



**ÇEMBERSEL DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE MANYETİK  
ANALİZİ**

**Akın AYDIN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2019**

Akın AYDIN tarafından hazırlanan “ÇEMBERSEL DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE MANYETİK ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Cemal YILMAZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan:** Doç. Dr. İlhan KOŞALAY

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Doç. Dr. Ercan Nurcan YILMAZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 02/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Akın AYDIN

02/05/2019



ÇEMBERSEL DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE MANYETİK ANALİZİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Akın AYDIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Günümüzde elektrik makinalarından doğrusal hareket üretmek önemli bir ihtiyaçtır. Endüstride ve otomasyonda söz konusu hareket, döner makinalara kayış, kasnak ve dişliler eklenmesi yoluyla sağlanır. Fakat bu durumda maliyetlerin artması ve verimin düşmesi kaçınılmazdır. Diğer taraftan lineer motorlar, ilave araç gereçlere gereksinim duymadan elektrik enerjisini doğrusal harekete direkt çeviren makinalardır. Ancak, lineer motorların düşük kuvvet/akım oranları ve uzunluk sınırlamaları gibi problemleri fazla tercih edilmemelerine sebebiyet vermiştir. Bununla birlikte son yıllarda geliştirilen sabit mıknatıslı çift yanlı doğru akım lineer motorda söz konusu problemler giderilmiştir. Bu çalışmada analitik yöntemler ile manyetik devre hesapları yapılmış olan çift yanlı DA lineer motorun detaylı nümerik analizleri ANSYS-Maxwell ortamında yapılmıştır. Ayrıca lineer olan tasarım topolojisi çember şekline dönüştürülerek, dairesel hareket üreten yeni bir elektrik motoru tasarlanmıştır. Çembersel motor olarak adlandırılan söz konusu motorun manyetik analizleri ANSYS-Maxwell yazılımı ile yapılmıştır. Son olarak, geliştirilen motorun elektrikli araçlarda teker motor olarak kullanılması durumuna göre moment/akım oranı analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, tasarımı yapılan motorun teker içi kullanıma uygun olduğu, benzer amaçlı motorlara kıyasla tasarımının basit ve maliyetinin düşük olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 90514

Anahtar Kelimeler : Sabit Mıknatıs, Lineer Motor, Çembersel Motor, ANSYS-Maxwell

Sayfa Adedi : 65

Danışman : Doç. Dr. Cemal YILMAZ

# DESIGN AND MAGNETIC ANALYSIS OF CIRCULAR DIRECT CURRENT MOTOR

(M. Sc. Thesis)

Akın AYDIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

## ABSTRACT

Today it is an important need to produce linear motion from electric machines. In industry and automation, the related motion is obtained with rotary machines by adding belt, pulley and gears. However, in the case of such solution, low efficiency and increased cost are inevitable. On the other hand, linear motors are machines which convert electric energy directly into linear motion without the need for additional tools. However, main problems of linear motors such as low force / current ratios and length limitations led them not to be preferred. The permanent magnet double-sided DC linear motor developed in recent years have solved the related problems. In this study, detailed numerical calculations of double-sided DC linear motor of which magnetic circuit calculations were done analytically, have been performed in ANSYS-Maxwell. Additionally, a new electric motor that generates circular motion has been designed by converting design topology of the double-sided DC linear motor from linear to circular. Magnetic analysis of the developed motor which is called as circular motor, has been performed in ANSYS-Maxwell. Finally, torque / current ratio analyses have been completed in case of its use as a wheel motor in electric vehicles. From the results obtained, it has been observed that the motor designed is suitable for in-wheel usage and its design is simple and cost effective compared to similar purpose motors.

Science Code : 90514

Key Words : Permanent Magnet, Linear Motor, Circular Motor, ANSYS-Maxwell

Page Number : 65

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cemal YILMAZ

## TEŐEKKÖR

Tez alıőmamda, bana yardımlarını esirgemeyen hocam Prof. Dr. Recep DEMİRCİ'ye, desteği ile rehberlik yapan danışman hocam Do. Dr. Cemal YILMAZ'a, ayrıca tez sürecinde yardımları bulunan Doç. Dr. Yusuf SÖNMEZ ve Burak YENİPİNAR'a manevi desteği ile eőime ve TCDD'de çalışma arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.





## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. MANYETİK MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1. Histerezis Eğrisi .....	5
2.2. Sabit Mıknatıslar ve Çeşitleri.....	8
3. LİNEER MOTORLAR.....	11
3.1. Lineer Motor Tasarım Prensipleri .....	11
3.2. Çift Yanlı DA Lineer Motor .....	12
3.2.1. Çift yanlı DA lineer motor yapısı ve çalışma prensibi.....	13
3.2.2. Çift yanlı DA lineer motorun manyetik analizi.....	15
3.2.3. Çift yanlı DA lineer motorda üretilen kuvvet .....	24
4. ÇEMBERSEL DA MOTOR .....	27
4.1. Çembersel DA Motor Tasarımı Süreci .....	29
4.2. Çembersel DA Motorun Manyetik Analizi ve Üretilen Moment .....	33
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	37
5.1. Çift Yanlı Lineer DA Motorun Nümerik Analizi .....	37
5.2. Çembersel DA Motorun Nümerik Analizi.....	43

	<b>Sayfa</b>
5.3. Yüksek Momentli Çembersel DA Motor .....	50
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	59
KAYNAKLAR .....	61
ÖZGEÇMİŞ .....	65



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Mıknatısların karakteristikleri .....	9
Çizelge 2.2. NdFe35 mıknatıs özellikleri .....	9
Çizelge 4.1. Çift yanlı lineer DA motor boyutları .....	32
Çizelge 4.2. Çembersel DA motor boyutları .....	32
Çizelge 5.1. Çembersel DA motor: manyetik akı dağılımı.....	47
Çizelge 5.2. Yüksek moment akım oranlı çembersel motor.....	55
Çizelge 5.3. Çembersel DA motor: manyetik akı dağılımı.....	56

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Radyal akılı motor ve eksenel akılı motor .....	3
Şekil 2.1. Histerezis eğrisi .....	6
Şekil 2.2. 1010 çelik <i>B-H</i> karakteristiği.....	7
Şekil 2.3. Mıknatısların <i>B-H</i> karakteristikleri.....	9
Şekil 3.1. Döner hareketli motorun kesilerek açılması .....	12
Şekil 3.2. Çift yanlı DA lineer motor.....	14
Şekil 3.3. Çift sarım ve 8 fırça devrede iken fırça-kollektör durumu .....	14
Şekil 3.4. Çift sarım ve 8 fırça devrede iken elektrik devre şeması.....	15
Şekil 3.5. Sürücü devre .....	15
Şekil 3.6. Çift yanlı DA lineer motorun manyetik devresi .....	16
Şekil 3.7. Çift yanlı DA lineer motorun manyetik eşdeğer devresi .....	17
Şekil 3.8. Hava aralığındaki tipik manyetik akı dağılımı .....	17
Şekil 3.9. Mıknatısın yük ve demanyetizasyon eğrisi.....	21
Şekil 3.10. Manyetik alan içerisindeki iletkende oluşan kuvvet.....	24
Şekil 4.1. Çembersel DA motorun manyetik devresi .....	29
Şekil 4.2. Çembersel DA motor tasarım süreci a) Çift yanlı DA lineer motor ANSYS-Maxwell 3D modeli b) Yay yörüngeli çift yanlı DA motor ANSYS-Maxwell 3D modeli.....	30
Şekil 4.3. Çembersel DA motor ANSYS-Maxwell 3D modeli .....	31
Şekil 5.1. Çift yanlı DA lineer motor: ANSYS-Maxwell ağ yapısı.....	38
Şekil 5.2. Çift yanlı DA lineer motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel).....	39
Şekil 5.3. Çift yanlı DA lineer motor: hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi .....	40
Şekil 5.4. Çift yanlı DA lineer motor: manyetik akı dağılımı .....	41

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.5. Çift yanlı DA lineer motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı(skaler) .....	42
Şekil 5.6. Çift yanlı DA lineer motor: üretilen kuvvet-akım değişimi, $K$ .....	43
Şekil 5.7. Yay yörüngeli çift yanlı DA motor: ANSYS-Maxwell ağ yapısı.....	44
Şekil 5.8. Yay yörüngeli çift yanlı DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel) .....	44
Şekil 5.9. Yay yörüngeli çift yanlı DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (skaler).....	45
Şekil 5.10. Çembersel DA motor: ANSYS-Maxwell ağ yapısı.....	45
Şekil 5.11. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel) a) ön görünüm b) arka görünüm.....	46
Şekil 5.12. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel) , üst görünüm .....	47
Şekil 5.13. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı(skaler) .....	48
Şekil 5.14. Çembersel DA motor: hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değişimi .....	49
Şekil 5.15. Çembersel DA motor: moment-akım değişimi, $K_t$ .....	50
Şekil 5.16. Çembersel DA motor: üretilen moment-akım oranının hava aralığı ile değişimi .....	52
Şekil 5.17. Çembersel DA motor: $(r_d-r_i)$ değişiminin momente etkisi .....	52
Şekil 5.18. Yüksek momentli çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı(skaler), $r_d = 210\text{mm}$ , $r_i = 21\text{mm}$ a) perspektif b) odaklanmış .....	53
Şekil 5.19. Çembersel DA motor: stator-rotor kalınlık değişiminin momente etkisi a) mıknatıs kalınlığı 25mm iken momentin stator-rotora göre değişimi b) mıknatıs kalınlığı 20 mm iken momentin stator-rotora göre değişimi.....	54
Şekil 5.20. Yüksek momentli çembersel DA motor: ANSYS-Maxwell 3D modeli .....	55
Şekil 5.21. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu a) manyetik akı yoğunluğu dağılımı (skaler) b) manyetik akı yoğunluğu vektörel yönü (ön görünüm) c) manyetik akı yoğunluğu vektörel yönü (arka görünüm).....	57
Şekil 5.22. Sargıların üzerinde akım yoğunluğu gösterimi.....	58
Şekil 5.23. Çembersel DA motor: üretilen moment-akım değişimi, $K_t$ .....	58

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$(BH)_{max}$	Maksimum enerji çarpımı
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
$\mu_0$	Boşluğun manyetik geçirgenliği
$\mu_r$	Manyetik malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği
$A$	Amper
$A/m$	Amper/metre
$A/wb$	Manyetik relüktans
$A_g$	Manyetik akının geçtiği hava aralığının kesit alanı
$A_m$	Mıknatıs kesit alanı
$B$	Manyetik akı yoğunluğu
$B_{doyum}$	Doyum noktasındaki manyetik akı yoğunluğu
$B_g$	Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu
$B_{gQ}$	Çalışma noktasındaki manyetik akı yoğunluğu
$B_m$	Mıknatıstaki manyetik akı yoğunluğu
$B_Q$	Çalışma noktasının ordinatı
$B_r$	Mıknatısın artık manyetik akı yoğunluğu
$E$	Uygulanan voltaj
$F$	Kuvvet
$F_c$	Bobinin oluşturduğu manyetomotor kuvveti
$F_m$	Mıknatısın oluşturduğu manyetomotor kuvveti
$H$	Manyetik alan şiddeti
$H_c$	Koersif kuvvet
$H_{doyum}$	Doyum noktasındaki manyetik alan şiddeti
$H_g$	Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti
$H_m$	Mıknatısın manyetik alan şiddeti
$H_Q$	Çalışma noktasının apsisi

**Simgeler****Açıklamalar**

$I$	İletkenden geçen akım
$K$	Statik kuvvet/akım oranı
$K_t$	Moment/akım oranı
$L$	Aktif bölgedeki iletken uzunluğu
$l_g$	Manyetik akı yolundaki hava aralığının genişliği
$l_m$	Manyetik akı yolundaki mıknatıs genişliği
$q$	Kaçak akı faktörü
$r_d$	Dış yarıçap
$r_i$	İç yarıçap
$r_0$	Ortalama yarıçap
$R_c$	Nüvenin relüktansı
$R_g$	Hava aralığının relüktansı
$R_m$	Mıknatısın relüktansı
$R_T$	Eşdeğer relüktans
$\theta$	Manyetik akı yoğunluğu vektörünün iletkenle açısı

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AA</b>	Alternatif akım
<b>Al</b>	Alüminyum
<b>AlNiCo</b>	Alüminyum-nikel-kobalt
<b>Ba</b>	Baryum
<b>ÇYDAL</b>	Çift yanlı doğru akım lineer
<b>DA</b>	Doğru akım
<b>Nd</b>	Neodyum
<b>NdFeB</b>	Neodyum demir bor
<b>Ni</b>	Nikel
<b>PWM</b>	Darbe genişlik modülasyonu
<b>SEY</b>	Sonlu elemanlar yöntemi
<b>Sm</b>	Samaryum
<b>SmCo</b>	Samaryum-kobalt
<b>Sr</b>	Stronsiyum





## 1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel otomasyonda, ulaşımda, savunma sanayinde, tıbbi cihazlarda ve hayatımızın her alanında elektrik makinalarına ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaç, doğrusal veya dairesel hareket üretme ihtiyacıdır. Her iki hareket türü için çıkış üreten farklı motorlar olsa da genelde dairesel hareket üreten motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal hareketi dairesel çıktı üreten motorlardan elde etmek için kayış, kasnak ve dişli gibi ilave donanımlara gereksinim duyulması, söz konusu motorlarda verimin düşmesine ve maliyetin artmasına sebep olmuştur. Diğer taraftan doğrusal hareketi lineer motorlar aracılığıyla elde etme durumunda, ilave donanımların olmaması, maliyeti düşürmenin yanı sıra arıza olasılığını azaltması, modüler olarak istenen boyda tasarlanması lineer motorlara olan ilgiyi artırmıştır [1,2].

Kullanım alanlarına göre lineer motorların avantajlı yönleri oldukça fazladır. Hareket yönü manyetik alan tasarımına göre değişen lineer motorlarda, uygun geri besleme ve kontrol sistemiyle ulaşım araçlarında tercih edilebilirler. Ayrıca, lineer motorlar 1 mikron hassasiyetle 3 m/s hıza erişmekle birlikte hassasiyetin düşmesi durumunda 5m/s ve daha fazla hızlara erişebilir [3-5]. İlave donanımların olmaması, yüksek konum hassasiyeti ve beraberinde dinamik tepki hızının artmasına sebep olmuştur [4,6,7]. Dairesel motorlara göre lineer motorların üstün olan bu yönleri ulaşım araçlarında lineer motora daha kolay hızlanma ve frenlemede katkı sağlar. Bununla birlikte, temas parçaların olmaması aşınmayı giderirken, bu sayede bakımının kolay olması ve uzun ömürlü olmasını mümkün kılar [4,8,9].

Lineer motorların dairesel motorlardaki hava aralığına kıyasla büyük hava aralığına sahip olması dezavantajları arasındadır. Hava aralığının büyük olması verimi olumsuz yönde etkileyen bir bileşendir[2,10]. Bunun yanı sıra yatayda oluşan kuvvetin çok daha fazlasının stator ve rotor arasında olması tasarım zorluğu getirmektedir. Lineer motorlarda kullanılan mıknatısların yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, etrafındaki metal aksanları kendine çekmesine neden olur ve istenmeyen bu durum dezavantajları arasında gösterilebilir.

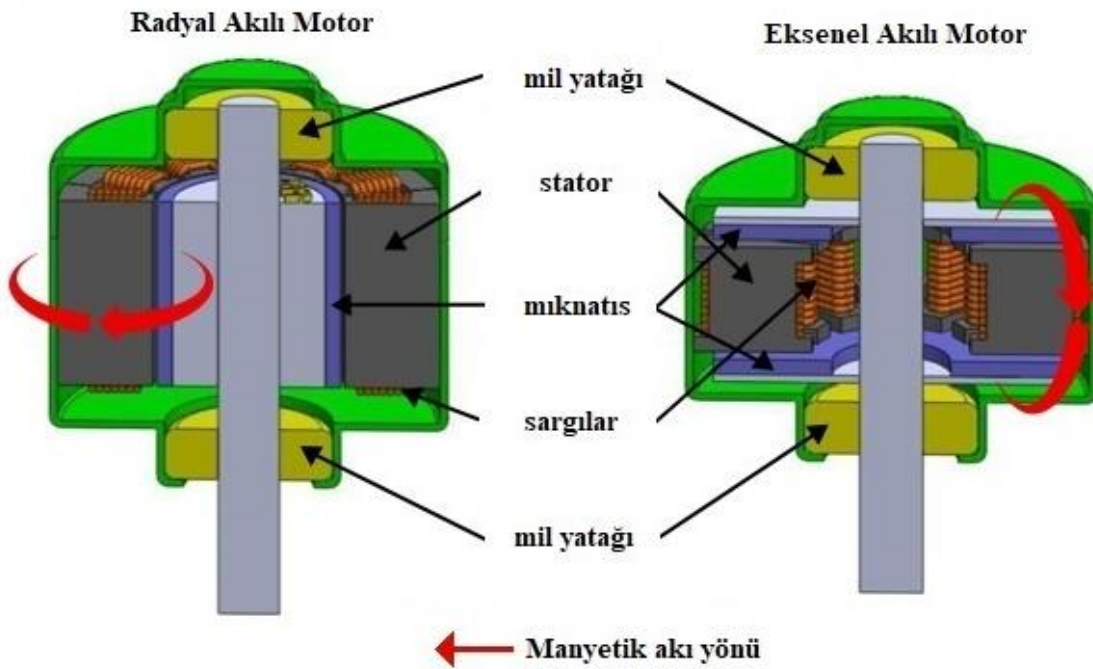
Lineer motorlar temelde dairesel motorların kesilerek açılmış modelleridir [11]. Bu yüzden çalışma prensibi olarak dairesel motorlar ile benzerlik gösterir. Lineer motorlar AA olarak

tek fazlı veya üç fazlı olabileceği gibi DA olarak sargılı veya sabit mıknatıslı olarak da tasarlanabilmektedir. Birbirlerine göre artı ve eksi yönleri olan bu tip motorlarda yukarıda sayılan tasarım problemleri her durumda vardır. Ayrıca lineer motorların dairesel hareketli motorlardan farklı olarak başı ve sonu olması ve uç etkisi sebebiyle yüksek hızlarda performansı olumsuz etkilenmektedir. Lineer motorların performans ölçütleri olarak düşük ağırlık/kuvvet oranı ve yüksek kuvvet/akım oranı dikkate alınır. Bir başka deyişle hareketli kısmın kütlelerinin hafif olması, akım başına üretilen kuvvetin ise yüksek olması arzu edilir. Diğer taraftan, tasarımın fırçalı veya fırçasız olması da bir başka seçenektir. Fırçalı durumda arıza ihtimali artar iken, fırçasız tasarımda karmaşık sürücü düzeneğine ihtiyaç vardır [2].

Lineer motor tasarımı ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Tarihi 1840'lara dayanan lineer motorların ilk modeli Wheatstone'a aittir. Kullanışlı olmayan bu modelden sonra 1905'de trenler için önerilen lineer motor, Alfred Zehden tarafından yapılmıştır. Ancak lineer motorlar 1950'lerde Laithwaite tarafından geliştirilen model ile ünlenmiştir [12]. Başlarda, alan sargılı DA lineer motor tasarımı üzerinde araştırmalar varken, daha sonra yüksek güç yoğunluklu mıknatısların bulunabilirliği sayesinde, sabit mıknatıslı lineer motor tasarımlarına yönelim artmıştır [2,13]. Basak ve Shirkoohi, NdFeB mıknatıslar ile fırçasız lineer motoru tasarlamış, geliştirilen modelin 3 boyutlu manyetik analizlerini bilgisayar yazılımları ile gerçekleştirmişlerdir [14].

Diğer taraftan endüstride döner hareket gereksinimi önemli ihtiyaçlardandır. Doğrusal harekette lineer motorun avantajlı olduğu gibi, döner hareketlerde de dairesel çıktı üreten motorlar avantajlı konumdadır. Döner hareket üreten motorlara, en yaygın kullanılan fırçasız doğru akım motoru, asenkron veya senkron motorlar örnek gösterilebilir. Kullanım yerleri ve amaçlarına göre değişen bu motorlar endüstride, otomasyonda, elektrikli araçlarda, küçük ev aletleri gibi hemen her alanda kullanılmaktadır. Besleme tipine göre AA veya DA olarak ayrılan döner motorlar aynı zamanda, üretilen akı itibarıyla radyal akılı veya eksenel akılı olarak da ikiye ayrılır. Eksenel akılı motorlar uzun bir süre yüksek güç yoğunluklu mıknatısların olmadığı ve üretimde bugünkü teknolojiye sahip olunmadığı zamanda radyal akılı motorlar kadar yaygınlaşmamıştır [15]. Halbuki, eksenel akı prensibine 1831 yılında Faradayın disk jeneratörlerinde rastlanılmaktadır [16]. Tarihi oldukça eski olan eksenel akılı motorlar bugün bazı uygulamalarda geleneksel radyal akılı motorların yerini almaktadır. Bunun sebebi olarak, Neodyum ve Dysprosium gibi nadir

elementlerin sabit mıknatıslarda kullanılmaya başlanması ve bu sabit mıknatısların fiyatlarının son yıllarda uygun seviyelere inmesi ve yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile ilerleme kaydeden güç elektroniği sistemlerinin gelişmesi ve üretim maliyetlerindeki iyileşmeler gösterilebilir. Bunun yanı sıra eksenel akılı motorların radyal akılı motorlara kıyasla yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, daha az çekirdek malzemesi kullanılması, düz ve kolay ayarlanabilen hava aralığı başlıca üstün yönleridir [17-19]. Kompakt yapısı, yüksek verimi, çalışma hız aralığının genişliği doğrudan tahrikli çekiş makineleri uygulamalarında eksenel akılı motorları en iyi aday yapar [20-28]. Dahası, artırılabilen kutup sayısına uygunluğu ve birim hacim veya kütledeki etkili tork çıkışı ve düşük hızda yüksek moment üretmesi eksenel akılı motorlara elektrikli araçlar için uygulama alanı kazandırmıştır [17-19,29,30]. Disk motor olarak da isimlendirilen eksenel akılı motorların radyal akılı motorlardan akı kaynaklı tasarım farklılığı Şekil 1.1’de verilmiştir [22,31].



Şekil 1.1. Radyal akılı motor ve eksenel akılı motor [31]

Bu tez çalışmasında, lineer motorun yukarıda bahsedilen avantajlı ve dezavantajlı yönleri göz önüne alınarak ANSYS-Maxwell programında tasarım modellenmiş, tasarım dairesel hareket üreten motorlara dönüştüğünde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak, detayları [2] numaralı kaynakta verilen çok katmanlı çift yanlı doğru akım lineer motorun (ÇYDALM) ANSYS-Maxwell programında manyetik analizi irdelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) prensibine göre çalışan ANSYS-Maxwell programında elde

edilen sonuçların, [2] numaralı kaynakta analitik yöntemler ile hesaplanan sonuçlar ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Dairesel motorların kesilerek açılmış versiyonu olan lineer motorun uçları tekrar birleştirilerek elde edilen sonuçların manyetik analizi yapılmıştır. Lineer motorlar ile ilgili yapılan çalışmalardan farklı olarak birleştirme işlemi, akının aksel yönde oluşması şeklinde tasarlanmıştır. Çembersel motor olarak adlandırılan söz konusu motorda üretilen akı, aksel yönde olup ANSYS-Maxwell programında vektörel analizi gözlenmiştir. Aksel akılı motorların geleneksel radyal akılı motorlara kıyasla yukarıda bahsedilen üstün yönleri teker motor tasarımını daha elverişli kılar [17,20,32]. Bu yüzden çembersel motorda parametreler teker motor boyutlarında modellenmiştir. Üretilen momenti artırabilmek için teker motorun stator ve rotor boyutlarında değişik varyasyonlar incelenmiş, akım yoğunluğu gözetilerek sargıların boyu artırılıp çok katmanlı sarılmıştır. Sonuç olarak, moment/akım oranı yüksek yeni bir motor topolojisi elde edilmiştir.

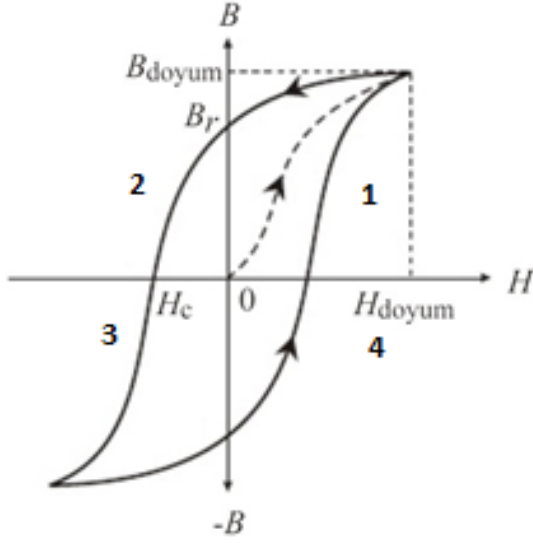
## 2. MANYETİK MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Endüstride, modern cihazların büyük bölümünde manyetik malzemelere ihtiyaç vardır. Bunlar mıknatıslar veya mıknatıslar tarafından etkilenen malzemelerdir. Mıknatısların oluşturduğu manyetik alanda her maddenin verdiği tepki farklıdır. Malzemelerin mıknatıslanma durumu, birim hacimdeki atomlarının manyetik momentlerinin manyetik alan ile aynı doğrultuda olması ile ortaya çıkar. Burada manyetik moment, elektronların çekirdek etrafındaki yörünge hareketi ve kendi etrafındaki spin hareketi momentinin toplamına denktir.

### 2.1. Histerezis Eğrisi

Malzemelerin özellikleri, malzemenin  $B-H$  histerezis eğrisi ile gösterilir. Şekil 2.1' den görüleceği üzere,  $B$  malzemenin manyetik akı yoğunluğu,  $H$  ise dışardan uygulanan manyetik alan şiddetidir. Şekil 2.1'de  $B$  akı yoğunluğu değeri, değişen manyetik alan ya da uygulanan akım ile bağlantılı manyetik alan şiddetinin değişimine verdiği tepkidir. Başlangıçta kalıcı mıknatıslık özelliği olmayan bir malzemeye sarılı iletkenle akım geçirildiğinde ve değeri artırıldığında, akım ile birlikte doğrusal artış gösteren manyetik alan şiddeti  $H$  artacaktır.

Diğer taraftan Şekil 2.1'de 1 numaralı bölgede manyetik akı yoğunluğu  $B$  lineer olmayan bir artış gösterir ve belli bir değerde doyuma ulaşır. Doyum değerinden itibaren akım azalması ile 0'a geldiğinde manyetik alan şiddeti 0 olmasına rağmen  $B$  değeri remanans akı yoğunluğu veya artık mıknatıslık  $B_r$  değerinde kalır. Ancak mıknatıslanma Şekil 2.1'de 2 numaralı bölgede gösterildiği gibi ters yönde  $H_c$  koersif kuvvet olarak adlandırılan değere geldiğinde, bir diğer ifade ile akım ters yönde arttığında, manyetik akı yoğunluğu değeri 0'a gelir. 2 numaralı bu bölge, mıknatısların karakteristiğine göre şekillenir ve mıknatısların oluşturduğu manyetik devre analizlerinde göz önüne alınır. Şekil 2.1'de gösterilen kapalı çevrim ise ancak birkaç periyottan sonra ulaşır ve  $B-H$  arasındaki lineer olmayan bu ilişki histerezis eğrisi ile ifade edilir [33].



Şekil 2.1. Histerezis eğrisi

Mıknatıslanmanın ölçüt birimi, manyetik geçirgenlik

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.1)$$

olarak gösterilir. Burada  $\mu$  manyetik geçirgenlik (H/m),  $B$  akı yoğunluğu (T),  $H$  manyetik alan şiddeti olup birimi A/m'dir.  $B$ - $H$  arasındaki oranı ifade eden manyetik geçirgenlik boşluğun manyetik geçirgenliği  $\mu_0$  ile malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği  $\mu_r$  çarpımıdır.

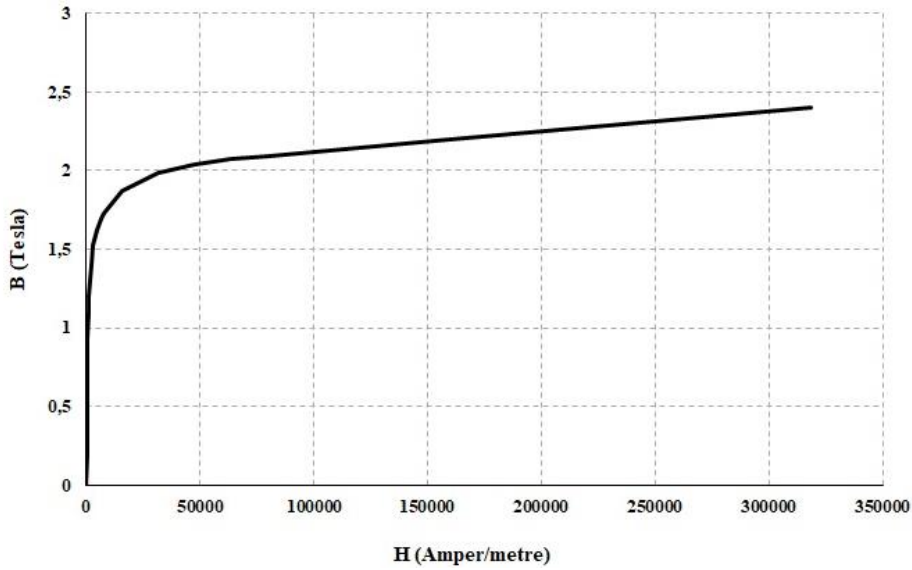
$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.2)$$

Yukarıda şekilde ifade edilen  $B_r$  artık mıknatıslık değeri ve  $H_c$  koersif kuvvet değeri mıknatısların ayırt edici değerleridir. Histerezis eğrisi manyetik devre hesaplarında kullanılır. Manyetik alana maruz kalan malzemelerin verdiği farklı tepkileri üç farklı gruba ayırmak mümkündür. Bunlar, diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemelerdir.

Diyamanyetik malzemeler, manyetik alana maruz kaldığında zayıf etkilenme gösterir ve bu tip malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri  $\mu_r < 1$ 'dir. Manyetik özellik göstermeyen bu tip malzemelerde atomların manyetik net momenti 0 ya da çok küçük olup elektron sayıları tektir. Soygazlar, bakır, gümüş, altın ve su bu gruba girer.

Paramanyetik malzemeler, manyetik alan içerisinde geçici manyetik özellik kazanır ve bu tip malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri  $\mu_r \geq 1$  şeklinde ifade edilir. Sıcaklık ve manyetik alan değeri paramanyetik malzemelerin manyetik özelliğini etkiler ancak manyetik alan ortadan kalktığında manyetik özelliği sıfırlanır. Hava, alüminyum, platin ve uranyum bu gruba dahildir [34].

Ferromanyetik malzemeler, manyetik alan içerisinde çok kuvvetli bir şekilde manyetik özellik kazanır ve bu tip malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri  $\mu_r \gg 1$ 'dir. Ferromanyetik malzemelerin ayırt edici özelliği manyetik alana maruz kaldığında, maddenin içindeki atomların manyetik momentinin uygulanan alan yönünde düzenlenmesi ve manyetik alan ortadan kalktığında dahi mıknatıslık özelliğini sürdürmesidir. Kalıcı mıknatıslanmaya elverişli bu tip malzemelere örnek olarak, demir, nikel, kobalt ve alaşımları gösterilebilir. Yüksek sıcaklıkta manyetik özelliğini yitirip paramanyetik malzemelere dönüşme riski taşırlar. Şekil 2.2'de ferromanyetik bir malzeme olan 1010 çeliğin  $B-H$  eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.2. 1010 çelik  $B-H$  karakteristiği

## 2.2. Sabit Mıknatıslar ve Çeşitleri

Mıknatıslar genel olarak doğal ve yapay olarak ayrılmakla birlikte yapay mıknatıslar da elektromıknatıs ve kalıcı mıknatıs olarak sınıflandırılır. Elektromıknatıslar, üzerinde iletken sargı olan manyetik bir nüvede, akım akmasıyla manyetik akının oluşması prensibi ile çalışır. Ancak akımın kesilmesiyle mıknatıslık özelliğini yitiren geçici mıknatıslardır.

Diğer taraftan manyetik alan etkisinden bağımsız olarak mıknatıslık özelliğini koruyan kalıcı mıknatıslar, daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Histerezis eğrisinde yüksek değerlere sahip olan sabit mıknatıslar ferromanyetik malzemedir yapılır. Sabit mıknatıslar kullanım alanına göre, manyetik etkisi ve mekanik dayanımı özelliklerine göre ayrılırlar. Örnek olarak, yumuşak mıknatısın manyetik etkisi düşük iken, sert mıknatısın manyetik etkisi yüksek olup, mekanik dayanımı düşük olabilmektedir. Bununla birlikte mıknatısların üretim kolaylığı ve ısıl dayanımları da göz önüne alınması gereken bir başka kriterdir. Günümüzde yaygın olarak, ferrit mıknatıslar, AlNiCo mıknatıslar ve nadir toprak elementli mıknatıslar kullanılmaktadır. Ferrit mıknatıslar doğada bol bulunan, demir-oksit, Baryum (Ba) ve Stronsiyum (Sr) maddelerinden yapılır. Bu sayede yaygın olarak kullanılır ancak ısıl dayanımı yüksek olmadığı için sıcaklık sorunu bulunan yerlerde tercih edilmezler. Bunun yanı sıra kalıcı akı yoğunlukları düşük olması sebebiyle diğer mıknatıs türlerine göre kıyasla aynı akı için daha büyük hacim kullanılmasını zorunlu kılar. Bir diğer yaygın mıknatıs AlNiCo, bileşenlerinden de anlaşılacağı üzere alüminyum, nikel ve kobalttan oluşur. Histerezis eğrisinde kalıcı akı yoğunluğu yüksek iken koersif kuvvet  $H_c$ , düşük seviyededir. Bu yüzden yüksek performans isteyen motorlarda tercih edilmezler. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi üstün yönleridir. Son olarak, nadir toprak elementli mıknatıslarda en bilinen ve yaygın kullanılan NdFeB ve SmCo'dır. Yukarıda bahsedilen mıknatıslara kıyasla manyetik özellik parametreleri oldukça yüksektir. Histerezis eğrisinde 2 numaralı bölgede yer alan bu mıknatısların  $B-H$  karakteristikleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Çizelge 2.1'de görüleceği üzere ısıl dayanımı yüksek olan SmCo yüksek sıcaklıkta rahatlıkla kullanılabilir.

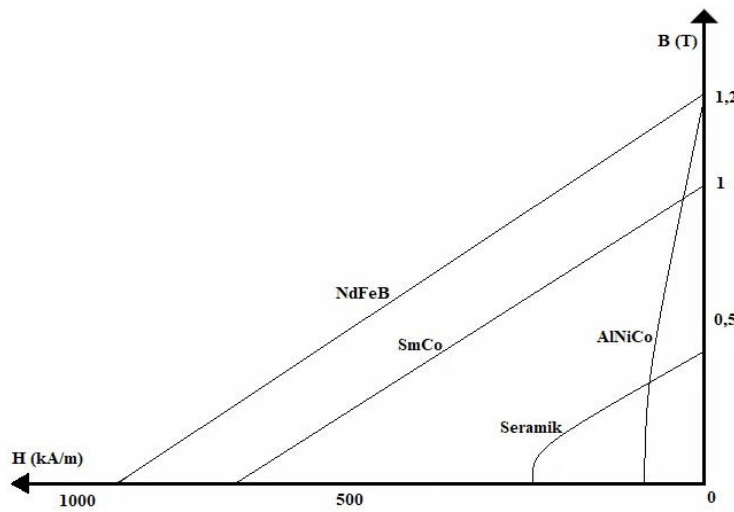
Diğer taraftan NdFeB en son gelişme gösteren mıknatıs türüdür. Son zamanlarda maliyetinin de ucuzlaması sebebiyle birçok elektrik motorunda yerini almıştır. SmCo mıknatıslara kıyasla birim hacimde enerji üretimi yüksektir ve bu sebeple performans gereksinimi olan alanlarda daha az hacim kaplar. Ancak, yüksek sıcaklık isteyen



uygulamalarda SmCo mıknatısların gerisinde kalır ve demanyetizasyon riski taşır [35,36]. Çizelge 2.2’de NdFeB mıknatısın karakteristiği verilmiştir.

Çizelge 2.1. Mıknatısların karakteristikleri

	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	Birim enerji başına fiyat (\$/J)	Curie sıcaklığı (°C)	Maksimum çalışma sıcaklığı (°C)
NdFeB	1,20	870	200-290	3,5	310	140
SmCo	0,97	750	130-190	8,5	720	250
Alnico	1,1	130	70-85	4	830	500
Seramikler	0,4	240	27-35	0,5	450	300



Şekil 2.3. Mıknatısların  $B-H$  karakteristikleri

Çizelge 2.2. NdFe35 mıknatıs özellikleri

NdFe35 Mıknatıs	
Remanans, $B_r$	1,17 T
Bağıl geçirgenlik, $\mu_r$	1,0726
Artık mıknatıslanma, $H_c$	-8.68e+005 amper/metre
İletkenlik	6.25e+005 siemens/metre
Kütle yoğunluğu	7400 kg/m <sup>3</sup>



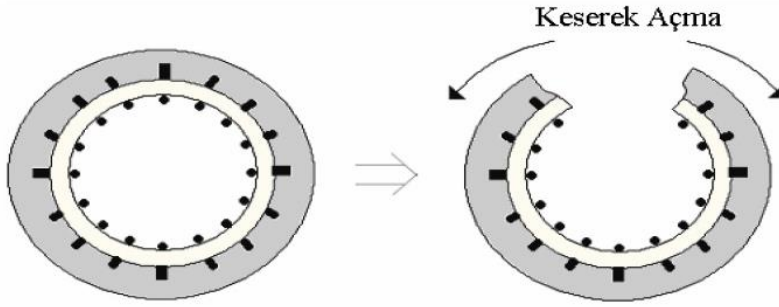
### 3. LİNEER MOTORLAR

Lineer motorlar, adında anlaşılacağı üzere doğrusal hareket üreten, bir başka deyişle itme ve çekme hareketi sağlayan elektrik makinalarıdır. Lineer motorlar, geleneksel dairesel hareket üreten motorların ortadan kesilmiş hali olmakla birlikte, döner motorların lineer hareket üretmek için kullanmasının zorunlu olduğu harici ekipmanlara gereksinim duymamaktadır. Dişli sistemi, kayış, kasnak gibi söz konusu ekipmanlar sürtünmeyi artırıp verimi olumsuz etkilemektedir. Bunun yanı sıra lineer motorlarda hareketli kısım, nüveden bağımsız olup arada dönüştürücü parça olmaması da sürtünmeden kaynaklı sorunların önüne geçmiştir. Bu sayede yüksek hızlara yüksek ivme ile ulaşılabilir. Lineer motorlar ile aynı prensipte çalışan maglev trenlerin, günümüz trenlerinden daha hızlı olması da buna bir örnektir. Döner motorların doğrusal hareket üretmek için kullandığı dönüştürücü elemanlar maliyeti artırıp, bakım süresini azaltması ve zamanla deforme olması da hassasiyet ve tepki süresinde soruna yol açar. Lineer motorlarda bu elemanların olmaması, hassasiyetin daha önemli olduğu çalışma alanlarında lineer motorların avantajlı konuma gelmesini sağlar.

#### 3.1. Lineer Motor Tasarım Prensipleri

Lineer motorlar Şekil 3.1’de görüldüğü gibi dairesel hareket üreten motorların kesilmiş hali olup çalışma prensibi döner motorlar ile benzerdir [4,11,37]. Lineer motorlar dairesel hareket üreten motorlar gibi hareketli ve hareketsiz parçalardan oluşur. Hareketli kısım rotor veya mil adı alırken, hareketsiz kısım nüve veya statordur. Lineer motorda stator çalışma alanını belirler ve boyu isteğe göre artırılıp azaltılabilir. Lineer motorlarda en yaygın iki tasarım şekli kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, sabit stator üzerinde yerleştirilmiş mıknatıslar ile birlikte rotora sarılı bobinlerin oluşturduğu tasarımdır. Bu tasarımda, bobinlerin hareketli rotora bağlanması ve rotorun boyunun statordan kısa olması sürücü tasarımında kolaylık sağlar. Ayrıca statorlara mıknatısların eklenip çıkarılmasıyla modüler tasarım gerçekleştirilebilir. Ancak rotora bağlı bobinlerin hareketli kısımda ağırlığa sebebiyet vermesi, yüksek hıza çıkmasına engel olur. Bunun yanı sıra rotora enerji vermek için kullanılan kablolar motorun yüksek hıza çıkmasında olumsuz etki yapar. Diğer taraftan ikinci tasarım şeklinde bobinler sabit stator üzerine sarılı olup mıknatıslar hareketli rotora bağlıdır. Yüksek hız istenen çalışma alanlarında bu tasarım daha avantajlı olmakla birlikte,

statora sarılı bobinler sürücü maliyetini ve karmaşıklığını artırmaktadır [12].



Şekil 3.1. Döner hareketli motorun kesilerek açılması [4,37]

Mıknatıs hareketli lineer motorlar, mıknatısların kutup yönlerine göre uygun konumlanması ve stator üzerine sarılı bobinlere uygun sırayla enerji verilmesi prensibine göre çalışır. Yüksek güç yoğunluğuna sahip mıknatısların ürettiği manyetik alan içerisinde stator üzerinde sarılı bobinlere enerji verildiğinde yatay ekseninde rotora kuvvet etkimektedir. Motorun çalışma alanı besleme tipini belirler. Genelde uzun mesafelerde AA lineer motorlar tercih edilirken, kısa mesafelerde basit sürücü sistemi ile DA lineer motorlar tercih edilir. Ancak, DA lineer motorlar hakkında AA lineer motorlara kıyasla daha az araştırma yapılmıştır [1]. DA lineer motorlar kendi içinde fırçalı veya fırçasız olarak ayrılabilir. Fırçalı tasarımda aşınma, yıpranma problemleri oluşurken, fırçasız tasarımda ise sürücü karmaşıklığı göze çarpar.

Lineer motor tasarımında, yukarıda bahsedilen avantajlı yönleri göz önüne alındığında mıknatıs hareketli lineer motorun performans açısından üstün olduğu görülmüştür. Tasarım nüvenin bir tarafında rotor ve mıknatısın olduğu veya her iki tarafında rotor ve mıknatısın olduğu, bir başka deyişle tek yanlı ya da çift yanlı lineer motor olarak yapılabilir. Çift yanlı lineer motor tasarımında nüve etrafında sarılı bobinin her iki yanından kuvvet elde edilir. Bu durum, tek yanlı lineer motorlara göre üstün özelliktir. Bunun yanı sıra yüksek kuvvet akım oranları ve modüler yapıları sebebiyle tez çalışması çift yanlı DA lineer motor üzerinden gerçekleşmiştir.

### 3.2. Çift Yanlı DA Lineer Motor

Lineer motorlar tüp şeklinde, yassı şekilde, U şeklinde veya daha farklı tasarımlarla

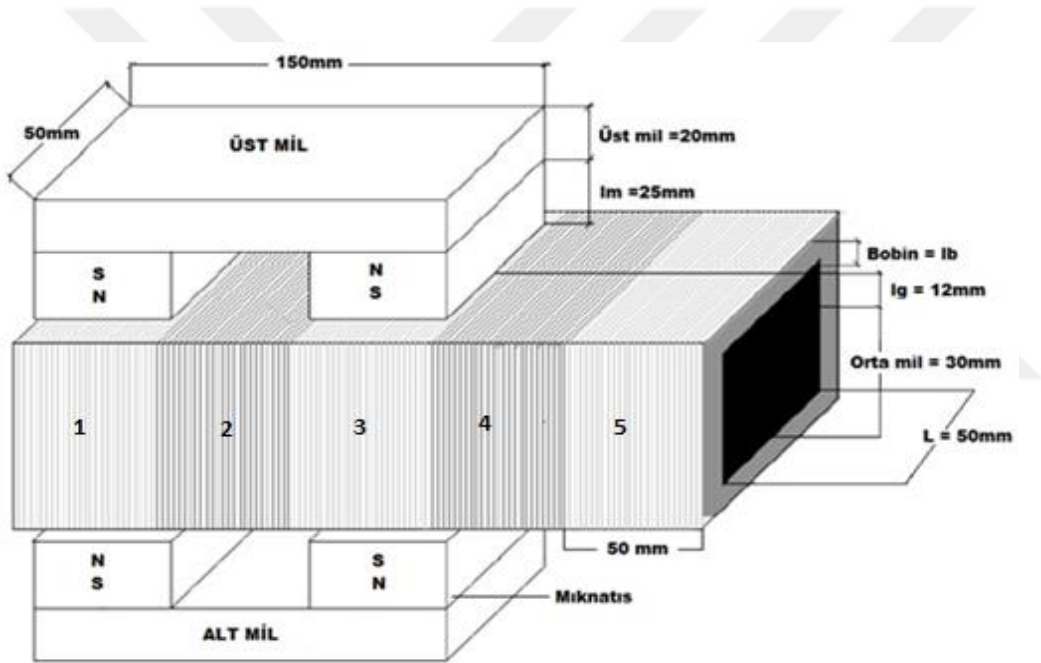
yapılabilir. Doğru motoru, kullanım yeri ve amacı belirlemektedir. Prototipi [2] numaralı kaynakta yapılan çift yanlı DA lineer motor Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Şekil 3.2’den de görüleceği üzere nüve olarak alınan orta milin her iki tarafında hareketli ayrı mil bulunmakta ve üretilen kuvvet bu millere aktarılmaktadır. Lineer motorlarda kuvvet/akım oranı motor performansı açısından önemlidir. Enerjinin verimli kullanılması amacıyla düşük akımda yüksek kuvvet elde etmek gerekmektedir. Ayrıca, motorda hareketli kısmın kütesinin hafif olması belli bir kuvvet değerinde ivmeyi artıracığından performans kriteri olarak gösterilebilir.

### 3.2.1. Çift yanlı DA lineer motor yapısı ve çalışma prensibi

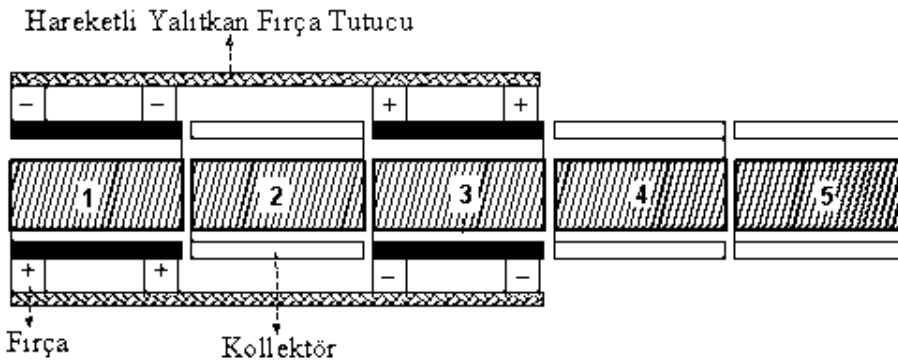
Şekil 3.2’de verilen çift yanlı DA lineer motorda, tüm lineer motorda olduğu gibi hareketli ve hareketsiz iki kısım bulunmaktadır. Hareketli kısım 1010 çelik tipi manyetik geçirgen malzemeden yapılmıştır. Üst ve alt mil olarak adlandırılan miller yüksek güç yoğunluğuna sahip NdFeB mıknatısları taşımaktadır. Hava aralığında manyetik alan oluşmasını sağlayan dört adet mıknatısların kutup yönlerine göre dizilimi Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir. Diğer taraftan hareketsiz olan orta mil olarak adlandırılmış nüvede 1010 çelik tipi malzemeden yapılmıştır. Bobinler orta mil üzerine sarılmıştır. Böylece sargı ağırlığı hareketsiz kısımda kalmış olur ve hareketli kısma yansıyan bir yük olmaz. Dolayısıyla motor verimine katkıda bulunulmuştur. Motorun çalışma alanında ihtiyaca göre orta mil boyu, sargılarla birlikte modüler olarak artırılabilir. Mıknatısların ürettiği manyetik alanda sargılara uygulanan akım, kuvvetin büyüklüğünü ve yönünü belirler. Fırçalı veya fırçasız tasarım şekliyle enerjilendirilen bobinlerden yalnızca mıknatıs altında kalanlar aktiftir. Bu sayede hareket oluştuğunda görevini icra etmiş bobin soğumaya bırakılır ve gereksiz enerji kaybı önlenir. Motorun frenleme işlevi, mıknatıs altında kalan sargılara aynı yönde ve eşit büyüklükte enerji verilmesi ile sağlanır.

Fırçalı tasarımda fırçalar mıknatıslar ile birlikte hareket etmektedir. Anahtarlama veya bir başka deyişle komitasyon, kollektör ve fırçalar ile gerçekleştirilir [2]. Şekil 3.3’te fırça konfigürasyonu, Şekil 3.4’te ise elektrik şeması verilen tasarımda, bobinleri baş ve sondan aktifleştirmek üzere mıknatıslarla birlikte eşzamanlı hareketi sağlayan düzeneğe fırçalar yerleştirilmiştir. Bobinlerin baş ve sonunda bulunan fırçalar yoluyla aynı anda enerjilendirilmesi durumunda üretilen kuvvette dalgalanmalar azaltılmıştır [2].

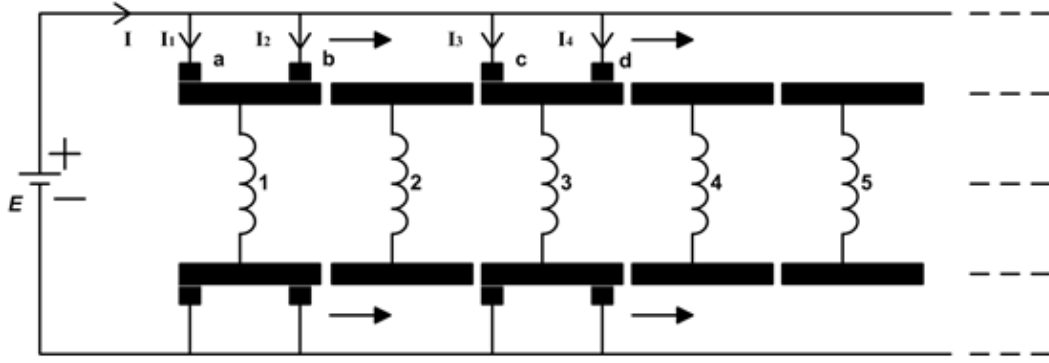
Sargıların doğru akımla enerjilendirilmesi suretiyle oluşan hareketin yönü ise yine sargılara uygulanan akımın yönüne bağlıdır. Akım yönünü değiştirmek hareket yönünü değiştirecektir. Fırçalı tasarımda fırçalar + ve - kutup olarak çapraz yerleştirildiğinden zıt yönde enerjilendirilmesi gereken bobinler için simetrik güç kaynağına ihtiyaç kalmamıştır [10]. Bobinlere temas halinde olan fırçalar, hareket yönü boyunca aktif olmayan diğer bobinleri de aktif edeceğinden, ilave anahtarlama devresine gerek kalmadan istenilen uzunlukta çalışma alanı oluşacaktır. Sargılardan geçen akım ve motorun konumunu geri besleme olarak alacak bir denetleyici, aşağıdaki Şekil 3.5’de gösterilen H köprüsündeki transistörleri, çıkışı PWM sinyali olacak şekilde sürer. Sargılar mekanik olarak fırçalara bağlı olduğu için, ilave elektronik devre olmadan ilgili bobin aktifleştirilir.



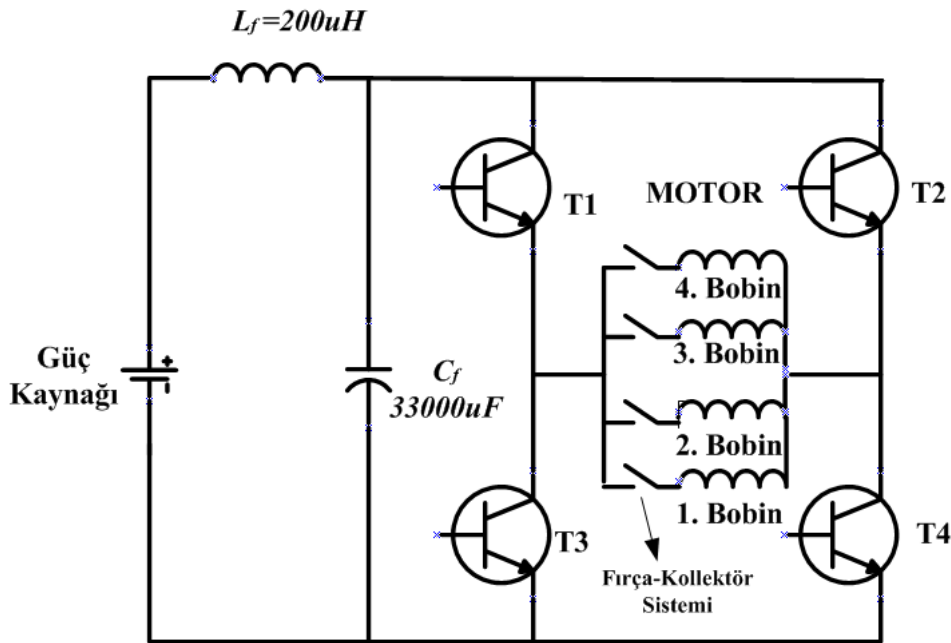
Şekil 3.2. Çift yanlı DA lineer motor [2]



Şekil 3.3. Çift sarım ve 8 fırça devrede iken fırça-kollektör durumu [2]



Şekil 3.4. Çift sarım ve 8 fırça devrede iken elektrik devre şeması [2]



Şekil 3.5. Sürücü devre [2]

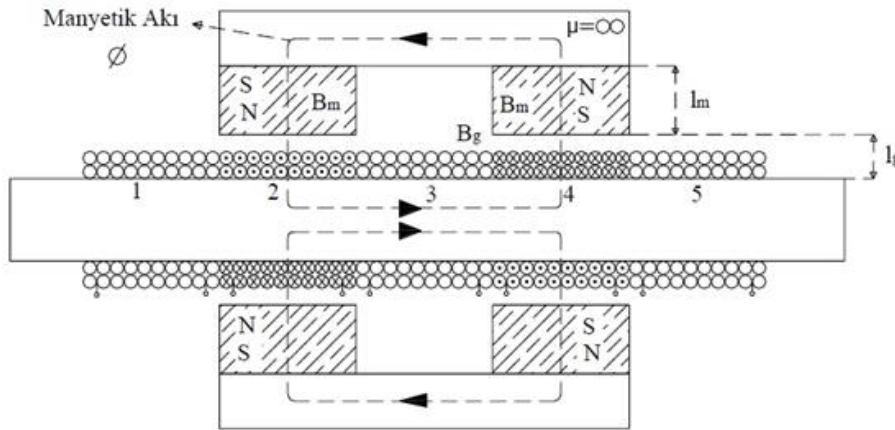
### 3.2.2. Çift yanlı DA lineer motorun manyetik analizi

Elektromekanik bir sistem olan lineer motorların manyetik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Şekil 3.2’de gösterilen çift yanlı doğru akım lineer motorunda sargılardan geçen akım tek başına kuvvet oluşturamaz. Ancak sargıları dik kesen bir manyetik alan olduğunda kuvvet üretilir. Söz konusu tasarımda manyetik akılar NdFeB mıknatıslar tarafından oluşturulmuştur. Mıknatısların Şekil 3.2’deki kutup yönleri ile oluşan diziliminde üretilen akı önce hava aralığından geçerek orta mile, ardından tekrar hava aralığı üzerinden diğer mıknatısa geçerek devresini tamamlar. Lineer motorun çift yanlı olması sebebiyle birbirine simetrik ve orta mil üzerinde birbirini destekleyen akıların oluşması Şekil 3.6’da verilmiştir. Bu yüzden orta milde akı yoğunluğu artmaktadır. Ayrıca

hareket halindeki çift yanlı lineer motorda, mıknatıslar da hareket halinde olacağı için akının artış göstereceği bölge sürekli yer değiştirmiş olacaktır.

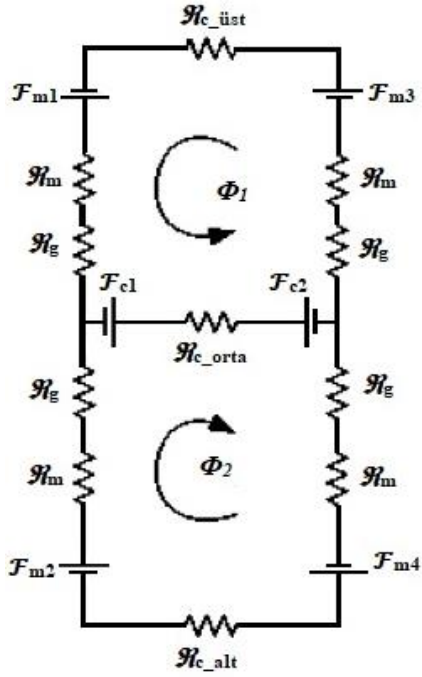
Şekil 3.6'dan da görüleceği üzere mıknatıs altındaki aktif sargıları dik kesen akı, hava aralığındaki akıdır. Motorda üretilen kuvvetin analizinde hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması gereklidir. Hem hava aralığındaki akı yoğunluğu hem de manyetik malzemeden geçen akı için motorun manyetik eşdeğer devresi Şekil 3.7'deki gibi oluşturulmuştur.

Mıknatısların ürettiği manyetik akılar yolunu Şekil 3.7'de manyetik eşdeğer devresinde görüldüğü gibi tamamlar. Ancak üretilen tüm akı devresini manyetik geçirgen olan 1010 çelik malzeme ve mıknatıslardan tamamlayamaz. Manyetik akının bir kısmı kaçak olarak devresini hava üzerinden tamamlar. Bunun yanı sıra hava aralığından geçen manyetik akı taşma şeklinde diğer manyetik malzemeye geçer. Şekil 3.8'de görüleceği üzere manyetik akı hava aralığında yolunu düz olarak tamamlamayıp, uç etkisi nedeniyle sapmalar olmaktadır.

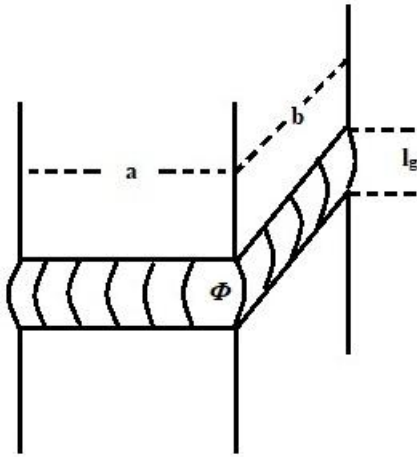


Şekil 3.6. Çift yanlı DA lineer motorun manyetik devresi [2]





Şekil 3.7. Çift yanlı DA lineer motorun manyetik eşdeğer devresi



Şekil 3.8. Hava aralığındaki tipik manyetik akı dağılımı

Bunun sonucu olarak, hava aralığının orta noktasında manyetik akı yoğunluğu, mıknatıs malzeme ya da manyetik geçirgen 1010 çelik malzemedeki akı yoğunluğundan azdır ve hava aralığının kesiti de artmıştır. Manyetik devrelerin çözümünde kesitlerin değeri göz önüne alınmalıdır. Hava aralığının etkin kesitinin yaklaşık değeri analitik olarak hesaplanır. Hava aralığının etkin kesiti, karşısındaki manyetik malzeme ile eşit ve paralel ölçülere sahip olması durumunda,

$$A_g = (a + l_g)(b + l_g) \quad (3.1)$$

olarak hesaplanır. Burada a ve b hava aralığındaki kenar yüzeylerin boyutları,  $l_g$  ise hava aralığı boyudur [38]. Şekil 3.2’de boyutları verilen motorun hava aralığının boyutlarının manyetik malzeme ile paralel ve yaklaşık eşit olduğu varsayıldığında hava aralığı kesiti,

$$A_g = (50.10^{-3} + 12.10^{-3})(50.10^{-3} + 12.10^{-3})$$

$$A_g = 3,844.10^{-3} m^2$$

dir. Manyetik kesiti  $A_m$  ise

$$A_m = (50.10^{-3} \times 50.10^{-3})$$

$$A_m = 2,5.10^{-3} m^2$$

olarak bulunmuştur.

Manyetik devrelerin analizinde yararlanılan yasalardan biri Ampere yasası olup,

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanır. Denklem 3.2’ye göre kapalı bir yol boyunca manyetik alan şiddetinin integrali bu yolun sınırladığı bölgedeki akımı verir. Diğer taraftan N sarımlı bir bobinde i akımının geçmesi durumunda, bobinin manyeto motor kuvveti

$$F_m = NI \quad (3.3)$$

şeklinde yazılır ve birimi Amper-sarımdır. Buradan hareketle Ampere yasası tekrar yazılırsa

$$F_m = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (3.4)$$

ifadesi elde edilir. Manyetik devrelerin analizinde kullanılan bir diğer devre elamanı relüktansdır. Elektrik devrelerinde akımı sınırlayan direnç, manyetik devrelerde relüktans olarak tanımlanır. Bir başka deyişle içerisinde  $\Phi$  akısı geçen ve uçlarında  $F_m$  manyeto motor kuvveti olan bir manyetik malzemenin relüktansı,

$$\mathfrak{R} = \frac{F_m}{\phi} \quad (3.5)$$

olup, birimi A/Wb'dir. Buradan hareketle Şekil 3.7'de verilen manyetik devrede  $\mathfrak{R}_m$ ,  $\mathfrak{R}_g$  ve  $\mathfrak{R}_c$  sırasıyla mıknatıs, hava aralığı ve nüvenin manyetik relüktansını ifade etmektedir. Ayrıca,  $F_m$  ve  $F_c$  sırasıyla mıknatıs ve bobinin oluşturduğu manyeto motor kuvvetleridir. Manyetik devrede dolaşan akının hesaplanması için toplam relüktans ve toplam manyeto motor kuvvetin bilinmesi gereklidir. Mıknatısın relüktansı için,

$$\mathfrak{R}_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m} \quad (3.6)$$

ifadesi yazılır. Burada  $l_m$  mıknatısın boyunu,  $A_m$  kesiti,  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliği ve  $\mu_r$  bağlı manyetik geçirgenliktir. Çizelge 2.2'den artık mıknatısıyeti,  $B_r$  değeri 1.17 T ve koersif kuvveti  $868.10^3$  A/m olan NdFeB mıknatısın, manyetik geçirgenliği Denklem 2.1 yardımıyla

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{1,17}{868.10^3} = 1,34.10^{-6} H / m$$

elde edilir. Bilinen değerler yerine konduğunda Çizelge 2.2'de verilen NdFeB mıknatısın relüktansı,

$$\mathfrak{R}_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m} = \frac{25.10^{-3}}{1,34.10^{-6} \times 2,5.10^{-3}}$$

$$\mathfrak{R}_m = 7,419.10^6 A / Wb$$

olarak hesaplanır. Hava aralığının manyetik relüktans ise

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{4\pi 10^{-7} \times 3,844 \cdot 10^{-3}}$$

$$\mathfrak{R}_g = 2,484 \cdot 10^6 \text{ A/Wb}$$

dir. Manyetik devrede bulunan ferromanyetik malzemelerin bağıl manyetik geçirgenliklerinin çok yüksek olduğu daha önce bahsedilmiştir. Relüktans hesabında manyetik geçirgenliğin çok büyük olması relüktans değerini çok fazla düşüreceğinden, 1010 çelik malzemenin relüktansı, yukarıda hesaplanan  $\mathfrak{R}_m$  ve  $\mathfrak{R}_g$  nin yanında ihmal edilebilir [2,38]. Ferromanyetik 1010 çelik malzemenin relüktansı ihmal edildiğinde, manyetik eşdeğer devrenin üst kısmının eş değer relüktansı

$$\mathfrak{R}_T = 2(\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_g)$$

$$\mathfrak{R}_T = 19,806 \cdot 10^6 \text{ A/Wb}$$

olarak hesaplanır. Mıknatısların ürettiği toplam manyeto motor kuvvet ise Eş. 3.4 yardımıyla

$$F_m = HI$$

$$F_m = 2 \cdot (868 \cdot 10^3 \times 25 \cdot 10^{-3})$$

$$F_m = 43400 \text{ A-tur}$$

olarak belirlenir. Buradan hareketle eşdeğer devrenin üst kısımdaki manyetik akı için Eş. 3.5 yardımıyla

$$\phi = \frac{F_m}{\mathfrak{R}_T} = \frac{43400}{19,806 \cdot 10^6}$$

$$\phi = 2,191 \text{ mWb}$$

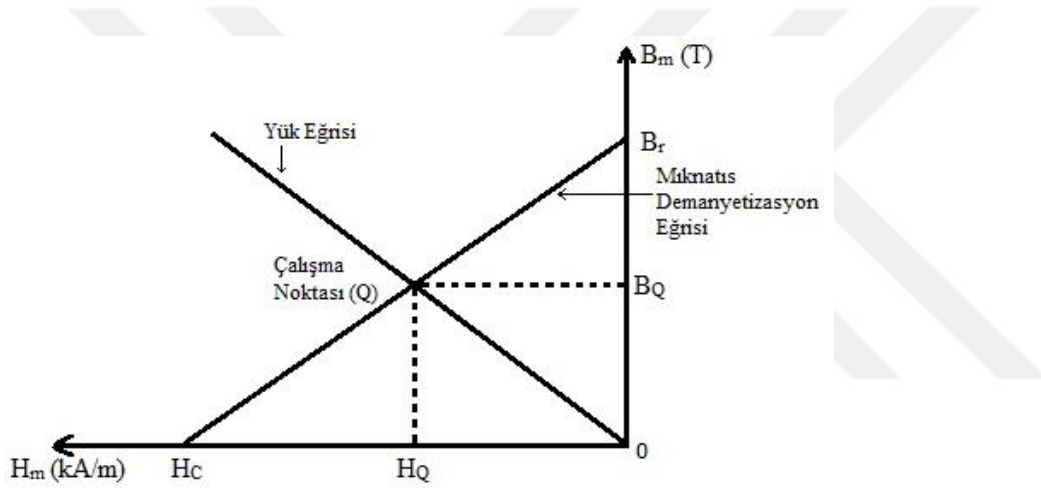
olarak elde edilir. Mıknatısın manyetik akı yoğunluğu

$$B_m = \frac{\phi}{A_m} = \frac{2,191.10^{-3}}{2,5.10^{-3}} = 0,876T$$

dir. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu ise,

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} = 0,569T$$

olarak bulunur. Diğer taraftan mıknatısın Şekil 3.9'daki yük ve demanyetizasyon eğrisi kullanılarak da manyetik hesaplar yapılabilir.



Şekil 3.9. Mıknatısın yük ve demanyetizasyon eğrisi

Mıknatısın yük eğrisi ile demanyetizasyon eğrisinin kesiştiği nokta, mıknatısın çalışma noktasıdır. Çalışma noktasının değerleri denklemlerde  $B_Q$  (T) ve  $H_Q$  (A/m) olarak tanımlanır.

Mıknatısların ürettiği manyetik akılar hava aralığı ve orta mil üzerinden devresini tamamlamaktadır. Her iki manyetik devrede üretilen manyetik akılar orta milde birbirini destekler durumdadır. Böylece herhangi bir manyetik devredeki manyetik akı için

$$\phi = B_m A_m = q B_g A_g \quad (3.7)$$

dir. Burada  $B_m$  ve  $B_g$  sırasıyla mıknatıs ve hava aralığının manyetik akı yoğunluğu olup,  $A_m$  ve  $A_g$  ise mıknatıs ve hava aralığı etkin kesitidir. Hava aralığı ve mıknatısın etkin

kesitlerinin oranı, kaçak akı faktörü,  $q$  olup bu tasarım için 1,537 olarak hesaplanmıştır. Manyetik devrede ferromanyetik 1010 çelik malzemenin relüktansları, mıknatıs ve hava aralığının relüktanslarına göre çok küçük olduğundan ihmal edildiğinde,

$$2H_m l_m + 2H_g l_g = 0 \quad (3.8)$$

ifadesi elde edilir. Eş. 3.8'de  $H_m$  ve  $H_g$  sırasıyla mıknatıs ve hava aralığındaki manyetik alan şiddetini, aynı şekilde  $l_m$  ve  $l_g$  ise mıknatıs ve hava aralığının akı boyunca uzunluğunu göstermektedir [10]. Eş. 3.8'den  $H_g$  değeri çekilirse

$$H_g = -\frac{H_m l_m}{l_g} \quad (3.9)$$

olarak yazılır. Eş. 3.7'den  $B_m$  değeri çekilirse,

$$B_m = \frac{q B_g A_g}{A_m} \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilir.  $B_g$  yerine Eş. 2.1'den boşluğun manyetik geçirgenliği ve manyetik alan şiddeti yerine yazıldığında,

$$B_m = \frac{q \mu_0 H_g A_g}{A_m} \quad (3.11)$$

olarak bulunur. Bununla birlikte Eş. 3.9'daki  $H_g$  değeri, Eş. 3.11'de yerine yazıldığında

$$B_m = -\frac{q \mu_0 A_g l_m}{A_m l_g} H_m \quad (3.12)$$

elde edilir. Eş. 3.12'de bulunan bu denklem Şekil 3.9'daki yük eğrisinin denklemdir. Diğer taraftan Şekil 3.9'daki demanyetizasyon eğrisi,

$$B_m = \frac{B_r}{H_c} H_m + B_r \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir. Eş. 3.12 ve Eş. 3.13’de bulunan denklemler eşitlenip, denklemden  $H_m$  çekilirse

$$H_m = -\frac{B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \frac{qA_g l_m}{A_m l_g}} \quad (3.14)$$

bulunur. Şekil 3.9’deki yük ve demanyetizasyon eğrisinin kesişim noktası çalışma noktası olup  $H_m$  yerine  $H_Q$  yazıldığında,

$$H_Q = -\frac{B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \frac{qA_g l_m}{A_m l_g}} \quad (3.15)$$

ifadesi bulunur. Hava aralığı ve mıknatıs kesitleri yaklaşık eşit olduğu göz önüne alınıp bilinen değerler yerine yazıldığında çalışma noktasında manyetik alan şiddeti

$$H_Q = -218.10^3 \text{ A/m}$$

olarak hesaplanmıştır. Çalışma noktasındaki manyetik akı yoğunluğu için Eş. 3.13’ten  $B_m$  yerine  $B_Q$  yazıldığında

$$B_Q = \frac{B_r}{H_c} H_Q + B_r \quad (3.16)$$

olarak ifade edilir. Bilinen değerler yerine konduğunda

$$B_Q = 0,876T$$

olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, mıknatısın çalışma noktasındaki manyetik akı yoğunluğu değeridir. Aynı şekilde çalışma noktasında hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu ise

$$B_{sQ} = \frac{B_Q}{q} \quad (3.17)$$

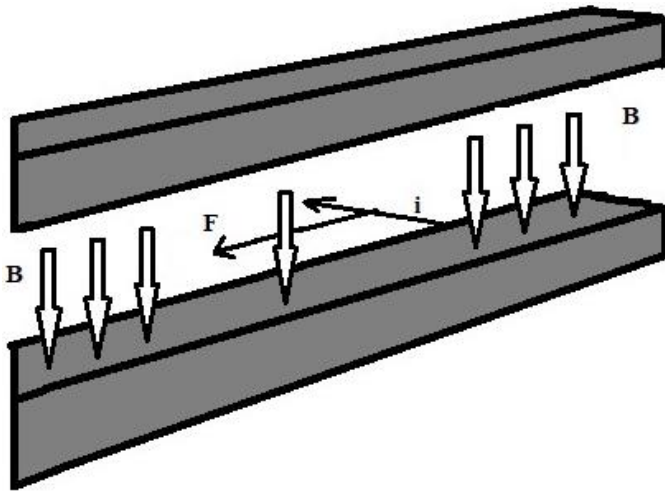
olarak ifade edilir. Kaçak akı faktörü,  $q$  yerine konduğunda, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu  $B_{gQ} = 0,569 T$  olarak bulunur.

### 3.2.3. Çift yanlı DA lineer motorda üretilen kuvvet

Lineer motorlarda, hava aralığında elde edilen manyetik akı yoğunluğu önceki kısımlarda hesaplandığı gibidir. Denklemlerden de görüleceği üzere hava aralığının boyunun az olması mıknatısların hava aralığında oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunu artıracaktır. Bu yüzden motor tasarımlarında hava aralığı olabildiğince küçük tutulmaya çalışılır ve bu sayede üretilen kuvvet artar. Lineer motorlarda kuvvet elde edilmesi için manyetik alan içerisine dik yerleştirilmiş iletken akım geçirilmesi gerekmektedir. Şekil 3.10'da görüleceği üzere, üretilen kuvvetin yönü ve büyüklüğü, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu ve akımın yönü ve büyüklüğüne bağlıdır. Lorentz kanuna göre manyetik alan içerisindeki iletkenlerde üretilen kuvvet,

$$F = nB_{gQ} Li \sin\theta \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $F$  iletkenlerde oluşan kuvveti (N),  $n$  sargıların sarım sayısını,  $B_{gQ}$  hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunu (T),  $L$  mıknatıs altında kalan iletken uzunluğunu (m),  $i$  sargılardan geçen akımı (A) ve  $\theta$  hava aralığındaki manyetik akı ile iletkenler arasındaki açıyı temsil etmektedir.



Şekil 3.10. Manyetik alan içerisindeki iletkende oluşan kuvvet



Manyetik hesapları yukarıda yapılan çift yanlı doğru akım lineer motorda üretilen akı, sargıları dik keserek yolunu tamamlamaktadır. Bu yüzden ilgili açı 90 derece olup sinüs değeri 1'dir. Manyetik alan, mıknatıs ile nüve arasındaki hava aralığında oluşmaktadır. Dolayısıyla mıknatısın genişliği kadar olan bölgede sargılar etkilenmektedir. Sarım sayısı 1000 olan sargıların hava aralığında kalan 50 mm'lik kısmı kuvvet üretimine katkı sağlar. Buradan hareketle, 0,569 T değerinde manyetik akı yoğunluğunda, bobin üzerinde oluşan kuvvet Eş. 3.18 yardımıyla,

$$F = 28,45i \quad N$$

olarak bulunur. Çift yanlı doğru akım motorunda nüve üzerine sarılı iletkenin mıknatıs altında kalan her iki kısmı kuvvet üretimine etkisi olacağı düşünülürse, üretilen kuvvet,

$F = 56,9i \text{ N}$  dur. Yine aynı şekilde motorun hareket halindeyken iki bobinin de enerjili olduğu durum göz önüne alındığında bobinlerin ürettiği toplam kuvvet iki katına çıkmaktadır. Bu durumda üretilen kuvvet

$$F = 113,8i \quad N$$

sonucu elde edilir. Lineer motorlarda üretilen kuvvet için kuvvet katsayısı  $K$  literatürde yer almaktadır. Statik kuvvet/akım oranı da olarak bilinen  $K$  lineer motorların ayırt edici parametrelerindedir [2]. Bu durumda kuvvet

$$F = K i \quad (3.19)$$

şeklinde verilebilir. Eş. 3.19 aracılığıyla söz konusu motorda kuvvet/akım oranı

$$K = 113,8 \quad N/A$$

olarak bulunur. Başka bir ifadeyle motora uygulanan her 1 Amperlik akıma karşılık, hareketli üniteye 113,8 N kuvvet üretildiği görülmüştür. Gerçekte kuvvet sarımlarda oluşmaktadır. Ancak sarımlar sabit olduğundan oluşan kuvvet hareketli kısımda reaksiyon kuvveti şeklinde etkili olacaktır.



#### 4. ÇEMBERSEL DA MOTOR

Lineer motorların en temel tanımla döner motorların kesilerek açılmış hali olduğu daha önceki kısımlarda anlatılmaktadır. Lineer motorlar basit yapısıyla ilave ekipmanlara gereksinim duymadan lineer hareketi yüksek hassasiyetle gerçekleştirirler. Lineer motorlarda hareketli kısımda oluşan itme için kuvvet hesaplanırken, döner motorlarda rotara bağlı dönme hareketi yapan şaft adı verilen milin momenti hesaplanır. Dolayısıyla lineer motorlarda ayırt edici unsur olan kuvvet/akım oranı olan  $K$ , döner motorlarda yerini moment /akım oranı  $K_t$ 'ye bırakır.

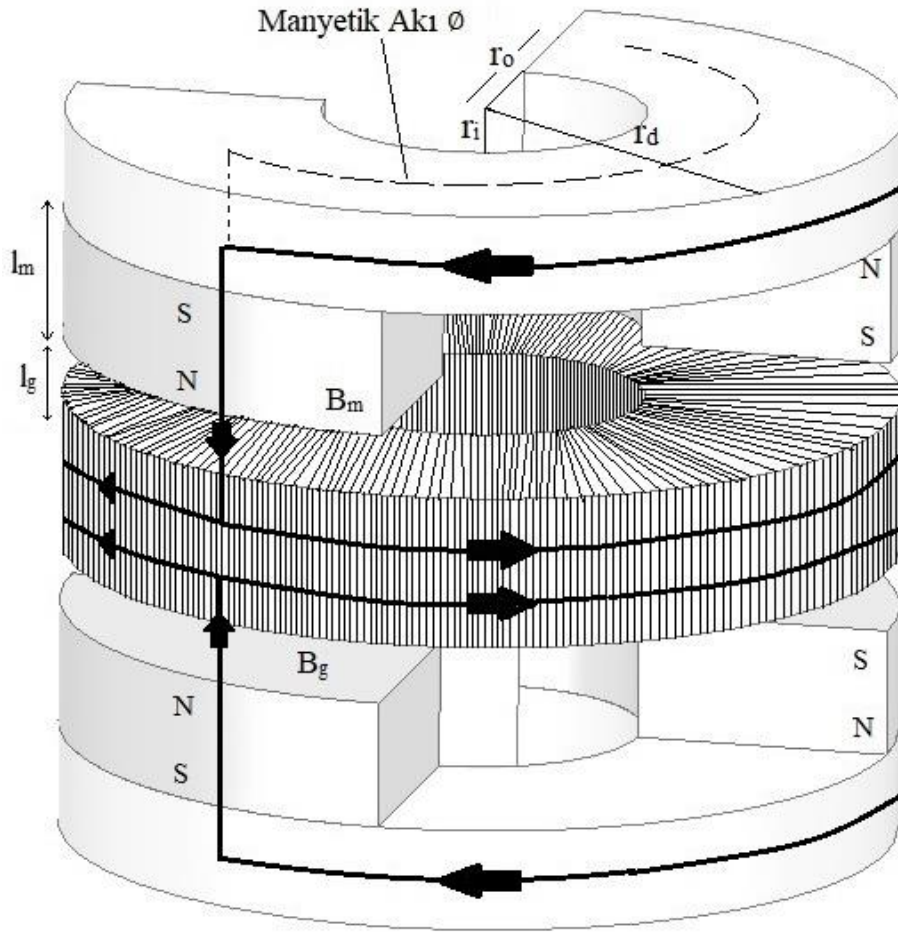
AA veya DA beslemeye sahip döner motorların çalışma prensipleri en basit anlamda, önce stator sargılarına uygulanan gerilim ile döner bir manyetik alan oluşturma, sonra asenkron motorlar için, sabit stator sargılarıyla oluşan döner alanın rotorda endüksiyon akımları meydana getirerek ikinci bir manyetik alan oluşturmaya, daha sonra bu iki alanın etkileşimi ile rotorun döner alanı takip ederek dönmesi prensibidir. Rotorun devir sayısı, döner alanın devir sayısından küçük olduğu için kayma olarak da ifade edilir ve bu yüzden asenkrondur. Rotora dışardan uygulanacak DA gerilimle kaymanın ortadan kaldırılması durumunda senkron motor halini alır. Diğer taraftan benzer prensiple çalışan, daha çok elektrikli araçlarda tercih edilen motor, sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorudur. En çok tercih edilen üç fazlı türleri doğrudan şebekeden beslenemeyip bir sürücü düzeneğine ihtiyaç duyarlar. Sabit stator faz sargılarının denetleyici üzerinden belirli bir sırayla tetiklenmesiyle elektromanyetik alan oluşur. Mıknatıslar rotoru oluşturup, rotor akısı meydana getirir. Uygun sırayla enerjilendirilmiş stator sargılarının oluşturduğu döner alan rotor tarafından izlenir ve dönme hareketi gerçekleşir. Elektrik motorları arasında en yüksek moment yoğunluğuna sahip olan bu motorlarda fırça olmaması, dolayısıyla arıza olasılığını azaltması, verimlerinin yüksek olması, yüksek hızlarda güvenli çalışma ortamı oluşturması üstün yanlarıdır. Bu yüzden elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları, üretilen akı yolu itibarıyla ikiye ayrılır: Bunlar radyal akılı motorlar ve aksel akılı motorlardır. Radyal akılı motorlar günümüzde en çok tercih edilen motor yapısıdır. Radyal tasarımda mıknatıs kutupları rotorun dış kutbunda radyal olacak şekilde uzanır. Mıknatısların ürettiği manyetik akı stator sargıları ile etkileşim halinde olup, stator ve rotor arasındaki hava boşluğundan geçerek stator

üzerindeki metal dışten geçer. Statorun oluşturduğu malzemeden akan akı, stator üzerindeki ikinci diş üzerinden rotodaki ikinci mıknatısa geri döner. Diğer taraftan aksenal akılı motorlarda, mıknatıslar rotorun üzerine yerleştirilir. Manyetik kuvvetlerin dengelenmesi için statorun her iki tarafına mıknatıs yerleştirilmiş rotor konur. Geniş çapta, kısa uzunluğa sahip motorda mıknatısların ürettiği akı hava boşluğundan aksenal olarak statora gelip daha sonra diğer mıknatısa ulaşır. Tasarım olarak radyal akılı motorlara kıyasla aksenal akılı motorların hava aralığının değiştirilebilir olması ve daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olması üstün yönleridir. Bunun yanı sıra, yüksek güç yoğunluğuna sahip mıknatısların daha kolay ulaşabilirliği ve tasarım zorluğuna karşın teknolojiye gelişmeler, aksenal akılı motorlara yönelimi artırmıştır. Ayrıca pankek şeklinde tasarım bir başka deyişle uzun çap kısa kalınlık, teker içi kullanıma olanak sağlamış, bu yüzden elektrikli araçlarda kullanılmasına yönelik araştırma gereksinimi duyulmuştur.

Elektrikli araçlarda merkezi bir motordan tekerlere güç aktarımı ile hub motor olarak her tekerde ayrı motor konfigürasyonu arasında performans farklılığı bulunmaktadır. Dışli kutusu, tahrik milleri ve aktarma elamanları gibi elemanları gereksiz kılacak teker içi motor tasarımında, her tekerlek ayrı ayrı kontrol edilir ve teker başına üretilen tork arttığı takdirde toplamda yüksek tork kolaylıkla elde edilebilir [39,40]. Ancak, araçların kendi ağırlığı kadar teker ağırlıkları da sürüş esnasında önemli bir unsurdur. Bu yüzden teker içine yerleştirilmiş motorda performans açısından ağırlığın düşük olması gerekmektedir. Sonuç olarak, geleneksel radyal akılı fırçasız doğru akım motorları yerine daha hafif ancak daha yüksek güç yoğunluğuna sahip aksenal akılı motorlar alternatif hale gelir.

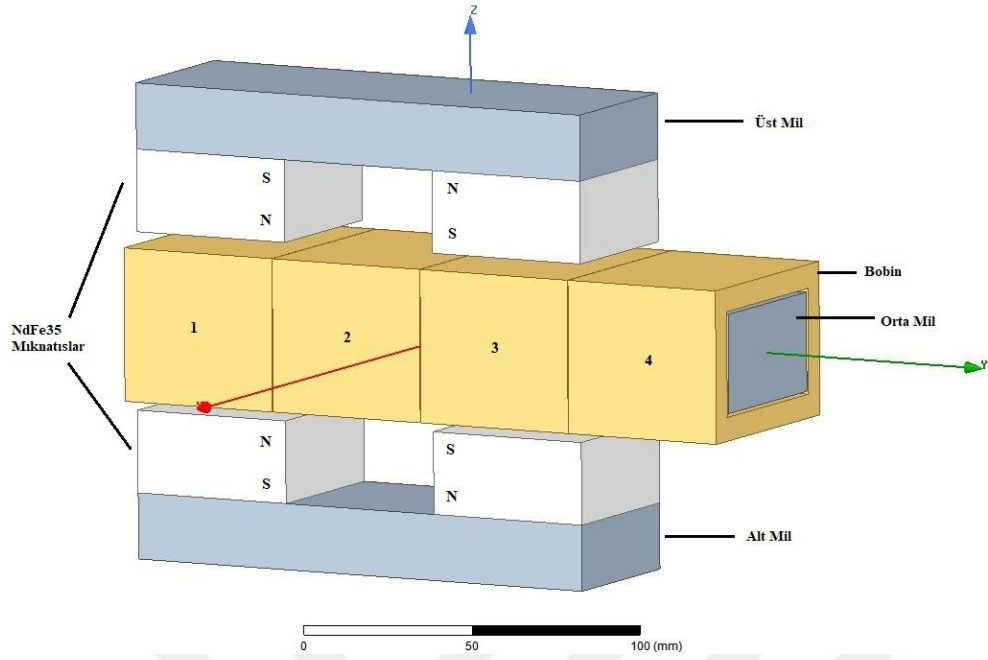
Yukarıda bahsedilen açıklamalardan ötürü aksenal akı üretecek şekilde tasarımı yapılan doğru akım motorları teker motor olarak en uygun olanıdır. Literatürde lineer motorların radyal akılı döner motorların kesilerek açılmış hali olarak çalışmalar mevcuttur. Buradan hareketle lineer motorların uçlarından aksenal akı üretecek şekilde birleşmesi sonucu döner motor tasarımı elde edileceği açıktır. Manyetik hesapları yukarıda yapılan lineer motor çember şeklinde uçlarının birleştirilmesi ile çembersel motor elde edilir. Şekil 4.1'de çembersel motorda akı, geleneksel aksenal akılı motorlarda olduğu gibi üretilmekte ancak rotor disk şeklinde olmayıp lineer motordaki hareketli millerin nüve boyunca kıvrılması şeklinde tasarlanmıştır.



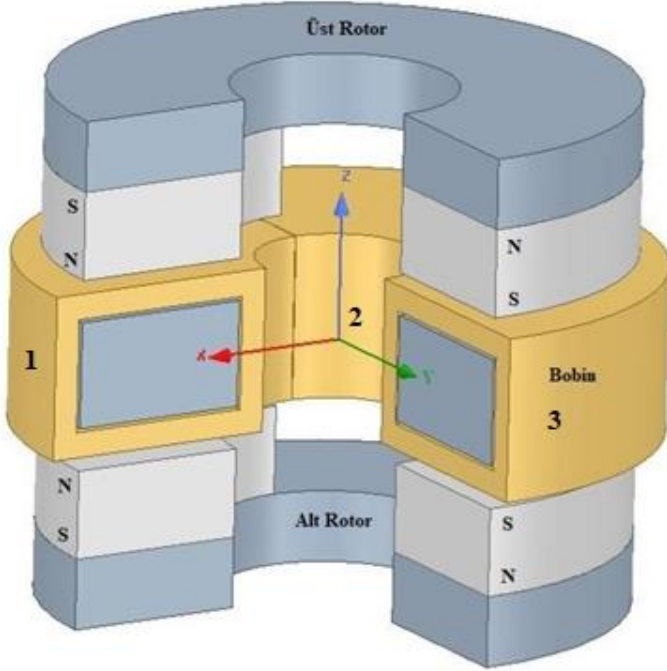
Şekil 4.1. Çembersel DA motorun manyetik devresi

#### 4.1. Çembersel DA Motor Tasarımı Süreci

Manyetik hesapları yapılan çift yanlı lineer DA motorun ANSYS-Maxwell programında 3 boyutlu modeli Şekil 4.2(a)'daki gibidir. Orta mil üzerine sarılan 1,2 ve 3 numaralı sargıların uçlarından Şekil 4.2(b)'deki gibi çevrilmesi ile tasarım yay halini alır. Böylece lineer motordaki temel çalışma mantığı çember haline getirilen motora uyarlanabilir. Ancak hareketli millerde dönme hareketinin devamlılığı için, 1 ve 3 numaralı sargıların arasına 4 numaralı sargı ve orta mil yerleştirilmelidir. Bu sayede, lineer motorlardaki hareket alanının sınırlılığı, çembersel motorun döner hareketiyle ortadan kaldırılmış olur. Şekil 4.3'te elde edilen çembersel tasarım verilmiştir.



a)

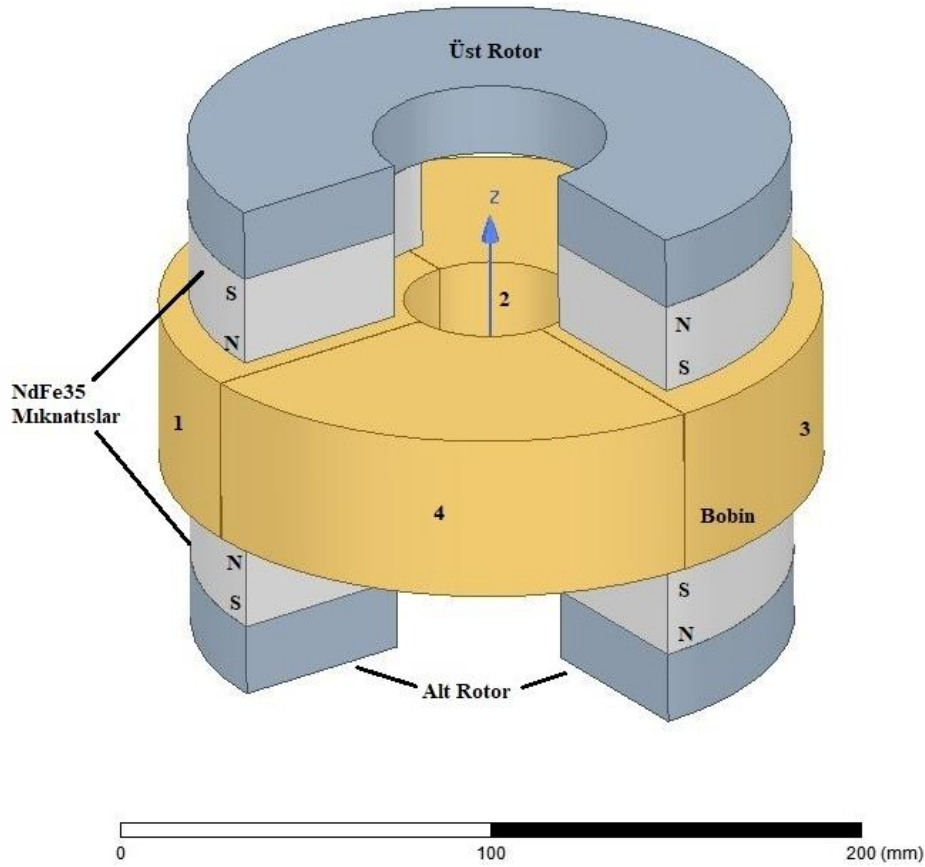


b)

Şekil 4.2. Çembersel DA motor tasarım süreci a) Çift yanlı DA lineer motor ANSYS-Maxwell 3D modeli b) Yay yörüngeli çift yanlı DA motor ANSYS-Maxwell 3D modeli

Oluşturulan çembersel motorda, tasarımın boyutları Çizelge 4.1 ve 4.2’de gösterildiği gibidir. Yüksek güç yoğunluklu Neodyum mıknatıslar ile nüve ve hareketli milleri

oluşturan 1010 çelik malzemenin ve hava aralığının aksenal uzunlukları lineer motorlar ile birebir aynı kalmıştır. Ayrıca, çift yanlı lineer motorun hareketsiz kısmı olan nüve, 4 bobin genişliğinde toplam 200 mm boyunda olacak şekilde çember haline getirilmiştir. İç yarıçap bu durumda yaklaşık 32 mm olarak hesaplanmış, kuvvet üretiminde etkili olan sargıların radyal uzunluğu değişmeyecek şekilde düşünülerek dış yarıçap 82 mm olarak belirlenmiştir. Çift yanlı DA lineer motorda hareketli üst ve alt miller, çembersel motorda üst ve alt rotor olarak adlandırılmış, sabit orta mil veya nüve ise stator adını almıştır. Lineer motorda olduğu gibi, stator üzerine sarılı iletken ile motor ağırlığı sabit kısımda kalmış, mıknatısların bağlı olduğu döner kısım veya rotorun hafif olması amaçlanmıştır.



Şekil 4.3. Çembersel DA motor ANSYS-Maxwell 3D modeli

Çizelge 4.1. Çift yanlı lineer DA motor boyutları

ÇYDAL Motor Boyutları	
Hava aralığı, $l_g$	12 mm
Sargı yüksekliği	46,4 mm
Üst mıknatıslar	50x50x25 (mm)
Alt mıknatıslar	50x50x25 (mm)
Üst mil	50x150x20 (mm)
Alt mil	50x150x20 (mm)
Orta mil (nüve)	50x50x30 (mm)

Çizelge 4.2. Çembersel DA motor boyutları

Çembersel DA Motor Boyutları	
İç yarıçap: $r_i$	31,83 mm
Dış yarıçap: $r_d$	81,83 mm
Hava aralığı (z ekseni): $l_g$	12 mm
Sargı (z ekseni)	46,4 mm
Üst mıknatıslar (z ekseni)	25 mm
Alt mıknatıslar (z ekseni)	25 mm
Üst rotor (z ekseni)	20 mm
Alt rotor (z ekseni)	20 mm
Stator (z ekseni)	30 mm

Referans alınan Şekil 3.2'deki lineer motorun çalışma prensibi fırçalı veya fırçasız olarak yapılabildiği yukarıda bahsedilmiştir. Fırçalı tasarımda motorda hareketin sağlanması için mıknatıslara bağlı fırçalar vasıtasıyla mıknatıs altına gelen bobinlere pozitif ve negatif yönde akım akacak şekilde enerji verilmesi gerekmektedir. Mıknatıs altında kalmayan bobinler gereksiz aktifleştirilmeden motor verimi sağlanır. Ayrıca, bobinlere aynı yönde verilmesi durumunda frenleme sağlanmaktadır. Çembersel motorda benzer düşünce ile hareket edip motorda dönme hareketi incelenecektir. Diğer taraftan, fırçalı tasarımda aşınma ve bakım problemleri motorun performansını olumsuz etkileyen önemli bir etkendir. Bu yüzden fırça yerine bobinlerin, rotorun dönme yönüne uygun olarak



tetikleneceği sürücü sistemi geliştirilmesi gereklidir.

#### 4.2. Çembersel DA Motorun Manyetik Analizi ve Üretilen Moment

Çember haline getirilen çift yanlı DA lineer motorda neodyum mıknatısların ürettiği manyetik akı Şekil 4.1'den de görüleceği üzere hava aralığı üzerinden bobin altında kalan statorda ikiye ayrılır. Manyetik akının yarısı statorun rotor altında kalan kısmından, diğer yarısı ise üzerinde rotor olmayan kısmından diğer mıknatısa ulaşır. Statoru oluşturan 1010 çelik malzemeden geçen akı diğer mıknatısa ikiye ayrılmış şekilde ulaştığından malzemenin doyuma gitmesi bir ölçüde önlenmektedir. Diğer mıknatısta bir araya gelen manyetik akı, daha sonra rotor üzerinden devresini tamamlar. Ancak, çembersel motorda manyetik akı, yolunun büyük bir kısmını mıknatıs ve rotor üzerinden tamamlarken, önemli bir kısmı da devresini rotor yerine hava aralığı üzerinden tamamlayabilir. İstenmeyen bu durum için motorda mıknatısların ürettiği manyetik akının rotora yönlendirilmesi, bahsi geçen hava aralığındaki akı atlamalarına çözüm olarak manyetik izolasyon veya tasarım değişikliği sağlanmalıdır. İlerleyen bölümlerde söz konusu akının momente etkisi tartışılacaktır.

Motorda üretilen momentin hesaplanması için lineer motorda olduğu gibi hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun değeri ve sargılarda radyal uzunluk boyunca elde edilen kuvvet ve yarıçap oranında kuvvetin oluşturduğu moment hesaplanabilir. Çembersel motorda manyetik akının yolunu lineer motorda olduğu gibi tamamladığı düşünülürse hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun bilinmesi için Eş. 3.15 yardımıyla

$$H_Q = -\frac{B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \frac{qA_g I_m}{A_m l_g}}$$

çalışma noktasındaki manyetik alan şiddeti hesaplanabilir. Ancak, denklemde, lineer motordaki tasarımdan farklı olarak değişen mıknatıs ve hava aralığı kesitidir. Bu yüzden, hem hava aralığında hem de mıknatısta değişen kesit boyları kaçak akı faktörü  $q$ 'yu etkilemektedir. Lineer motorda kaçak akı faktörü hesabı için uygulanan matematiksel yaklaşımlar burada kesitler ve tasarım değiştiği için tam anlamıyla uygulanamayacaktır. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu için gerçeğe yakın değerler, sonlu eleman

yöntemi kullanan ANSYS-Maxwell programında ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Çembersel motorda yukarıda bahsedilen noktalar göz ardı edildiğinde, bir başka deyişle hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun değişmediği varsayıldığında, sargıların radyal boyu aynı olduğundan üretilen kuvvet/akım oranı 113,8 N/A olacaktır. Ancak hareket dairesel olduğundan çembersel motorda üretilen kuvvet, rotorda oluşan momente dönüşmüştür. Motorda üretilen kuvvet, dönme eksenine dik olarak yerleştirilmiş olan iletkenlerde olduğundan, moment hesabında Şekil 4.1'den en küçük yarıçap  $r_i$  ile en büyük yarıçap  $r_d$  nin ortalaması:

$$r_0 = \frac{r_i + r_d}{2} = 57 \text{ mm}$$

bulunmuştur. Böylece stator sargılarında üretilen, rotorda ve bağlı mıknatıslarda reaksiyon şeklinde oluşan moment Eş. 3.19 yardımıyla

$$M = F r_0 = K i r_0 = K_t i \quad (4.1)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Eş. 3.19'daki bilgiler ve ortalama yarıçap Eş. 4.1'de yerine konulduğunda, moment/akım oranı

$$K_t = 6,486 \text{ Nm / A}$$

olarak bulunur. Burada moment, stator üzerinde sarılı iletkenlerden mıknatıs altında kalanlara birbirilerine zıt yönde 1A verildiğinde üretilir. Sargılara aynı yönde enerji verildiğinde lineer motorda olduğu gibi frenleme sağlanır.

Çembersel motorda moment/akım oranı artırmak için tasarımda birtakım değişiklikler yapılması gerekmektedir. Tasarımda ortalama yarıçapın büyük olması ve üretilen kuvvetin artması için iletkenin mıknatıs altında kalan aktif radyal uzunluğunun artması, moment üretimine doğrudan katkı sağlar. Bunun yanı sıra hava aralığının küçülmesi hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu artıracığından, kuvvetin artmasına dolayısıyla momentin artmasına neden olur. Ayrıca söz konusu tasarımda stator üzerine sarılı iletkenler hava aralığının küçülmesine engel olmaktadır. Bunun yerine 1010 çelik

malzemeyi doyuma götürmeden sargılar için oluklu lamine tasarımı, hava aralığını düşürülmesine neden olur ve kuvveti artırır. Tasarım yapılacak yerin koşullarına göre en uygun boyutlarda tasarlanan motorda kayıpların azalması için stator ve rotorda kullanılan 1010 çelik yerine farklı malzeme denenebilir. Tüm bu amaçlara yönelik prototipi var olan lineer motorun ve çembersel hale gelen yeni motorun ve optimizasyon sonucu elde edilen yeni motor topolojisinin yazılım programı ile analizi irdelenecektir.





## 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR

Önceki bölümde analitik yöntemlerle manyetik akı yoğunluğu ve kuvvet analizi yapılan çift yanlı lineer DA motorun prototipi [2] numaralı kaynakta verilmiş ve analitik hesaplar ile deneysel sonuçların yaklaşık tutarlılığı görülmüştür. Ancak, motorun tasarımında yapılacak her bir iyileştirmenin analitik sonuçlarını prototipi oluşturularak test etmek zahmetli ve maliyetli bir süreçtir. Özellikle 2 boyutlu manyetik sistemlerden analitik olarak edinilen sonuçlar, gerçek değerlerden çok uzaktır. Bunun yanı sıra, analitik hesabı 3 boyut düşünülerek yapıldığında dahi doğrusal olmayan malzemelerin doyuma gelip gelmemesi, motorda oluşan kaçak akı ve saçaklamalar, analitik sonuçları gerçek değerden uzaklaştıran durumlardır. Ayrıca, farklı geometri ile oluşturulmuş tasarımların analitik olarak hesabı zor ve zaman alıcıdır.

Tüm bu nedenlerden dolayı, manyetik sistemlerin tasarımında ve manyetik analizinde bilgisayar yazılımlarından faydalanmak çok önemlidir. Bunların arasında en yaygın olarak tercih edilen ANSYS firmasının Maxwell 3D yazılımıdır. Sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlene yapan program, tasarımı yapılan sistemi öncelikle dörtyüzlü elemanlara böler ve sonlu elemanlar ağı oluşturur. Elemanlara bölme işlemi veya mesh (ağ) üretme işlemi analizin doğruluğu açısından önemlidir. Ağ içerisinde kullanılan elemanların sayısının fazla olması ve şekillerinin uygun olması arzu edilir. Maxwell'de tasarımı yapılan sistemde oluşturulan ağların orta noktalarındaki manyetik alan şiddeti, lineer olmayan malzeme için Newton-Raphson yöntemi ile hesaplanır. Malzemenin  $B-H$  eğrisi kullanılarak  $H$ 'nin doğrusal olmayan çözümü için, yaklaşık sonuçlar bulunur ve hata analiz edilir. En hatalı dörtyüzlü elemanları küçülterek çözüm sürer. Analiz sonrasında; manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, akım yoğunluğu, kuvvetler ve moment, boyut ve yön olarak elde edilir [41].

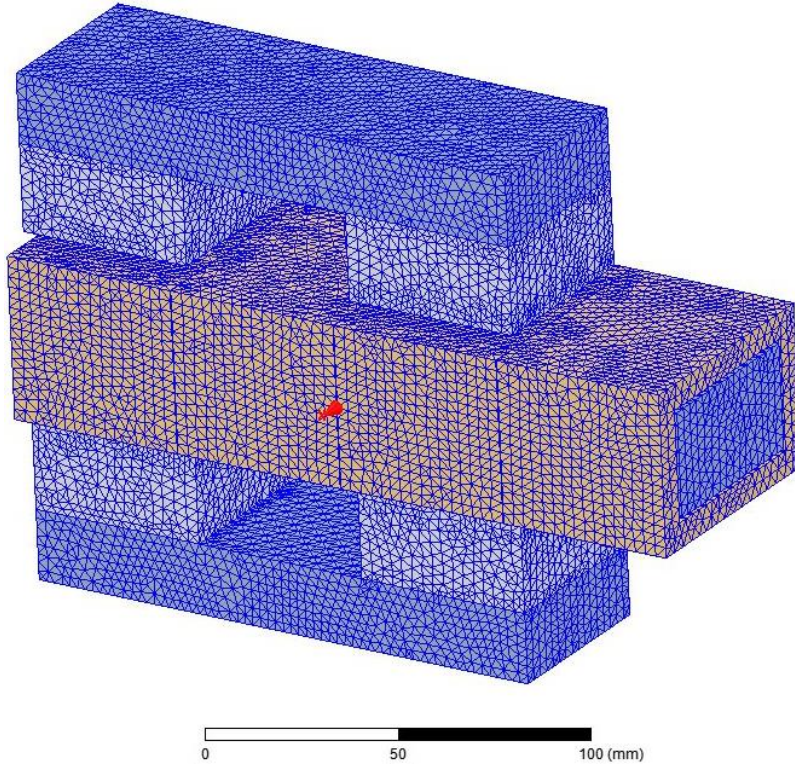
### 5.1. Çift Yanlı Lineer DA Motorun Nümerik Analizi

Analitik olarak manyetik hesapları yapılmış çift yanlı DA lineer motor, ANSYS-Maxwell programında 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Motoru oluşturan 1010 çelik, mıknatıs ve sargıların boyutları, yukarıda referans alınan Şekil 3.2'deki motorla birebir aynıdır. Ancak

Şekil 4.2 (a)'dan da görüleceği üzere orta mil üzerinde yalnızca 4 bobin olan kısmı modellenmiştir.

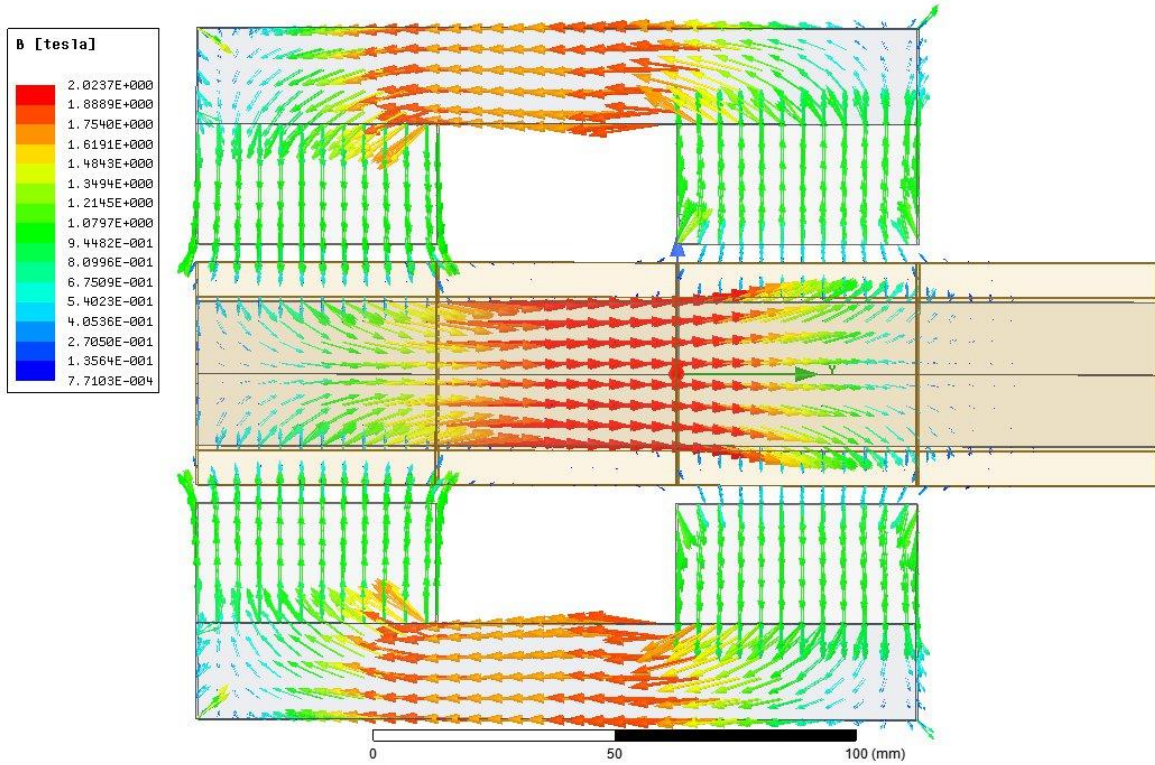
Boyut olarak birebir ölçüler ile 3 boyutlu tasarlanan motorda ANSYS-Maxwell kütüphanesinde mıknatıslar için NdFe35, üst, alt ve orta mil için Steel 1010 ve sargılar için de bakır seçilmiştir. Neodyum mıknatısın manyetik geçirgenlik ve mıknatıslanma değerleri Çizelge 2.2'deki gibi oluşturulmuştur. Üst, alt ve orta mil için ise  $B-H$  eğrisi Şekil 2.2'de verilen Steel 1010 atanmıştır.

Motorun Maxwell 3D'de tasarımı ve malzeme seçimleri tamamlandıktan sonra, mıknatıs altında kalan bobinlere birbirine zıt yönde enerji verilmiştir. Uyartım değeri manyeto motor kuvvet olarak alınmıştır. Bir başka deyişle 1000 tur sarım sayısı olan sargılardan 1A akım geçtiği takdirde 1000 Amper-tur olarak belirlenmiştir. Manyetik analize başlamadan önce mesh için yeterli eleman sayısı girilip daha sonra manyetik analiz başlatılmıştır. Analiz sonrasında çift yanlı DA lineer motorun 3 boyutlu ağ yapısı Şekil 5.1'de verilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi sonlu elamanlar ağında yeterli eleman olması ve elamanların uygun şekli manyetik analiz sonucunu etkileyen önemli bir bileşendir.



Şekil 5.1. Çift yanlı DA lineer motor: ANSYS-Maxwell ağ yapısı

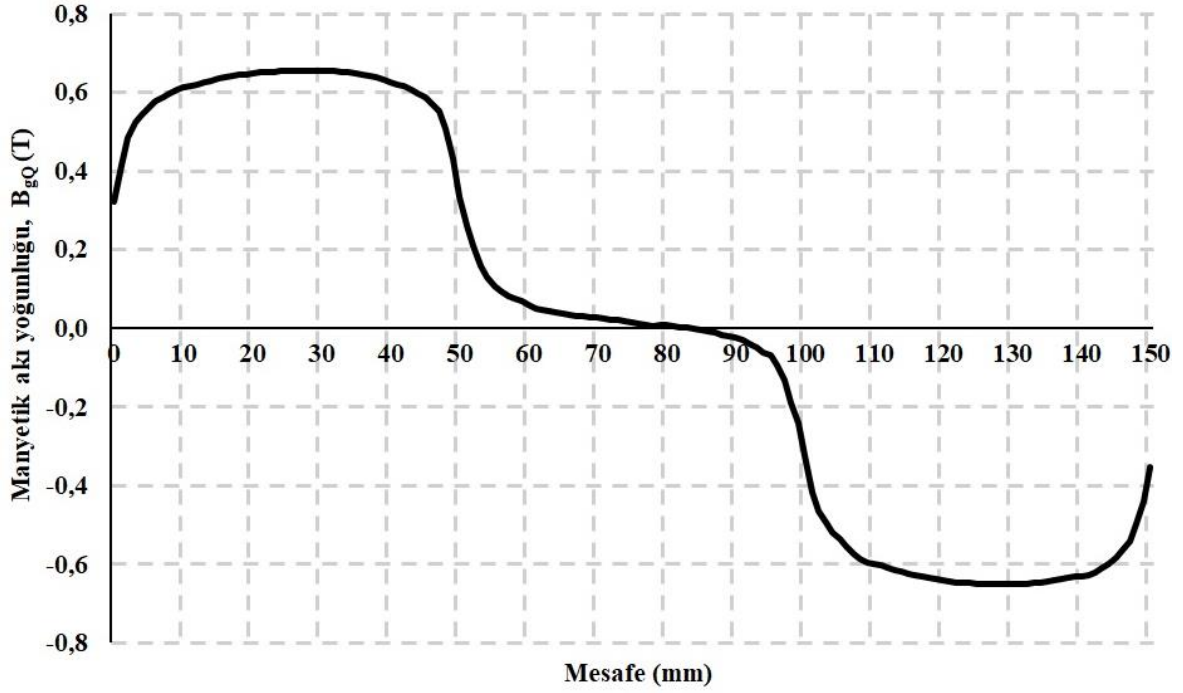
Manyetik analiz sonucunda mıknatısların ürettiği akının vektörel gösterimi Şekil 5.2’de verilmiştir. Analitik hesaplarda dikkate alınan Şekil 3.7’deki manyetik eşdeğer devre aynı şekilde ortaya çıkmıştır. Şekilden de görüleceği üzere mıknatısların ürettiği manyetik akı hava aralığı üzerinden orta mile ve daha sonra tekrar hava aralığı üzerinden diğer mıknatısa geçmektedir. Çift yanlı motor olması sebebiyle birbirine simetrik ve orta mil üzerinde birbirini destekler yönde iki ayrı akı vektörü oluşmuştur.



Şekil 5.2. Çift yanlı DA lineer motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel)

Hava aralığından geçen manyetik akı vektörü dikkatle incelendiğinde, teorik olarak beklenen akı sapmaları gerçekleşmiştir. Hava aralığının kesit alanı, saçak etkisi ile genişleyerek mıknatıstan geçen akının bir kısmını taşımıştır.

Kuvveti oluşturan etkenlerden hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu vektörü 3 boyutlu bir vektördür. Kuvvet üretimine yalnızca bobinleri dik kesen akı katkı sağlar. Tasarımda bu akı koordinat sisteminde  $\pm Z$  yönüdür. Söz konusu bu bileşen, alt mile bağlı mıknatıs ile orta mil arasında kalan boşluktaki hava aralığında Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



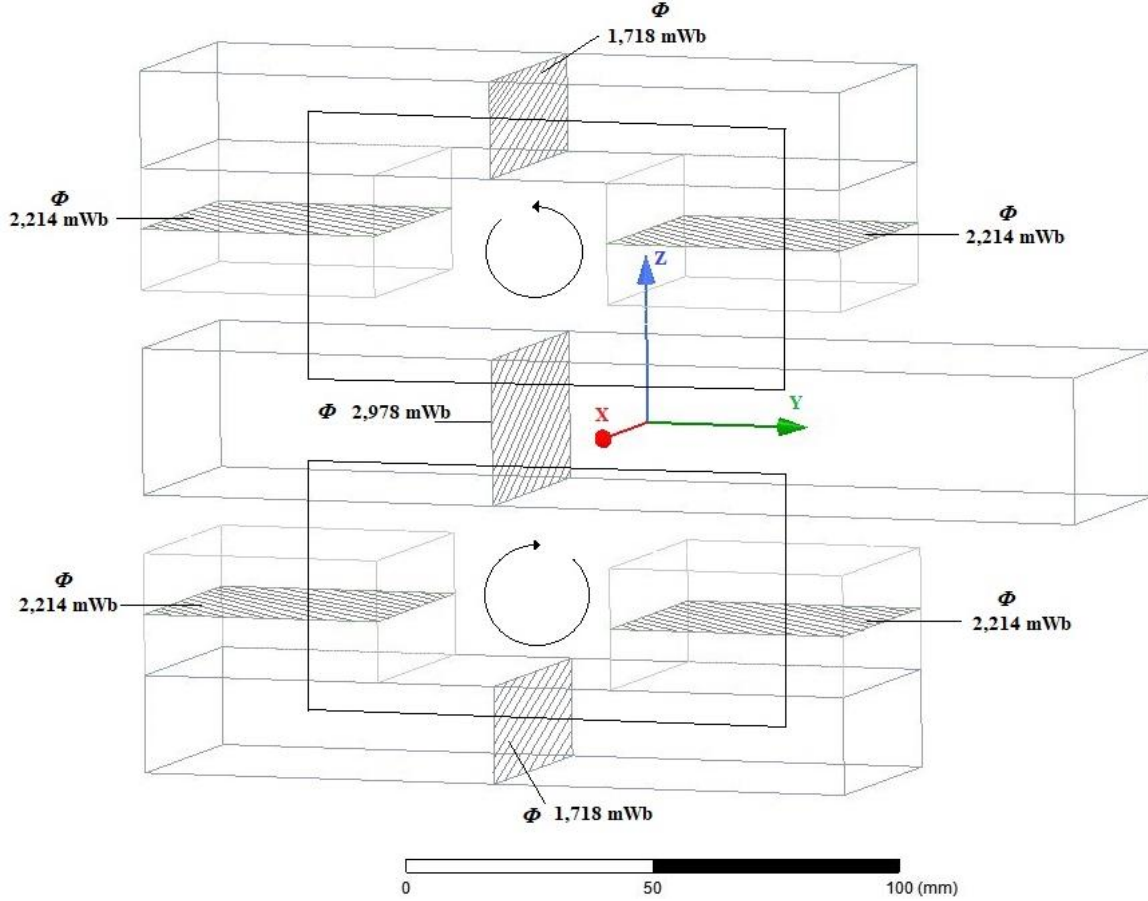
Şekil 5.3. Çift yanlı DA lineer motor: hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi

150 mm genişliğe sahip alt mil boyunca uzanan bir çizgi üzerinde manyetik akı yoğunluğu değeri Şekil 5.3'ten de görüleceği üzere mıknatısların altında birbirine zıt yöndedir. Mıknatısların genişliği kadar mesafede hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu yaklaşık sabit kalmıştır. Diğer taraftan manyetik akı yoğunluğu mıknatısın 50 mm genişliğinin bittiği noktada hemen sıfır olmamaktadır. Kaçak akı olarak da tanımlanan bu akılar, hareket esnasında enerjilendirilecek diğer bobinlere katkı sağlayacağından, kuvvet üretiminde faydalı akıya dönüşmektedir.

ANSYS-Maxwell programında alan hesaplayıcı yardımıyla motoru oluşturan elamanların her birinin ayrı ayrı üzerinden geçen akı, akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve akım yoğunluğunun genlik ve vektörel olarak değeri bulunabilir. Hava aralığında analitik olarak Eş. 3.17 kullanılarak bulunan 0,569 T değerindeki manyetik akı yoğunluğu, alan hesaplayıcıda ortalama 0,606 T olarak bulunmuştur. Aynı şekilde Eş. 3.16'dan mıknatısın çalışma noktasındaki manyetik akı yoğunluğu 0,876 T değeri bulunmuş olup, alan hesaplayıcıda 0,863 T olarak bulunmuştur. Bunun yanı sıra çift yanlı lineer motorun manyetik eşdeğer devresi oluşturularak yapılan çözümlerde 1010 çelik malzemenin relüktansları çok küçük olduğundan ihmal edilmiş, mıknatıs üzerinden geçen akı Eş. 3.5 yardımıyla 2,191 mWb bulunmuştur. Maxwell alan hesaplayıcıda, lineer olmayan 1010



çelik malzeme göz önüne alınarak yapılan çözümlemede manyetik akı değerleri Şekil 5.4'te verilmiştir.

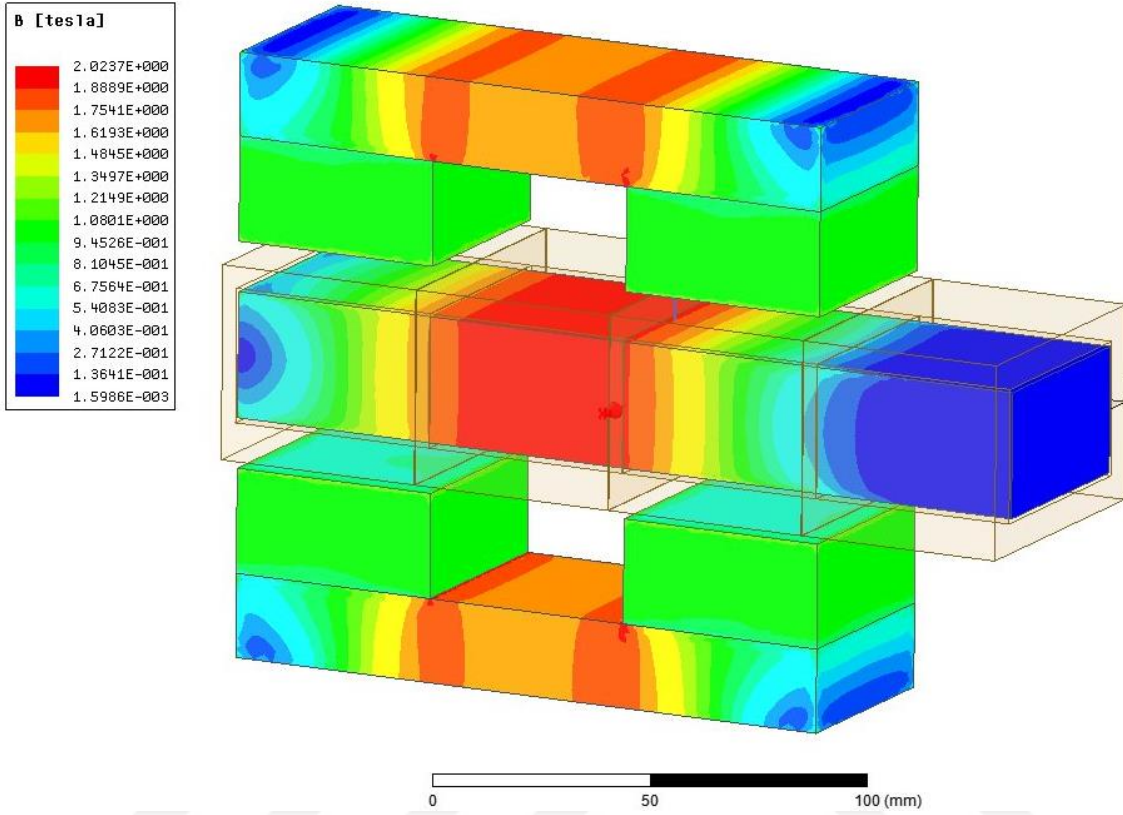


Şekil 5.4. Çift yanlı DA lineer motor: manyetik akı dağılımı

Şekil 5.4'ten de görüleceği üzere mıknatıs ortasında belirtilen kesitte manyetik akı değeri, alan hesaplayıcıda 2,214 mWb olarak bulunmuştur. Bu değer analitik olarak Eş. 3.5 denklemiyle bulunan 2,191 mWb değerindeki manyetik akıyı doğrulamaktadır. Lineer olmayan 1010 çelik malzemedeki manyetik akı dağılımı malzeme üzerinde değişkendir. Burada yalnızca orta noktasındaki kesitteki manyetik akı hesaplanmıştır. Şekil 5.3'ten görüleceği üzere orta milin orta noktasında manyetik akı değeri maksimum 2,978 mWb olarak bulunmuştur. Şayet kaçak akı olmasaydı mıknatıslar üzerinden geçen 2,214 mWb değerindeki akı, orta mil üzerinde üst üste gelip, orta mildeki manyetik akı değeri toplam en fazla 4,428 mWb olarak bulunacaktı.

Kuvvet analizinden önce dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, motoru oluşturan doğrusal olmayan malzemelerin manyetik akı dağılımları ve doyumda olup olmadıklarıdır.

Şekil 5.5’de manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.

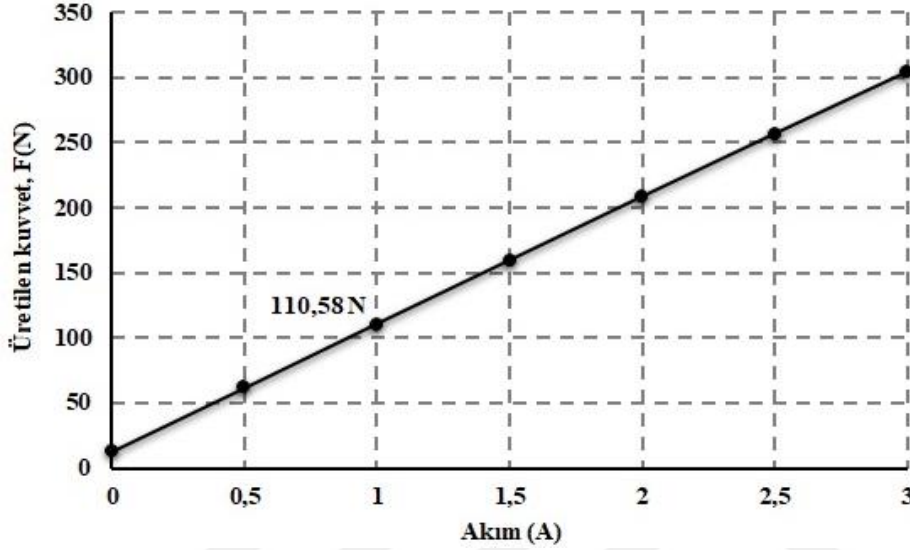


Şekil 5.5. Çift yanlı DA lineer motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı(skaler)

Şekil 5.5’ten de görüldüğü gibi, orta mil üzerinde enerjili bobinler arasında kalan kısımda manyetik akı yoğunluğu değeri, topolojinin diğer kısımlarından fazladır. Bunun sebebi, simetrik iki manyetik devrenin manyetik akılarının orta mil üzerinde üst üste gelmesidir. Orta milin 1010 çelik malzemesinin  $B-H$  eğrisi incelendiğinde  $2T$  üzerinde malzemenin doyumda olacağı bilinmektedir. Burada manyetik akı yoğunluğu maksimum  $2,02 T$  civarına ulaşmakta ve sınırlar dâhilinde kalmaktadır. Diğer taraftan mıknatısları taşıyan üst ve alt milde manyetik akı yoğunluğu değeri bir miktar fazladır. Üst ve alt milde oluşan bu fazlalık orta mildeki durumdan farklı olarak kesit ile ilgilidir. Orta mile göre kesitinin küçük olması malzemenin manyetik akı yoğunluğu değerini artırmıştır. Fakat limitlerin altında olması doyumda olmadığını gösterir.

Son olarak, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunda enerjili bobinler kuvvet oluşmasına yol açar. Motorda üretilen kuvvetin akım ile değişimi, Şekil 5.6’da verilmiştir. Motorda üretilen kuvvetin kontrol edilebileceği parametre akımdır. Burada Şekil 5.6’dan

da görüleceği üzere, akımın artması hareketli kısımda üretilen kuvveti artırmıştır. Ayrıca analitik olarak daha önce Eş. 3.19'da 1 A akıma karşılık 113,8 N olarak bulunan kuvvet değeri analiz sonucunda 110,58 N olarak ortaya çıkmıştır. Her iki durumda elde edilen sonuçların birbirini desteklemesi, analitik yöntemler ile yapılan hesaplamaların oldukça geçerli olduğunu göstermektedir.



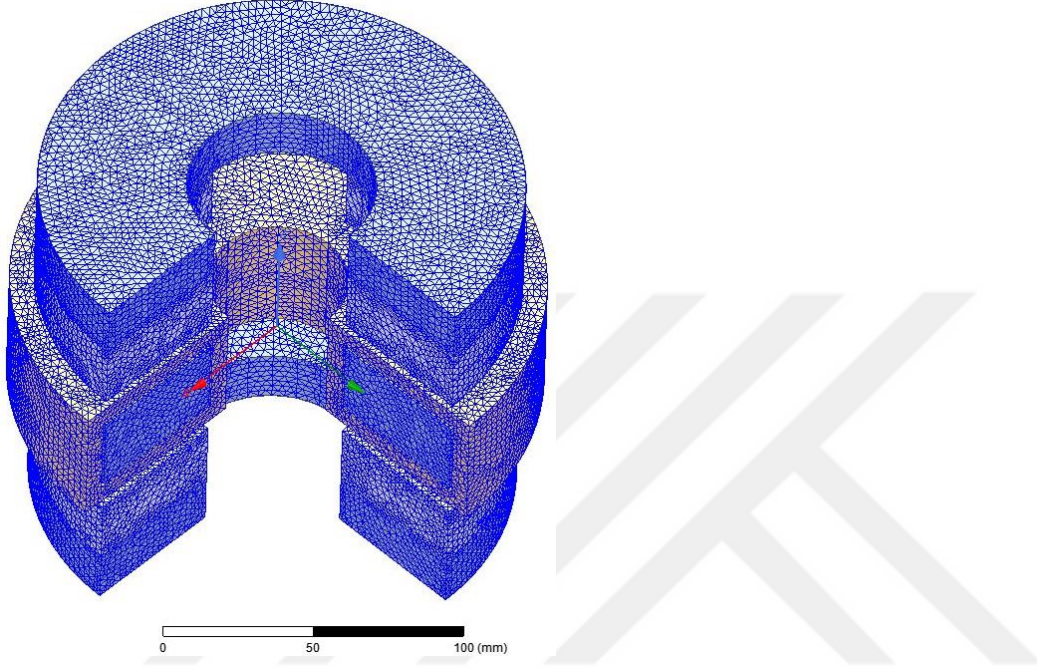
Şekil 5.6. Çift yanlı DA lineer motor: üretilen kuvvet-akım değişimi,  $K$

## 5.2. Çembersel DA Motorun Nümerik Analizi

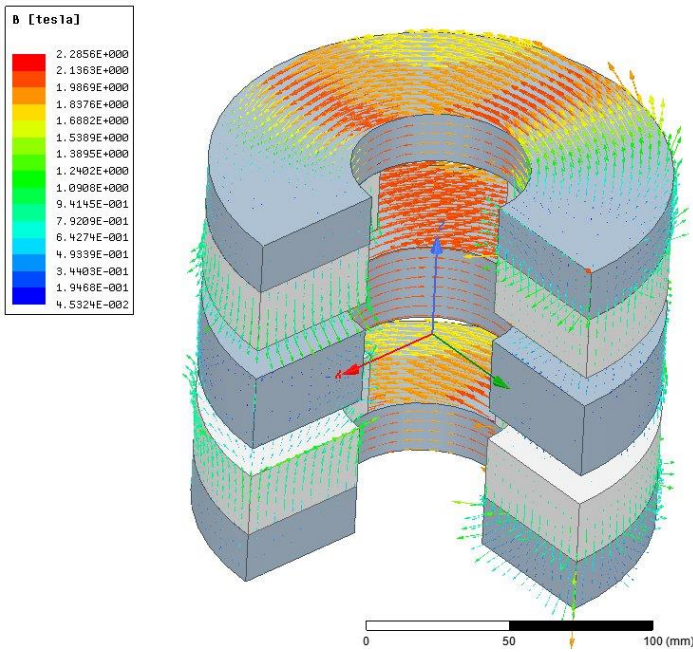
Çift yanlı lineer DA motor için yapılan analitik hesapların ANSYS-Maxwell programında karşılık bulmasını takiben lineer motor yay haline getirilmiştir. 4. Bölümde gerekçeleri ve detayları verilen yay motor topolojisi öncelikle Şekil 4.2(b)'deki gibi Maxwell 3D ortamında yeniden modellenmiştir. Tasarım sürecinde malzemelerin özellikleri lineer motorda belirlenen parametrelere göre düzenlenmiştir. Lineer motorda olduğu gibi mıknatıs altında kalan bobinlere birbirine zıt yönde enerji verilmiştir. Mesh eleman yapısı Şekil 5.7'deki gibi oluşturulup analiz edilmiştir.

Yay tipi motorda manyetik analiz bitiminde öncelikle, manyetik akı yoğunluğunun vektörel gösterimi incelenmiştir. Şekil 5.8'de söz konusu dağılıma bakıldığında, mıknatısların ürettiği manyetik akı, lineer motorlarda olduğu gibi hava aralığı üzerinden statora daha sonra tekrar hava aralığı üzerinden diğer mıknatısa gidecek şekilde oluşmuştur. Stator ve rotorlarda oluşan akı yönü lineer motorda olduğu gibi birbirine zıt yönlü olup, simetrik iki

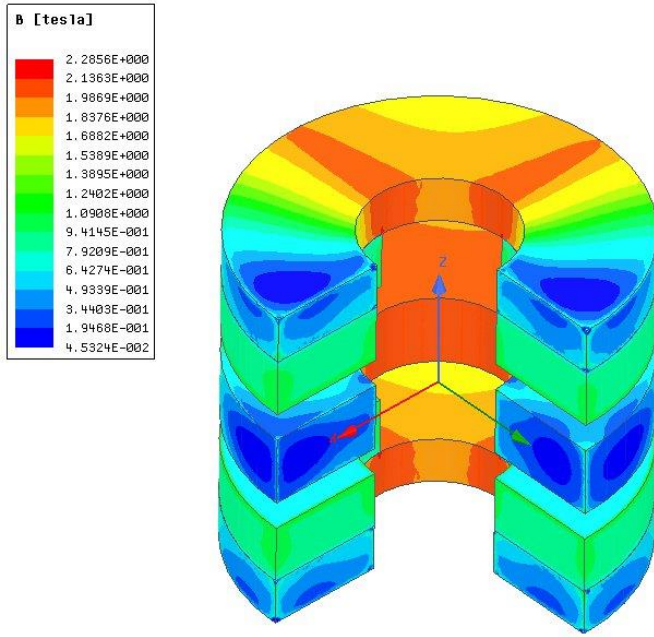
akı statorda birleşmektedir. Bu durum statorun rotorlardan daha büyük kesite sahip olmasına rağmen doyuma gitmesine neden olmaktadır. Malzemenin manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 5.9’da gösterilmiş olup lineer motorda karşılaşılan durum aynı şekilde ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.7. Yay yörüngeli çift yanlı DA motor: ANSYS-Maxwell ağ yapısı

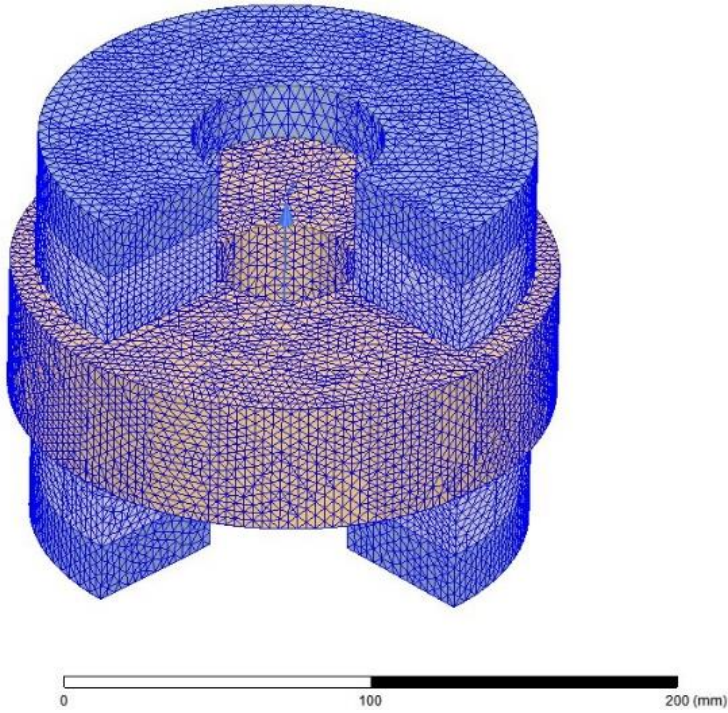


Şekil 5.8. Yay yörüngeli çift yanlı DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel)



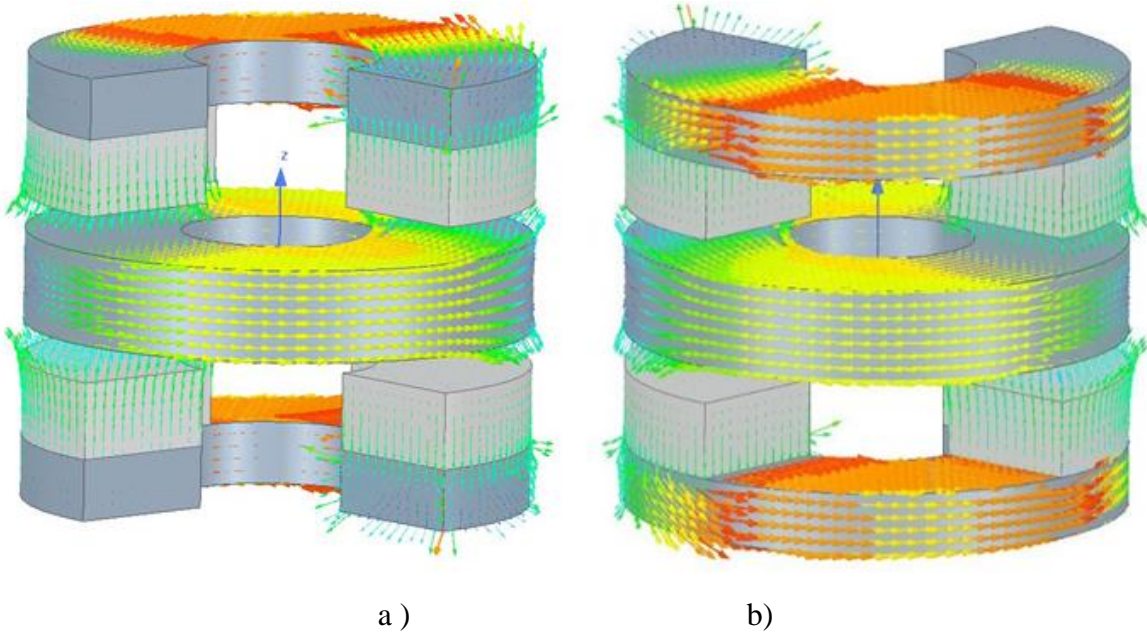
Şekil 5.9. Yay yörüngeli çift yanlı DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (skaler)

Çembersel motorda dönme hareketinin sağlanması için oluşturulan yeni tasarımın mesh yapısı ile gösterimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



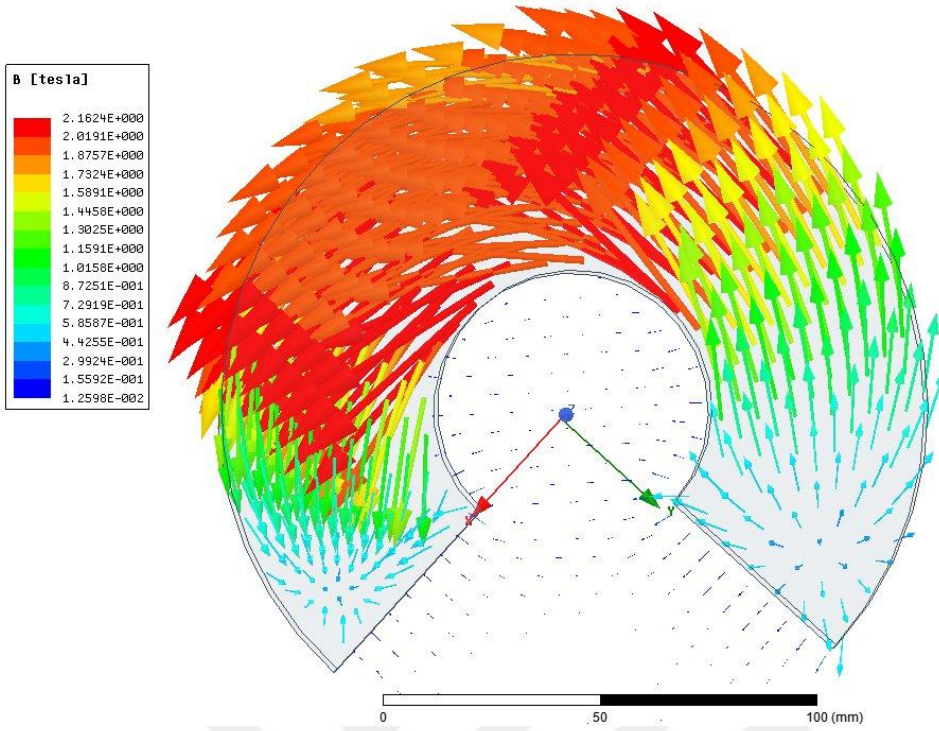
Şekil 5.10. Çembersel DA motor: ANSYS-Maxwell ağ yapısı

Bu durumda mıknatıslardan geçen manyetik akı hava aralığından sonra statorda ikiye ayrılır. Bu akının bir bölümü Şekil 5.11’de verildiği gibi rotor altında kalan statorun (lineer motordaki çevrim ), bir bölümü ise üzerinde rotor olmayan statorun açık kısmından diğer mıknatısa ulaşır. Enerjili olmayan bobinler üzerinden geçen bu akılar statorun doyuma gitmesini önlemekte, benzer performans için kesit azaltmaya gidilmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.11. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel) a) ön görünüm b) arka görünüm

Lineer motorda mıknatısa dönen akı, yolunu üst mil veya alt kısımda alt mil üzerinden sağlıyordu. Çembersel motorda beklenen, yine aynı şekilde akının dönüş yolunu rotorlar üzerinden sağlamasıdır. Fakat, mıknatıslara dönen akı, yolunun bir kısmını rotor üzerinden bir kısmını ise çember haline gelmesinden dolayı iç çemberde boşluk üzerinden sağlar. Manyetik akının yolu, rotor üzerinde detaylı incelendiğinde Şekil 5.12’de görüldüğü gibi, mıknatıslara dönen akı tamamen rotor üzerinden geçmemektedir.



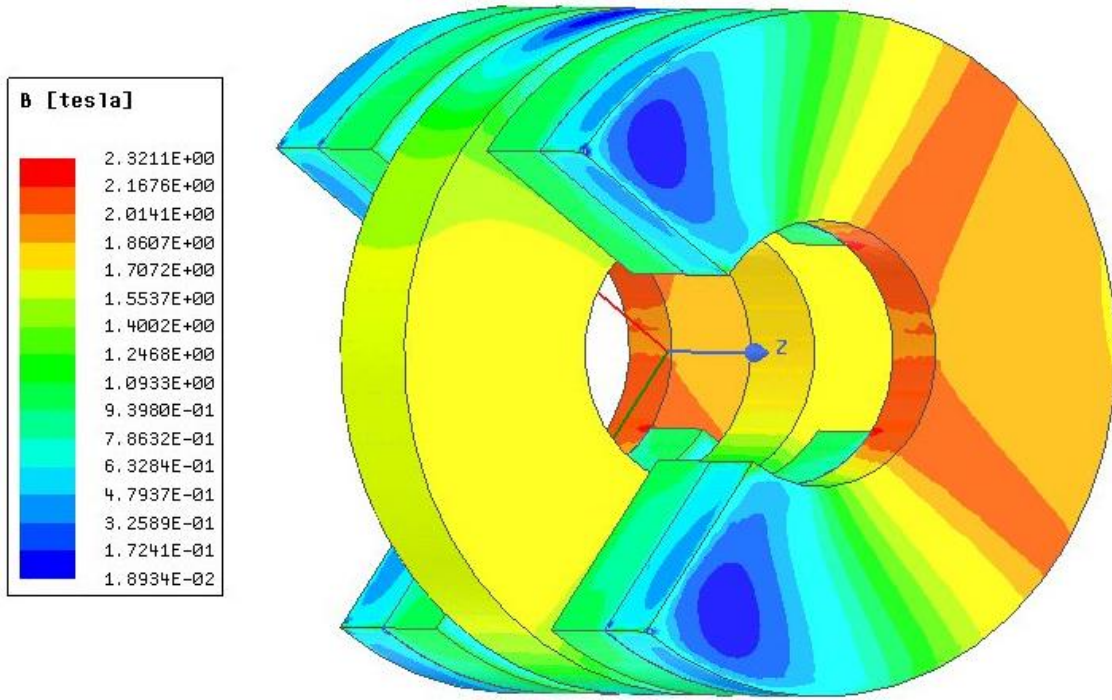
Şekil 5.12. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı (vektörel) , üst görünüm

Burada görülen durum aynı şekilde alt rotorda, hava aralığında ve statorda da meydana gelmektedir. Dezavantajlı bu durum motorda üretilen momenti düşürmektedir. ANSYS-Maxwell programında alan hesaplayıcı yardımıyla lineer motordaki manyetik akı dağılımları Şekil 5.4'te yapılmıştı. Çember haline geldiğinde yalnızca mıknatısın ve hava aralığının kesitleri artmıştır. Bu durum göz önüne alınarak, alan hesaplayıcı yardımıyla malzemelerin orta noktasındaki kesitlerde oluşan akı değerleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çembersel DA motor: manyetik akı dağılımı

Üst rotor: 1,92 mWb	
Mıknatıs A: 3,67 mWb	Mıknatıs B: 3,67 mWb
Stator (rotor ekseninde kalan kesiti): 2,54 mWb	
Stator (açık alan kesiti) : 2,54 mWb	
Mıknatıs C: 3,67 mWb	Mıknatıs D: 3,67 mWb
Alt rotor: 1,92 mWb	

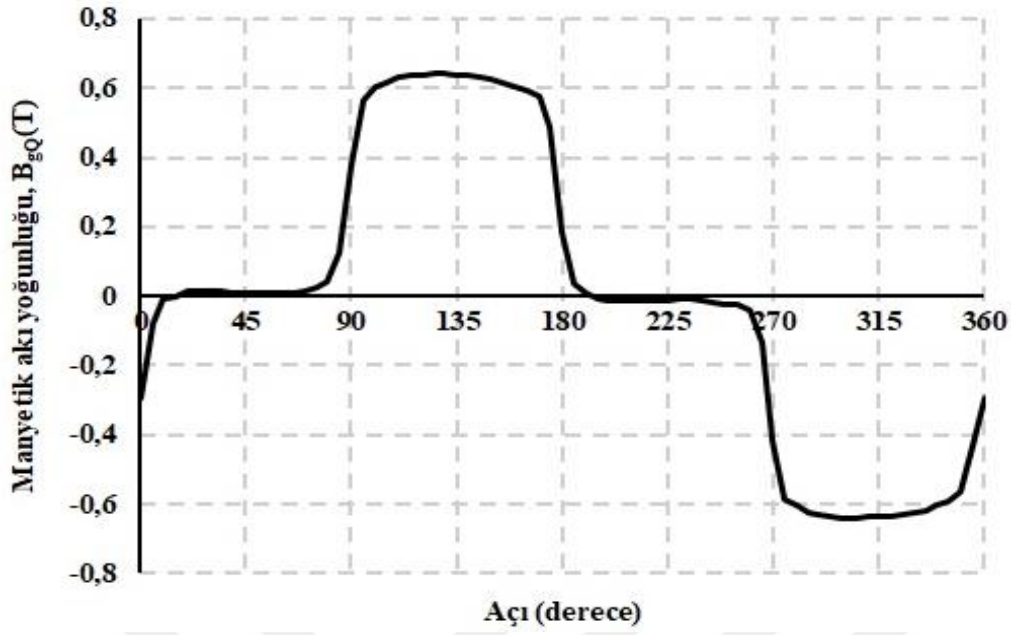
Çizelge 5.1'den de görüldüğü üzere, mıknatısların kesitinin artmasıyla üretilen akı, lineer motordaki mıknatıslara kıyasla %60 oranında artmıştır. Bu sayede, stator üzerinden geçen toplam akı, lineer motorda orta milden geçen toplam akıya kıyasla daha fazla olmuştur. Ancak, akının ikiye bölünerek diğer mıknatısa ulaşması neticesinde stator doyuma ulaşmamıştır. Şekil 5.13'te söz konusu motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.13. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı(skaler)

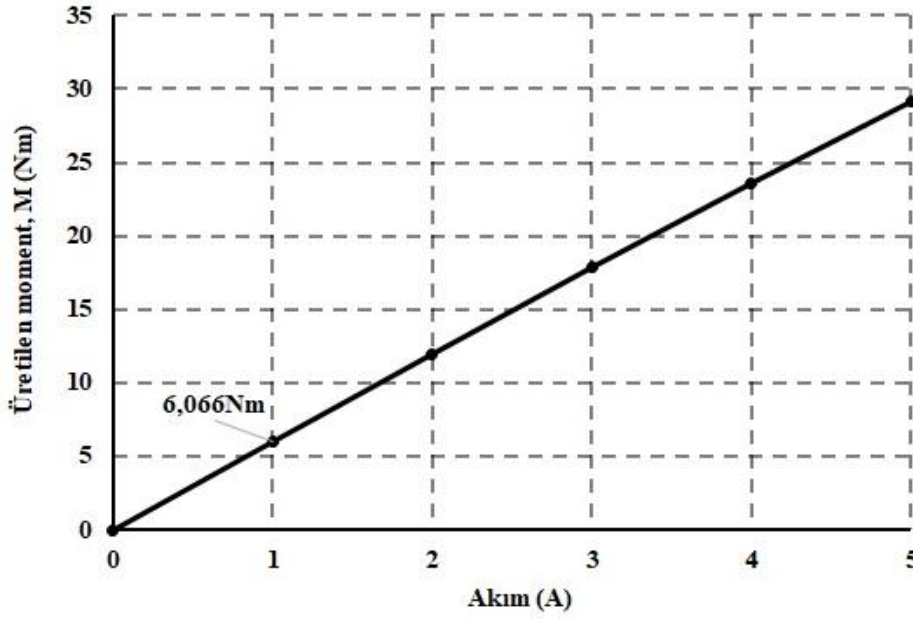
Manyetik devrede dolaşımda olup, sargıları aksel olarak kesen manyetik akı yoğunluğu eğrisi Şekil 5.14'te verilmiştir. Çembersel motorda 4 adet sarım 90 derecelik aralığa karşılık gelecek şekilde yerleştirildiğinden ve her mıknatıs 90 derecelik açı oluşturduğundan, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu 360 derecelik bir yörünge boyunca analiz edilmiştir. Çembersel motorda hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun açısal olarak değişimi, lineer motorda elde edilen eğriye benzer olup, mıknatısların altında birbirine zıt yöndedir. Sargıları dik kesen bu akı, kuvvet oluşumuna ve tasarım dairesel olduğu için moment üretimine katkı sağlar.





Şekil 5.14. Çembersel DA motor: hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değişimi

Çembersel motorda moment yaklaşık olarak kuvvet ve ortalama yarıçap dikkate alınarak Eş. 4.1 yardımıyla 6,48 Nm bulunmuştu. Çift yanlı DA lineer motorda elde edilen kuvvetin değişmediği varsayılarak yarıçap oranında moment hesabı yapılmıştı. Ancak, çembersel motorun ANSYS-Maxwell programında yapılan manyetik analizinde, lineer motorun manyetik devresindeki akı yönüne ek olarak iç dairede kaçak akıya sebebiyet veren akı atlamaları da görülmüştür. Eş. 3.17 dikkate alındığında kaçak akı faktörü  $q$ 'nun artması, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun azalmasına dolayısıyla kuvvet ve momentin düşmesine sebebiyet vermektedir. Lineer motorda hava aralığı kesiti için Eş. 3.1'den yararlanılmıştır. Fakat çembersel tasarımda hava aralığı kesiti geometri olarak farklı olduğundan Eş. 3.1 uygulanamayacaktır. Bu yüzden kaçak akı faktörü  $q$ 'nun arttığı bilinmekle birlikte gerçek değeri bulmak, çember şekli itibariyle akı atlamaları da düşünüldüğünde analitik olarak zordur.



Şekil 5.15. Çembersel DA motor: moment-akım değişimi,  $K_t$

ANSYS-Maxwell yazılımı ile yapılan momentin akım ile değişimi Şekil 5.15’de verilmiştir. 1 A akıma karşılık 6,066 Nm moment değeri analitik olarak hesaplanan 6,48 Nm değerine yakın olmakla birlikte, kaçak akı faktörü  $q$ ’nun arttığı ortaya çıkmaktadır. Eş. 3.15 ve Eş. 4.1 kullanılarak yapılan hesaplamada bu değerin kaçak akı faktörü  $q$ , 1,7 olduğunda ortaya çıktığı ve bu oranın lineer motorda hesaba katılan kaçak akı faktörü  $q$  1,537’den büyük olduğu anlaşılmıştır.

1000 tur sarım sayısına sahip sargılardan 1A geçtiği takdirde rotorlarda oluşan moment değeri Şekil 5.15’de verilmiştir. Uygulanan akım değeri arttıkça momentin doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Eş. 4.1’den moment akım oranı bu tasarım için

$$K_t = 6,066 \quad \text{Nm/A}$$

olarak bulunmuştur.

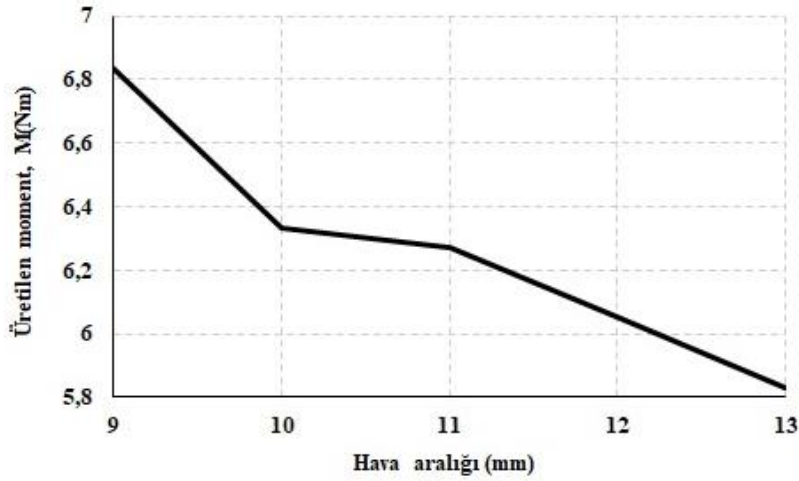
### 5.3. Yüksek Momentli Çembersel DA Motor

Sargılara uygun sürücü düzeneği ile akım uygulandığında dönme hareketi elde edilecek, aynı yönde akım verildiği takdirde frenleme sağlanacaktır. Çembersel motor tasarımında elde edilen moment/akım oranı değeri iyileştirmeye açıktır. Şekil 5.15’de elde edilen

değer, lineer motordan elde edilen kuvvetin, tasarım çember haline geldiğinde oluşan moment karşılığıdır. Döner hareket isteyen alanlarda motorun kullanılabilmesi için, bir başka deyişle elde edilen moment/akım oranının artırılması için, tasarımda birtakım iyileştirmeler yapılmalıdır. Kullanım amacına göre boyutları değiştirilecek motor için sınır değerler belirlenmelidir. 2 rotorlu tek statorlu tekere benzer yapının teker içi kullanımı amaçlandığında, lastik çapları ile motor boyutlarının orantılı değiştiği düşünülebilir. Literatürde 19 inç çapında bir lastik için 210 mm yarıçap genişliğe ve 160-170 mm kalınlığa sahip teker motorun uygun olabileceği anlaşılmıştır [42].

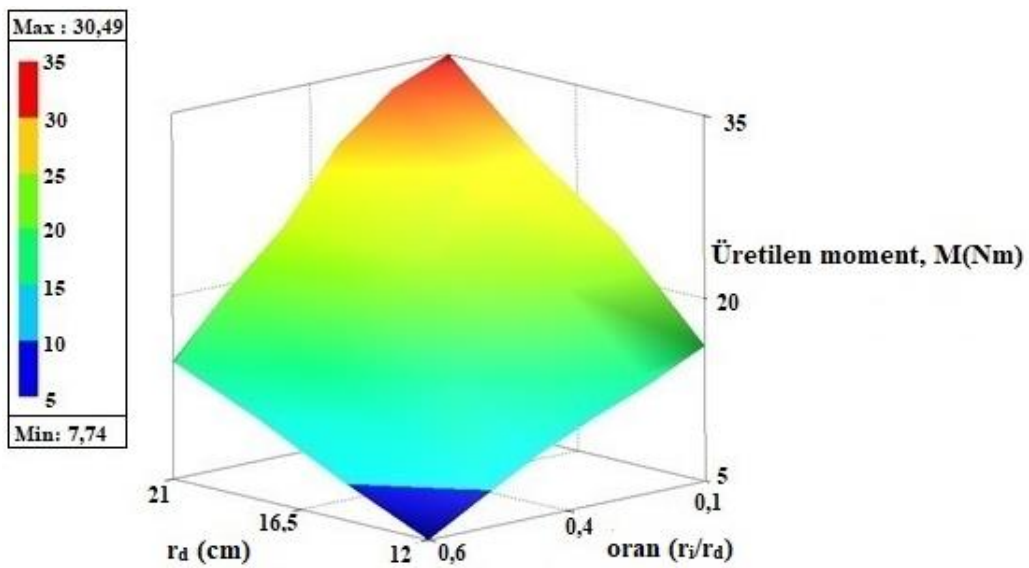
Motorda üretilen momenti etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar başlıca hava aralığı ve sargı boyu, motorun iç ve dış yarıçapları, mıknatıs, rotor ve statorun kalınlıkları şeklinde sınıflandırılabilir. Tüm bu değişkenler göz önüne alınarak, malzemenin doyumuna gitmeden kullanım yeri boyutlarında motordan maksimum verim alınacağı ölçütler gözetilmelidir. Öncelikle analitik olarak yapılan hesaplarda hava aralığının boyunun düşürülmesi, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu artırdığından, üretilen kuvvete ve çembersel tasarımda momente pozitif katkı sağlayacaktır. Yukarıda detayları verilen lineer motorda hava aralığı boyu, sargıların ve sargılar ile mıknatıs arasında kalan boşluğun toplamı olan 12 mm olarak ayarlanmış, hava aralığının azalmasının moment/akım oranına etkisi Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekil 5.16'dan da görüldüğü üzere hava aralığındaki 3 mm'lik düşüş, momenti de 6,8 Nm seviyesine çıkarmıştır.

Sargının hava aralığındaki yüksekliği, akım yoğunluğu da gözetilerek belirli bir değerde kalmalıdır. Ancak sargıların akım yoğunluğu, sargıların yalnız hava aralığındaki yüksekliğine değil aynı zamanda kuvvet üreten radyal uzunluğuna, dolayısıyla yarıçapa da bağlıdır. Yarıçapın artması sargıların boyunu artıracığı için akım yoğunluğunu düşürür. Bu yüzden motorda yapılacak iyileştirmede sargıların akım yoğunluğuna göre boyu, motorun yarıçap ve diğer boyutlarının optimizasyonu sonrasında netleştirilecektir.



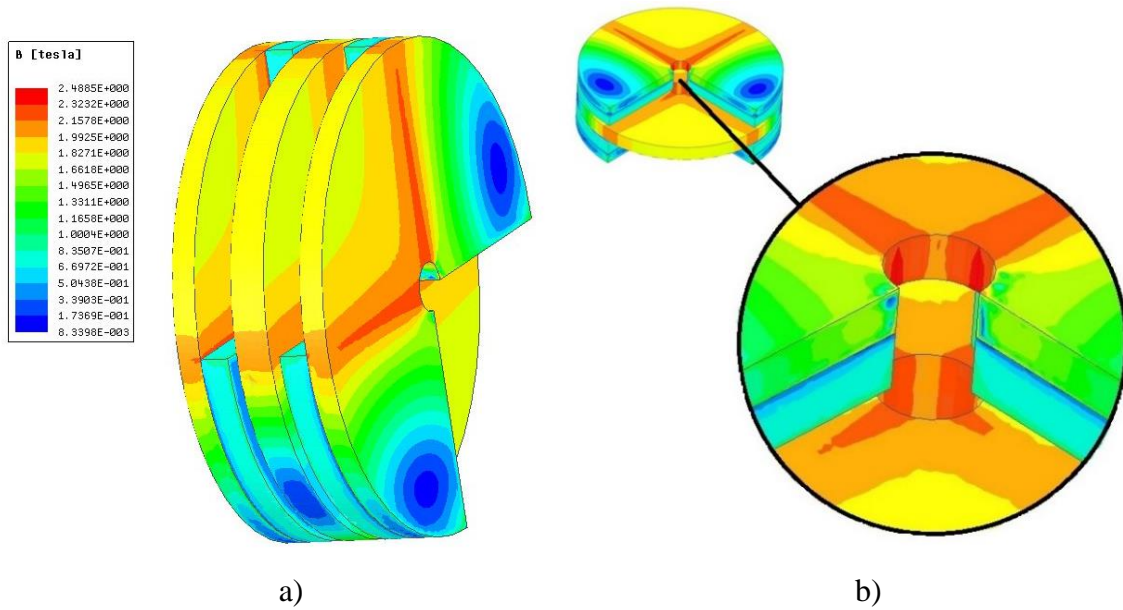
Şekil 5.16. Çembersel DA motor: üretilen moment-akım oranının hava aralığı ile değişimi

Çembersel DA motorda sargılarda kuvvet üreten aktif olan kısım dış ve iç yarıçap arasında kalan radyal uzunluktur. Kuvvet hesabında sargıların uzunluğu arttıkça üretilen kuvvetin arttığı göz önüne alındığında, dış yarıçapın artması ve iç yarıçapın mümkün olduğunca küçülmesi, kuvveti ve dolayısıyla momenti artıracaktır. Şekil 5.17’de çembersel DA motorda üretilen momentin dış yarıçap ve iç yarıçapa göre değişimi verilmiştir. Stator, rotor ve mıknatıs kalınlıkları Çizelge 4.2’deki ölçülerdedir. Yalnızca hava aralığı boyu Şekil 5.16’da tespit edilen 9 mm’ye ve sargının yüksekliği 8 mm’ye getirilip tasarım analiz edilmiştir.



Şekil 5.17. Çembersel DA motor:  $(r_d-r_i)$  değişiminin momente etkisi

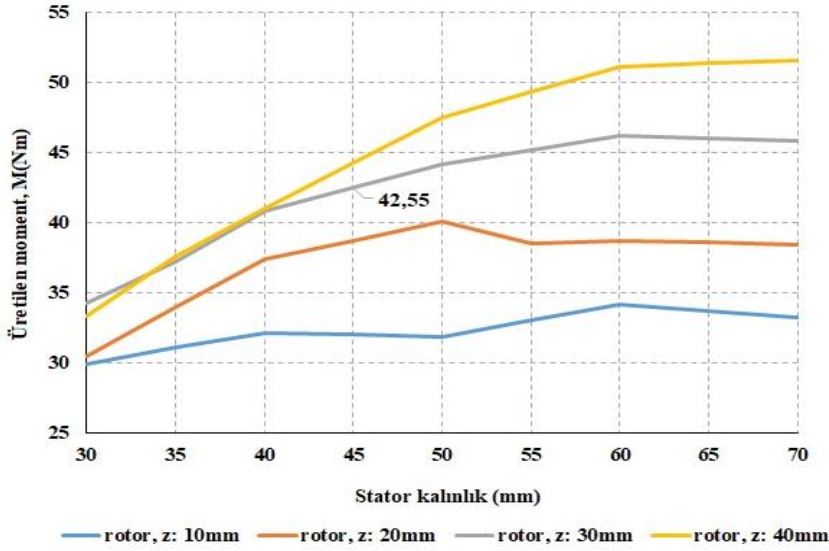
3 boyutlu grafikten anlaşılacağı üzere yarıçapın artması ve buna bağlı olarak iç yarıçap ve dış yarıçap oranı olan ( $r_i/r_d$ ) azalması momenti artırmıştır. Buradan hareketle, teker içi yerleşim sınırı da olduğu göz önüne alınırsa motorun dış yarıçapı 210 mm olup, iç yarıçap 21 mm olarak alındığında moment değerinin 30,49 Nm olduğu görülmektedir. Motorun bu yarıçap değerlerinde göz önüne alınacak bir diğer nokta malzemelerin doyumda olup olmadıklarıdır. Şekil 5.18’de üst rotor, alt rotor ve statorun yarıçap değişimine verdiği manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Ayrıca üst rotor ve alt rotorda mıknatıslar ile aynı ekseninde belli noktalarda malzemenin doyum sınırlarına geldiği görülmüştür.



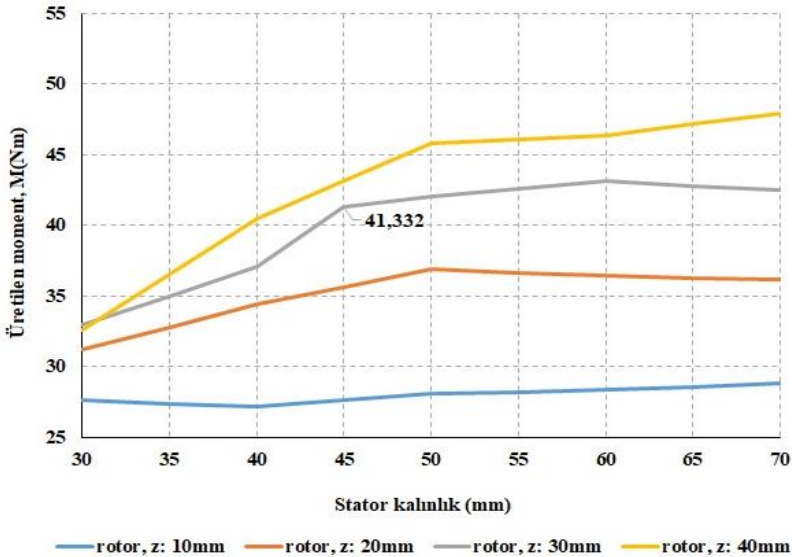
Şekil 5.18. Yüksek momentli çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı(skaler),  $r_d = 210\text{mm}$ ,  $r_i = 21\text{mm}$  a) perspektif b) odaklanmış

Manyetik geçirgen malzemenin doyuma gitmesinin önüne geçilmesi için, temel olarak malzemeden geçen manyetik akının azalması veya kesitin artırılarak manyetik akı yoğunluğu azaltılması gereklidir. Bundan dolayı stator ve rotor kesitlerinin veya kalınlıklarının farklı varyasyonları ile moment değişimi gözlenmelidir. 210 mm dış yarıçap, 21 mm iç yarıçapa sahip motorun stator ve rotor kesit değişiminin momente etkisi Şekil 5.19’da görülmektedir. Şekil 5.19’dan da görüleceği üzere kalınlıkları artırılan stator ve rotor, moment değerini artırmıştır. Momentin en yüksek değerindeki stator ve rotor kalınlığı belirlemek için öncelikle motorun kullanım alanı içinde sınırlı bölge göz önüne alınmalıdır. Ayrıca hareketli kısımda ortaya çıkan fazla ağırlık motorun performansını olumsuz etkilemektedir. Teker içi tasarım düşünüldüğünde kalınlık sınırlaması ve Şekil 5.19 göz önüne alınarak stator ve rotorun kalınlıkları için optimum değer belirlenmelidir.

Mıknatis boyutu da düşünülerek yapılan analizde, statorun 45 mm, rotorun ise 30 mm kalınlığa sahip olduğu değer seçilebilir. Mıknatis boyutundaki 5 mm'lik farklılık momente çok etki etmediği için daha ince olan 20 mm seçilebilir. Sonuç olarak kalınlık sınırlaması da göz önüne alındığında toplam 163 mm kalınlığa sahip motor elde edilebilir. Buradan hareketle motor tasarım olarak Çizelge 5.2'deki ölçüler ile Şekil 5.20'deki gibi oluşturulur.



a) Mıknatis kalınlığı 25 mm iken momentin stator-rotora göre değişimi

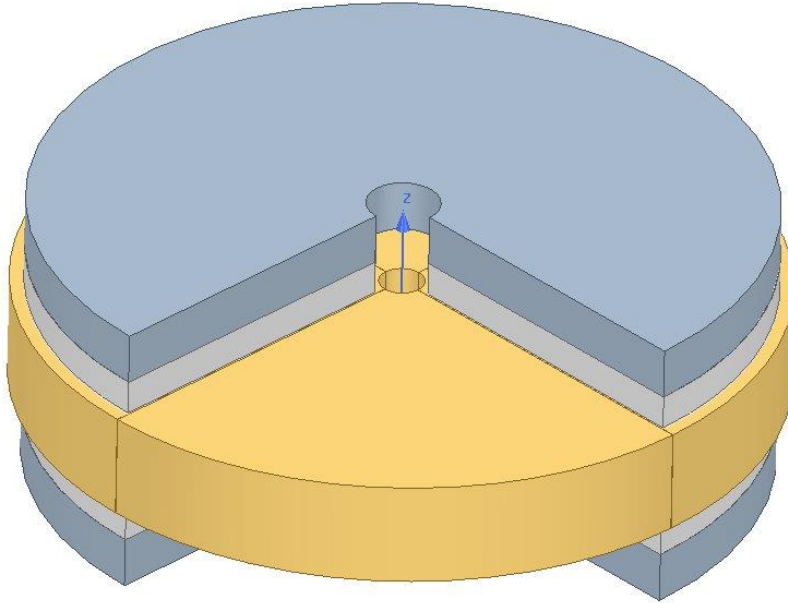


b) Mıknatisin kalınlığı 20 mm iken momentin stator-rotora göre değişimi

Şekil 5.19. Çembersel DA motor: stator-rotor kalınlık değişiminin momente etkisi a) mıknatis kalınlığı 25mm iken momentin stator-rotora göre değişimi b) mıknatis kalınlığı 20 mm iken momentin stator-rotora göre değişimi

Çizelge 5.2. Yüksek moment akım oranlı çembersel motor

Çembersel DA Motor	
İç yarıçap	21 mm
Dış yarıçap	210 mm
Hava aralığı (z ekseni)	9 mm
Sargı (z ekseni)	61 mm
Üst mıknatıslar (z ekseni)	20 mm
Alt mıknatıslar (z ekseni)	20 mm
Üst rotor (z ekseni)	30 mm
Alt rotor (z ekseni)	30 mm
Stator (z ekseni)	45 mm



Şekil 5.20. Yüksek momentli çembersel DA motor: ANSYS-Maxwell 3D modeli

Tasarımın son halini takiben ANSYS-Maxwell programında yapılan manyetik analizde hava aralığında ve mıknatısta sırasıyla 0,539 T ve 0,576 T değerinde manyetik akı yoğunluğu ortaya çıkmıştır. Manyetik devrede dolaşan akının malzemelerin ortasındaki

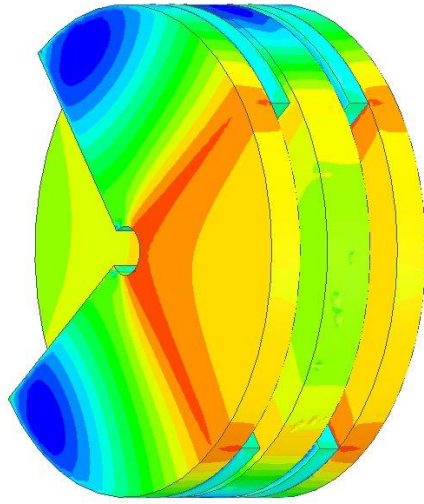
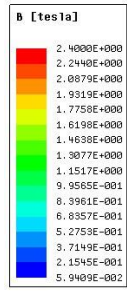
kesitlerde manyetik akı dağılımları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Çizelge 5.3'ten de görüleceği üzere daha önceki tasarıma kıyasla manyetik akının arttığı dolayısıyla momenti artırdığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.3. Çembersel DA motor: manyetik akı dağılımı

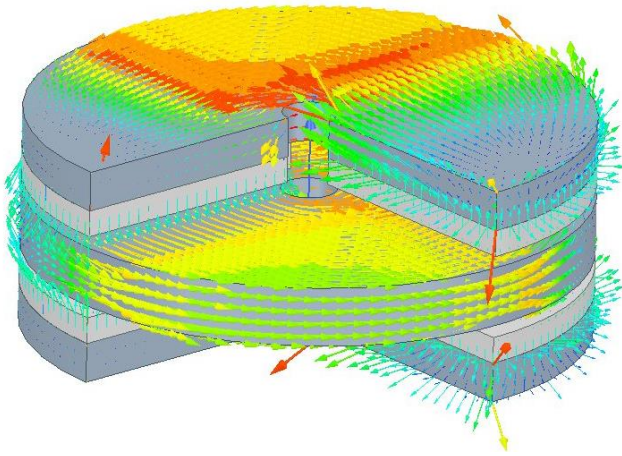
Üst rotor: 10.87 mWb	
Mıknatıs A: 20 mWb	Mıknatıs B: 20 mWb
Stator (rotor ekseninde kalan kesiti): 14.4 mWb	
Stator (açık alan kesiti) : 14.6 mWb	
Mıknatıs C: 20 mWb	Mıknatıs D: 20 mWb
Alt rotor: 10.87 mWb	

Diğer taraftan değişen stator ve rotor boyutları ile manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 5.21'de verildiği gibi değişmiş, ancak doyum sınırlarında sonuçlanmıştır. Çembersel DA motorun ANSYS-Maxwell programında yapılan manyetik analizlerinde, sargılardan çift yanlı lineer DA motorda olduğu gibi 1 A akım geçmektedir. Sargılardan geçen akım belli bir değerin üzerinde ısınmaya ve dolayısıyla kayba neden olur. Bu yüzden tasarımı yapılan motorda sargılarda oluşan akım yoğunluğu hesaba katılmalıdır. Şekil 5.22'de sargılar üzerindeki akım yoğunluğu maksimum  $5,9 \text{ A/mm}^2$  olarak motorun iç yarıçapında görülmüştür. Bu değer kabul edilebilir seviyededir. Çizelge 5.2'de tespit edilen boyutlarda sargılardan geçen akım doğrultusunda elde edilen moment  $41,33 \text{ Nm}$ 'dir. Momentin akım ile değişimi Şekil 5.23'te verilmektedir.

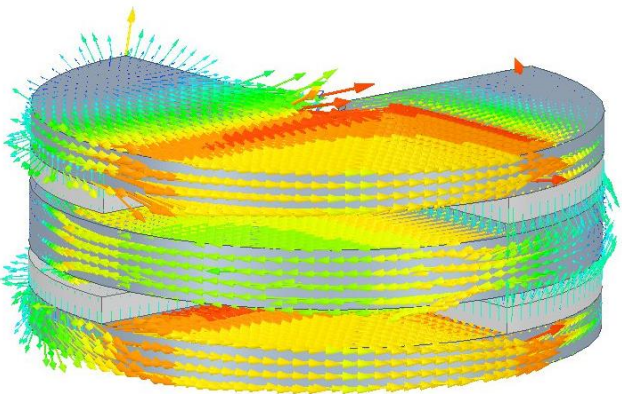




a)

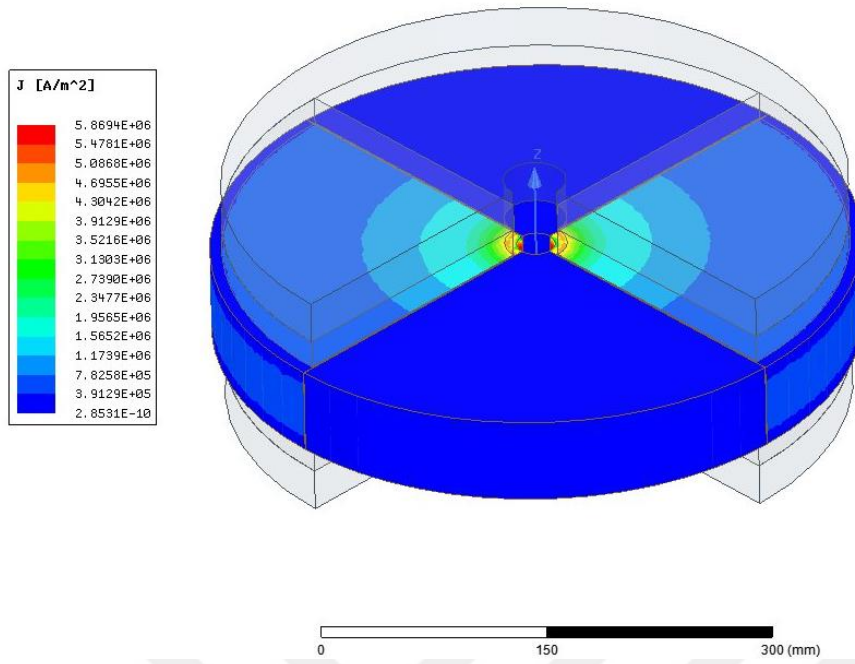


b)

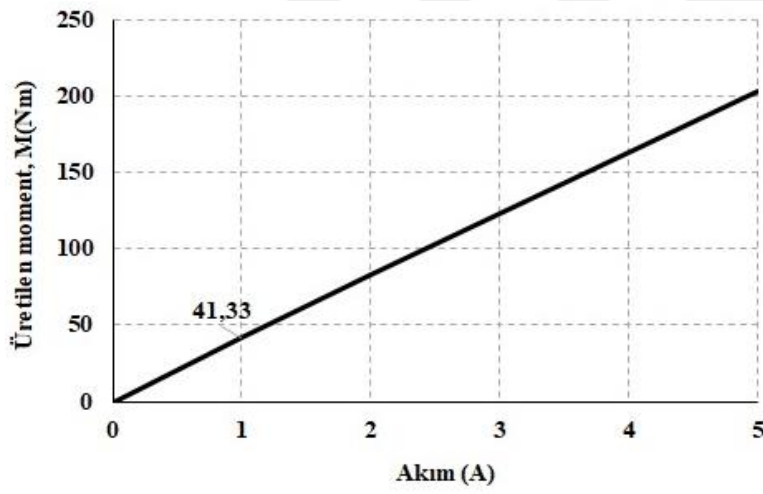


c)

Şekil 5.21. Çembersel DA motor: manyetik akı yoğunluğu a) manyetik akı yoğunluğu dağılımı (skaler) b) manyetik akı yoğunluğu vektörel yönü (ön görünüm) c) manyetik akı yoğunluğu vektörel yönü (arka görünüm)



Şekil 5.22. Sargıların üzerinde akım yoğunluğu gösterimi



Şekil 5.23. Çembersel DA motor: üretilen moment-akım değişimi,  $K_t$

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrikli araçlarda, özellikle teker içi uygulamalarında kullanılan motorlara alternatif olabilecek, üretilen akı itibariyle aksenal akılı, DA beslemeli, akım başına moment değeri yüksek, yeni geometriye sahip bir motor topolojisi geliştirilmiştir. Literatür araştırmalarında rastlanılmayan bu tasarımın geleneksel hub motorlara kıyasla daha basit yapıda olması, üretimini kolaylaştıracağı için maliyeti düşürecektir. Bunun yanı sıra rotorun iç ve dış yarıçap oranının değiştirilebilir olması, motorun farklı boyutlardaki teker içi tasarıma elverişli olacağını göstermektedir.

Tasarımı yapılan motorun manyetik analizleri öncelikle analitik yöntemler ile incelenmiş, daha sonra ANSYS-Maxwell programında üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Manyetik analiz sonuçlarının gerçeğe daha yakın ve doğru olması için ağ yapısı küçük ölçekte tutulmuş analiz süresi uzamıştır. Yazılım programı desteğiyle elde edilen manyetik sonuçların analitik hesaplar ile örtüştüğü görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan mıknatıs tipi Neodyum mıknatıs olup, stator ve rotor tasarımı için 1010 çelik malzeme seçilmiştir. 1010 çelik malzemede kayıp oranları yüksek olduğundan yerine lamine şeklinde farklı tip malzemeler seçilerek tasarımdan daha yüksek oranda verim elde etmek mümkündür. Bunun yanı sıra oluksuz tasarlanan stator, tasarımda kolaylık sağlarken, oluk oluşturularak yapılacak yeni topolojide hava aralığının azalmasının motor performansı üzerindeki etkileri muhtemel çalışma alanlarıdır.



## KAYNAKLAR

1. Basak, A. (1996). *Permanent-Magnet DC Linear Motors*. Oxford: Oxford University Press, 1-37.
2. Tuncay, M.T. (2016). *Sabit Mıknatıslı Dc Lineer Motor Tasarımı Ve Denetimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
3. Ekmekçi, M. (2006). *Otomatik Açılıp Kapanan Kapılar için Tüp Tipi Lineer İndüksiyon Motor Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
4. Küçükali, M., Akyazı, Ö., ve Akpınar, A. S. (2008). *Doğrusal hareketli asenkron motor sürücülü mekanik osilatör ve evirici ile kontrolü*. Bursa Eleko 2008, Bildiri no: 39.
5. Sato, K., Katori, M., and Shimokohbe, A. (2013). Ultrahigh-acceleration moving-permanent magnet linear synchronous motor with a long working range. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1), 307-315.
6. Jiefan, C., and Chengyuan, W. (2004). Design characteristic and force analysis of PM linear motor for fast response servo system. *IEEE 4th IPEMC*, 1001–1004.
7. Taşkın, Ö. (2015). *Çift Taraflı Hava Çekirdekli Lineer Motor Tasarımı Ve Gerçeklenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
8. Nasar, S.A., and Boldea, I. (1987). *Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications*. Amerika: Prentice-Hall, 4-23.
9. Norouzi, Pooria. (2015). *Fırçasız Lineer Doğru Akım Motorunun Yüksek Performanslı Konum Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
10. Demirci, R., ve Tuncay, M.T. (2013). Çift yanlı doğru akım lineer motor tasarımı. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7, 42-54.
11. Laithwaite, E.R. (1971). *Linear Electric Motors*. London: Mills and Boon Limited, 32–88.
12. Çepni, M.E. (2010). *Lineer Servo Motor ve Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
13. Tavana, N. R., and Shoulaie, A. (2009). *Modeling and design optimization of permanent magnet linear synchronous motor with halbach array*. 17th Iranian Conference on Electrical Engineering, 441-446.
14. Basak, A., and Shirkoohi, G. H. (1990). Computation of magnetic field in DC brushless linear motors built with NdFeB magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(2), 948-951.

15. Atherton WA. (1987). *From Compass to Computer; A History of Electrical and Electronics Engineering*. London: The Macmillan Press Ltd.
16. Gieras. J.F., Wang. R.J., Maarteen. J.K. (2005). *Axial Flux Permanent Magnet Brushless machines*. USA: Kluwer Academic Publishers.
17. Choppa, D. (2006). *Performance of Torus-Type Brushless DC Motor with Winding Connected in Two and Three-Phase System*, Master's Theses, Louisiana State University, Louisiana, USA.
18. Aydin, M., Huang, S., and Lipo, T. A. (2004). *Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review*, University of Wisconsin-Madison.
19. Çetin, E., Daldaban, F. (2014). *Otomotiv Uygulamalarında Kullanılacak Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı BLDC Motor Tasarım Modeli*. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.
20. Profumo, F., Zhang, Z., and Tenconi, A. (1997). A new viable solution for electric cars. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(1), 39-45.
21. Yeşilbağ, E., Ertuğrul, Y., ve Ergene, L. (2017). Axial Flux PM BLDC Motor Design Methodology And Comparison With Radial Flux PM BLDC Motor. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 44 (25), 3455-3467.
22. Chandler, P. L. (2004). *2d & 3d Electromagnetic And Material Loss Analysis of An Axial Flux Permanent Magnet Machine*, Doctor of Philosophy, Faculty of Technology & Industrial Education, Charles Darwin University.
23. Di Napoli, A., Solero, L., and Capponi, F.G. (1998). *Development and Testing of an High Powered Performance Direct-Wheel Drive System for a Dual-Power Electric Vehicle*. International Electric Vehicle Symposium, Brussels.
24. Cvetkovski. G., Petkovska. L., Cundev. M., and Gair. S. (1998). *Optimisation of a Permanent Magnet Axial Field Synchronous Motor for Direct EV Wheel Drive*. International Electric Vehicle Symposium, Brussels.
25. Ehsani, M., Rahman, K., and Toliyat, H. (1997). Propulsion System Design of Electric and Hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 19-27.
26. Chaker, N., Salah. IB., Tounsi. S., Neji. R. (2009). Design of axial-flux motor for traction application. *JEMAA 2009*, 2, 73-83.
27. Hakala H. (2000). *Integration of motor and hoisting machine changes the elevator business*. International Conference on Electrical Machines, Espoo, Finland, 1242-1245.
28. Mebarki. A., Gerada. D., Brown. NL. (2014). *Analysis of an Axial PM machine with field weakening capability for engine integration*. 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 1-6.
29. Rahim, N.A., Ping, H.W., and Tadjuddin, M. (2007). *Design of axial flux permanent magnet brushless DC motor for direct drive of electric vehicle*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 1-6.

30. Parvainen, A. (2005). *Design Of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines And Performance Comparison Between Radial-Flux And Axial-Flux Machines*, Doctor of Science, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland.
31. Nidec Corporation. *Fundamental Technology for Innovative Motors*. [https://www.nidec.com/en-NA/technology/rd/innovative\\_motor/](https://www.nidec.com/en-NA/technology/rd/innovative_motor/) Son erişim tarihi: 08 Mart 2019.
32. Hüner, E., Ekren, N., ve Akıncı, T.Ç. (2008). Teker Motorlar Ve Teker Motorların Elektrikli Araçlarda Kullanımına İlişkin Bir İnceleme. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3, 2.
33. Küçük, F. (2002). *Magnetik malzemelerde kayıpların ölçülmesi ve modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
34. Otluoğlu-Ercan, S. (2010). *Oda sıcaklığında manyetik soğutucularda kullanılacak halbach kalıcı mıknatıs düzeni kuramsal tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
35. Gürdal, O. (2015). *Elektrik Makinaları Tasarımı*, Bursa, Türkiye, Orhangazi Üniversitesi.
36. Murphy, B. C. (2003). *Design and Construction of a Precision Tubular Linear Motor and Controller*, Master of Science, Texas A&M University.
37. Gürdal, O. (2001). *Elektrik Makinaları Tasarımı*, İstanbul, Türkiye, Atlas Yayınları.
38. Gürünlü, C. (1989). *Enerji Dönüşümünün Temelleri Çözümlü Problemler 1*, Trabzon, Türkiye, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 1-12.
39. Ifedi, C.J., Mecrow, B.C., Brockway, S.T.M., Boast, G.S., Atkinson, G.J., and Dragica, K.P. (2013). Fault Tolerant In-Wheel Motor Topologies for High Performance Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), 1249-1257.
40. Yang, Y.P., Wang, J.P., W, S.W., and Luh, Y.P. (2004). Design and control of axial-flux brushless dc wheel motors for electric vehicles - Part II: Optimal current waveforms and performance test. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(4), 1883-1891.
41. Fenercioğlu, A., ve Tarımer, İ. (2007). Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3d Alan Simülatörü İle Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 6, 3.
42. Çakır, K., and Sabanovic, A. (2006). In-wheel motor design for elektric vehicles. *9th IEEE International Workshop on*, 613-618.





## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYDIN, Akın  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 19.02.1987, İstanbul  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 309 05 15  
 Faks : 0 (312) 309 05 15  
 e-mail : akn.aydn@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2011
Lise	Gazi Osman Paşa Lisesi	2005

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	TCDD Genel Müdürlüğü	Mühendis
2012-2014	Eczacıbaşı-Monrol Nükleer Ürünler A.Ş.	Teknik Destek Uzmanı

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

-

### Hobiler

Yüzme, Seyahat.





*GAZİ GELECEKTİR..*