

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**ÇİFT TARAFLI HAVA ÇEKİRDEKLİ SABİT MIKNATISLI
LİNEER SERVO MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KASIM OĞUZ

DENİZLİ, OCAK - 2021

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**ÇİFT TARAFLI HAVA ÇEKİRDEKLİ SABİT MIKNATISLI
LİNEER SERVO MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KASIM OĞUZ

DENİZLİ, OCAK - 2021

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

KASIM OĞUZ

ÖZET

ÇİFT TARAFLI HAVA ÇEKİRDEKLİ SABİT MİKNATISLI LİNEER SERVO MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KASIM OĞUZ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. YUSUF ÖNER)

DENİZLİ, OCAK - 2021

Lineer motor teknolojileri günümüzde toplu taşımacılık, optik cihazlar, tekstil endüstrisi, nanoteknoloji ve tıp elektroniği gibi birçok endüstriyel uygulama alanında kullanılmakta ve araştırma geliştirme faaliyetlerinde sıklıkla konu edilmektedir. Lineer motorlardan günümüzde beklentiler oldukça fazladır. Bunun nedeni, hafiflik, kontrol edilebilirlik, yüksek kuvvet/moment ağırlık oranı ve lineer motor da elde edilen lineer hareketin, dönel sistemlere eklenen kayış kasnak mekanizmalarıyla elde edilen lineer harekete kıyasla çok daha hızlı, hassas ve düşük bakım maliyeti gerektirmesidir.

Bu tez kapsamında öncelikli olarak lineer motor teknolojileri anlaşılır bir biçimde ortaya konularak, lineer motor çeşitleri incelenmiştir. Sonrasında ana boyut ölçüleri, parametreleri ve kontrol metodu ele alınarak çift taraflı hava çekirdekli basit hassas konum kontrolü yapılabilen lineer motor tasarımı yapılmıştır. Lineer motor tasarım süreci genel hatlarıyla ortaya koyulduktan sonra Solidworks programı yardımıyla lineer motorun 3D katı modeli oluşturularak, sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS Maxwell programında 2D manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Lineer motor tasarımı ve manyetik benzetimi yeterli seviyede gerçekleştikten sonra, lineer motorun enerjilendirilmesi ve istenilen şekilde sürülebilmesi için sürücü tasarımı ele alınmıştır. Lineer motor ve sürücüsü tasarımları ardından lineer motorun hareketini optimum seviyede kontrol altında tutarak, kullanılabilir bir prototip ürün haline getirilmiştir. Yapılan analiz sonuçları ile prototip motordan elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmış ve sonuçları üzerinde tartışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Lineer Servo Motor, Lineer Motor ve Kontrolü, Doğrusal Motorlar, Ansys Maxwell 2d-Analiz

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DOUBLE-SIDED AIR CORE PERMANENT MAGNET LINEAR SERVO MOTOR

MSC THESIS

KASIM OĞUZ

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR:PROF. DR. YUSUF ÖNER)

DENİZLİ, JANUARY 2021

Linear motor technologies are used in many industrial applications such as public transportation, optical devices, textile industry, nanotechnology and medical electronics and are frequently used in research and development activities. Expectations from linear motors are quite high today. This is because the lightness, controllability, high force / moment-to-weight ratio and linear motion in the linear motor require much faster, more precise and low maintenance cost compared to the linear motion obtained by the belt-pulley mechanisms added to the rotary systems.

Within the scope of this thesis, linear motor technologies are presented in a comprehensible manner and linear motor types have been examined. Afterwards, a simple precision position controlled double sided, air core, linear motor was designed by considering the main dimensions, parameters and control method. After explaining the linear motor design process in general terms, 3D solid model of the linear motor was created with the help of Solidworks program and 2D magnetic analysis was carried out in ANSYS Maxwell program with the finite element method. After performing the linear motor design and magnetic simulation at a sufficient level, the driver design is discussed in order to energize the linear motor and drive it as desired. After the design of the linear motor and its driver, it was turned into a usable prototype product by keeping the motion of the linear motor under optimum control. The results of the analysis and the experimental data obtained from the prototype motor were compared and the results were discussed.

KEYWORDS: Linear Servo Motor, Linear Motor And Control, Linear Motors, Ansys Maxwell 2d-Analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Araştırması	3
2. LİNEER MOTOR.....	7
2.1 Lineer Motorun Yapısı ve Çalışma İlkesi	7
2.2 Lineer Motor Tiplerinin Sınıflandırılması.....	10
2.2.1 Komütasyonun Sağlanmasına Göre Sınıflandırma.....	10
2.2.1.1 Fırçalı Lineer Motorlar.....	10
2.2.1.2 Fırçasız Lineer Motorlar	11
2.2.2 Şekline Göre Sınıflandırma	14
2.2.2.1 Tüp Şeklindeki Lineer Motorlar	14
2.2.2.2 Yassı Lineer Motorlar	15
2.2.2.2.1 Slotsuz Demirsiz Yassı Lineer Motorlar	15
2.2.2.2.2 Slotsuz Demirli Yassı Lineer Motorlar.....	15
2.2.2.2.3 Slotlu Demirli Yassı Lineer Motorlar.....	16
2.2.2.3 U Kanal Şeklindeki Lineer Motorlar.....	17
2.2.3 Çekirdek Tipine Göre Sınıflandırma	18
2.2.3.1 Demir Çekirdekli Lineer Motorlar	18
2.2.3.2 Hava Çekirdekli Lineer Motorlar.....	19
2.2.3.3 Slotsuz Lineer Motorlar	20
2.3 Tez Kapsamındaki Lineer Motorun Yapısı	22
3. LİNEER MOTOR TASARIMI.....	23
3.1 Lineer Motor Yapısını Oluşturan Materyaller.....	28
3.1.1 NdFe35 Sabit Miknatıslar	28
3.1.1.1 Miknatısların Manyetik Parametreleri	30
3.1.1.2 Sıcaklığın Miknatıslığa Etkisi	31
3.1.2 Steel_1008 Malzeme Özellikleri	32
3.2 Lineer Motor Tasarım Parametreleri.....	33
3.3 Lineer Motorun Matematiksel Modellenmesi	42
4. LİNEER MOTORUN MANYETİK MODELLEMESİ VE ANALİZİ.47	47
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	48
4.2 Lineer Motorun İki Boyutlu (2D) Modeli ve Analizi.....	49
4.2.1 Generatör Mod Çalışma Simülasyon.....	49
4.2.2 Boşta Çalışma Simülasyonu	53
4.3 Lineer Motorun Üç Boyutlu (3D) Modeli ve Analizi	60
5. LİNEER MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI	63
5.1 Lineer Motor Sürücü Blok Şeması.....	63
5.2 Lineer Motor Sürücü Çalışma Prensipleri	64
5.3 Lineer Motor Sistem Tasarımı	66

5.3.1	MCU Kontrol Birimi	66
5.3.2	3 Faz PWM Inverter	67
5.3.3	Enkoder	68
5.3.4	Voltaj Regülatörü.....	71
5.4	Lineer Motor Sürücü Yazılımı	72
5.4.1	Sürücü Sistemi Akış Diyagramı	72
6.	LİNEER MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE BULGULAR.....	75
6.1	Stator Gövde İmalatı	75
6.2	Forcer İmalatı	76
6.3	Bobin İmalatı	77
6.4	Sürücü İmalatı ve Motorun Son Hali	78
6.5	DeneySEL Çalışma Bulguları	79
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	87
8.	KAYNAKLAR.....	89
9.	ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Lineer motorların makro seviyedeki uygulamalarına bir örnekte Maglev trenleridir.....	1
Şekil 2.1: Döner bir motorun paketini açmak doğrusal bir motor oluşturacaktır.....	7
Şekil 2.2: Döner motor ve lineer motor yapısının karşılaştırılması	8
Şekil 2.3: Forcerın hareketi	8
Şekil 2.4: Fırçalı lineer motor yapısı.....	10
Şekil 2.5: Fırçasız motorlarda hall sırası ve faz akımları.....	11
Şekil 2.6: Fırçasız motorlarda komütasyon tipleri	12
Şekil 2.7: Fırçasız lineer motor yapıları.....	13
Şekil 2.8: Fırçasız lineer motorlarla donatılmış yüksek hızlı pick and place makinaleri.....	13
Şekil 2.9: Tüp şeklindeki lineer motor yapısı	14
Şekil 2.10: Yassı lineer motor.....	15
Şekil 2.11: (a) Slotsuz demirsiz yassı lineer motor, (b) Slotsuz demirli yassı lineer motor, (c) Slotlu demirli yassı lineer motor	16
Şekil 2.12: U kanal linner motor yapısı	17
Şekil 2.13: Demir çekirdekli lineer motor yapısı.....	18
Şekil 2.14: Hava çekirdekli lineer motor yapısı.....	20
Şekil 2.15: Çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer motor yapısı	22
Şekil 3.1: Çift taraflı hava çekirdekli lineer motor çalışma prensibi (PI 2020)	23
Şekil 3.2: Global tasarım parametreleri (Vărăticeanu 2014)	24
Şekil 3.3: Bir kutbun kapladığı kesit alanı (Sg)	25
Şekil 3.4: Tasarımda kullanılan NdFe35 mıknatıs biçimi.....	29
Şekil 3.5: Bir manyetik tele ait histerezis döngüsü ailesi.....	31
Şekil 3.6: Steel-1008 çeliğinin B-H eğrisi	32
Şekil 3.7: NdFe35 mıknatıslarının alan yönlerinin belirlenmesi ve stator gövde üzerinde yerleşimi	35
Şekil 3.8: Zıt mıknatıslanma yönüne göre fazlarda indüklenen gerilim eğrisi .	35
Şekil 3.9: Zıt mıknatıslanma yönüne göre fazlarda oluşan akı bağlantısı.....	36
Şekil 3.10: Zıt mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı çizgilerinin dağılımı.....	36
Şekil 3.11: Zıt mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı yoğunluğunun dağılımı.....	36
Şekil 3.12: NdFe35 mıknatıslarının alan yönlerine göre stator gövde üzerine yerleşimi	37
Şekil 3.13: Aynı mıknatıslanma yönüne göre fazlarda indüklenen gerilim eğrisi	37
Şekil 3.14: Aynı mıknatıslanma yönüne göre fazlarda oluşan akı bağlantısı ...	37
Şekil 3.15: Aynı mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı çizgilerinin dağılımı.....	38
Şekil 3.16: Aynı mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı yoğunluğunun dağılımı.....	38
Şekil 3.17: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu fazlarda indüklenen gerilim eğrisi.....	39

Şekil 3.18: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu fazlarda oluşan akı bağlantısı	40
Şekil 3.19: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu manyetik akı çizgilerinin dağılımı	40
Şekil 3.20: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	40
Şekil 3.21: Tasarımı gerçekleştirilecek lineer motorun 2 ve 3 boyutlu çizimi	42
Şekil 3.22: Manyetik alan biriminin çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı doğrusal motordaki yapısı (Qian 2019).....	43
Şekil 3.23: Manyetik alan biriminin görseli.....	46
Şekil 4.1: Tasarlanan motorun iki boyutlu ağ örüntüsü (mesh).....	48
Şekil 4.2: Tasarlanan motorun iki boyutlu (2D) modeli	49
Şekil 4.3: Generatör mod açık devre şeması.....	50
Şekil 4.4: Generatör mod analizinde fazlarda indüklenen gerilim eğrisi.....	50
Şekil 4.5: Generatör mod analizinde fazlarda oluşan akı bağlantısı	51
Şekil 4.6: Generatör mod analizinde kuvvet-zaman eğrisi	52
Şekil 4.7: Generatör mod analizinde manyetik akı çizgilerinin dağılımı.....	52
Şekil 4.8: Generatör mod analizinde oluşan manyetik akı yoğunluğu	53
Şekil 4.9: Lineer motor için Maxwell Circuit Editor de düzenlenmiş harici uyarma devresi	53
Şekil 4.10: Lineer motorun boşta çalışma analizi sonucu ortalama elektromanyetik kuvveti.....	54
Şekil 4.11: Lineer motorun bobin uyartım akım grafiği	56
Şekil 4.12: Lineer motorun boşta çalışma analizi sonucu fazlarda indüklenen gerilim	56
Şekil 4.13: Lineer motorun boşta çalışma analizi sonucu fazlarda oluşan akı bağlantısı	56
Şekil 4.14: Lineer motorun 0. saniyedeki manyetik akı çizgilerinin dağılımı ...	57
Şekil 4.15: Lineer motorun 83.67 saniyedeki manyetik akı çizgilerinin dağılımı.....	57
Şekil 4.16: Lineer motorun 0. saniyedeki manyetik akı yoğunluğu	57
Şekil 4.17: Lineer motorun 83.67 saniyedeki manyetik akı yoğunluğu	58
Şekil 4.18: Lineer motorun 0. saniyedeki manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı.....	58
Şekil 4.19: Lineer motorun 103.35 saniyedeki manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı	59
Şekil 4.20: Lineer motorun manyetik alan şiddeti $H(A/m)$	59
Şekil 4.21: Lineer motorun birim alandaki akım yoğunluğu (A/m^2)	59
Şekil 4.22: Lineer motorun üç boyutlu (3D) modelinin oluşturulması.....	60
Şekil 4.23: Lineer motorun Ansys Maxwell ortamında üç boyutlu (3D) modeli.....	60
Şekil 4.24: Dört yüzlü eleman (tetrahedra).....	61
Şekil 4.25: Tasarlanan motorun üç boyutlu ağ görüntüsü (mesh)	61
Şekil 4.26: Toplam oluşan ağ (mesh) sayısı	61
Şekil 4.27: Lineer motorun üç boyutlu modelinin manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	62
Şekil 4.28: Lineer motorun üç boyutlu modelinin manyetik alan şiddeti $H(A/m)$ grafiği	62
Şekil 5.1: Lineer motor sürücü blok şeması.....	63
Şekil 5.2: Motor faz akım diyagramı	64
Şekil 5.3: L6234 sürücü entegrasyonu ile lineer motor bağlantısı.....	65

Şekil 5.4: Arduino nano pin diyagramı	66
Şekil 5.5: L6234 3 Faz sürücü entegresi blok diyagramı	67
Şekil 5.6: H köprüsü kontrol bloğu	68
Şekil 5.7: Artırımlı optik döner kodlayıcı şeması	69
Şekil 5.8: Artırımlı optik döner kodlayıcı A ve B faz çıkış sinyalleri	70
Şekil 5.9: Arduino nano için voltaj regülatör devre şeması	71
Şekil 5.10: PlatformIo IDE geliştirme ortamı üzerinde yazılımın derlenmesi..	72
Şekil 5.11: Sürücü akış diyagramı	73
Şekil 5.12: Sürücü PWM sinyal çıkışlarının osiloskop ile kontrolü	74
Şekil 6.1: Mıknatısları yerleştirilmiş stator gövde	75
Şekil 6.2: Cnc tezgahından çıkan forcerın boyut kontrolü.....	76
Şekil 6.3: Lineer kızak ve MGN12h araba.....	76
Şekil 6.4: 3 faza ait sarımları yapılmış çekirdeksiz bobinler	77
Şekil 6.5: A, B ve C fazlarının bağlantı şeması	77
Şekil 6.6: (a) Sürücü pcb kart tasarımı, (b) Sürücü pcb kart 3D modeli.....	78
Şekil 6.7: Elektronik sürücü kartı	78
Şekil 6.8: Prototip imalatı gerçekleştirilen lineer motorun son hali	79
Şekil 6.9: Deneysel çalışma düzeneği.....	79
Şekil 6.10: C fazı bobin direnç ve endüktans değerlerinin ölçümü	80
Şekil 6.11: 4 çıkışlı osiloskop ile motor faz gerilim ve akımlarının ölçümü	81
Şekil 6.12: Boşta çalışma durumunda lineer motorun 3 faz akım eğrisi	81
Şekil 6.13: Boşta çalışma durumunda A faz – toprak arası %79 duty oranına sahip PWM dalga formu	82
Şekil 6.14: Boşta çalışma durumunda B faz – toprak arası %31 duty oranına sahip PWM dalga formu	82
Şekil 6.15: Boşta çalışma durumunda A ve B fazları arası geçiş dalga formu .	83
Şekil 6.16: Boşta çalışma durumunda A, B ve C fazlarına uygulanan PWM dalga formu	83
Şekil 6.17: (a)Yük hücresi çalışma diyagramı (b) Yük hücresi	84
Şekil 6.18:Boşta çalışma durumunda lineer motorun yük hücresi yardımı ile elde edilen kuvvet eğrisi.....	84
Şekil 6.19: 300 mm/s hız altında pozisyon-zaman eğrisi.....	85
Şekil 6.20: 410 mm/s hız altında pozisyon-zaman eğrisi.....	86
Şekil 6.21: 510 mm/s hız altında pozisyon-zaman eğrisi.....	86

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Çekirdek tiplerine göre lineer motor özelliklerinin karşılaştırılması.	21
Tablo 3.1: Tasarımı gerçekleştirilecek lineer motorun teknik özellikleri.	24
Tablo 3.2: Çeşitli sabit mıknatısların avantaj ve dezavantajları.	29
Tablo 3.3: Tasarımda kullanılan NdFe35 mıknatıs malzemesinin özellikleri. .	30
Tablo 3.4: Farklı tip mıknatısların Curie sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	32
Tablo 3.5: Tasarımda kullanılan Steel_1008 çelik malzemesinin özellikleri. ..	32
Tablo 3.6: Dairesel motor parametreleri ile lineer motor parametrelerinin karşılaştırılması.	33
Tablo 3.7: Optimizasyon parametreleri.....	34
Tablo 3.8: Güncellenmiş optimizasyon parametreleri.	39
Tablo 3.9: Tasarımı gerçekleştirilecek lineer motor parametreleri.....	41
Tablo 4.1: İki boyutlu analizde kullanılan bobin direnç ve endüktans değerleri.....	54
Tablo 6.1: Sarımları yapılan bobinlerin direnç ve endüktans değerleri.	80

KISALTMALAR LİSTESİ

AC	:	Alternatif Akım
BLDC	:	Fırçasız Doğru Akım
CAD	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	:	Bilgisayarlı Nümerik kontrol
DC	:	Doğru Akım
DSLIM	:	Çift Taraflı Doğrusal Asenkron Motor
EMF	:	Elektromotor Kuvvet
EMI	:	Eşdeğer Mıknatıslanma Yoğunluğunu
FSLM	:	Akı Anahtarlama Sabit Mıknatıslı Motor
FEM	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FEA	:	Sonlu Elemanlar Analizi
FDM	:	Eriyik Yığıma Modelleme
FSPM	:	Akı Anahtarlama Sabit Mıknatıs
LFSPM	:	Doğrusal Akı Anahtarlama Sabit Mıknatıslı Motor
LSRM	:	Lineer Anahtarlama Relüktans Motor
MAGLEV	:	Manyetik Kaldırma
MCU	:	Mikro Denetleyici Birimi
MEMS	:	Mikro Elektromekanik Sistemler
MLFSPM	:	Modüler Doğrusal Akı Anahtarlama Sabit Mıknatıs
MMF	:	Manyetomotor Kuvvet
MOSFET	:	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
NdFeB	:	Neodimyum Demir Bor
PMLSM	:	Sabit Mıknatıslı Doğrusal Senkron Motor
PWM	:	Darbe Genişlik Modülasyonu
RLES	:	Halatsız Asansör Sistemi
2D	:	İki Boyutlu
3D	:	Üç Boyutlu

ÖNSÖZ

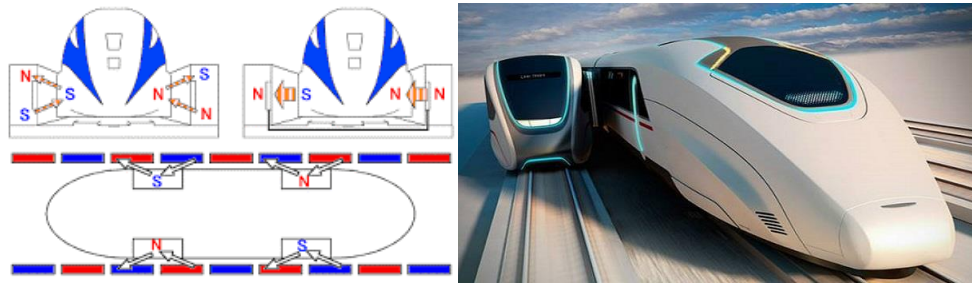
Bu çalışma esnasında, yüksek lisans eğitiminin başından beri her türlü desteğini esirgemeyen ve yanımda olan değerli tez danışmanım; Prof. Dr. Yusuf ÖNER hocama teşekkürü bir borç bilir, katkılarından dolayı sonsuz şükranlarımı iletirim. Yine fikir, öneri ve her türlü yardımlarından dolayı Sn. Metin ERSÖZ'e, teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışma süresince her zaman destekleriyle yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Günümüzün doğrusal hareket uygulamaları, endüstriyel uygulamalar başta olmak üzere, füze konumlama sistemleri, gen dizimi, optik konumlama, konveyör sistemleri, vinç sistemleri, akıllı ev sistemleri ve manyetik levitasyon gibi farklı birçok alanda her zamankinden daha fazla ilgi görmekte ve kullanılmaktadır. Lineer hareket kontrolü üzerine faaliyet gösteren firmalar, sürekli ilerleyen teknoloji çağında, daha hızlı üretim, doğru ve hassas konumlandırma, düşük bakım maliyeti ve uzun kullanım ömrüne sahip ürünler tasarlamaya ve geliştirmeye çalışmaktadır.

Lineer motor teknolojisine yapılan yatırımların ciddi boyutlarda olmasının ve geliştirme faaliyetlerinin tüm dünyada hız kazanmasının önemli sebeplerinden biri de kayış kasa, kremayer, bilyeli veya kılavuz vida mekanizmaları ile döner hareketten elde edilebilecek lineer hareket yerine doğrudan manyetik kuvvet ile elde edilebilen lineer hareketin daha geçerli olmasıdır. Aynı zamanda yüksek tekrarlanabilirlik, düşük çözünürlük ve büyük ivmelerin ihtiyaç duyulduğu uygulamalardaki çevrim zamanını büyük ölçülerde düşürebilirken, kullanıldığı uygulamanın da kalitesini artırmaktadır. Bunun yanında yüksek teknoloji ürünlerin temelini oluşturan MEMS (Mikro Elektromekanik Sistemler) ve Nanoteknoloji sistemlerinin gelişiminde önemli bir basamak olmuştur. Lineer motorlar mikro elektromekanik sistemler teknolojisinde waferların hassas konumlandırılması ve kalıpların üzerlerine yerleştirilmesi işlevlerinde vazgeçilemezdir. Yüksek çözünürlük ve tekrarlanabilirlikle bu alanda kullanılacak en hızlı hareket eden 10 nanometre çözünürlüğe sahip araçlardır. Oldukça zor bir uygulama örneği olarak da Trilogy Systems Corporation'ın lineer motorlarıyla gerçekleştirilmiş DNA/gen dizilimi uygulaması gösterilebilir.



Şekil 1.1: Lineer motorların makro seviyedeki uygulamalarına bir örnekte Maglev trenleridir.

Lineer motorlar, yakın zamanda dünyanın hız rekorunu kıran yeni nesil yüksek hızlı "maglev" trenlerde en iyi itici güç kaynağı olarak bilinir. Maglev trenleri çok yüksek hızlarda güvenli yolculuk vaat ediyor. Bununla birlikte, pahalıdırlar ve mevcut demiryolları ile uyumsuzdurlar. Maglev trenleri ile ilgili çoğu araştırma Japonya ve Almanya'da yapılmıştır. "MAGLEV" sözcüğü İngilizce "magnetic levitation" sözcüklerinin kısaltılmasıyla elde edilmiş, yani "manyetik olarak havada tutma, yükseltme" anlamına gelir (Wikipedia 2020). Bu kavram Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Bu örneklerden de anlaşılabilceği gibi geliştirilmeye açık olan lineer motor ve sürücüler teknolojileri, araştırma konusu olarak ele alınmaya değer bir konudur.

Lineer motorların sağladığı avantajlara ve farklı uygulama alanlarına II. Ulusal Hidrolik ve Pnömatik sergisinin de aşağıdaki gibi dikkat çekilmiştir:

Teknolojideki gelişmeler neticesinde doğrusal tahrik elemanlarına alternatif yeni çözümler eklenmektedir. Gelenekselleşmiş lineer tahrik sistemleri olan hidrolik, pnömatik, vidalı mil ve diğer elektromekanik çözümlere alternatif olarak lineer motorlar giderek kullanılabilişliğini arttırmaktadır. Lineer motorlar sahip oldukları avantajları ile diğer sistemlere karşı ciddi bir alternatif oluşturmaktadır. Bilinçli ve araştırmacı kimliğe sahip tasarımcıların dikkatini çeken iki konu aynı zamanda lineer motorların son zamanlarda popülaritesini artırmasını sağlayan faktörlerdir. Bunlardan birincisi manyetik temelli malzemelerin işlenmesi ve maliyetlerinin eskiye göre çok daha uygun olmasıdır. İkinci olarak da dijital kontrol teknolojisindeki gelişmeler yüksek performanslı cihazların yüksek hassasiyetlerde ölçülebilir ve kontrol edilebilir hale gelmesini sağlamıştır. Hidrolik sistemlerde enerjinin yağ basıncına, pnömatik sistemlerde hava basıncına çevrimi, olası arızalarda ve normal seyrindeki gürültü dahil kirlilikler, lineer motorları daha da tercih edilebilir kılmaktadır. Elektromekanik sistemlerin içerdiği vidalı mil, triger kayış, kremayer dişli v.b aktarma ve çevrimlerden kaynaklanan yataklama, periyodik bakım ve oluşan boşluk sorunlarının lineer motor sistemlerinde yer almaması, lineer motorlara artı puan kazandırmaktadır (Karaçar 2001).

Bu tez çalışmasında bir lineer motor tasarımı, bu motorun basit kontrolünü sağlayan sürücü tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, ana boyut ölçüleri, parametreleri ve kontrol metodu ele alınarak çift taraflı çekirdeksiz basit hassas konum kontrolü yapılabilen lineer motor tasarlamak ve uygulanabilirliğini

sağlamaktır. Bu durum çerçevesinde öncelikle motorun mekanik hesapları yapılmış ve bu hesaplamalara dayanılarak Solidworks programı yardımıyla motorun üç boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Üç boyutlu tasarımın ardından analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS Maxwell programında 2D manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Lineer motor tasarımı ve manyetik benzetimi yeterli seviyede gerçekledikten sonra, motorun enerjilendirilmesi ve istenilen şekilde sürülebilmesi için sürücü tasarımı ele alınmıştır. Lineer motor ve sürücüsü tasarımları ardından lineer motorun hareketini optimum seviyede kontrol altında tutarak, makul kullanılabilir bir prototip ürün haline getirilmiştir. Yapılan analiz sonuçları ile prototip motordan elde edilen deneysel test verileri karşılaştırılmış ve yapılabilecek iyileştirmeler ile elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

1.1 Literatür Araştırması

Lineer elektrik motorlarının geçmişi, 1840'lı yıllara, Londra'da, King's College'deki Charles Wheatstone'un çalışmalarına kadar izlenebilir, ancak Wheatstone'un modeli pratiğe dönüştürülemeyecek kadar verimsizdi. Uygun bir lineer endüksiyon motoru, trenleri veya asansörleri sürmek için ABD Patenti 782,312'de (1905 yılında Alfred Zehdan adına kayıtlı patentlerde) açıklanmaktadır. 1935 yılında ise ilk çalışan lineer motor modelini Alman mühendis Hermann Kempler ortaya koymuştur. 1940'ların sonlarında, Manchester Üniversitesi'nden Prof. Dr. Eric Laithwaite her boyutuyla çalışan bir lineer motor sistemi gerçekleştirmiştir. İngiltere'nin tekstil üretimi merkezi olan Lancashire'da yetişmiş olan Prof. Dr. Eric Laithwaite lineer motor kullanarak bir dokuma tezgahının mekiğine doğrusal hareket verdirmeyi başarmıştır. Prof. Dr. Eric Laithwaite buluşunu "açılmış sıradan bir elektrik motorundan farkı yok" sözleriyle açıklamıştır. Ana çalışma prensibi ise üzerinde oluşturulan manyetik alanlar ile sürtünmeyle yavaşlamayan duran ve hareket eden bir cisim bulunmaktadır. Bu durum yıllarca anlaşılır olmasına rağmen ilk pratik uygulamayı Prof. Dr. Eric Laithwait, doğrudan lineer sürüşü hem mekanizmada hem de transportta gerçekleştirerek, ticari gelişimine öncülük eden isim olmuştur. İlerleyen süreçte lineer motorlar yüksek kuvvette veya yüksek hızda olmak üzere iki ana özellik üzerinden gelişimlerini sürdürmüşlerdir. Lineer motorlar, hareketli parça ile kızak

arasında fiziksel temas gerektirmediğinden, 1960'larda ve 70'lerde gelişmiş ulaşım sistemlerinde ortak bir fikstür haline gelmiştir.

Zhu ve arkadaşı Cho (2010), asansör sistemleri üzerinde çalışmış ve “Halatsız asansör sistemi için sabit mıknatıslı doğrusal senkron motorun yapı seçimi” isimli raporlarını yayınlamışlardır. En önemli gereksinimin halatsız asansör sistemi (RLES) için yüksek kuvvet yoğunluğu olduğunu belirtmişlerdir. Büyük bir kilit kuvvetine sahip olmasının yanı sıra, demir çekirdek sabit mıknatıslı doğrusal senkron motor (PMLSM) en iyi seçenek olarak gösterilmektedir. Tetik kuvveti, normal kuvvet ve PMLSM'nin itme kuvvetinin özellikleri farklı yapılarla incelenmiştir. Sonuç olarak, sonlu yöntemler analizinden sonra en iyi performans için fraksiyonel yarıklı sargılı uzun stator çift taraflı yarıklı demir çekirdek tipi PMLSM seçilmiştir.

Buarse ve Subsingha, (2012) uzay vektör darbe genişlik modülasyon tekniğini kullanarak çift taraflı lineer endüksiyon motor kontrolü üzerine çalışmalar yapmışlardır. 500W, 300 Vmax, 50 Hz güç oranına sahip bir çift taraflı doğrusal asenkron motor (DSLIM) sundular. Kullanılan kontrol tekniği, 3 fazlı gerilim kaynak invertörüne uygulanan ortalama uzay vektör darbe genişlik modülasyonudur. DSPACE'den gerçek zamanlı bir kontrol ara yüz kartı (DS1104) kullanıldı ve yazılım geliştirme kiti olarak Matlab / Simulink simülasyon ortamı kullanılmıştır. Kontrolör tasarımı, deneylerle başarıyla doğrulanmıştır. DSLIM'in hem motor hızı hem de rotasyonel kontrolörü, 3 fazlı voltaj kaynağı invertörü ile test edilmiştir.

Cao ve arkadaşları (2013) yeni bir tamamlayıcı ve modüler doğrusal akı anahtarlama sabit mıknatıslı (FSPM) motor serisinin incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmalarda, geleneksel akı anahtarlama sabit mıknatıslı motorlar (FSLM) ve döner FSLM'yi karşılaştırmışlardır. Geleneksel FSLM'nin bobinin sonunda dengesiz manyetik devreye sahip olduğu ve aynı zamanda daha fazla dişli kuvvet ve kuvvet dalgalanmasına sahip olduğu belirtilmektedir. Sonlu elemanlar yönetimi FEM, deneysel sonuçları doğrulamak için dişli kuvvetini ve itme kuvveti dalgalanmasını azaltmak için farklı taşıyıcı / stator kutup aralığı oranları için kullanılır. Farklı kutup aralığı oranlarına sahip modüler doğrusal akı anahtarlama sabit mıknatıslı (MLFSPM) motorları için genel tasarım ilkeleri sonuçlandırılmıştır.

Cao ve arkadaşları (2014) kısa çift taraflı birincil taşıyıcıda hem armatür sargılarına hem de mıknatıslara sahip bir doğrusal akı anahtarlamalı sabit mıknatıslı motorlar (LFSPM) üzerinde çalışmıştır. Stator yalnızca boyunduruksuz bir demir çekirdekten oluşur. Tek ve çift taraflı motoru karşılaştırdılar ve önerilen motorun daha avantajlı olduğunu kanıtlamışlardır. Daha yüksek güç yoğunluğu, daha küçük sürtünme kuvvetlerine sahiptir ve genel olarak daha verimlidir. Motorun özellikle şehir içi raylı geçiş ve yüksek binalardaki asansörler gibi uzun stator uygulamaları için uygun olduğu görülmüştür. Hesaplamalar sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak yapılmıştır.

Lineer motor teknolojilerdeki en önemli sorunlardan biri hassas kontroldür. K. Sato, (2014) , lineer motorların 100G'nin üzerinde bir hızlanma ile hareket edebileceğini ve aynı zamanda yüksek hassasiyet ve yüksek hızda da yetenekli olduklarını belirten, 12 m / s hız ile 500 nm'ye kadar konum doğruluğu sağlayabilen çalışmalar yapmıştır.

Daldaban ve Ustkoyuncu (2006) düşük maliyetli çift taraflı lineer anahtarlamalı relüktans motor üzerine yaptıkları çalışmalarda yeni bir lineer anahtarlamalı relüktans motor (LSRM) yapısının tasarımını göstermişlerdir. Bu model için çift taraflı konfigürasyon kullanmışlar ve LSRM, 30 VDC gerilim beslemeli üç asimetrik MOSFET tarafından sürülmüştür. Bu konfigürasyon, birçok endüstriyel uygulama için daha düşük maliyetli daha yüksek bir güç oluşturmuştur. Motorun sonlu yöntemler analizi gerçekleştirilmiş ve test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, sonlu yöntemler analizinin yaklaşık %99 oranında deneysel sonuçlarla ilişkili olduğunu göstermiştir.

Minghu ve arkadaşları (2010) eşdeğer mıknatıslanma yoğunluğunu (EMI) metodunu kullanarak çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer servo motorun (DAPMLSM) manyetik alanını analiz etmişlerdir. Doğru FEA sonuçlarıyla, formüller ve deneysel sonuçlar kanıtlanmıştır. Sonuçları, itme dalgalanmasını azaltmak ve yüksüz manyetik harmonikleri analiz etmek için kullanmışlardır. Sargı adımını ve mevcut sırayı değiştirerek, sinüzoidal olmayan bir manyetik alandan gelen harmoniklerin ve doğrusal bir motorun son etkilerinin eşit olduğunu gösteren daha

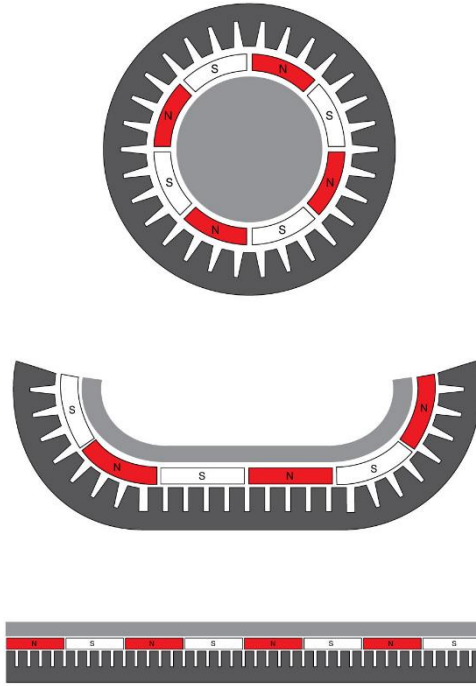
kararlı bir itme elde etmişlerdir. Amaç, optimum sinüzoidal manyetik alan ve kararlı itme elde etmektir. Bu amaca ulaşmak için, sargılar da dahil olmak üzere motorun ana boyutları için tasarım yasaları üzerine tartışmışlardır.

Kim, Jeong ve Cho (2004) lineer motorlarla donatılmış takım tezgâhının temel davranış üzerine yaptıkları çalışmalarda amaç, bir FEM aracı kullanarak bir motorun termal davranışını göstermektir. Takım tezgâhı endüstrisinde büyük bir sorun olan yüksek hız ve hassasiyete sahip bir besleme sürücü sistemi geliştirme fikrini desteklemişlerdir. Dönüşte lineer motorlara sahip yüksek hızlı besleme tahrik sisteminin ısı sorunları yarattığını, özellikle yüksek hızlarda sürüldüğünde LM bloğunun bilyalı veya makaralı yatağında sürtünme ısısı üretildiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, doğrusal cetvel ve takım tezgâhı yapısının ısıl deformasyonunun neden olduğu ısıl hata ölçülerek ısıl deformasyon özellikleri belirlenmiştir. Baskın termal hata bileşenlerini tanımlamak için FEM kullandılar ve önerilen analiz şemasının baskın termal hata bileşenlerini ve bunların büyüklüklerini belirlemede etkili olduğunu göstermişlerdir.

Naso (2010) boru şeklindeki doğrusal motorların hassas konum kontrolü üzerine, sürtünme ve elektromanyetik fenomenler gibi belirsizlikleri hesaba katan ve bunları Lyapunov tasarımına dayalı bir öğrenme yasası kullanılarak çevrimiçi olarak eğitilen radyal temel işlevli bir sinir ağı ile yaklaştıran bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, mikro metrik konumlandırma toleranslarına sahip uyarlanabilir bir kontrol şemasını incelemiştir. Yaklaşımcı, izlem hatasını ve model tahmin hatasını birleştiren bir bileşik uyarlama yasası kullanılarak eğitilmiştir. Çalışma, hassas bir kontrolün mümkün olduğunu göstermiştir.

2. LİNEER MOTOR

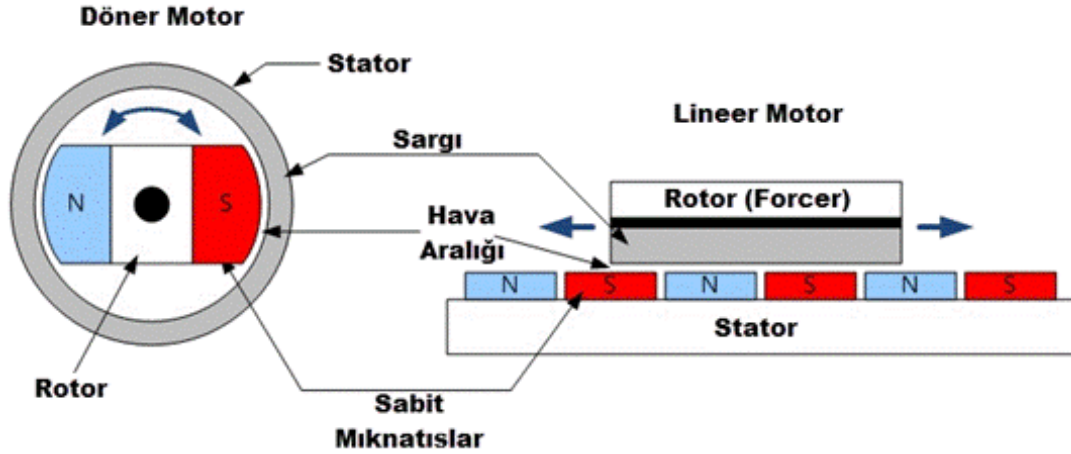
Lineer motor, manyetik alan etkisiyle mekanik hareketi dairesel bir hareket olmayan yatay eksen (x ya da y eksenleri) üstünde itme ve çekme kuvvetleri aracılığıyla, rotora hareket kabiliyeti veren bir elektrik makinesidir. Lineer motorların temel tasarım prensibi Şekil 2.1’de gösterildiği gibi basitçe dairesel hareket üreten motorların, statorlarının ve rotorlarının kesilerek açılmasına dayanmaktadır. Kısaca lineer motorlar indüksiyon motorlarının X-Y düzleminde açılmış halidir. Lineer motor, sonsuz yarıçaplı bir döner motor olarak da düşünülebilir.



Şekil 2.1: Döner bir motorun paketini açmak doğrusal bir motor oluşturacaktır.

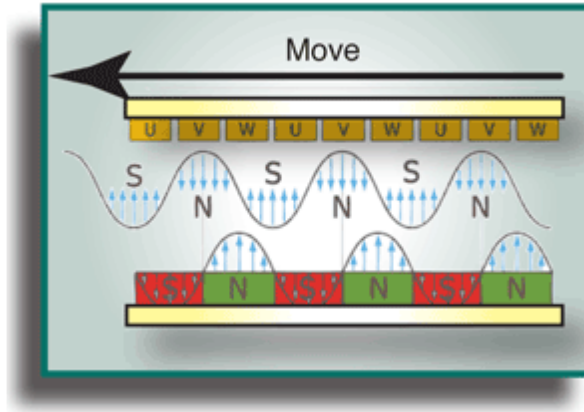
2.1 Lineer Motorun Yapısı ve Çalışma İlkesi

Lineer motor, dairesel hareket eden elektrik motorlarında olduğu gibi hareketli ve hareketsiz olmak üzere iki parçadan oluşur. Hareket etmeyen sabit parçaya Şekil 2.2’de gösterildiği gibi stator ismi verilirken, lineer motorun yapısına göre uzunlukları sabit veya arttırılabilir olabilir. Hareketsiz parça statorun boyutu, lineer motor hareketli parçasının(forcer) da hareket alanını belirler.



Şekil 2.2: Döner motor ve lineer motor yapısının karşılaştırılması

Döner motorlarda rotor olarak adlandırılan hareketli parça ise lineer motorlarda forcer ismini alır ve genelde statordan küçüktür. Stator ve forcer arasındaki hareket yatay eksendeki itme ve çekme kuvvetleriyle sağlanır. Bu itme ve çekme kuvvetleri stator ve forcer yerleştirilen bobin veya kalıcı mıknatıs malzemeler sayesinde elde edilir. Kontrol ünitesinde gelen rotor pozisyon bilgisine göre bobinler uygun şekilde enerjilendirilerek manyetik kutuplar arasındaki itme ve çekme kuvveti oluşturulur. Oluşan bu manyetik kuvvet Şekil 2.3'teki gibi forcerin hareket etmesini sağlar.



Şekil 2.3: Forcerin hareketi

Lineer motorların kontrollüde döner motorlarınkine ile benzerlik gösterir. Fırçasız dairesel motorlarda olduğu gibi fırçasız lineer motorlarda da hareketli ray ile forcer arasında fırça gibi bir temas yoktur. Dairesel motorlardaki gibi statorun sabit kalıp rotorun manyetik alanı takip etmesinden farklı olarak lineer motorlarda hem forcer hemde mıknatıslı stator hareket edebilir. Özellikle hassas konumlandırma sistemlerinde hareketli forcer ve sabit stator kullanılır. Fakat lineer motorlar bu

yapıdan farklı olarak sabit forcer ve hareketli stator olarak da kullanılabilir. Hareketli forcer durumunda forcerin ağırlığı üzerine eklenen yükün ağırlığının yanında çok küçük kalır ve daha fazla yük taşıyabilir. Fakat forcer üzerinde bobinlerin enerjilenmesini sağlayan kabloların forcerı takip etmesi gerektiğinden son derece esnek ve hareketli olmaları gerekir. Hareketli stator durumunda ise motorun hem üzerinde yükü hem de mıknatıslı gövdesini hareket ettirmesi gerekmektedir. Bu durumda kabloların hareketsiz kalacağından dolayı yerleştirilmesi konusunda herhangi bir problem yaşanmamaktadır.

Lineer motor tasarımının arkasındaki temel fiziksel ilke Lorentz kuvvet yasasıdır. Bu yasa, bir motorun oluşturabileceği kuvvet (F) miktarının, manyetik alan yoğunluğu (B) ile tel makarasındaki (L) tel uzunluğunun çarpımının akım miktarı (I) ile çarpımına eşit olduğunu belirtir.

Dairesel motorda torku oluşturan elektromanyetik kuvvet lineer motorda da lineer kuvveti oluşturmaktadır. Bu nedenle lineer motorlar dairesel motorlarla aynı sürücü yapısı ve programlanabilir konumlama sistemlerini kullanabilirler. Dairesel motorlar da tork newton metre (Nm) olarak ölçülürken lineer motorlarda da kuvvet newton (N) olarak ölçülür. Yine dairesel motorlarda hız dev/dk olarak ölçülürken lineer motorda m/s olarak ölçülür. Diğer elektrik motor tiplerini göre lineer motorlar elektrik enerjisini doğrudan mekanik kuvvete çevirir ve doğrudan yüke aktarır. Arada başka bir mekanizmaya ihtiyaç yoktur ve yüksek hassasiyet ve limitsiz yol almak mümkündür. Çağımızda lineer motor uygulamaları 10 m/sn lik hızlara ve 10g lik ivmelenmelere ulaşabilmektedir. Teorik olarak ise lineer motorlar 20g lik ivmelere ve 40 m/sn lik hızların üstüne rahatlıkla çıkabilmekte ancak yataklama ve ihtiyaç duyulan hareket parametreleri bu performansı sınırlamaktadır. Yağlama gerektirmez, aşınma deforme olma yoktur ve bu nedenle bakım maliyetleri oldukça düşüktür veya hiç yoktur. Ayrıca geniş sistem bant genişliği ve sahip olduğu rijit yapısı nedeniyle daha hassas konum tekrarlama bilirligi, yüksek doğruluk ve yüksek hızlara ulaşabilmek mümkündür.

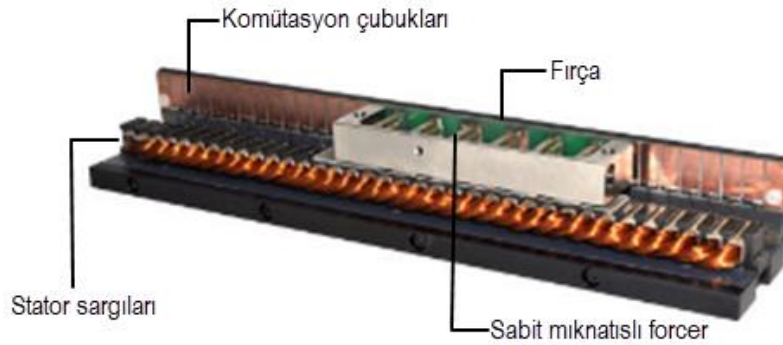
2.2 Lineer Motor Tiplerinin Sınıflandırılması

Lineer motorlar uygulama alanı ve kullanım amacına göre farklı yapılarda tasarlanabilmesine rağmen en çok kullanılan yapı, statorun sabit mıknatıslardan oluştuğu, hareketli parçanın (forcer) ise bobinlerden oluştuğu formdur. Bu yapının en çok tercih edilmesinin sebebi, statora sabit mıknatısları ekleme veya çıkarma yöntemiyle motorun hareket alanını değiştirmek ve bobinlerin sadece hareketli parça üzerinde yer alması sebebiyle çok daha basit bir sürücü ünitesi ile motoru kontrol edebilmektir. Her tipte lineer motor kavramı aynı işlevselliğe sahipken oluşan itme-çekme kuvveti, kontrol ve verim değişiklik gösterir. Lineer motorlar çekirdek tipine, komütasyonun sağlanmasına ve şekillerine göre sınıflara ayrılmaktadır (Yapıcı ve Cengiz 2006).

2.2.1 Komütasyonun Sağlanmasına Göre Sınıflandırma

2.2.1.1 Fırçalı Lineer Motorlar

Mıknatısların hareketli parça forcer üzerinde, sargıların ise stator üzerinde yer aldığı fırçalı lineer motorlarda komütasyon, forcerdaki fırçalar ile statordaki sargılara bağlı komütasyon çubuğu tarafından sağlanır (Şekil 2.4). Forcer stator üzerinde hareket ettikçe fırçalar sargıların akım yönlerini değiştirerek kutup yönlerini de değiştirir. Ancak statordaki sargıların döşenmesi maliyet gerektirir ve malzeme harcamasını artırır. Komütasyon çubukları ve fırçalı yapı nedeniyle yüksek hızlara çıkmak sınırlı düzeydedir.



Şekil 2.4: Fırçalı lineer motor yapısı

Fırçalı Lineer Motor Avantajları:

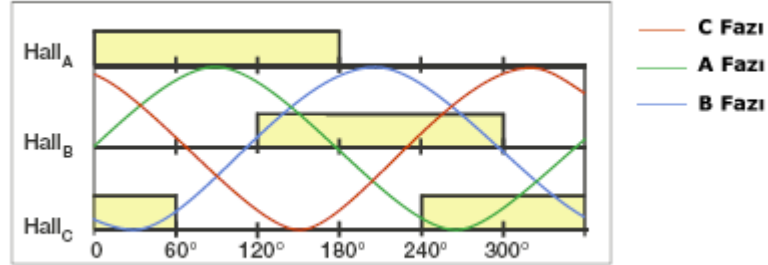
- Düşük profil ve küçük kesit yüzeyine sahip olması
- Farklı genişlik ve uzunluklarda tasarlanabilmesi
- Düşük maliyetli sinyal yükleticilerle kontrol edilebilmesi

Fırçalı Lineer Motor Uygulama alanları:

- Koordinat ölçme makinaları,
- Denetleme makinaları,
- Parça transferleri

2.2.1.2 Fırçasız Lineer Motorlar

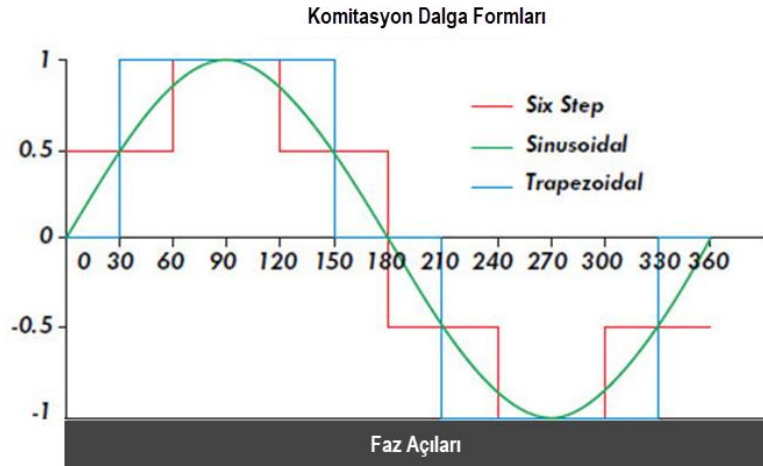
Fırçasız lineer motorlar Şekil 2.5'te gösterildiği gibi 3 fazlı akım ile komütasyon sağlanır. Forcerın konum kontrolü için stator üzerinde yer alan mıknatısların oluşturduğu manyetik alana göre sinyal üreten hall effect sensörler kullanılır. Bu tip lineer motorların hareketi hall effect sinyalleri sürekli okunmasıyla sağlanabilir veya sadece ilk kalkış anında bu sinyal verilerini okuyup, kalkıştan sonra sinüzoidal komütasyon ile devam edilebilir.



Şekil 2.5: Fırçasız motorlarda hall sırası ve faz akımları

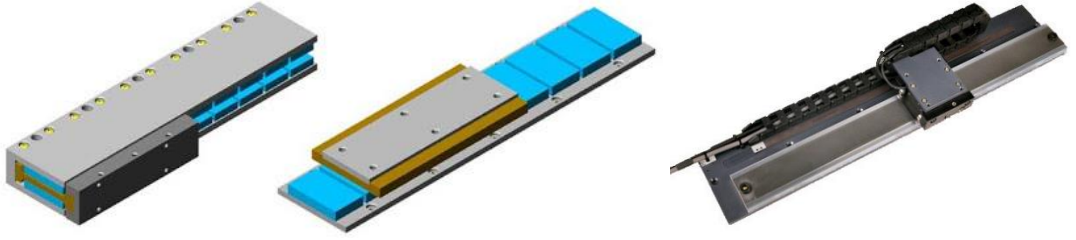
Komütasyon tipleri Şekil 2.6'da gösterildiği gibi 3 çeşittir. Bunlar trapezoidal, altı adımlı kare dalga modeli ve sinüzoidal komütasyondur. En basit komütasyon biçimi trapezoidal komütasyondur. Dijital hall effect sensörleri başlangıç noktasından itibaren 30 derece açılı olarak hizalanmıştır. Hall effect sinyalinin çakıştığı her noktada faz sırası değişir ve böylece motorun komütasyonu meydana gelir. Bu en maliyetsiz komütasyondur. Trapezoidale çok benzeyen diğer komütasyon tipi ise altı adımlı kare dalga komütasyonudur. Altı adımlı kare dalga komütasyondaki fark ise iki akım

sensörü kullanılarak, komütasyon sırası ideal sinüzoidal faz akımına daha yakın tutulur.



Şekil 2.6: Fırçasız motorlarda komütasyon tipleri

Bu metot 2 akım durumunun kontroölünü gerektirdiğinden trapezoidal komütasyona göre daha maliyetlidir. Karışık sinyallere sebep olacağından bu iki metot da yüksek sıcaklıklarda çalışmama ve düzgün olmayan hareketlerin oluşumuna sebep olabilir. Sinüzoidal olarak sarılmış herhangi bir fırçasız lineer motorda en ideal sürüş metodu sinüzoidal komütasyonla elde edilir. Bunun için iki farklı yaklaşım vardır. Dijital olmayan hall effect sensörleri, mıknatıslı stator gövdenin manyetik kutuplarından geçtiğinde sinüzoidal sinyalin oluşmasına neden olur. Komütasyon için doğru olan bu sinyaller, lineer motoru doğru komüte etmek için daha sonra dönüştürülerek birleştirilir. Sinüzoidal komütasyonun maliyeti diğer ikisinden düşüktür fakat ortam oluşabilecek gürültü hall effect cihazlarını ve komütasyonu etkileyebilir. Diğer bir yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen yöntem ise yüksek çözünürlük enkoder cihazlarını kullanmaktır. Artımsal rotary enkoder sinyali hall effect sinyallerinde bir değişim bulunduğu dijital olarak motorun hangi komütasyon turunda olduğunu hassas bir şekilde saptamakta kullanılabilir. 120 derece faz açılına sahip iki sinyalin akım sinyali ile çarpılmasıyla komütasyon sağlanır. Bu metot en iyi sonucu verirken motor akımını, motor konumun ve hızını kontrol etmek için aynı işlemci kullanıldığından daha hızlı rejim zamanına ulaşma ve sıkışık servo döngüleri elde edilir. Sinüzoidal komütasyonun kullanılması lineer motorlarda hareketin daha düzgün elde edilmesine ve motorun daha az ısınarak daha verimli bir şekilde çalışmasına imkân sağlar. Şekil 2.7’de fırçasız lineer motor yapıları yer almaktadır.



Şekil 2.7: Fırçasız lineer motor yapıları

Fırçasız Lineer Motor Avantajları;

- Düşük Maliyet, Sessiz Çalışma,
- Yumuşak hareket geçişleri
- Düşük bakım periyodu,
- Yüksek hız, çabuk ivmelenme,
- Yüksek enerji verimliliği,
- Montaj ve kullanım rahatlığı,
- Küçük hacimlerde kullanabilme,

Fırçasız Lineer Motor Uygulama Alanları;

- Kayar kapı mekanizmaları
- Konum belirleme uygulamaları
- Robotik ve cnc tezgâh uygulamaları
- Doğrusal hareket gerektiren mekanizmalar



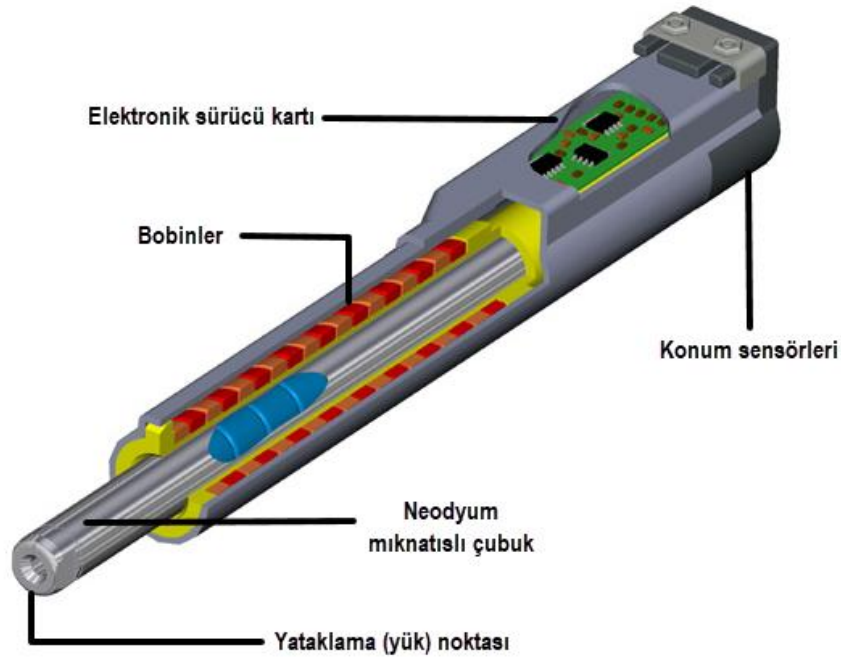
Şekil 2.8: Fırçasız lineer motorlarla donatılmış yüksek hızlı pick and place makineleri

Şekil 2.8’de yüksek hız ve hassasiyet gerektiren uygulamalarda fırçasız lineer motorun kullanımı gösterilmektedir.

2.2.2 Şekline Göre Sınıflandırma

2.2.2.1 Tüp Şeklindeki Lineer Motorlar

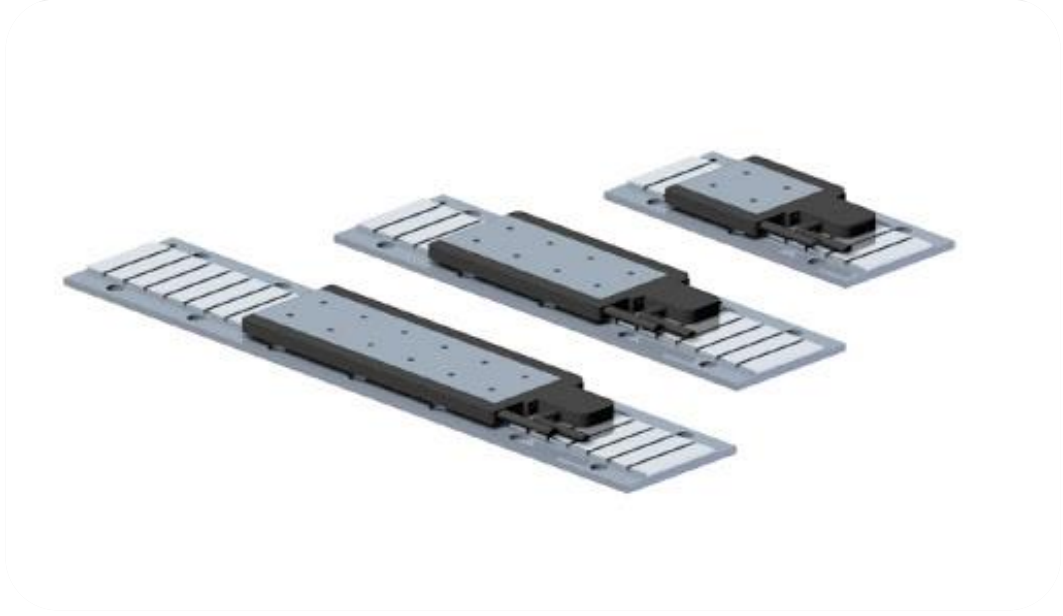
Bu motorlarda forcer yapısı Şekil 2.9’da gösterildiği gibi silindirikdir. Forcer mıknatısları tutan silindirik bir çubuk içerisinde hareket etmektedir. Ticari olarak ilk uygulama alanları bulan lineer motor tipidir. Manyetik düzeneği manyetik lineer aktüerlerinkine benzerdir. Bu motorlardaki tek fark torku arttırmak için bobin sargıları tekrar edilmiştir. Bobin sargı yapıları üç fazlı, hall effect cihazlarda kullanan fırçasız sinüzoidal komütasyon yapısıyla aynıdır. Hareketli parça forcer silindirik yapıdadır ve manyetik çubuğu itme/çekme kuvvetleri ile ileri geri hareket ettirir. Bu lineer motor yapısı manyetik alan değişimine hassas uygulamalar için elverişli değildir. Tüp şeklindeki linner motor tasarımı, en çok yaşanan problem alınan mesafenin uzamasıdır. Mesafe artışı çubuğun sehim yaparak mıknatısların forcera değmemesine neden olur. Motor yapısının tamamen silindirik olması ve lineer hareketin çubuk boyunca gerçekleşmesinden dolayı bu tip tasarımlarda sadece uç noktalardan yataklama yapılabilir. Buna göre tüp şeklindeki lineer motor yapıları, sehim problemi yaşamamak için belli bir limit dahilinde tutulmalıdır.



Şekil 2.9: Tüp şeklindeki lineer motor yapısı

2.2.2.2 Yassı Lineer Motorlar

Bu motor tipleri de kendi içerisinde slotsuz demirsiz, slotsuz demirli ve slotlu demirli olarak üçe ayrılır. Şekil 2.10'da yassı lineer motor yapısı yer almaktadır.



Şekil 2.10: Yassı lineer motor

2.2.2.2.1 Slotsuz Demirsiz Yassı Lineer Motorlar

Slotsuz demirsiz yassı lineer motor Şekil 2.11'de gösterildiği gibi alüminyum kaide içerisine monte edilmiş bobinlerden oluşur. Forcer içerisinde demir bulunmaması sebebiyle motorda manyetik kuvvetler veya adımlama (cogging) yoktur. Bu özellik bazı uygulamalarda yatak ömrünün uzamasını sağlar. Yapılacak olan uygulama tipine göre force üste veya kenar bölümlere yerleştirilebilir. Düzgün ve hassas hız kontrolü gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

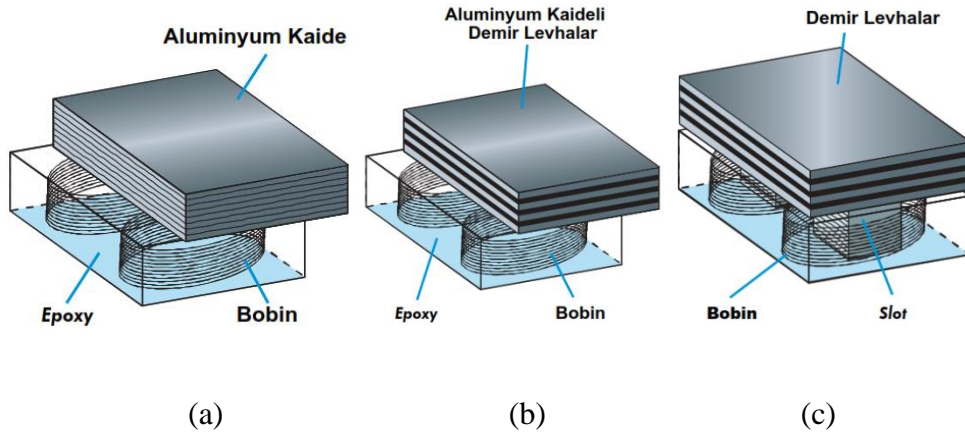
2.2.2.2.2 Slotsuz Demirli Yassı Lineer Motorlar

Slotsuz demirli yassı lineer motorlar demirsiz yassı motorlarla aynı yapıya sahiptir. Aralarındaki tek fark Şekil 2.11'de gösterildiği gibi bobinler önce demir plakalara sonra alüminyum kaide içerisine monte edilmiştir. Demir plakalar manyetik

alanı yönlendirmek ve kuvveti arttırmak için kullanılırlar. Force içerisinde yer alan demir plakalar nedeniyle forcer ile stator arasında bir çekim kuvveti meydana gelir ve bu kuvvet motorun oluşturduğu kuvvetle orantılıdır. Bu demir plakalar sebebiyle motorda bir adımlama kuvveti oluşur.

2.2.2.2.3 Slotlu Demirli Yassı Lineer Motorlar

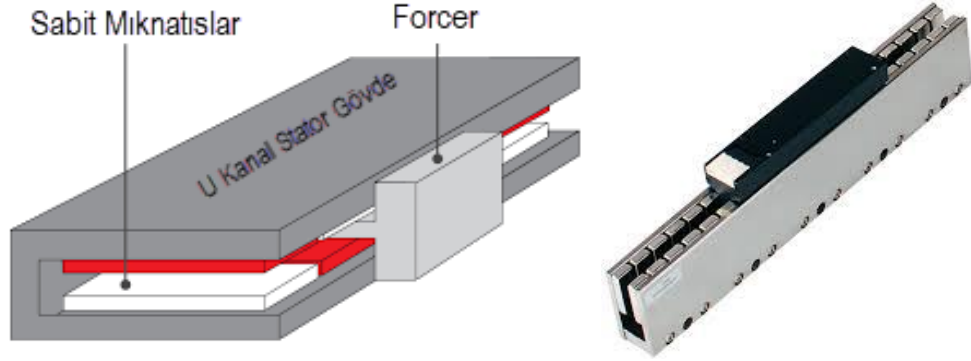
Bu tip slotlu demirli lineer motorlarda Şekil 2.11’de gösterildiği gibi bobin sargıları demir blokların arasına yerleştirilmiştir. Bu motorların forcerın da yer alan demir, çekirdek sargıların oluşturduğu manyetik alanı odaklayarak önemli derecede motor kuvvetini artırır. Demir çekirdek ile mıknatıslı stator gövde arasında kuvvetli bir manyetik çekim kuvveti vardır ve bu durum havalı yataklama sistemi için avantaj olarak görülüp önyüklemeye kullanılabilir fakat bu kuvvetlerin dezavantajı ise yataklardaki aşınmayı arttırmasıdır. Eş zamanlı olarak adımlama kuvvetleri oluşacaktır ve mıknatısları eğri olarak yerleştirerek bu kuvvetler azaltılabilir.



Şekil 2.11: (a) Slotsuz demirsiz yassı lineer motor, (b) Slotsuz demirli yassı lineer motor, (c) Slotlu demirli yassı lineer motor

2.2.2.3 U Kanal Şeklindeki Lineer Motorlar

Bu tip lineer motorlar Şekil 2.12’de gösterildiği gibi birbirine bakan iki paralel mıknatıs stator gövdeden ve aralarında hareket eden forcerdan oluşur. Forcer iki mıknatıslı stator gövde arasında rulmanlar veya lineer kılavuzlar ile yataklanmıştır. Forcer üzerinde demir yer almaz yani forcer ile mıknatıslı stator gövde arasında manyetik çekim kuvvetleri ve bozucu kuvvetler oluşmaz. Demirsiz bobinler düşük kütlelidir ve yüksek ivmelenmelere çıkmaya izin verir. Tipik olarak bobin sargıları üç fazlı fırçasız sinüzoidal komütasyon yapıdadır. Bu tip motorlara hava veya su soğutması eklenerek daha fazla performans elde edilebilir. Bu lineer motor tasarımlarında mıknatısların birbirine karşılıklı yerleştirilmesi ve U kanal şeklindeki gövde yapısıyla daha az manyetik alan sızıntısına sebep olur. Bu ayrıca yabancı cisimlerin güçlü mıknatıslar tarafından yakalanma tehlikesini de azaltır. Mıknatıslı stator gövdeye, mevcut sahip olduğu tasarımı sebebiyle ek yapılarak hareket mesafesi arttırılabilir. Stator gövde uzunluğu artırılırken, forcer kablo bağlantısının uzunluğu ve mevcut enkoder boyutu dikkate alınmalıdır.

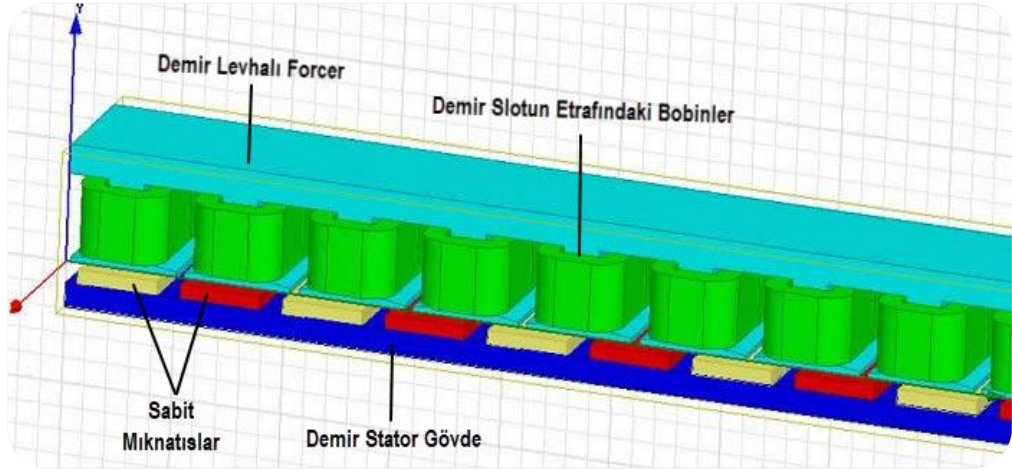


Şekil 2.12: U kanal linner motor yapısı

2.2.3 Çekirdek Tipine Göre Sınıflandırma

2.2.3.1 Demir Çekirdekli Lineer Motorlar

Bu motor mevcut tasarımını fırçasız dairesel motorlardan alır. Motorda Şekil 2.13'te gösterildiği gibi yassı bir stator gövde üzerine yerleştirilmiş sabit mıknatıslar yer alır. Forcer plaklardan ve bu plakanın slotları etrafına sarılmış bobinlerden oluşur. Sargıların içerisinde sıcaklık kontrolünü sağlayan termal sensörler yerleştirilmiştir. Manyetik alan kontrolü için ise hall effect sensörleri sargı alanına veya motorun kenarına yerleştirilebilmektedir. Bu hall effect sensörleri stator gövdede yer alan sabit mıknatıslar tarafından uyarılır ve sargıların uygun şekilde enerjilendirilmesinde kullanılır (Barrett 2020).



Şekil 2.13: Demir çekirdekli lineer motor yapısı

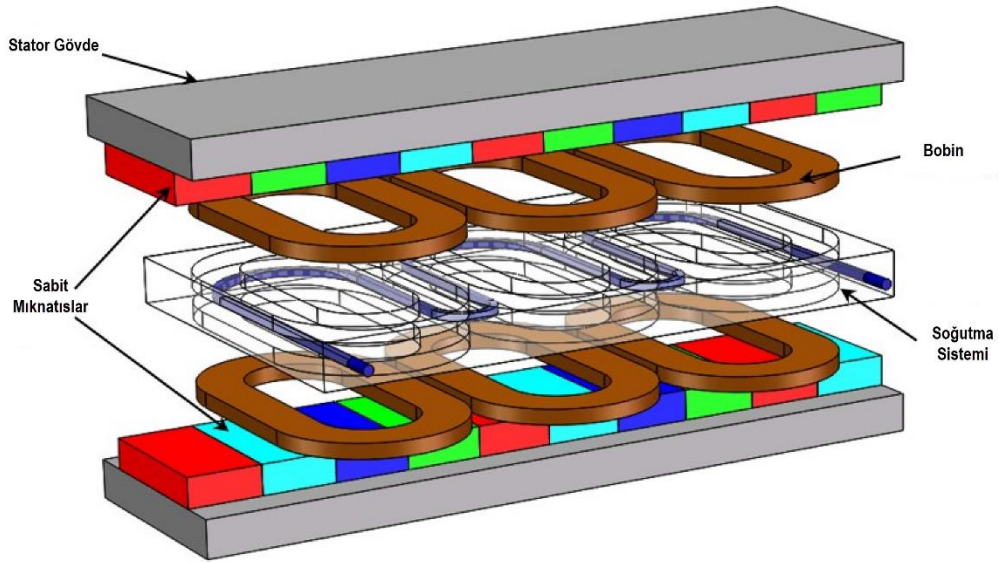
Ana stator gövde ve hareketli parça forcer da demir levhaların kullanılması manyetik alanı yoğunlaştırılır ve hacim başına en büyük kuvvetin oluşmasını sağlar. Mıknatısların tek sıra halinde kullanılmasından dolayı maliyeti hava çekirdekli lineer motorlara göre düşüktür. Tek taraflı, sabit mıknatıslı, stator gövdeye sahip lineer motorların kullanıldığı uygulama türleri çift taraflı hava çekirdekli lineer motorlar uygulamalarına göre hafif olduğundan daha avantajlıdır. Sargıların enerjilenmesi sonucu ortaya çıkan ısının demir slotlar aracılığıyla dağıtılması diğer bir avantajdır. Bu yöntemde yetersiz kaldığı durumlarda slotlar içine soğutma tüpleri de yerleştirilebilir. Ardından bu tüpler içerisinden hava, su veya yağ gibi akışkanlar geçirilerek soğutma sistemi optimize edilebilir.

Forcer yapısının demirden olması nedeniyle forcer ile sabit mıknatıslı stator gövde arasında çok güçlü bir çekim kuvveti vardır. Bu oluşan kuvvet motorun sürekli hareketindeki itme kuvvetinin 10 katı kadar olabilir. Bu durum lineer yatak tasarımları yapılırken hesaba katılmalıdır. Forcer yapısının demirden olması nedeniyle stator üzerinde sabit mıknatıslar üzerinden geçtiğinde her mıknatısın üzerinden geçişte itme kuvvetinde değişimler meydana gelir. Bu duruma adımlama ismi verilir ve düşük hareket hızlarda, dalgalanmalara neden olduğundan doğrusal hareketi etkiler. Bu tip motor tasarımlarında adımlama etkisini azaltmak üzere mıknatısların açılı yerleştirilmesi veya farklı bazı optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

2.2.3.2 Hava Çekirdekli Lineer Motorlar

Bu lineer motor yapısı hava çekirdekli veya demirsiz olarak adlandırılmaktadır. Stator ana gövdesi U kanal lineer motor yapısı ile aynıdır. Şekil 2.14'te gösterildiği gibi iki mıknatıslı stator gövde birbirine zıt kutupları bakacak şekilde yerleştirilir. Forcer üzerinde demir veya herhangi bir manyetik malzeme kullanılmaz bobin sargıları epoksi içerisine yerleştirilir. Bobin sargıları da demir veya herhangi bir manyetik malzeme içermez. Bu sargıların etrafı hafif ve oluşan ısıyı dağıtmasını nedeniyle alüminyum levha ile kapatılmıştır. Aynı zamanda bu levha üzerine bağlanan yükü taşımak amacıyla da kullanılır. Bu tip motorlarda da termal sensörler ve hall effect sensörleri forcer üzerine yerleştirilmiştir. Forcer üzerinde manyetik malzeme olmadığından forcer ile stator gövde arasında bir çekim kuvveti mevcut değildir. Bu durumda forceri taşıyan yataklar üzerinde ekstra bir yük oluşmamasını sağlar. Forcer ve yatakları üzerinde bu kuvvetlerin olmaması, motorun yönetilmesi ve kurulması kolaylaştırır. Ayrıca forcer ve stator arasında çekim kuvvetleri olmaması nedeniyle adımlamada söz konusu değildir. Bu nedenle yüksek hız ve hassas konumlandırma gerektiren uygulamalara uygundur. Çok düşük yüklerin kullanıldığı uygulamalarda forcerin de hafif olması bir avantajdır. Hava çekirdekli lineer motorlarda forcer hafif yapıdadır. Bu nedenle düşük ağırlıklarda yüksek hız, yüksek ivmeler ve daha fazla işlem hacmi elde edilebilir. Sargılar epoksi içerisinde yer aldığından bobinlerdeki ısının ortamı terk etmesinin yollarından biri sargılardan alüminyum forcer üzerine aktarılması oradan da bir soğutucu üzerine aktarılmasıdır. Diğer bir yolu ise sargı etrafına yerleştirebilecek sıvı, gaz vb. soğutma sistemleri vasıtasıyla da sargılarda

oluşabilecek ısınma problemlerinin önüne geçilebilir. Isı aynı zamanda hava aralığından ve stator gövde içerisinde de geçer. Bu ısı dağılım yollarının her birinin yüksek ısı direnci olduğundan motor üzerinde ısı kontrolü sağlamak zordur. Forcer sadece bobinlerden ve epoksi kaplamadan meydana geldiği için kullanılan tüm kuvvet, bobinler ve epoksi üzerindedir. Bu durum bu tip motorların demir çekirdekli lineer motorlara göre daha zayıf yapıda olmasına sebep olur. Bu zayıflık dan dolayı ilave yapısal destekleyici elemanlar kullanmadan imal edilmiş motorlarda maksimum boyutları ve kuvvetleri sınırlar.



Şekil 2.14: Hava çekirdekli lineer motor yapısı

2.2.3.3 Slotsuz Lineer Motorlar

Stator gövde, demir çekirdekli lineer motorlardaki tasarım ile aynı yapıya sahiptir. Forcer ise hava çekirdekli lineer motorlardaki bobin tasarımından oluşur. Bu tip motorlarda bobinlerin üzerine ekstra demir bir levha yer alır. Bu demir levhalı yapı altı açık alüminyum bir kasa içerisine yerleştirilmiştir. Ardından üzerlerine epoksi ile doldurularak kasa içerisindeki sargılar ve demir levha sabitlenerek koruma altına alınır. Güvenli bir motor sürüşü için gerekli olan termal sensörlerde kasa içerisinde yer alır. Slotsuz motor tasarımı demir çekirdekli ve hava çekirdekli lineer motorların birleşimi olduğundan avantajları ve dezavantajları bu iki tipin karşılaştırılmasıyla elde edilir.

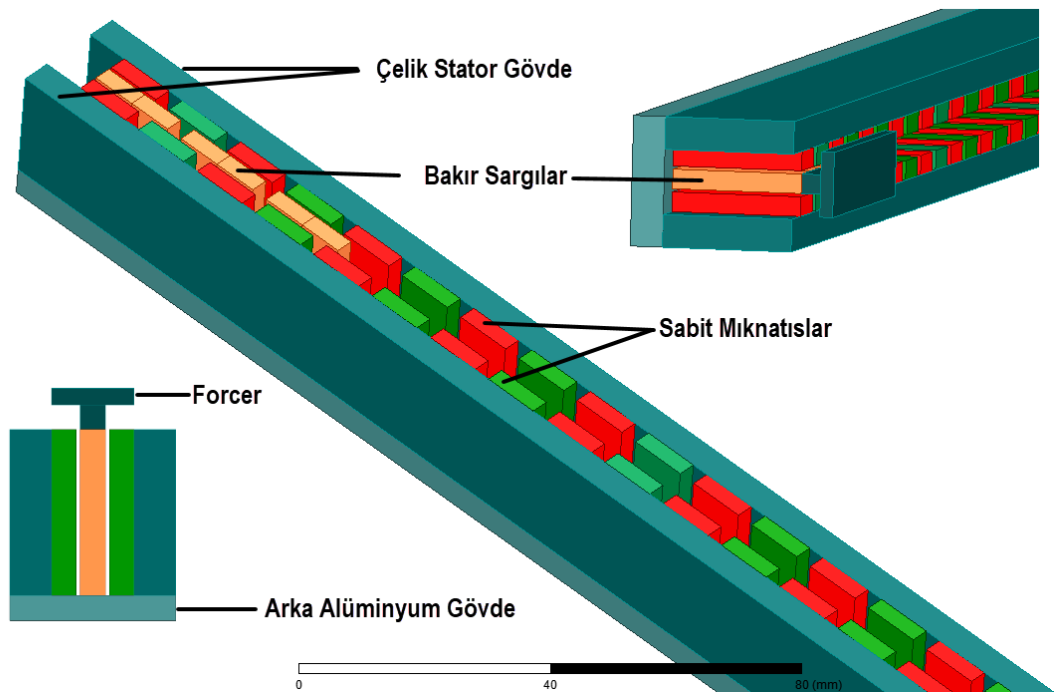
Demir çekirdekli lineer motor tasarımdaki gibi tek sıra mıknatıslardan oluşan stator gövde kullanıldığından maliyeti hava çekirdekli lineer motorlara göre düşüktür. Tek bir sabit mıknatıslı stator gövde kullanıldığından ağırlığı hava çekirdekli lineer motorların yarısı kadardır. Buda çok eksenli hibrit sistemlerde daha az yük ve daha fazla iş hacmi demektir. Forcerın gövdesinin alüminyum malzemedan yapılması ve bobinlerin bu kasaya bağlanması sonucu forcerın dayanımı hava çekirdekli lineer motora göre daha fazladır. Slotsuz lineer motor tasarımın da demir levha olması forcer ile stator gövde arasında manyetik çekim kuvvetleri meydana getirir fakat bu oluşan kuvvet demir çekirdeklide olduğu kadar fazla değildir. Bu çekim kuvveti sürekli harekette oluşan kuvvetin 5 ila 7 katı kadardır. Stator gövde deki mıknatıslar ile forcerdaki demir levha arasında yer alan boşluğun fazla olması, çekim kuvvetinin az olması sebebiyle slotsuz lineer motor tasarımın da adımlama daha azdır. Bu durum slotsuz tasarımın iyi ve hassas hız kontrolü gerektiren uygulamalarda da çalışabilmesine olanak sağlar. Slotsuz lineer motor tasarımın da bobinlerin demir levha ile demir levhanın da alüminyum malzeme ile teması sayesinde ısı transferi yüksektir ve bu yöntemle ısı problemleri kolayca çözülebilir. Hacim başına oluşan kuvvet slotsuz lineer motor tasarımın da hava çekirdekli ile demir çekirdekli lineer motor tasarımları arasındadır. Slotsuz tasarımlarda ısı transfer yolunun daha iyi olması nedeniyle hava çekirdekli lineer motorlara göre daha yüksek akımlara izin verilir ve bu nedenle daha yüksek kuvvetler elde edilir. Tablo 2.1’de çekirdek tiplerine göre lineer motor özelliklerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

Tablo 2.1: Çekirdek tiplerine göre lineer motor özelliklerinin karşılaştırılması.

Nitelik	Demir Çekirdekli	Hava Çekirdekli	Slotsuz
Maliyet	Düşük	Yüksek	En düşük
Çekim Kuvveti	En yüksek	Yok	Orta
Adımlama (Cogging)	En yüksek	Yok	Orta
Kuvvet / Boyut	En iyi	Orta	İyi
Isıl Karakteristik	En iyi	En kötü	İyi
Forcer Ağırlığı	En ağır	En hafif	Orta
Forcer Dayanımı	En iyi	En kötü	İyi

2.3 Tez Kapsamındaki Lineer Motorun Yapısı

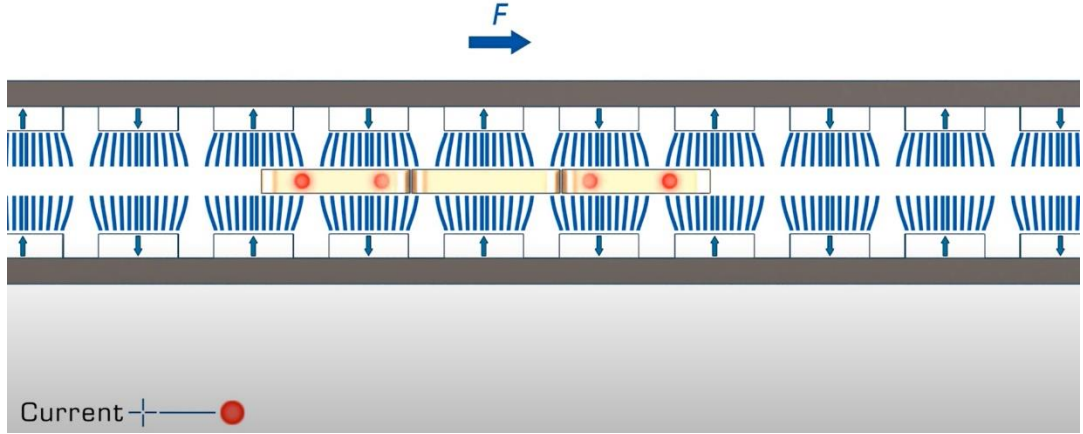
Bu tez çalışmasında ana yapısı Şekil 2.15'te yer alan çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer servo motor tasarlanmıştır. Çift taraflı hava çekirdekli lineer motorlar çok yüksek ve çok düşük hızlarda çalışabilir, yüksek ivmelenmelere izin verir, az bakım gerektirir ve verimliliği düşüren harici parçalara (örn. Silindir, kayış, kasnak) sahip değildirler. Dairesel doğru akım motorlarında olduğu gibi döner hareketinin doğrusal harekete dönüşümü olmadığından, tasarım lineer hareket uygulamalarında geleneksel bir doğru akım motorundan daha fazla verimlidir. Çift taraflı çekirdeksiz lineer motorların sağladığı bir diğer avantaj ise statoru kalıcı mıknatıstan oluşması nedeniyle motorların stator boyutlarının rahatlıkla uzatılabilmesidir. Bununla birlikte, dezavantajları da vardır. Örneğin dikey uygulamalarda çok verimli değildirler, acil durum frenleri yoktur ve ısı problemleri oluşabilmektedir. Bu dezavantajlara rağmen, çift taraflı hava çekirdekli lineer motorlar endüstri ortamında yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın alanlar şunlardır; konveyör sistemleri, yüksek hassasiyetli doğrudan tahrik sistemleri, daha yüksek hızlarda yüksek hassasiyetli kontrol uygulamalarıdır.



Şekil 2.15: Çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer motor yapısı

3. LİNEER MOTOR TASARIMI

Teorik olarak bir lineer servo motor, kapalı döngü pozisyon geri beslemesine sahip sadece üç fazlı bir senkron motordur. Her bir bobine üç fazlı bir sinüzoidal akım vererek lineer motoru bir döner motor gibi kontrol etmek mümkündür. Şekil 3.1'deki gibi sırayla enerjilendirilen bobinler periyodik hareketli bir manyetik alan yaratacak ve bu da motoru çalıştıracak bir kuvvetin oluşmasına neden olacaktır. Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen motor dairesel motor tiplerinde BLDC motor gibi davranır. Bu bölümde tasarımda kullanılan kavramlar açıklanacak ve tasarım için gerekli parametre hesaplamaları yapılacak ve motorun 3 boyutlu modeli ortaya koyulacaktır.



Şekil 3.1: Çift taraflı hava çekirdekli lineer motor çalışma prensibi (PI 2020)

Lineer motorun Tablo 3.1'de yer alan teknik özellikleri belirlenirken günümüz sanayi şartları ve bu aşamaya kadar elde edilen literatür bilgisi esas alınmıştır. Günümüz hassas kontrol gerektiren doğru akım motor uygulamalarında 24 V anma gerilimine sahip motorlar tercih edilmektedir. Bu doğrultuda mevcut otomasyon sistemleri içerisinde hali hazırda 24V doğru akım güç kaynakları yerleştirilmekte ve motor beslemeleri rahatlıkla bu sistemler üzerinde yapılabilmektedir. En düzgün lineer hareket ise sinüzoidal komütasyon yapıda olması nedeniyle motor 3 fazlı olarak belirlenmiştir. Boyut ve hassasiyet parametreleri ise uygulamaya dökülecek lineer motorun oluşturacağı maliyet göz önünde tutularak optimum seviyede belirlenmiştir. Lineer motorun boyutu arttıkça maliyet buna doğru orantılı olarak artmaktadır.

Tablo 3.1: Tasarımı gerçekleştirilecek lineer motorun teknik özellikleri.

Lineer Motor Teknik Özellikleri	
Nominal Gerilim	24V DC
Nominal Akım	2 A
Faz	3 Fazlı /Y Bağlı
Hareket Mesafesi	33,5 cm
Max. Hareket Hızı	400 mm/s
Hassasiyet	0.125 mm

Dairesel hareket yapan motorun enerji denklemleri aşağıdaki gibi bulunabilir. Elektrik motorlarında (3.1) eşitliğinde gösterildiği gibi giriş gücü gerilim (E) ve akımın (I) çarpımına eşittir. Giriş gücünün gerilim ve akımın ürünü olduğu durumlarda, döner makinalar için çıkış gücü (3.2) eşitliğindeki gibi hesaplanır;

$$P_{in} = E \cdot I \quad (3.1)$$

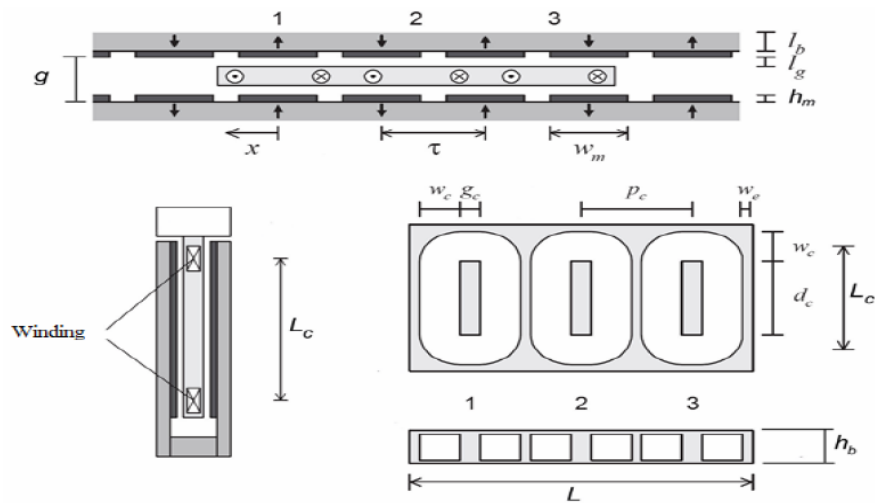
$$P_{out} = \omega \cdot M \quad (3.2)$$

Doğrusal motorlarda kayıpların ihmal edildiği durumlarda (3.5) eşitliğindeki gibi giriş gücü çıkış gücüne eşittir. Giriş gücü (3.3) eşitliğinde gösterildiği gibi gerilim (V) ve akımın (I) çarpımına eşit iken çıkış gücünü (3.4) eşitliğinde gösterildiği gibi oluşan itme kuvveti ile hızın çarpımı oluşturur:

$$P_{in} = V \cdot I \quad (3.3)$$

$$P_{out} = v \cdot F \quad (3.4)$$

$$P_{in} = P_{out} \quad (3.5)$$



Şekil 3.2: Global tasarım parametreleri (Vărățiceanu 2014)

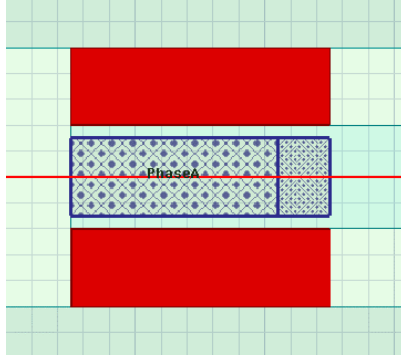
Çift taraflı lineer motorun global tasarım parametreleri Şekil 3.2' deki gibi tanımlanmıştır. Demir kaybı olmayan çift taraflı, sabit mıknatıslı doğrusal senkron motorun (PMLSM) parametreleri analitik bir yöntem kullanılarak hesaplanır (Chevailler ve diğ. 2004). Lineer motordaki alan dağılımı, örneğin, bir sonlu eleman modelinden bilindiği varsayılır.

Faz başına elektromotor kuvvetinin hesaplanması (3.6) eşitliğindeki gibi gerçekleştirilir:

$$E_{ph} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot N_f \cdot \varphi \cdot k_w \quad (3.6)$$

Burada f frekans olarak tanımlanırken ve N_f faz başına spir sayısıdır. Hava boşluğundaki akı yoğunluğunun ilk harmoniğinin genliği olan B_g ile akı ise (3.7) eşitliğindeki gibi hesaplanır:

$$\varphi = B_g \cdot S_g \cdot \frac{2}{\pi} \quad (3.7)$$



Şekil 3.3: Bir kutbun kapladığı kesit alanı (S_g)

Yukarıdaki denklem içerisinde tanımlanan S_g Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bir kutbun kapladığı kesit alanıdır. τ iki kutup arasındaki mesafedir. Bir PMLSM'de hareket eden manyetik alanın hızı ise (3.8) eşitliğindeki gibi hesaplanır:

$$v = \frac{dx}{dt} = 2 \cdot \tau \cdot f \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de açıklandığı gibi τ iki kutup arasındaki mesafedir. Denklem (3.7)'de manyetik akı değeri yerine konularak, Emk denklemini (3.9) eşitliğindeki gibi tekrar düzenlenir:

$$E_{ph} = \sqrt{2} \cdot v \cdot B_g \cdot L \cdot N_{ph} \cdot k_w \quad (3.9)$$

Burada sargı faktörü, k_w , (3.10) eşitliğinde gösterildiği gibi kutup faktörü k_p ve dağılım faktörü k_d 'nin çarpımına eşittir (Mehta ve diğ. 2015).

$$k_w = k_d \cdot k_p \quad (3.10)$$

$$k_p = \sin\left(\frac{Q_p}{2}\right) \quad (3.11)$$

$$k_d = \frac{\sin\left(\frac{q_1 a}{2}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{a}{2}\right)} \quad (3.12)$$

$$a = \frac{\pi}{mq_1} \quad (3.13)$$

Bir tam birimin temel harmoniği için sargı faktörü, sargı aralığı (pitch coil) ile (3.14) eşitliğindeki gibi elde edilebilir.

$$k_w = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\pi}{2mq_1}\right)} \quad (3.14)$$

Lorentz kanunu gereği manyetik alan içerisine yerleştirilen bir iletkenin akım akıtılırsa kuvvet oluşur. Bu kuvvet (3.15) eşitliğindeki gibi hesaplanır.

$$F = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot I}{v} \quad (3.15)$$

I , sargı boyunca oluşan sinüzoidal akımın RMS değeridir. J , akım yoğunluğu ve s , iletkenin kesit alanının çağırımı ile (3.16) eşitliğindeki gibi hesaplanır:

$$I = J \cdot s \quad (3.16)$$

Bakır doldurma faktörü, (3.17) eşitliğindeki gibi toplam bakır alanın toplam kullanılabilir alana bölünmesiyle hesaplanır:

$$k_u = \frac{6 \cdot N_{ph} \cdot s}{L_c \cdot h_b} \quad (3.17)$$

Sinüzoidal komütasyona sahip çift taraflı PMLSM'nin elde itme kuvveti (3.18) eşitliğindeki gibi hesaplanır:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot B_g \cdot L \cdot L_c \cdot h_b \cdot k_u \cdot k_w \cdot j \quad (3.18)$$

Çift taraflı lineer motorun ana çalışma prensibi, geleneksel bir doğru akım dairesel motorun çalışmasına benzer. Akı, lamine çekirdekler üzerindeki yalıtımlı bakır tellerden oluşan sargılar veya sabit mıknatıslar ile elde edilir, burada alan akışı sabit mıknatıslar tarafından sağlanır (Basak 1996). Doğrusal bir motorun temel amacı, akımın (I) akı yoğunluğu (B) ile etkileşimi ile kuvvet (F) üretmektir. Bu durum, elektromanyetizmanın temel yasalarından biri ile Biot-Savart Yasası olarak, gösterilmektedir; eğer akım taşıyan bir iletken, elektromanyetik alana dik olan bir manyetik alana yerleştirilirse akım yönünde, iletken üzerine hem akıma hem de manyetik alana dik olarak mekanik bir kuvvet uygulanır. Bu kuvvet (3.19) eşitliği ile elde edilir:

$$F = I(L \cdot B) \quad (3.19)$$

Kuvvet denklemini (3.20) eşitliğindeki gibi yüzeyde oluşan akı (φ -Webers) cinsisinde yazacak olursak:

$$\varphi = n \cdot I_a \quad (3.20)$$

Burada I_a faz akımı (Amper) ve n , bir fazdaki iletken sayısıdır (Basak 1996). Bu aynı zamanda (3.21) eşitliğindeki gibi gösterilir:

$$F = k \cdot \varphi \cdot I_a \quad (3.21)$$

Burada k , iletken (bakır) apının genel tel çapına oranıdır ve sargı faktörü olarak bilinir. Doğrusal bir motorun (3.22) eşitliğinde gösterilen bir diğer önemli formülü, temeli Faraday yasasına dayanan elektromotor kuvveti formülüdür:

$$E = \left| -\frac{d\phi}{dt} \right| = \left| \frac{d(BA)}{dt} \right| = \left| \frac{BdA}{dt} \right| = \left| \frac{Blvt}{dt} \right| = B \cdot L \cdot v \quad (3.22)$$

Hareketli bir iletken (bobinin parçası) B akı yoğunluğundaki bir manyetik alanı kestiğinde, terminaller boyunca orantılı olarak voltaj E indüklenir. l manyetik alanı kesen iletkenin uzunluğu ifade ederken v göreceli hızı belirtir.

Elektromotor kuvvet denklemini (3.23) eşitliğindeki gibi kuvvet denklemi yerine konularak düzenlenir:

$$E = k \cdot \phi \cdot v \quad (3.23)$$

3.1 Lineer Motor Yapısını Oluşturan Materyaller

3.1.1 NdFe35 Sabit Mıknatıslar

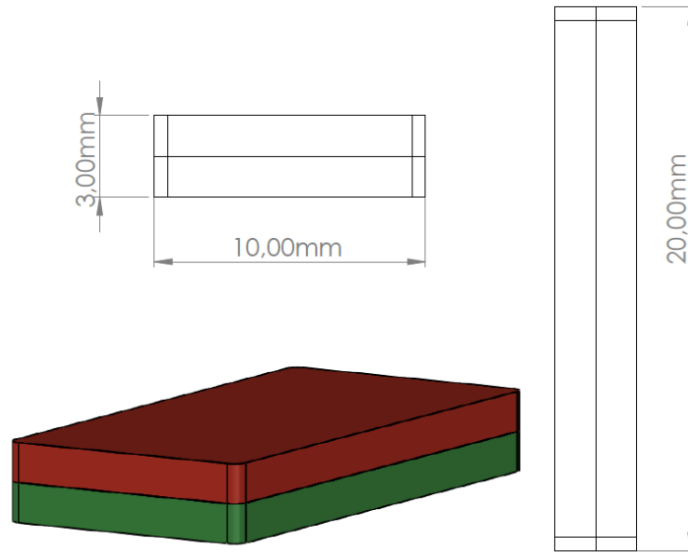
Sabit mıknatıslı bir motor tasarlanırken malzeme seçiminin en önemli kısmını mıknatıslar oluşturmaktadır. Tasarım içerisinde kullanılan mıknatıslar Neodimyum, Demir ve Bor elementlerinden yapılmış NdFeB tipi mıknatıslardır.

SmCo alaşımlarından sonra günümüze kadar üretilmiş olan nadir toprak elementi mıknatısları içerisinde en yüksek enerjiye ve kalıcı indüksiyona sahip olan mıknatıslar NdFeB mıknatıslarıdır. Tablo 3.2’de NdFeB, AlNiCo ve SmCo mıknatıs çeşitlerinin avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir. NdFeB mıknatıslarının sahip oldukları en büyük dezavantaj Curie sıcaklığının düşük olması ve pahalı olmalarıdır. NdFeB mıknatıslar uzay araçlarında, uçaklarda ve robotikte gereksinim duyulan tahrik motorlarında, demir cevheri zenginleştirme ayırıştırıcılarında, potların yapımında, manyetik bar yapımında vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Tablo 3.2: Çeşitli sabit mıknatısların avantaj ve dezavantajları.

Tip	Avantajları	Dezavantajları
NdFeB	Birim hacim başına yüksek enerji ve yüksek akı yoğunluğu	Düşük curie sıcaklığı ve yüksek maliyet
AlNiCo	Yüksek curie sıcaklığı ve yüksek akı yoğunluğu	Koersif değeri düşük, kırılma hassas yapı ve yüksek maliyet
SmCo	Büyük koersif kuvvet, yüksek akı yoğunluğu ve ısıya karşı dayanıklı	Yüksek maliyet ve üretim zorluğu

Bu çalışmada NdFe35 tipi mıknatıs kullanılmasının amacı diğer mıknatıslara göre sahip olduğu büyük kalıcı akı yoğunlukları, çok yüksek enerji çarpanı ve tasarımda da aynı güçte olan motorlar için daha küçük yapıda motorlar elde edilmesine olanak tanınmasıdır.



Şekil 3.4: Tasarımda kullanılan NdFe35 mıknatıs biçimi

Stator gövde üzerine zıt kutuplar karşı karşıya gelecek ve aralarında bir hava aralığı yer alacak şekilde Şekil 3.4'te yer alan mıknatıslardan 26 çift yerleştirilmiştir. Kullanılan mıknatısın manyetik özelliği ise aşağıda Tablo 3.3'te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3.3: Tasarımda kullanılan NdFe35 mıknatıs malzemesinin özellikleri.

Paremetre	Tip	Değer	Birim
Relative Permeability	Simple	1.0997785406	-
Bulk Conductivity	Simple	625000	siemens/m
Magnetic Coercivity (H_{cb})	Vector	-890000	A_per_meter
Mass Density	Simple	7400	kg/m ³
Young's Modulus	Simple	147000000000	N/m ²
Remanence (B_r)	Simple	1.23	T
Max. Working Temp (T_c)	-	80	°C

3.1.1.1 Mıknatısların Manyetik Parametreleri

a) Kalıcı Mıknatıslık (B_r)

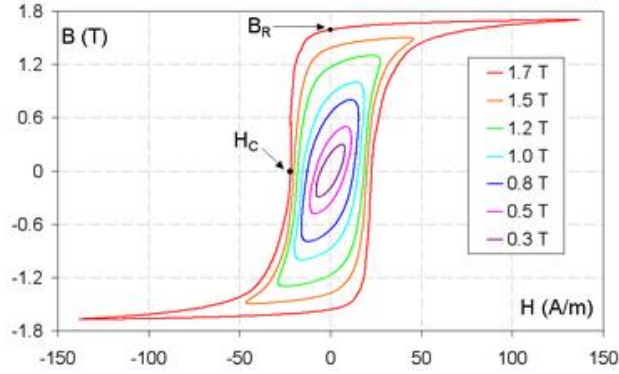
Motorun performansını etkileyen en büyük faktörlerden birisidir. Başarılı bir manyetizasyondan sonra mıknatıs içinde kalan manyetik indüksiyon veya manyetik akı yoğunluğu için bir ölçümdür. Basitçe bu değer ne kadar yüksekse, mıknatıs o kadar "güçlü" olur. T (Tesla), manyetik indüksiyon ve sırasıyla manyetik akı yoğunluğu için ölçüm birimi olarak kullanılır. Daha önce kullanılan ölçü birimi G (Gauss) idi. 1 Tesla = 10000 Gauss.

b) Zorlayıcı (Koersif) Kuvvet (H_{cb})

Ferromanyetik bir malzemedeki zorlayıcılık, numunenin mıknatıslanmasının doygunluğa getirilmesinden sonra bu malzemenin manyetizasyonunu sıfıra indirmek için gereken uygulanan manyetik alanın yoğunluğudur. Bu nedenle zorlayıcılık, ferromanyetik bir malzemenin manyetikliğini gidermeye karşı direncini ölçer. Zorlayıcı kuvvet genellikle amper / metre birimleri cinsinden ölçülür ve H_{cb} olarak ifade edilir.

Zorlayıcı kuvvet H_{cb} 'nin matematiksel ifadesi ise (3.24) eşitliğindeki gibi formalize edilir. B_m ve H_m çalışma noktasındaki akı yoğunluğunu ve alan şiddetini belirtmektedir (Üstün 2000). Şekil 3.5'te manyetik alan şiddeti değişiminin manyetik akı yoğunluğu üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

$$B_m = B_r \left(1 - \frac{H_m}{H_{cb}}\right) \quad (3.24)$$



Şekil 3.5: Bir manyetik tele ait histerezis döngüsü ailesi

c) Kritik Sıcaklık (T_c)

Mıknatısların kalıcı mıknatıs özelliklerini kayb ettikleri sıcaklık noktasıdır.

d) Maksimum Enerji Çarpımı ($B-H_{max}$)

Sürekli mıknatısın üretebileceği enerji miktarı, zorlayıcı (koersif) kuvvet öz eğrisinden çıkarılabilir (Hanselman 1994). Motorun üreteceği enerji miktarı kullanılan mıknatısın akı yoğunluğu ve motor sargı alanın çarpımıyla doğru orantılıdır. $B-H_{max}$ (3.25) eşitliğindeki gibi belirlenebilir:

$$B-H_{max} = \left(\frac{B_r \cdot H_{cb}}{4}\right) \quad (3.25)$$

Eşitlikten de görüleceği üzere enerji çarpanının birimi J/m^3 'tür. Bu birim malzemenin birim hacim başına üretebileceği enerji miktarını belirtmektedir. Mıknatısın birim hacim başına ürettiği enerji miktarı ne kadar yüksek ise mıknatıs boyutları ve mıknatısların kullanıldığı motor boyutları da o oranda küçük olur.

3.1.1.2 Sıcaklığın Mıknatıslığa Etkisi

Kalıcı mıknatıs özelliği yüksek sıcaklıklarda kaybolabilir. Curie sıcaklığı denilen eşik noktasında manyetik malzemeler mıknatıs özelliklerini tamamen yitirebilir. Curie sıcaklığı mıknatıs malzemelerin tipine göre Tablo 3.4'teki gibi

farklılık gösterebilir. Uygulamalarda sargı, döner mekanizmalar vb. gibi unsurların makine üzerinde ekstra ısı yayması sebebiyle mıknatısların oluşan bu ısılarından etkilenmemesi için Curie sıcaklığı yüksek olan malzemeler tercih edilmelidir

Tablo 3.4: Farklı tip mıknatısların Curie sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

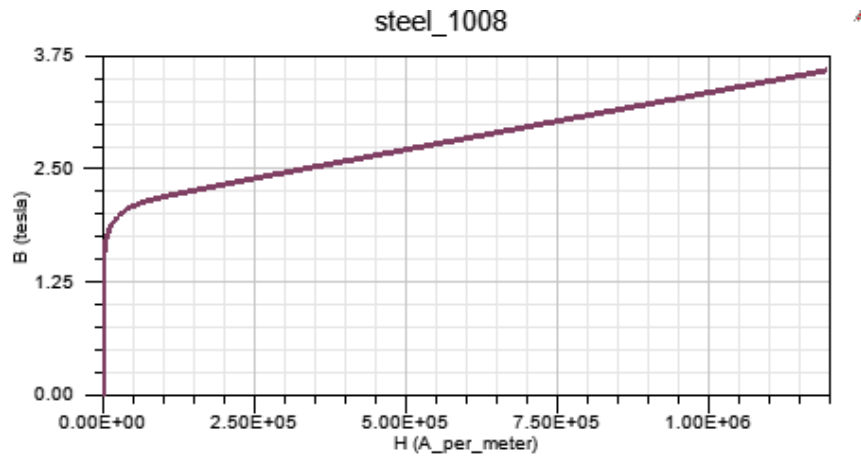
Tip	Maks. Çalışma Sıcaklığı	Curie Sıcaklığı
NdFeB	120°C	310°C
Ferrit	300°C	450°C
AlNiCo	500°C	800°C

3.1.2 Steel_1008 Malzeme Özellikleri

Mıknatıslardan sonra ikinci önemli materyal seçimi motorun ana gövdesini oluşturan stator bölümünün malzemesidir. Bu tez kapsamında stator ana gövdesi için kullanılan malzeme, Tablo 3.5'te özellikleri ve Şekil 3.6'da B-H eğrisi verilen steel_1008 çelik alaşımıdır.

Tablo 3.5: Tasarımda kullanılan Steel_1008 çelik malzemesinin özellikleri.

Paremetre	Tip	Değer	Birim
Relative Permeability	Non-Linear	B-H Eğrisi	-
Bulk Conductivity	Simple	2000000	siemens/m
Magnetic Coercivity (H_{cb})	Vector	0	A_per_meter
Mass Density	Simple	7872	kg/m ³
Young's Modulus	Simple	200000000	kN/m ²



Şekil 3.6: Steel-1008 çeliğinin B-H eğrisi

3.2 Lineer Motor Tasarım Parametreleri

Lineer motor sistemlerinin dairesel motor sistemleriyle olan benzerlikleri Tablo 3.6'da gösterildiği gibi motor parametrelerine de yansımaktadır. Döner motorlarda olduğu gibi lineer motorlarda da stator veya rotor direnci, endüktans, stator veya rotor akımı ve gerilimi, zıt elektromotor kuvveti, sürtünme parametreleri lineer motoru modelleme ve analizinde kullanılır.

Tablo 3.6: Dairesel motor parametreleri ile lineer motor parametrelerinin karşılaştırılması.

Dairesel Motor Parametreleri	Lineer Motor Parametreleri
T (Tork)	F (Kuvvet)
J (Atalet Momenti)	m (Kütle)
α (Açısal İvme)	a (Doğrusal İvme)
ω (Açısal Hız)	v (Doğrusal Hız)
θ (Açısal Yer Değiştirme)	x (Doğrusal Yer Değiştirme)

Kısa hareket mesafesinde yüksek hızlara çıkabilen hassas konumlandırılmalı lineer motor tasarlamak bazı özel durumlar gerektirir. Bu çalışmada hava çekirdekli çift taraflı bir lineer motor tasarlanmıştır. Hava çekirdekli yapı düzgün bir hareket sağlar. Demir çekirdekli bir motorda, mıknatıslar ve forcer arasındaki etkileşim nedeniyle çekim kuvveti ve isteksizlik kuvveti oluşur. Bu, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda bir sorun haline gelir. Çekirdeksiz bir motorda, sargılardan dolayı stator ve forcer arasında bir çekim kuvveti olsa bile, bu sorun ihmal edilebilir. Motorun çift taraflı bir yapıya sahip olması çok yüksek, çok düşük hızlarda çalışmasını ve daha hızlı ivmelenmesini sağlar.

Tasarıma, mevcut mıknatıslar NdFeB temel alınarak başladı. Bu mıknatıslar nispeten pahalıdır, ancak Curie sıcaklıkları düşük olmasına rağmen verimlilikleri ve enerjileri diğer mıknatıs türlerinden çok daha yüksek olduğundan yüksek performansa sahiptir. Gerekli kuvvet 15N'dur. Bilindiği gibi elde edilecek kuvvet, mıknatıslara ve akıma bağlıdır. Modelde 3 fazlı bobin yapısı ve 26 mıknatıs çifti kullanılmıştır. Gövde, daha hafif olması ve daha az hacim kaplaması nedeniyle çelik malzemeden yapılmıştır. Bunlar, geometrik tasarımın temel özelliklerini vermektedir.

Motor boyutlarıyla ilgili ilk kararlar alındıktan sonra Solidworks ortamında 3D boyutlu katı model oluşturularak, ANSY Maxwell programı aracılığıyla 2D elektromanyetik analiz ortamında tasarım parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilir.

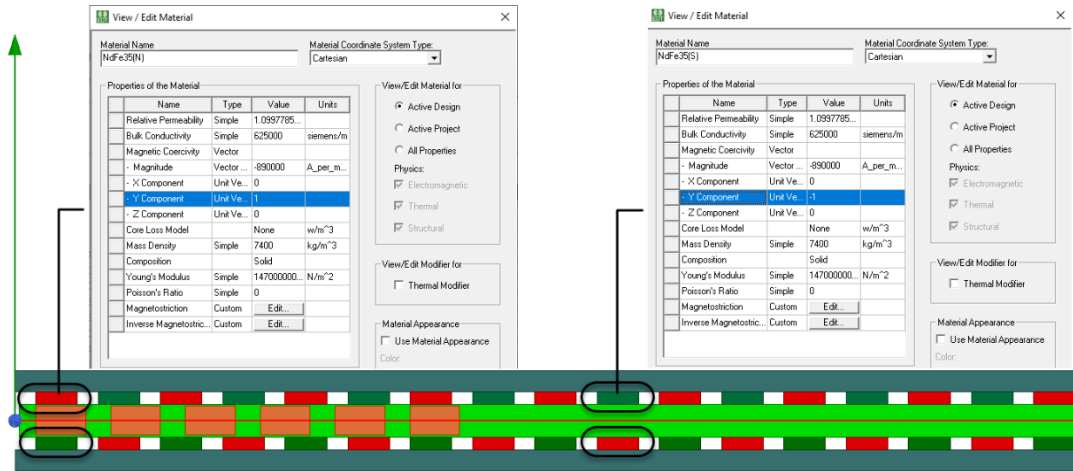
Lineer motor tasarım parametrelerin optimizasyonunda temel hedef, lineer hareketin sinüzoidal komütasyon yapıyla sağlanabilmesi olarak belirlenmiştir. Sinüzoidal bir lineer motor tasarımı için forcerın belirli bir hızda hareketi sonucu, makinenin sargılarında indüklenen gerilimin sinüzoidal yapıda olması amaçlanmıştır. Literatür araştırmaları sonucu, tasarımı gerçekleştirilecek lineer motorun, uygulamaya dökülecek olması ve motor boyutuna bağlı olarak üretilirlik ve maliyet unsurları göz önünde bulundurularak model derinliği 20 mm, mıknatıs çift sayısı 26, mıknatıs boyutları ise 3x20x10 mm olarak belirlenmiştir. Bu mevcut parametreler dışında optimizasyonu yapılacak motor parametreleri aşağıdaki Tablo 3.7'deki gibi verilmiştir.

Tablo 3.7: Optimizasyon parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değer
Hava Aralığı (mm)	g	8
Kutup Aralığı (mm)	τ	15
Sargı Boyu (mm)	L	114
Sargı Genişliği (mm)	L_c	30
Sargı Yüksekliği (mm)	h_b	7
Sargı İç Hava Boşluğu (mm)	g_c	6
Sargı Aralığı (mm)	p_c	36
Mıknatıslar Arası Mesafe (mm)	G	5
Faz Başına Tur Sayısı (spir)	N_f	150

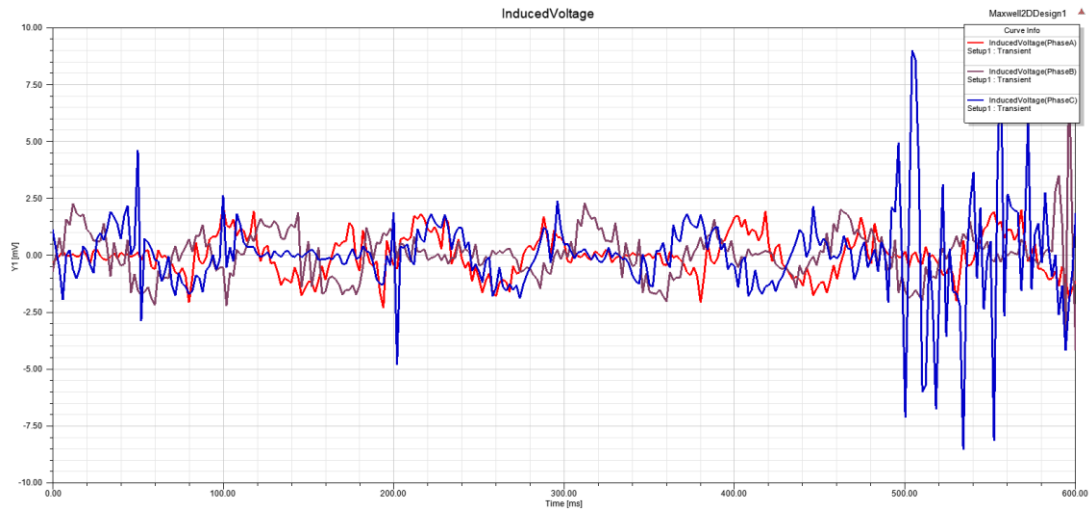
Motor boyutlarıyla ilgili ilk kararlar alındıktan sonra Tablo 3.7'deki parametreler Ansys Maxwell ortamına aktarılarak 2D elektromanyetik analizi gerçekleştirilir. İlk olarak sabit NdFe35 mıknatısların, mıknatıslanma yönünü incelemek için malzeme kitaplığından mevcut kartezyen, silindirik ve küresel modlar arasından kartezyen koordinat sistem türü seçilerek, malzeme düzenleme penceresindeki uygun bileşenler üzerindeki ilgili seçeneği otomatik olarak değiştirmesi sağlanır. Bir bileşene karşı "0" tanımlanması bileşenin olmadığını

gösterirken "1" bileşenin varlığını belirtir. "+1" pozitif eksen yönündeki alanı belirtirken, yönü tersine çevirmek için "-1" kullanılabilir.



Şekil 3.7: NdFe35 mıknatıslarının alan yönlerinin belirlenmesi ve stator gövde üzerinde yerleşimi

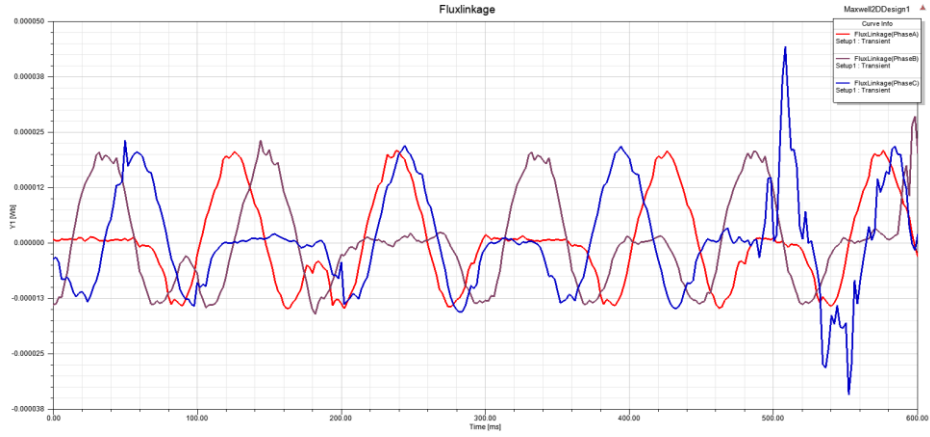
Mıknatıslanma yönleri dikkate alınarak lineer motor sabit mıknatısları Şekil 3.7'deki gibi Y ekseninde karşılıklı ve yan yana pozitif-negatif alan yönlerine sahip olacak şekilde yerleştirildi ve sabit 400 mm/s hız altında devreden akım ve gerilim kaynakları çıkartılarak, analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda sargılarda indüklenen gerilim, manyetik akı yoğunlukları ve manyetik akı çizgilerinin dağılımı aşağıdaki gibi incelenmiştir.



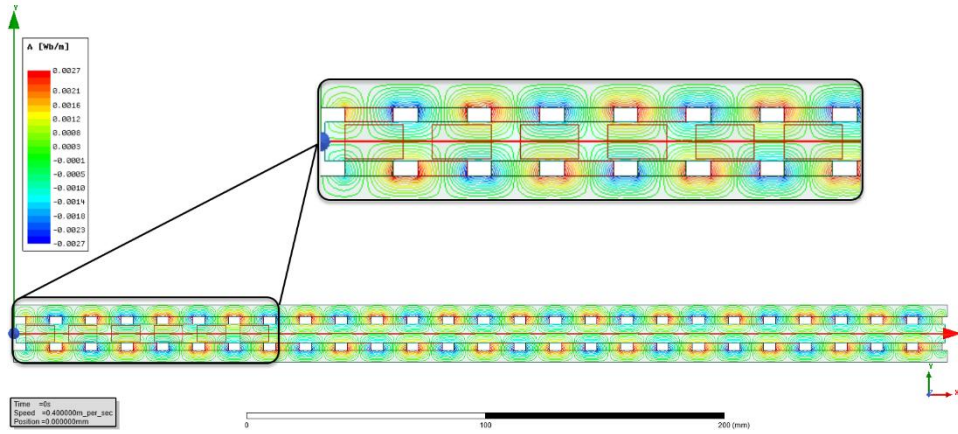
Şekil 3.8: Zıt mıknatıslanma yönüne göre fazlarda indüklenen gerilim eğrisi

Şekil 3.8'de görüleceği üzere lineer motor fazlarında sinüzoidal eğriye sahip bir gerilim indüklenmemiştir.

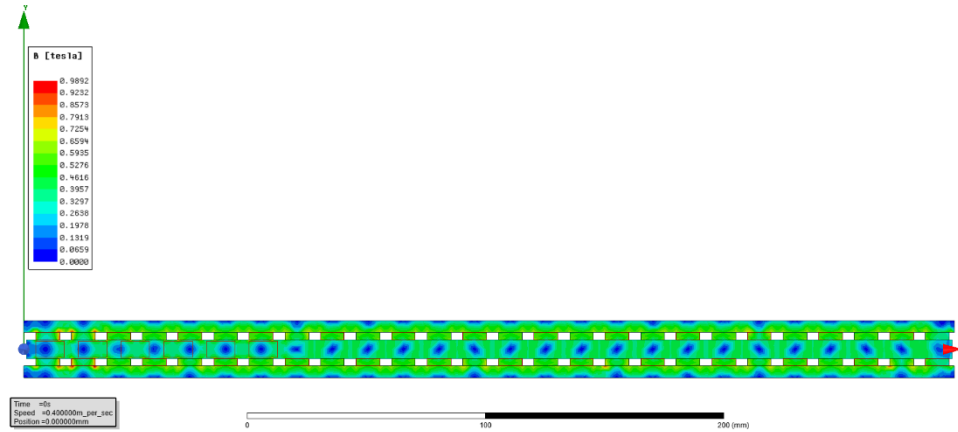
Buna bağı olarak Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterildiği gibi düzgün bir manyetik akı dağılımı sağlanamamıştır. Yeterli manyetik akı yoğunluğunun oluşmadığı ise Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.9: Zıt mıknatıslanma yönüne göre fazlarda oluşan akı bağlantısı

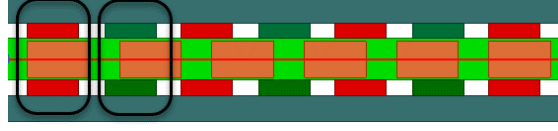


Şekil 3.10: Zıt mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı çizgilerinin dağılımı



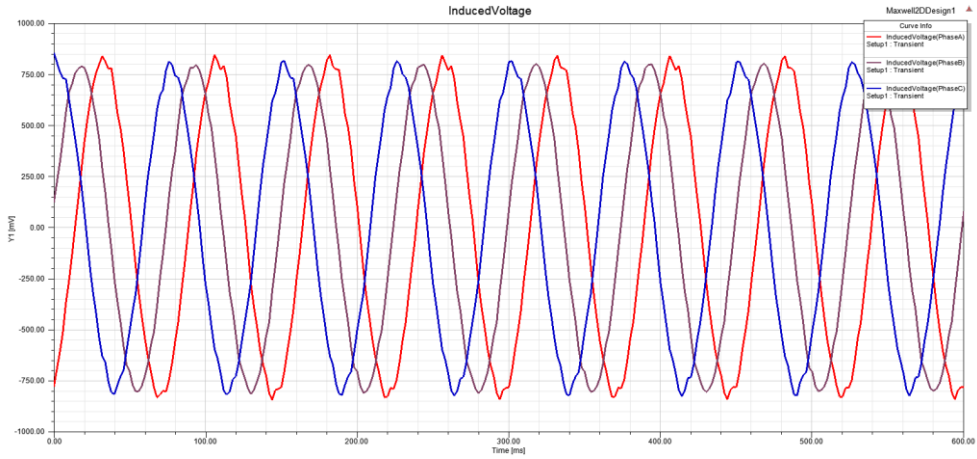
Şekil 3.11: Zıt mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

Mevcut parametreler ve analiz yöntemi üzerinde hiçbir değişiklik yapmadan sadece Şekil 3.12’de gösterildiği gibi mıknatıs alan yönleri karşılıklı olarak aynı, yan yana ise zıt olacak şekilde değiştirilerek, sabit 400 mm/s hız altında analiz işlemi tekrar edilmiştir.

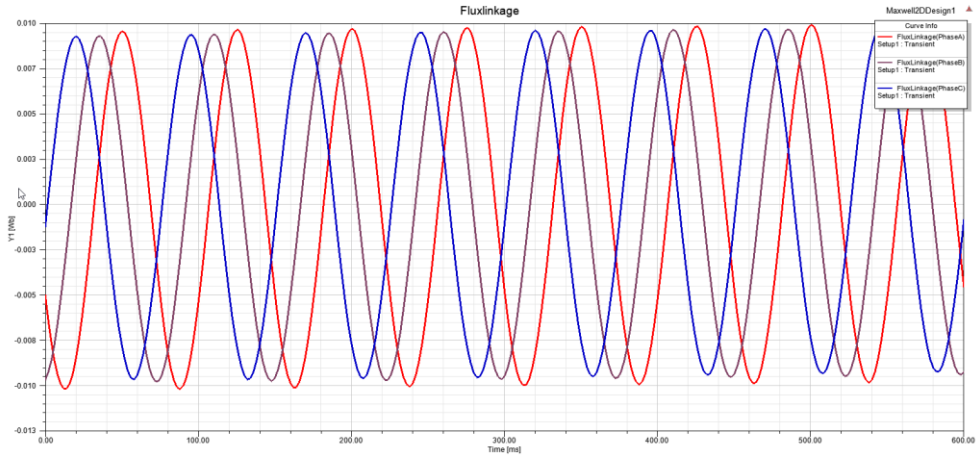


Şekil 3.12: NdFe35 mıknatıslarının alan yönlerine göre stator gövde üzerine yerleşimi

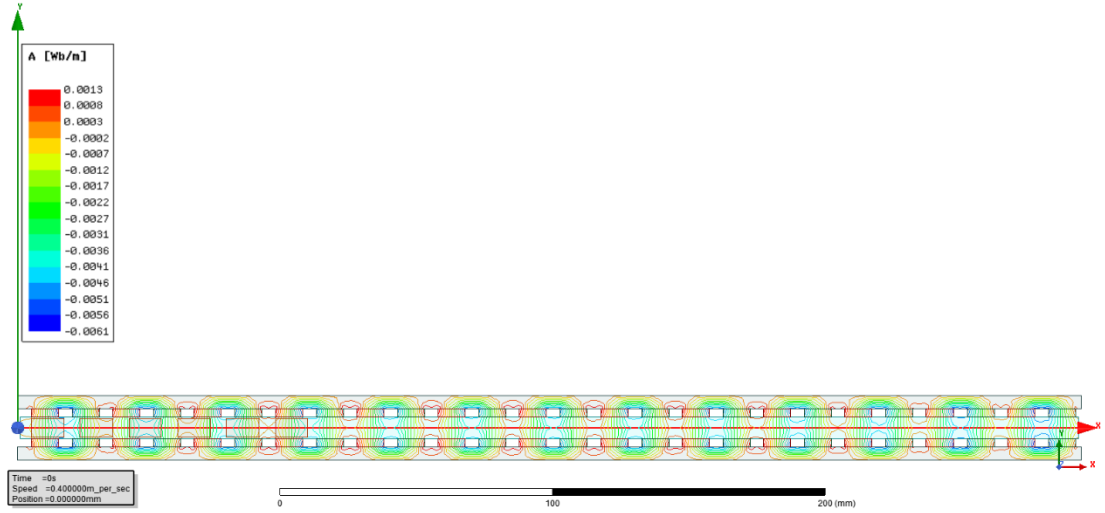
Aşağıda, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te görüleceği üzere fazlarda sinüzoidal bir gerilim indüklenmesine sebep olan karşılıklı aynı, yan yana zıt alan yönüne sahip mıknatıs diziliminin hedeflenen lineer motor tasarımı için daha uygun olduğu belirlenmiştir.



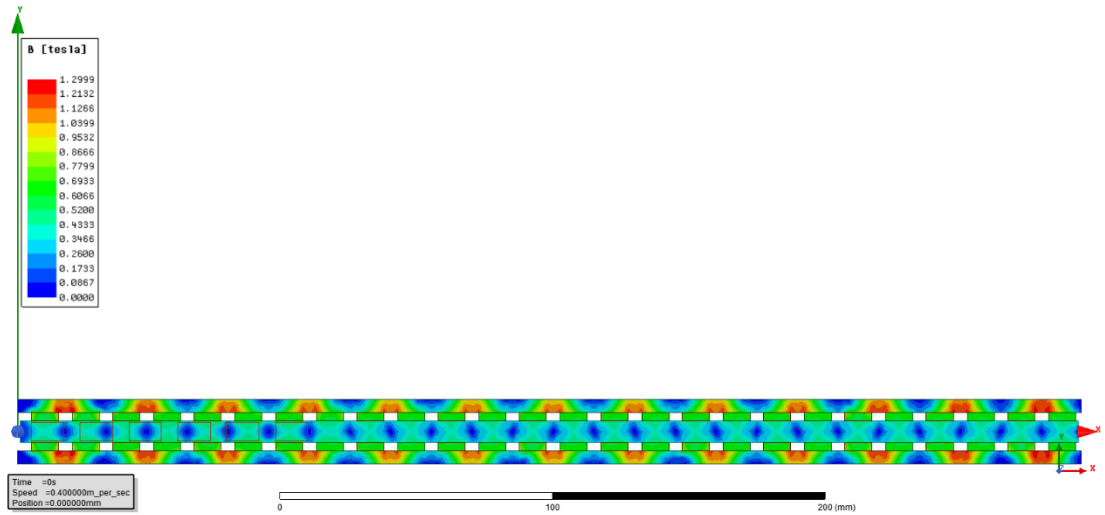
Şekil 3.13: Aynı mıknatıslanma yönüne göre fazlarda indüklenen gerilim eğrisi



Şekil 3.14: Aynı mıknatıslanma yönüne göre fazlarda oluşan akı bağlantısı



Şekil 3.15: Aynı mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı çizgilerinin dağılımı



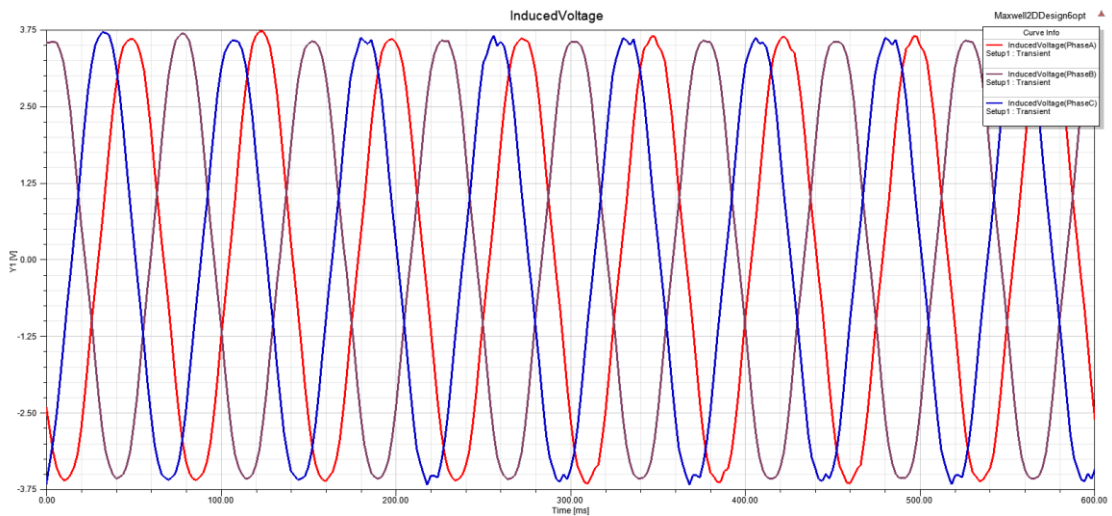
Şekil 3.16: Aynı mıknatıslanma yönüne göre manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

Doğru mıknatıslanma yönünün tayinden sonra fazlarda indüklenen gerilimin sinüzoidal yapıda olmasına rağmen, fazlar arası açının ve kutuplar arası mesafenin fazla olması, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterildiği gibi manyetik akı çizgilerinin dağılımının ve manyetik akı yoğunluğunun düzgün olmaması nedeniyle hava aralığı, sargı boyutu ve sargı aralığı parametreleri Tablo 3.8'deki gibi güncellenmiş ve analiz işlemi tekrar edilmiştir. Burada kutup aralıkları sabit tutularak, sadece sargı parametreleri değiştirilmiş ve fazlar üzerinde indüklenen gerilim eğrileri ile manyetik akı bağlantıları incelenmiştir.

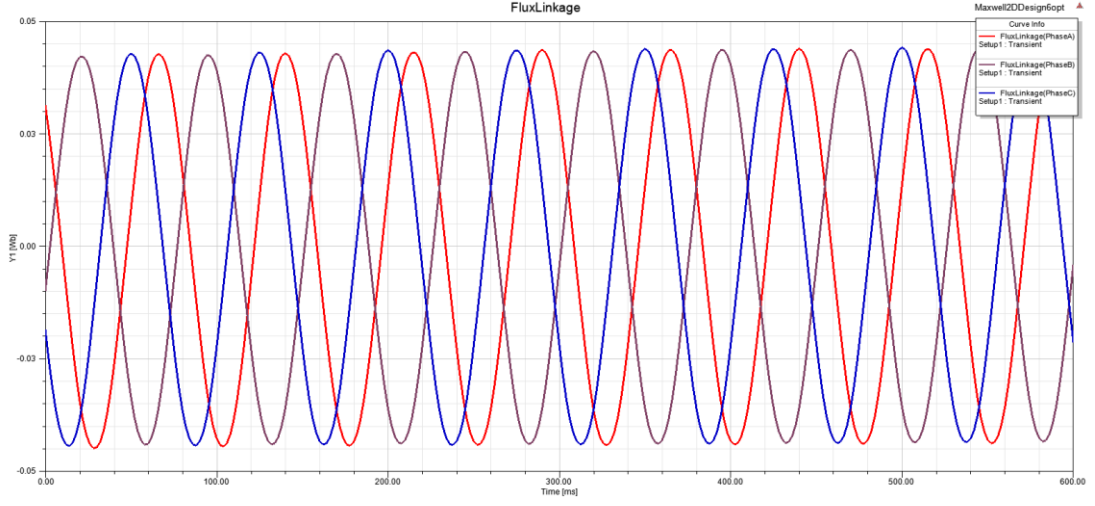
Tablo 3.8: Güncellenmiş optimizasyon parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değer
Hava Aralığı (mm)	g	3.2
Kutup Aralığı (mm)	τ	15
Sargı Boyu (mm)	L	55
Sargı Genişliği (mm)	L_c	17
Sargı Yüksekliği (mm)	h_b	3
Sargı İç Hava Boşluğu (mm)	g_c	1
Sargı Aralığı (mm)	p_c	18
Mıknatıslar Arası Mesafe (mm)	G	5
Faz Başına Tur Sayısı (spir)	N_f	400

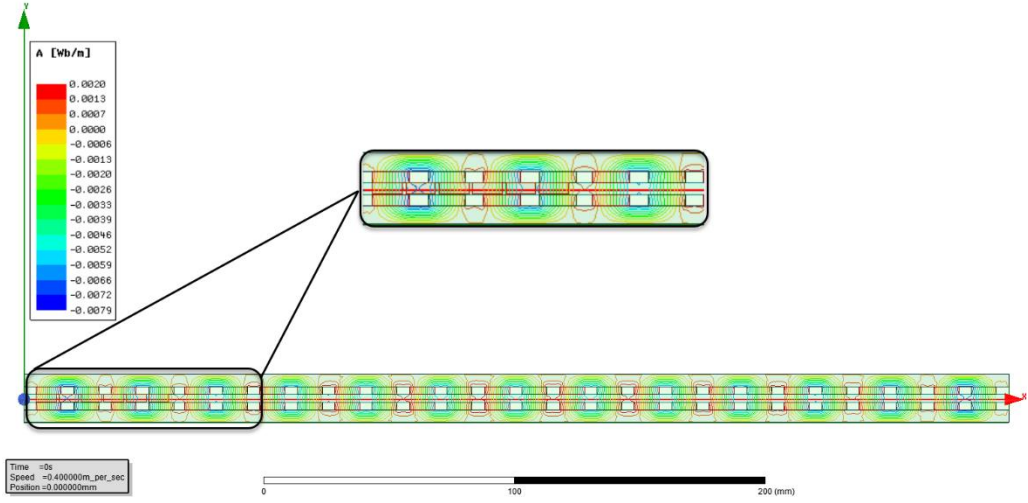
Lineer motor sargı aralıklarının ve boyutlarının düşürülmesi sonucu faz açısı değerleri yaklaşık olarak eşitlenerek Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'deki gibi daha düzgün bir sinüzoidal yapı elde edilmiştir. Ancak bu sargı boyutlarında 400 spire sahip bir bobinin uygulanabilirliğini sağlamak oldukça zordur. Sargı aralıkları üzerinde çok fazla bir değişiklik yapmadan sargı boyutlarının tekrardan artırılarak ideal uygulanabilir ölçülere getirilmelidir. Diğer bir husus ise Şekil 3.19'daki manyetik akı çizgilerinin ve Şekil 3.20'de manyetik akı yoğunluğunun dağılımından da görüleceği üzere kutuplar arası mesafenin fazla olması forcer adım geçişlerini zorlaştıracaktır, daha düzgün manyetik akı dağılımı için kutup aralıklarının küçültülmesi gerekmektedir.



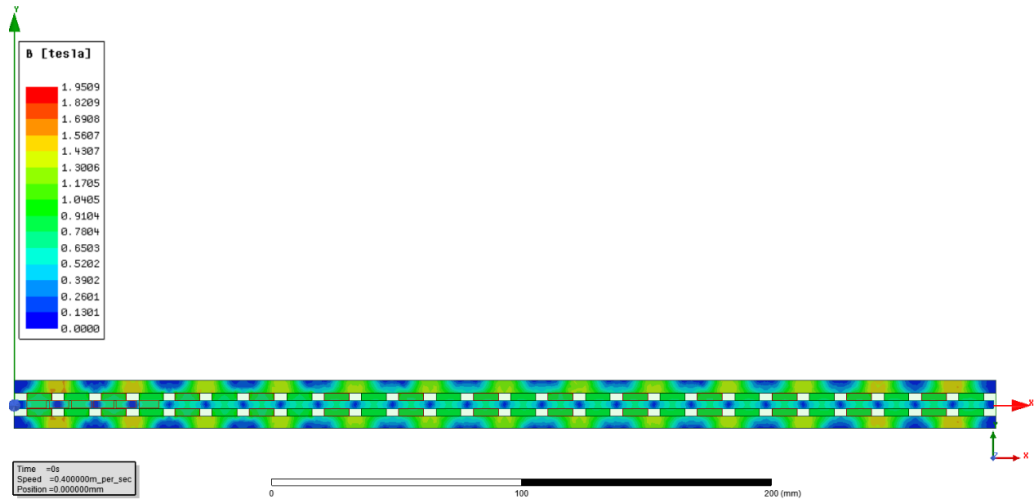
Şekil 3.17: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu fazlarda indüklenen gerilim eğrisi



Şekil 3.18: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu fazlarda oluşan akı bağlantısı



Şekil 3.19: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu manyetik akı çizgilerinin dağılımı



Şekil 3.20: Optimizasyon parametrelerindeki değişim sonucu manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

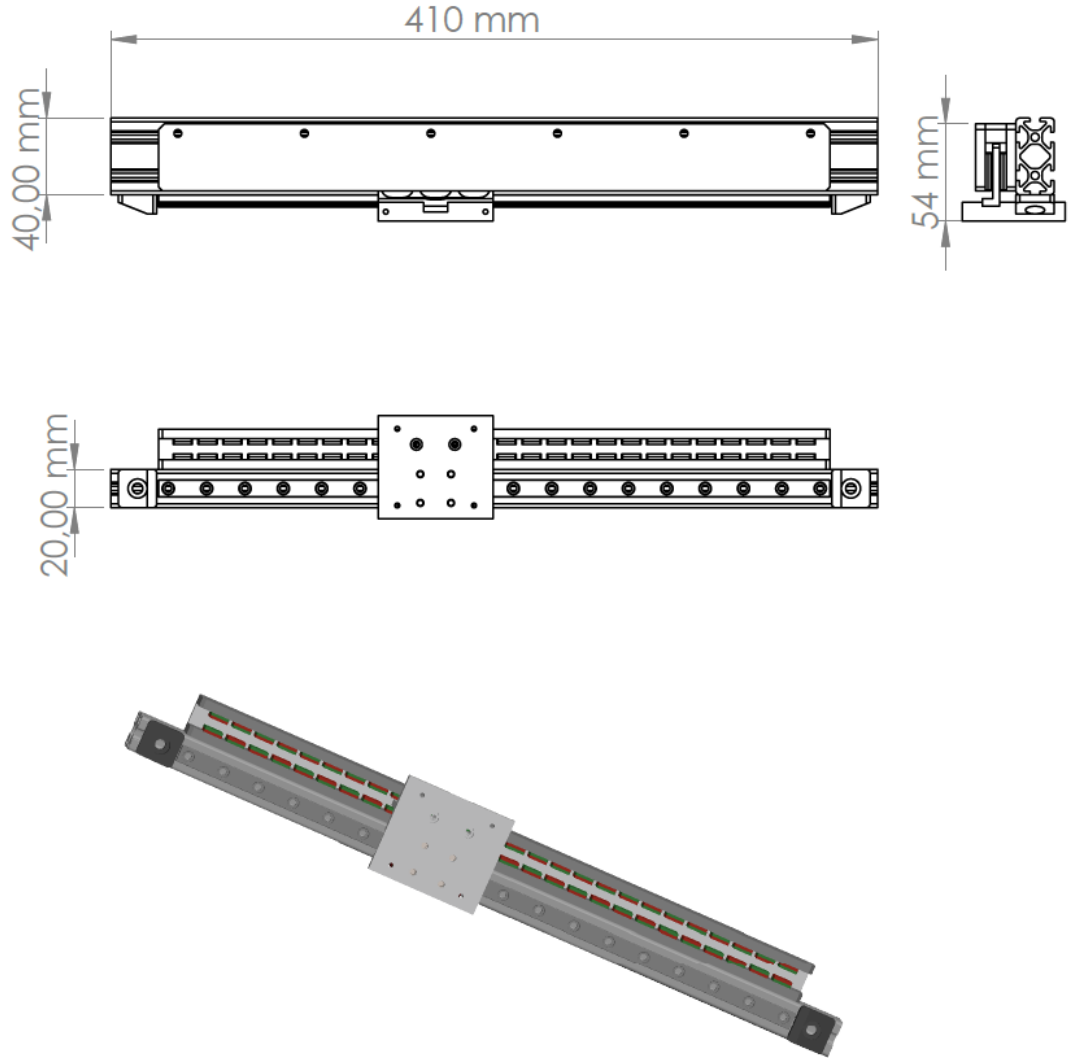
Lineer motor temel tasarım parametrelerindeki değişimin, motor üzerindeki etkilerinin incelenmesi sonucu nihai analize ve uygulamaya aktarılacak tasarım parametreleri Tablo 3.9'daki gibi belirlenmiştir.

Tablo 3.9: Tasarımı gerçekleştirilecek lineer motor parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Hava Aralığı	g	6	mm
Kutup Aralığı	τ	13	mm
Kutup Çifti Sayısı	-	26	-
Mıknatis Yüksekliği	h_m	3	mm
Mıknatis Genişliği	w_m	10	mm
Sargı Boyu	L	60	mm
Sargı Genişliği	L_c	25	mm
Sargı Yüksekliği	h_b	5	mm
Sarım Son Nokta Uzaklığı	w_c	6.5	mm
Sargı İç Hava Boşluğu	g_c	3	mm
Yoke (Stator) Yüksekliği	l_b	5	mm
Sargı Aralığı	p_c	19	mm
Mıknatisler Arası Mesafe	G	3	mm
Bobin Hava Boşluğu Uzunluğu	d_c	14	mm
Akı Yoğunluğu	B_r	0.78	Tesla
Manyetik Bağıl Geçirgenlik	μ_r	1.09	-
Faz Başına Tur Sayısı	N_f	300	spir
Model Derinliği	-	20	mm
Yoke (Stator) Materyal	-	Steel_1008	-
Forcer Materyal	-	Alüminyum	-

Bu çalışmada, motorun konumlandırılması forcera bağlanmış bir enkoder tarafından gerçekleştirilecektir. Kullanılacak olan enkoder çözünürlüğü 0.125mm olarak öngörülmektedir. Günümüzde lineer motor sistemlerine ait enkoderlerde çözünürlük 1 μ m' ye kadar inebilmektedir. Ancak yüksek hızlarda çalışan sistemlerde bu değere sahip enkoderler kullanmak çok yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Gerçek motora monte edilen enkoder FEA modeline ve 3D modele dahil değildir.

Aşağıda Şekil 3.21’de 3 fazlı bobine ve 26 NdFe35 mıknatıs çiftine sahip tasarımı yapılan lineer motorun, Solidworks programında çizilmiş 2 ve 3 boyutlu şekli gösterilmektedir.

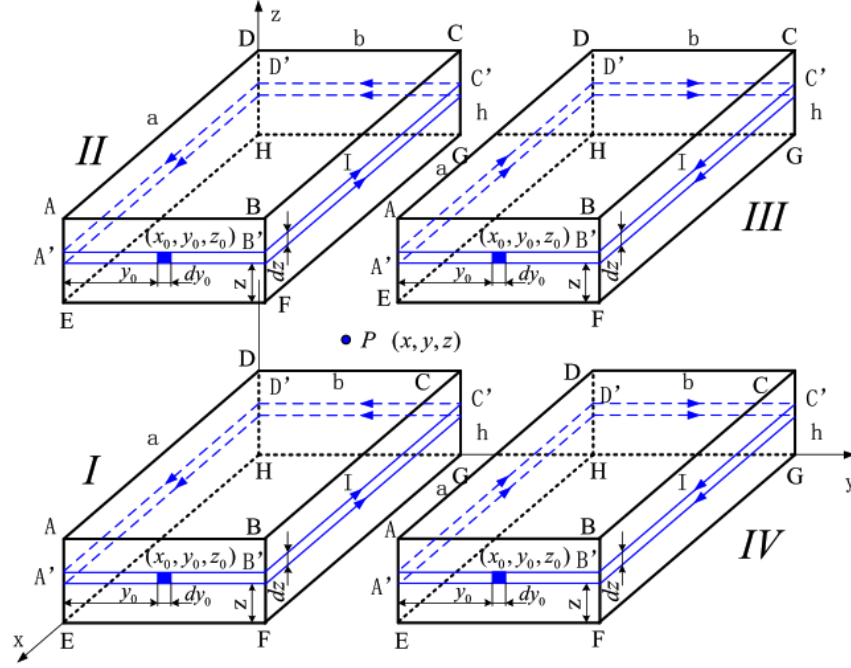


Şekil 3.21: Tasarımı gerçekleştirilecek lineer motorun 2 ve 3 boyutlu çizimi

3.3 Lineer Motorun Matematiksel Modellenmesi

Hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer motorun manyetik alan yapısı, hava boşluğu manyetik alanın dağılımının bitişik sabit mıknatıs bloklarının manyetik alanları tarafından belirlendiğini gösterir. Bu nedenle, Şekil 3.22’deki gibi tek bir sabit mıknatıs bloğu için uzaysal manyetik alanın, hava çekirdekli bir sabit

mıknatıslı doğrusal motorda çoklu etkileşimli sabit mıknatıs blokları ile modellenmesi, hava boşluğu manyetik alan analizinin temelidir.



Şekil 3.22: Manyetik alan biriminin çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı doğrusal motordaki yapısı (Qian 2019)

Bio-Savart yasasına göre, koordinat sistemi uzayında bir P (x, y, z) noktasında bir elektrik teli tarafından üretilen manyetik indüksiyonun yoğunluğu (3.26) eşitliğindeki gibi ifade edilir:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I dl \times (r - r')}{|r - r'|^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I \sin \theta dl}{|r - r'|^2} \quad (3.26)$$

Burada μ_0 , bir vakumdaki manyetik iletkenliktir.

Statorun sabit mıknatıs dizisinde hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer motorda, genel motor manyetik alan modeli, birden fazla kapalı sabit mıknatıs biriminden, yani üstteki dört bitişik sabit mıknatıs bloğundan gelen yerel manyetik alanların kombinasyonudur. Manyetik alan modelleme ve analizi sırasında, her bir birimin manyetik alanı, kapalı bir sabit mıknatıs biriminin manyetik alanının ve üst ve alt katmanlardaki dört bitişik sabit mıknatıs bloğunun manyetik alanının modellenmesi ve analizinden türetilir. Sabit mıknatıs dizisinde, sabit mıknatıs birimi

ABCDEFGH'nin (Şekil 3.22) manyetik alan yoğunluğu analiz edilir; Sabit mıknatıs ABCD-EFGH'nin H noktası, bir Kartezyen koordinat sistemi H-xyz oluşturmak için başlangıç noktası olarak ayarlanır. Sabit mıknatısın dışında, uzayda P noktasındaki manyetik indüksiyon yoğunluğunu hesaplamak için sabit bir mıknatıs mikro döngü manyetik alan birimi seçilir. Ampere'in moleküler dolaşım hipotezine göre, sabit mıknatıs içinde bir mikro kapalı akım döngüsü A'B'C'D'A seçilir. Bu kapalı akım döngüsü tarafından tanımlanan sabit mıknatısın dışındaki uzayda P noktasındaki manyetik indüksiyon yoğunluğu, A'B', B'C', C'D' ve D'A' bölümlerindeki mikro akımlarla uzayda P noktasında manyetik alanlara ayrıştırılır. (Gou 2004) Diyagramda, a, b ve h sırasıyla tek bir sabit mıknatıs bloğunun uzunluğu, genişliği ve kalınlığıdır (Qian 2019).

$$\begin{aligned}
B_{z-1} = \frac{\mu_0 J_s}{4\pi} \int_0^h \left\{ \int_0^b \left[\frac{a-x}{[(x-a)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \right. \\
+ \left. \frac{x}{[x^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dy_1 \\
+ \int_0^a \left[\frac{b-y}{[(x-x_1)^2 + (y-b)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
+ \left. \frac{y}{[y^2 + (x-x_1)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dx_1 \Big\} dz_1
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Çift taraflı hava çekirdekli bir sabit mıknatıslı lineer motorda sabit bir mıknatıs dizisinin yerleştirilmesi, tekrarlayan bir modele sahiptir. Motor manyetik alanı, bu nedenle, manyetik alan biriminin modellenmesi ve analiz edilmesinden türetilir. Şekil 3.22'de gösterildiği gibi, hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer motorun hava boşluğu manyetik alanındaki P noktasındaki manyetik indüksiyon yoğunluğu, manyetik alan birimindeki dört sabit mıknatıs bloğunun (dört sabit mıknatıs bloğu) üst üste konulmasıyla belirlenir. I, II, III ve IV olarak işaretlenmiştir). Bunlar arasında, sabit mıknatıs bloğu I ile uzayda P noktasındaki manyetik indüksiyon yoğunluğunun hesaplanması (3.27) eşitliğindeki gibi tamamlandı; sabit mıknatıs blokları II, III ve IV daha sonra sabit mıknatıs bloğu I'in uzamsal ötelemeleri olarak işlem görür. Benzer şekilde, bir manyetik alan biriminin manyetik alan modeli, sabit mıknatıs bloğu I'in uzaysal ötelemesine dayanarak elde edilir (Qian 2019).

Sabit mıknatısın öteleme analizine dayanarak, sabit mıknatıs bloğu II'nin manyetik alanı, sabit mıknatıs bloğu I alanının z_m için z eksenini boyunca uzaysal ötelemesi ile elde edilir. Sabit mıknatıs bloğu I için analitik hesaplamaya benzer şekilde, sabit mıknatıs bloğu II'nin z eksenini boyunca P noktasındaki manyetik indüksiyon yoğunluğu (3.28) eşitliği ile ifade edilir:

$$\begin{aligned}
B_{z-II} = \frac{u_0 J_s}{4\pi} \int_0^h \left\{ \int_0^b \left[\frac{a-x}{[(x-a)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \right. \\
+ \left. \left. \frac{x}{[x^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dy_2 \right. \\
+ \int_0^a \left[\frac{b-y}{[(x-x_2)^2 + (y-b)^2 + (z-z_2-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
+ \left. \left. \frac{y}{[y^2 + (x-x_2)^2 + (z-z_2-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dx_2 \right\} dz_2
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Şekil 3.22'de gösterildiği gibi, sabit mıknatıs bloğu IV için bir çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer motorun manyetik alan birimi, y eksenini boyunca y_m için sabit mıknatıs bloğu I'in manyetik alanının uzamsal ötelemesi ve N-S kutuplarını değiştirerek polarize elde edilir (Qian 2019). Z eksenini boyunca P noktasında karşılık gelen manyetik indüksiyon yoğunluğu (3.29) eşitliğindeki gibidir:

$$\begin{aligned}
B_{z-IV} \\
= \int_0^h \frac{u_0 J_s}{4\pi} \left[\int_0^b \left[\frac{x-a}{[(x-a)^2 + (y-y_4-y_m)^2 + (z-z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \right. \\
+ \left. \left. \frac{-x}{[x^2 + (y-y_4-y_m)^2 + (z-z_2)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dy_4 \right. \\
+ \int_0^a \left[\frac{b-y}{[(x-x_4)^2 + (y-b-y_m)^2 + (z-z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
+ \left. \left. \frac{y_m-y}{[(x-x_4)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_3)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dx_4 \right] dz_4
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Sabit mıknatıs blokları III ve IV, xyz koordinat sisteminde aynı yönde manyetik alanlara sahiptir ve analiz süreçleri çok benzerdir. Sabit mıknatıs bloğu III tarafından indüklenen P noktasındaki manyetik indüksiyon yoğunluğu, sabit mıknatıs bloğu IV tarafından indüklenen manyetik indüksiyon yoğunluğunun analitik olarak hesaplanmasıyla elde edilir (Qian 2019). Sabit mıknatıs bloğu III için sonuçlar, z_m için z eksenini boyunca sabit mıknatıs bloğu IV'den elde edilen sonuçların uzaysal çevirisi ile (3.30) eşitliğindeki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
B_{z-III} &= \int_0^h \frac{u_0 J_s}{4\pi} \left[\int_0^b \left[\frac{x-a}{[(x-a)^2 + (y-y_3-y_m)^2 + (z-z_0-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \right. \\
&+ \left. \frac{-x}{[x^2 + (y-y_3-y_m)^2 + (z-z_2-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dy_3 \\
&+ \int_0^a \left[\frac{b-y}{[(x-x_3)^2 + (y-b-y_m)^2 + (z-z_1-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
&+ \left. \frac{y_m-y}{[(x-x_3)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_3-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] dx_3 \Big] dz_3
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Şekil 3.23'te yer alan sabit bir mıknatıs dizisindeki manyetik alan biriminin, analitik hesaplamasına göre manyetik alan biriminden gelen hava boşluğundaki P noktasındaki manyetik indüksiyon yoğunluğu (3.31) eşitliğindeki gibidir:

$$B_z = B_{z-I} + B_{z-II} + B_{z-III} + B_{z-IV} \tag{3.31}$$



Şekil 3.23: Manyetik alan biriminin görseli

4. LİNEER MOTORUN MANYETİK MODELLEMESİ VE ANALİZİ

Bu bölümde Ansys Maxwell programı aracılığıyla çift taraflı hava çekirdekli lineer servo motorun 2 ve 3 boyutlu modellemesi sağlanarak sonlu elemanlar metodu ile analizi gerçekleştirilecektir. Ansys Maxwell ortamında 2 boyutlu model oluşumu Bölüm 3'te yer alan tasarım parametreleri temel alınarak gerçekleştirilir. Lineer motorun mekanik konstrüksiyonunun oluşturulma sürecinde, manyetik modellemeleri yol gösterici unsurlardandır. Ansys Maxwell programı sayesinde, kullanılacak materyal türünden, bobin yapısına, mıknatıs boyutlarından, bobinlerin konumlarına ve bobinden akacak akımın yönüne kadar her aşama test ve simüle edilebilmektedir. Lineer motorun manyetik benzetimi sayesinde elde edilen kuvvet, manyetik akı yönü, manyetik akı yoğunluğu, hareket doğrultusu, akacak akım, malzemelerin doyuma gittiği sınırları gibi birçok parametre hakkında bilgi edinilebilmektedir. Ansys Maxwell, elektrik makineleri tasarımlarında Ar-Ge aşmalarında kullanılan, tasarımcıyı yönlendiren ve tasarım sonucu oluşan motorun analitik çözümlerinin detaylı olarak alınabildiği, minimum prototip üretimi ile seri üretime geçiş sağlayan elektrik motor tasarımların vazgeçilmez araçlarından biridir.

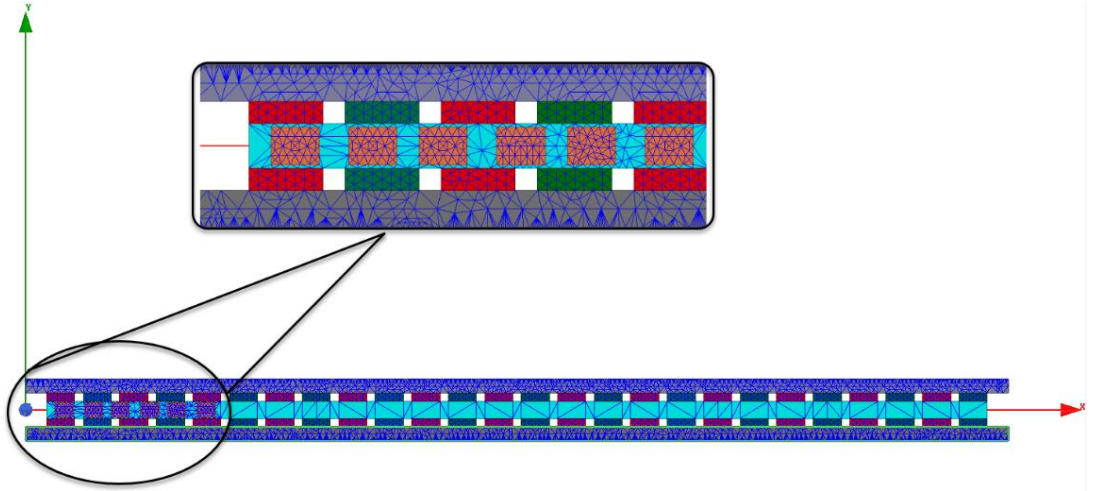
Elektrikli makine tasarımında dikkate alınması gereken bazı faktör vardır. Başarılı tasarım yalnızca oluşabilecek demir, bakır, yalıtım, soğutma ve hava aralığı sorunlarını çözmekle değil, aynı zamanda üretim, işletim ve bakım masraflarının maliyetini optimize etmekle sağlanabilir (Taskın 2015). Bu nedenle, motor tasarımında aşağıdakilere hususlara dikkat etmelidir:

- Manyetik devre veya akı yolu, minimum MMF kullanarak gerekli miktarda akı oluşturmalı ve çekirdek kayıpları minimum olmalıdır.
- Elektrik devresi ve sargılar, sargı düzenlemesinde herhangi bir karmaşıklık olmadan indüklenen gerekli EMF' yi sağlamalı ve bakır kayıpları minimum olmalıdır.
- İzolasyon, makine parçalarının sorunsuz bir şekilde ayrılmasını sağlamalı ve akımı belirtilen yollarda sınırlamalıdır. Makine parçaları da sağlam olmalıdır.

4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), herhangi bir geometriyi parçayı küçük alanlara ayırarak elde edilen ve sonlu eleman olarak adlandırılan bu alanlardan elde edilen çözüm yöntemini ifade etmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, sağlam bir teorik temele sahiptir. Alanlardan gelen hesaplamaların kesin çözüme doğru doğruluğunu sağlayan matematik teoremlerine dayanmaktadır. Alan çözümleri için uzaysal ayrıklaştırma rafine edilir ve tahmin edilen sabitlere uyarlanarak kullanılır.

Maxwell alan çözücüsünde, Maxwell denklemleri, gerektiğinde uygun sınır ve başlangıç koşullarıyla sonlu bir bölgedeki elektromanyetik alan problemlerini çözmek için kullanılır. Mümkün olan tek sonlu eleman yapısı dörtyüzlü (tetrahedral) eleman elemanlardır. Modeldeki tüm dört yüzlü elemanların birleştirilmesiyle sonlu eleman ağı (mesh) oluşturulur. Sonlu elemanlar yöntemi, doğru sonuçlar veren hem geometriyi hem de malzeme özelliklerini (örneğin doğrusal olmayan manyetik malzeme) hesaba katar. Sonuçların doğruluğu, ağın ne kadar ayrıntılı olduğuna bağlıdır. Mesh ne kadar yoğunsa, sonuçların doğruluğu o kadar yüksek olur. Bununla birlikte, doğruluk ve hesaplama süresi arasında, mesh ayrıntılarıyla orantılı olarak artan bir denge vardır.



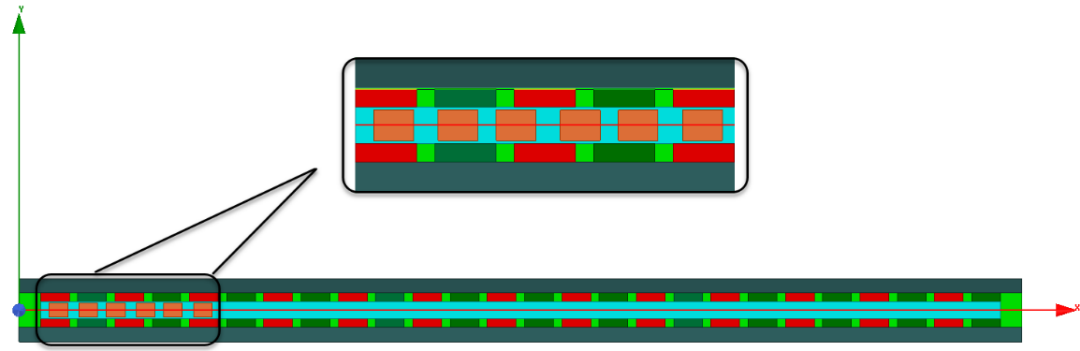
Şekil 4.1: Tasarlanan motorun iki boyutlu ağ örüntüsü (mesh)

Model için toplam 10677 ağ (mesh) yapısı oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de makinenin örgülü geometrisi yer almaktadır.

4.2 Lineer Motorun İki Boyutlu (2D) Modeli ve Analizi

Bu çalışmada da motor, ilk olarak Maxwell 2D ortamında tasarlanmıştır. Malzeme olarak; stator malzemesi Steel_1008 çeliği seçilmiştir, sabit mıknatıslar NdFe35 ve sargılar bakır olarak atanmıştır.

Ansys Maxwell 2D modülü ile transient, magnetostatik, eddy akımları, elektrostatik, alternatif akım ve doğru akım analizleri yapılabilmektedir. Bu çalışmada transient analizi kullanılmıştır. Transient analizinde; akım, gerilim, akı, moment, nüve kayıpları gibi parametrelerinin hem zaman domeninde hem de frekans domeninde analizi yapılabilmektedir. Bu çalışmada akım, akı, hız, pozisyon ve kuvvet verileri incelenmiştir. İki boyutlu analiz için modellenen motorun Şekil 4.2’de görülmektedir.



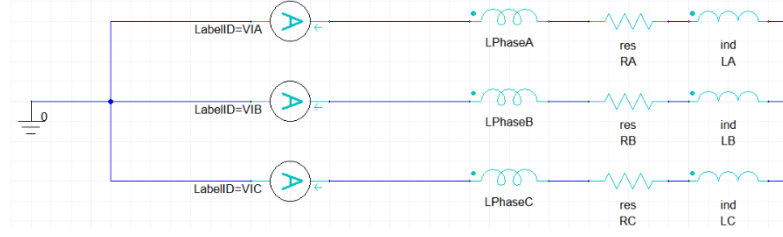
Şekil 4.2: Tasarlanan motorun iki boyutlu (2D) modeli

4.2.1 Generatör Mod Çalışma Simülasyon

Akım ve gerilim kaynakları kaldırılarak lineer motor yüksüz olarak Ansys Maxwell ortamında simülasyonu gerçekleştirilir. Bu simülasyon sabit mıknatısların makinenin sargılarındaki neden olduğu EMF'yi hesaplamayı mümkün kılar. Lineer makineler dairesel makine bazlı alternatiflere göre hassasiyeti ile tercih edildiğinden; EMF'yi analiz etmek önemlidir.

Yüksüz analiz, 400 mm / s hız ayarlanarak ve bir elektrik döngüsü üzerinden simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Makinede sıfır akım durumunun simülasyonu için Şekil 4.3'teki devre kullanılmıştır. RA, RB ve RC bobinlerin direncini, LA, LB ve LC

ise bobinlerin endüktansını temsil ederken, LPhaseA, LPhaseB ve LPhaseA, uç sargılarını açıklamaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçları aşağıdaki gibidir.



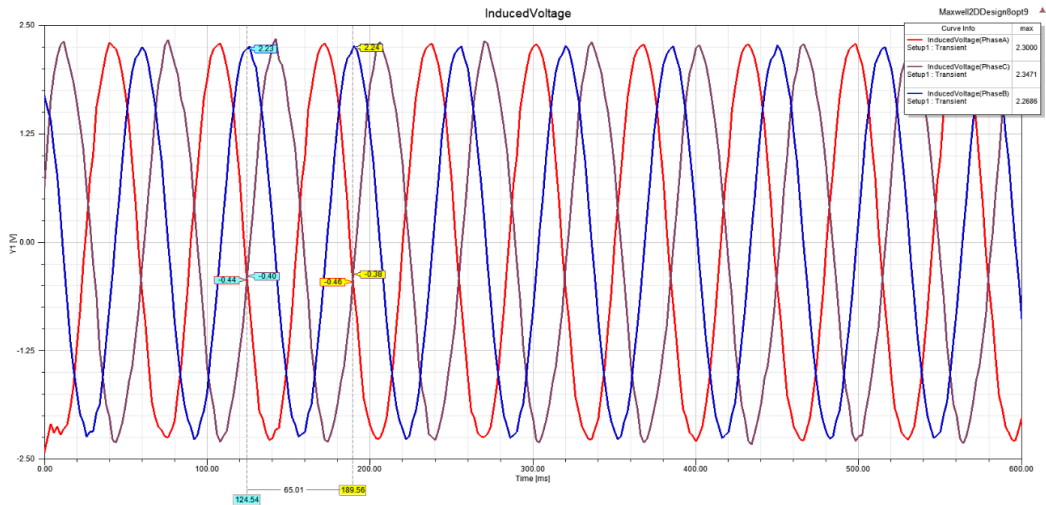
Şekil 4.3: Generatör mod açık devre şeması

Ansys Maxwell üzerinde sargıların hareket hızları 400 mm / s hız ayarlanarak generatör çalışma prensibine göre, sargılardan 0 akım geçen devre üzerinden simüle edilir. Simülasyon sonucu her fazda oluşan maksimum EMF 2.34 V olarak Şekil 4.4'teki gibi elde edilir. Sonuçlardan da görüleceği üzere, bobinlere hiçbir uyarım uygulanmadığında bobinlerde sinüzoidal bir gerilim indüklenmektedir. Bu tasarım söz konusu motorun sinüzoidal bir motor olduğunu göstermektedir. Periyodu 65,01ms ve $f=1/t$ denklemine göre frekansı 15,38 Hz'dir. Elde edilen frekans üzerinden hız (v) değerinin doğrulaması eşitlik (4.1) ile gerçekleştirilir.

$$v = 2 \cdot \tau \cdot f$$

$$v = 2 \times 0,013 \times 15,38 \quad (4.1)$$

$$v = 0,3998 \text{ m/s}$$



Şekil 4.4: Generatör mod analizinde fazlarda indüklenen gerilim eğrisi

Sabit mıknatısların 400 mm / s hızla hareket eden sargıların üzerinde indüklediği gerilim nümerik hesaplama ile doğrulaması (4.2) eşitliği ile gerçekleştirilir. Tasarım parametreleri Bölüm 3'ten elde edilerek (4.2) eşitliği üzerinde yerine koyulur. Sargı faktörü konsantre bobinler için maksimum k_w 0,76 olarak kabul edilir (Vărățiceanu 2014). Bir bobin 300 spirden meydana gelmektedir. Bir mıknatıs üzerindeki B manyetik akı yoğunluğu bilgisi de simülasyon sonucunda da görüleceği üzere yaklaşık olarak 0,78T olarak hesaplanır (bkz. Resim 4.8). Bu ölçüm, tasarımdaki herhangi bir kutbun merkezinde elde edilir.

$$E_{ph} = \sqrt{2} \cdot v \cdot B_g \cdot L \cdot N_{ph} \cdot k_w$$

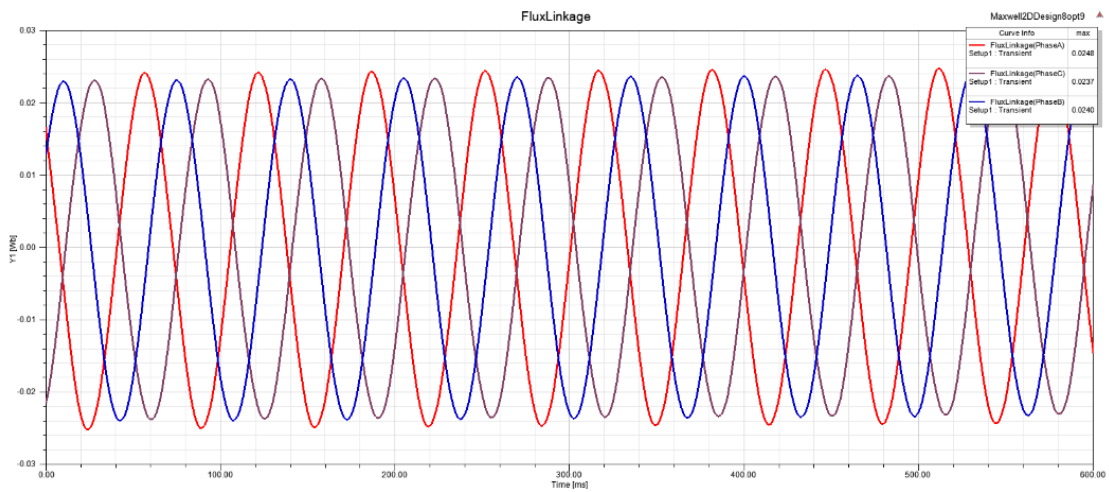
$$v = 0,4 \frac{m}{s}, \quad B_g = 0,78 T, \quad L = 0,02m, \quad N_{ph} = 300 \quad (4.2)$$

$$E_{ph} = \sqrt{2} \times 0,4 \times 0,78 \times 0,02 \times 300 \times 0,76$$

$$E_{ph} = 2,012 V$$

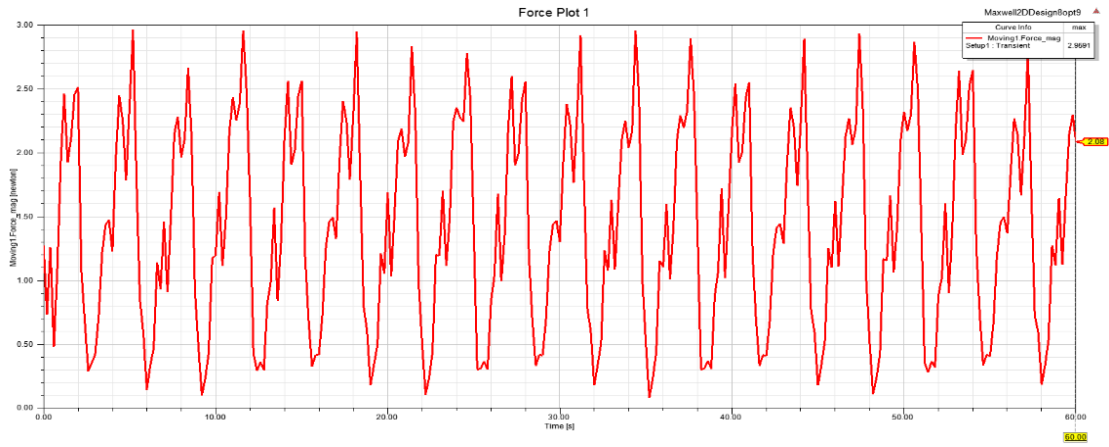
Nümerik hesaplama ile simülasyon sonucu arasındaki fark sayısaldir. Ansys maxwel de zaman adımı, doğrusal olmayan artık değer seçimi ve ağın kalitesi gibi sonuçları etkileyen birkaç nokta vardır. Bu nedenle fark önemsizdir.

Şekil 4.5'te 400 mm / s hız ayarlanarak generatör çalışma prensibine göre sargılardan 0 akım geçen devre üzerinden simülasyonu sonucu her fazda oluşan manyetik akı bağlantıları gösterilmektedir.



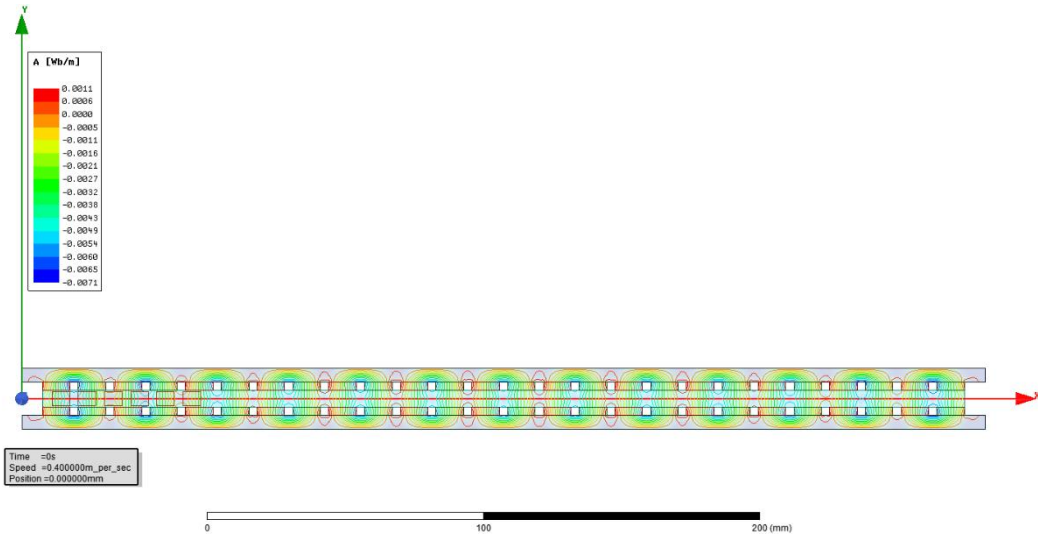
Şekil 4.5: Generatör mod analizinde fazlarda oluşan akı bağlantısı

Şekil 4.6’da generatör çalışma prensibine göre yüksüz elektrik döngüsü üzerinden simülasyonu sonucu oluşan kuvvet eğrisi yer almaktadır.



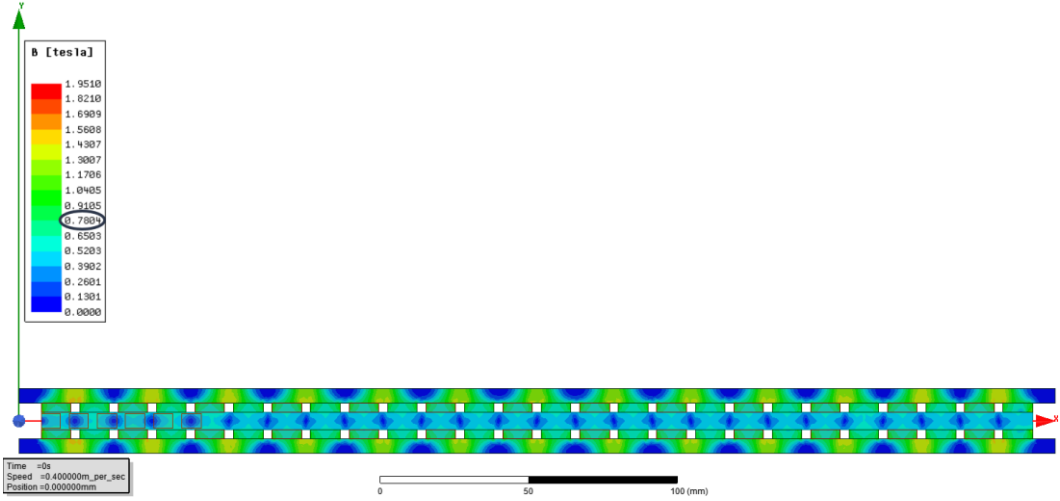
Şekil 4.6: Generatör mod analizinde kuvvet-zaman eğrisi

Şekil 4.7’de lineer motorun generatör çalışma prensibine göre yüksüz elektrik döngüsü üzerinden simülasyonu sonucu oluşan manyetik akı çizgilerinin dağılımı yer almaktadır.



Şekil 4.7: Generatör mod analizinde manyetik akı çizgilerinin dağılımı

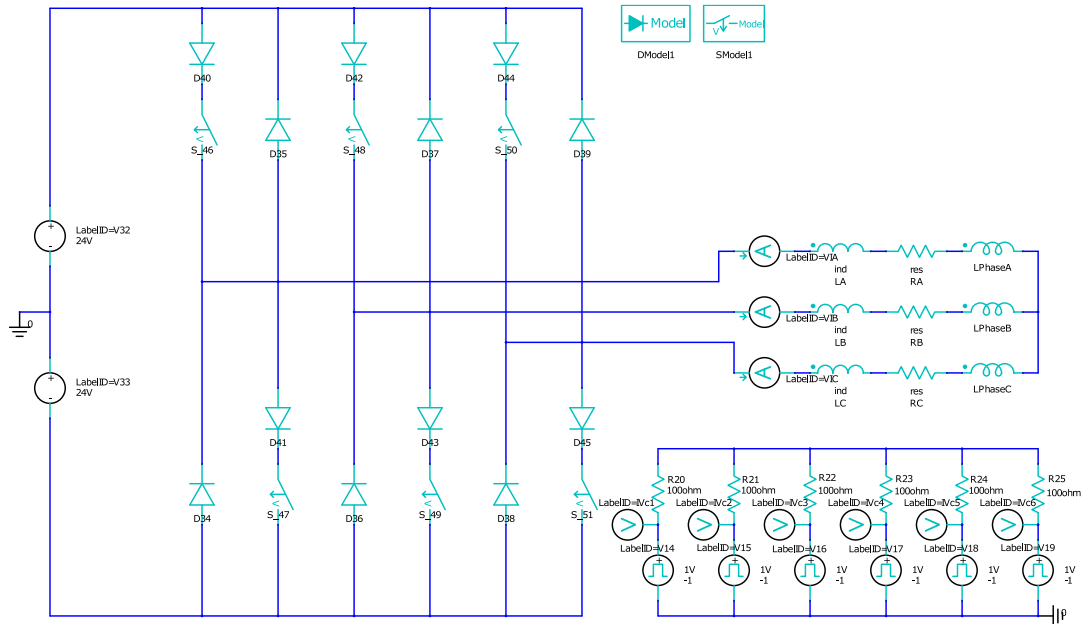
Generatör çalışma prensibine göre bir mıknatıs üzerindeki B manyetik akı yoğunluğu bilgisi de Şekil 4.8’de simülasyon sonucunda da görüleceği üzere yaklaşık olarak 0,78 Tesla olarak hesaplanır.



Şekil 4.8: Generatör mod analizinde oluşan manyetik akı yoğunluğu

4.2.2 Boşta Çalışma Simülasyonu

Boşta çalışma durumunun simülasyonu için, lineer motor bobinleri Şekil 4.9'daki devrede gösterildiği gibi harici devre tarafından enerjilendirilir. Doğrusal makineler tipik olarak, sınırlı bir iz uzunluğuna sahip olduklarından, yalnızca küçük bir süre için nominal hızda çalışır. Doğrusal makinelerin çoğu uygulaması, ani hızlanma ve yavaşlamayı içerir. Bu bölüm boşta çalışma durumunda sinüzoidal akımlarla uyarılan lineer motorun sonlu elamanlar analizini içerir.



Şekil 4.9: Lineer motor için Maxwell Circuit Editor de düzenlenmiş harici uyarma devresi

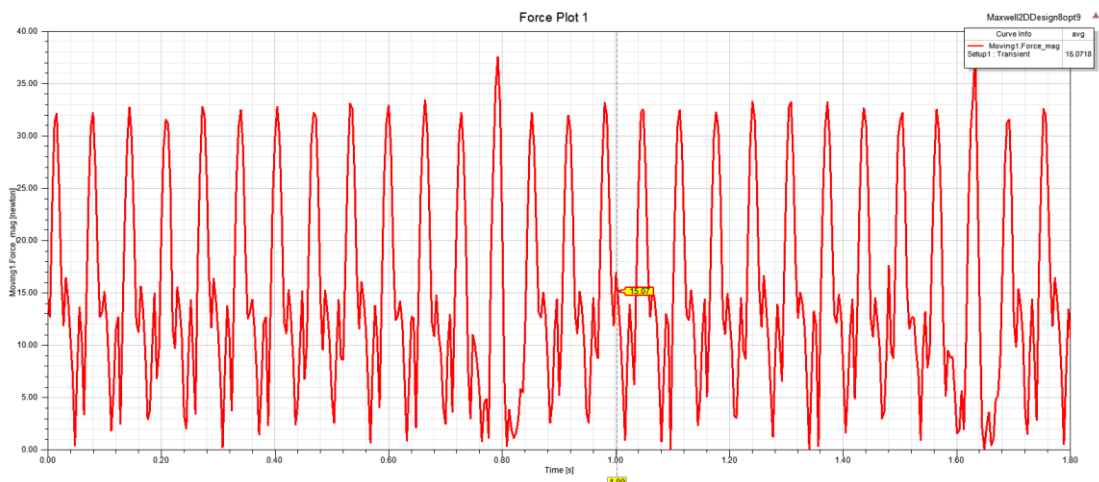
Lineer motorun Maxwell 2D ortamını tasarımı tamamlandıktan sonra güç elektroniği inverter devresi, Maxwell yazılımı için temel bir tamamlayıcı güç elektroniği tasarımcısı olan Maxwell Circuit Editor kullanılarak oluşturulur. Katı hal diyotları ve anahtarları, kullanıcının kontak direnci, emisyon katsayısı, bariyer yüksekliği, ters kırılma gerilimi ve akım gibi verileri girebileceği bir modelleme penceresi tarafından değerlendirilir. Anahtar modeli, açma / kapama durumu direnci ve kontrol voltajları gibi değişken girişler içerir. Anahtarlar invertörde ideal kabul edilir ve sadece invertör kısmı temel alınmıştır.

Analiz boşa çalışma olarak 400 mm/s sabit hız altında gerçekleştirilir. Bobinlerin uyartımı harici uyarma devresi tarafından gerçekleştirilir. Harici uyartım devresine 24 VDC gerilim uygulanmış olup, sargı direnci (res) ve endüktansları (ind) Tablo 4.1'deki gibi gerçek değerlere yakın olacak şekilde tanımlanmıştır.

Tablo 4.1: İki boyutlu analizde kullanılan bobin direnç ve endüktans değerleri

Parmetre	Değer	Birim
Res (Sargı Direnci)	11	ohm
Ind (Sargı Endüktansı)	1.75	mh

Simülasyon sonucu Şekil 4.10'da de görüleceği üzere ortalama 15.07N itme elektromanyetik kuvvet değeri elde edilmiştir. Yüksüz olarak hesaplanan kuvvet dalgalanmaları, yüklü koşullardakilerden farklı olabilir. Boşa çalışma durumunda, kuvvet dalgalanmalarının nedenini tahmin etmek zordur çünkü bu hareket ettiricinin konumuna, akım yüküne ve aynı zamanda kilit kuvvetine bağlıdır (Remy 2007).



Şekil 4.10: Lineer motorun boşa çalışma analizi sonucu ortalama elektromanyetik kuvveti

Boşta çalışma analiz sonucunun nümerik hesaplama ile doğrulaması (4.3) eşitliği ile gerçekleştirilir. Bir mıknatıs üzerindeki B manyetik akı yoğunluğu bilgisi, simülasyon sonucunda da görüleceği üzere yaklaşık olarak 0.78T olarak hesaplanır (bkz. Resim 4.8). Bu ölçüm, tasarımdaki herhangi bir mıknatısın merkezinde elde edilebilir. Model derinliği ise Bölüm 3 tasarım parametreleri bölümümde de belirtildiği üzere 20 mm'dir. Bir faz üzerinden akan akım miktarının simülasyon sonucu ise Şekil 4.11'de verilmiştir. Aynı faz için iki bobin dönüşü olduğundan kuvvet değerini elde etmek için bu kuvvet değerinin 2 ile çarpılması gerekir (Taskın 2015).

$$F = I(L.B)$$

$$F = 2,1 \times (0,02 \times 0,78)$$

$$F = 0,03276 \tag{4.3}$$

$$F = 0,03276 \times 2$$

$$F = 0,06552N$$

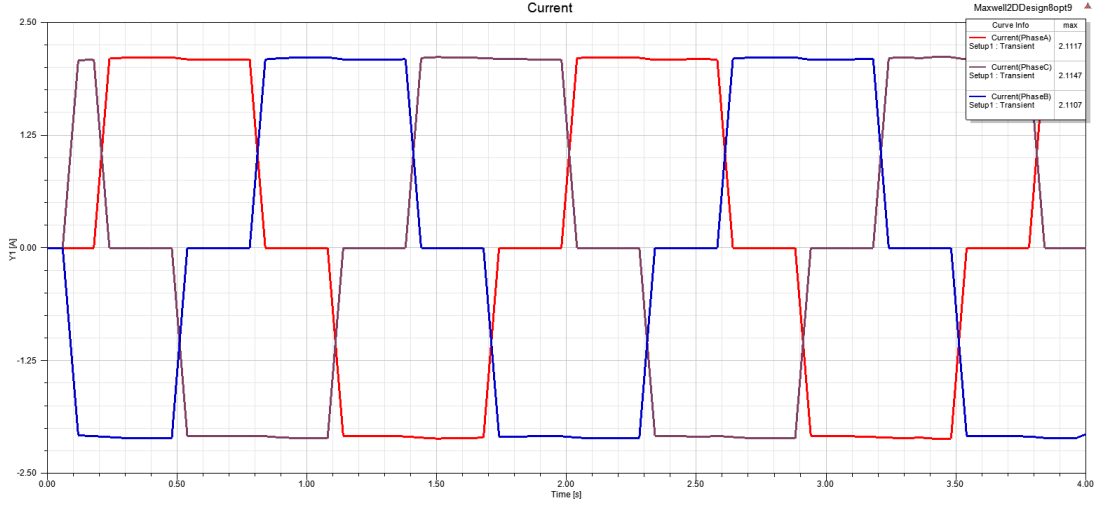
Bununla birlikte, döner alan vektörünün dikkate alınması gerekir. Üç fazlı bir sistemde, üç faz arasında 120 derece varsa ve doğrusal ise, ortaya çıkan döner alan vektörü vektörlerin 1,5 katı olacaktır (Taskın 2015). Ayrıca bir kutup çifti altına denk gelen spir sayısı hesabını yapacak olursak 300 spir 400 mm² alan kaplamakta bir kutup çiftinin kapladığı alan 200 mm² bu alan denk gelen spir sayısı 150 ardından oluşan toplam kuvvet (4.4) eşitliğindeki gibi hesaplanır:

$$F = 0,06552 \times 150$$

$$F = 9,828 \times 1,5 \tag{4.4}$$

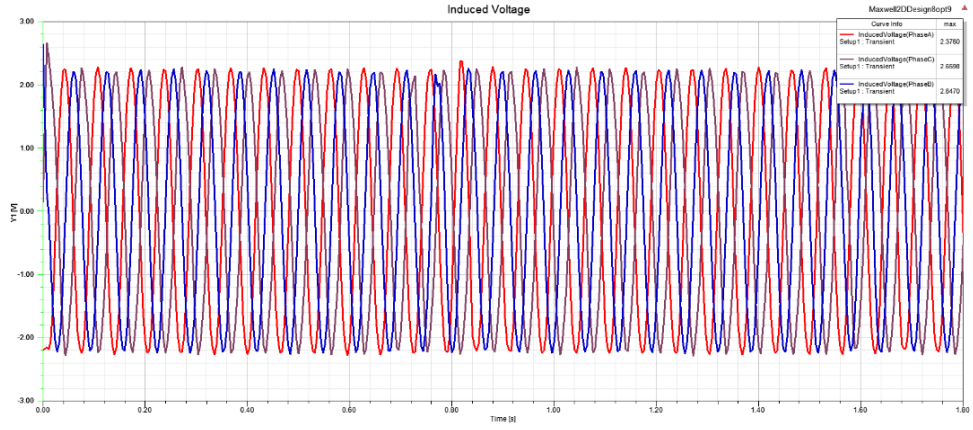
$$F = 14,74N$$

Hesaplanan elektromotor kuvvet ile simülasyon sonucu arasındaki yaklaşık 0.5N fark vardır. Maxwell iki boyutlu sonlu elemanlar analizinde, zaman adımı, doğrusal olmayan artık değer seçimi ve mesh yapısının kalitesi gibi sonuçları etkileyen birçok nokta vardır. Bu nedenle aradaki fark ihmal edilebilecek seviyededir. Lineer motorun boşta çalışma analizinde Şekil 4.11'deki gibi bir faz başı oluşan akım 2.1 amperdir.

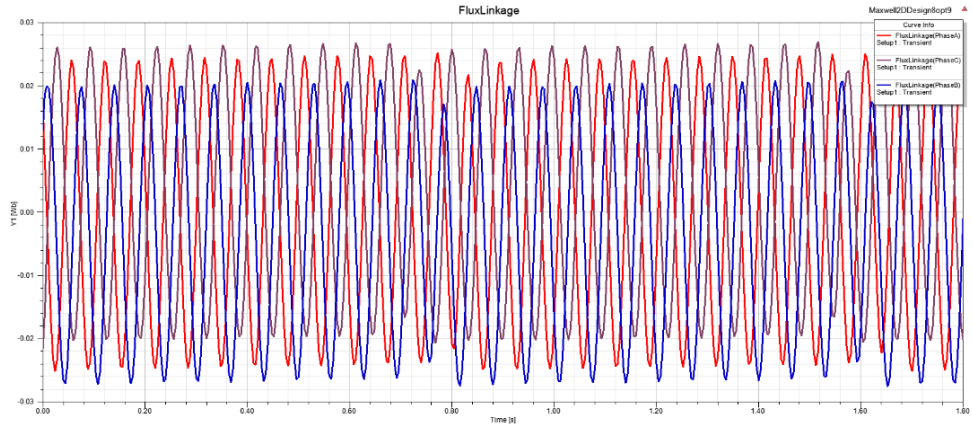


Şekil 4.11: Linear motorun bobin uyarım akım grafiği

Linear motorun boşa çalışma analizi sonucu fazlarda indüklenen gerilim ve akı bağlantıları Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'teki gibi elde edilmiştir.

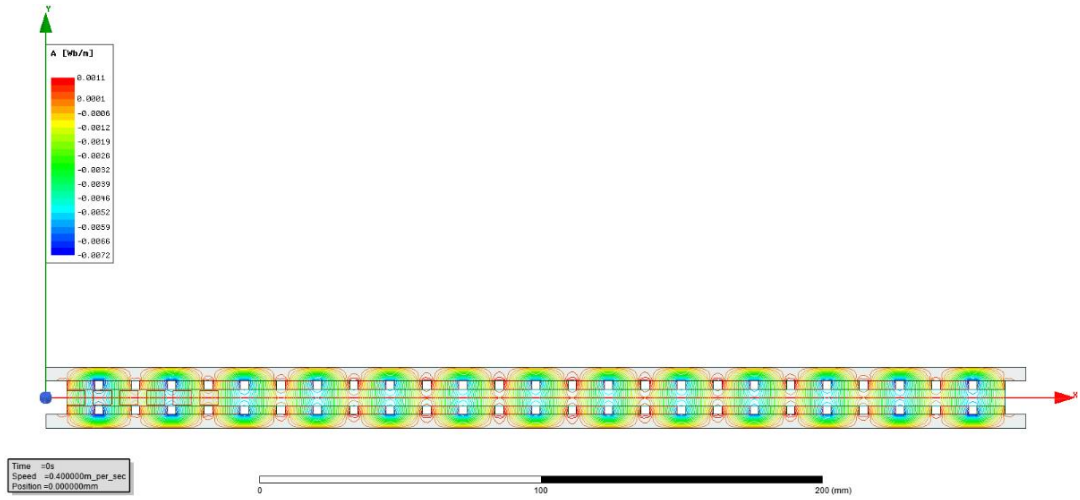


Şekil 4.12: Linear motorun boşa çalışma analizi sonucu fazlarda indüklenen gerilim

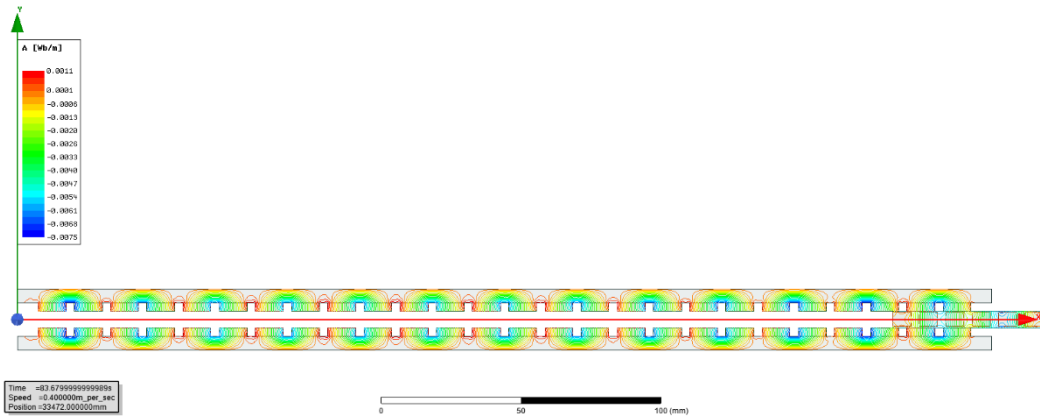


Şekil 4.13: Linear motorun boşa çalışma analizi sonucu fazlarda oluşan akı bağlantısı

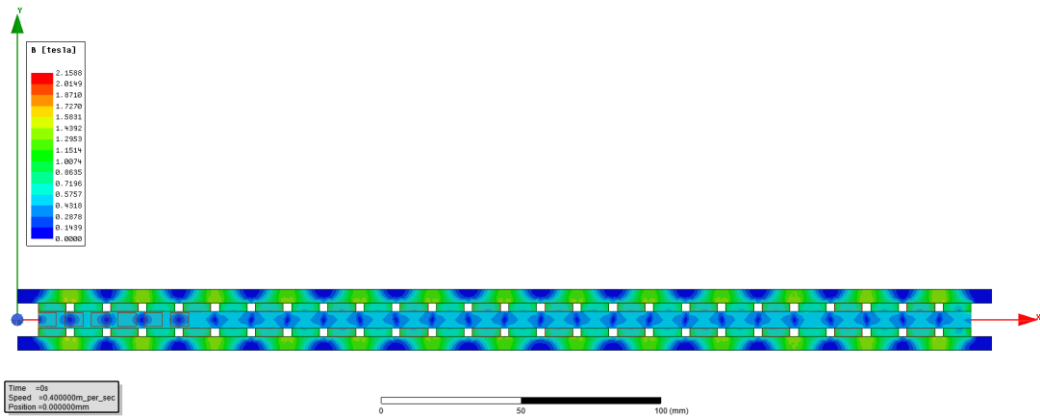
Tasarlanan motorun transient analizinde enerjili bobinlerin yer aldığı kutup noktalarıyla beraber ilk ve son kutup noktalarında manyetik akı çizgilerinin daha yoğun olduğu Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'teki gibi görülmektedir.



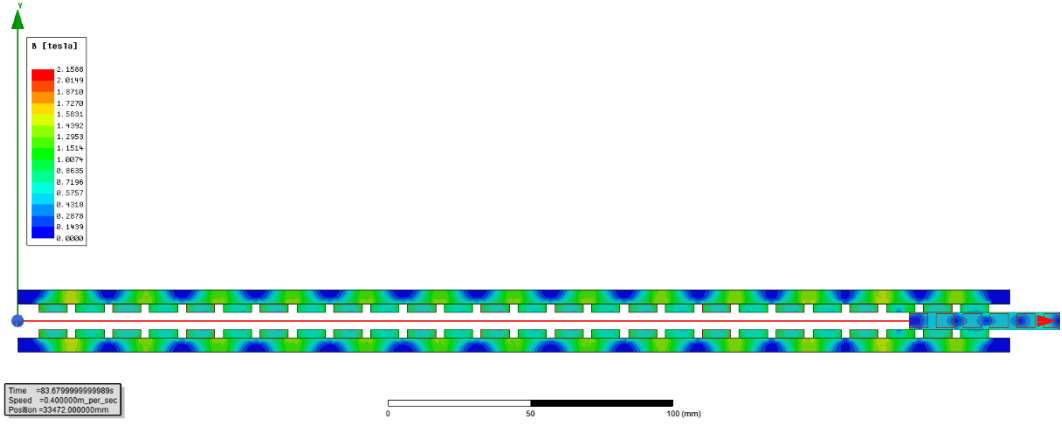
Şekil 4.14: Lineer motorun 0. saniyedeki manyetik akı çizgilerinin dağılımı



Şekil 4.15: Lineer motorun 83.67 saniyedeki manyetik akı çizgilerinin dağılımı

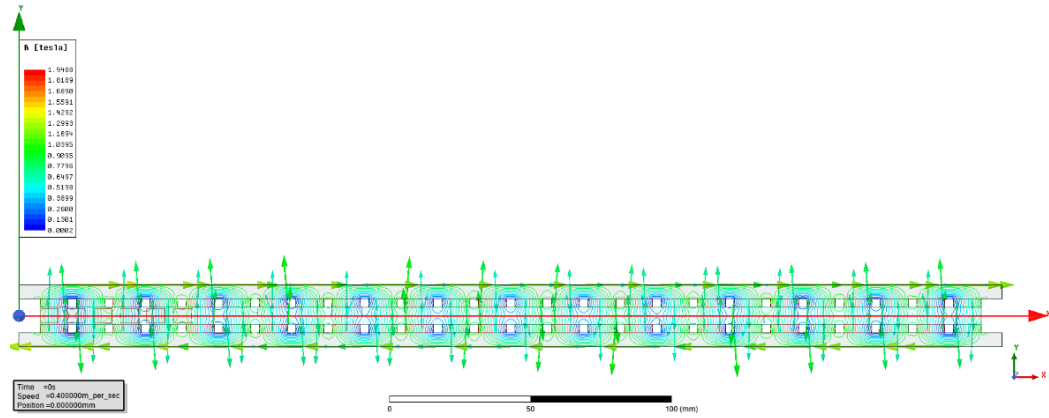


Şekil 4.16: Lineer motorun 0. saniyedeki manyetik akı yoğunluğu



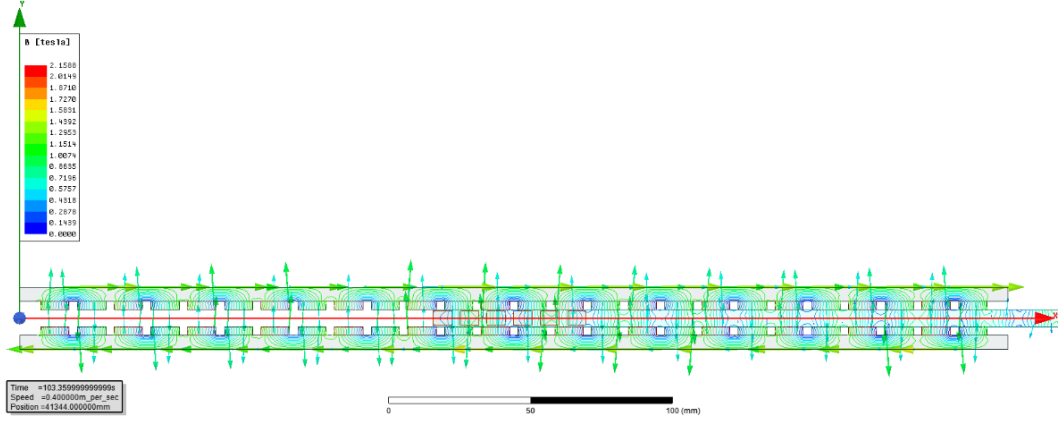
Şekil 4.17: Lineer motorun 83.67 saniyedeki manyetik akı yoğunluğu

Lineer motor tasarımında kullanılan Steel_1008 çelikte meydana gelen manyetik akı yoğunluğunun istenilen değerden fazla olması motorda fazladan demir kayıplarına neden olmaktadır. Steel_1008 çeliği B-H eğrisinden de anlaşılacağı üzere 2-2.5 Tesla aralığında doyuma gitmektedir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de görüldüğü gibi yapılan çalışmada manyetik akı yoğunluğunun 1-1.5 Tesla aralığında tutularak demir kayıplarının azaltılması sağlanmıştır.



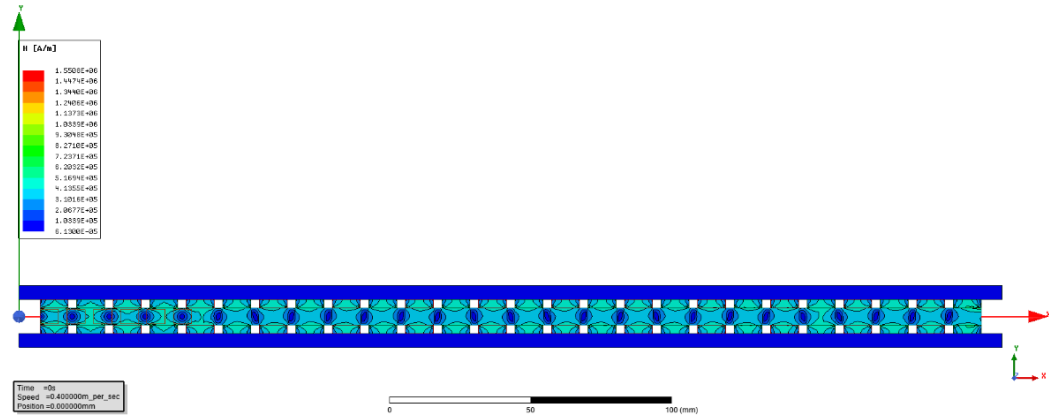
Şekil 4.18: Lineer motorun 0. saniyedeki manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı

Şekil 4.18 ve 4.19’da lineer motorun akı yoğunluğunun vektörel dağılımı gösterilmektedir. Şekil 4.19’da forcerın orta nokta olduğu durum için 103.35 saniyedeki manyetik akı yoğunluğu vektörel dağılımı verilmiştir. Yapılan transient analizde sabit mıknatısların oluşturduğu manyetik akı yönleri kolaylıkla tespit edilebilir.

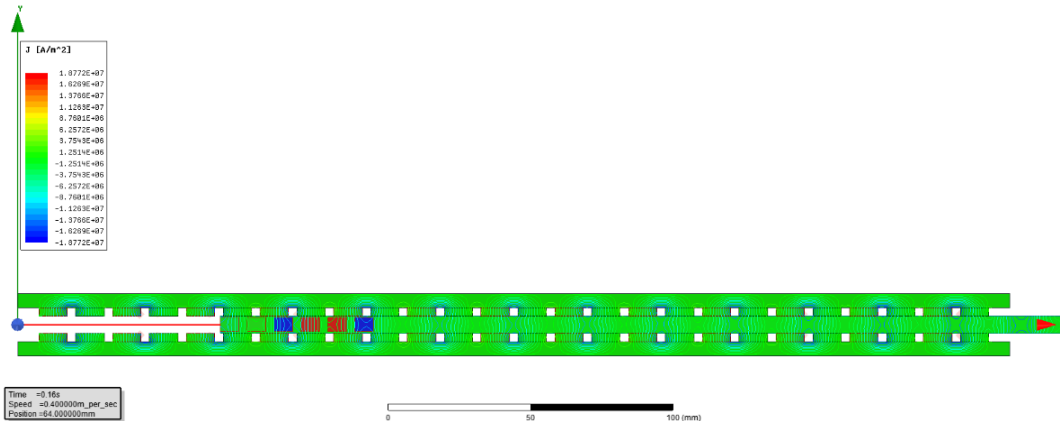


Şekil 4.19: Lineer motorun 103.35 saniyedeki manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı

Şekil 4.20’de lineer motorun boşa çalışma analizi sonucu elde edilen manyetik alan şiddeti gösterilmektedir. Şekil 4.21’de ise lineer motorun boşa çalışma analizi sonucu birim alandaki akım yoğunluğu gösterilmektedir.



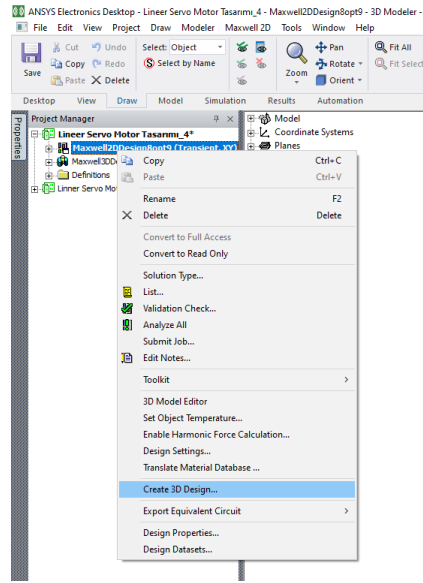
Şekil 4.20: Lineer motorun manyetik alan şiddeti H(A/m)



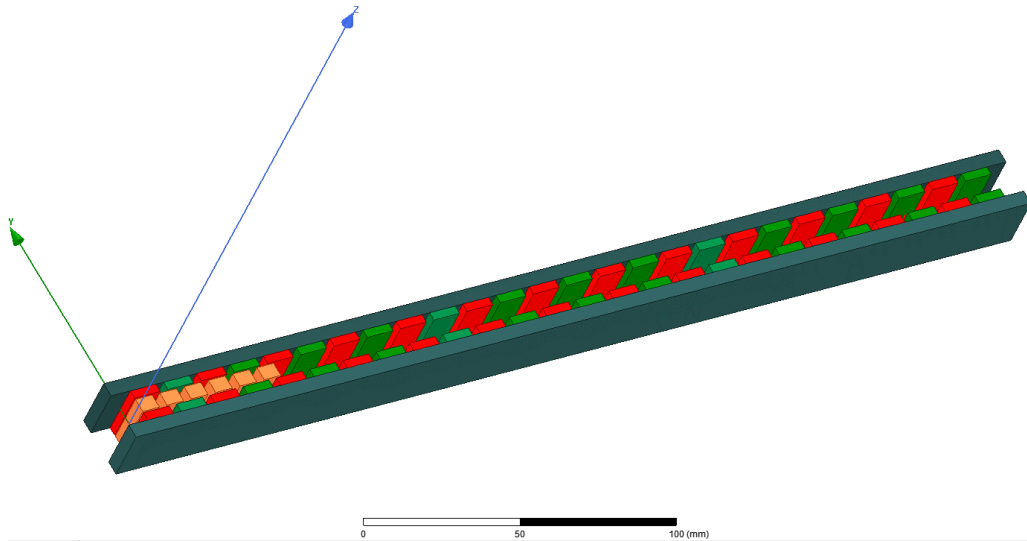
Şekil 4.21: Lineer motorun birim alandaki akım yoğunluğu (A/m^2)

4.3 Lineer Motorun Üç Boyutlu (3D) Modeli ve Analizi

Lineer motorun Ansys Maxwell ortamında iki boyutlu tasarımı tamamlandıktan sonra Şekil 4.22'de gösterildiği gibi mevcut iki boyutlu model, Ansys Maxwell 3D ortamına “Create 3D Design” seçeneğiyle rahatlıkla aktarılabilir. Lineer motor Ansys Maxwell 3D ortamında Şekil 4.23'teki gibi modeli oluşturulmuştur. İlk olarak, alan dağılımını bulmak ve boyunduruğun doğru boyutlandırılması için doğrusal motorun sabit kısmının magnetostatik analizi gerçekleştirildi.

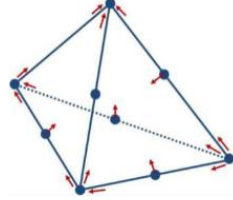


Şekil 4.22: Lineer motorun üç boyutlu (3D) modelinin oluşturulması

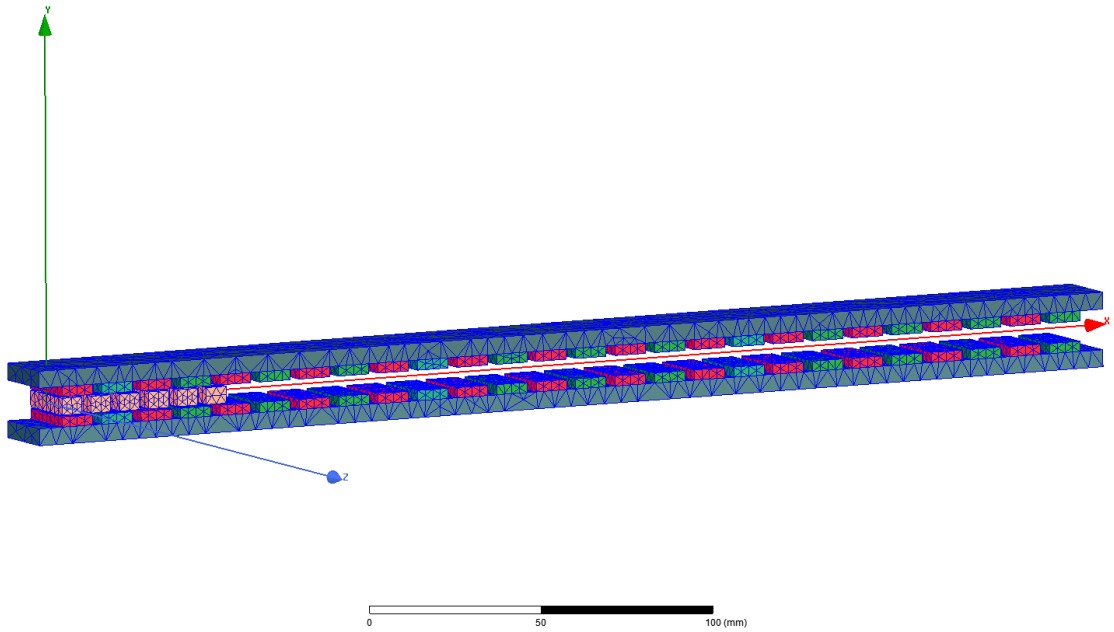


Şekil 4.23: Lineer motorun Ansys Maxwell ortamında üç boyutlu (3D) modeli

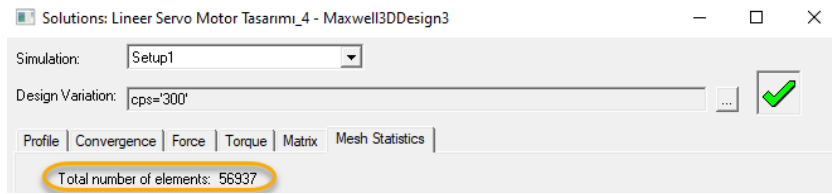
Maxwell 3D’de sonlu elemanın temel birimi tetrahedrondur (Şekil 4.24). Modelde yer alan dört yüzlü yapıların tamamı tüm modelin sonlu elemanlar örgüsü ya da daha basit bir ifade ile ağ örgüsü olarak adlandırılır. Maxwell’de ağ oluşturma işlemi oldukça önemli bir yer tutmaktadır çünkü mesh işlemi hesaplanan sonuçların doğruluğunu doğrudan etkilemektedir (ANSYS 2013).



Şekil 4.24: Dört yüzlü eleman (tetrahedra)



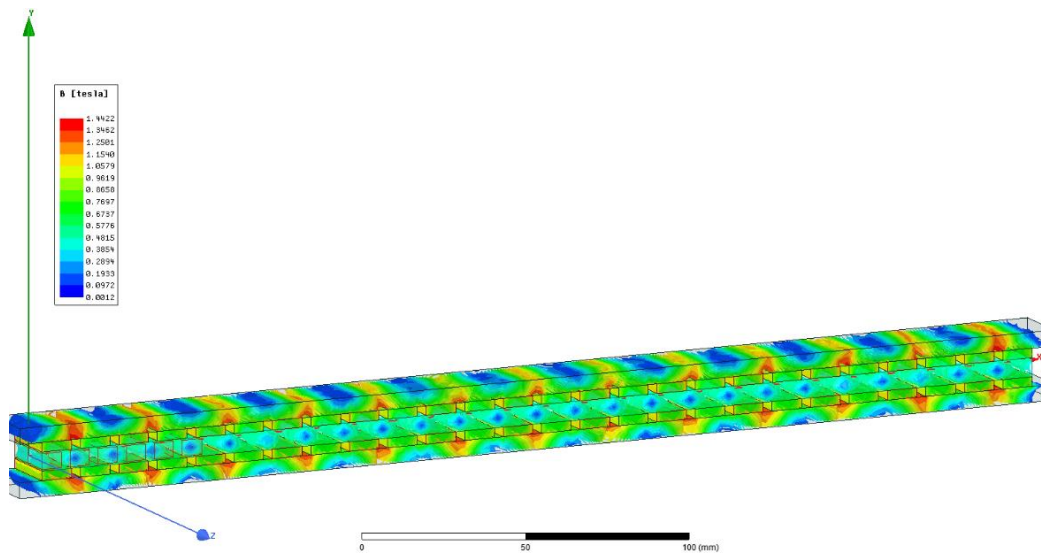
Şekil 4.25: Tasarlanan motorun üç boyutlu ağ görüntüsü (mesh)



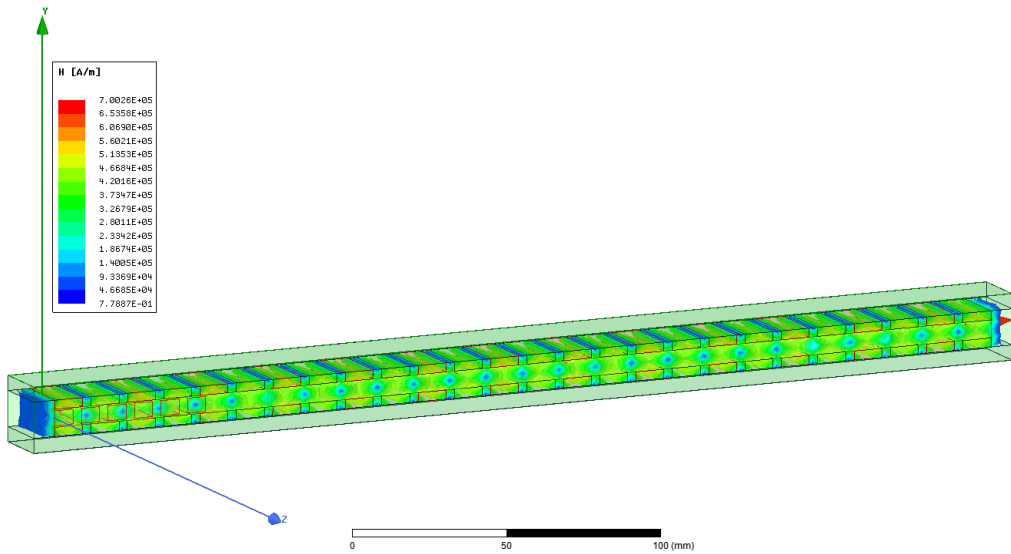
Şekil 4.26: Toplam oluşan ağ (mesh) sayısı

Şekil 4.25’te makinenin örgülü geometrisi gösterilmektedir. Lineer motorun üç boyutlu modeli için Şekil 4.26’da gösterildiği gibi toplam 56937 ağ (mesh) yapısı oluşturulmuştur.

Şekil 4.27'de motorun sabit kısmındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve hava boşluğunun ortasında hava boşluğu akı yoğunluğu dağılımı sunulmuştur. Boyunduruktaki manyetik alan dağılımının incelenmesi, dağılımın her iki mıknatısta bir ağırlıklı olarak gruplandırıldığını ortaya koymaktadır. Manyetik akı yoğunluğunun iki mıknatıs kutupları arası geçiş bölgelerinde daha fazla olduğu ve hava boşluğundaki akı yoğunluğu düzenli olarak dağıldığı gözlemlenmektedir. 2 boyutlu model analizinde de tespit edildiği gibi stator gövde üzerindeki manyetik akı yoğunlukları 1-1.5 Tesla aralığında kalmaktadır, Steel_1008 çeliği 2-2.5 Tesla aralığında doyuma gitmektedir. Şekil 4.28'de ise lineer motorun manyetik alan şiddeti gösterilmektedir.



Şekil 4.27: Lineer motorun üç boyutlu modelinin manyetik akı yoğunluğu dağılımı



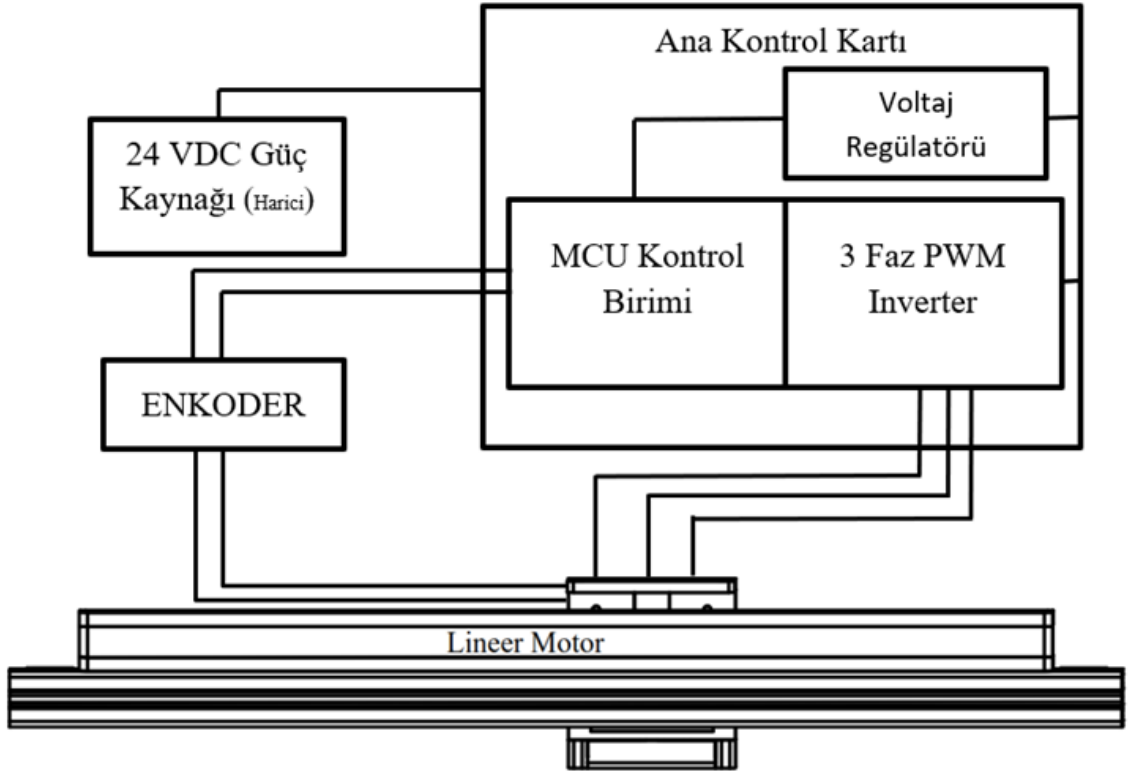
Şekil 4.28: Lineer motorun üç boyutlu modelinin manyetik alan şiddeti H(A/m) grafiği

5. LİNEER MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

Teorik olarak bir lineer servo motor, kapalı döngü pozisyon geri beslemesine sahip sadece üç fazlı bir senkron motordur. Her bir bobine üç fazlı bir sinüzoidal akım vererek lineer motoru bir döner motor gibi kontrol etmek mümkündür. Bobinler sırayla enerjilendirilerek periyodik hareketli bir manyetik alan oluşmasını sağlayacak ve bu da motoru çalıştıracak bir kuvvetin oluşmasına neden olacaktır. Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen motor dairesel motor tiplerinde BLDC motor gibi davranır. Bu bölümde, lineer motorun istenilen şekilde hareket etmesi için bobinlere uygulanan enerjinin hangi sırada ve sıklıkta ne şekilde ne seviyede ne kadar süre de olacağını belirleyip düzenleyen, forcer pozisyonunu enkoder teknolojisi sayesinde algılayıp davranışını otomatik olarak buna göre şekillendiren, en basit haliyle lineer motor sürücü tasarımı ortaya koyulacaktır.

5.1 Lineer Motor Sürücü Blok Şeması

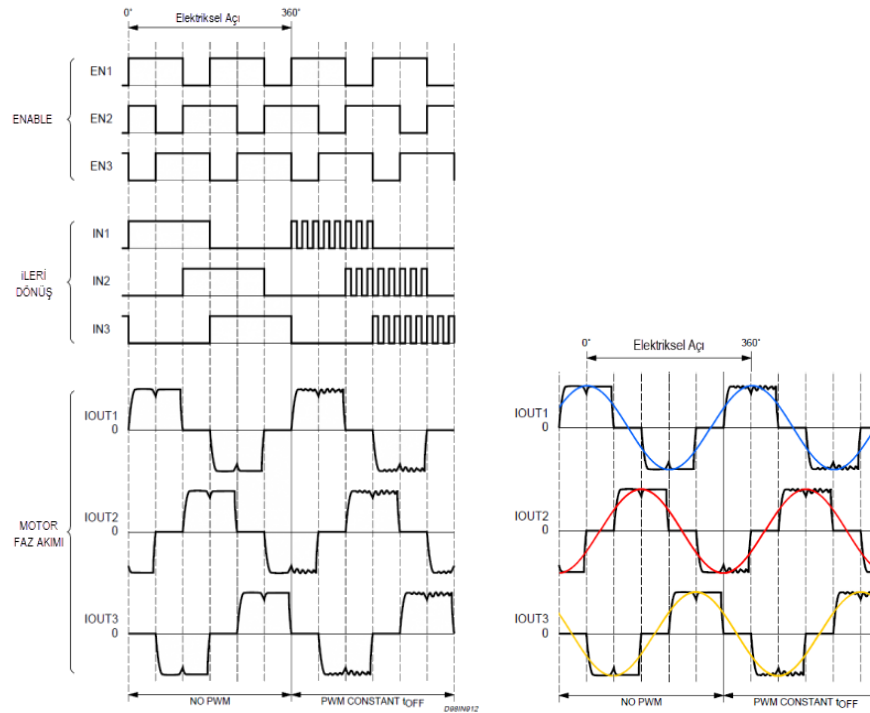
Şekil 5.1'de genel hatlarıyla sürücüye ait blok şeması tanımlanmıştır. Bu şemada sürücüyü oluşturan temel birimler ve bağlantıları gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Lineer motor sürücü blok şeması

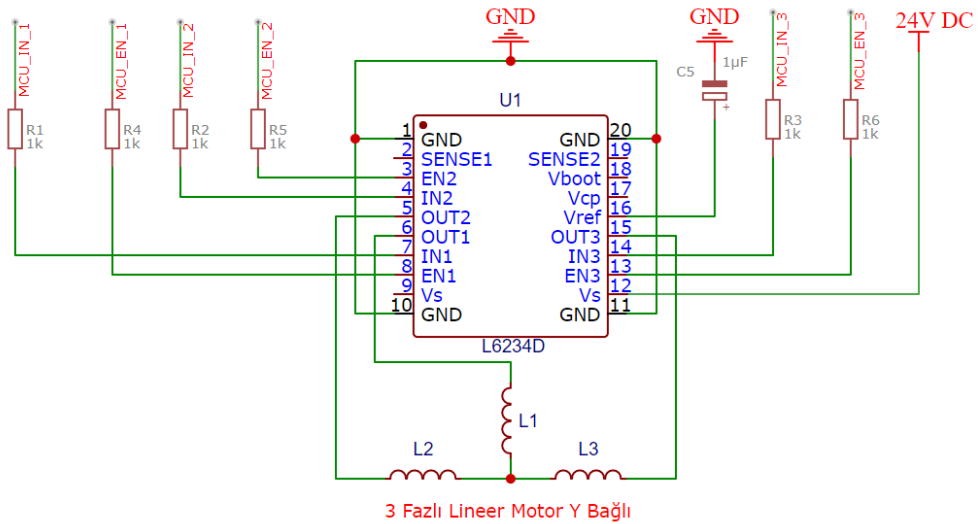
5.2 Lineer Motor Sürücü Çalışma Prensipleri

Lineer motorların çalıştırılması ve kontrolü oldukça zordur. Bu motorlar, yapıları gereği elektronik olarak kontrol edilir ve doğru akım komütasyonu için kontrol işleminde forcer pozisyon bilgisi gerektirirler. Lineer motor sürücüsünün temel olarak yaptığı iş, enkoderden aldığı konum bilgisine göre, hangi bobin grubunun ne şekilde enerji vereceğini belirleyerek, uygun gerilim değerlerini bobinlere uygulamaktadır. Komütasyon, hareket oluşturmak için motor fazlarındaki akımı değiştirme işlemidir. Hava çekirdekli çift taraflı lineer motor yapımız daha önce de belirttiğimiz gibi üç fazlı bir motor tasarımına dayanmaktadır. Üç fazlı bir motorda komütasyonu sağlamanın birkaç farklı yolu vardır; bunlardan birisi trapezoidal komütasyondur. Trapezoidal komütasyon, komütasyonun en basit şeklidir. Hall effect sensörleri yerine artımsal enkoderlerin kullanıldığı durumlarda, bir enkoder sinyal geçişinin meydana geldiği her noktada, faz akım dizisi değiştirilir, böylece motorun komütasyonu gerçekleşir. Bu metod yüksek hızlarda çok etkin çalışabilmekte, ancak yavaş devir hızlarında adımlarda dalgalanma oluşacaktır. Bu yüzden sürüş akımını sinüs dalgalarına çevirmemiz gereklidir. Bu, en ucuz komütasyon şeklidir ve motor faz akımı Şekil 5.2'de gösterilen diyagrama benzer. (Gramba 2015)



Şekil 5.2: Motor faz akım diyagramı

Linear motor sürücüsü tarafından, bobinlerden geçecek akım, bobinlerin mıknaatısın konumuna göre stator gövdenin sonuna geldiğinde yön değiştirme komutunu işleyerek ters yönde de akım akıtılabilmelidir. Akım yönlerinden biri referans olarak alınıp + yön kabul edilirse, devre tarafından bobinlere forcer hareketini ters yönde devam ettirecek negatif gerilim ve akım üretilebilmelidir. Bu, inverter tarafından üretilen sinüsün belirli bölgelerde zaman eksenine göre simetriğinin alınması ile olur. Bu işlem, doğru akım motorlarını sürmede sıklıkla kullanılan H köprüsü yapısı sayesinde olur. H köprüsünde anahtarlanan transistor sırası değiştirildiğinde bobinlerden akacak olan akımda ters çevrilir. Bu çalışmada H köprü yapısı şekil 5.3'te gösterildiği gibi L6234 sürücü entegresiyle gerçeleştirilir.



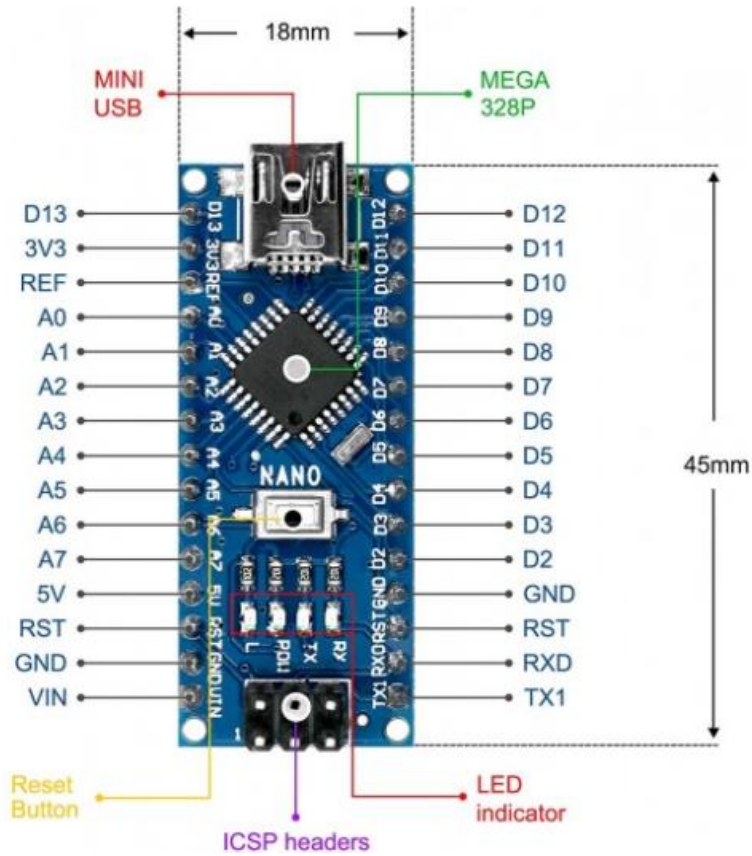
şekil 5.3: L6234 sürücü entegresiyle lineer motor bağlantısı

Sürücü yapısının bir diğer parçası forcer konum bilgisi için gerekli olan enkoder yapısıdır. Motor teknolojilerinde genellikle hall-effect ve optik olmak üzere iki farklı yapıya sahip enkoderler kullanılır. Enkoder tarafından üretilen analog veya dijital sinyaller MCU tarafından değerlendirilerek forcer pozisyonu enkoder çözünürlüğüyle doğru orantılı olacak şekilde çok hassas olarak ölçülür.

5.3 Lineer Motor Sistem Tasarımı

5.3.1 MCU Kontrol Birimi

Lineer motor sürücü kartı tasarımında mikro denetleyici birimi olarak Arduino nano kullanılmıştır. Lineer motor hareket için gerekli PWM sinyallerinin oluşturulması, enkoderden gelen konum bilgilerin okuyup değerlendirerek, sürücü entegresinin kontrolü ana kontrol birimi Arduino nano tarafından gerçekleştirilmektedir. Arduino nano; açık kaynak kodlu, üzerinde Microchip Atmel ATmega328 mikro kontrolörü bulunduran, 5V DC çalışma gerilime, 16 Mhz çalışma frekansına sahip üzerinde 6 PWM kanalı bulunan hızlı prototipleme için uygun bir geliştirme ortamıdır. Arduino nano kullanıcı kitlesinin çok geniş olması sebebiyle geniş kaynak kütüphaneleri ve yazılım desteği sunulabilmektedir. Şekil 5.4'te arduino nano gömülü sistem prototip geliştirme kartının pin diyagramı görülmektedir.

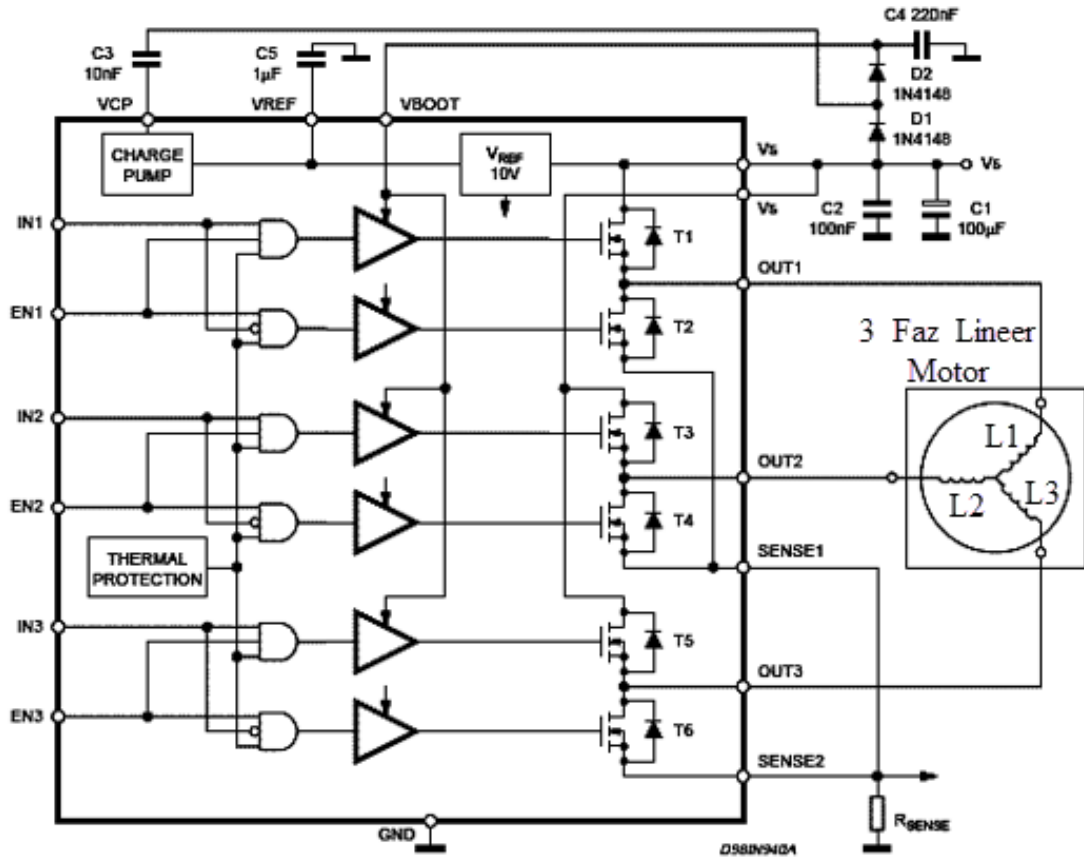


Şekil 5.4: Arduino nano pin diyagramı

5.3.2 3 Faz PWM Inverter

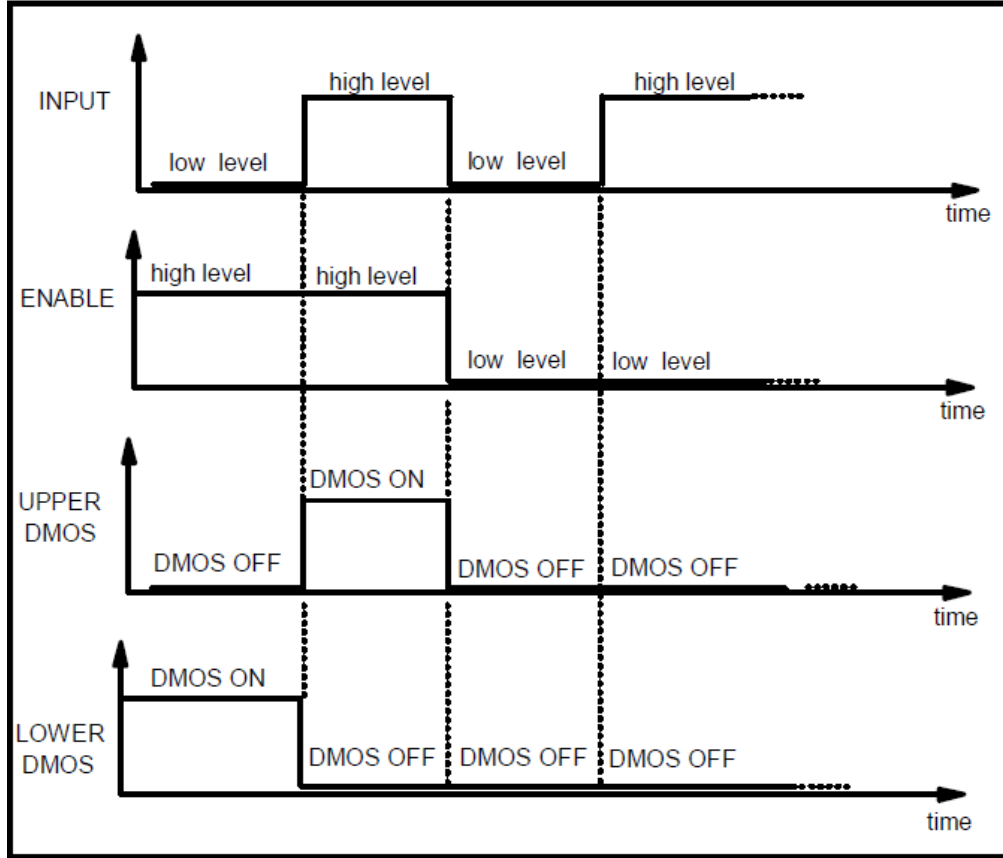
Uygulamada, kullanılan lineer motor 3 fazlı ve yıldız bağlı olduğundan dolayı, motorun çalıştırılabilmesi için 3 fazlı L6234 entegresi kullanılmıştır. Sistemde PWM frekansı 32 kHz seçilmiştir. L6234, giriş besleme voltajı 7-52V ve çıkış akımı 5A olan bir DMOS üçlü yarım köprü sürücüsüdür. Çok geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir. İzole DMOS transistörlerinin CMOS ve Bipolar devreler ile aynı çip üzerinde kombinasyonuna izin veren Multipower BCD60II teknolojisinde gerçekleştirilmiştir. Power DIP 20 (16 + 2 + 2) ve Power SO 20 paketlerinde mevcuttur.

Tüm girişler TTL / CMOS uyumludur ve her yarım köprü kendi özel girişiyle çalıştırılabilir ve etkinleştirilebilir. DMOS yapısı, içsel bir serbest dönen gövde diyotuna sahiptir, böylece bipolar konfigürasyonda gerekli olan harici diyotların kullanımından kaçınılabilir. DMOS yapısı, 6.5 mA tipinde çok düşük bir hareketsiz akıma izin verir. Şekil 5.5'te L6234 entegresinin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.5: L6234 3 Faz sürücü entegresi blok diyagramı

L6234 sürücüsünün 3 çıkışı vardır: OUT1, OUT2 ve OUT3. Her çıkış 2 pin ile kontrol edilir: giriş (IN) ve etkinleştirme (EN), örneğin OUT1, IN1 ve EN1 ile kontrol edilir. Şekil 5.6'da her bir yarım köprünün kontrol mantığı gösterilmektedir.



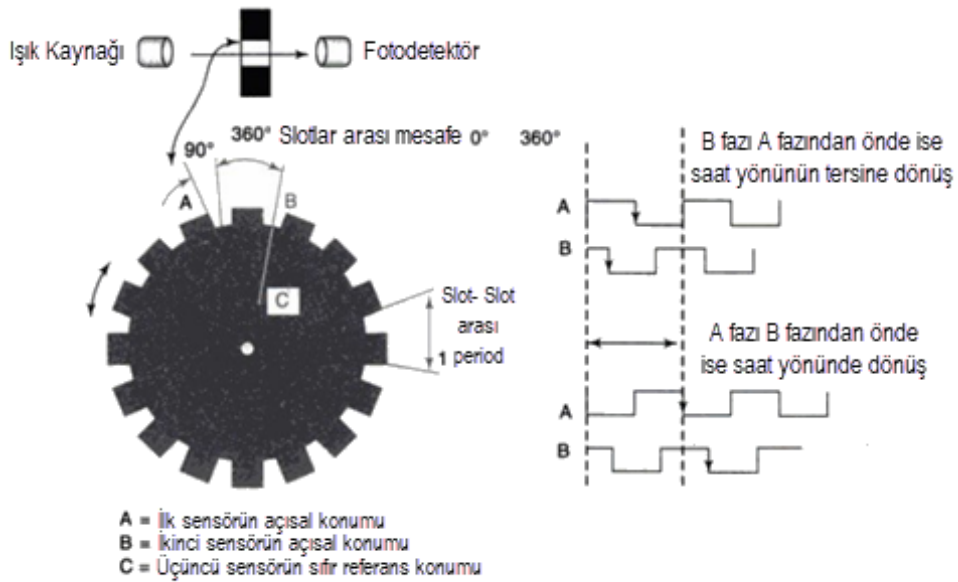
Şekil 5.6: H köprüsü kontrol bloğu

5.3.3 Enkoder

Fırçasız bir motoru veya lineer motoru hızlı bir şekilde hareket ettirmek istiyorsanız, bobinleri tam olarak mükemmel konumda değiştirmek için rotorun bulunduğu bilgiye ihtiyacınız vardır. Fırçasız ESC kontrol cihazlarında bu genellikle hall-effect sensörleri tarafından yapılır. Ancak pozisyon geri beslemeli lineer motorlar için bu en iyi seçenek değildir, çünkü bobinlerin nerede olduğunu, hareket halindeyken bilirsiniz. Ayrıca, pozisyon geri beslemesinin çözünürlüğü gerçekten doğru değildir.

Bu yüzden bu çalışmada, lineer motor forcer üzerine GT2 kayışla bağlanan E38-S6-400 2-N-24 bir enkoder kullanıldı. Bu, bobinlerin konumunu ölçmek için, aynı

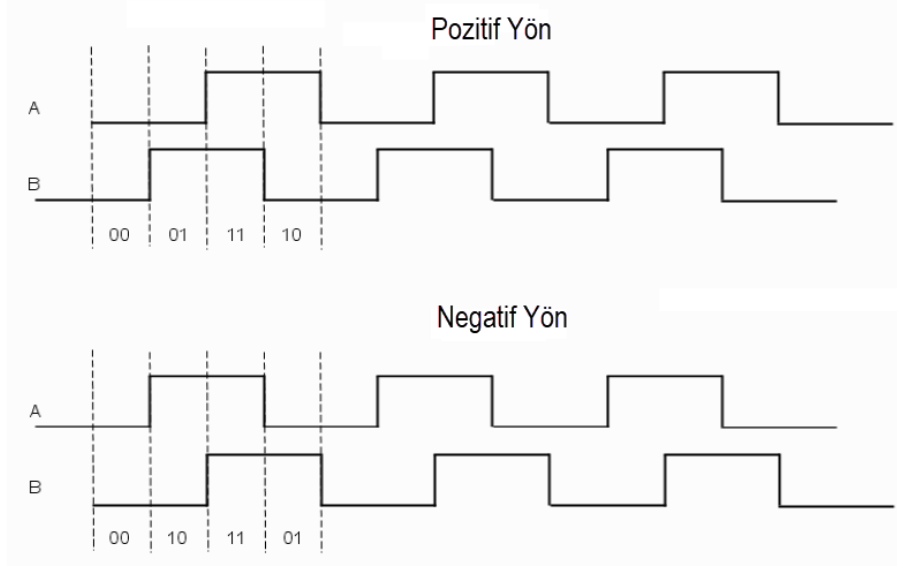
zamanda forcerın bulunduğu gerçek konumu okumak için ideal bir yöntemdir. Bu enkoder AB iki fazlı, darbe sinyali üretim sayısı, ızgara diski ve optokuplörün dönüş yönü ile tanımlanabilir. E38-S6-400 2-N-24 enkoder, DC 5-24V geniş besleme gerilim aralığına sahiptir ve maksimum mekanik hızı 6300 devir / dakika olup devir başına 400 darbe üretebilmektedir. Döner (artırımsal) enkoder çalışma prensibi ise; enkoder içerisine Şekil 5.7’de gösterildiği gibi ışık kaynakları ve bu ışık kaynaklarını algılaması için optik algılayıcılar (fototransistor) yerleştirilmiştir. Çentikli bir disk bu iki optik eleman arasında yerleştirilmiştir. Işık kaynağı tarafından gönderilen ışınlar çentikli diskin aralarından geçebilir iken deliğin çentiğinin olmadığı kısımlardan geçememektedir. Fototransistorun geçirdiği akım bu ışığın geçip geçmeme durumuna göre değişmektedir. Transistorun on/off durumuna göre çıkışta bir kare dalga üretilmektedir. Döner enkoderlerin temel çalışma prensibi buna dayanmaktadır.



Şekil 5.7: Artırımlı optik döner kodlayıcı şeması

Enkoderlar da diğer bir önemli husus ise çözünürlükleridir. Çözünürlük bir enkoderin bir turda kaç tane puls ürettiğinin sayısıdır. Puls sayısı arttıkça enkoderin hassasiyetini arttırmakta ve adım aralığı küçülerek en küçük açı değişimleri ölçülebilmektedir. Bu çalışmada kullanılacak olan enkoderin çözünürlüğünü şu şekilde hesaplanır; enkoder bir tam turunda 400 puls üretmektedir. Tek bir pulsın algılanmasıyla elde edilecek olan açı değişimi $360/400=0,9$ derece olarak bulunur. Ancak motorumuzun lineer motor olması sebebiyle enkoder çözünürlüğümüz mm

cinsinde hesaplanması gerekmektedir. Dişli çevresi $16(\text{çap})\times\pi=50,26$ mm'dir. Yani enkoder bir tam tur attığında forcer 50,26 mm hareket etmektedir. Bu nedenle lineer motor için enkoder çözünürlüğümüz $50,26/400=0.125$ mm'dir.

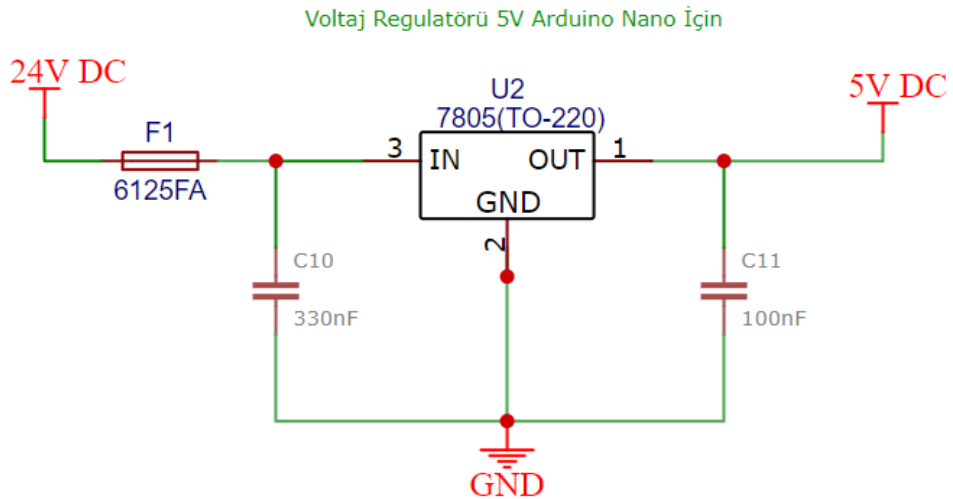


Şekil 5.8: Artırımlı optik döner kodlayıcı A ve B faz çıkış sinyalleri

Artırımlı döner enkoderlerin A, B olmak üzere 2 adet faz çıkışları bulunmaktadır. A ve B çıkışları birbirlerine göre 90 derece faz farkı olan 2 kare dalga üretmektedir. Oluşturdukları pals sayıları aynıdır. Bir tam turda kullanılan enkoderin çözünürlüğü kadar pals üretirler. Eğer A faz çıkışı, B faz çıkışından 90 derece önde ise enkoderin dönme yönü saat yönünde diğer bir deyişle x ekseninde hareket eden lineer motorun hareket yönü x (+), B çıkışı A çıkışından 90 derece önde ise enkoderin dönme yönü saat yönünün tersi, lineer motorun hareket yönü ise x (-) yönündedir. Şekil 5.8'de görüldüğü üzere A ve B fazına ait lojik "1" ve lojik "0" çıkış sinyal seviyeleri görülmektedir, bu çıkış sinyalleri karşılaştırılarak dönme yönü belirlenebilmektedir.

5.3.4 Voltaj Regülatörü

Entegrelerin (IC) çoğu, çalışabileceği sabit bir voltaj gerektirir. Basit bir entegre veya karmaşık bir mikroişlemci olsun, kendi çalışma voltajlarına sahiptirler. En yaygın çalışma voltajları 3,3V, 5V ve 12V'tur. Voltaj kaynağı olarak hareket edebilecek piller ve DC Adaptörlerimiz varken, çoğu zaman bunlardan gelen voltaj düzenlenmediği için devre tasarımıımıza doğrudan bağlanamazlar. Buna bağlı olarak devrelerde voltaj regülatörü kullanılarak, giriş voltajındaki veya yük koşullarındaki değişikliklerden bağımsız olarak sabit bir dc çıkış voltajı elde edilir. Voltaj regülatörü tasarımında bulunan elemanların kombinasyonları, değişken bir giriş kaynağı ile sabit bir çıkış voltajına sahip olmayı sağlar. Voltaj regülatörleri ayrıca aşırı voltaj koruması, kısa devre koruması, termal kapatma, akım sınırlama gibi koruyucu işlevleri de gösterebilir. Doğrusal regülatör veya anahtarlamalı regülatör olabilir, ancak en kolay ve ekonomik voltaj regülatörü türü doğrusal olandır. Bu çalışmada kontrol kartının ana besleme kaynağı 24V DC gerilimdir. Mikro kontrolör kontrol birimi arduino nanonun çalışabilmesi için gerekli olan 5V DC gerilim 7805 entegresi kullanarak Şekil 5.9'daki devre ile elde edilmiştir. 7805 giriş gerilim 5-24 V aralığında olabilir buna karşılık sabit 5 V çıkış sağlamakla beraber yeterli ısı dağılımı sağlanırsa, 1 A üzerinde çıkış verebilir.



Şekil 5.9: Arduino nano için voltaj regülatör devre şeması

5.4 Lineer Motor Sürücü Yazılımı

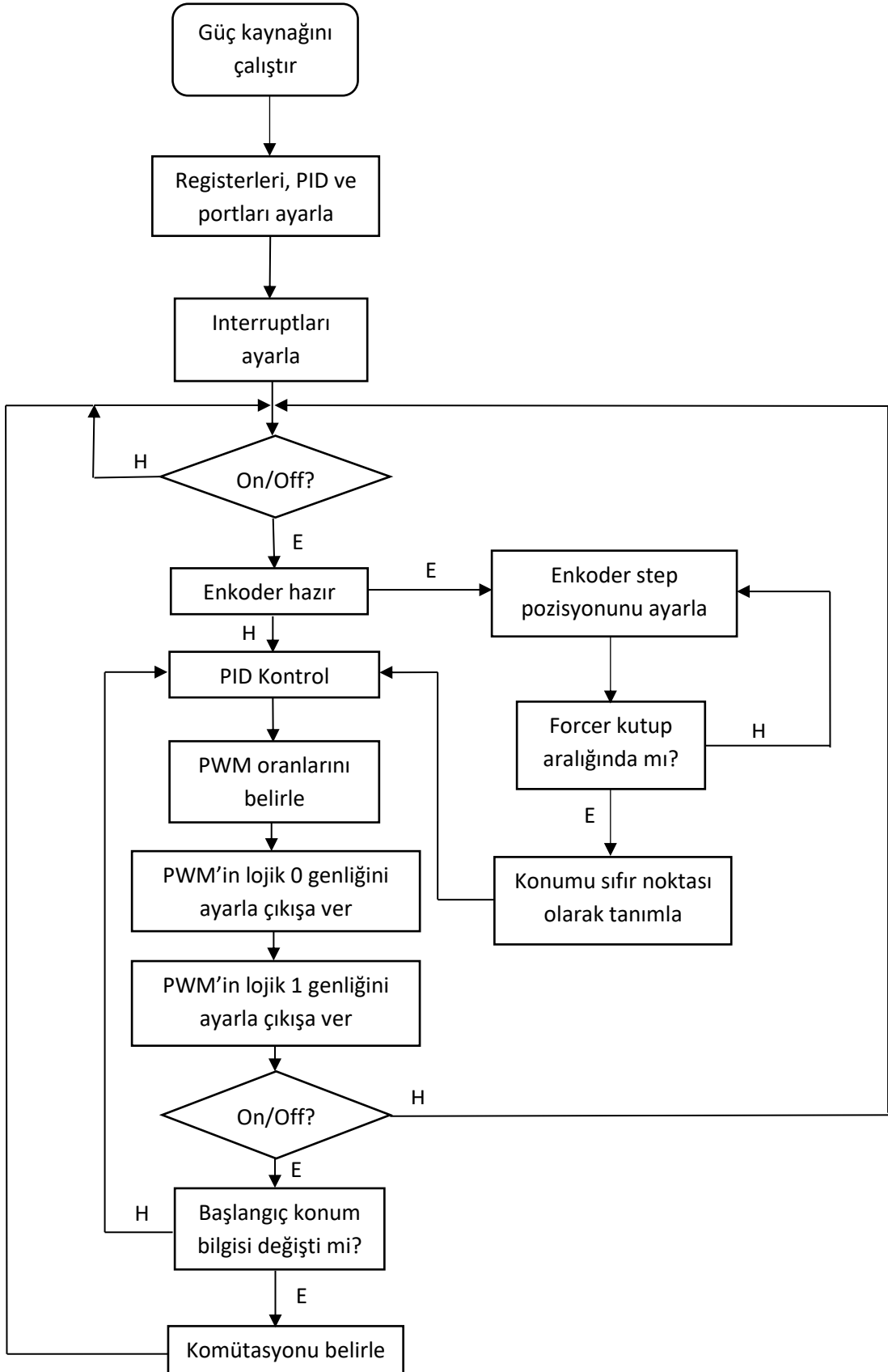
Bu bölümde, sürücü sisteminde kullanılan Arduino nano Atmega 328P mikro denetleyicinin kontrol yazılımı ele alınmaktadır. Arduino da yazılım bir geliştirme platformu (IDE) ve kütüphanelerden oluşur. Geliştirme platformu IDE, için Java dili kullanılmış ve Processing adlı dilin ortamına dayanmaktadır. Kütüphaneler ise C ve C++ dillerinde oluşturulmuş ve AVR-GCC ve AVR Libc tarafından derlenmiştir. Lineer motor sürücü sisteminde, motor dönüş yönü ve PWM doluluk oranları enkoderden gelen A ve B faz çıkışları tarafından belirlenmektedir. Mikro kontrolör, bu giriş değerlerine göre motoru, x (+) veya x (-) yönde hareket ettirmektedir. Ayrıca frekans yazılım ortamında kontrol edilerek motor hızı ayarlanabilmektedir. PWM sinyali yazılımsal veya donanımsal olarak iki şekilde oluşturabilmektedir. Bu projede PWM sinyali, harici bir PWM modül kullanılmadan, Şekil 5.10'da gösterildiği gibi Platform IDE ortamında yazılımsal olarak üretilmiştir.



Şekil 5.10: PlatformIo IDE geliştirme ortamı üzerinde yazılımın derlenmesi

5.4.1 Sürücü Sistemi Akış Diyagramı

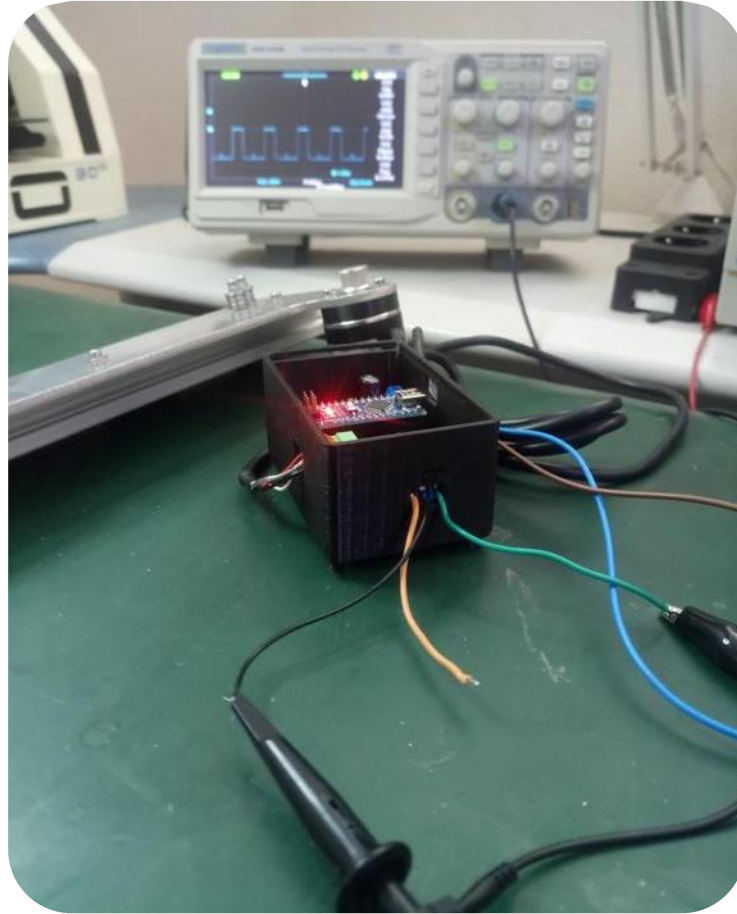
Lineer motor sürücü sisteminin program akış şeması Şekil 5.11'de verilmiştir. Akış şemasına göre, sisteme ilk enerji verildikten sonra registerler ve PID kütüphanesi ayarlanmakta, dijital input olarak ayarlanan enkoder faz çıkışları okunmakta, motor pozisyonu belirlenmekte, ardından sürücü dijital çıkışları ayarlanmakta ve enkoderden gelen konum bilgisine göre hazır olarak kullanılan PID kütüphanesi gerçek konum ile istenilen konum arasındaki fark hesaplaması sonucu PWM sinyalleri oluşturarak fazlara uygulanmaktadır.



Şekil 5.11: Sürücü akış diyagramı

Bobinler, mıknatısların nerede olduğunu, mikro kontrolörün önceden bildiği tanımlanmış bir noktaya karşılık gelmelidir. Bu durum, bobinlere üç fazlı bir gerilim uygulanarak yapılır. Böylece forcer otomatik olarak manyetik alanın içerisine girecektir. Bu noktadan sonra motorun konumu sıfır olarak tanımlanır. Ardından sinüzoidal voltajın, sabit mıknatıs konumlarıyla senkronize edilmesi gerekir. Senkronizasyon yazılım üzerinden PWM sinyalinin doğru komütasyonu ile gerçekleştirilir, böylece bobinler ve mıknatıslar arasında her zaman doğru alan yönlendirmesi olur.

Kontrol yazılımın son aşamasını PID kontrol döngüsü oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Arduino kitaplık yöneticisi tarafından yüklenebilen, zaten tamamlanmış bir PID kitablığı kullanıldı. PID döngüsü, gerçek konum ile istenen konum arasındaki farka bakarak, PWM sürücü fonksiyonu tarafından kullanılacak değerleri tanımlar. Enkoderin hareketi sonucu oluşan PWM sinyallerin kontrolü Şekil 5.12’de gösterildiği gibi osiloskop ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.12: Sürücü PWM sinyal çıkışlarının osiloskop ile kontrolü

6. LİNEER MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE BULGULAR

Bu bölümde prototip üretimi gerçekleştirilen lineer motorun ve sürücüsünün üretim aşamalarından bahsedilecektir. Bu aşamaya kadar, lineer motorlar teknolojileri detaylıca ortaya konulmuş, motorun üç boyutlu cad çizimleri oluşturulmuş, iki ve üç boyutlu manyetik benzetimleri çıkartılarak, analiz işlemleri gerçekleştirilmiş ve hesaplanan nümerik sonuçlar sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla desteklenmiştir. Ardından sürücü tasarımı ele alınmıştır.

6.1 Stator Gövde İmalatı

Elde edilen tasarım parametreleri ve üç boyutlu tasarım boyutları kullanılarak ilk, motorun stator gövdesini oluşturan alt ve üst çelik levhaların dxf çıktıları gönderilerek lazer kesimleri yaptırılmıştır. Lazer kesimleri yapılan alt ve üst çelik levhalar üzerine değişken kutuplu 26 mıknatıs kutup çifti Şekil 6.1’ de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Mıknatıslar arasındaki mesafe manyetik benzetim esnasında en optimum sonuçlar elde edilen 3 mm olarak ayarlanmıştır. Tüm mıknatıslar doğru konuma geldikten sonra, hızlı yapıştırıcı aracılığıyla yerlerine sabitlenmiştir. Stator gövde, enkoder ve forcer hareketlerinin düzgün olması için 20x40 sigma profil şasesi üzerinde oturtulmuştur.



Şekil 6.1: Mıknatısları yerleştirilmiş stator gövde

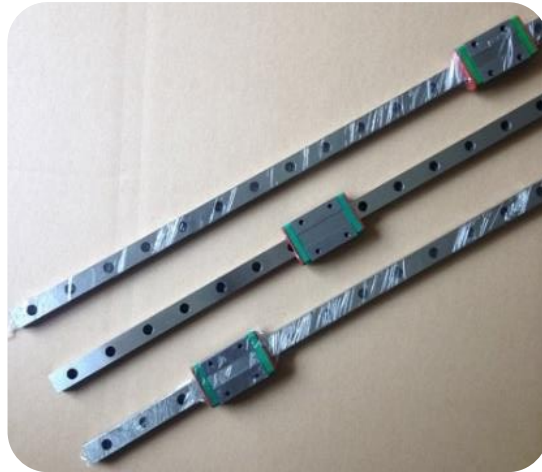
6.2 Forcer İmalatı

Lineer motorun ikinci en önemli parçası forcer, hafiflik ve sargılar üzerinde oluşan ısının dağıtımını sağlamak amacıyla alüminyum malzemeden, cad dosyaları sağlanarak dik işlem yapabilen 5 eksenli cnc tezgahlarda işlenmiştir. Forcer 6 mm hava boşluğu içerisinde hareket edeceğinden boyutları Şekil 6.2’de gösterildiği gibi hassas ölçüm yapabilen kumpas yardımıyla kontrol edilmiştir.



Şekil 6.2: Cnc tezgahından çıkan forcerın boyut kontrolü

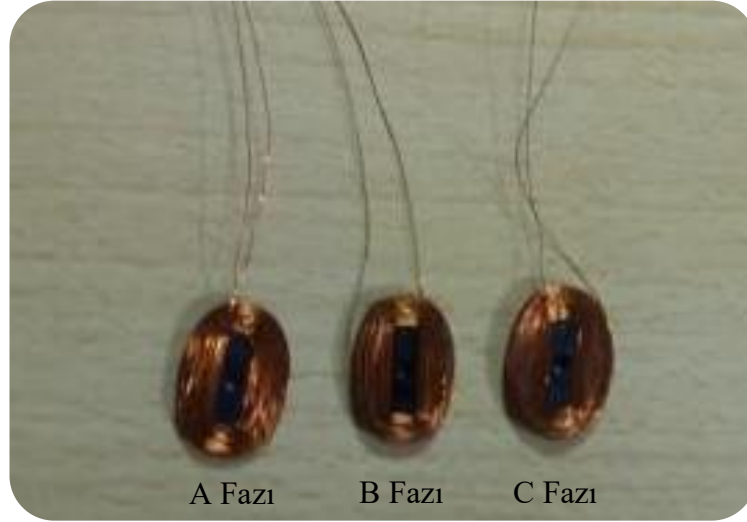
Forcer, 20X40 sigma profil üzerinde yerleştirilmiş dikey eksende yük taşıyabilen minimum sürtünme kayıplarına sahip Şekil 6.3’te gösterilen lineer kızak üzerinde yer alan MGN12h araba üzerine sabitlenerek lineer hareketini sağlamaktadır.



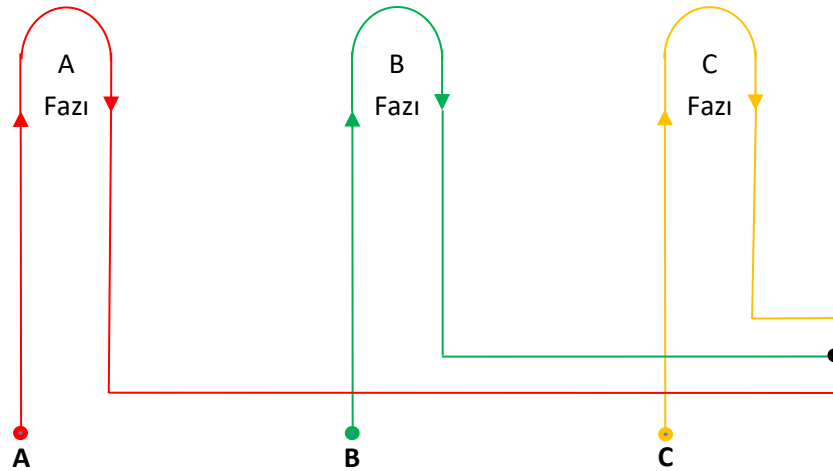
Şekil 6.3: Lineer kızak ve MGN12h araba

6.3 Bobin İmalatı

Bobinlerin sarımı, motorun en karmaşık adımlarından birisidir. Forcer da ferromanyetik malzeme yer almadığından, manyetik alanı yükseltmeyecektir, bu nedenle bobinlerin dışında kalan manyetik alanın forceri hareket ettirecek kadar güçlü olması gerekir. Bobinler Şekil 6.4'te gösterildiği gibi FDM yazıcılarda üretilmiş plastik PLA malzemeden oluşan dikdörtgen makara üzerine elle sarılmıştır. Her bir faz 300 spire sahiptir. Fazların bağlantı şeması Şekil 6.5'te gösterilmektedir. Bobinler forcer üzerinde yuvalara ısıya karşı dirençleri yüksek olan kapton band kullanarak sabitlenmiştir. Profesyonel üretimlerde sargılar epoksi reçine kullanılarak sabitlenmektedir.



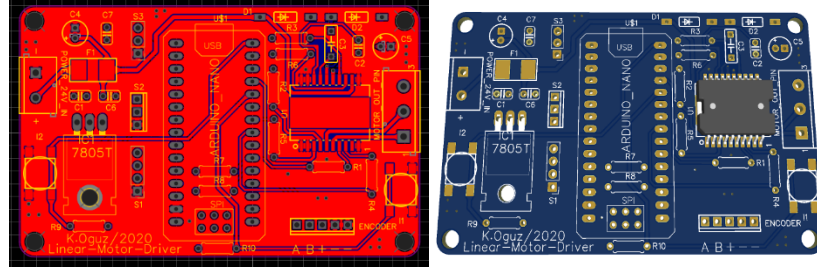
Şekil 6.4: 3 faza ait sarımları yapılmış çekirdeksiz bobinler



Şekil 6.5: A, B ve C fazlarının bağlantı şeması

6.4 Sürücü İmalatı ve Motorun Son Hali

EasyEDA online pcb editörü üzerinde devre şeması oluşturulan sürücü kartının pcb tasarımı Şekil 6.6'daki gibi gerçekleştirilerek, tasarıma ait gerber dosyaları oluşturulmuştur. Oluşturulan gerber dosyaları profesyonel pcb üreticileri ile paylaşılarak FR4 malzemeden pcb kartın imalatı sağlanmıştır.

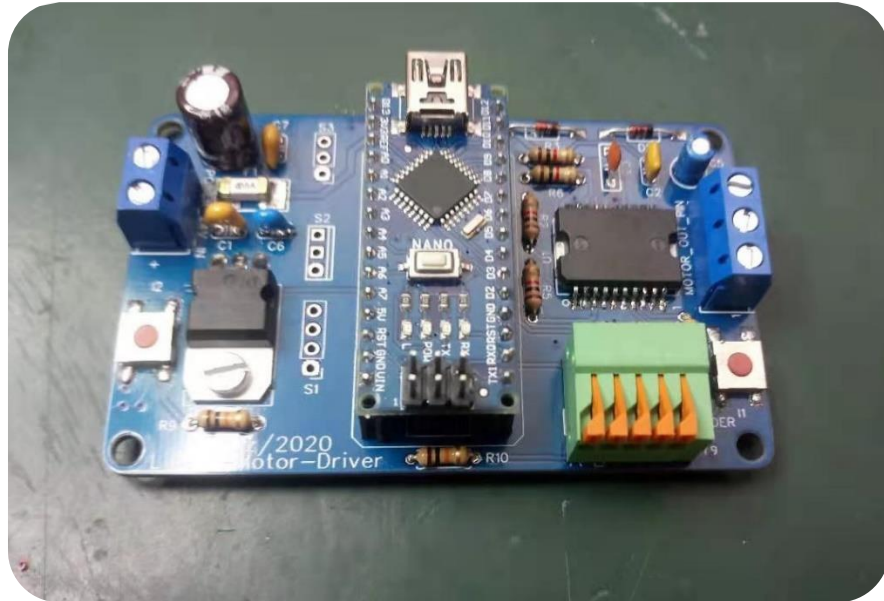


(a)

(b)

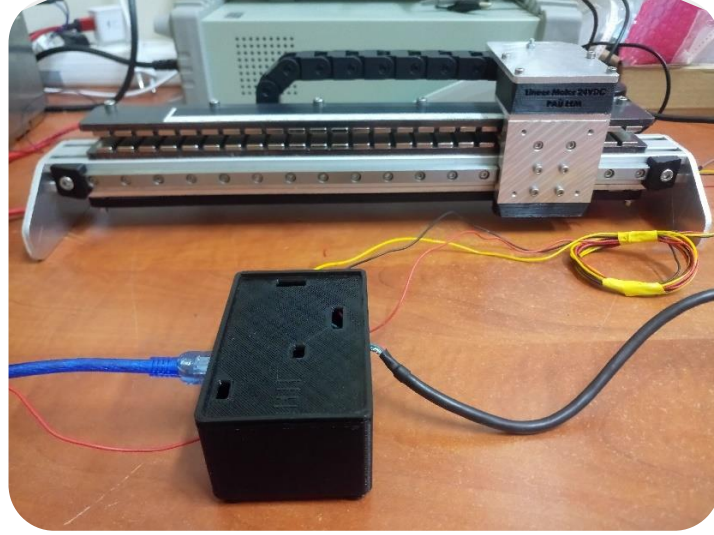
Şekil 6.6: (a) Sürücü pcb kart tasarımı, (b) Sürücü pcb kart 3D modeli

Bileşen listesinde yer alan komponentler ayrıca tedarik edilerek sürücü kartı üzerlerine montajları Şekil 6.7'deki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.7: Elektronik sürücü kartı

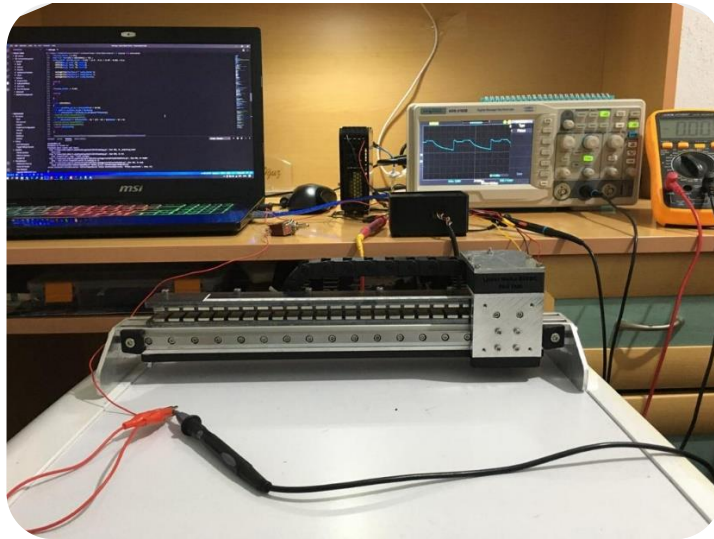
Sabit mıknatısları yerleştirilmiş alt-üst çelik levhaların, forcerın ve bobin sargılarını enerjilendirecek kabloları taşıyan kablo taşıyıcı zincirin sigma profil üzerine yerleştirilmesi sonucu motorun son görünüşü Şekil 6.8’de verilmektedir.



Şekil 6.8: Prototip imalatı gerçekleştirilen lineer motorun son hali

6.5 Deneysel Çalışma Bulguları

Bu bölümde tasarlanan çift taraflı hava çekirdekli lineer motorun deneysel çalışmalarına yer verilmiştir. Lineer motor test işlemleri için Şekil 6.9’da verilen deney düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 6.9: Deneysel çalışma düzeneği

Bu test düzeneğinde tasarımı gerçekleştirilen basit konum kontrolü lineer motor sürücüsü, osiloskop, multimetre ve 24V doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. Lineer motor boşa çalışma modunda hiçbir mekanik yük uygulanmadan çalıştırılarak osiloskop ve multimetre ölçüm cihazları üzerinden akım, gerilim değerleri ölçülmüş ve kuvvet, hız-pozisyon eğrileri çıkartılmıştır. Bobinlerin endüktans ve direnç değerlerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10: C fazı bobin direnç ve endüktans değerlerinin ölçümü

İlk olarak bobinlerin endüktans ve direnç değerleri Şekil 6.10'da gösterildiği gibi 23 °C ortam şartlarında ölçülmüş ve üç faza ait direnç ve bobin endüktans değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

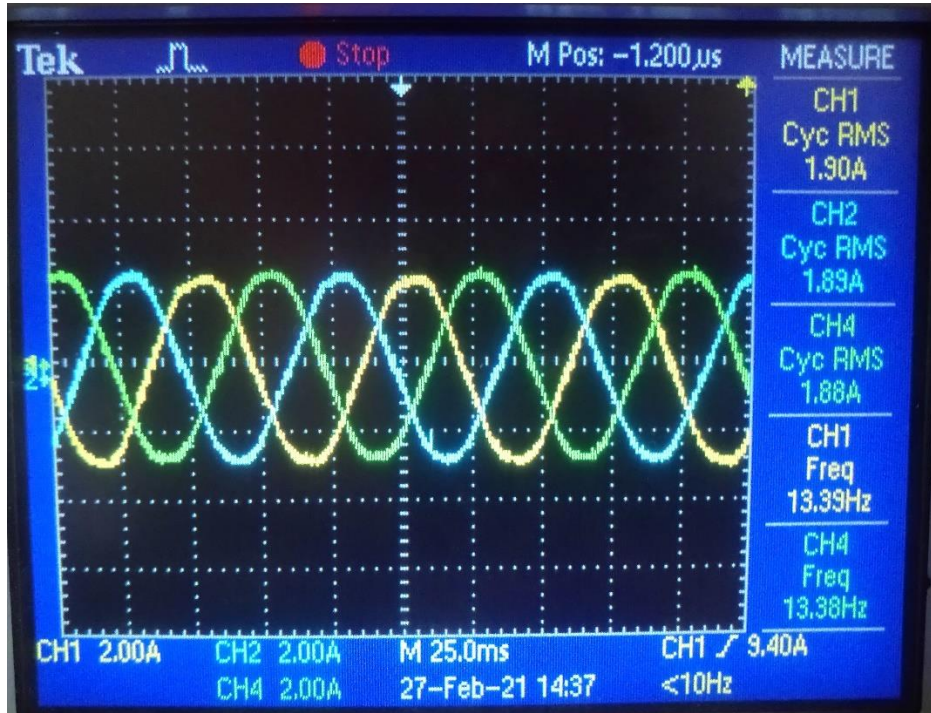
Tablo 6.1: Sarımları yapılan bobinlerin direnç ve endüktans değerleri.

Faz	Direnç Değeri (Ohm)	Endüktans Değeri (mH)
A	10.4	1.277
B	10.5	1.363
C	10.7	1.384

Lineer motorun boşta çalışma durumunda 400 mm/s hızda çalıştırılarak çekilen akım miktarları ve sinüs akım eğrisi Şekil 6.11'deki gibi hazırlanan 4 çıkışlı osiloskop üzerinden Şekil 6.12'deki gibi ölçülmüştür. Lineer motor sabit hız altında RMS değeri 1.9 A maksimum değeri ise 2.1 A olan üç fazlı sinüzoidal akıma sahiptir. Motor Ansys Maxwell 2D analiz sonuçları da faz başına maksimum akım miktarın 2.1 amper olduğu gözlemlenmişti.

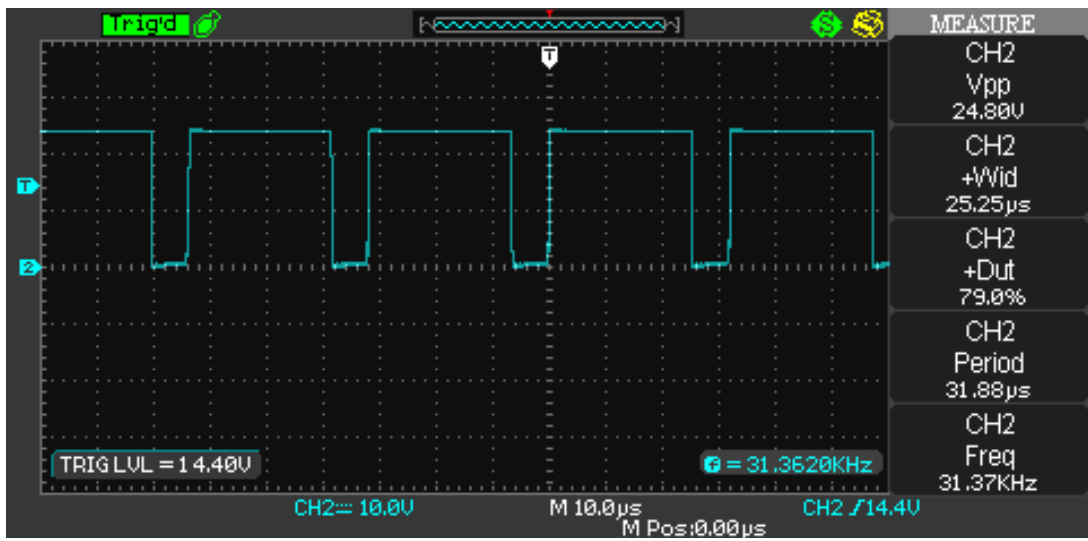


Şekil 6.11: 4 ıkışlı osiloskop ile motor faz gerilim ve akımlarının ölümü

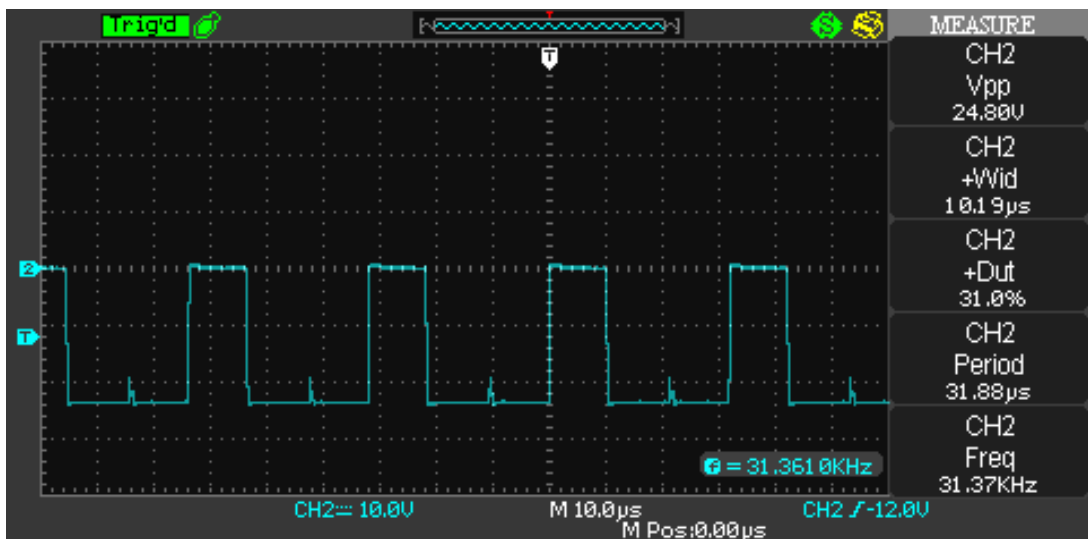


Şekil 6.12: Boşta alışma durumunda lineer motorun 3 faz akım eğrisi

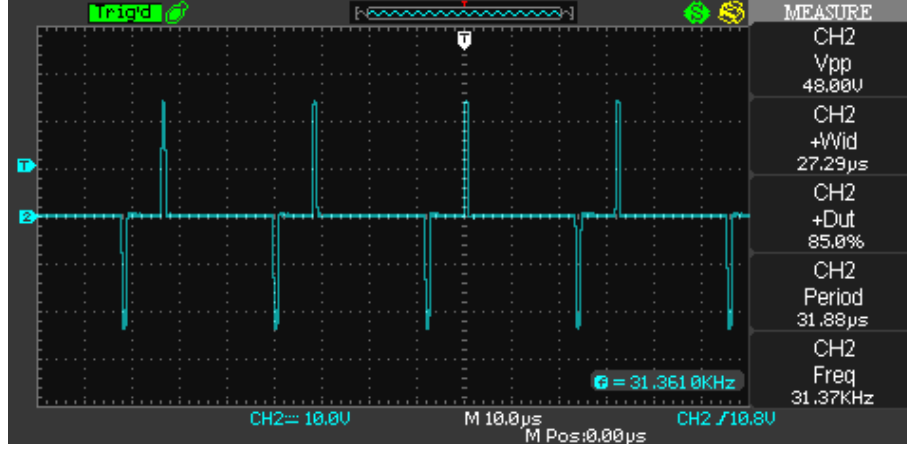
Aşağıda lineer motora hiçbir mekanik yük uygulanmadan, fazlar üzerine uygulanan gerilim dalga biçimleri gösterilmiş ve incelenmiştir. Sonuçlar osiloskop kullanılarak yakalanmıştır. Motor sürücüsü 24V doğru akım kaynağına sahiptir ve inverterin anahtarlama frekansı 32kHz'dir. Lineer motor fazlarına uygulanan fazları arası komütasyon ve duty cycle oranları forcerın hareketi sonucu PID döngüsü tarafından rahatlıkla sağlanabilmektedir. Şekil 6.13'te boştta çalışma durumunda PID döngüsü tarafından oluşturulan A fazının %79 duty oranına sahip dalga formu gösterilmektedir. Şekil 6.14'te ise osiloskop ile yakalanmış %31 duty oranına sahip B fazı dalga formu yer almaktadır.



Şekil 6.13: Boştta çalışma durumunda A faz – toprak arası %79 duty oranına sahip PWM dalga formu



Şekil 6.14: Boştta çalışma durumunda B faz – toprak arası %31 duty oranına sahip PWM dalga formu



Şekil 6.15: Boşta çalışma durumunda A ve B fazları arası geçiş dalga formu

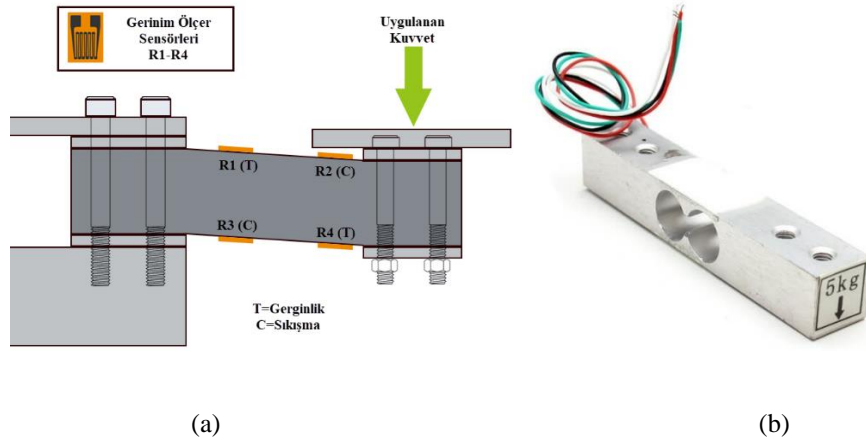


Şekil 6.16: Boşta çalışma durumunda A, B ve C fazlarına uygulanan PWM dalga formu

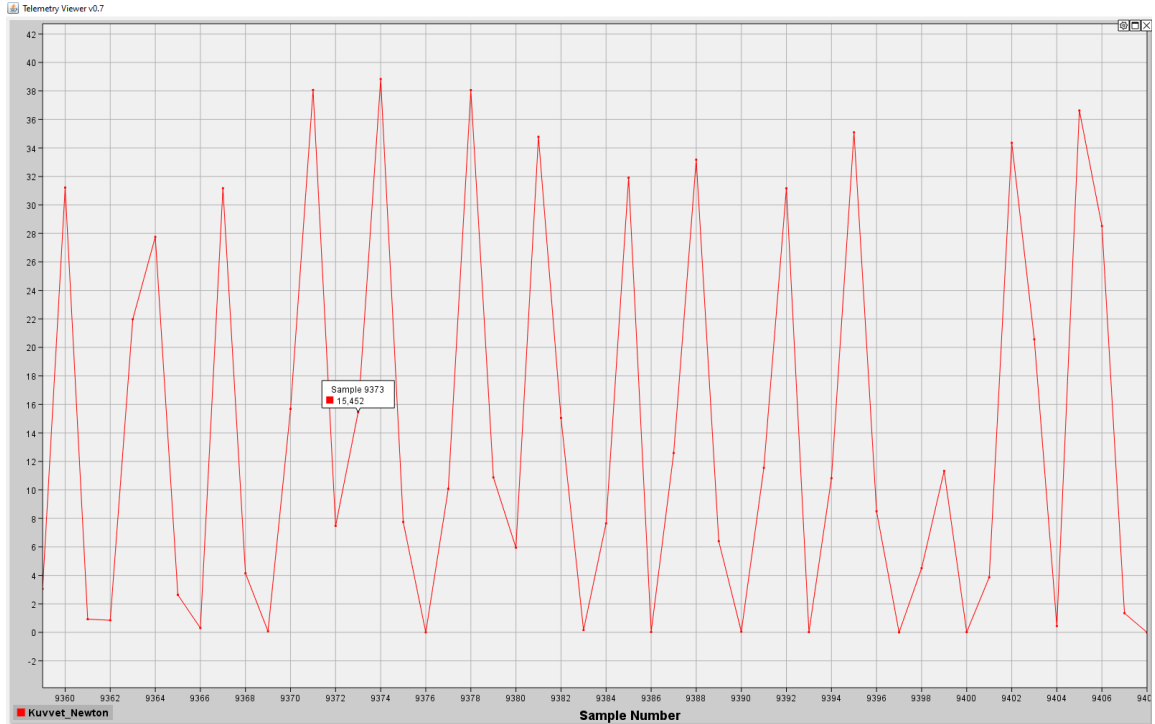
Bireysel faz ölçümleri ardından A ve B fazları arası geçiş dalga formu Şekil 6.15'te gösterildiği gibi osiloskop ile ölçülmüştür. Şekil 6.16'da ise 4 çıkışlı osiloskop üzerinden 3 faza ait PWM dalga formları tek bir ekran üzerinde gösterilmiştir.

Prototip motor üzerinde gerçekleştirilen deneysel testlerden bir tanesini ise kuvvet ölçümü oluşturmaktadır. Tasarlanan lineer motorun oluşturduğu kuvvet ölçümü için 5 Kg kapasiteli yük hücreleri kullanılmıştır. Yük hücresi, üzerine etki eden bir ağırlığı veya kuvveti elektronik sinyallere dönüştüren bir çeşit sensördür. Yapısal olarak, bir yük hücresi, gerinim ölçerlerle kurulmuş wheatstone köprüsünden oluşan

metal bir gövdeye sahiptir. Gövde genellikle alüminyum, alaşımlı çelik veya paslanmaz çelikten yapılmıştır, bu da onu çok sağlam ve aynı zamanda minimum düzeyde elastik kılar. Bu esneklik, yük hücresinin gövdesine atıfta bulunan "yay elemanı" terimine yol açmaktadır. Yük hücresine kuvvet uygulandığında, yay elemanı Şekil 6.17’de gösterildiği gibi hafifçe deforme olur ve aşırı yüklenmedikçe her zaman orijinal şekline geri dönecektir. Yay elemanı deforme olurken, gerinim ölçerler de şekil değiştirir. Gerinim ölçerlerdeki dirençte ortaya çıkan değişiklik, voltaj olarak ölçülebilmektedir.



Şekil 6.17: (a)Yük hücresi çalışma diyagramı (b) Yük hücresi

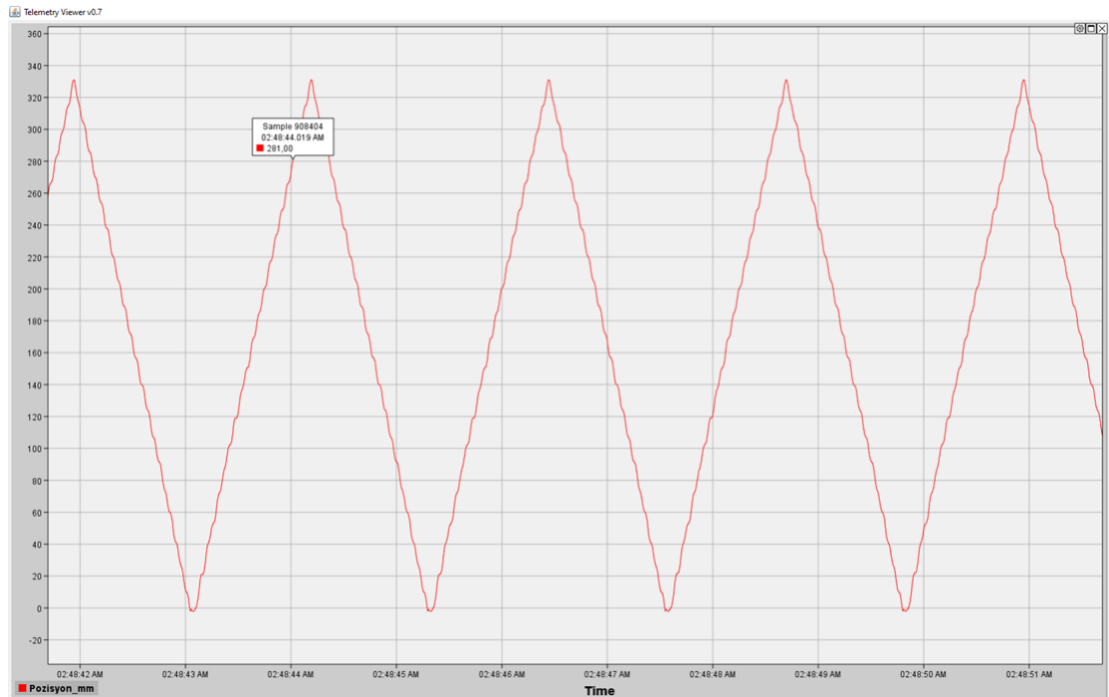


Şekil 6.18:Boşta çalışma durumunda lineer motorun yük hücresi yardımı ile elde edilen kuvvet eğrisi

Gerilimdeki değişiklik hücreye uygulanan kuvvet miktarı ile orantılıdır, bu nedenle 400mm/s hız altında yük hücresinin çıktısından kuvvet miktarı Arduino analog kanalları vasıtasıyla okunarak, ortalama 15,45 N olarak aşığıdaki gibi hesaplatılmış ve sonuçlar telemetry viewer programı aracılığıyla Şekil 6.18'deki gibi grafiğe dökülmüştür.

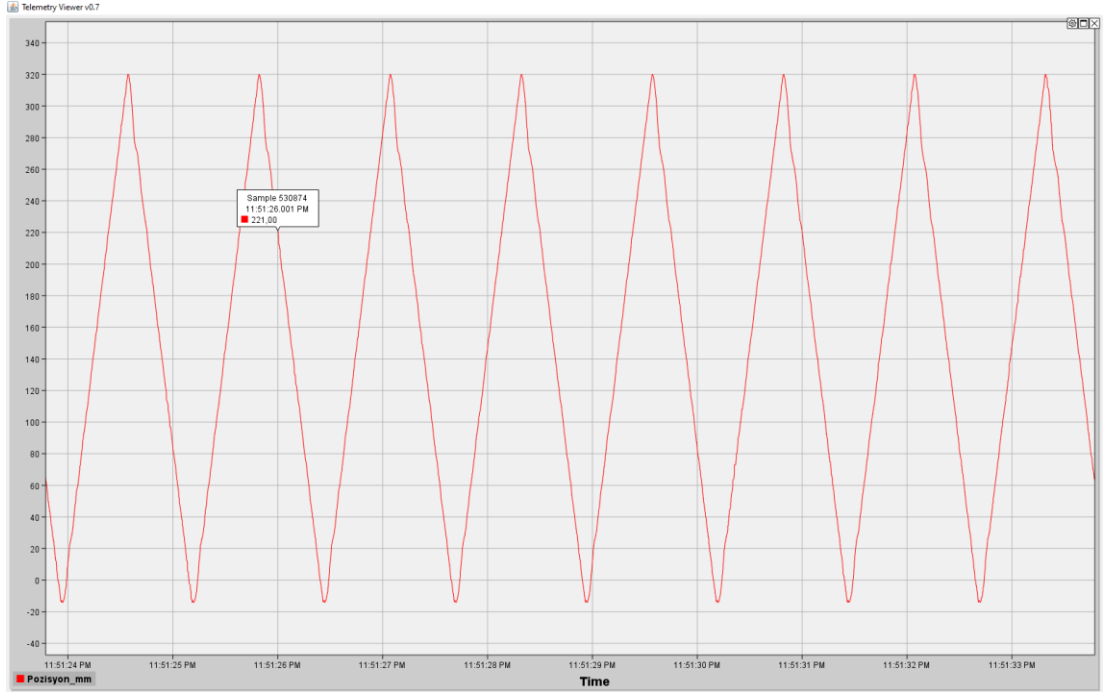
Ansys Maxwell boştta çalışma analizi sonucu ortalama 15.07 N itme elektro manyetik kuvveti elde edilmişti, elde edilen deneysel veriler ile analiz sonucu doğrulanmıştır.

Tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen lineer motorun önemli parametrelerinden biri de hız, pozisyon eğrileridir. Boştta çalışma durumunda enkoder vasıtasıyla lineer motorun 330 mm hareket mesafesi içerisindeki pozisyon bilgileri arduino üzerinden telemetry viewer programına aktarılarak aşığıdaki grafikler elde edilmiştir. Şekil 6.19 lineer motorun 1 saniye içerisinde yer değişiminin 300 mm olduğu ve konum değişim esnasında hafif dalgalanmaların olduğu görülebilmektedir.

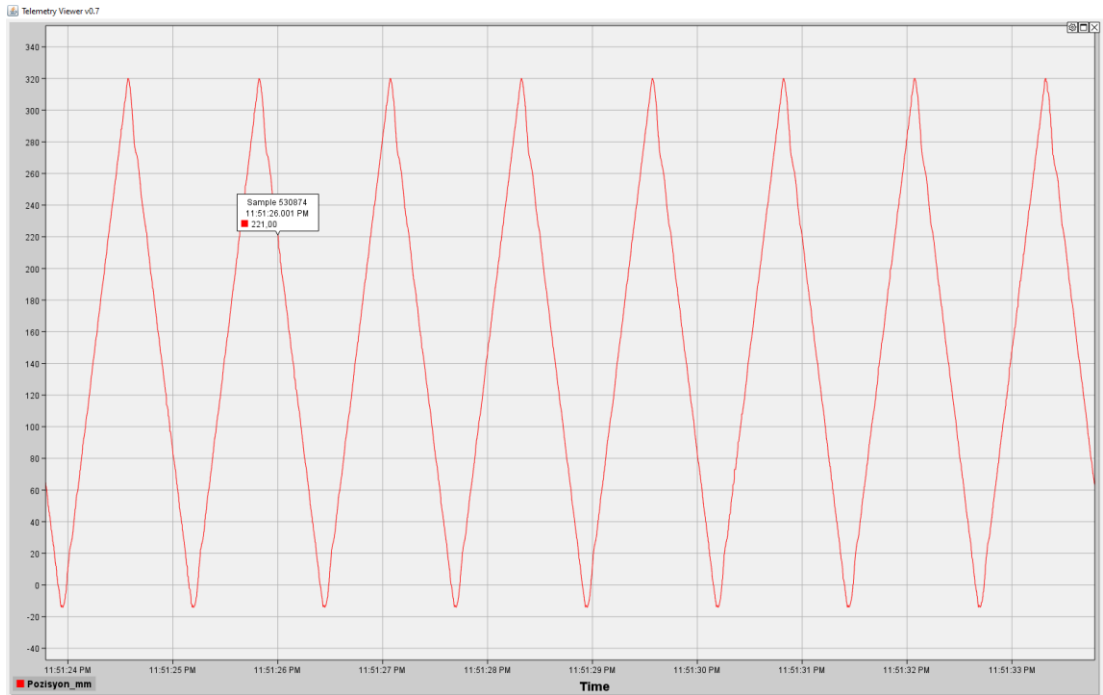


Şekil 6.19: 300 mm/s hız altında pozisyon-zaman eğrisi

Şekil 6.20'de ise lineer motorun 1 saniye içerisinde yer değişiminin 410 mm olduğu ve 300 mm/s hızdaki konum eğrisine göre daha düzgün bir lineer hareket sağladığı görülebilmektedir.



Şekil 6.20: 410 mm/s hız altında pozisyon-zaman eğrisi



Şekil 6.21: 510 mm/s hız altında pozisyon-zaman eğrisi

Şekil 6.21’de görüleceği üzere, 510 mm/s hız altında lineer motorun sert köşe dönüşlerini rahatlıkla gerçekleştirdiği ve yüksek hızlara çıkıldıkça daha pürüzsüz bir hareket sağladığı deneysel veriler ile tespit edilmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Ansys firmasının Ansys Maxwell program modülünde yer alan Maxwell 2D ara yüzü kullanılarak, çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer servo motorun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Literatür incelendiğinde fırçalı veya fırçasız dc motorlar ve asenkron motorlar üzerine çok çalışma bulunmasına karşın lineer motorlar üzerine yapılan çalışmalar çok az sayıdadır. Bunun sebebi, çalışma koşullarının, mekanik ve ısıl karakteristiğinin farklı olması ve ticari nedenler gösterilebilir. Literatürde yer alan lineer motor üzerine yapılan çalışmalarda daha çok iki boyutlu analiz metodu kullanılmıştır. Lineer motorların tasarım optimizasyonunda, kimi uygulamalarda istatistiksel yöntemler doğru sonuçlar vermesine karşın elektrik makinaları tasarımında deterministik yöntemler tercih edilmektedir. Ancak; elektrik makinaları tasarımında prototip maliyetini en aza indiren, iki yöntemin de kullanıldığı Ansys yazılımı gibi paket programlar daha doğru sonuç vermektedir.

Bu çalışmada, lineer motor tasarımını ve sürücü devresini üzerinde durulmuş ağırlıklı olarak lineer motor tasarımı, analizi ve uygulaması ele alınmıştır. Çift taraflı hava çekirdekli lineer motorlar çok yüksek ve çok düşük hızlarda çalışabilir, yüksek ivmelenmelere izin verir, az bakım gerektirir ve verimliliği düşüren silindir, kayış, kasnak gibi harici parçalara sahip değildirler. Dairesel doğru akım motorlarındaki gibi döner hareketinin doğrusal harekete dönüşümü olmadığından, tasarım lineer hareket uygulamalarında geleneksel bir doğru akım motorundan daha fazla verimlidir. Çift taraflı çekirdeksiz lineer motorların sağladığı bir diğer avantaj ise statoru kalıcı mıknatıstan oluşması nedeniyle motorların stator boyutlarının rahatlıkla uzatılabilmesidir. Çalışmada ele alınan motor prototip maliyetlerini optimumda tutmak ve kompakt bir hacimden hızlı, güçlü çalışma sonuçları elde etmek adına kısa stator gövdeli olarak tasarlanmıştır. Bu avantajlarla birlikte, çift taraflı lineer motorların dikey uygulamalardaki verimsizlikleri, acil durum frenlerinin bulunmayışı ve yaşanan ısı problemleri sahip oldukları dezavantajlardır.

Motorun tasarım ve uygulaması aşamasında, öncelikle teknik gereksinimler ve mevcut tasarım parametreleri dikkate alınarak 3 boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Ardından, motorun Ansys Maxwell 2D ortamında sonlu elemanlar analizi

gerçekleştirilerek, elde edilen analiz sonuçlarının nümerik hesaplarla doğrulaması sağlanmıştır. Mevcut üç boyutlu katı modelin, manyetik benzetim sonucu optimize edilmiş tasarım parametreleri dikkate alınarak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte lineer motorun hareketini ve kontrolü sağlayacak basit konum kontrolü sürücü tasarımı ele alınmış ve pcb tasarımı gerçekleştirilerek, bir elektronik sürücü kartı ortaya konulmuştur. Üretimin ardından prototip motor üzerinde deneysel testler uygulanmış ve elde edilen sonuçların tasarım analiz sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür. Testler, bu tip bir motorun yüksek hız ve hassasiyet gerektiren lazer veya 3D yazıcı uygulamalarında kullanılabileceğini öngörmektedir. Ancak özellikle düşük hızlarda pozisyon düzenlemesi konusunda iyileştirilmesi gereken bazı noktalar vardır. Gelecek çalışmalarda lineer motor sürücü yapısında daha gelişmiş işlemci mimari yapısı kullanılarak, düşük hızlarda daha pürüzsüz hareket ve motor daha verimli çalıştırılarak daha az ısı kayıpları elde edilebileceği öngörülmektedir.

8. KAYNAKLAR

Basak, A., *Permanent Magnet DC Linear Motors*, Oxford: Clarendon Press, (1996).

Buasre, A. and Subsingha, W., “Double-Sided Linear Induction Motor Control Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique”, *10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Conference*, Rajamngala University of Technology Thanyaburi, Lanna Nan, Thailand, (2012).

Cao, R., Cheng, M. and Hua, W., “Investigation and General Design Principle of a New Series of Complementary and Modular Linear FSPM Motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (9), 5436- 5446, (2013).

Cao, R., Huang, W. and Cheng, M., “A New Modular and Complementary Double-Sided Linear Flux-Switching Permanent Magnet Motor with Yokeless Secondary”, *17th International Conference on Electrical Machines and Systems Department of Electrical Engineering*, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, School of Electrical Engineering, Southeast University, China, (2014).

Chevallier, S., Markovic, M., Jufer, M. and Perriard, Y., “Linear Motor Optimization Using An Analytical Model”, *16th International Conference on Electrical Machines. Conference Proceedings*, 5, (2004).

Mehta, M., Pandey, N., Agrawal, R., Pandya, M. and Raval H.H., “A Design Of Double Sided Linear Induction Motor For Efficient Performance For Low Speed Applicationé”, *International Journal For Technological Research In Engineering (IJTRE)*, 2 (9), 1853-1858, (2015).

Daldaban, F. and Ustkoyuncu, N., “A New Double Sided Linear Switched Reluctance Motor with Low Cost”, *Energy Conversion and Management*, 47 (18-19), 2983-2990, (2006).

Granted. ABD Patent: US3,470,828. (1969).

Gou, X.F., Yang, Y. and Zheng, X.J., “Analytic expression of magnetic field distribution of rectangular permanent magnets”, *Applied Mathematics and Mechanics*, 25 (3), 271–278, (2004).

Hanselman, D.C., *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Electrical and Computer Engineering University of Maine Orono, ME 04469 USA: Magna Physics Publishing, (1994).

Karaçar, E., “Hidrolik ve Pnömatik’e Alternatif Çözüm; Doğrusal Motorlar”, *II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, 489, (2001).

Kim, J.-J., Jeong, Y.H. and Cho, D.-W., “Thermal Behavior of a Machine Tool Equipped with Linear Motors”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture (ijmachtool)*, 44 (7-8), 749-758, (2004).

Minghu, Y., Yuqiu, Z., Xiao, L. and Yunyue, Y., “Design Method and Analysis of Double-Side Air-Core Permanent Magnet Linear Servo Motor”, *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference*, College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China, (2010).

Naso, D., Cupertino, F. and Turchiano, B., “Precise Position Control of Tubular Linear Motors with Neural Networks and Composite Learning”, *Control Engineering Practice*, 18 (5), 515-522, (2010).

Remy, G., Krebs G., Tounzi, A. and Barre, P., “Finite Element Analysis of a PMLSM (part 1)- Meshing techniques and thrust computations”, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Lille, France, (2007).

Sato, K., “High-Precision and High-Positioning of 100 G Linear Synchronous Motor”, *Precision Engineering*, (in press), (2014).

Taskın, O., “Design And Implementation Of A Double-Sided Coreless Linear Motor”, Master Thesis, *University of Istanbul Technical, Graduate School Of Science Engineering And Technology*, Istanbul, (2015).

Üstün, Ö., "Sürekli Mıknatıslı Baskılı Devre Endüvili Doğrusal Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2000).

Vărățiceanu, B. and Minciunescu, P., “Modeling And Analysis Of Dual-Sided Coreless”, *Revue Roumaine des Sciences Techniques- Serie Électrotechnique et Énergétique*, 60 (1),17-27, (2014).

Zhu, Y. and Cho, Y., “Structure Selection of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Ropeless Elevator System”, *Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Chicago, IL, USA, (2010).

Qian, j., Bao, L., Ji, C. and Wu J., “Magnetic field modeling and analysis for permanent magnet synchronous linear motors”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*,60 (2), 220-221, (2019).

ANSYS maxwell V16 training manual, “Lecture 6: Meshing and mesh operations [online]”, (20.11.2020), [“http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L06_Mesh_Operations.pdf”](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L06_Mesh_Operations.pdf), (2013).

Barrett, J., Harned T. and Monnich, J., “Linear motors complement today’s linear motion Technologies[online]”, (30.09.2020), [“http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf”](http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf)

Gramba, I., “Spining BLDC(Gimbal) motors at super sloooooow speeds with Arduino and L6234 [online]”, (10.10.2020), [“http://www.berryjam.eu/2015/04/driving-blcd-gimbals-at-super-slow-speeds-with-arduino/”](http://www.berryjam.eu/2015/04/driving-blcd-gimbals-at-super-slow-speeds-with-arduino/), (2015).

PI, “Operating principle of a 3-phase linear motor [online]”, (15.08.2020), [“https://www.pi-usa.us/en/products/positioning-stages-linear-rotary-motorized-precision/precision-motorized-linear-stages/”](https://www.pi-usa.us/en/products/positioning-stages-linear-rotary-motorized-precision/precision-motorized-linear-stages/)

Yapıcı K.O. ve Cengiz C., “Mekanik sistemlerin bilgisayarla kontrolü [online]”, (05.05.2020), [“http://oytunyapici.net/LM/index.html”](http://oytunyapici.net/LM/index.html), (2006).

Wikipedia, “Linear Motor [online]”, (20.09.2020), [“https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor”](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor)