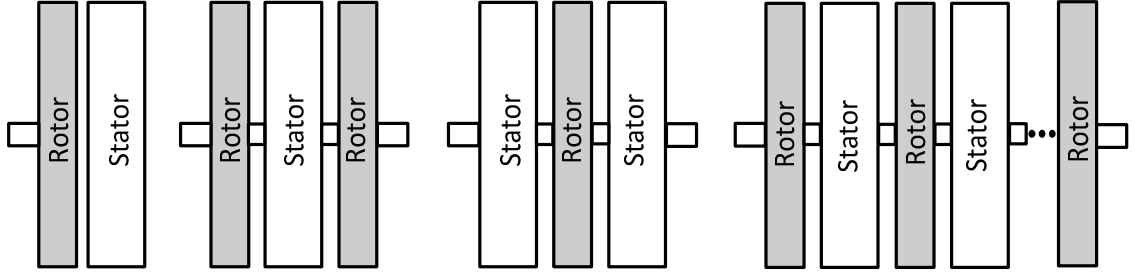
3.1 Giriş

Sürekli mıknatıslı motorlarda, radyal akılı ve eksenel akılı olmak üzere iki çeşit yapı mevcuttur. Radyal akılı makinelerin patenti ilk olarak 1837 de Davenport tarafından alınmıştır. Uzun süre kullanılan bu motorların yerini, günümüzde yapısından kaynaklanan, yüksek verim, düşük kayıplar, düşük hacim, yüksek ağırlık/moment, yüksek güç ve moment yoğunluğu sebebiyle eksenel akılı motorlar almaktadır. Bu tip motorların en tipik ve önemli özelliği getireceği geometrik avantajı ve enerji dönüşümünde kullanılan hava aralığının radyal akılı motorlara göre fazla olmasıdır.

Eksenel akı motorlar da diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi stator ve rotor yapılarından oluşmaktadır. Fakat bunların dizilişinde çok temel farklılıklar vardır. Bu tip makinelerin stator ve rotorları diğer makinelerde olduğu gibi iç içe değil de, disk şeklinde ve yan yana lamine edilmiş şekilde sıralanırlar. Bu bölümde makinelerin stator ve rotor yapıları ayrı ayrı açıklanacaktır [33],[34],[35],[36].

Kullanım alanlarına göre çeşitli türlerde eksenel akılı sürekli mıknatıslı motor çeşitleri mevcuttur. Şekil 3.1’de en temel eksenel akılı sürekli mıknatıslı motor konfigürasyonları gösterilmiştir. Eksenel akılı SM motorlar 4 farklı şekilde üretilirler. Bunlar; tek stator tek rotorlu, tek stator iki rotorlu, iki stator tek rotorlu, çok stator çok rotorlu yapılardır.

Bu tezde üzerine çalışılan ve vuru mu momentini azaltmada kullanılan motor türü iki rotor tek statorlu oluklu TORUS NN tip motordur.



Şekil 3.1 Temel aksel akılı motor konfigürasyonları

3.2 Aksel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motorların Avantaj ve Dezavantajları

Aksel akılı SM motorların diğer radyal tip elektrik motorlarından farkları ve avantajları aşağıdaki gibi açıklanabilir;

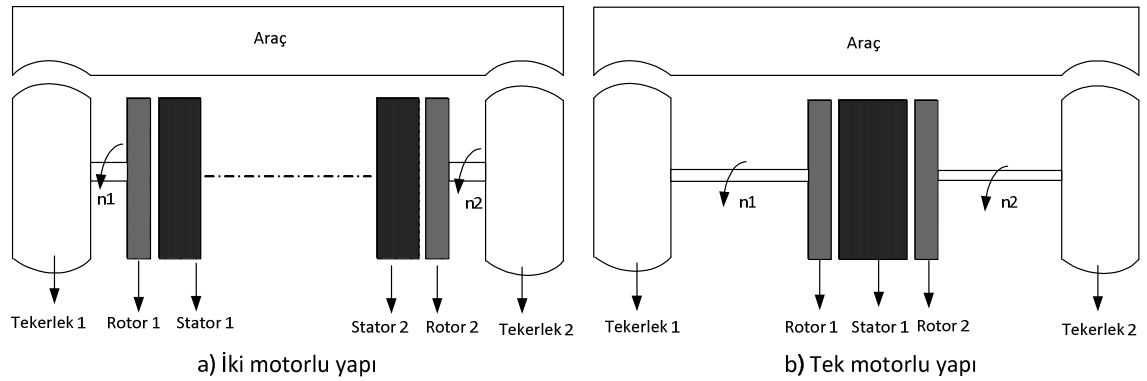
- Aksel akılı sürekli mıknatıslı motorların diğer tip motorlara göre en önemli avantajı, bu tip motorların rotor sargısının olmamasından dolayı verimlerinin, diğer tip motorlardan daha fazla olmasıdır. Yani motorun birim hacminden üretilen güç, moment ve verim daha yüksek olur.
- Bu tip motorların diğer önemli bir avantajı ise geometrik kısıtlamalara uygun olmasıdır. Yani motorun küçük hacimli olması gereken uygulama alanlarında kullanımı, diğer standart motorlara göre daha uygundur. Çünkü standart motorlarda stator ve rotor birbiri içinde aksel olarak uzunlamasına yerleştiği için daha büyük bir hacim gereklidir. Ancak aksel akılı sürekli mıknatıslı motorların Şekil 3.1'den de görüldüğü gibi aksel uzunlukları kısa olduğu için çalışma hacimleri daha küçüktür. Zaten uygulama alanları da ileride görüleceği gibi bu özelliği sayesinde genişlemiştir [37],[38].
- Hacimlerinin küçük olması sayesinde de ağırlıkları da diğer tip motorlara göre daha azdır.
- Bu tip motorların stator ve rotorları arasındaki hava boşlukları motorun yapısından dolayı düzlemsel ve ayarlanabilmektedir.
- Bu tip motorların rotorlarının yapısı termal avantajlar sağlar. Mıknatısların takıldığı rotor diskleri doğal fanlar gibi hareket ederler ve stator sargılarının daha iyi

soğumasını sağlarlar [39],[40].

- Gürültü ve titreşim seviyeleri standart SM makinelerden daha azdır [41].

3.3 Sürekli Mıknatıslı Eksenel Akılı Motorların Kullanım Alanları

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorların Bölüm 3.2’de bahsedilen avantajlarından özellikle ilk ikisi sayesinde kullanım alanlarının son derece geniş olabileceği kolaylıkla görülebilir. Bu tip motorların uygulama alanlarından birisi olan taşıt uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Taşıt uygulamalarında kullanıma aşağıdaki örnek verilebilir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi eksenel akılı motorlar taşıtın tekerleklerinin hemen içerisine yerleştirilir ve tekerlekler sürülür. Her bir tekerleğin yanına stator-rotor çifti konularak iki eksenel akı makinesi ile sürüleceği gibi tek eksenel akı makinesi tekerleğin orta noktasına konumlandırılarak bir çift tekerlek içinde kullanılabilir. Motor ile tekerlek arasında bir dişli kutusuna gerek kalmamaktadır.



Şekil 3.2 Eksenel akılı motorların elektrikli taşıtta kullanımı

Sadece bu tür taşıtlarda değil elektrikli bisikletlerde de bu tür motorları görmek mümkündür. Bu motorun bisiklet tekerleklerinin ortasına yerleştirilmesi durumunda, hem standart motordan daha az yer kaplayacağı için daha kompakt bir yapı sağlar hem de bisiklet daha hafif olduğu için rahatça kullanılabilir. Ayrıca güneş enerjisi ile çalışan elektrikli araçlarda da bu motorlar kullanılır. En büyük avantajı, motorun ince olması ve tekerleğin içine konulabilmesidir.

3.4 Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motorların Genel Yapısı ve Çeşitleri

Eksenel akılı motorlarda magnetik akı doğrudan eksenel olarak hava boşluğundan geçer. Genellikle stator halka, rotor ise disk yapısındadır. Moment üreten aktif parça statorun iç çapından dış çapına kadar olan radyal uzaklıktaki bölümdür. Eksenel akılı motorun radyal aktif parçası değişmeden kutup sayısı arttırılabilir. Böylece eksenel uzaklık azalır ve güç yoğunluğu artar. Bundan dolayı da eksenel akılı motorlar düşük hızda yüksek moment üretebilirler. Eksenel akılı motorlar sargıların bulunduğu bir stator ve mıknatısların bulunduğu bir rotor diskinden oluşur. Genel olarak aşağıdaki gibi; stator ve rotor düzenine ve sayılarına, mıknatısların yerleştiriliş biçimlerine ve oluk yapılarına göre isimlendirilirler [42],[43].

✓ **Stator-Rotor düzenine göre,**

- a. Tek kenarlı Yapılar
- b. Çift kenarlı Yapılar
- c. Multi-Disk Yapılar

✓ **Sürekli Mıknatısın rotordaki konumuna göre**

- a. İçe gömülü sürekli mıknatıslı
- b. Yüzey yerleştirilmeli sürekli mıknatıslı

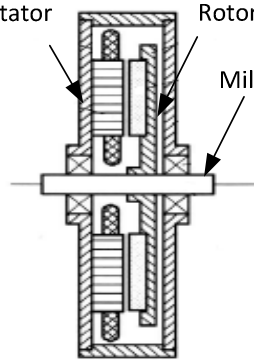
✓ **Olukların varlığına göre**

- a. Oluksuz sürekli mıknatıslı
- b. Oluklu sürekli mıknatıslı

3.4.1 Tek- Kenar Yapılı Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

Bu tür yapılar eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor tipleri arasındaki en basit yapıdır. Moment kapasiteleri düşüktür. Şekil 3.3'den görüldüğü gibi lamineli stator ve yüzey yerleştirilmeli mıknatıs tipine sahip bir rotordan oluşmaktadır. Endüstride kullanımı yaygın değildir. Genellikle asansör sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu tip motorlarda mıknatısın yarattığı akı mıknatısın kuzey kutbundan statora girer, dairesel

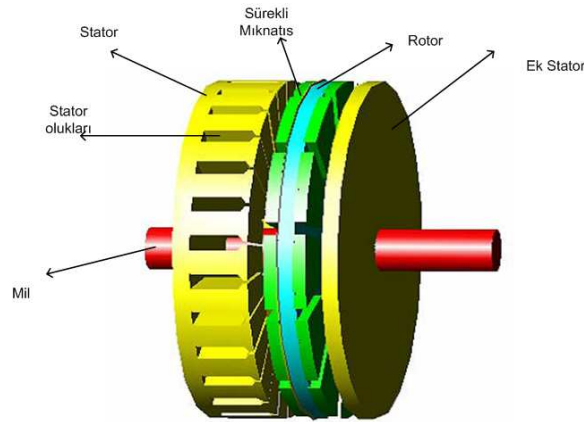
olarak bir kutup boyunca statorda ilerler ve mıknatısın güney kutbuna geçip rotor diski üzerinden devresini tamamlar [44],[45].



Şekil 3.3 Tek-kenarlı aksel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor

3.4.2 Stator Dengeli Tek Kenarlı Aksel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

Bu tür motorlar sadece bir rotor ve statora sahiptirler. Rotor ve stator arasında büyük bir çekme kuvveti oluşur. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda normalde bilezik bulunmamasına rağmen, aksel yöndeki hareketten rotoru korumak için, özel bilezikler kullanılır. Yapıya ek stator ekleyerek çekim kuvveti dengelenebilir. Rotorun karşı kısmı üzerinde, denge kuvvetini indüklemek için magnetik alan üretilmesinden dolayı sürekli mıknatıslara ihtiyaç vardır. Magnetik alan, histeresiz ve eddy kayıplarını dalgalandıracağından dolayı stator lamine edilir. Akı yüzeyi dikkatlice tasarlandığında, rotor ve ek stator arasında üretilen kuvvet, rotor ve makinenin statoru arasındaki kuvveti dengeler. Şekil 3.4'de motor yapısı gösterilmektedir [57].



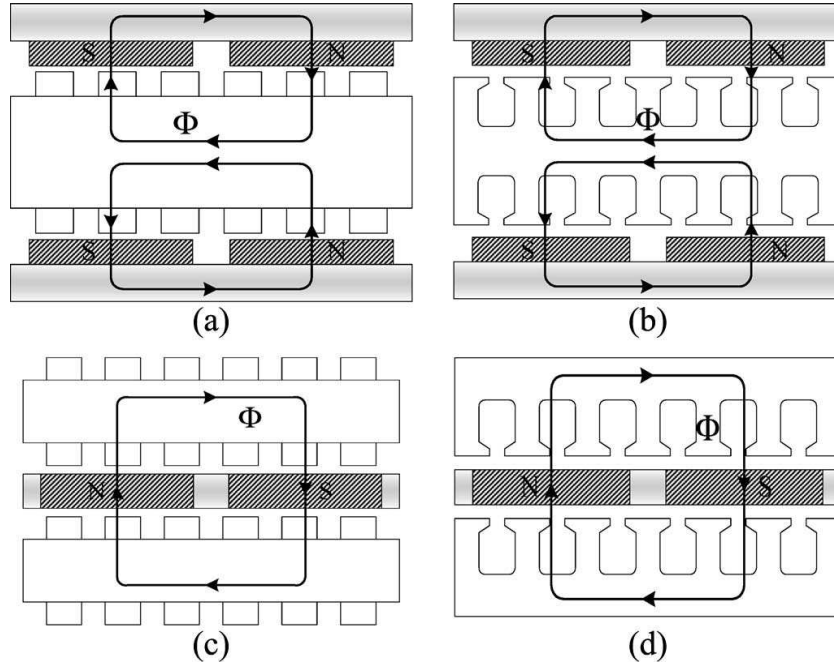
Şekil 3.4 Stator dengeli tek kenarlı aksel akılı motor [57]

3.4.3 Rotor Dengeli Tek Kenarlı Eksenel Akılı Makine Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

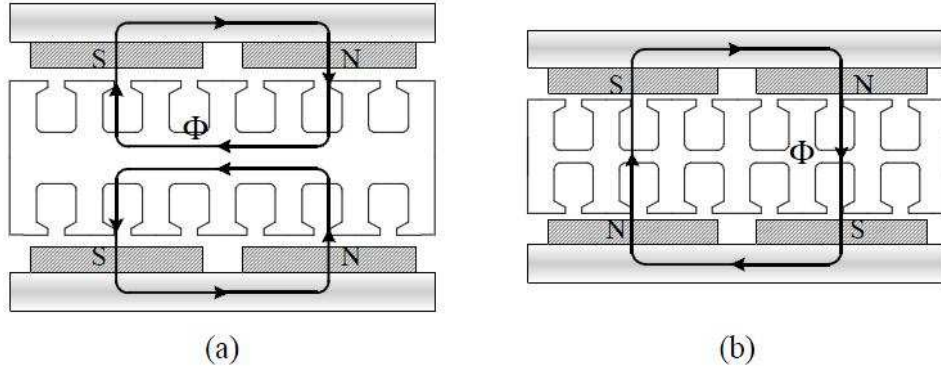
Yapı olarak stator dengeli tek kenarlı eksenel akılı motorlara benzemektedir. Sadece burada çekme kuvveti dengesi, ek stator yerine ek yüzey mıknatıslı rotor eklenerek sağlanır. Bu yapıya sahip makinelerde stator dengeli motorlara göre daha fazla malzeme kullanılır.

3.4.4 Çift Kenar Yapısına Sahip Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

Bu yapılar tek kenarlı eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlara göre daha avantajlı olup, moment kalitesi ve yoğunluğu daha iyidir. Bu yapıya ait eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor tipleri Şekil 3.5’de verilmiştir [46].



Şekil 3.5 EASM yapıları (a,b) oluksuz ve oluklu TORUS (c,d) oluksuz ve oluklu AFIR [54] AFIR olarak adlandırılan makine iç rotor dış stator, TORUS olarak adlandırılan makine iç stator dış rotor yapısındadır. Çalışmamızda TORUS tip eksenel akılı motor kullanılmıştır. Bu motor mıknatısların yerleşimine göre TORUS-NS ve TORUS NN olarak isimlendirilir [47],[48]. Çalışmamızda kullanılan motor, Şekil 3.6 b’de görülen TORUS-NN yapısındadır.

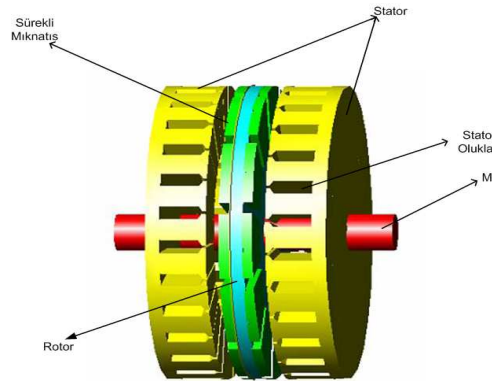


Şekil 3.6 EASM TORUS tip motorların akı yolları (a) TORUS-NN (b) TORUS-NS [11]

NS tip torus makineler diğer motorlara göre yüksek verim ve güç yoğunluğu oranına sahiptir. Ayrıca moment yoğunluğu bakımından da bu motorlar diğerlerine göre daha yüksek değerler vermektedirler. NN tip Torus motorlar, NS tip Torus motorlardan sonra en yüksek verimlilik, güç yoğunluğu ve moment yoğunluğu oranına sahiptir. AFIR tip motorlarda stator sargı sonlarının fazla olmasından dolayı verimliliği biraz düşer. Ayrıca bakır kayıpları da artar. Bunun yanında rotor yapılarındaki nüvenin daha az olması sayesinde ağırlık bakımından daha hafif olması sağlamıştır [49].

3.4.5 Çift Stator Oluklu Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar

Bu motor tipinin kesiti Şekil 3.7'da gösterilmektedir. Şekil olarak benzerliğinden dolayı bu motorlar pancake makine olarak da adlandırılmaktadır. İki dış statora ve bir iç rotora sahiptir. Miknatıslar rotor yüzeyine yerleştirmeli veya içe gömülü olabilir. Stator demir nüvesi radyal yönde lamine edilir ve konik dişli, sabit oluk aralığına sahip eşmerkezli halkalara benzer.



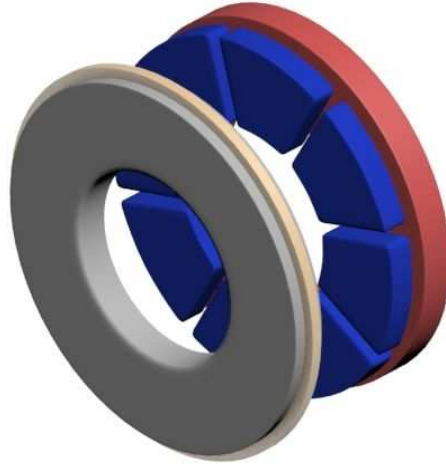
Şekil 3.7 Çift statorlu eksenel akılı sürekli miknatıslı senkron motor [57]

3.4.6 Çift Rotor Oluklu Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

Yapı olarak çift stator oluklu eksenel akılı motora benzemektedir. Sadece bir stator iki rotora sahiptir. Stator iki rotor arasına yerleştirilmiştir. Rotor boyunduruğu üzerinde demir kısma akı yoğunluğu için ihtiyaç duyulur. Fakat stator boyunduruğu elimine edilebilir.

3.5 Eksenel Akılı Motorlarda Rotor ve Stator Yapıları

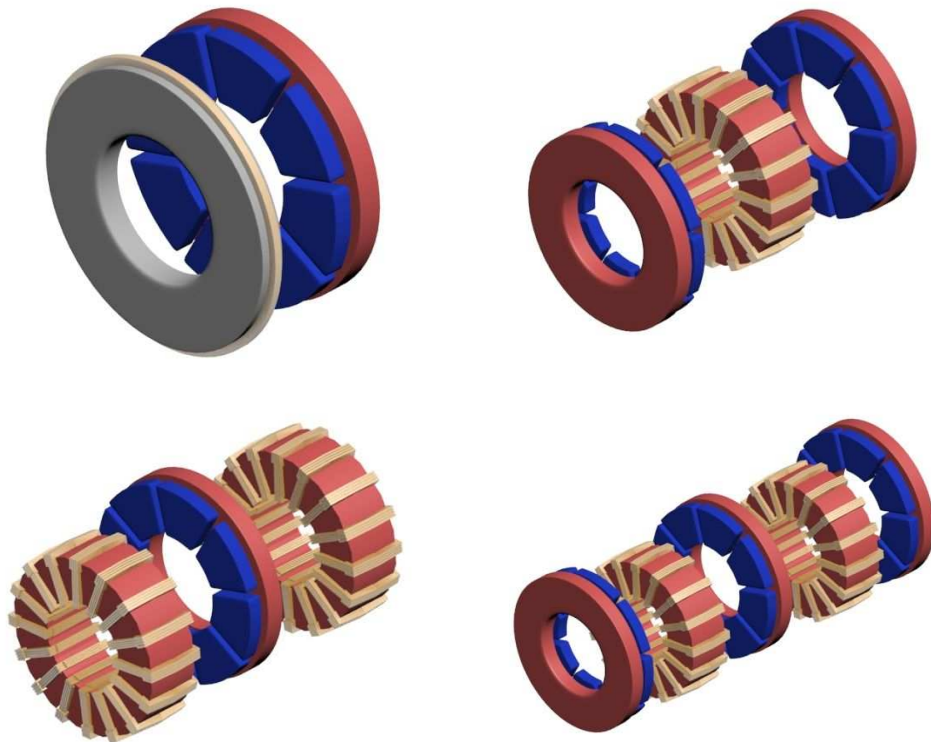
Eksenel akılı motorlarda rotor diskleri som demirden yapılır. Bir tarafına Şekil 3.8’de mavi renkli görülen mıknatıslar özel bir madde ile yapıştırılır veya vidalanır. Bu mıknatıslar nadir toprak mıknatıs (rare earth) diye adlandırılan mıknatıs yapılarıdır. Mıknatıslar merkezleri diskin merkezi olacak şekilde yay şeklinde yapılır. Ancak uygun tasarım ölçütlerinden dolayı mıknatısların kenarları birbirine paralel olacak şekilde de yapılabilir.



Şekil 3.8 Yüze monte mi knatıslı rotor ve stator

Makinenin statoru, spiral bir tarzda sarılmış lamine demir tabakasıyla oluşturulur. Farklı tür stator ve rotor yapıları Şekil 3.9’da görülmektedir. Bu yapıda lamine tarzda sarılmış statorda oluk yapısı tamamen açık olarak tasarlanmıştır ve sargının bu olukların içine sarılması sağlanmıştır. Tezde üzerine çalışılan motordaki stator üretim kolaylığı ve düşük maliyet avantajlarından dolayı açık oluk yapısındadır. Oluk açma işlemi bu tip statorlar için masraflı ve zahmetli bir iş tir. Demir nüvenin kesiminde büyük problemler yaşanabilir. Eğer çok hassas olarak kesilmezse lamineler arasında kısa devreler

oluşabilir. Ayrıca düzgün olmayan oluk yüzeyi oluk izolasyonuna zarar verebilir. Bunlardan dolayı çok hassas lazerli kesim makineleri tarafından kesimler yapılmalıdır. Bu yöntem stator üretmek için pahalı bir tekniktir. Diğer bir teknikte belirli bir kalıpta statoru oluşturmaktır. Statoru oluklarıyla beraber oluşturduktan sonra, oluklar yalıtım malzemesi ile kaplanır. Daha sonra da sargılar stator olukları arasını çevreleyecek şekilde sarılır. Yine zahmetli işlemlerle sargılar oluğun içerisine yerleştirilir. Sonrasında bunlara epoxy reçinesi emdirilir ve stator yapım işlemi bitirilmiş olur. Bu şekilde de sargıları ile beraber oluklu bir stator oluşturulmuş olur.



Şekil 3.9 Çeşitli yapılarıdaki eksenel akılı motor yapıları

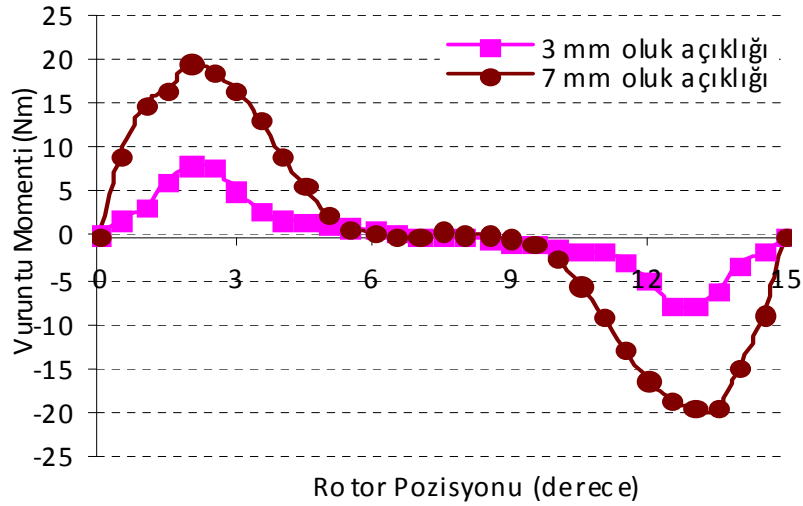
3.6 Tezde Kullanılan TORUS NN Tipi Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

Bu çalışmadaki analizlerde Yolacan vd. [50] tarafından yapılan çalışmada detayları verilen 24 oluklu, 8 kutuplu, 2 rotor - 1 statorlu, eksenel akılı, statoru silisli lamineli, rotoru ise bir disk ve yüzeye yerleştirilmiş 140 derece mıknatıs adımlı fan tipi mıknatıslardan oluşan sürekli mıknatıslı motor referans olarak kullanılmıştır. Bu yapıda vuru momentini azaltmak için herhangi bir teknik uygulanmamıştır. Ancak analizleri

yapılan motor yapısında, rotor düzenlemeleri için Yolacan vd. [50] tarafından yapılan çalışmadan farklı olarak statorda açık oluk yapısı üzerine çalışılmak için oluk açıklıkları 7mm yapılmıştır. Motor yapısında oluk açıklığının artması ile ortaya çıkan vurutu momentinin Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi yaklaşık 2,5 kat arttığı görülmüştür. Çalışmada kullanılan referans motorun parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 EASM Referans Motorun Parametreleri

| | | |
|--------------------------|-------------------------|------|
| Stator dış yarıçapı | 89 mm | |
| Stator iç yarıçapı | 50 mm | |
| Mıknatıs kalınlığı | 7.2 mm | |
| Stator aksenal kalınlığı | 22 mm | |
| Oluk / kutup / faz | 1 | |
| Kutup sayısı | 8 | |
| Hava aralığı | 0.8 mm | |
| Faz sayısı | 3 | |
| Oluk sayısı | 24 | |
| Oluk Açıklığı | Stator çalışmaları için | 3 mm |
| | Rotor çalışmaları için | 7 mm |



Şekil 3.10 Referans yapıların vurutu momentini değişimleri

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ ve MODELLENMESİ

Sonlu elemanlar analizi (SEA), elektrik mühendisliğinde; magnetik alanların incelenmesinde, elektrik makinelerinin davranış hesaplarında ve modellenmesinde, makine mühendisliğinde; termik ve hidrolik problemlerin çözümünde, eğilme, burulma ve kırılma incelemelerinde, inşaat mühendisliğinde; mekaniki dayanım için kuvvet hesaplamalarında çok kullanılan bir yöntemdir. Elektrik makinelerinin incelenmesinde ve imalat öncesi tasarımlarında da bu yöntemden faydalanılmaktadır. Bir motorun boşta veya yükte üretebileceği moment ve akı dağılımları, motorun fiziksel boyutları ve kullanılacak malzemenin özelliklerine göre hesaplanabilir.

Sonlu elemanlar analizi 1940'lı yıllarda önerilmiş ve 1950 yıllarda uçak tasarımında kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin magnetik devrelere uygulanması 1970'li yıllarda başlamıştır. Bu konu ile ilgili göze çarpan ilk çalışmalar; Silvester tarafından yapılan, doyumlu magnetik alan problemlerinin sonlu elemanlar analizi ile incelenmesidir. 1971'de Chari ve Silvester tarafından elektrik makinelerinde elektro magnetik alan problemlerinin doğrusal olmayan varyasyon formülasyonunun çözümü yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile herhangi bir elektrik makinesinin geçici, kompleks ve statik incelemesi yapılabilir. Elektrik makinelerinin imalat öncesi tasarımlarında da bu yöntemden faydalanılmaktadır. Aynı şekilde bir motorun boşta veya yükte üretebileceği moment ve akı dağılımları, motorun fiziksel boyutları ve kullanılacak malzemenin özellikleri değiştirilerek elde edilip, yapılan inceleme sonuçlarına göre en ekonomik ve en iyi davranış sağlayan motor tipi belirlenebilir.

Böylece hem zamandan hem de imalat öncesi yapılan model üretme harcamalarından kazanç sağlanmaktadır.

Bunun yanı sıra kontrol teknolojisinde motorun doğru modellenmesi son derece önemli olup literatürde geniş yer almaktadır. Bir motorun modellenmesi iki şekilde yapılır. Birinci yöntem genel elektrik makine teorisi kullanılarak bir eşdeğer devre oluşturmaktır, ikinci yöntem ise magnetik alan dağılımının elde edilmesi için sayısal incelemelerle yapılan modellemedir. Eşdeğer devre veya analitik modelde motoru basitleştirme varsayımları kullanılır. Bu basitleştirme varsayımları doğrusal magnetik malzemeler, basitleştirilmiş diş/oluk ve stator/rotor geometrisi, ideal olarak kabul edilen bir geometri ve makine sargılarının dağılımıdır. Sayısal inceleme yöntemlerinden biri olan Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile makine sargılarının gerçek alan dağılımı, geometrinin detayları, magnetik materyallerin doğrusal olmayan magnetik geçirgenliği hesaba katılarak daha doğru bir modelleme yapılır. Özellikle son yıllarda SEA bulgularının motorların kontrolünde kullanılması konusuna literatürde geniş yer verilmektedir [51],[52].

4.1 Sonlu Elemanlar Analizinin Teorisi

Sonlu elemanlar analizi, Laplace ve Poisson tipi kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümlerinde kullanılan bir yöntemdir. Çözüm için yapılan işlemlerin çok fazla olması nedeniyle bir bilgisayar programı kullanılır. Laplace ve Poisson denklemlerinin bu yöntemle çözümü, denklemin doğrudan çözümü yerine, çözümü sağlayan işlevin sisteme ait enerji fonksiyoneli minimize eden değerleri bulmakla yapılır. Deneme fonksiyonu oluşturmada genellikle Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılır.

Statik elektrik alan probleminin çözümü, Laplace denklemi olarak bilinen;

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (4.1)$$

ikinci mertebeden bir homojen diferansiyel denklemin çözümünü gerektirir. Sonlu elemanlar yöntemi bu denklemi;

$$W = z \iint \left\{ \frac{1}{2} \left[\epsilon_x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \epsilon_y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx.dy \quad (4.2)$$

elektriksel enerji denkleminin çözüm bölgesi içinde en küçük değere indirgenmesi (minimizasyon) ilkesi ile çözer. Çünkü bu yolla bulunan çözüm, Laplace denkleminin de aranan çözümüdür. Bu bağıntılarda $V = V(x, y, z)$ elektriksel potansiyeldir.

Problem aksenel simetriye sahip değildir. Bu nedenle çözümde kartezyen koordinatlar kullanılabilir. Bunun için sözü edilen bölge sonlu elemanlara bölünür. Buna bölgenin ayrıklaştırılması denir. Bölmelemede, yani problemi sonlu elemanlara ayırmada genellikle üçgen elemanlar kullanılır. Sonra sınır koşulları ve malzeme özellikleri kullanılarak her bir eleman için de geçerli olduğu kabul edilen birinci dereceden polinomsal yaklaşım işlevleri ile eleman denklemleri ve problemin birleşik (genel) denklemi elde edilir. Elde edilen denklem, matris olarak bol sıfırlı (seyrek), büyük boyutlu bir doğrusal denklem takımıdır. Bu doğrusal denklem takımı yinelemeli bir sayısal çözüm yöntemi ile çözümlenerek üçgen elemanların köşe (düğüm) noktalarının potansiyelleri bulunur. Potansiyel değerlerine bağlı olarak eleman potansiyel yaklaşım işlevleri ile herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektrik alan değerleri bulunabilir. [53]

4.2 Ritz Yöntemi

Sınır değer problemine yaklaşık çözüm bulabilmek için bir çeşit ayrıklaştırma hemen hemen her zaman gereklidir. Bunun için verilen sınır koşulları altında temel diferansiyel denklemi minimum yapan bir ifadeye ihtiyaç duyulur. Bu ifadeyi tanımlayan yöntem Ritz yöntemi denir. Ritz yöntemi varyasyonel bir yöntemdir. Varyasyonel işlemde işlevsel minimum yapan işlev aranır. Bu işlev problemin çözümü olan işlevdir. Örneğin statik elektrik alanında elektrik alan şiddeti koordinatların işlevidir.

Bu yöntemde göre işlevsel öncelikle bulunmalıdır. Eşitlik (4.3)'de işlevsel formülü gösterilmektedir.

$$v = \sum_{j=1}^n k_j V_j = \{k\}^T \{V\} = \{V\}^T \{k\} \quad (4.3)$$

Burada V_j bütün bölgede tanımlanmış seçilen açılım işlevleri ve k_j 'ler de belirlenecek katsayılardır. Herhangi bir L diferansiyel denklemin işlevselini yazarsak,

$$\Phi(v) = \frac{1}{2} \{k\}^T \int_{\Omega} \{\zeta\} \Lambda \{\zeta\}^T \delta\Omega \{k\} - \{k\}^T \int_{\Omega} \{\zeta\} \phi \delta\Omega \quad (4.4)$$

elde edilir. $\Phi(v)$ 'yi minimum yapmak için k_i 'lere göre minimum kısmi türevleri alınır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial k_i} &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} V_i L \{V\}^T d\Omega \{k\} + \frac{1}{2} \{k\}^T \int_{\Omega} \{V\} L V_i d\Omega - \int_{\Omega} V_i f d\Omega \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n k_j \int_{\Omega} (V_i L V_j + V_j L V_i) d\Omega - \int_{\Omega} V_i f d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Bu bağlantı aşağıdaki gibi matrisel biçimde yazılabilir;

$$[K] \{V\} = \{B\} \quad (4.6)$$

Burada K matrisi,

$$k_{ij} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (V_i L V_j + V_j L V_i) d\Omega \quad (4.7)$$

ve $\{B\}$ matrisinin terimleri,

$$b_i = \int_{\Omega} V_i f d\Omega \quad (4.8)$$

şeklinde verilir. $[K]$ matrisi simetrik bir matristir.

4.3 Sınır Koşulları

Sınır koşulları üç grupta toplanır:

a) Dirichlet sınır koşulu: Bu koşulda potansiyel fonksiyonu $\phi(s)$ sınırın belirli bir kısmında veya bütün sınır boyunca belirli bir değerdedir. Eğer sınır koşulu sıfır ise, buna homojen Dirichlet sınır koşulu denir.

b) Neumann sınır koşulu: Sınıra dik doğrultuda gelen akı yoğunluğu ile ilgili bir sınır koşuludur. Eğer ortam izotropik ise sınıra dik doğrultuda gelen akı genel olarak eşitlik (4.9) ile ifade edilir.

$$K(s) = \frac{\partial \phi}{\partial n} = H(s) \quad (4.9)$$

Burada n , sınır dışına doğru birim vektörü göstermektedir. Bu ifade çözüm bölgesindeki alandan bağımsızdır. $H(s)=0$ olması haline homojen Neumann sınır koşulu denir.

c) Karışık sınır koşulu: Sınırdaki bulunan iletken bir malzeme sınıra normal doğrultuda gelen akıyı etkiler. Sınırdaki bu değişimler doğrusal değişimler ise bu sınır koşulu genel olarak eşitlik (4.10) ile ifade edilir.

$$K(s) = \frac{\partial \phi}{\partial n} = \sigma(s)(\phi_0(s) - \phi(s)) \quad (4.10)$$

Burada $\sigma(s)$ sınırdaki elektriksel iletkenlik fonksiyonunu göstermektedir. Bu sınır koşulu yeniden düzenlenerek eşitlik (4.11) yazılırsa, daha önceki koşulları da içeren bir bağıntı elde edilir.

$$K(s) \frac{\partial \phi}{\partial n} + \sigma(s)\phi(s) = \sigma(s)\phi_0(s)$$

$$K(s) \frac{\partial \phi}{\partial n} + \sigma(s)\phi(s) = h(s) \quad (4.11)$$

4.4 Poisson Denklemlerinin Elde Edilmesi

Magnetik alan problemlerinde Maxwell denklemleri kullanılır.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (4.12)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.14)$$

$$v = \frac{1}{\mu} \quad (4.15)$$

H : Magnetik alan şiddeti, B : Magnetik indüksiyon, μ : Magnetik geçirgenlik, J : akım yoğunluğu, v : Magnetik direnç.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.16)$$

\vec{A} magnetik vektör potansiyelidir. Eşitlik (4.12)'de \vec{H} yerine eşitlik (4.13) konulduğunda Eşitlik (4.17) elde edilir. Bu denklemde B yerine eşitlik (4.16)

konulduğunda eşitlik (4.18) elde edilir. Bu eşitlik (4.19)'da düzenlendiğinde Poisson denklemi elde edilir.

$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J} \quad (4.17)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \vec{A}) = -\vec{J} \quad (4.18)$$

$$\nu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = \vec{J} \quad (4.19)$$

İki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelemesi yapılırken eşitlik (4.19)'daki \vec{J} akım yoğunluğu z ekseninde olduğu için, magnetik vektör potansiyel $\vec{A} = (x, y) = \vec{A}_z(x, y)$ olur.

4.5 Kaynak Fonksiyonlarının Girilmesi ve Çözüm

Magnetik alan problemlerinde sonlu elemanlar yöntemi ile inceleme yapılırken kaynak fonksiyonu olarak akım yoğunluğu kullanılır. Akım bakır bölgeye uygulandığından, bölmelendirme sırasında bakır bölgede bulunan elemanlar belirlenmelidir. Bakır bölgede bulunan üçgenlerin her biri için eşitlik (4.20) yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{im} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_i \\ A_j \\ A_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 \\ 1/3 \\ 1/3 \end{pmatrix} \Delta_n J \quad (4.20)$$

Demir bölgede de girdap akımları aynı şekilde ifade edilir. Ayrıca sürekli mıknatıslar da bir elektromıknatis olarak modellendiği için bir akım yoğunluğuna sahiptir. Bakır bölgede geçen akım kompleks olduğunda çözüm karmaşık sayılı bir denklemin çözümü olacaktır. Hava bölgesinde, bakır bölgesinde bulunan üçgenler hariç diğer üçgenler için eşitlik (4.20)'nin sağ tarafı sıfır alınır. Bu durumda Poisson denklemi Laplace denklemi haline gelecektir. Elde edilen Poisson denkleminde magnetik geçirgenlik doymadan dolayı \vec{A} vektör potansiyelin bir fonksiyonudur. Bu, Poisson denkleminin doğrusal olmamasına neden olur. Çözüm yapılırken \vec{A} vektör potansiyel değerleri bulunduktan sonra B değerleri (4.21)'de verilen ifadeler ile hesaplanır.

$$B(x,y) = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & A(x,y) \end{pmatrix}$$

$$B_x = \frac{\partial A_z(x,y)}{\partial y} \quad B_x = \frac{1}{2\Delta} \left[(c_i A_i + c_j A_j + c_m A_m) \right]$$

$$B_y = \frac{\partial A_z(x,y)}{\partial x} \quad B_y = \frac{1}{2\Delta} \left[(b_i A_i + b_j A_j + b_m A_m) \right] \quad (4.21)$$

Akı yoğunluğunun genliği ise eşitlik (4.22)'deki gibi bulunur.

$$B(x,y) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (4.22)$$

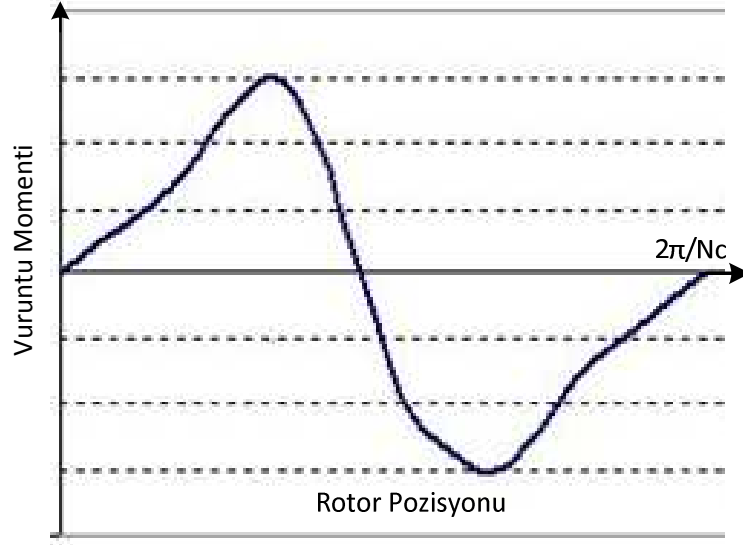
Bulunan B değerleri kullanılarak her bir sonlu eleman için tasarımda kullanılan ferromagnetik malzemenin B-H eğrisinin matematiksel modelinden magnetik geçirgenlik değerleri bulunur. Bulunan magnetik geçirgenliğe göre tekrar çözüm yapılır. Çözümde elde edilen B değerleri veya A değerleri bir önce hesaplanan değerlerle karşılaştırılır. Aralarında kabul edilebilir bir fark oluncaya kadar bu işleme devam edilir.

4.6 Sonlu Elemanlar Analizi ile Vuruntu Momenti Analizi

Vuruntu momenti gibi istenmeyen moment bileşenini azaltmak ya da tamamen ortadan kaldırmak için ya analitik modeller ya da zaman alıcı sonlu elemanlar metodu kullanılmalıdır. Bu bölümde vuruntu momentinin teorisi ve analizi anlatılmıştır.

4.6.1 Vuruntu Momentinin Teorisi

Vuruntu momenti, mıknatıslardan kaynaklanan EMF harmonikleri ile statordaki oluklardan kaynaklanan magnetik iletkenlik harmoniklerinin etkileşiminden doğar. Motor uyarılmasa bile, sabit konumları hizalamak için rotor eğilimi ile vuruntu momenti kendini gösterir ve toplam momente katkıda bulunmayan titreşim momentini oluşturur. Özellikle hafif yük ve düşük hızlarda, hız dalgalanmaları ve titreşmelere neden olduğundan, vuruntu momentinin azaltılması önemli tasarım amaçlarından. Tipik bir vuruntu momentinin eğrisi Şekil 4. 1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Vuruntu momentinin dalga formu

Tam kutup adımına sahip bir motorun vuruntu momentini a) dişlerin merkezi ile kutuplar arası eksenler aynı hizada olduğunda, b) olukların merkezi ile kutuplar arası eksenler aynı hizada olduğunda, sıfıra eşit olur. Ancak sürekli olarak mıknatıs, enerjinin maksimum olarak depolandığı pozisyon etrafında konumlanma eğiliminde bulunur. Bu pozisyon; a) kutuplar arası kaçak akı yolu minimum olduğunda kararlı denge pozisyonuna, b) kaçak akı yolları oluk açıklığı içerdiğinde kararsız denge pozisyonuna karşılık gelmektedir. Vuruntu momentinin dalga şeklindeki pozitif ve negatif uç noktaları yaklaşık olarak kutuplar arası eksenler ile olukların kenarlarının aynı hizada olduğu duruma karşılık gelir [62].

Vuruntu momentini; eşitlik 4.23'de ki gibi açıklanabilir.

$$T_{\text{cog}} = \sum_{i=1,2,3,\dots}^{\infty} K_{sk} T_i \sin i N_c \theta \quad (4.23)$$

Burada; N_c oluk sayısı Q_s ile kutup sayısı $2p$ nin en küçük ortak katı, θ ise stator ve rotor arasındaki açı olup K_{sk} kayk faktörü şu formülle verilir:

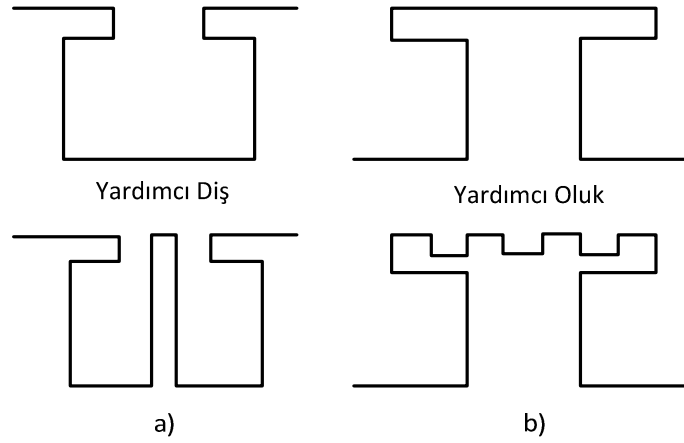
$$K_{sk} = \frac{\sin(i N_c \pi \alpha_{sk} / Q_s)}{i N_c \pi \alpha_{sk} / Q_s} \quad (4.24)$$

Eşitlik 4.24'de bulunan α_{sk} toplam çembersel kaykının oluk adımına oranıdır. Genelde en küçük ortak kat olan N_c nin büyük, kutup veya olukların sayısının küçük olması

vuruntu momentinin genliğini düşürür. Bunun yanında Q_s ve $2p$ nin seçimine yardımcı olmak amacıyla ortaya çıkan C_T faktörü kutup ve oluk sayısı kombinasyonunun iyileşmesini sağlar. C_T faktörü büyüdükçe vuruntu momentinin genliğinin büyüdüğü görülmüştür. Çift sayıda oluk sayısına sahip bir motorun tek sayıda oluk sayısına sahip motora göre 2 kat fazla vuruntu momentine sahip olduğu bilinmektedir. Bunun nedeni çift kutup sayılı yapıda, kutup kenarlarının dişlerle aynı görel konuma sahip olmasıdır.

$$C_T = \frac{2pQ_s}{N_c} \quad (4.25)$$

Kutup ve oluk sayısı kombinasyonunun etkisinin bilinmesi, yardımcı diş ve/veya olukların kullanılarak vuruntu momentinin azaltılmasını mümkün kılar. Buna rağmen olukların sayısı her zaman için C_T değerini azaltacak şekilde seçilmelidir.



Şekil 4.2 Yardımcı diş ve oluğun gösterimi a) yardımcı diş b) yardımcı oluk

Mıknatıs adımı, vuruntu momentinin seviyesinin belirlenmesinde önemli rol oynayan bir parametre olup, magnetik saçaklanma ihmal edildiği zaman mıknatıs adımı/kutup adımı oranının optimum olduğu durum için bulunur. Vuruntu momentinin temel bileşenini minimuma indirmek için herhangi bir oluk-kutup sayısı kombinasyonunda ($N=N_c/2p$) olduğunda;

$$\alpha_p = \frac{N-N_1}{N}, \quad k_1 = 0,1,2,\dots,N \quad (4.26)$$

Pratikte magnetik akının oluklara doğru saçaklanmasından dolayı k_2 faktörü ortaya çıkar ve bu faktör α_p değerini az da olsa arttırır;

$$\alpha_p = \frac{N-N_1}{N} + k_2, \quad k_1 = 0,1,2,\dots,N-1 \quad (4.27)$$

Hava aralığının uzunluğunun değişmesine bağlı olarak k_2 nin değeri 0.01 den 0.03'e kadar değişir. Buna bağlı olarak $k_1= 1,2, \dots, N-1$ şeklinde tekrar tanımlanır. Mıknatısların tamamıyla kutup arkına sahip olması durumunda minimum vuruuntu momenti daha da azalamayacağından $k_1=N$ ifadesi gerçekçi değildir. Hava aralığındaki akıyı ve dolayısıyla momenti arttırmak yerine, mıknatıs adımı/kutup adımı oranı olabildiği kadar maksimum seçilmelidir. Bu yüzden pratikte $k_1=1$ bir başka ifadeyle $\alpha_p=(N-1) / N + k_2$ genelde tercih edilen değerdir. Eşitlik 4.27 mıknatıs adımı/kutup adımı oranının optimum olmasının oluk-kutup sayısı kombinasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Mıknatıslardaki veya oluklardaki kaykının vuruuntu momentinin seviyesini düşürdüğü ve iyi bilinmektedir. Vuruuntu momentinin temel düzeni, kutup-oluk sayısının en küçük ortak katlarının tamsayı olması ile sağlanır.

$$\frac{N_c \alpha_{sk}}{Q_s} \quad (4.28)$$

eşitlik 4.28 herhangi bir tamsayıyı ifade ederse ve kayk bir oluk adımından daha az şekilde sınırlandırılırsa, vuruuntu momentini ortadan kaldıran kayk;

$$\alpha_{sk} = \frac{k.Q_s}{N_c}, \quad k_1 = 0,1,2,\dots, \frac{N_c}{Q_s} \quad (4.29)$$

şeklinde ifade edilir.

Stator oluk açıklığının vuruuntu momenti üzerindeki etkisi azımsanamayacak derecededir. Bütün incelemelerde stator oluk açıklığının artmasıyla vuruuntu momenti arttığı görülmüştür.

4.6.2 Vuruuntu Momentinin Azaltılması için Kullanılan Analitik ve Nümerik Yöntemler

Vuruuntu momenti tasarım aşamaları arasında elektromagnetik tasarım sürecinde hesaba katılmalıdır. Elektromagnetik tasarım kendi içerisinde motor modeli, optimizasyon, 2 ya da 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi gibi uzun, yorucu ve zaman alıcı aşamalardan ibarettir. Vuruuntu momenti gibi istenmeyen moment bileşenini azaltmak ya da tamamen ortadan kaldırmak için ya analitik modeller ya da zaman alıcı

sonlu elemanlar metodu kullanılmalıdır. Bu moment bileşenini azaltıcı analitik modeller radyal akılı sürekli mıknatıslı (RASM) motorlar için oluşturulmuştur. EASM disk motorlar için bu modeller henüz oluşturulmadığından, vuruuntu momentinin elektromagnetik tasarım aşamasında sonlu elemanlar analizi kullanılarak en aza indirgenmesi gerekir.

Vuruuntu momenti ister analitik, ister sonlu elemanlar yöntemi ile belirlensin, Fourier serisi ile tanımlanabilir ve sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilir. Vuruuntu momentinin değişimi 2D ya da 3D SEA kullanılarak elde edilebilir. Motor sargıları enerjisizken rotor döndürülerek elde edilen moment değerleri vuruuntu momentini verecektir. Farklı makine modelleri yüklü ve yüksüz analizde kullanılıp vuruuntu momenti, ortalama moment ve endüklenen gerilim gibi farklı hedefler için sonuçlar elde edilir. Tez kapsamında Maxwell 3D yazılım paket programı kullanılmıştır.

4.7 Maxwell ile Vuruuntu Momentinin Analizi

Bu bölümde, elektromagnetik analizde kullandığımız Maxwell 3D yazılım paket programı ve Torus NN tipi eksenel akılı motorun sonlu elemanlar analiziyle vuruuntu momenti elde etme aşamaları anlatılmıştır. Makinenin modellenmesi, makine bileşenlerinin yapılarının belirlenmesi ve çözüm aşamasına kadar yapılanlar belirtilmiştir.

Eksenel akılı motorun elektromagnetik tasarımını gerçekleştirebilmek için yapılması gereken simülasyonlar için sonlu elemanlar analizi (SEA) metodu kullanılır. Sonlu elemanlar analizi karmaşık elektromagnetik alan problemlerini çözmek için sayısal bir metottur. Özellikle lineer olmayan malzeme yapıları için oldukça elverişlidir. Bu programla 2D veya 3D analizler yapılabilir. Bu analizlerin çalışma şekli 2D analiz için motor kesitinin, 3D analiz için ise motor hacminin üçgensel olarak daha küçük alanlara veya hacimlere bölünmesiyle gerçekleşir. Herhangi bir motorda, motor boyunca magnetik potansiyelinin değişimi, doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Bu diferansiyel denklemler Maxwell denklemlerinden ortaya çıkar ve akı, alan yoğunluğu ve yön gibi önemli alan ölçütlerinin yer aldığı vektör potansiyelleri açısından belirlenebilir.

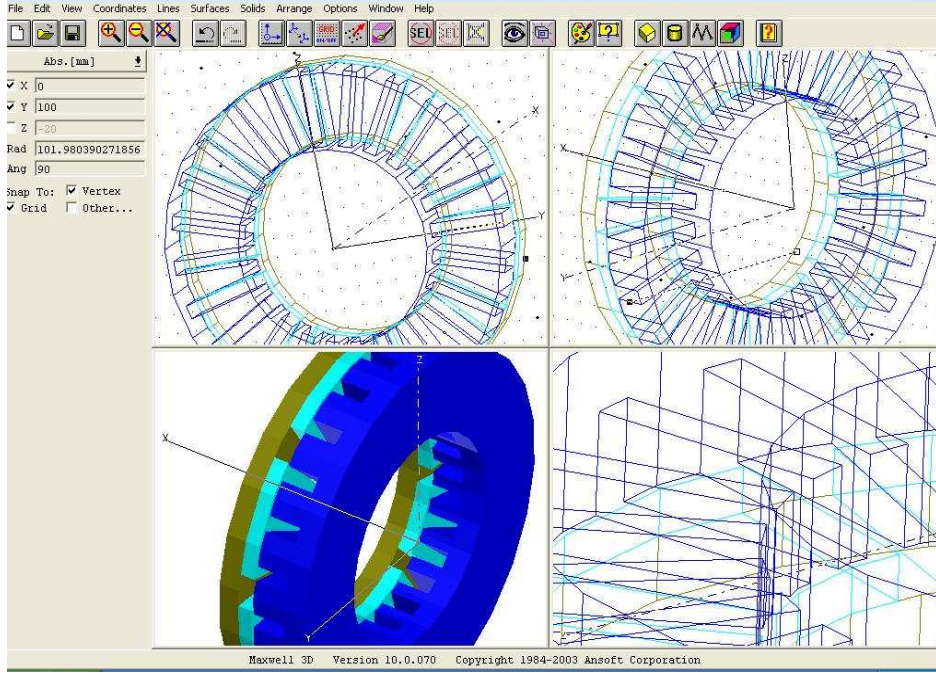
4.8 Eksenel Akılı Makinenin Modellenmesi ve Maxwell Kullanarak Vuruntu Momenti Tespit Aşamaları

Öncelikle analizi gerçekleştirilecek modelin çizimi için Draw kısmı açılır. Burada modelin 3 boyutlu görünüşünün yanı sıra 2 boyutlu görünüşlerinden yararlanılarak model çizilir. Çizim işlemi tamamlandıktan sonra Setup Materials kısmında çizilmiş olan modelin malzemeleri ayrı ayrı seçilir. Tasarlanacak olan makinenin mıknatısları için NdFe35 mıknatıs yapısı seçilmiştir ve özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu mıknatıs güçlü çekim gücüne sahip nadir toprak element adı verilen Neodmiyum-Demir-Bor (NdFeB) türü mıknatıslardandır.

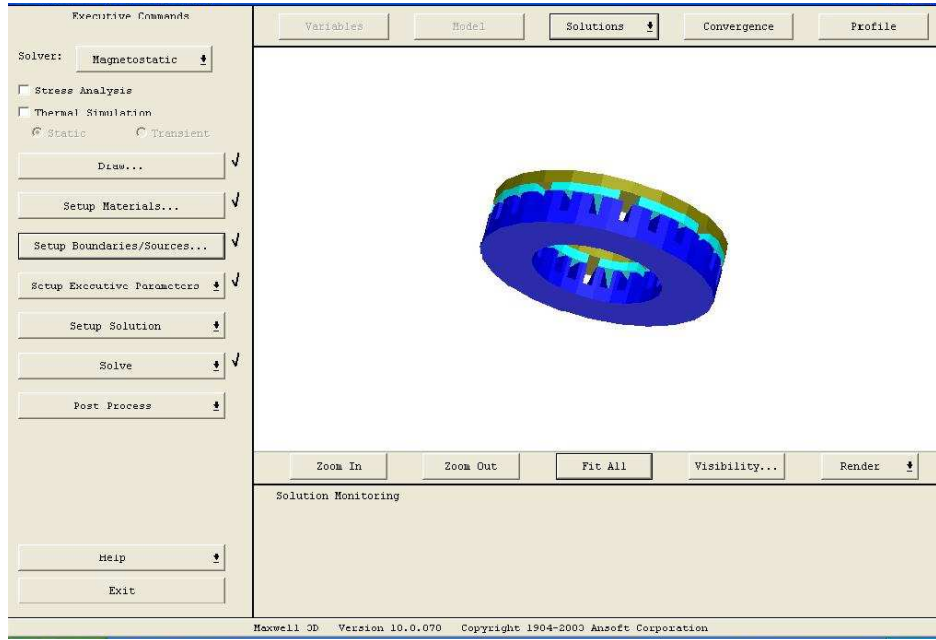
Çizelge 4.1 Kullanılan mıknatıs yapısının datası

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Geçirgenliği | 1.0997785406 |
| İletkenliği | 6.25e+005 siemens/metre |
| Artık mıknatıslanma (Hc) | -8.9e+005 amper/metre |
| Mıknatıs akı yoğunluğu (Br) | 1.23 Tesla |

Setup Executive Parameters kısmından mıknatısların akılarının yönleri tanımlanır. Daha sonra incelenecek motorun vuruntu momentini elde etmek için önce setup solution menüsündeki options içeriğinden yapılacak analizin adım sayısı belirlenir. Adım sayısını arttırdıkça daha etkin ve daha kararlı analiz sonuçları elde etmek mümkündür. Fakat analizlerin uzun sürmesi ve bir noktadan sonra vuruntu momenti değerlerinin sabit bir değer etrafında değişmesi ve kararlı bir hal alması, optimum bir analiz aralığı seçmemizi gerektirir. Mevcut motor vuruntu momentini bulmak için motor yapısında bulunan stator ya da rotor yapısından herhangi biri döndürülerek, mıknatısın ve olukların etkileşimi sağlanır. Stator yapısında 24 adet oluk bulunmaktadır. Dairenin 360 derece açı değerinin statorun 24 adet oluk sayısına bölersek, 15 derece mıknatıs-oluk rotasyon aralığı elde ederiz. Her 15 derece açı değişiminden sonra vuruntu momenti aynı değeri almaktadır. Bu işlemleri yapmak için çizim menüsünden select butonu seçilir, bu şekilde stator ya da rotoru sabitledikten sonra arrange menüsünden rotate butonu seçilir. Seçtiğimiz kısmı 0.5 derece döndürerek, farklı aralık ve mıknatıs pozisyonları için vuruntu momenti değerleri edilmiş olunur.



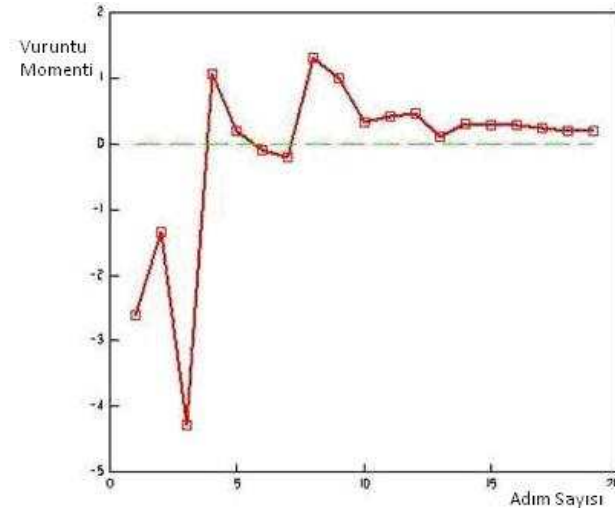
Şekil 4.3 TORUS NN tipi makinenin Maxwell 3D kullanılarak modellenmesi



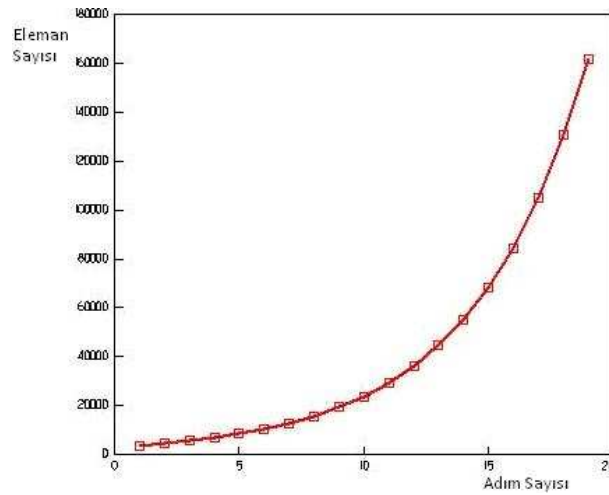
Şekil 4.4 Maxwell programının çözüm ekranı

Analiz işlemlerini tamamladıktan sonra convergence display menüsünden, vuru mu momenti değerlerini, ağ yapısında kullanılan eleman sayısını, toplam enerji değerini görebiliriz. Şekil 4.5’den analiz adımları art tı kça daha kararlı ve düzgün değerler elde edildiği görülmektedir. Vuru mu momenti için başlangıçta çok farklı değerler

oluşmuştur. Adım sayısı arttıkça vuruğu momenti sonuçlarının belli bir değere oturduğu görölmektedir.

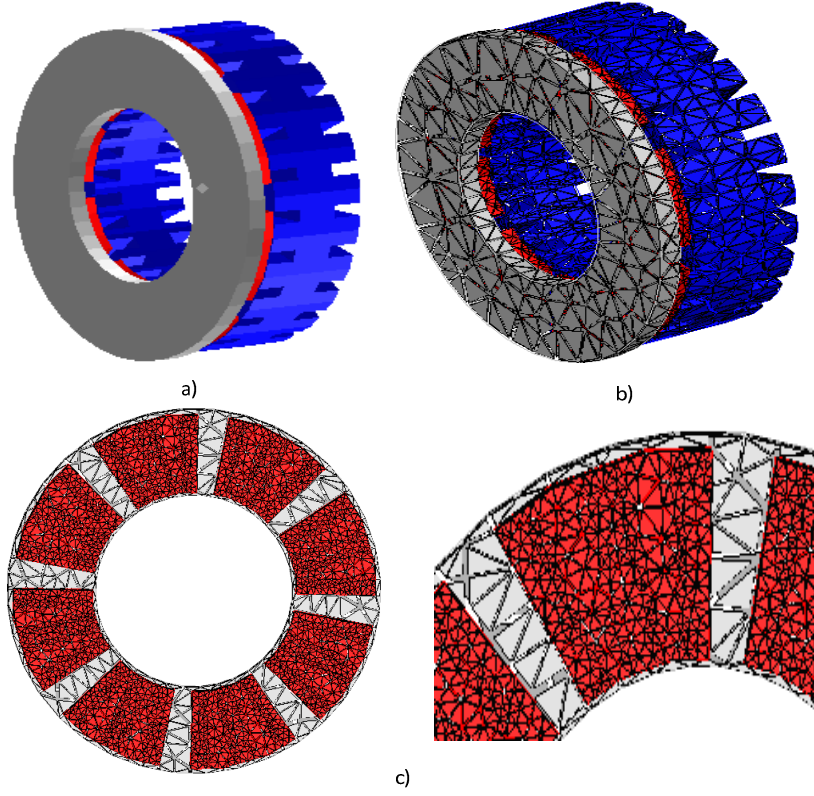


Şekil 4.5 Vuruğu momenti değeri adım sayısına bağlı değişimi



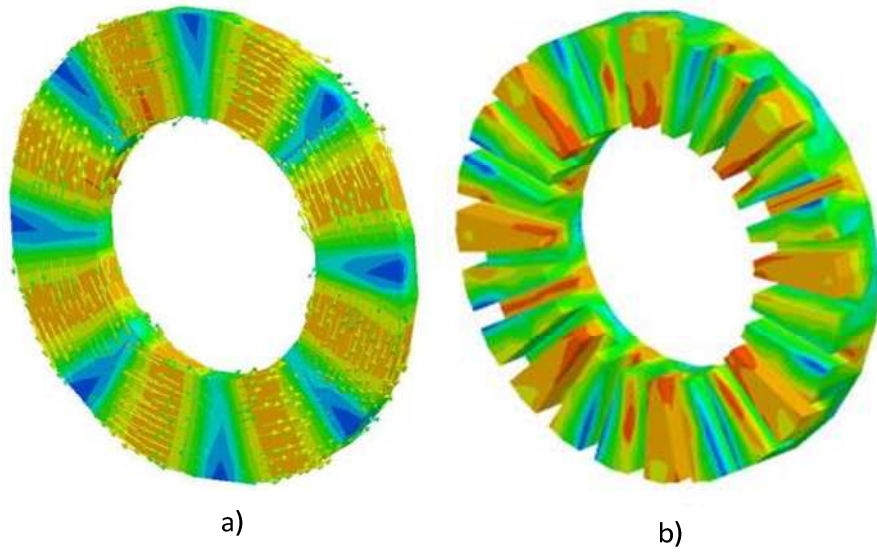
Şekil 4.6 Vuruğu momenti tespitinde adım sayısına bağlı eleman sayısının değişimi

Vuruğu momenti tespitinde, doğru analiz için eleman sayısı (tetrahedra) oldukça önemlidir. Şekil 4.6'da analizlerde kullanılan bir model için eleman sayısının değişimi verilmiştir. Şekil 4.7'de yapılan analizlerden birinde kullanılan 3 boyutlu SEA modeli, eleman yapısı ve detaylı mıknatıs eleman yapısı gösterilmektedir. Yapılan çalışmada 3,16 GHz Intel Core 2 Quad 3.49 GB RAM bilgisayar kullanılmış, toplam eleman sayısı: 234745, toplam CPU zamanı ise 22 dakika olduğu görölmüştür.



Şekil 4.7 EASM motorun (a)SEA modeli (b)3D eleman yapısı (c)mıknatıs eleman yapısı

Şekil 4.8’de EASM motorun stator yapısının ve rotor yapısının yüksüz durum akı yoğunluğu ile akının yönü göstermektedir.



Şekil 4.8 EASM motorun rotor akı yönü ve stator akı yoğunluğunun değişimi

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORDA VURUNTU MOMENTİNİ AZALTMAK İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER VE 3D SEA ÇALIŞMALARI

Vuruntu momenti azaltma teknikleri sürekli mıknatıslı motorlarda stator ve rotor tarafında yapılan değişiklikler olmak üzere iki ana grupta özetlenebilir. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi uygulanan tekniklerin büyük çoğunluğu RASM motorların vuruntu momenti azaltılmasında kullanılmış ve literatüre sunulmuştur. Ancak EASM motorlarda bu çalışmaların birçoğu modelleme zorluğundan dolayı yapılamamıştır. Bu nedenle çalışmamızda öncelikle vuruntu momentinin teorisi ve azaltılmasında kullanılan teknikler verilmiştir. Daha sonra ise çalışmamıza özgü stator ve rotor tarafında uygulanabilecek teknikler açıklanmış ve 3D SEA simülasyonları ile alınan sonuçlar referans yapı ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uygulanan tekniklerin vuruntu momenti için ortaya atılan teorileri desteklediği görülmüştür. Teorileri alınan sonuçlar ile desteklenmiş tekniklerin kendi aralarında ki avantaj/dezavantajlarına bakılarak çalışma ilerletilmiştir.

5.1 Vuruntu Momentinin Kaynağı ve Hesaplanması

Vuruntu momenti, mıknatıslardan kaynaklanan elektromotor kuvveti harmonikleri ile oluklardan kaynaklanan magnetik iletkenlik harmoniklerinin etkisinden meydana gelir ve yük durumundan bağımsızdır. Ortalama momente bir katkısı olmadığı gibi hız dalgalanmalarına ve titreşime neden olmaktadır.

Vuruntu momenti hesabı için genel olarak maxwell stres metodu, co-enerji metodu gibi çeşitli nümerik ve analitik yöntemler kullanılmaktadır. Analitik olanlar oldukça basit

geometri için uygundur fakat yapının basitleştirilmesinden dolayı kesin olmayan sonuçlara yol açabilir. Analitik yöntemler algılaması güç performans tahminleri yapılmasını kolaylaştıran kapalı formdaki çözümleri üretebilir ki bu da onları ilk tasarım için daha ideal olmasını sağlamaktadır. Öte yandan, normal şartlarda iki boyutlu ya da üç boyutlu sonlu eleman hesaplama yöntemleriyle gerçekleştirilen sayısal hesaplamalar daha karışık geometri için bile daha kesin sonuçlar ortaya koymaktadır. Ancak, sonlu eleman yöntemleri hesaplama olarak çoğunlukla zordur ve birçok tekrar eden hesaplamaları içerdiğinden optimizasyon yapmak için oldukça vakit kaybettiricidir. Bu sebeple, analitik ve sayısal yöntemlerin birbirini tamamlayıcı tasarım araçları olarak kullanılması önerilmektedir [58, 59].

Vuruntu momenti sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak doğru olarak hesaplanabilir. Ancak SEA parametrik çalışmayı zorlaştıran nümerik yöntemdir. Bundan dolayı birçok analitik yolla vuruntu momenti hesaplama yöntemi önerilmiştir [60]. Literatüre bakıldığında, vuruntu momenti genelde, hava aralığında depolanmış enerjiiyi kullanan sanal iş tekniğinden hesaplanan hava aralığı magnetik akı yoğunluğu dağılımından ve stator dişleri kenarları boyunca etkili olan magnetik kuvvetin toplanmasıyla tahmin edilir [64]. Ayrıca sürekli mıknatıslı motorların vuruntu momentini tahmin etmek için akı manyetomotor kuvvet (MMK) yöntemini önerilmiştir. Akı MMK yöntemi sadece mıknatıslardaki magnetik alan enerjisini kullanır. Bu yönteminin, genel amaçlı vuruntu momenti tahmin yöntemi olduğu ve moment minimizasyonu yöntemleri hakkında bilgi verdiği belirtilmektedir [65].

Akı MMF yöntemini vuruntu momenti minimizasyonu gerektiren uygulamalara vurgu yaparak sunar. Akı MMF yöntemine dayalı önerilen yeni bir vuruntu momenti denklemi ile akı MMF yönteminin grafik yapısal diyagramından kaçınılmış, bu da vuruntu momenti hesaplamasını kolaylaştırmıştır [66]. Bu denklem aynı zamanda vuruntu momenti minimizasyon çalışmaları uygulamaları için de bir potansiyel taşımaktadır [67], [68].

5.2 Geleneksel Vuruntu Momenti Hesabı

Vuruntu momenti hesabı için üç aşama vardır. Birinci aşamada, ideal olumsuz yapı için hava aralığındaki akı dağılımı formüle edilir. İkinci aşama da hava aralığı magnetik

iletkenliği hesaba katılarak modifiye edilmiş hava aralığı akı yoğunluğu hesaplanır. Üçüncü ve son aşamada ise modifiye edilmiş hava aralığı akı yoğunluğundan vuruğu momenti hesaplanır. Böylece ideal oluksuz makinenin stator çapının alanında akı yoğunluğu ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$B_{rl}(\theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} 2 \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} \cdot \left(\frac{(np-1) + 2 \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} - (np+1) \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2np}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{2np} \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2np} - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2np} \right]} \right) \cos(np\theta) \quad (5.1)$$

Burada $M_n = 2 \left(\frac{B_r}{\mu_0} \right) \alpha_p \frac{\sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}}$, R_m mıknatısın dış yarıçapı, R_s stator dış yarıçapı, R_r

rotor yarıçapıdır. Oluk etkisini hesaba katmak için permanans hesaplanır.

$$\lambda_{rel} = \frac{g + \frac{l_m}{\mu_r}}{g + \frac{\pi}{2} w_1 + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad (5.2)$$

Son olarak vuruğu momenti,

$$T_{cog}(\theta_1) = \frac{L}{2\mu_0} \sum_{m=1}^{N_s} \left[\int_0^{\frac{w_s}{2}} B_{PM}^2(w_1)(R_s + w_1) dw_1 - \int_{\frac{w_s}{2}}^{w_s} B_{PM}^2(w_2)(R_s + w_2) dw_2 \right] \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3'deki integral çözülrse,

$$T_{cog}(\theta_1) = \frac{\pi L R_s}{2\mu_0 N} \sum_{m=1}^N \left[B_{PM}^2\left(\frac{2\pi}{N}m + \theta_1\right) (R_M + g_a) ssg \right] \quad (5.4)$$

elde edilir [61].

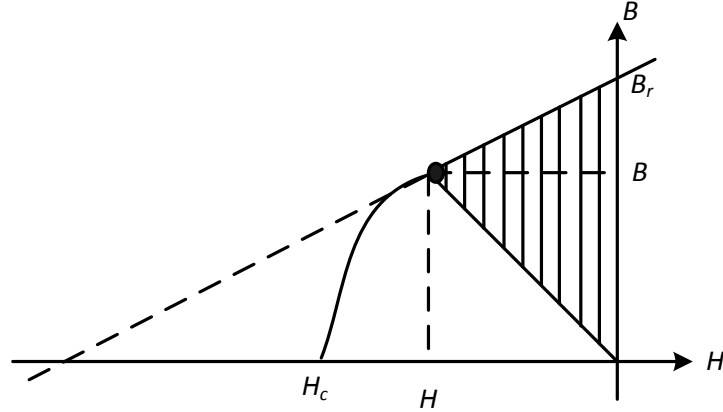
5.2.1 Akı-MMF Metoduna Dayalı Vuruğu Momenti Hesabı

Hava aralığında depolanan enerji biliniyorsa, vuruğu momenti hesabı kolaylıkla hesaplanır.

$$T_{\text{cog}}(\theta) = -\frac{dW}{d\theta} \quad (5.5)$$

Burada θ mekaniksel rotor açısıdır.

Hava aralığında depo edilen enerji, vurutu momenti hesabında kullanılır. Şöyle ki; eğer elektromagnetik sistemler sadece lineer soft magnetik malzeme ve lineer sürekli mıknatıs içeriyorsa, mıknatıslardan elde enerji sistemin enerjisidir.



Şekil 5.1 B-H diagramı ve enerji yoğunluğu eğrisi [65]

Şekil 5.1’de, sürekli mıknatısın çalışma noktası ile orjini birleştiren çizgi yük eğrisi olarak bilinir. Yük eğrisi hava aralığı relüktansı ile tanımlanır. Çıkık veya oluklu stator yapısına sahip SM makinelerde, rotor döndükçe mıknatısın çalışma noktası değişir. Her bir rotor pozisyonu için, sürekli mıknatısın çalışma noktası tanımlanır ve sistemde depo edilen toplam enerji elde edilir. Böylece vurutu momenti de elde edilmiş olunur.

Mıknatıs üzerindeki hacim integralini çözmek için, ilk olarak magnetizasyon yönüne dik olan yüzey üzerindeki mıknatıs akısı hesaplanır. Toplam sistem enerjisini bulmak için akının magnetizasyon yönü boyunca integrali alınır. Uygulanan integral metodu, mıknatıs içerisindeki düzenli dağıtılmış alan olduğu varsayılarak basitleştirilebilir. Magnetizasyon yönüne dik yüzey, magnetizasyon yönünde ilerlediğinde, bu yüzeydeki akı değişmiyorsa, vurutu momentine ilişkin sistem enerji hesabı basitleşir.

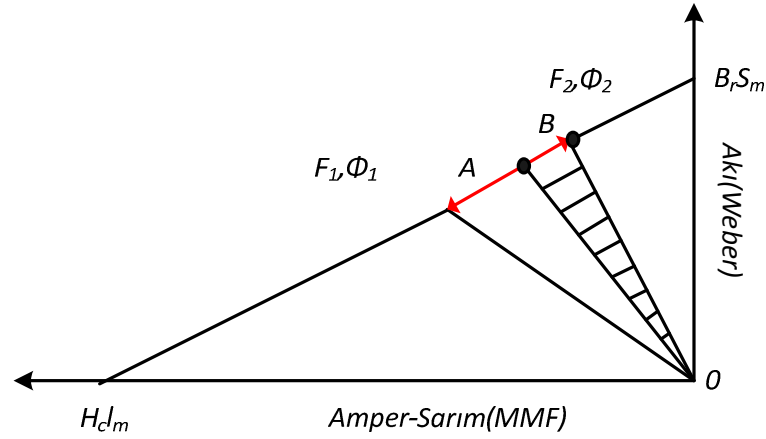
$$W = -\frac{1}{2}(H_m l_m)(B_r S_m) = -\frac{1}{2}F_m \Phi_m \quad (5.6)$$

Burada S_m ; magnetizasyon yönüne dik olan mıknatıs alanı, l_m ; magnetizasyon yönü boyunca mıknatıs uzunluğu, F_m ; mıknatıs MMF’i, Φ_r ; mıknatıs kalıcı akısıdır. B-H eğrisi

ve enerji hesabının hacimsel integrali yerine eşitlik (5.7)'nin kullanımı önerilir. Burada enerji mıknatıs MMF ve akıyla direk olarak bulunabilir. Bu yöntemle akı-MMF diyagram yöntemi denir. Herhangi bir rotor pozisyonunda, mıknatısın çalışma noktası Şekil 5.2'de gösterildiği gibi A noktasıdır. Bu noktaya karşılık gelen MMF ve akı F_1 ve Φ_1 'dir. Rotor pozisyonu değiştirilerek B noktasına geldiğinde ise bu noktadaki MMF ve akı, F_2 ve Φ_2 'dir. Bu hareket esnasında enerji değişimi,

$$\Delta W = \frac{1}{2} \phi_r (F_1 - F_2) \quad (5.7)$$

elde edilir.



Şekil 5.2 Sürekli mıknatısın akı-MMF diyagramı [65]

Burada çalışma noktası A noktasından B noktasına taşınırken, MMF değeri azalır, akı değeri artar. F_1 ve F_2 değerleri negatif olduğundan dolayı eşitlik (5.7)'ye göre ΔW sıfırdan küçük ve vuru mu momenti pozitifdir. Aynı zamanda $F_2 = F_1 (\theta + \Delta\theta)$ 'dir. Taylor serisi teoremine göre, F_2 ifadesi F_1 'den aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_2 = F_1 (\theta + \Delta\theta) = F_1 + \frac{dF_1}{d\theta} \Delta\theta + \frac{1}{2!} \frac{d^2F_1}{d^2\theta} (\Delta\theta)^2 + \dots \quad (5.8)$$

Eşitlik (5.8)'de elde edilen F_2 değeri eşitlik (5.7)'de yerine yazılırsa,

$$\Delta W = \frac{1}{2} \phi_r \left(\frac{dF_1}{d\theta} \Delta\theta + \frac{1}{2!} \frac{d^2F_1}{d^2\theta} (\Delta\theta)^2 + \dots \right) \quad (5.9)$$

elde edilir.

$\theta \rightarrow 0$ giderken eşitlik (12)'nin limiti alınırsa vuruuntu momenti elde edilir.

$$T_{\text{cog}}(\theta) = -\frac{dW}{d\theta} = -\lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta\theta} \quad (5.10)$$

Eşitlik 5.10 ifadesi çözümlürse,

$$T_{\text{cog}}(\theta) = -\lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta\theta} = \frac{1}{2} \phi_r \frac{dF}{d\theta} \quad (5.11)$$

elde edilir.

Akı ile MMF arasındaki ilişki,

$$F = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r} \left(\frac{\phi}{S_m} - B_r \right) \quad (5.12)$$

olarak ifade edilir.

Eşitlik (5.12) ifadesi eşitlik (5.11)'de yerine yazılırsa,

$$T_{\text{cog}}(\theta) = \frac{1}{2} B_r \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r} \frac{d\phi}{d\theta} \quad (5.13)$$

elde edilir.

Eşitlik (5.13) ifadesinde mekaniksel açı yerine elektriksel açı kullanılırsa,

$$T_{\text{cog}}(\theta_e) = \frac{1}{2} B_r p \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r} \frac{d\phi}{d\theta_e} \quad (5.14)$$

elde edilir.

Eşitlik (5.14)'deki ifadeye göre, vuruuntu momentinin genliğinin kutup sayısı, remanans akı değeri, mıknatis uzunluğu, akının rotor pozisyonu ile değişimine bağlı olarak değişir [60].

Vuruuntu momenti; tasarım aşamaları arasında, elektromagnetik tasarım sürecinde hesaba katılmalıdır. Bu moment bileşenini azaltmak için ya analitik modeller ya da zaman alıcı sonlu elemanlar metodu kullanılmalıdır. Bu moment bileşenini azaltıcı analitik modeller RASM motorlar için oluşturulmuştur. EASM motorlar için bu modeller henüz oluşturulmadığından, vuruuntu momentinin elektromagnetik tasarım aşamasında sonlu elemanlar analizi kullanılarak en aza indirgenmesi gerekir. Analitik

yaklaşımında SEA kullanımının önemli avantajı, vuruuntu momenti ve moment dalgalanmasını rotor pozisyonlarının değişimiyle hesaplama yeteneğidir [54],[55].

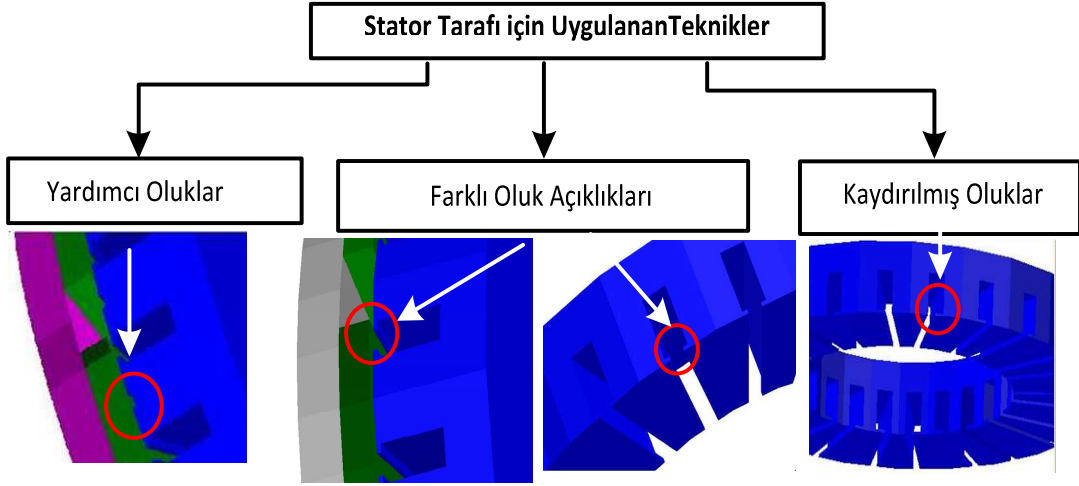
5.3 Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Vuruuntu Momenti Minimizasyon Yöntemleri

Vuruuntu momenti minimizasyon teknikleri SM motorlarda stator ve rotor tarafından yapılan değişiklikler olmak üzere iki ana grupta özetlenebilir. Vuruuntu momentini azaltıcı tekniklerin büyük bir çoğunluğu RASM motorların vuruuntu momenti minimizasyonunda kullanılmıştır. Bu tekniklerin çoğu EASM motorlarda kullanılabilir. Ancak stator tarafında yapılabilecek değişiklikler üretim zorluğu ve maliyet sebebiyle EASM motorlarda tercih edilmez. Bu sebeple bu tür motorlarda vuruuntu momentinin azaltmak için rotor tarafında uygulamalar yapılmalıdır. EASM motorlarda rotor tarafından yapılabilecek değişiklikler; mıknatıs adımı, mıknatıs kaykısı, mıknatıs veya kutup kaydırması ile rotor kaydırması olarak özetlenebilir.

Çalışmamızda, EASM motorların vuruuntu momenti azaltıcı tekniklerinin özetlenmiş ve EASM motorlara özgü yeni teknikler önerilerek 3D SEA simülasyonları ile çalışma desteklenmiştir.

5.4 Stator Tarafında Uygulanan Teknikler

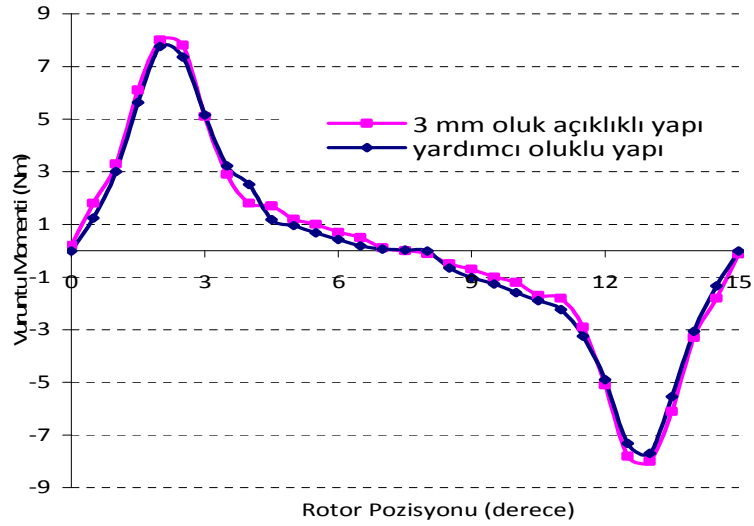
Vuruuntu momentini azaltmak için stator tarafında; farklı oluk açıklıkları, stator dişlerine yardımcı oluk eklenmesi ve kaydırılmış oluk yapıları teknikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için [50] numaralı kaynakta verilen 3 mm oluk açıklığındaki yapı stator tarafında yapılan işlemlerde referans yapı olarak seçilmiştir. Üzerine çalışılan teknikler Şekil 5.3'de verilmiş ve aşağıda özetlenmiştir. Bu tekniklerin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 5.4, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 5.1'de verilen ve stator çalışmaları için referans olarak kabul edilen yapı ile karşılaştırılması yapılmış olan teknikler bölüm sonunda yorumlanmıştır.



Şekil 5.3 Stator tarafında uygulanan teknikler

5.4.1 Stator Dışlerinde Yardımcı Oluklar Açmak

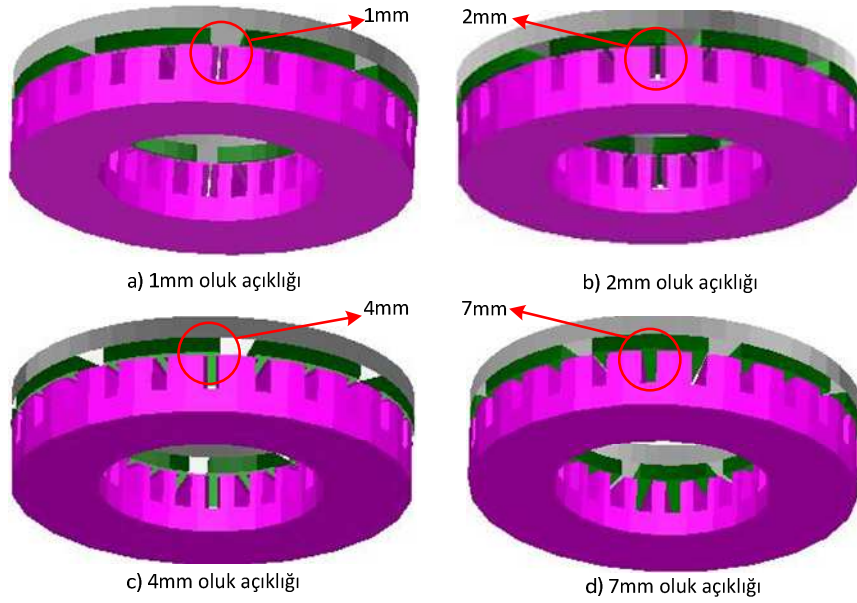
Vuruntu momentini azaltması beklenen metotlardan birisi stator dişlerine yardımcı oluklar açmaktır. Böylece hava aralığında oluşacak olan vuruntu momentinin hem genliği azalacak hem de frekansı artacaktır. Şekil 5.4'den görüldüğü gibi yardımcı oluk ekleme metodu ile vuruntu tepe değeri 7,75 Nm. değerine düşürülmüş ve referans yapıya göre % 3,1 azaltılma sağlanmıştır.



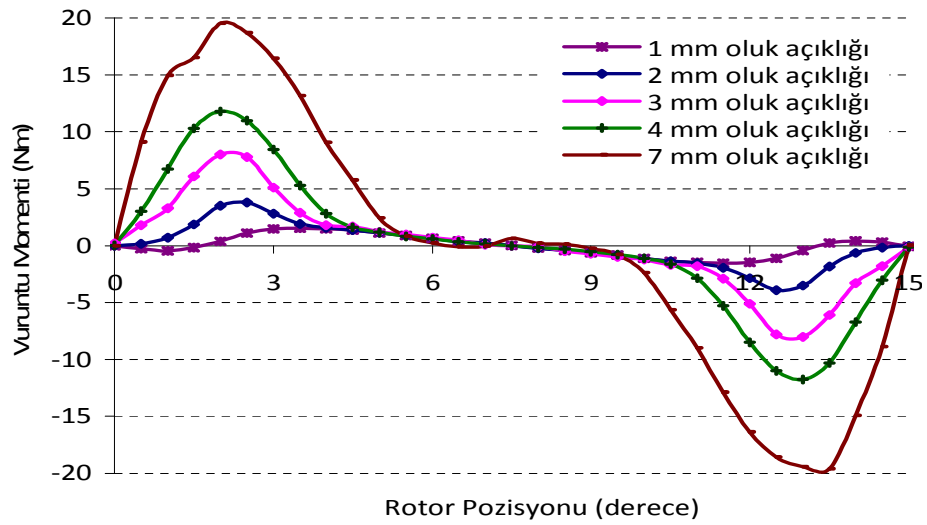
Şekil 5.4 Referans yapı ile yardımcı oluk açılmış yapının karşılaştırılması

5.4.2 Farklı Oluk Açıklıkları ya da Oluk Açıklığının Kaydırılması

Oluk açıklığının azaltılması ve kaydırılmış oluk yapısı EASM motorlarda vuruğu momentini azaltması beklenen yöntemlerden diğerkileridir. Oluk açıklığının azaltılmasıyla vuruğu momentinin tepe değeri azalması beklenir. Karşılıklı oluklardaki oluk açıklıklarının birbirine göre kaydırılması ise hava aralıklarındaki relüktans değeri değiştirerek toplam vuruğu momentinin azalmasına neden olur. Şekil 5.5’de farklı oluk açıklıkları değeri ve gösterimi verilmiştir.



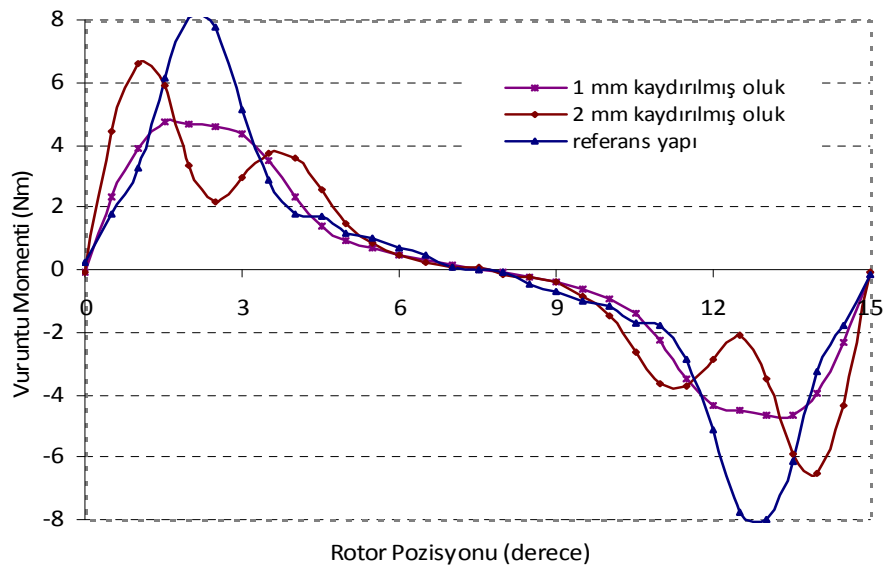
Şekil 5.5 Farklı oluk açıklıkları ile çizilmiş motor yapıları



Şekil 5.6 Referans yapı ile farklı oluk açıklıklı yapıların karşılaştırılması

Oluk açıklığının azaltılması ile vuruğu momentinin tepe değeri de ğer düşüşler elde edilmiştir. Şekil 5.6'dan görüleceği gibi alınan sonuçlara göre vuruğu momentindeki en büyük düşüş 1 mm oluk açıklığındaki yapıda sağlanmıştır. Bu yapıda vuruğu momentinin tepe değeri 1,528 Nm'dir ve bu teknikle referans motora göre % 80,9'lik bir azalma sağlanmıştır.

Stator tarafında üzerine çalışılan son teknik, oluk açıklıklarının kaydırılmasıdır. Şekil 5.7'den görüldüğü gibi kaydırılmış oluk çalışması ile de vuruğu momenti tepe değeri başarılı bir şekilde azaltılmıştır. 1 mm kaydırılmış oluk açıklığı yapısında vuruğu momenti tepe değeri 4,7 Nm değerine düşürülmüş ve referans yapıya göre % 41,25 azaltılma sağlanmıştır.



Şekil 5.7 Referans yapı ile oluk açıklıkları kaydırılmış yapıların karşılaştırılması

Stator tarafında çalışma yapılan teknikler ve bu tekniklerin vuruğu momenti üzerindeki etkileri Çizelge 5.1 de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Stator tarafında uygulanan tekniklerin referans ile karşılaştırılması

| Uygulanan Teknikler | Vuruntu Momenti Tepe Değeri [Nm] | Referans Motora Göre Değişim |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Oluk açıklığı 1 mm | 1,528 | % 80,9 düşüş |
| Oluk açıklığı 2 mm | 3,9 | % 50,94 düşüş |
| Oluk açıklığı 3 mm | 8 | Stator teknikleri için referans yapı |
| Oluk açıklığı 4 mm | 10,288 | % 29,4 artış |
| Oluk açıklığı 7 mm | 19,518 | % 145,5 artış |
| Yardımcı oluk ekleme | 7,75 | % 3,1 düşüş |
| 1 mm kaydırılmış oluk | 4,7 | % 41,25 düşüş |
| 2 mm kaydırılmış oluk | 6,6 | % 16,98 düşüş |

Stator tarafında uygulanan farklı oluk açıklıkları, yardımcı oluk ekleme ve oluk açıklığının kaydırılması tekniklerinden alınan sonuçlar referans yapı için elde edilen değer ile karşılaştırıldığında, başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu teknikler üzerinde yapılan çalışmalar optimize edilerek vuruntu seviyeleri daha da aşağılara çekilebilir. Ancak EASM motorların statorunun üretim zorluğu ve üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle bu tip motorlarda, RASM motorlar için literatürde sıklıkla çalışılan stator tarafında uygulanan tekniklerin uygulanması tercih edilmemelidir. Bunun yerine rotor tarafında çeşitli tekniklerin uygulanması daha düşük maliyetli ve pratiktir. Bundan dolayı çalışmamızın ilerleyen bölümlerinde EASM motorlarda vuruntu momentini azaltmak için rotor tarafında uygulanacak çalışmamıza özgün teknikler ile düşük maliyetli ve yüksek performanslı yapı üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu amaç için vuruntu momentinin en yüksek değerinde olacağı açık oluklu motor yapısı referans seçilmiştir. Rotor tarafında yapılacak çalışmalarda seçilen açık oluk yapısındaki referans motor için yapılan SEA analizinden, 140 derece mıknatis adımına sahip fan tipi mıknatıslardan oluşan rotor yapısıyla 19,518 Nm vuruntu momentini elde edilmiştir. Bu değer bundan sonraki tüm analizler için karşılaştırma yapılacak referans vuruntu momentini değeridir.

5.5 Rotor Tarafında Uygulanan Teknikler

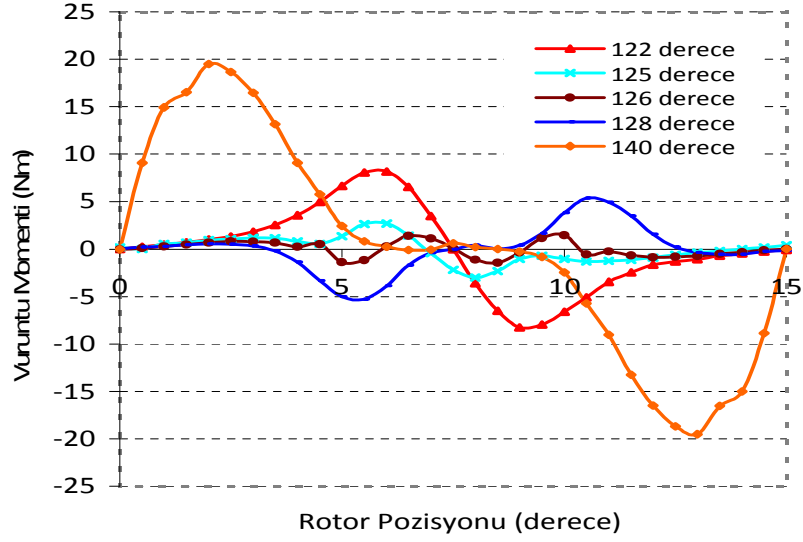
EASM motorlarda vuruñtu momentini azaltmak için stator tarafında yapılan düzenlemeler hem üretim zorluğu hem de yüksek maliyeti nedeniyle endüstriyel alanda kendine fazla yer bulamamıştır. EASM motorlarda rotor tarafında uygulanabilecek teknikler, motor yapısının ekşnel olması ve rotorda yapılacak çalışmaların daha uygun olması sebebiyle stator tarafında yapılan tekniklere göre daha ucuz ve pratiktir. Çalışmamızda önce fan tipi mıknatıs yapısı için, mıknatıs adımının farklı değerleri üzerine çalışılmıştır. Daha sonra bu yapılar arasında alınan en iyi (126 derece) sonuca göre, aynı mıknatıs alanına sahip olacak şekilde üçgen ve oval kaykık teknikleri uygulanmıştır. Üçgen ve oval kaykıklı yapıdaki mıknatıslarda da aynı fan tipi yapıdaki gibi önce, mıknatıs adımının farklı değerleri üzerine çalışılmıştır.

Daha sonra vuruñtu momenti azaltılması için tez çalışmasında kullanılan, bir rotorun diğerine göre belli açılarda kaydırılması ve mıknatıs gruplama teknikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tüm çalışmaların detayları aşağıda özetlenmiştir. Mıknatıs adımı 140 derece olan fan tipi klasik şekilli referans motorun vuruñtu momenti ile üzerinde çalışıma yapılan tekniklerin 3D SEA ile bulunan sonuçları karşılaştırılarak, vuruñtu momentindeki değişimler gösterilmiştir.

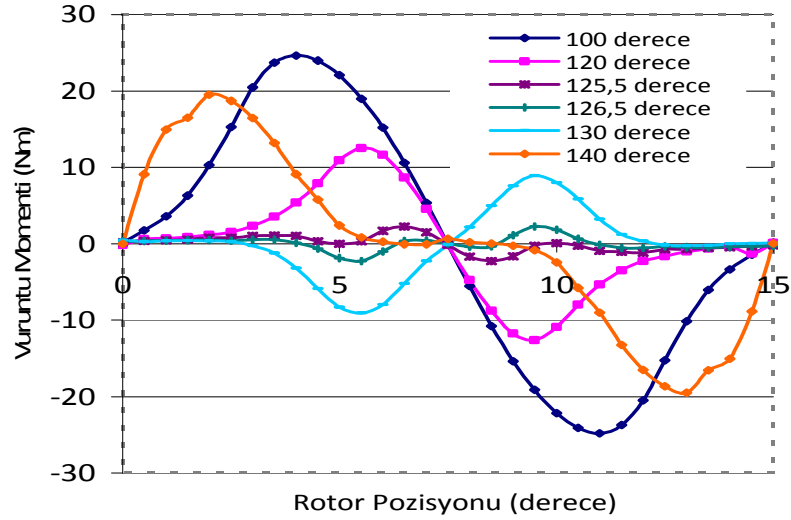
5.5.1 Mıknatıs Adımının Değiştirilmesi

EASM motorlarda, vuruñtu momentini azaltmak için en yaygın kullanılan metotlardan birisi, mıknatıs adımının kutup adımına oranının uygun bir değerde seçilmesidir. Bilindiđi gibi vuruñtu momenti, mıknatıs kutuplarının kenarları ile stator olukları arasındaki etkileşimden oluşur. Bu nedenle, gerek vuruñtu momenti dalga şekli, gerekse tepe değerleri mıknatıs adımına bağlıdır. Mıknatıs adımı azaltılarak mıknatıs kaçak akısı da azaltılabilir. Fakat mıknatıs akısı dolayısıyla ortalama moment de azalmış olur [56], [57]. Bu nedenle uygun seçilecek bir mıknatıs adımıyla vuruñtu momenti istenilen seviyelere düşürülürken, ortalama momentte ciddi bir düşüşe sebep olmamalıdır. Çalışmamızda öncelikle klasik fan tipindeki mıknatıslar ile vuruñtu momenti açısından en uygun yapının bulunması amacıyla modeller oluşturulmuştur. Çizelge 5.2'den görüldüğü gibi fan tipi mıknatıs yapısında optimum mıknatıs adımı oranı 126 derecede elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; 126 derece mıknatıs

adımına sahip fan tipi mıknatıs yapısında, 140 derece mıknatıs adımına sahip referans motora göre % 92,51 ile maksimum düşüm gözlenmiştir. Bu açı değerinde fan tipi mıknatıslı motorda vuruñtu momenti 1,462 Nm olarak elde edilmiştir. Fan tipi mıknatıs yapısı için elde edilen sonuçların grafik olarak gösterilmesi Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da verilmiştir. Şekil 5.10'da ise fan tipi mıknatıs yapıları için elde edilen vuruñtu momenti tepe değerlerinin grafiksel olarak gösterilmesi verilmiştir.



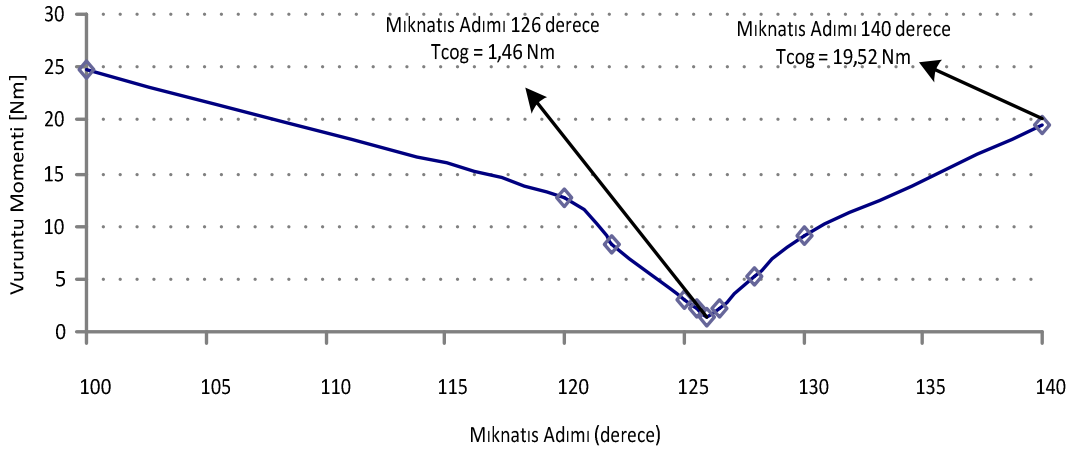
Şekil 5.8 Beş farklı mıknatıs adımında fan tipi mıknatısın vuruñtu momenti eğrileri



Şekil 5.9 Altı farklı mıknatıs adımında fan tipi mıknatısın vuruñtu momenti eğrileri

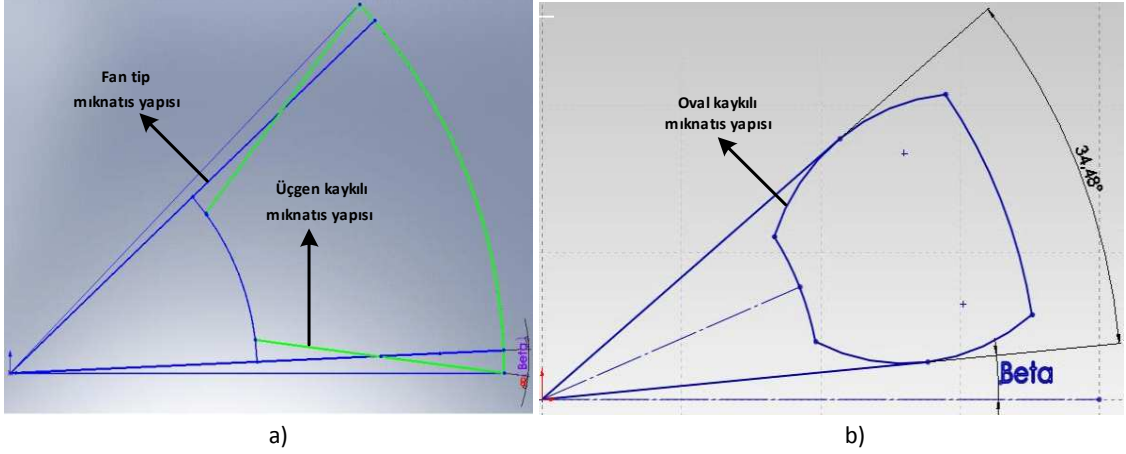
Çizelge 5.2 Fan tipi mıknatıs yapılarının vuruntu momenti değerlerinin referans yapı ile kıyaslanması

| Mıknatıs Adımı | Vuruntu tepe değeri [Nm] | Referans motora göre değişim |
|----------------|--------------------------|------------------------------|
| 100 | 24,802 | % 27,06 artış |
| 120 | 12,62 | % 35,34 düşüş |
| 122 | 8,18 | % 58,88 düşüş |
| 125 | 2,976 | % 84,75 düşüş |
| 125,5 | 2,28 | % 88,31 düşüş |
| 126 | 1,462 | % 92,51 düşüş |
| 126,5 | 2,26 | % 88,4 düşüş |
| 128 | 5,28 | % 73,94 düşüş |
| 130 | 9,044 | % 53,66 düşüş |
| 140 | 19,518 | Referans Motor |



Şekil 5.10 Fan tipi mıknatıs yapıları için vuruntu momenti tepe değerleri

Fan tipi mıknatıs yapısı için optimum yapı elde edildikten sonra bu yapı ile aynı alana sahip olacak şekilde üçgen kayıklı ve oval kayıklı yapılardaki mıknatıs modelleri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

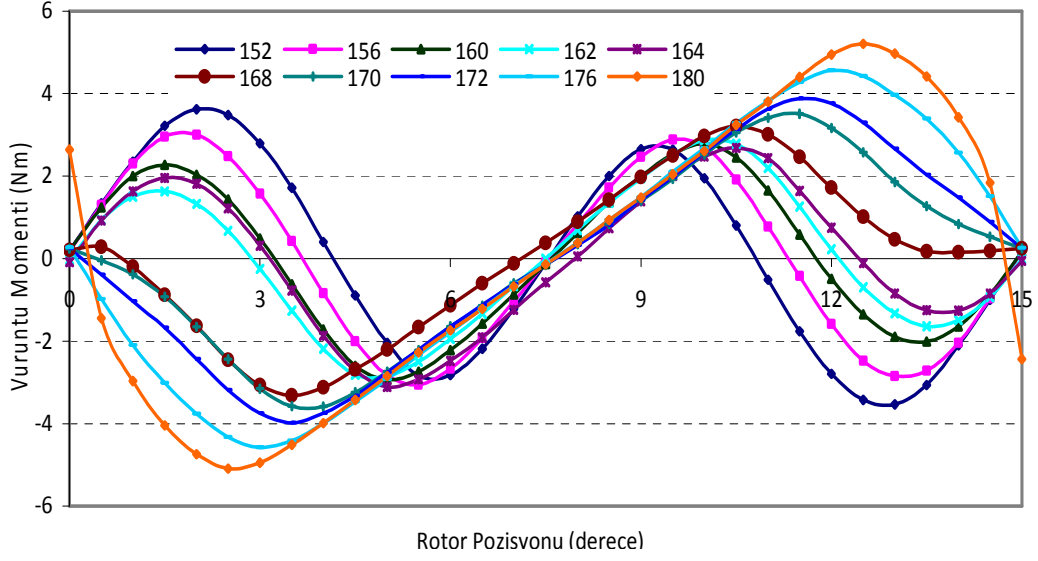


Şekil 5.11 Kaykılı açısının tanımlanması a) Üçgen kaykılı b) Oval kaykılı

Üçgen ve oval kaykılı yapılarıdaki üzerine çalışılan tüm mıknaş alanları, fan tipi 126 derece mıknaş adımı yapıdaki mıknaş alanı ile aynı değere sahiptir. Yani üçgen ve oval kaykılı yapılar için mıknaş adımları her zaman $Alan_{126fan} = Alan_{üçgen\ kaykılı} = Alan_{oval\ kaykılı}$ olacak şekilde belirlenmiştir. Üçgen ve oval kaykılı açıların şekilsel olarak gösterilmesi Şekil 5.11’de verilmiştir.

Bu yapılar için elde edilen vuru mu momenti değeri Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, üçgen kaykılı tipteki mıknaşlı modeller arasında 15,235 derece kaykılı (162 derece mıknaş adımı) yapıda referans motora göre % 85,3 ile maksimum düşüm gözlenmiştir. Bu açı değeri nde üçgen kaykılı tipteki mıknaşlı motorda vuru mu momenti 2,868 Nm olarak elde edilmiştir.

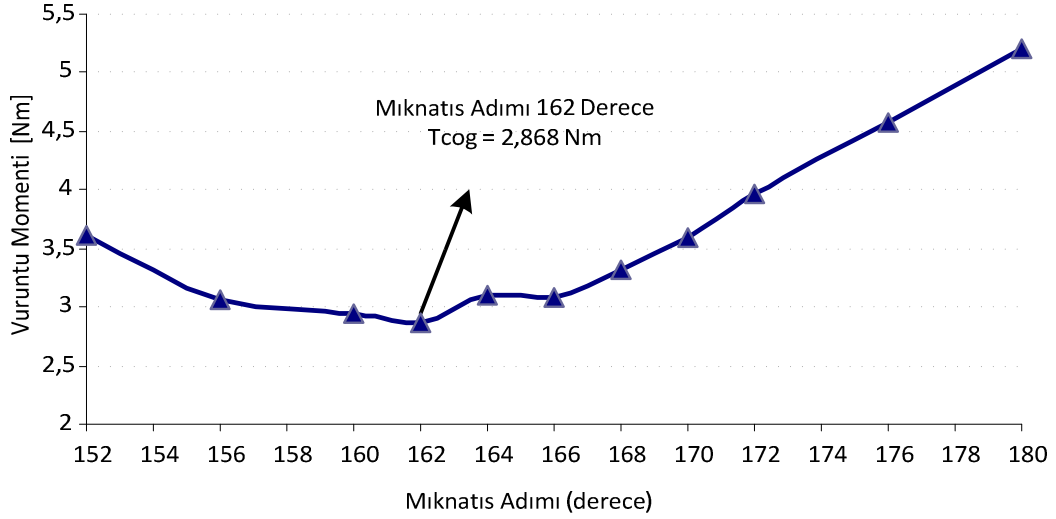
Üçgen kaykılı mıknaş yapısı için elde edilen sonuçların grafik olarak gösterilmesi Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekil 5.13’de ise üçgen kaykılı mıknaş yapıları için elde edilen vuru mu momenti tepe değeri nin grafiksel olarak gösterilmesi verilmiştir.



Şekil 5.12 Üçgen kaykılı tipteki mıknatıs için vuruntu momenti eğrileri

Çizelge 5.3 Üçgen kaykılı tipteki mıknatıs yapıların vuruntu momenti değerlerinin referans motorla kıyaslanması

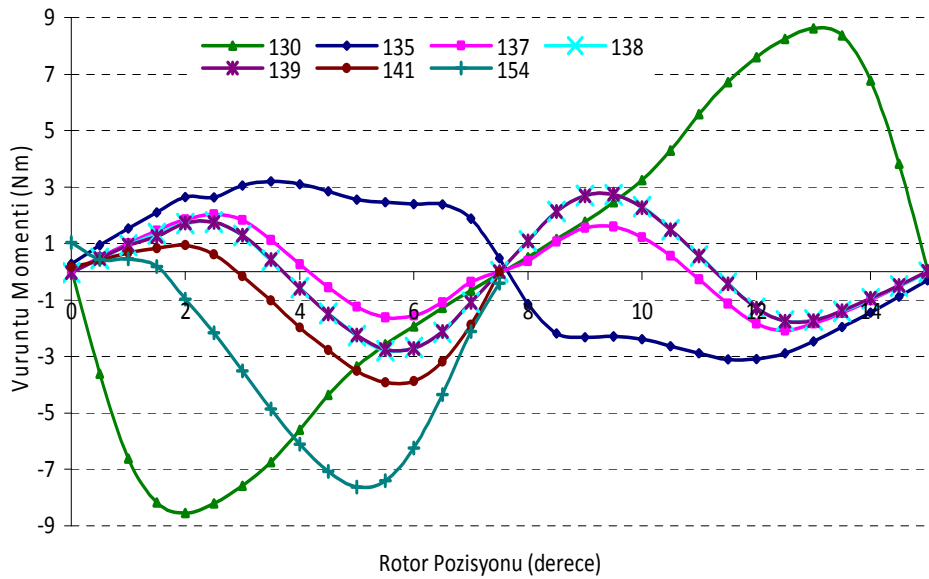
| Mıknatıs Adımı | Kaykılı Açısı [Derece] | Vuruntu Momenti Tepe Değeri [Nm] | Referans Motora Göre Değişim |
|----------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 152 | 12,804 | 3,622 | % 81,44 düşüş |
| 156 | 13,498 | 3,056 | % 84,34 düşüş |
| 160 | 14,685 | 2,934 | % 84,96 düşüş |
| 162 | 15,235 | 2,868 | % 85,3 düşüş |
| 164 | 15,664 | 3,104 | % 84,09 düşüş |
| 168 | 16,676 | 3,32 | % 82,99 düşüş |
| 170 | 16,949 | 3,514 | % 81,99 düşüş |
| 172 | 17,308 | 3,964 | % 79,69 düşüş |
| 176 | 18,172 | 4,576 | % 76,55 düşüş |
| 180 | 19,12 | 5,206 | % 73,32 düşüş |
| 140 Derece Fan | ----- | 19,518 | Referans yapı |



Şekil 5.13 Üçgen kayıklı mıknatıs yapılarının vuruntu momenti tepe değerleri

Oval kayıklı tipteki mıknatıslı modeller arasında 5,25 derece kayıklı (137 derece mıknatıs adımlı) yapıda referans motora göre % 89,527 ile maksimum düşüm sağlanmıştır. Bu kayık değerinde, oval yapıdaki optimum vuruntu momenti değeri 2,044 Nm olarak elde edilmiştir.

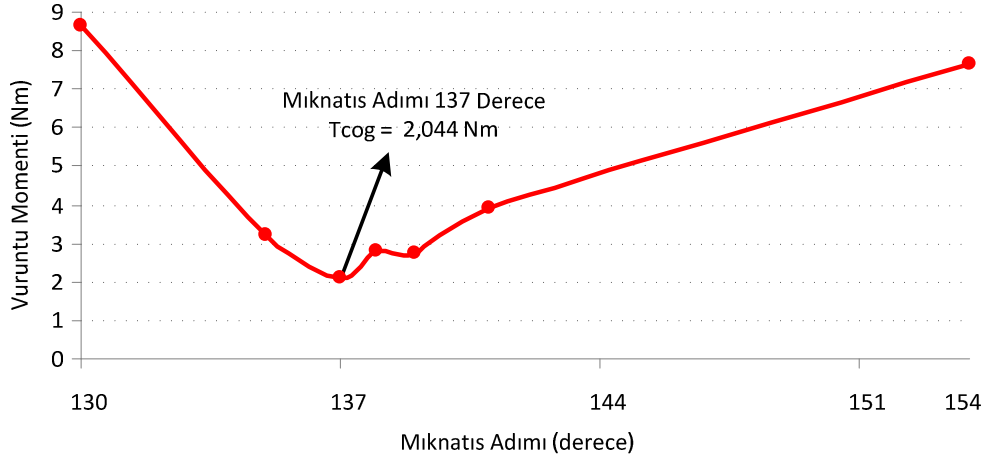
Oval kayıklı mıknatıs yapısı için elde edilen sonuçların grafik olarak gösterilmesi Şekil 5.14'de verilmiştir. Şekil 5.15'de ise oval kayıklı mıknatıs yapıları için elde edilen vuruntu momenti tepe değerlerinin grafiksel olarak gösterilmesi verilmiştir.



Şekil 5.14 Oval kayıklı mıknatıs yapılarının vuruntu momenti eğrileri

Çizelge 5.4 Oval tip mıknatis yapıların vuruntu momenti değerlerinin referans motorla kıyaslanması

| Mıknatis Adımı | Kaykılı Açısı [Derece] | Vuruntu Momenti tepe değeri [Nm] | Referans motora göre değişim |
|----------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 130 | 7,676 | 8,538 | % 56,25 düşüş |
| 135 | 6 | 3,1 | % 84,117 düşüş |
| 137 | 5,25 | 2,044 | % 89,527 düşüş |
| 138 | 5,1 | 2,736 | % 85,98 düşüş |
| 139 | 4,95 | 2,738 | % 85,971 düşüş |
| 141 | 4,8 | 3,926 | % 79,8 düşüş |
| 154 | 3,16 | 7,628 | % 60,91 düşüş |
| 140 Derece Fan | ----- | 19,518 | Referans yapı |



Şekil 5.15 Oval kaykılı mıknatis yapılarının vuruntu momenti tepe değerleri

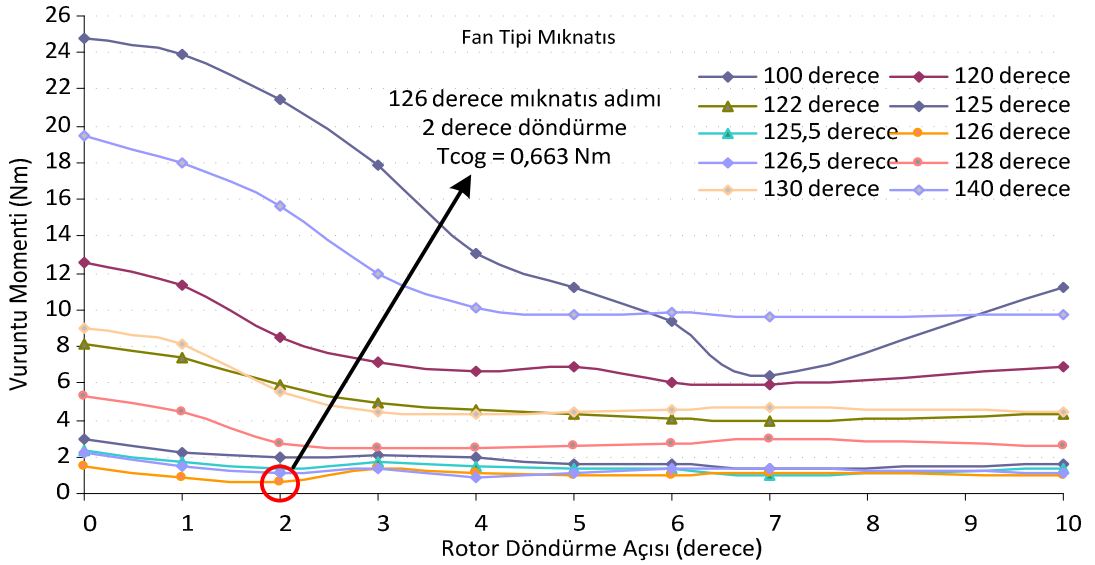
Buraya kadar yapılan analizlerle, vuruntu momenti için alınan sonuçlarda 126 derece mıknatis adımlı fan tipi mıknatislerden oluşan rotor, 162 derece mıknatis adımlı üçgen kaykılı mıknatislerden oluşan rotor ve 137 derece mıknatis adımlı oval kaykılı mıknatislerden oluşan rotor yapıları ile kendi tiplerinde optimum değerler elde edilmiştir. Her üç tip mıknatis yapısı içinde fan tipi 126 derece mıknatis adımlı yapı için en düşük vuruntu momenti değeri elde edilmiştir.

Üzerine çalışma yapılan motor için 5.5.2 başlığı altında, tez çalışmasında kullanılan vuruntu momenti azaltma tekniklerden olan ve motor prototipinin bu tekniğin test

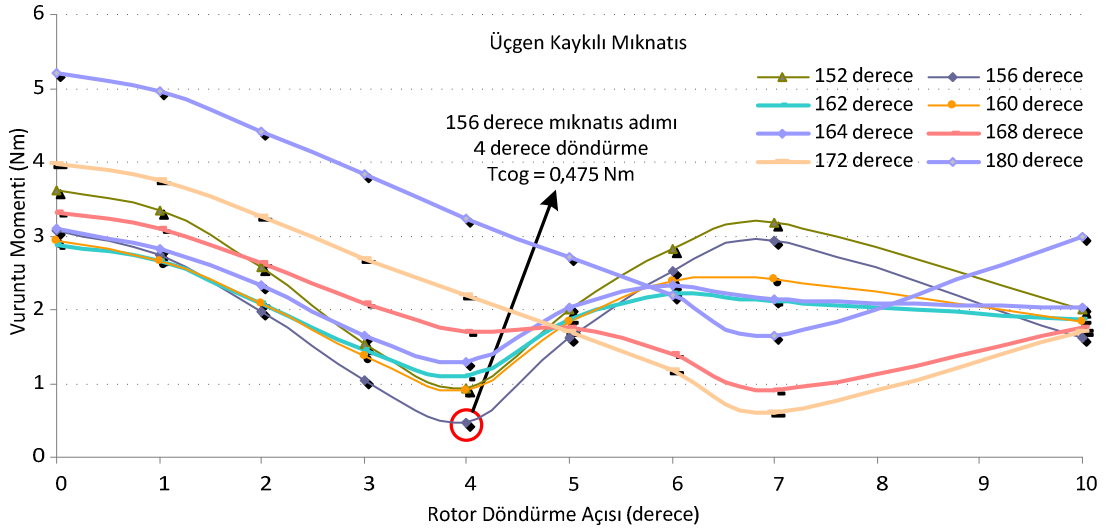
edilebilmesine olanak sağlayacak şekilde üretildiği, rotorlardan birisinin diğerine göre dairesel olarak döndürülmesi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir.

5.5.2 Bir Rotorun Diğerine Göre Dairesel Olarak Döndürülmesi

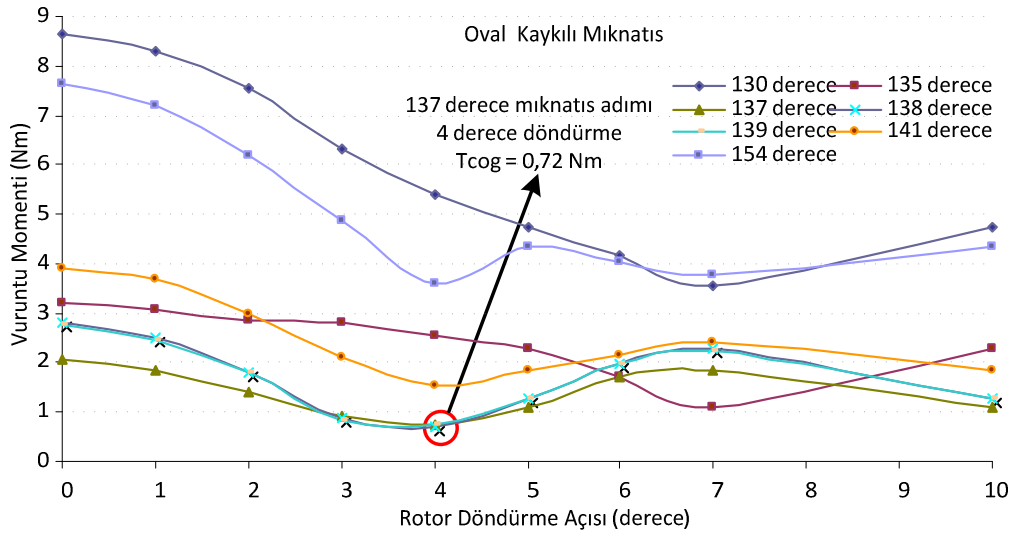
Çift hava aralıklı EASM motorlarda vuruğu momenti, her bir hava aralığındaki vuruğu momentlerin vektörel toplamına eşittir. Bu sebepten rotorların biri diğerine göre döndürülürse her bir hava aralığındaki vuruğu momentlerinin vektörel toplamı ve dolayısıyla toplam vuruğunun tepe değeri aşağıya çekilebilir. Bu doğrultuda fan, üçgen kayıklı ve oval kayıklı yapılarda bu teknik uygulanmış ve Şekil 5.16 ile Şekil 5.18 arasında verilen grafikler elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre vuruğu momentinin düşürülmesi açısından en iyi değer, bir rotorun diğerine göre 4 derece döndürüldüğü, 156 derece mıknatis adımlı üçgen kayıklı tipte sağlanmıştır. Bu yapıda vuruğu momenti tepe değeri 0,475 Nm değerine düşürülmüştür. Bu şekilde referans motora göre %97,56 oranında düşüm sağlanmıştır.



Şekil 5.16 Fan tipli mıknatis yapılarının rotor döndürme tekniği sonuçları



Şekil 5.17 Üçgen kayıklı mıknatis yapılarının rotor döndürme tekniği sonuçları

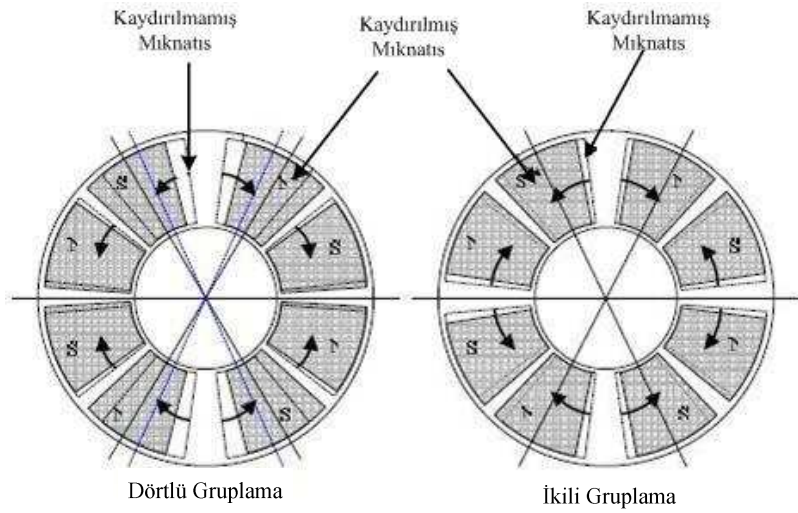


Şekil 5.18 Oval kayıklı mıknatis yapılarının rotor döndürme tekniği sonuçları

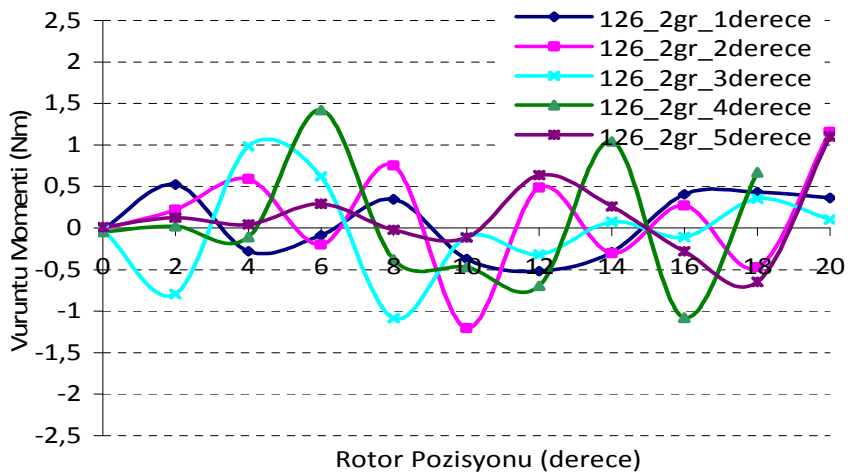
Bir rotorun diğerine göre döndürülmesi tekniği kullanılarak yapılan analizler sonucunda, 126 derece mıknatis adımlı fan tipli mıknatis yapısına sahip motorda, rotorlardan birisinin diğerine göre 2 derece döndürülmesi ile 0,663 Nm değeri elde edilmiştir. Aynı şekilde üçgen kayıklı mıknatis yapıları arasında 156 derece mıknatis adımına sahip yapıda, rotorlardan birisinin diğerine göre 4 derece döndürülmesi ile 0,475 Nm değeri elde edilmiştir. Son olarak bu teknikle oval kayıklı mıknatis yapıları arasında 137 derece mıknatis adımına sahip yapıda, rotorlardan birisinin diğerine göre 4 derece döndürülmesi ile 0,72 Nm değeri elde edilmiştir.

5.5.3 Mıknatıs veya Kutup Kaydırması (Gruplama Tekniği)

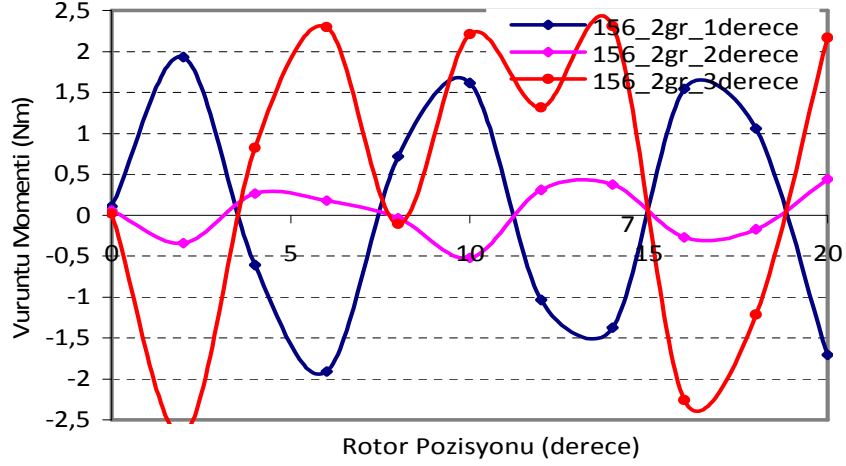
Vuruntu momentin azaltılması için tezde üzerine çalışılan başka bir etkili teknikte bitişik mıknatısların birbirine göre kaydırılmasıdır. Bu teknikle daha önceki çalışmalardan alınan en iyi yapılar için mıknatıslar Şekil 5.19’da ki gibi ikili ve dörtlü olarak gruplanmış ve rotor diskinin müsaade ettiği farklı kaydırma açıları için çalışmalar yapılmıştır. Çalışma önce ikili gruplamalar için yapılmıştır. Şekil 5.20’de 126 derece mıknatıs adımına sahip fan tipi yapıda ikili gruplama için farklı kaydırma açıları için elde edilen sonuçların grafiksel gösterimi verilmiştir. Aynı yöntemle, Şekil 5.21’de 156 derece mıknatıs adımına sahip üçgen kaykılı yapıda ikili gruplama için farklı kaydırma açıları için elde edilen sonuçların grafiksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.19 EASM motorlarda mıknatıs kaydırma tekniği

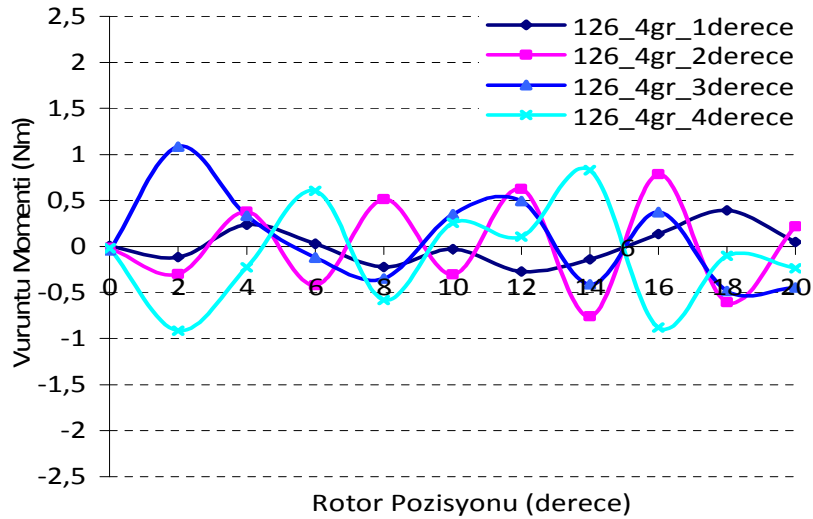


Şekil 5.20 Fan tipi 126 derece mıknatıs adımına sahip yapının ikili gruplama grafikleri

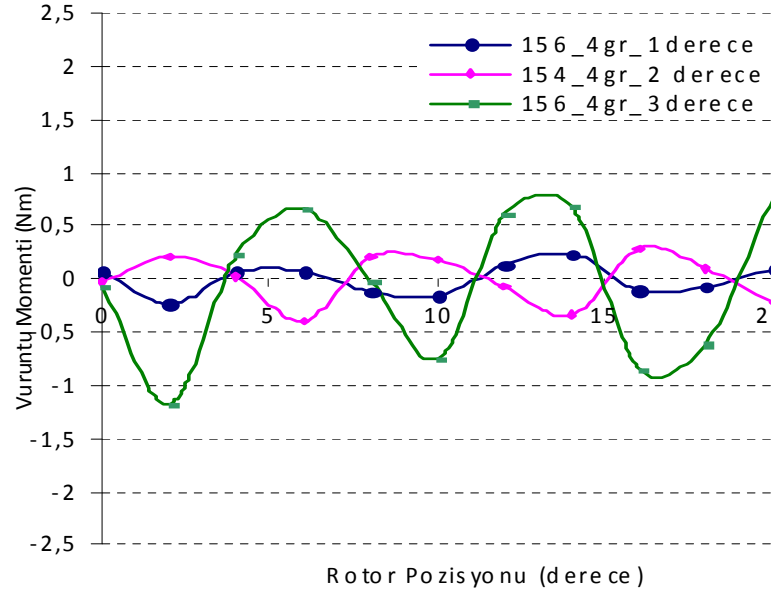


Şekil 5.21 Üçgen kaykılı 156 derece mıknatis adımlı yapının ikili gruplama grafikleri
 İkili gruplama tekniği kullanılarak yapılan analizlere göre en iyi sonuç 156 mıknatis adımına sahip üçgen kaykılı yapıda 2'li gruplamada 2 derece kaydırmadaki yapıda alınmış ve 0,524 Nm moment değeri elde edilmiştir.

Gruplama tekniği için yapılan diğer çalışmada dörtlü gruplama tekniği uygulamasıdır. 126 derece mıknatis adımlı fan ve 156 derece mıknatis adımlı üçgen kaykılı yapılar için elde edilen sonuçlar Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'de verilmiştir.



Şekil 5.22 Fan tipi 126 derece mıknatis adımlı yapının dörtlü gruplama grafikleri



Şekil 5.23 Üçgen kaykılı 156 derece mıknatıs adımlı yapının dörtlü gruplama grafikleri

Dörtlü gruplama tekniği kullanılarak yapılan analizlere göre en iyi sonuç 156 mıknatıs adımına sahip üçgen kaykılı yapıda 4'lü gruplamada 1 derece kaydırmadaki yapıda alınmış ve 0,24 Nm moment değeri elde edilmiştir.

Gruplama tekniğinde mıknatıslar simetrik konumlarından kaydırıldığında mıknatısın bir tarafındaki kaçak akı artarken diğer tarafındaki kaçak akı azalacaktır. Bu yöntemin başka bir dezavantajı ise moment dalgalanmasına neden olmasıdır. Vuruntu momenti azaltılması açısından iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen bu tekniğin dezavantajları göz önüne alındığında, uygulanmasının doğru olmayacağı düşünülmüştür.

5.6 Rotor Tarafında Uygulanan Tekniklerin Sonuçları

Vuruntu momentini azaltmak için öncelikle rotor tarafında fan tipi mıknatıs için mıknatıs adımı değeri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Bu analizlerden alınan sonuçlara göre optimum yapı 1,462 Nm değeri ile referans motora göre % 92,51 düşüşün sağlandığı 126 derece mıknatıs adımlı fan tipindedir.

Daha sonra elde edilen 126 derece mıknatıs adımlı fan tipindeki yapı ile aynı alana sahip olacak şekilde üçgen ve oval kaykılı mıknatıs yapıları için analizler yapılmıştır. Bu analizlere göre üçgen kaykılı mıknatıslı yapılar arasında optimum yapı 2,868 Nm değeri ile referans motora göre % 85,3 düşüşün sağlandığı 162 derece mıknatıs adımlı üçgen kaykılı tipli yapıdadır. Aynı şekilde oval kaykılı mıknatıslı yapılar arasında optimum yapı

2,044 Nm değeri ile referans motora göre % 89,527 düşüşün sağlandığı 137 derece oval mıknatıs tipindedir.

Elde edilen bu sonuçlardan sonra vurutuyu azaltmak amacıyla bir rotorun diğerine göre döndürüldüğü teknik bütün mıknatıs tipleri için denenmiştir. Alınan sonuçlara göre optimum yapı 4 derece döndürme işleminin yapıldığı 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaykılı mıknatısta sağlanmıştır. Bu yapıda elde edilen vuruuntu momentinin tepe değeri şekil 5.17'de verildiği gibi 0,475 Nm'dir. Bu sonuç referans motor ile karşılaştırıldığında vuruuntu momenti açısından %97,56 düşüş sağlanmıştır.

Vuruuntu momentini azaltmak için son olarak kullanılan mıknatıs gruplama tekniğinde mıknatıslar 2'li ve 4'l olarak farklı kaydırma açıları ile gruplanmıştır. Yapılan analizlere göre en iyi sonuçlar 156 mıknatıs adımına sahip üçgen kaykılı yapıda 4'l gruplamada 1 derece kaydırmadaki yapıda alınmış ve 0,24 Nm moment değeri elde edilmiştir. 126 derece mıknatıs adımlı fan tipi yapıda gruplama tekniği ile en iyi sonuç 4'l gruplamada 1 derecede derece kaydırmadaki yapıda alınmış ve 0,394 Nm moment değeri elde edilmiştir.

Prototip üretime geçmeden önce, buraya kadar analizleri yapılan vuruuntu momentini azaltma tekniklerinin ortalama moment ve moment dalgalanması üzerindeki etkilerine de bakılmalıdır. Bu bağlamda, Bölüm 6'da aksenal akılı sürekli mıknatıslı motorlarda moment dalgalanmasının 3D SEA kullanarak analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

VURUNTU MOMENTİNİ AZALTMAK AMACIYLA KULLANILAN TEKNİKLERİN ORTALAMA MOMENT ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN 3D SEA KULLANARAK ANALİZİ

Sürekli mıknatıslı motorlarda moment dalgalanmalarının birçok kaynağı vardır. Bunlardan en önemlileri, vuruntu momenti, PWM harmonikleri, ideal olmayan zıt EMK dalga şekli, faz komütasyonu ve DC baradaki dalgalanmalardır.

Bu bölümde 3D SEA kullanılarak vuruntu momentleri açısından en iyi sonuçların alındığı farklı mıknatis yapıları ve kullanılan tekniklerin ortalama moment ve moment dalgalanmasına etkileri analiz edilmiştir. Bu amaçla tüm motor modelleri aynı stator akımı ile yüklenmiştir. Ayrıca elde edilen değerlerin, hem referans motorla hem de kendi aralarında karşılaştırması yapılmıştır.

6.1 Fan Tipi Mıknatısların Moment Analizleri

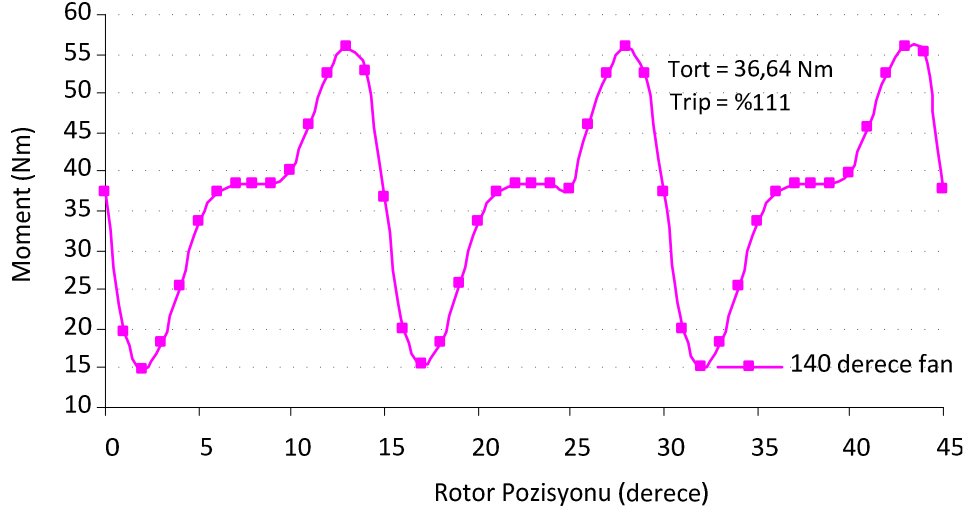
Fan tipindeki yapıda; referans değer olan 140 derece fan yapıdaki mıknatis ve en iyi sonucun alındığı 126 derece mıknatis adımlı fan yapıdaki mıknatıslar için moment analizleri yapılmıştır. Ayrıca 126 mıknatis adımlı fan tipi yapı ile karşılaştırma yapabilmek için vuruntu momenti çalışması yapılan 122 ve 128 derece mıknatis adımlı fan tipi mıknatis yapılarının da moment analizleri yapılmıştır.

a) Fan tipi 140 derece mıknatis adımlı referans yapının moment analizi

Fan tipi 140 derecelik mıknatis adımlı yapı referans motorun rotorunda kullanılan mıknatis yapısıdır. Bu yapının moment analizi yapılmıştır ve Şekil 6.1'den de görüldüğü gibi eşitlik (6.1)'deki hesaba göre %111'lik gibi oldukça yüksek bir moment

dalgalanması görülmüştür. Bu değer, üzerine çalışma yapılan diğer yapılarla karşılaştırmada referans olarak kullanılacaktır.

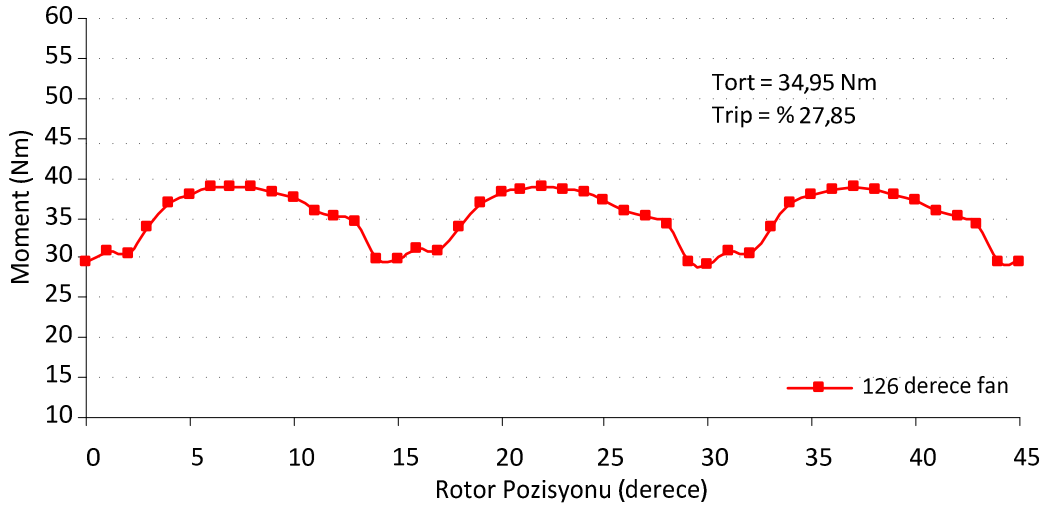
$$\%T_{\text{ripple}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{ort}}} \quad (6.1)$$



Şekil 6.1 Referans motor yapısının moment analiz grafiği

b) Fan tipi 126 derece mıknatıs adımli yapının moment analizi

Fan tipi 126 derecelik mıknatıs adımli yapıda moment dalgalanması Şekil 6.2'de görüldüğü gibi % 27,85 olarak bulunmuştur.



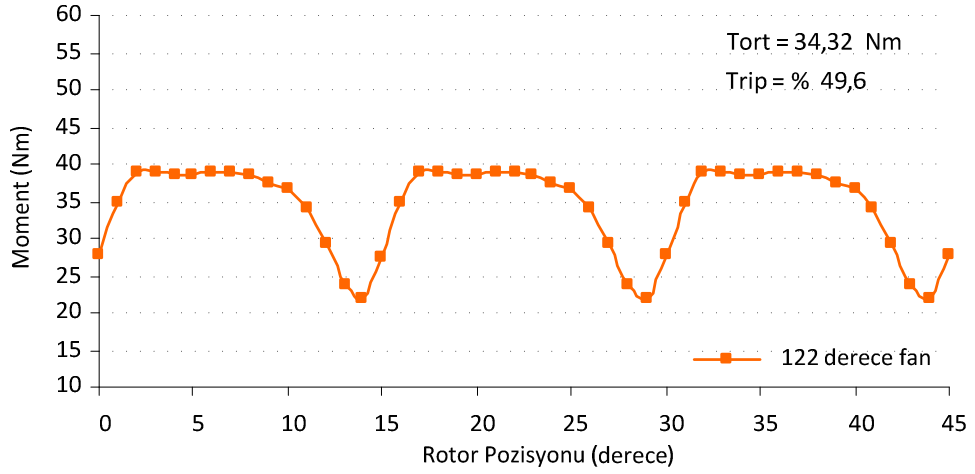
Şekil 6.2 Fan tipi 126 derecelik mıknatıs adımıdaki yapının moment grafiği

Fan tipi 126 derece mıknatıs adımli yapı için alınan sonucu referans motor haricinde diğer fan tipi yapılar ile karşılaştırabilmek amacıyla 122 derece ve 128 derece mıknatıs

adımlarındaki fan tipi yapılar için moment analizi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te verilmiştir.

c) Fan tipi 122 derece mıknatıs adımlı yapının moment analizi

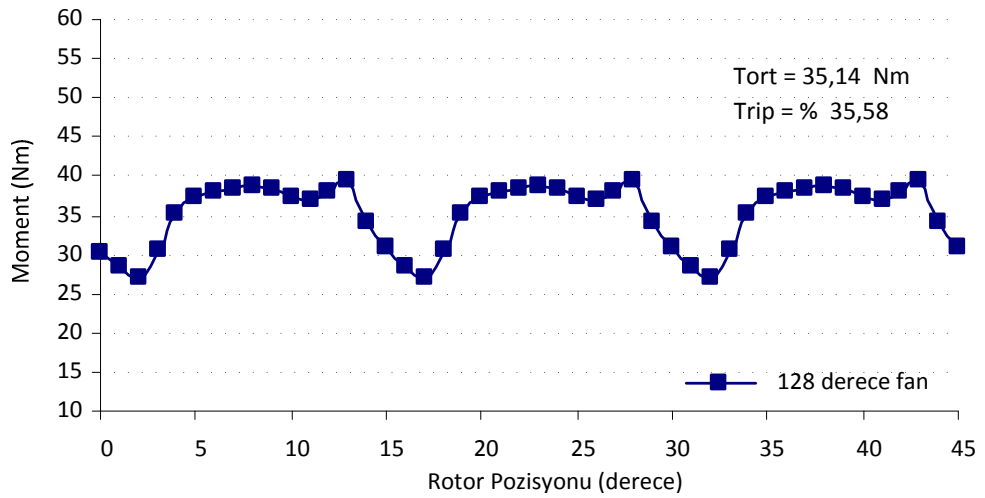
Fan tipi 122 derecelik mıknatıs adımlı yapıda moment dalgalanması Şekil 6.3'de görüldüğü gibi %49,6 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.3 Fan tipi 122 derecelik mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği

d) Fan tipi 128 derece mıknatıs adımlı yapının moment analizi

Fan tipi 128 derecelik mıknatıs adımlı yapıda moment dalgalanması Şekil 6.4'te görüldüğü gibi %35,58 olarak bulunmuştur.



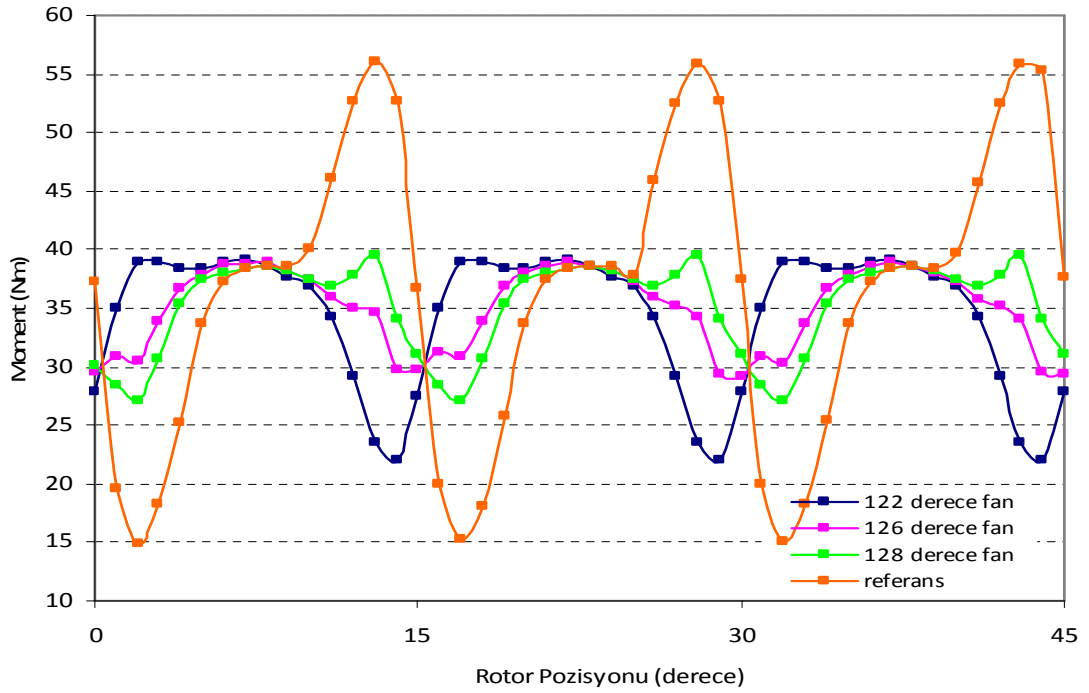
Şekil 6.4 Fan tipi 128 derecelik mıknatıs adımdaki yapının moment grafiği

e) Fan tipi yapıların karşılaştırılması

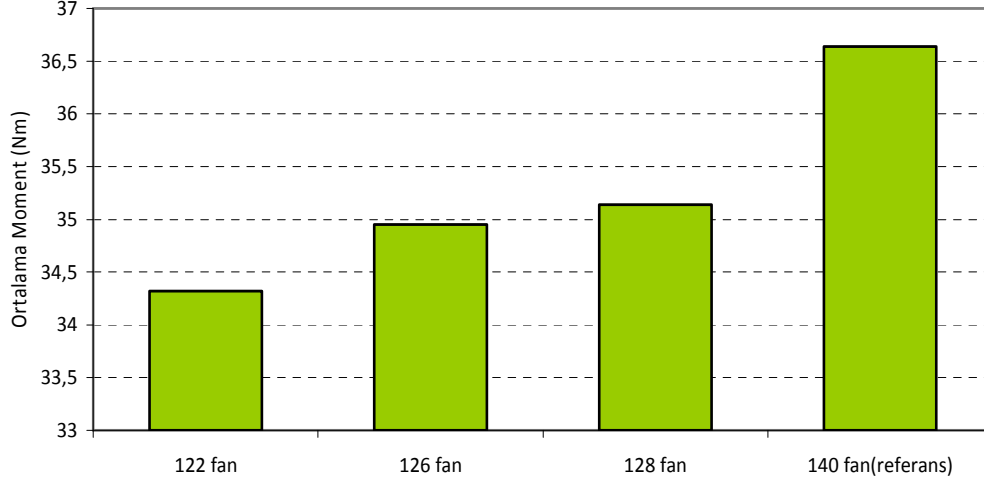
Fan tipi mıknatıslarda elde edilen moment değerleri grafiksel ve karşılaştırmalı olarak Şekil 6.5 ile Şekil 6.7 arasında verilmiştir.

Değerlerden görüldüğü gibi vuruğu momenti açısından optimum değer elde edilen 126 derece mıknatıs adımı fan tipi yapıda, moment dalgalanması da diğer fan tipi yapılara göre avantajlı durumdadır. Bu yapıda moment dalgalanması, 140 derece mıknatıs adımı fan tipi referans motor yapısında görülen moment dalgalanmasına göre % 74,9 oranında azaltılmıştır. Buna ek olarak elde edilen ortalama moment değerinde de referans motora göre sadece % 4,5 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

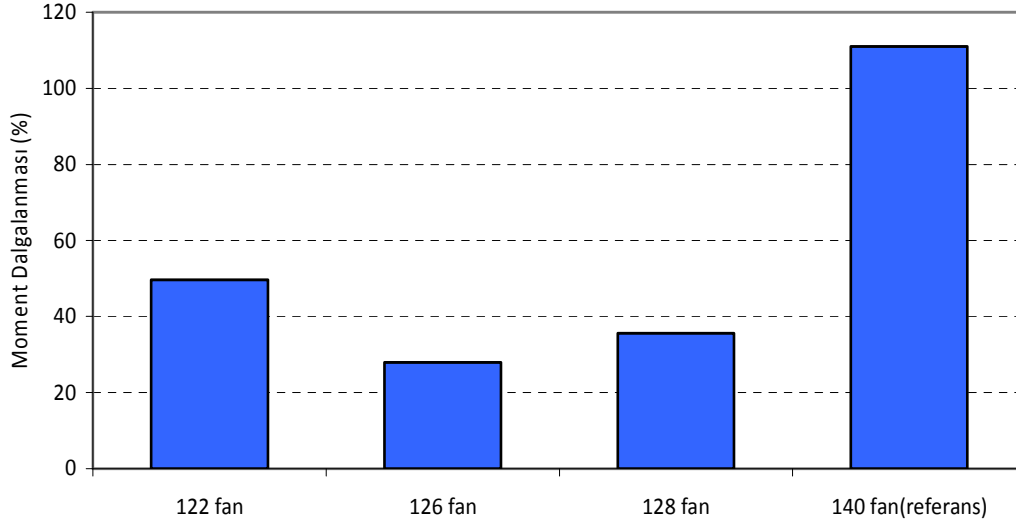
Fan tipi yapılar için elde edilen ortalama moment değerleri toplu olarak gösterilmesi Şekil 6.5’de görülmektedir.



Şekil 6.5 Fan tipi yapıların moment grafikleri



Şekil 6.6 Fan tipi yapıların ortalama moment değerlerinin karşılaştırılması



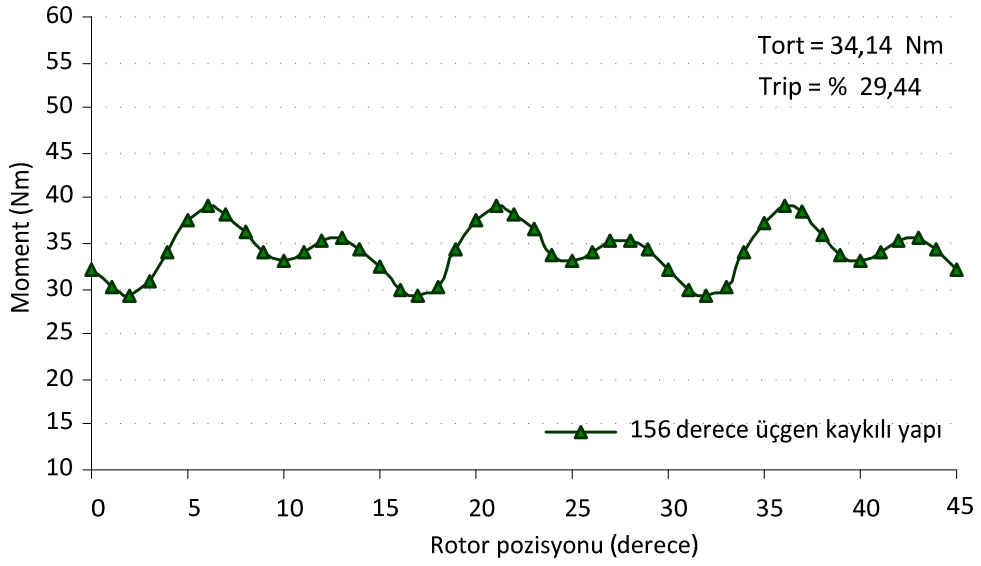
Şekil 6.7 Fan tipi yapıların moment dalgalanmalarının karşılaştırılması

6.2 Üçgen Kayıklı Tipteki Mıknatıs Yapılarının Moment Analizleri

Çalışmamızın bu bölümünde vuruğu momenti açısından üçgen kayıklı teknikte en iyi sonucun alındığı 156 derece mıknatıs adımlı yapı için moment analizleri yapılmıştır. Ayrıca karşılaştırmalarda kullanabilmek amacıyla vuruğu momenti açısından en iyi sonuçların alındığı diğer üçgen yapılar olan 160 ve 162 derece mıknatıs adımına sahip üçgen kayıklı yapılarında moment analizleri yapılmıştır.

a) Üçgen kayıklı 156 derece mıknatıs adımlı yapının moment analizi

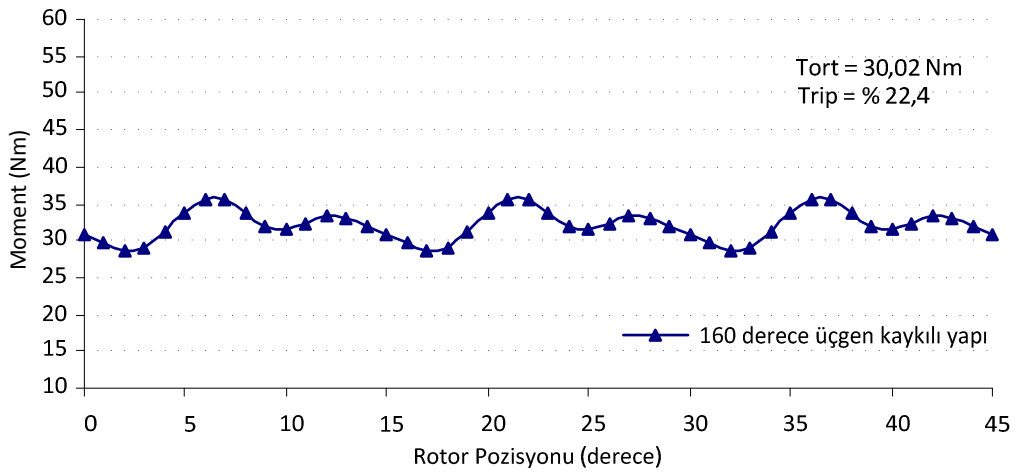
Üçgen kayıklı 156 derecelik mıknatıs adımına sahip yapıda moment dalgalanması Şekil 6.8'den görüldüğü gibi % 29,44 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.8 Üçgen kaykılı 156 derece mıkknatis adımdaki yapının moment grafiği

b) Üçgen kaykılı 160 derece mıkknatis adımlı yapının moment analizi

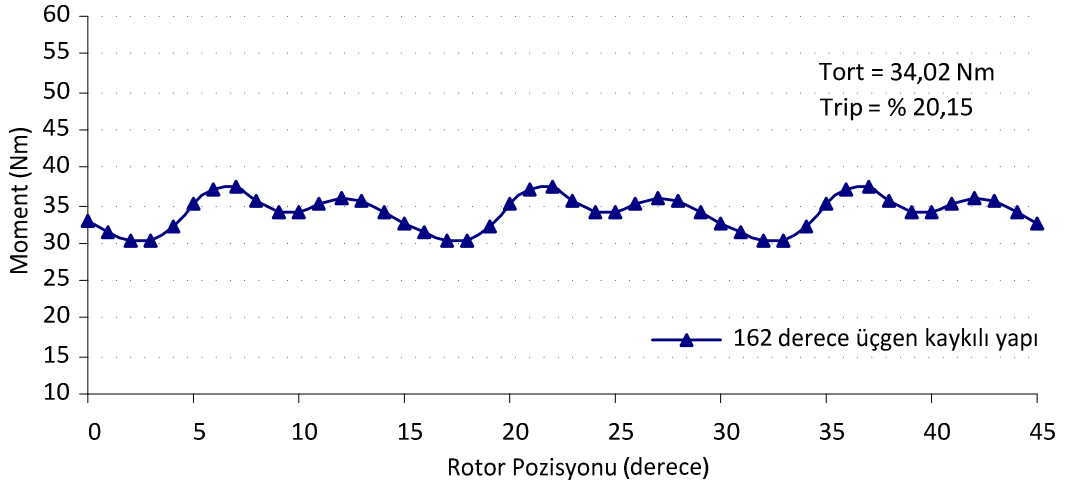
Üçgen kaykılı 160 derecelik mıkknatis adımına sahip yapıda moment dalgalanması Şekil 6.9'dan görüldüğü gibi % 22,4 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.9 Üçgen kaykılı 160 derece mıkknatis adımdaki yapının moment grafiği

c) Üçgen kaykılı 162 derece mıkknatis adımlı yapının moment analizi

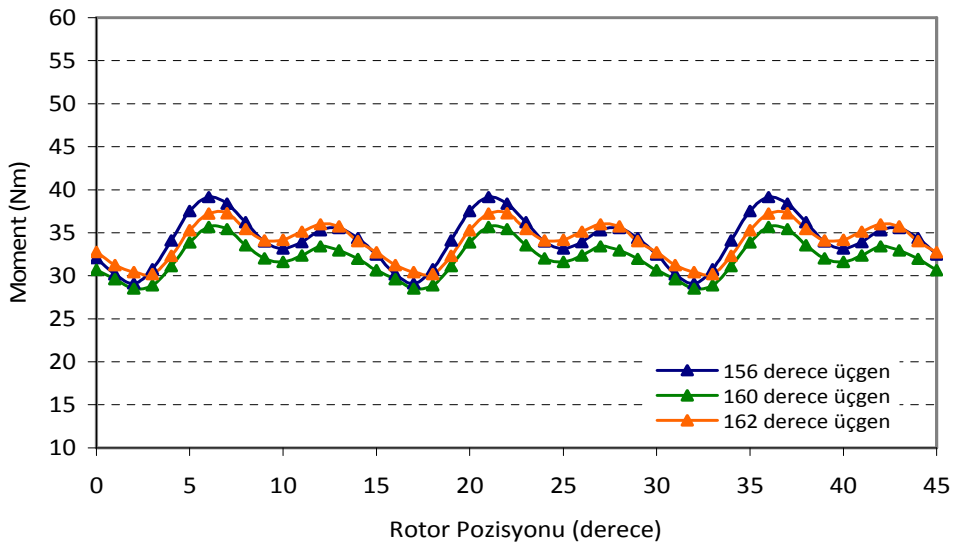
Üçgen kaykılı 162 derecelik mıkknatis adımına sahip yapıda moment dalgalanması Şekil 6.10'den görüldüğü gibi % 20,15 olarak bulunmuştur.



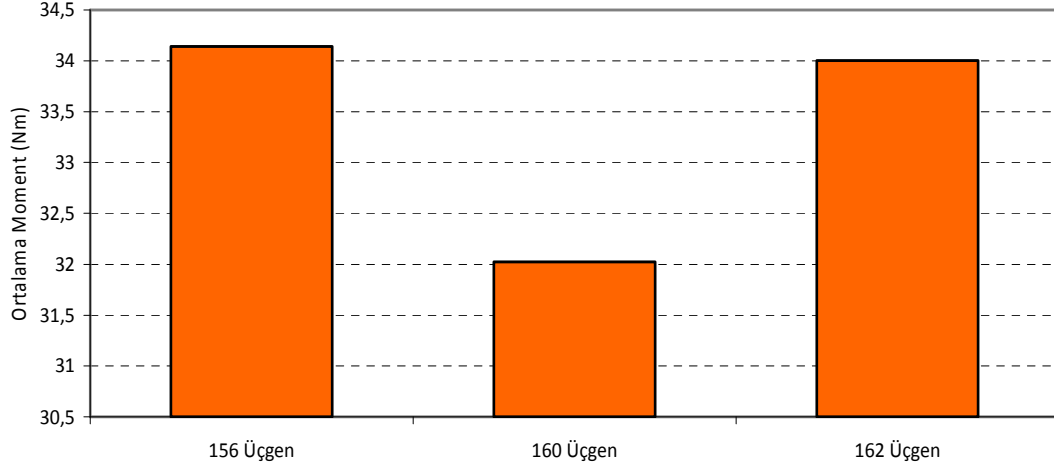
Şekil 6.10 Üçgen kaykılı 162 derece mıknatıs adımıdaki yapının moment grafiği

d) Üçgen kaykılı yapıların karşılaştırılması

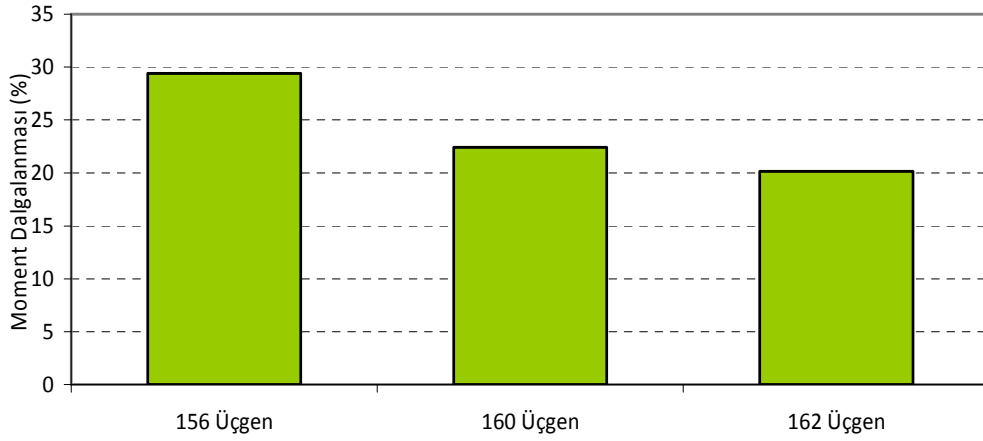
Üçgen kaykılı mıknatıslar kullanılarak analizi yapılan motora ait elde edilen moment değerleri grafiksel ve karşılaştırmalı olarak Şekil 6.11 ile Şekil 6.13 arasında verilmiştir. Değerlerden görüldüğü gibi vuruğu momenti açısından optimum değer elde edilen 156 derece mıknatıs adımı üçgen kaykılı yapıda ortalama moment değeri diğer yapılar ile yaklaşık aynı seviyededir. Bu yapıda 140 derece mıknatıs adımı fan tipi referans motor yapısında görülen moment dalgalanması % 69,2 oranında azaltılmıştır. Buna ek olarak elde edilen ortalama moment değerinde, referans motora göre sadece % 6,8 oranında düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 6.11 Üçgen kaykılı yapıların moment grafikleri



Şekil 6.12 Üçgen kaykılı mıkknatis yapıların moment değerlerinin karşılaştırılması



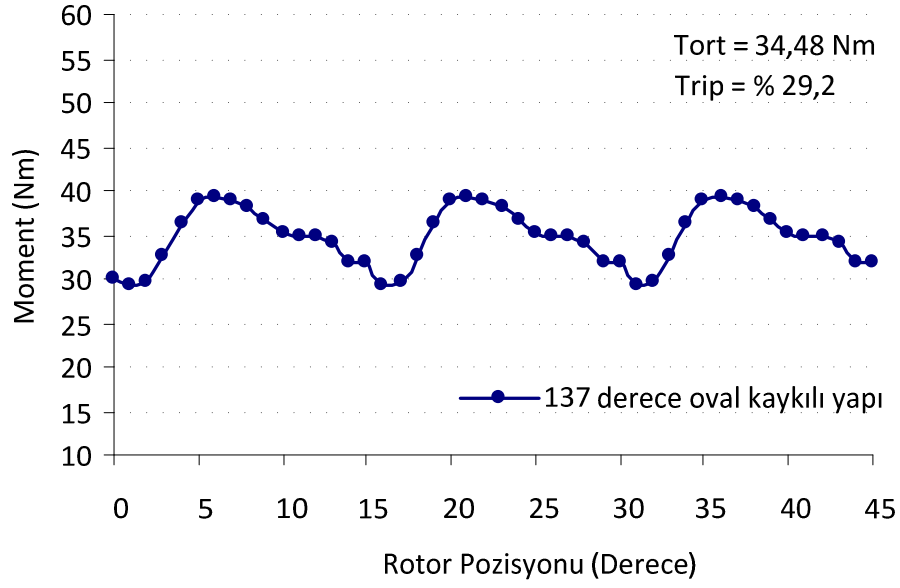
Şekil 6.13 Üçgen kaykılı mıkknatis yapılarının moment dalgalanmasının karşılaştırılması

6.3 Oval Kaykılı Tipteki Mıkknatis Yapılarının Moment Analizleri

Çalışmamızın bu bölümünde vuru momentini açısından oval kaykılı teknikte en iyi sonucun alındığı 137 derece mıkknatis adımlı yapı için moment analizleri yapılmıştır. Ayrıca karşılaştırmalarda kullanabilmek amacıyla vuru momentini açısından en iyi sonuçların alındığı diğer oval yapı olan 139 derece mıkknatis adımına sahip oval kaykılı yapılarda moment analizleri yapılmıştır.

a) Oval kaykılı 137 derece mıkknatis adımlı yapının moment analizi

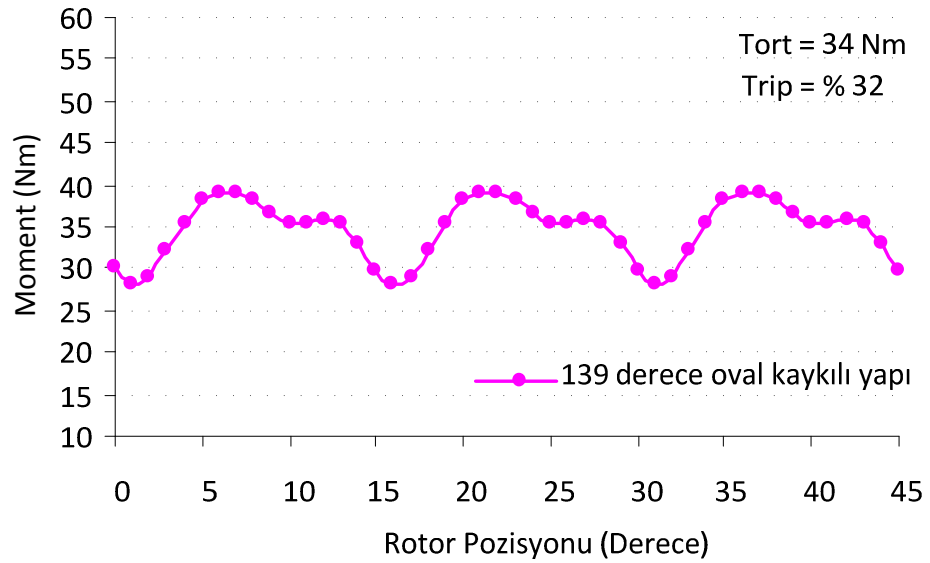
Oval kaykılı 137 derecelik mıkknatis adımına sahip yapıda moment dalgalanması Şekil 6.14'den görüldüğü gibi % 29,2 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.14 Oval kaynaklı 137 derece mıknaş adımıdaki yapının moment analiz grafiği

b) Oval kaynaklı 139 derece mıknaş adımı yapının moment analizi

Oval kaynaklı 139 derecelik mıknaş adımına sahip yapıda moment dalgalanması Şekil 6.15'den görüldüğü gibi % 32,27 olarak bulunmuştur.

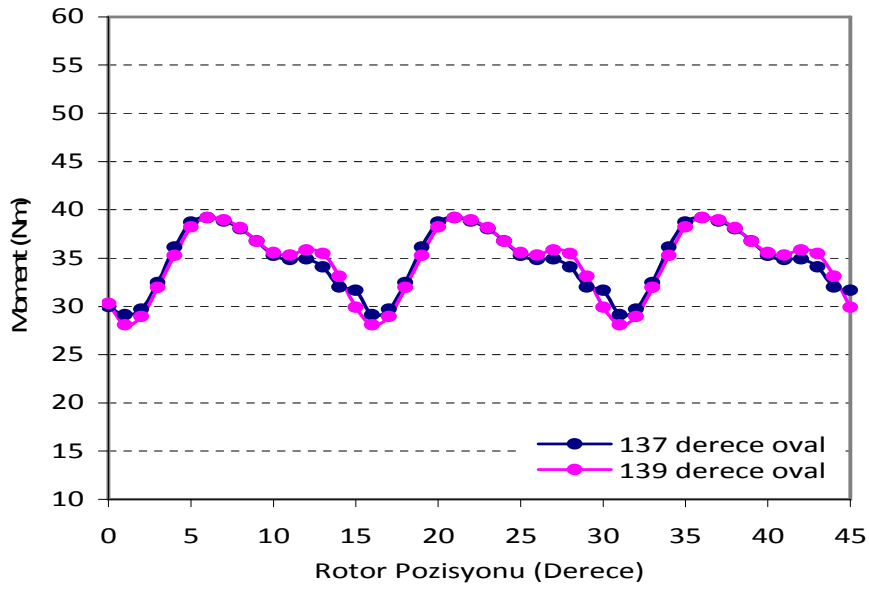


Şekil 6.15 Oval kaynaklı 139 derece mıknaş adımıdaki yapının moment analiz grafiği

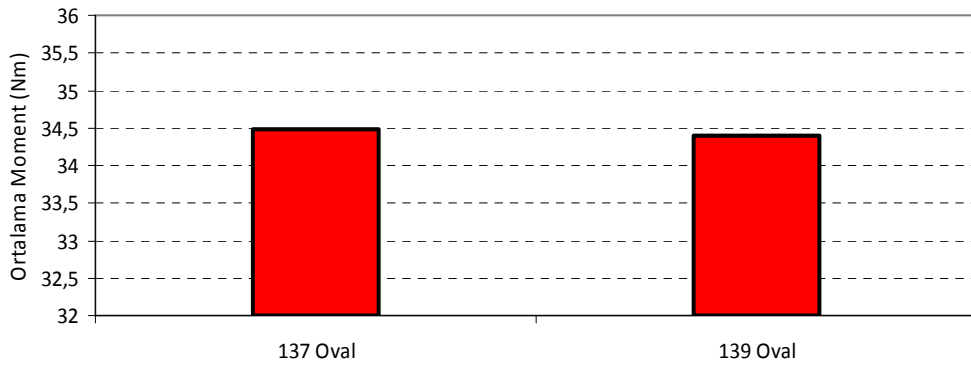
c) Oval kaynaklı yapıların karşılaştırılması

Oval kaynaklı mıknaşlar kullanılarak analizi yapılan motora ait elde edilen moment değerleri grafiksel ve karşılaştırmalı olarak Şekil 6.16 ile Şekil 6.18 arasında verilmiştir. Değerlerden görüldüğü gibi vuruş momenti açısından optimum değer elde edilen

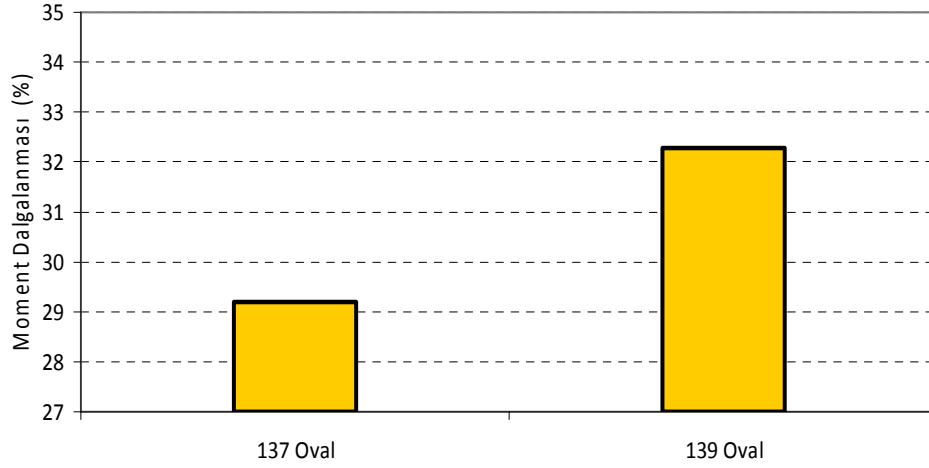
137 derece mıknatıs adımlı oval kaynaklı yapıda ortalama moment değeri diğer yapıların seviyelerindedir. Bu yapıda 140 derece mıknatıs adımlı fan tipi referans motor yapısında görülen moment dalgalanması % 73,6 oranında azaltılmıştır. Buna ek olarak elde edilen ortalama moment değerinde de referans motora göre sadece % 5,88 kadar düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 6.16 Oval kaynaklı yapıların moment grafikleri



Şekil 6.17 Oval kaynaklı mıknatıs yapıların moment değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.18 Oval kaynaklı mıknatıs yapılarının moment dalgalanmalarının karşılaştırılması

6.4 Rotorun Dairesel Döndürülmesi Tekniğinin Ortalama Momente Etkisi

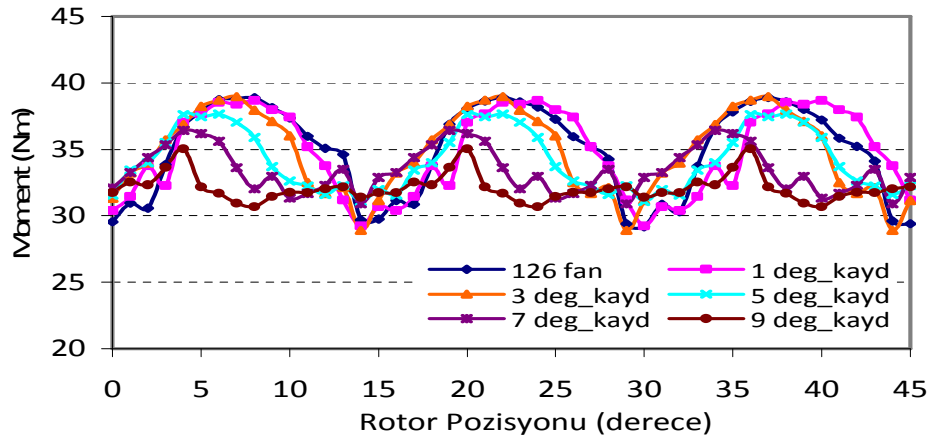
Bu bölümde vuru momentini azaltmak için uygulanan bir rotorun diğerine göre dairesel olarak döndürülmesi tekniğinin, motorun ortalama momentine etkisine bakılmıştır. Bu amaçla vuru momentini açısından en iyi sonuçların alındığı 126 derece mıknatıs adımlı fan ve 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaynaklı yapıdaki mıknatıslar için rotorun dairesel döndürülmesi tekniği kullanılan çalışmaların moment analizleri yapılmıştır. Çizelge 6.1’de 126 derece mıknatıs adımlı fan yapıdaki mıknatıslar için üzerine çalışılan rotorun, dairesel döndürülmesi sonuçları görülmektedir. Çizelge 6.2’de ise 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaynaklı yapıdaki mıknatıslar için üzerine çalışılan, rotorun dairesel döndürülmesi tekniğinin sonuçları görülmektedir. Elde edilen sonuçların grafiksel olarak gösterilmesi Şekil 6.19 ve 6.20’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Fan 126 derece mıknatıs adımlı yapıdaki rotor kaydırma sonuçları

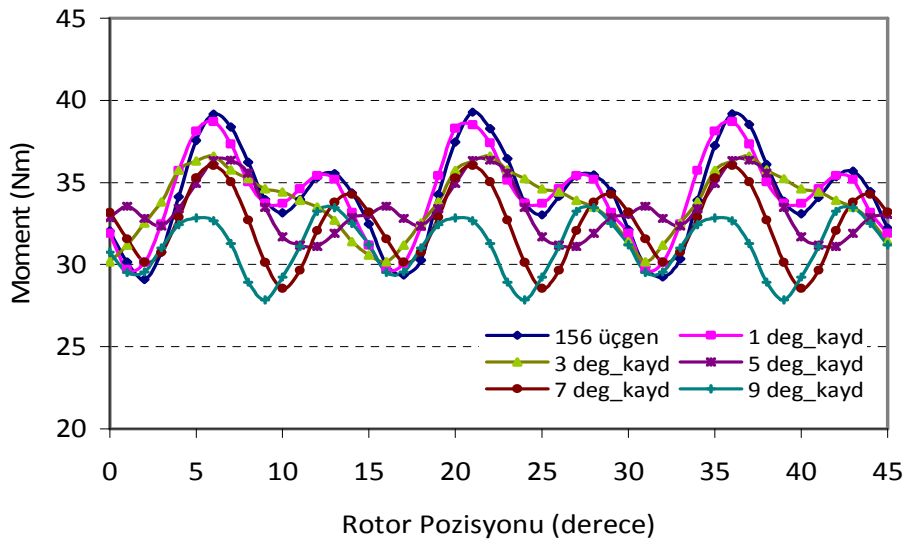
| Çalışma yapılan teknik | Ortalama moment (Nm) | Moment dalgalanması (%) |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| 1 derece rotor kaydırma | 34,8 | 27,17 |
| 3 derece rotor kaydırma | 34,791 | 22,52 |
| 5 derece rotor kaydırma | 34,213 | 19,213 |
| 7 derece rotor kaydırma | 33,455 | 15,8 |
| 9 derece rotor kaydırma | 32,085 | 12,08 |

Çizelge 6.2 Üçgen kaykılı 156 derece mıknatis adımlı yapıdaki rotor kaydırma sonuçları

| Çalışma yapılan teknik | Ortalama moment (Nm) | Moment dalgalanması (%) |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| 1 derece rotor kaydırma | 34,25 | 26,32 |
| 3 derece rotor kaydırma | 33,916 | 17,53 |
| 5 derece rotor kaydırma | 33,36 | 15,7 |
| 7 derece rotor kaydırma | 32,42 | 23 |
| 9 derece rotor kaydırma | 31,122 | 18,04 |



Şekil 6.19 126 derece mıknatis adımlı fan yapısındaki mıknatisler için rotor kaydırma moment grafikleri

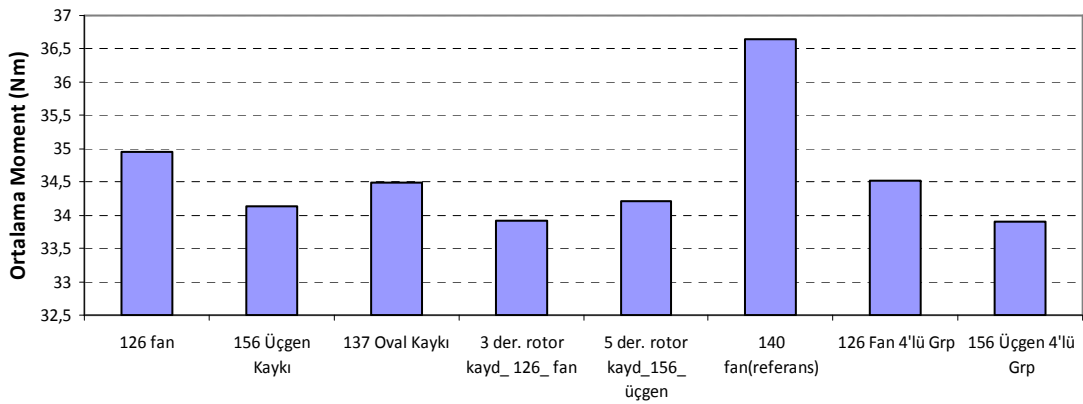


Şekil 6.20 156 derece mıknatis adımlı üçgen kaykılı yapıdaki mıknatisler için rotor kaydırma moment grafikleri

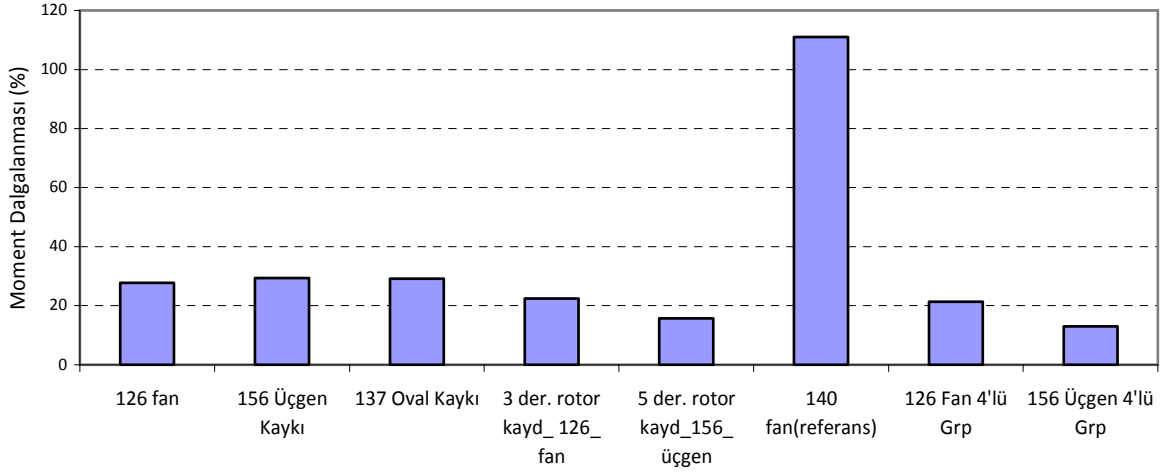
Fan tipi 126 derece mıknatıs adımlı yapıdaki moment dalgalanması %27,85 olarak bulunmuştu. Bu yapı için rotorlardan birisi diğerine göre 9 derece kaydırıldığında moment dalgalanması %12,08 olarak elde edildi. Üçgen kayıklı 156 derece mıknatıs adımlı yapıdaki moment dalgalanması %29,44 olarak bulunmuştu. Bu yapı için rotorlardan birisi diğerine göre 5 derece kaydırıldığında moment dalgalanması %15,7 olarak elde edildi. Bu da rotor kaydırma tekniğinin moment dalgalanmasını büyük oranda azaltabildiğinin kanıtıdır.

6.5 Moment Analizlerinin Sonuçları

Bu bölümde fan, üçgen kayıklı ve oval kayıklı yapıdaki değişik ölçülerdeki mıknatıslar kullanarak vuruğu momenti için en iyi sonuçların alındığı tekniklerin, ortalama moment analizleri ve moment dalgalanmaları karşılaştırılması verilmiştir. Vuruğu momenti azaltılması için önerilen tekniklerin ortalama momentte ciddi bir azalmaya neden olmadığı moment analizleri için elde edilen sonuçlardan görülmüştür (Şekil 6.21).



Şekil 6.21 Kullanılan tekniklerin optimum moment değerlerinin karşılaştırılması. Ayrıca fan, üçgen kayıklı ve oval kayıklı yapıdaki değişik ölçülerdeki mıknatıslar kullanarak vuruğu momenti için en iyi sonuçların alındığı tekniklerin moment dalgalanmalarına bakıldığında, vuruğu momenti azaltılması için önerilen tekniklerin moment dalgalanması bakımından referans değere göre büyük oranda düzelleme gösterdiği Şekil 6.22'den açıkça görülmektedir.



Şekil 6.22 Kullanılan tekniklerin optimum moment dalgalanmalarının karşılaştırılması

Referans motor maksimum vuruşu verecek şekilde tasarlandığı için moment dalgalanması da maksimum seviyededir. Fan tipi yapılar içinde 126 derecelik mıknatıs adımı oranına sahip yapıda en düşük vuruşu değeri ve en düşük moment dalgalanması elde edilmiştir. Aynı şekilde üçgen kaykılı tipli yapılar içinde 156 derecelik mıknatıs adımı oranına sahip yapıda rotor kaydırma tekniği de kullanıldığında en düşük vuruşu değeri ve en düşük moment dalgalanması elde edilmiştir.

Buna göre rotor döndürmeleri de uygulandığında vuruşu momenti açısından en iyi sonucun elde edildiği 156 derecelik mıknatıs adımı oranına sahip üçgen kaykılı mıknatıs yapısı en optimum yapıdır. SEA sonuçlarından elde edilen değerlere göre seçilen mıknatıslar ile tasarlanan motorun üretim aşamaları ve deneysel doğrulama için kurulan test düzeneği Bölüm 7'de verilmiştir.

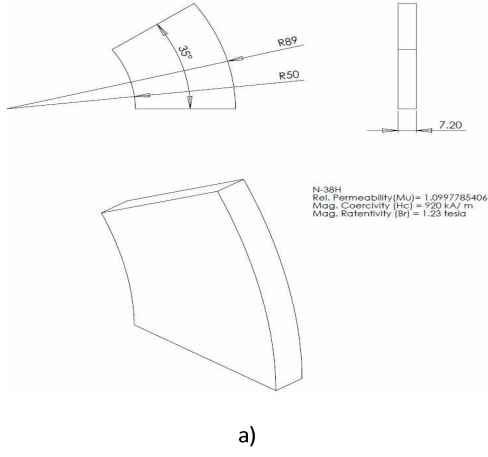
**EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI DİSK MOTORUN ÜRETİM AŞAMALARI
ve 3D SEA SONUÇLARININ DENEYSEL ÇALIŞMA İLE DOĞRULANMASI**

Bu bölümde SEA sonuçlarına göre seçilen ve özellikleri Çizelge 7.1’de verilen 3 farklı mıknatıs yapısının detaylı çizimleri ve rotor üretiminde kullanılan mıknatısların resimleri verilmiştir. Aynı zamanda tez çalışmasının amacına uygun olarak tasarlanıp imal edilmiş rotor yapılarının da çizimleri ve resimleri verilmiştir. Benzer şekilde stator çizimleri, stator üretim aşamaları, motor gövdesi, mil gibi diğer parçaların da resimleri verilmiştir. Ayrıca vurutu momentini ölçmek için özel olarak kurulan deney düzeneğinin yapısı verilip üretilen motorun test sonuçları ile 3D SEA değerleri karşılaştırmaları yapılmıştır.

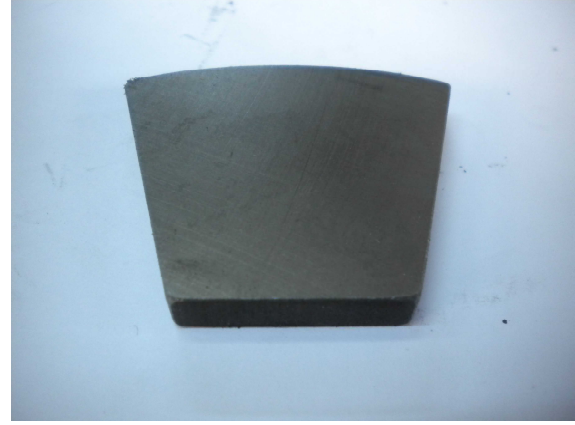
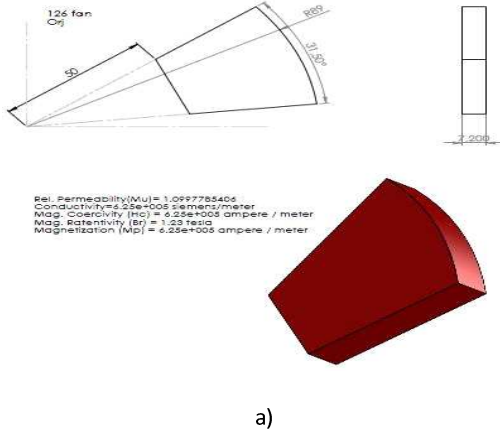
Çizelge 7.1 Laboratuvar ortamında vurutu momentleri incelenecek rotor yapıları

| Mıknatıs Yapısı | Mıknatıs Çeşidi | Açıklama |
|------------------------|------------------------|--|
| Fan Tipi 140 Derece | NdFeB | Referans Yapı |
| Fan Tipi 126 Derece | NdFeB | En düşük T_{cog} değerine sahip fan yapı |
| Üçgen Tip 156 Derece | NdFeB | En düşük T_{cog} değerine sahip üçgen yapı |

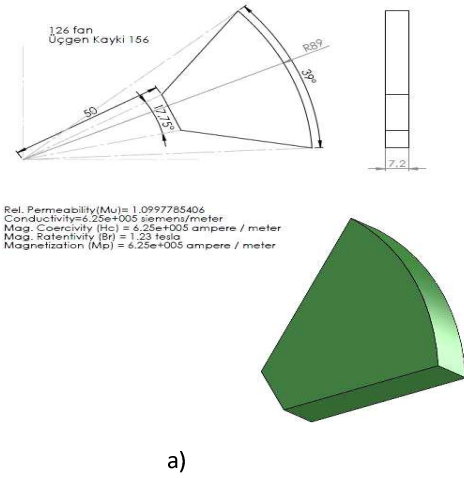
7.1 Mıknatıs Çizimleri ve Resimleri



Şekil 7.1 Fan tipi 140 derece mıknatıs



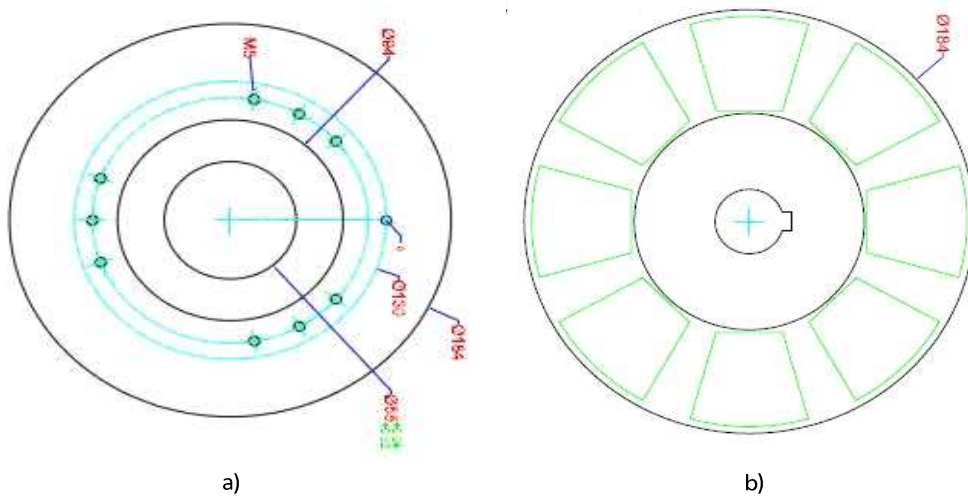
Şekil 7.2 Fan tipi 126 derece mıknatıs



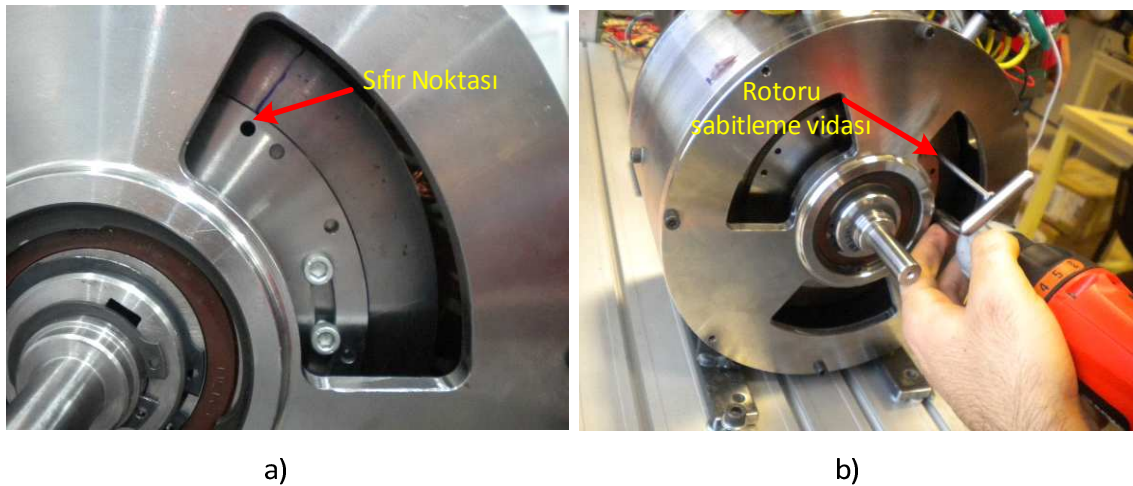
Şekil 7.3 Üçgen kayıklı 156 derece mıknatıs

7.2 Disk Rotorların Çizimleri ve Üretilmesi

Prototipi üretilen EASM motorun rotor diskleri standart çelikten yapılabilirler ve tek parça olarak üretilebilirler. Bu çalışmada kullanılacak rotor diskleri özel olarak vuruntu momentinin azaltılması amaçlı tasarlanmıştır. Bu disklerin özelliği rotorlardan birinin diğerine göre istenilen açılarda döndürülebilir olmasıdır. Bu sayede birbirlerine göre farklı konumlardaki rotorların vuruntusu rahatlıkla incelenebilecektir. Şekil 7.4'de rotor yapısının çizimleri ve Şekil 7.5'te prototip motorun özel tasarım rotor diskinin resimleri ve döndürme işleminin yapılma şekli verilmiştir.



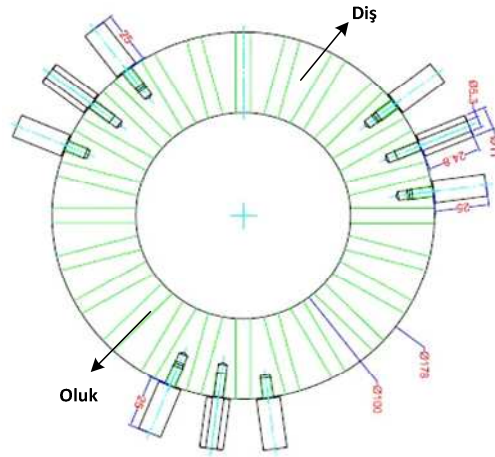
Şekil 7.4 EASM motorun a) hareketli disk b) rotor çizimleri



Şekil 7.5 EASM motorun a) Özel tasarım rotor disk b) rotorun döndürme işlemi

7.3 Eksenel Akılı Disk Motor Statorunun Çizimleri ve Üretilmesi

Eksenel akılı disk motorun stator yapısının çizimleri ve üretim aşamaları Şekil 7.6 ile Şekil 7.7’de verilmiştir. Şekil 7.7’de statorun kalıba çekilmesi, olukların açılması ve oluk yalıtkanları ve sargıların yerleştirilme işlemlerinin sırası görülmektedir. Sargı oluklarının açılma işlemi 5 eksen CNC tarafından yapılmıştır.

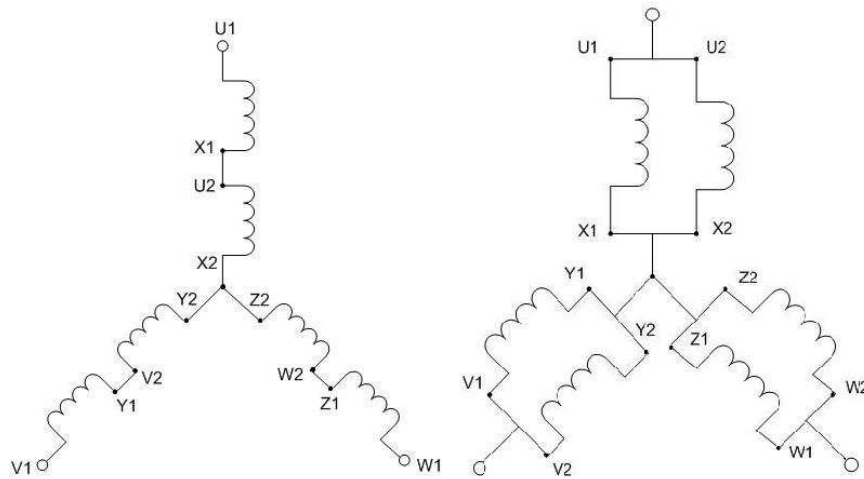


Şekil 7.6 EASM disk motorun stator çizimleri

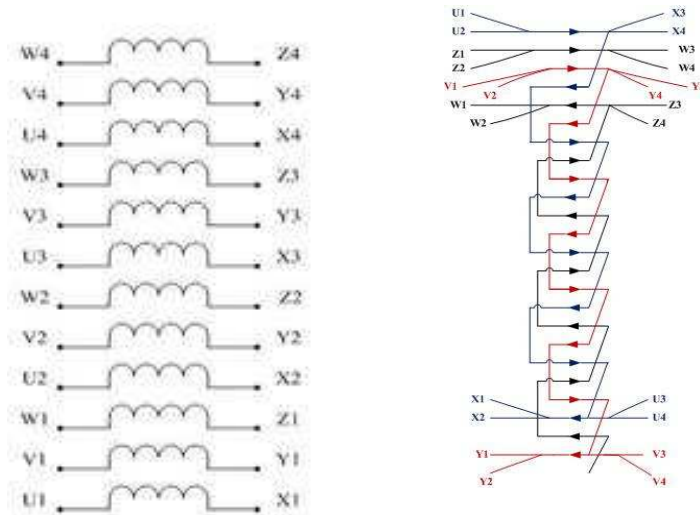


Şekil 7.7 EASM disk motor statorunun üretim aşamaları

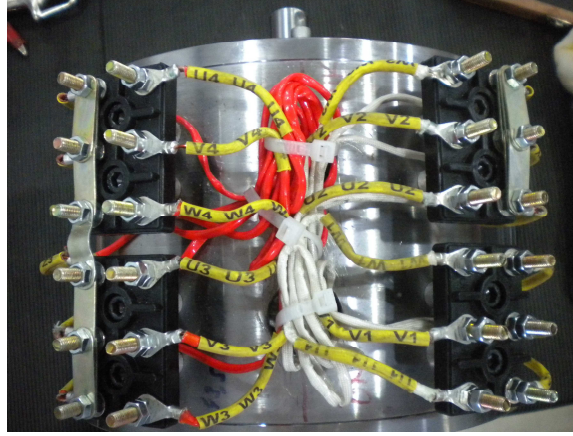
Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'da sargı yapısı detayları verilmiştir. Motor sargıları statorun her iki yakasında iki farklı set olarak sarılmış, her bir sargı seti iki adet seri ya da paralel bağlanabilen bobinden oluşturulmuştur. Sargıların seri ya da paralel bağlanabilme özelliği sayesinde çalışma esnasında motorun hızı artırılıp azaltılabilir. Ayrıca statorun her iki tarafına yerleştirilen bu sargılar kendi aralarında da seri ya da paralel olarak bağlanabilirler. Bu sayede motor anma akım ve gerilim değerleri ile oynamak mümkün hale gelmektedir.



Şekil 7.8 EASM motorun sargı düzeni



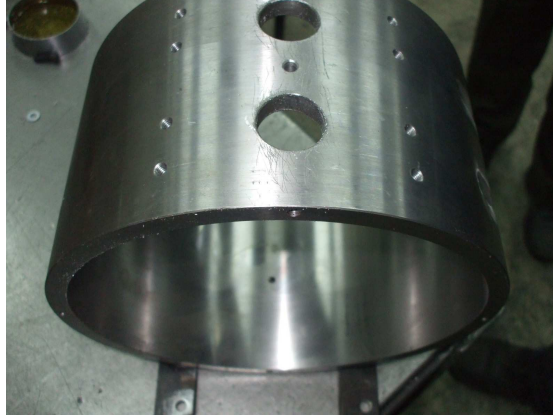
Şekil 7.9 EASM motorun sargı düzeni detayları



Şekil 7.10 Sargı bağlantı terminali

7.4 Motor Gövdesi ve Milin Üretilmesi

Motor gövdesi ve mil resimleri, Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de verilmiştir. Motor gövdesi alüminyumdan, mili ise paslanmaz çelikten üretilmiştir. Motor milinin tasarımı farklı rotorların rahatlıkla takılıp çıkarılabilmesine olanak sağlayacak şekilde yapılmıştır. Motor, deney düzeneğine ayaklar vasıtası ile bağlanmaktadır.

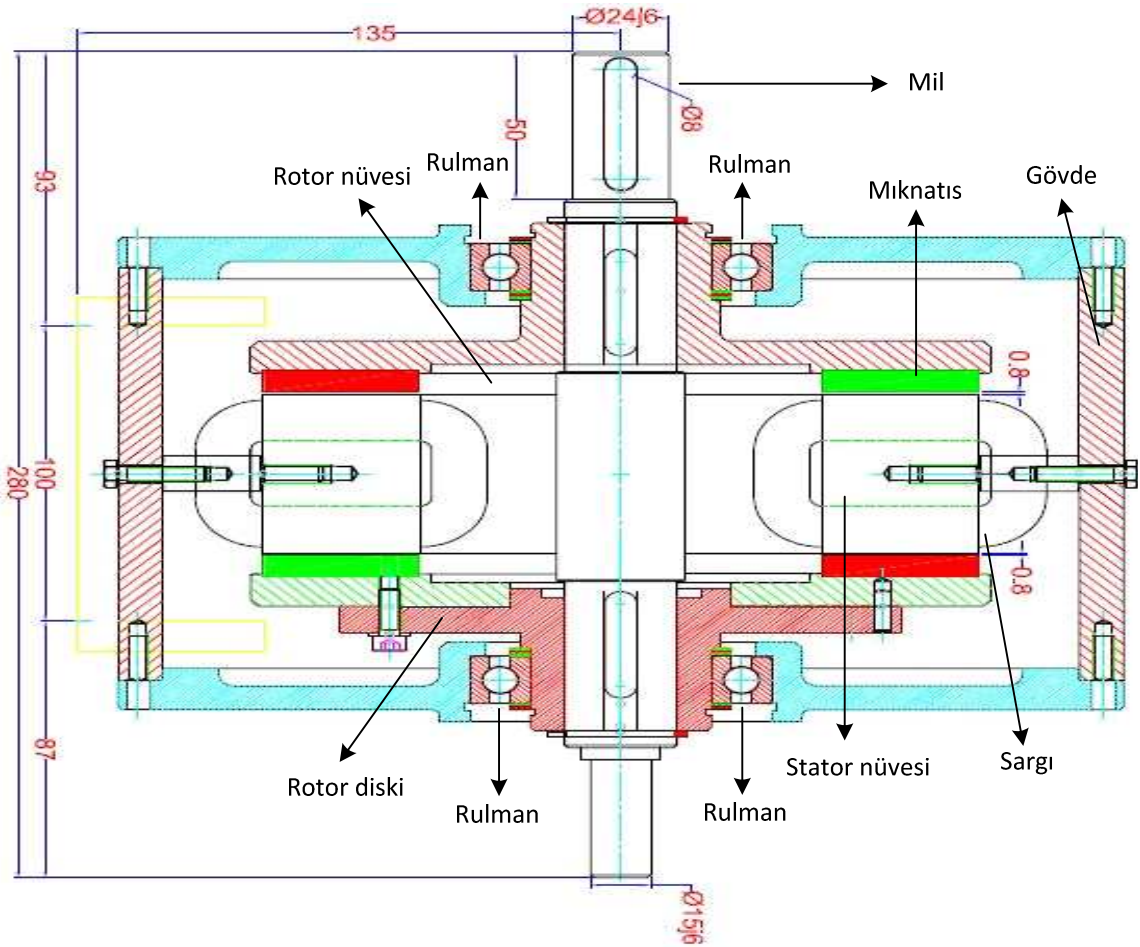


Şekil 7.11 EASM disk motorun gövdesinin resmi

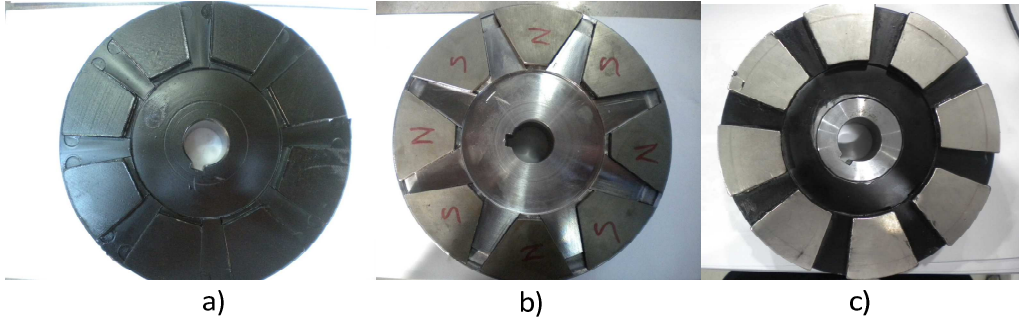


Şekil 7.12 EASM disk motor milinin resmi

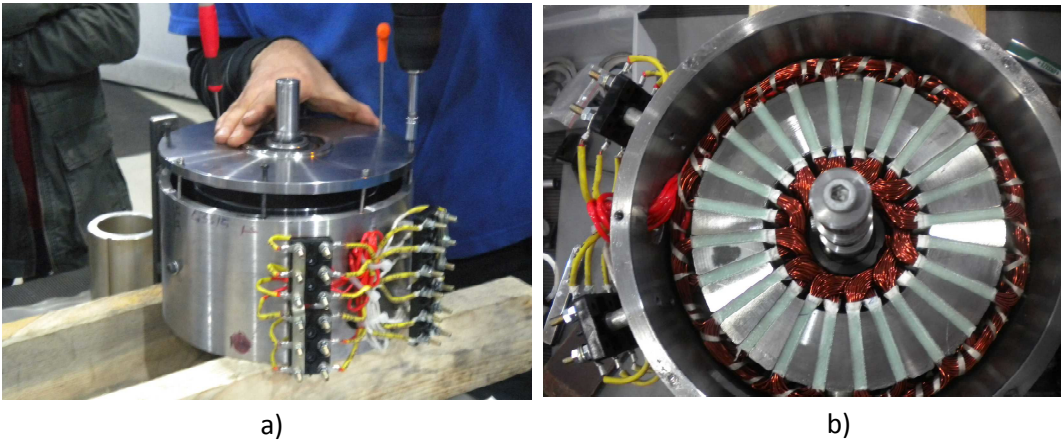
Yapılan çalışmada özel olarak üretilen iki rotor tek statorlu açık oluklu disk tipi motor kullanılmıştır. Şekil 7.13’de EASM disk motorun detaylı çizimi görülmektedir. Rotor montajı ve demontajını kolay hale getirmek için oluşturulmuş motor gövdesinde aynı stator yapısı ile Şekil 7.14’de görülen üç farklı mıknatıs setinden oluşan rotor yapıları takılabilecek ve bu sayede üç ayrı motor üretmek yerine tek motor gövdesi ile bütün deneysel ölçümler gerçekleştirilebilecektir. Şekil 7.15’deki gibi rotorun takılmasıyla üretim aşaması tamamlanmış motorun resmi Şekil 7.16’da görülmektedir.



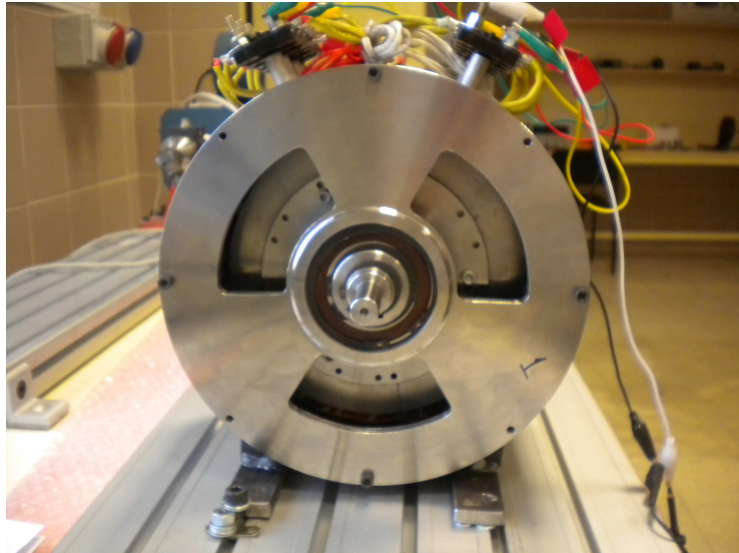
Şekil 7.13 EASM disk motorun detaylı çizimi



Şekil 7.14 Rotor yapıları a) 126 derece fan b) 156 derece üçgen c) 140 derece fan



Şekil 7.15 EASM motorun rotor montajı aşamaları a) Rotor montajı yapılmamış motorun resmi b) Rotor montajının yapılma işlemi

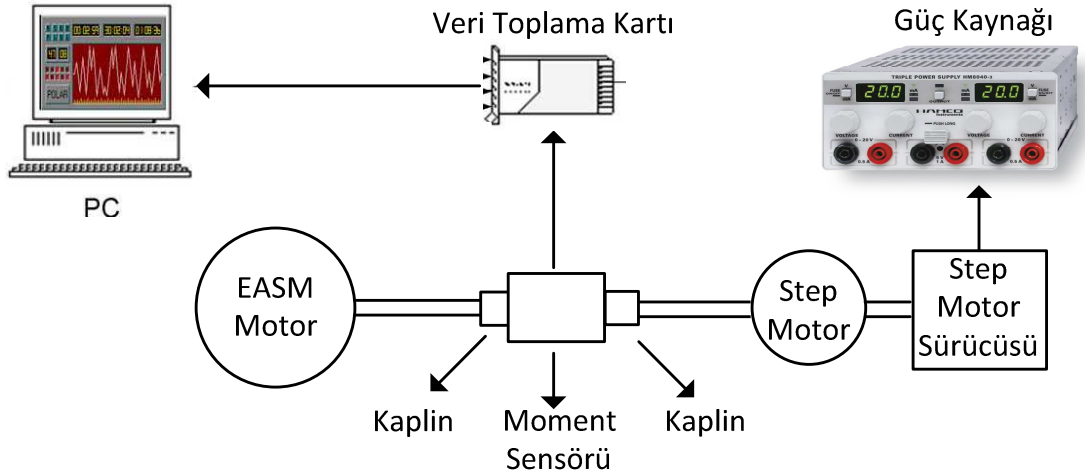


Şekil 7.16 Açık oluk yapılı EASM motor

Vuruntu momentini azaltmak için yapılan 3D SEA sonuçlarına göre seçilen ve prototipi üretilen EASM motorda 3 adet farklı rotor yapısının denenebileceği şekilde üretim tamamlanmış ve Bölüm 7.5’de detayları verilen vuruntu momenti ölçme düzeneği ile deneysel çalışmalar yapılmıştır.

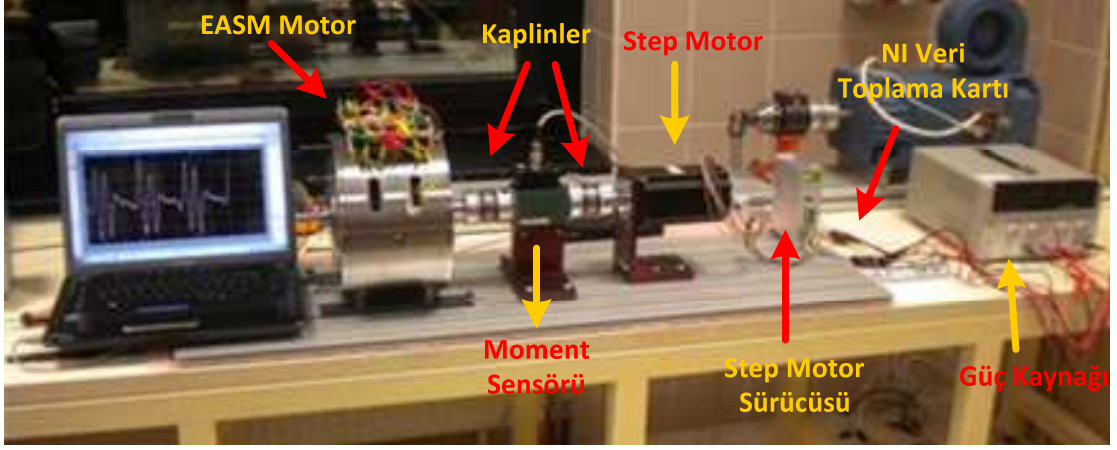
7.5 EASM Motorun Deney Düzeneği

Vuruntu momentini ölçmek için tasarlanan sisteme ait blok diyagram Şekil 7.17’de görülmektedir. Deney düzeneği, tahrik amaçlı kullanılan step motor ve sürücüsü, moment verilerini almak için kullanılan moment sensörü, analog tipteki veriyi dijitale çevirerek usb port vasıtasıyla bilgisayara aktarmak için kullanılan NI veri toplama kartı ve vuruntu moment değerlerinin ölçüldüğü EASM motordan oluşmaktadır. Veri toplama kartı National Instruments marka olup, 16 bitlik ADC’ye sahip olan NI-6009 modeli kullanılmıştır. NI veri toplama kartı ile moment sensöründen saniyede 200 adet örnekleme alınmış, veriler Matlab yazılımı ile işlenerek alınmıştır. Kullanılan step motor 12.5 Nm tutma momentine sahip olup, yapılan çalışma için vuruntu momentini karşılayacak değerdedir. Burster-8661 marka moment sensörü maksimum 10Nm moment değerini ölçmektedir.



Şekil 7.17 Vuruntu momenti deney seti ve ölçüm sisteminin blok diyagramı

Vuruntu momenti testlerini yapmak için step motor 1rpm hızda çevrilerek moment sensöründen elde edilen değerler kaydedilmektedir. Analog çıkış veren moment sensöründeki çıkış sinyali NI veri toplama kartı kullanılarak bilgisayar ortamına alınmaktadır.



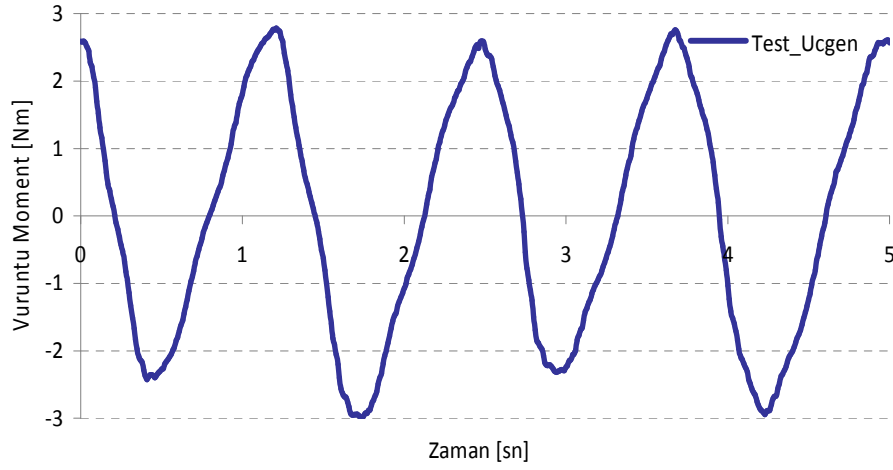
Şekil 7.18 EASM motorun deney düzeneği

7.6 Vuruntu Momentinin Deneysel Yolla Ölçülmesi ve SEA İle Karşılaştırılması

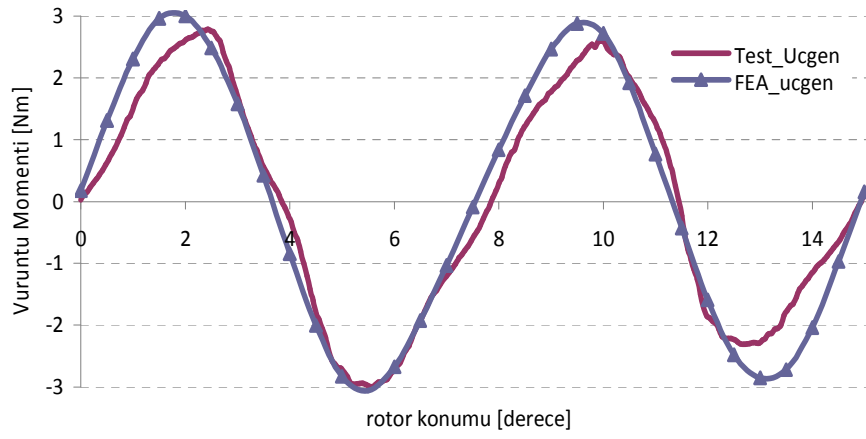
Bu bölümde vuruntu momenti bakımından optimum sonuçların alındığı mıknatis yapıları için üretilen motorların deneysel çalışmaları yapılmıştır. Deneyler Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan test düzeneğinde yapılmıştır.

7.6.1 Üçgen Kayıklı Rotor Kullanılarak Vuruntu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi

Yapılan deneysel çalışmada öncelikle 156 derece mıknatis adımlı üçgen kayık yapısındaki motorun kaydırılmamış durumundaki vuruntu momenti çalışması yapılmıştır. Bu yapıdaki deneysel çalışmada vuruntu momentinin tepe değeri 2,977 Nm olarak ölçülmüştür. Bu değer, aynı yapıdaki motorun 3D SEA sonucunda elde edilen 3,044 Nm değerine oldukça yakındır. Şekil 7.19'da deneysel olarak elde edilen vuruntu momenti eğrisi görülmektedir. Şekil 7.20'den görüldüğü gibi SEA simülasyonu sonucunda elde edilen grafik ile deneysel yolla elde edilen vuruntu momenti grafiği hem tepe değeri hem de şekil yönünden uyum içerisindedir.



Şekil 7.19 Üçgen kaykılı (156 derece mıknatıs adımlı) yapının deneysel çalışmasının vuruñtu momentini -zaman grafiği

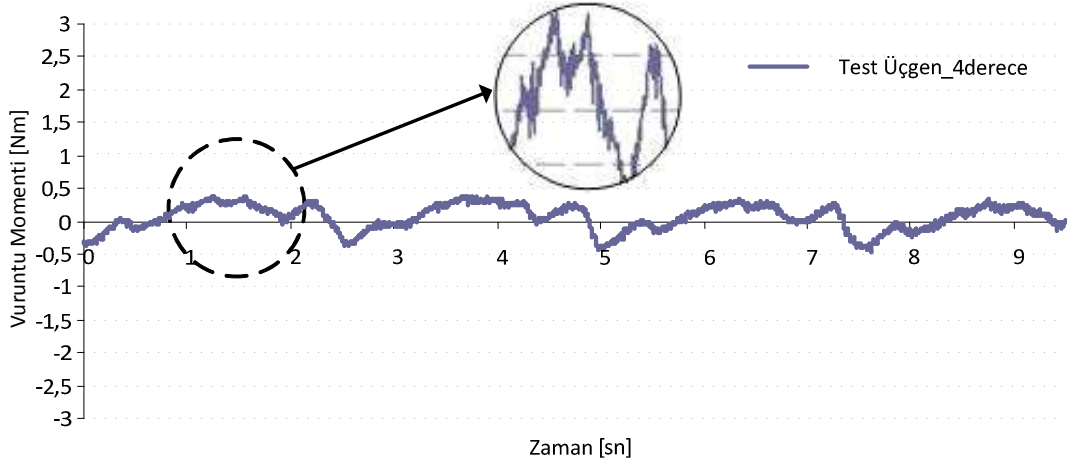


Şekil 7.20 Üçgen kaykılı (156 derece mıknatıs adımlı) yapının SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruñtu momentini grafiği

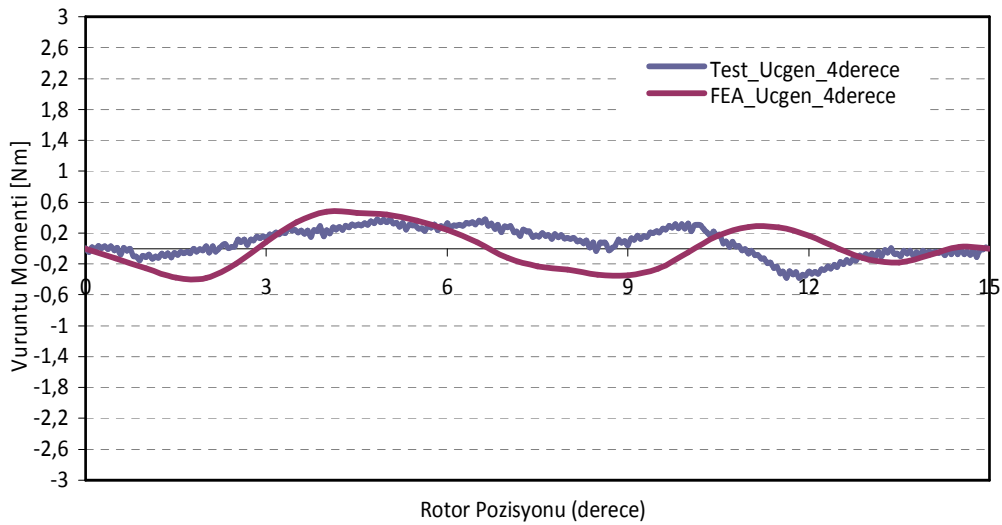
7.6.2 Üçgen Kaykılı Yapıda Bir Rotorun Diğerine Göre 4 Derece Kaydırıldığı Durumdaki Vuruñtu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi

Bu bölümde, 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaykılı yapısındaki motor için elde edilmiş olan en düşük vuruñtu momentini elde etme tekniği olan bir rotorun diğerine göre 4 derece döndürülmüş durum için deneysel çalışma yapılmıştır. Bu yapıdaki deneysel çalışmada vuruñtu momentinin tepe değeri 0,4 Nm olarak ölçülmüştür. Bu değeri, aynı yapıdaki motorun 3D SEA sonucunda elde edilen 0,475 Nm değeri oldukça yakındır. Şekil 7.21'de deneysel olarak elde edilen vuruñtu momentini eğri görülmektedir. Deneysel yol ile alınan sonuçlarda özellikle 1 Nm'den düşük moment değerlerinde, moment sensörünün hassasiyetinin azalması sebebiyle elde edilen

ölçümler çok düşük seviyelerde görülmektedir. Bu sebeple 1 Nm'nin altındaki moment değerlerinde, gerçek değerler ile SEA analiz sonuçları tam olarak örtüştüğü görülememektedir.



Şekil 7.21 Üçgen kayıklı (156 derece mıknatis adım) yapıda rotor döndürme tekniği (4 derece) ile yapılan deneysel çalışmanın vuruğu momenti-zaman grafiği

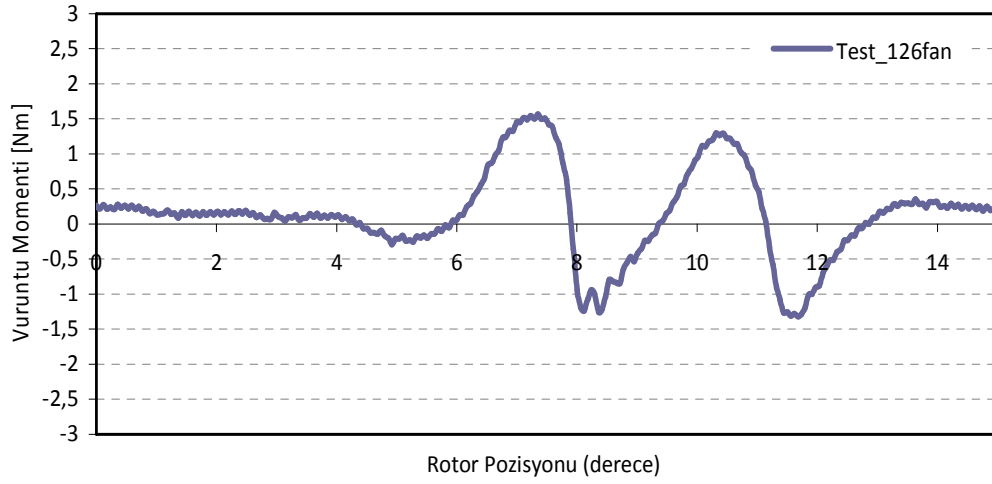


Şekil 7.22 Üçgen kayıklı (156 derece mıknatis adım) yapıda rotor döndürme tekniğinde SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruğu momenti grafiği karşılaştırması

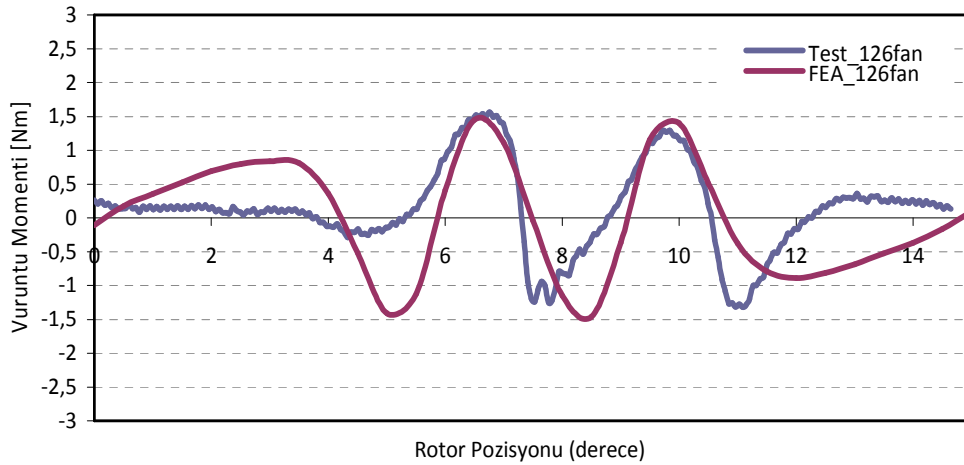
7.6.3 Fan Tipi Yapıda (126 derece mıknatis adım) Vuruğu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi

Yapılan deneysel çalışmada öncelikle 126 derece mıknatis adım fan tipi yapıdaki motorun kaydırılmamış durumundaki vuruğu momenti çalışması yapılmıştır. Bu yapıdaki deneysel çalışmada vuruğu momentinin tepe değeri 1,5 Nm olarak

ölçülmüştür. Bu değer aynı yapıdaki motorun 3D SEA sonucunda elde edilen 1,462 Nm değerine oldukça yakındır. Şekil 7.23’de deneysel olarak elde edilen vuruñtu momenti eğrisi görülmektedir.



Şekil 7.23 Fan tipli (126 derece mıknatıs adımlı) yapının deneysel çalışmasının vuruñtu-zaman grafiği

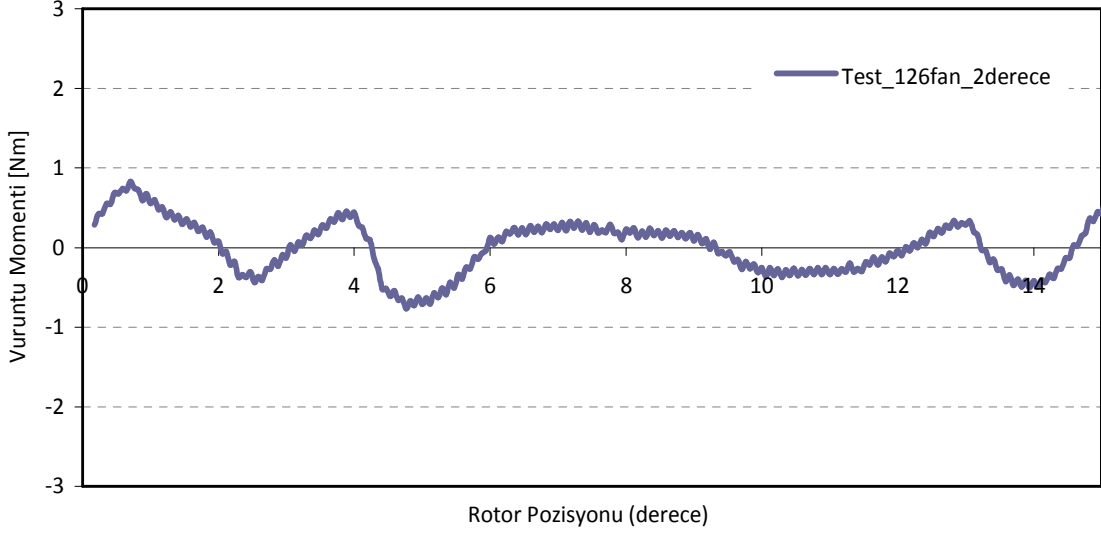


Şekil 7.24 Fan tipli (126 derece mıknatıs adımlı) yapının SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruñtu momenti grafiği karşılaştırılması

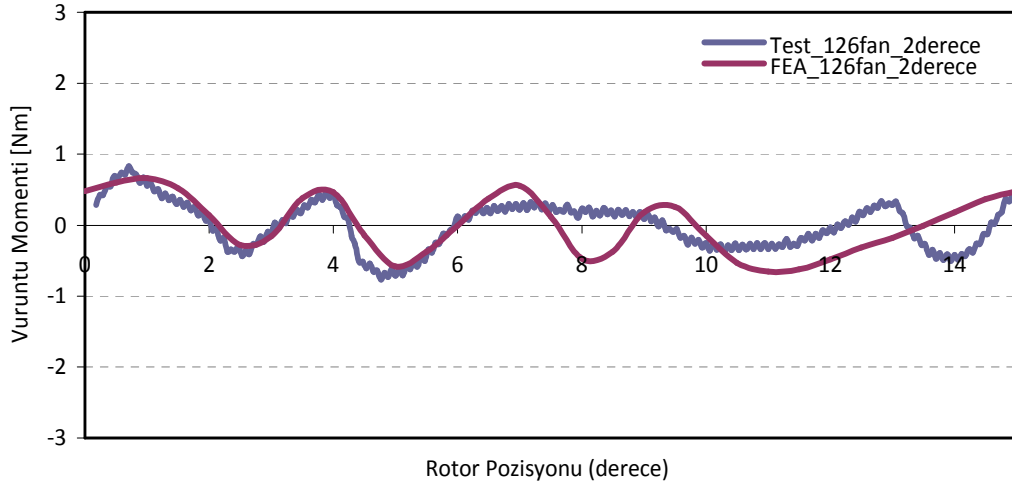
7.6.4 Fan Tipi (126 Derece mıknatıs adımlı) Yapıda Bir Rotorun Diğerine Göre 2 Derece Döndürüldüğü Durumdaki Vuruñtu Momentinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi

Bu bölümde, 126 derece mıknatıs adımlı fan tipi yapıdaki motor için en düşük vuruñtu momenti elde edilen teknik olan, bir rotorun diğerine göre 2 derece döndürülmüş durum için deneysel çalışma yapılmıştır. Bu yapıdaki deneysel çalışmada vuruñtu

momentinin tepe değeri 0,7 Nm olarak ölçülmüştür. Bu değer aynı yapıdaki motorun 3D SEA sonucunda elde edilen 0,663 Nm değerine oldukça yakındır. Şekil 7.25’de deneysel olarak elde edilen vuruntu momenti eğrisi görülmektedir.



Şekil 7.25 Fan tipli (126 derece mıknatis adımlı) yapıda rotor döndürme tekniği (2 derece) ile yapılan deneysel çalışmanın vuruntu momenti-zaman grafiği



Şekil 7.26 Fan tipli (126 derece mıknatis adımlı) yapıda rotor döndürme tekniğinde SEA simülasyonu ile deneysel çalışmanın vuruntu momenti grafiği karşılaştırması

Vuruntu momentini ölçmek için kurulmuş olan deney düzeneği ile 126 derece mıknatis adımlı fan tipi mıknatis ve 156 derece mıknatis adımlı üçgen kaykılı mıknatislerin kullanıldığı motorların, hem normal pozisyonlarında hem de bir rotorun diğerine göre döndürüldüğü durumlarda vuruntu momenti değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Tüm yapılarda vuruntu momentinin tepe değeri SEA sonuçları ile uyum içerisindedir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, EASM disk motorlarda vuruñtu momenti azaltma yöntemleri tartışılmış ve çift rotor tek statorlu açık oluk yapısındaki EASM motor, referans olması için vuruñtu momentini maksimum yapacak şekilde tasarlanmıştır. Vuruñtu momentini azaltmak amacıyla çeşitli tekniklerin uygulandığı motor, 3D sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek, üzerine çalışılan tekniklerin etkinliği bilgisayar simülasyonlarıyla incelenmiş ve test edilmiştir.

Ayrıca motor sabit bir akımla yüklenerek farklı mıknatıs yapıları ve tekniklerin moment üzerindeki etkisi incelenmiş ve moment dalgalanmaları hesaplanmıştır. Farklı rotor yapıları motorların moment kalitesi karşılaştırılmıştır.

Referans motor ile beraber, vuruñtu momenti açısından en iyi sonuçların alındığı 126 derece fan ve 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaykılı yapılar olmak üzere 3 farklı rotor yapısı üretilmiş ve motor prototip imalat aşamaları tez içinde anlatılmıştır. Çeşitli tekniklerin uygulanabilmesi amacıyla özel olarak tasarlanan prototip motor, vuruñtu momentini ölçmek üzere hazırlanmış deney düzeneğine monte edilmiş ve üzerine çalışılan yapılar ve teknikler için vuruñtu momenti deneysel yolla elde edilmiştir. Bu şekilde, SEA sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yapılan analiz çalışmalarından ve deneysel çalışmalardan aşığıdaki sonuçlar elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

EASM motorlarda stator tarafında vuruñtu momentini azaltmak için yapılacak çalışmalar hem üretim zorluğu hem de maliyeti arttırdığı için tercih edilmemelidir.

Rotor tarafında uygulanan kaykılı yöntemi, disk motorlarda getirdiği üretim avantajları nedeniyle oldukça kullanışlıdır.

Tez çalışması kapsamında vuruñtu momentini azaltmak için yapılan ilk çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre; 126 derece mıknatıs adımına sahip fan tipi mıknatıslı motorda vuruñtu momentini 1,462 Nm olarak elde edilmiş ve 140 derece mıknatıs adımına sahip fan tipi referans motora göre % 92,51 ile maksimum düşüm gözlenmiştir.

Fan tipi mıknatıs yapısı için optimum yapı elde edildikten sonra bu yapı ile aynı alana sahip olacak şekilde üçgen kaykılı ve oval kaykılı yapılarıdaki mıknatıs modelleri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Bu yapılar için elde edilen vuruñtu momentini değerlerine göre, üçgen kaykılı tipteki mıknatıslı modeller arasında 15,235 derece kaykılı (162 derece mıknatıs adımlı) yapıda vuruñtu momentini 2,868 Nm olarak elde edilmiş ve referans motora göre % 85,3 ile maksimum düşüm gözlenmiştir. Oval kaykılı tipteki mıknatıslı modeller arasında 5,25 derece kaykılı (137 derece mıknatıs adımlı) yapıda vuruñtu momentini 2,044 Nm olarak elde edilmiş ve referans motora göre % 89,527 ile maksimum düşüm sağlanmıştır.

Tezin ilerleyen bölümlerinde üzerine çalışma yapılan motor için tez çalışmasında kullanılan vuruñtu momentini azaltma tekniklerinden biri olan ve üretilen prototipin bu tekniğe olanak sağlayacak şekilde tasarlandığı, rotorlardan birisinin diğerine göre dairesel olarak döndürülmesi tekniği üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu doğrultuda fan, üçgen kaykılı ve oval kaykılı mıknatıs yapılarında bu teknik uygulanmıştır. Alınan sonuçlara göre vuruñtu momentinin düşürülmesi açısından en iyi değer, bir rotorun diğerine göre 4 derece döndürüldüğü 156 derece üçgen kaykılı tipte sağlanmıştır. Bu yapıda vuruñtu momentini tepe değeri 0,475 Nm değerine düşürülmüştür. Bu şekilde referans motora göre %97,56 oranında düşüm sağlanmıştır. Bir rotorun diğerine göre döndürülmesi tekniği kullanılarak yapılan analizler sonucunda, 126 derece mıknatıs adımlı fan tipli mıknatıs yapısına sahip motorda, rotorlardan birisinin diğerine göre 2 derece döndürülmesi ile vuruñtu momentinin tepe değeri 0,663 Nm olarak elde edilmiştir. Son olarak bu teknikte oval kaykılı mıknatıs

yapıları arasında 137 derece mıknatıs adımına sahip yapıda, rotorlardan birisinin diğerine göre 4 derece döndürülmesi ile vuruğu momentinin tepe değeri 0,72 Nm olarak bulunmuştur.

Vuruğu momentin azaltılması için tezde kullanılan başka bir etkili teknik de bitişik mıknatısların birbirine göre kaydırılmasıdır. Bu teknik için daha önceki çalışmalardan alınan optimum yapılarda mıknatıslar ikili ve dörtlü olarak gruplanmış ve rotor diskinin müsağe ettiği farklı kaydırma açıları için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan analizlere göre en iyi sonuçlar 156 derece mıknatıs adımına sahip üçgen kaykılı yapıda 4'lü gruplamada 1 derece kaydırılmış yapıda görülmüş ve 0,24 Nm vuruğu momenti değeri elde edilmiştir. 126 derece mıknatıs adımı fan tipi yapıda gruplama tekniği ile en iyi sonuç 4'lü gruplamada 1 derece kaydırılmış yapıda görülmüş ve 0,394 Nm vuruğu momenti değeri elde edilmiştir.

Tezin 6. Bölümünde, 3D SEA kullanılarak vuruğu momentleri açısından en iyi sonuçların alındığı farklı mıknatıs yapıları ve kullanılan tekniklerin ortalama moment ve moment dalgalanmasına etkileri analiz edilmiş ve vuruğu momenti azaltılması için önerilen tekniklerin ortalama momentte ciddi bir azalmaya neden olmadığı moment analizleri için elde edilen sonuçlardan görülmüştür. Referans motor maksimum vuruğu momentini verecek şekilde tasarlandığı için moment dalgalanması %111'dir.

126 derece mıknatıs adımına sahip fan tipi yapıda moment dalgalanması referans yapıya göre % 74,9, bu yapı için rotorlardan birisi diğerine göre 9 derece kaydırıldığında moment dalgalanması % 89,11 oranında azaltılmıştır.

156 derece mıknatıs adımına sahip üçgen kaykılı yapıda moment dalgalanması referans yapıya göre % 73,6, bu yapı için rotorlardan birisi diğerine göre 5 derece kaydırıldığında moment dalgalanması % 85,86 oranında azaltılmıştır.

Fan tipi yapılar içinde, 126 derecelik mıknatıs adımına sahip yapıda, bir rotorun diğerine göre 2 derece döndürme işlemi yapıldığında 0,663 Nm ile en düşük vuruğu momenti değeri elde edilmiştir. Aynı şekilde üçgen kaykılı tipli yapılar içinde 156 derecelik mıknatıs adımı oranına sahip yapıda bir rotorun diğerine göre 4 derece döndürme işlemi yapıldığında 0,475 Nm ile en düşük vuruğu momenti değeri elde edilmiştir.

Buna göre rotor döndürmeleri de uygulandığında vuruñtu momenti açısından en iyi sonucun elde edildiği 156 derecelik mıknatıs adımına sahip üçgen kaykılı mıknatıs yapısı en optimum yapıdır.

Tezin 7. Bölümünde prototip motorun üretimi detaylı olarak anlatılmıştır. Prototipi üretilen motor, çeşitli rotor yapılarının rahatlıkla çıkarılıp takılabileceği ve rotor kaydırma tekniğinin uygulanabileceği şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca vuruñtu momentini ölçmek için özel olarak kurulan deney düzeneği ile üretilen motorun testleri yapılmış ve elde edilen sonuçların 3D SEA değerleri ile karşılaştırmaları yapılarak önerilen tekniklerin etkinlikleri deneysel yol ile doğrulanmıştır. Üretilen prototip ile tasarlanan rotor yapılarının vuruñtu momenti değerlerinin uyum içinde olduğu görülmüştür.

Vuruñtu momenti açısından en iyi sonuçların elde edildiği 126 derece mıknatıs adımlı fan tipi ve 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaykılı rotor yapıları için yapılan deneyler sonucunda SEA analizlerinden elde edilen vuruñtu momenti deneysel olarak da doğrulanmıştır. Buna göre 126 derece mıknatıs adımlı fan tipli yapıda bir rotorun diğerine göre 2 derece döndürme işlemi yapıldığında vuruñtu momentinin tepe değeri, deneysel çalışmada 0,7 Nm olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde 156 derece mıknatıs adımlı üçgen kaykılı rotor yapısı için yapılan deneyler sonucunda bir rotorun diğerine göre 4 derece döndürme işlemi yapıldığında vuruñtu momentinin tepe değeri, deneysel çalışmada 0,4 olarak Nm elde edilmiştir.

Tez kapsamında tasarlanan, üretilen ve vuruñtu momenti değerleri analiz edilen motor, Türkiye'nin açık oluk yapısı kullanılan ilk disk motoru olma özelliğini taşımaktadır. Laboratuar çalışmaları ve elde edilen sonuçlar sayesinde Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Disk motorlarda gelecekte yapılacak çalışmalar için kapsamlı bir alt yapı sunulmaktadır.

Özellikle endüstriyel uygulayıcıların, ülkemizde üretimleri çok sınırlı olan nadir toprak mıknatısların üretim ve montaj tekniklerini geliştirerek seri üretime geçmeleri ülkemizde bu mıknatısların kullanımını yaygınlaştıracak ve böylece motor tasarım ve uygulamalarının artmasına büyük ölçüde katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Campbell, P., (1974). "Principles of Permanent-Magnet Axial-Field DC Machine", IEEE Proceedings of the IEE, 121:1489-1494,
- [2] Campbell, P., Rosenborg, D.J. ve Stanton, D.P., (1981). "The Computer Design and Optimization of Axial-Field Permanent Magnet Motors", IEEE Transaction on PAS, 100:1490-1495.
- [3] Spooner, E. ve Chalmers, B.J., (1992). "TORUS a Slotless, Toroidal-Stator, Permanent Magnet Generator", IEE Proceedings, 139:497–506.
- [4] D'Angelo, J., Chari, M.V.K. ve Campbell, P., (1983). "Three- Dimensional Finite Element Solution For a Permanent Magnet Axial- Field Machine", IEEE Transaction on Power App. and System, 102:83–90.
- [5] Caricchi, F., Crescimbin, F., Mezzetti, F. ve Santini, E., (1996). "Multistage Axial-Flux PM Machine for Wheel Direct Drive", IEEE Transactions On Industry Applications, 32:882:889.
- [6] Zhilichev, Y., (1998). "Three-Dimensional Analytic Model of Permanent Magnet Axial Flux Machine" IEEE Transaction on Magnetic, 34:3897-3901.
- [7] Profumo, F., Tenconi, A., Zhang, Z. ve Cavagnino, A., (1998). "Novel Axial Flux Interior PM Synchronous Motor Realized with Powdered Soft Magnetic Materials" Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, Oct. 1998, Torino, 12-15.
- [8] Muljadi, E., Butterfield C. P. ve Wan, Y., (1998). "Axial-Flux Modular Permanent-Magnet Generator with a Troidal Winding for Wind-Turbine Applications" IEEE Industry Applications Conference, November 5-8 1998, St. Louis, 831-836
- [9] Parviainen, A. Pyrhönen, J. Ve Niemelä M., (2001). "Axial Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motor With Sinusoidally Shaped Magnets" 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering 20-22 September 2001, Cracow, Poland.
- [10] Aydin, M., Huang, S. ve Lipo, T. A., (2001) "Design and 3D Electromagnetic Field Analysis of Non-Slotted and Slotted TORUS Type Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Machines", Electric Machines and Drives Conference, 2001, Madison, 645-651.

- [11] Aydin, M., Huang, S. ve A. Lipo, S. (2002). "A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control", Industry Application Conference, 37th IAS Annual Meeting, 13-18 Oct. 2002.
- [12] Yang, Y.P., Cheung, C.H., Wu, S.W. ve Wang, J .P., (2002). "Optimal Design and Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motor for Electrical Vehicles" Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation, 9-12 July 2002, Lisbon, Portugal.
- [13] Muljadi, E. ve Green, J., (2002). "Cogging torque reduction in a permanent magnet wind turbine generator," 21th American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium, 14–17 January 2002, Reno Nevada.
- [14] Gieras, J.F. ve Gieras, I.A., (2002). "Performance Analysis of a Coreless Permanent Magnet Brushless Motor" IEEE, 13-18 Oct. 2002, East Hartford, CT, USA.
- [15] Mendrela, E. A. ve Jagiela, M., (2004). "Analysis of Torque Developed in Axial Flux, Single-Phase Brushless DC Motor With Salient-Pole Stator" IEEE Transactions On Energy Conversion, 19:271-277.
- [16] Tapia, J.A., Gonzalez, D., Wallace, R. ve Valenzuela, A., (2006). "Axial Flux Surface Mounted PM Machine with Field Weakening Capability, Recent Developments of Electrical Drives, International Conference on Electrical Machines, ICEM'2006, Greece.
- [17] Locment, F., Semail, E ve Piriou, F., (2006). "Soft Magnetic Composite Axial Flux Seven-Phase Machine" , International Conference on Electrical Machines, ICEM'2006, Greece.
- [18] Aydin, M., Zhu, Z. Q., Lipo, T. A. ve Howe, D., (2007) "Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Design Concepts", IEEE Transactions On Magnetics, 43:3614-3622.
- [19] Lindh T., Salminen, P., Pyrhonen J., Niemela M., Kinnunen J. ve Haataja J., (2007). "Permanent Magnet Generator Designing Guidelines", International Conference on Power Engineering, Energy end Electrical drives, 12-14 April 2007, Portugal, Powereng,
- [20] Aleksashkin A. ve Mikkola A., (2008). " Literature review on Permanent Magnet Generators Design and Dynamic Behavior", Lappenranta University of Technology, Research Report,
- [21] Lidozzi, A., Solero, L. ve Taddia, P., (2005). "Synergetic Control for Axial-Flux PM Motor Drivers", IEEE Industry Applications Conference, 2-6 Oct. 2005, Italy.
- [22] Hredzak, B. ve Gai, S., (1996). "Elimination of Torque Pulsations in a Direct Drive EV Wheel Motor" IEEE Transactions On Magnetics, 32:5010-5012.
- [23] Krishnan R., (2001). Electric Motor Drives: Modelling, Analysis and Control, First Edition, Prentice Hall, New Jersey
- [24] Bose B., (2001). Modern Power Electronics and AC Drives, First Edition, Prentice Hall, New Jersey
- [25] Gieras J., ve Wing M., (2002). Permanent Magnet Motor Technology, Second

Edition, CRC Presss, New York.

- [26] Vas, P., (1998). *Sensorless Vector And Direct Torque Control*, First Edition, Oxford University Press, Inc., New York.
- [27] Gieras, J.F. ve Mitchell, W., (1997). *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [28] Dodrill B. ve Kelley B., (2005). "Measurements with a VSM Permanent magnet Materials", www.lakeshore.com, 01 Jan. 2012
- [29] Bowers, B., (1975). "Philips Technical Review", 35(4), 77-95.
- [30] Bose, B.K., (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [31] Svoboda, J., (2004), "Magnetic Techniques for The Treatment of Materials", Kluwer Academic Publishers, U.S.A.
- [32] Özçira, S., (2007), *Sabit Miknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] Bumby, J. R., Mueller, M.A., Spooner, E., Brown N. L. ve Chalmers, B. J., (2004). "Electromagnetic Design of Axial-Flux Permanent Magnet Machines", *IEE Proc.-Electr.Power Appl.*, 151: 151–160,
- [34] Chan, C. C., (1987). "Axial-Field Electrical Machines-Design and Applications", *Power Engineering Review,IEEE, PER-7:49-50*.
- [35] Gieras, J. F., Wang, R. J. ve Kamper, M.J., (2008). "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Second Edition, Springer.
- [36] Studer, C., Keyhani, A., Sebastian, T., ve Murthy, S. K., (1997). "Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans,5-9 Oct. 1997, 1:42-49*
- [37] Islam, R., Husain, I., Fardoun, A. ve Mclaughlin K., (2009). "Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction" *IEEE Transactions On Industry Applications, 45:152-160*.
- [38] Saied, S.A., K. Abbaszadeh, S. ve Hemati, M., (2009). "A New Approach to Cogging Torque Reduction in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors" *European Journal of Scientific Research, 26 :499-509* .
- [39] Deodhar, R. P., Staton, D. A., Jahns, T. M. ve Miller, T. J. E. (1996). "Prediction of Cogging Torque Using the Flux- MMF Diagram Technique," *IEEE Trans. Industry Applications, 32:569-576*.
- [40] Zhu, Z. Q., Ruangsinchaiwanich, S. Y. ve Howe, D., (2006). "Evaluation of Superimposition Technique for Calculating Cogging Torque in Permanent Magnet Brushless Machines," *IEEE Trans. Magnetics, 42:1597–1603*.
- [41] A. Letelier, Juan A. Tapia, R.Wallace, A.Valenzuela, (2005). "Cogging Torque Reduction in an Axial Flux PM Machine with Extended Speed Range" in *Proc.IEEE*

Int Electrical Machines and Drive Conf., 15 May 2005, Şili.

- [42] Jurisch, F., (2004). "Shell-shaped magnet", United States Patent, Patent Number: US24028945A1,
- [43] Castillo, R. ve Canedo, J. M., (2008) " A 2-D Finite Element Formulation for unambiguous torque calculation", IEEE Trans. Magnetics, 44: 373-376.
- [44] González, D. A., Tapia, J. A. I. ve Letelier A., (2007). "Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent-Magnet Machines" IEEE Transactions On Magnetics, 43:3435-3440.
- [45] Caricchi, F., Capponi, F. G., Crescimbin, F. ve Solero, L., (2002). "Experimental study on reducing cogging torque and core power loss in axial-flux permanent-magnetmachines with slotted winding," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 13-18 Oct 2002, Italy.
- [46] Zhu, Z. Q. ve Howe, D., (2000). "Influence of Design Parameters on Cogging Torque In Permanent Magnet Machines" IEEE Transactions On Energy Conversion, 15:407-412.
- [47] Hang-Sheng C., David G. ve Mi-Ching T., (2010), "Design and Operation of Interior Permanent-Magnet Motors With Two Axial Segments and High Rotor Saliency", IEEE Transactions On Magnetics, 46:3664-3675.
- [48] Islam, M. S., Mir, S. ve Sebastian, T., (2004). "Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent-magnet brushless DC motor," IEEE Trans. Industry Applications, 40:813-820.
- [49] Zhu, Z.Q., Ruangsinchaiwanich S., Ihsak, D. ve Howe, D., (2005). "Analysis of cogging torque in brushless machines having non-uniformly distributed stator slots and stepped rotor magnets," IEEE Trans. On Magnetics, 41: 3910-3912.
- [50] Yolacan, E., Ozyurt, E., Ocak, O. ve Aydin, M., (2010). "Cogging Torque Minimization And Torque Quality Of Radial And Axial Flux Permanent Magnet Servomotors" 11th International Workshop on Research and Education in Mechatronics, 9-10 September 2010, Ostrava, Czech Republic.
- [51] Silvester, P. ve Chari, M.V.K., (1970). "Finite Element Solution of Saturable Magnetic Field Problems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems", 7:1642 – 1651.
- [52] Salon, S.J., (1995). "Finite element analysis of electrical machines," Norwell, MA: Kluwer,
- [53] Çanakoğlu A.İ., (2001), Sonlu Elemanlar Yönteminde Yeni Bir Ağ İnceltme Yöntemi Kullanılarak Endüktans Hesabı ve Yapay Sinir Ağları Destekli Bir Analitik Yöntem İle Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [54] Aydin, M., Huang, S. ve Lipo, T. A., (2006). Torque Quality and Comparison of Internal and External Rotor Axial Flux Surface-Magnet Disc Machines, IEEE Transactions On Industrial Electronics, 53:3.
- [55] Zhu, Z. Q., Ruangsinchaiwanich, S. ve Howe, D., (2006). "Synthesis of cogging

- torque from a single stator slot in permanent magnet machines," IEEE Trans. Industry Applications, 42:650-657.
- [56] Aydin, M., Qu, R. ve Lipo, T. A., (2003). "Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM machines: alternating magnet polearcs in facing rotors," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 12-16 Oct. 2003, Madison.
- [57] Chen, Y., Pillay, P. ve Khan, A., (2005), "PM Wind Generator Topologies" IEEE Transactions on Industry Applications, 41:1619-1626.
- [58] Fei, W. ve Luk, P. C. K. Senior Member, (2010). "A New Technique of Cogging Torque Suppression in Direct-Drive Permanent-Magnet Brushless Machines" IEEE Transactions On Industry Applications, 46:1332-1340.
- [59] Wang, D., Wang, X., Yang, Y. ve Zhang, R., (2010). "Optimization of Magnetic Pole Shifting to Reduce Cogging Torque in Solid-Rotor Permanent-Magnet Synchronous Motors" IEEE Transactions On Magnetics, 46:1228-1234.
- [60] Lu K., Rasmussen P.O. ve Ritchie E., (2006). "An Analytical Equation for Cogging Torque Calculation in Permanent Magnet Motors", 17th International Conference on Electrical Machines, Chania, Kreta, Greece.
- [61] G. Sooriyakumar, R. Perryman ve S. J. Dodds, (2007). "Improved Cogging Calculation Methods For Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors", Advances in Computing and Technology, The School of Computing and Technology 2nd Annual Conference University of East London, 222-227.
- [62] Zhu Z.Q. ve Howe, D., (2000). "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. on Energy Conversion, 4:407-412.
- [63] Öner Y., (2009), Sürekli Mıknatıslı Dc Motor İle Tahrik Edilen Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Çıkış Geriliminin Kontrolü Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [64] Zhu Z. Q., Howe D.,(1992). "Analytical prediction of the cogging torque in radial field permanent magnet brushless motors," IEEE Trans. on Magnetics, 28:1371-1374.
- [65] Deodhar R.P., Staton D.A., Jahns T.M. ve Miller T.J.E., (1996) "Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique", IEEE Trans. Industry Applications, 32:569-576.
- [66] Watterson P.A., (2000). "Energy calculation of a permanent magnet system by surface and flux integrals (the flux-mmf method)", IEEE Trans. Magnets, 36:470-475.
- [67] Lovatt H.C., Watterson P.A., (1999) "Energy stored in permanent magnets", IEEE Trans. Magnets, 35:505-507.
- [68] Campbell P., (2000). "Comments on Energy stored in permanent magnets", IEEE Trans. Magnets, 36:401-403.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Engin AYÇIÇEK
Doğum Tarihi ve Yeri : 14.02.1978 Beyoğlu/İSTANBUL
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : eaycicek@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan | Okul/Üniversite | Mezuniyet Yılı |
|-----------|---|----------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2005 |
| Lisans | Elektrik Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2001 |

İŞ TECRÜBESİ

| Yıl | Firma/Kurum | Görevi |
|-------------|----------------------------|---------------------|
| 2001- Devam | Yıldız Teknik Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |