

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK VE UZAY ENDÜSTRİSİNDE
KULLANILMAK ÜZERE TÜBÜLER KALICI
MIKNATISLI DOĞRUSAL MOTOR TASARIMI

Halit UZUNER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Kadir ERKAN

Haziran, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK VE UZAY ENDÜSTRİSİNDE KULLANILMAK
ÜZERE TÜBÜLER KALICI MIKNATISLI DOĞRUSAL
MOTOR TASARIMI

Halit UZUNER tarafından hazırlanan tez çalışması 11.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Kadir ERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Kadir ERKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin ÜVET, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Emrehan YAVŞAN, Üye
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Kadir ERKAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Havacılık Ve Uzay Endüstrisinde Kullanılmak Üzere Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motor Tasarımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Halit UZUNER

İmza



Aileme

TEŐEKKÖR

Bu dönemde yanımda olan ve desteklerini benden esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Kadir Erkan'a, Ahmet Bozkurt'a, Enes Mahmut Göker'e, çok değerli arkadaşlarıma, İdil  zdemir'e ve aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Halit UZUNER



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	19
1.3 Hipotez	21
2 TÜBÜLER KALICI MIKNATISLI DOĞRUSAL MOTOR	22
2.1 Çalışma Prensibi	22
2.2 Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motorun Modellenmesi	22
2.3 Clarke-Park Dönüşüm Metodu ile Motorun Kontrolü	26
3 TÜBÜLER MOTORUN TASARIMI	30
3.1 Rotor Tasarımı	31
3.2 Stator Tasarımı	37
3.3 Motor Parametreleri ve Nihai Tasarım	40
3.4 Kuvvet Analizleri	41
4 DENEY DÜZENEGİ	44
4.1 Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motorun İmalatı	45
4.2 Deney Düzeneginin Oluşturulması	50
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	54
6 SONUÇ	58
KAYNAKÇA	60

SİMGE LİSTESİ

λ	Ak1
Ψ	Ak1 Yoğunluğu
i	Akım
I	Akım
J	Akım Yoğunluğu
A	Alan
A	Amper
Φ_0	Başlangıç Akısı
L	Bobin Uzunluğu
R	Direnç
θ_r	Elektriksel Aç1
φ	Elektriksel Faz Açısı
γ	Elektriksel Faz Açısı
ω_s	Elektriksel Hız
L	Endüktans
V_m	Faz Gerilimi
f	Frekans
v	Gerilim
Hz	Hertz
kg	Kilogram
x	Konum
P	Kutup Çifti Sayısı
τ	Kutuplar Arası Mesafe
F	Kuvvet
F_L	Lorentz Kuvveti
B	Manyetik Alan Şiddeti
m	Metre
v_m	Motorun Mekanik Hızı
N	Newton
N	Sarım Sayısı

KISALTMA LİSTESİ

FEM	Finite Element Method
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
TKMDM	Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motor
TPMLM	Tubular Permanent Magnet Linear Motor



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Dişli mekanizmalı doğrusal eyleyici.....	1
Şekil 1.2	Uçak spoiler doğrusal hidrolik eyleyicisi	3
Şekil 1.3	Pnömatik eyleyici örneği	3
Şekil 1.4	Tek taraflı bir doğrusal motor üretmek için dönel bir makineyi bölme ve açma işleminin hayali süreci	4
Şekil 1.5	Çift taraflı bir doğrusal motor üretmek için döner bir makineyi kesme ve ezme işleminin hayali işlemi	4
Şekil 1.6	Dönel elektrik motorundan düzlemsel doğrusal motora ve tübüler doğrusal motora geçiş aşamaları	5
Şekil 1.7	Ses bobini motoru	5
Şekil 1.8	(a) Sawyer motorunun şematik yapısı (b) 2 fazlı Sawyer motorunun alttan görünümü	6
Şekil 1.9	Fırçalı doğrusal motor.....	7
Şekil 1.10	Doğrusal indüksiyon motoru yapısı	7
Şekil 1.11	Doğrusal senkron relüktans motoru	8
Şekil 1.12	Doğrusal hibrit adım motoru.....	8
Şekil 1.13	Düz tip kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor yapısı	9
Şekil 1.14	Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorun yapısı	10
Şekil 1.15	Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor topolojileri.....	10
Şekil 1.16	İdeal radyal mıknatıslanma ve paralel mıknatıslanma.....	11
Şekil 1.17	İdeal radyal mıknatıslanma ve bileşik mıknatıslanma.....	11
Şekil 1.18	Eksenel mıknatıslanmalı tübüler doğrusal motor	12
Şekil 1.19	4 bölümlü Halbach dizilimi	13
Şekil 1.20	Zhao ve arkadaşları tarafından tasarlanan oluklu tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor	15
Şekil 1.21	Hao ve arkadaşlarının tasarlamış olduğu çift statorlu kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor yapısı	15
Şekil 1.22	Woofroffe'nin esnek motor çalışması.....	16
Şekil 1.23	Hu ve arkadaşlarının tasarladığı jeneratör	17
Şekil 1.24	Pirisi ve arkadaşlarının tasarladığı dalga jeneratörü	17
Şekil 1.25	Boroujeni ve arkadaşlarının tasarladığı kare kesitli motor	18
Şekil 1.26	Forbes ve arkadaşlarının tasarladığı çokgen topolojisine sahip motor.....	18
Şekil 2.1	3 fazlı sargı modeli eşdeğer devresi.....	23
Şekil 2.2	MATLAB TKMDM d-q dönüşümü benzetimi.....	27

Şekil 2.3	3 faz akımlarının d-q dönüşümü sonuçları.....	27
Şekil 3.1	TKMDM kesit görüntüsü.....	30
Şekil 3.2	Ara parçasız 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı	31
Şekil 3.3	Ara parçasız rotor MagB.....	32
Şekil 3.4	Ferromanyetik olmayan ara parçalı 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı	32
Şekil 3.5	Ferromanyetik olmayan malzemeden üretilmiş ara parçalı rotor MagB	33
Şekil 3.6	Ferromanyetik ara parçalı 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı	33
Şekil 3.7	Ferromanyetik malzemeden üretilmiş ara parçalı rotor MagB	34
Şekil 3.8	Ferromanyetik olmayan malzemeden üretilmiş milli 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı.....	35
Şekil 3.9	Ferromanyetik olmayan malzemeden (karbon fiber) üretilmiş mil MagB.....	35
Şekil 3.10	Ferromanyetik malzemeden üretilmiş milli 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı	36
Şekil 3.11	Ferromanyetik malzemeden (çelik) mil MagB	36
Şekil 3.12	Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor stator sargı modeli.....	37
Şekil 3.13	Hava aralığı akı yoğunluğu	37
Şekil 3.14	Kutup-oluk kombinasyonu kuvvet grafiği	38
Şekil 3.15	Ara parça boyu kuvvet grafiği	39
Şekil 3.16	TKMDM'nin Maxwell 3 boyutlu tasarımı	41
Şekil 3.17	Motorun FEM analizi akı yoğunluğu.....	42
Şekil 3.18	Motorun FEM analizi ağ yapısı	42
Şekil 3.19	1 Hz'de motora uygulanan akıma karşılık alınan kuvvet değerleri	43
Şekil 3.20	Sınır koşulları çerçevesinde alınabilecek maksimum kuvvet değeri ..	43
Şekil 4.1	Motorun Solidworks programından 3 boyutlu tasarımı.....	44
Şekil 4.2	Motor gövdesinin ve stator sargılarının ölçüleri	44
Şekil 4.3	Kalıcı mıknatısların ve ara parçanın ölçüleri	44
Şekil 4.4	Ara parça	45
Şekil 4.5	Rotor yapısı	45
Şekil 4.6	Bobin sarımı için kullanılan kalıplar.....	46
Şekil 4.7	Bobin sarımı son hali	46
Şekil 4.8	PETG yüzük.....	47
Şekil 4.9	Kalıba bobinlerin dizilmesi.....	47
Şekil 4.10	Kalıpta sıkıştırılan ve verniklenen stator	47

Şekil 4.11	Lehimleme ve makaronlama işlemi yapılan stator	48
Şekil 4.12	Yataklanmış ve kumaş bant ile sarılan stator.....	48
Şekil 4.13	Statorun kabuğun içerisine yerleştirilmesi	48
Şekil 4.14	Milin yataklanması için kullanılan 5 mm'lik doğrusal rulman.....	49
Şekil 4.15	Doğrusal rulman ile mil yataklanması ve sınırlandırıcı anahtar	49
Şekil 4.16	Motor prototipinin nihai hali.....	50
Şekil 4.17	Omron E4C-DS100 ultrasonik mesafe sensörü	50
Şekil 4.18	(a) Varsan varyak, (b) Quanser Q8 kontrol kartı	51
Şekil 4.19	Motor sürücü panosu ve motor sürücüleri	51
Şekil 4.20	Forsentek FSSM-10N kuvvet sensörü	52
Şekil 4.21	Kyowa WGI-300A amplifikatör	52
Şekil 4.22	Deney düzeneği bağlantı diyagramı.....	53
Şekil 4.23	Deney düzeneğinin nihai hali.....	53
Şekil 5.1	Kuvvet ölçümü deney düzeneği.....	54
Şekil 5.2	Simulink ana çalışma ekranı	54
Şekil 5.3	Mesafe Sensörü alt bloğu iç yapısı	55
Şekil 5.4	Frekans alt bloğu iç yapısı	56
Şekil 5.5	Ölçülen kuvvet değerleri.....	57
Şekil 6.1	Analiz çalışmaları ile deneysel çalışmalar arasındaki hata.....	58

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Mıknatıslanma çeşitlerinin kıyaslanması	13
Tablo 3.1	Soğutma tiplerine göre akım yoğunluğu tablosu	40
Tablo 3.2	Motor dizayn parametreleri.....	40
Tablo 5.1	Ultrasonik mesafe sensörü kalibrasyonu	55
Tablo 5.2	Akıma karşılık kuvvet gözlemleri.....	56



Havacılık ve Uzay Endüstrisinde Kullanılmak Üzere Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motor Tasarımı

Halit UZUNER

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Kadir ERKAN

Havacılık ve uzay endüstrisinde uzun süredir geleneksel hidrolik ve pnömatik eyleyiciler kullanılmaktadır. Fakat bu eyleyiciler sızıntı, aşınma, yüksek hacim, yüksek kütle ve kirlilik gibi sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu sorunlara bağlı olarak ortaya çıkan bakım maliyetleri, daha verimli, düşük hacimli, düşük kütleli ve çevre dostu alternatiflerin arayışını gerektirmiştir. Çalışmamızda bu sorunlara potansiyel bir çözüm olarak Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motor'un (TKMDM) tasarımı sunulmaktadır.

Bu çalışmada, Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motorun tasarım kriterlerine yer verilmiştir. ANSYS Maxwell analiz programında Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak manyetostatik ve transient analizleri ile motorun tasarım çalışmaları ve farklı akım değerleri için kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmaları tamamlanan motorun imalatı gerçekleştirilmiş ve deney düzeneği oluşturulmuştur. Oluşturulan deney düzeneği ile motorun farklı uyartım akımları altında kuvvet çıkışları gözlemlenmiştir. Benzetim çalışması kuvvet sonuçları ile deney düzeneği kuvvet sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor, TKMDM, túbüler doğrusal motor, doğrusal eyleyici, túbüler kalıcı mıknatıslı motor



Tubular Permanent Magnet Linear Motor Design for Aircraft Actuator Instead Of Hydraulic Actuators

Halit UZUNER

Department of Mechatronics Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir ERKAN

Conventional hydraulic and pneumatic actuators have long been used in the aviation and space industry. However, these actuators also bring problems such as leakage, wear, high volume, high mass and pollution. Maintenance costs arising from these problems have required the search for more efficient, low volume, low mass and environmentally friendly alternatives. In our study, the design of the Tubular Permanent Magnet Linear Motor (TPMLM) is presented as a potential solution to these problems.

This study outlines the design criteria of the Tubular Permanent Magnet Linear Motor. Using the Finite Element Method (FEM) in the ANSYS Maxwell analysis program, magnetostatic and transient analyses were conducted to develop the motor's design and perform force analyses for different current values. The motor designed through these studies was then manufactured, and an experimental setup was created. The experimental setup allowed for the observation of the motor's force outputs under different excitation currents. The simulation force results were compared with the force results obtained from the experimental setup.

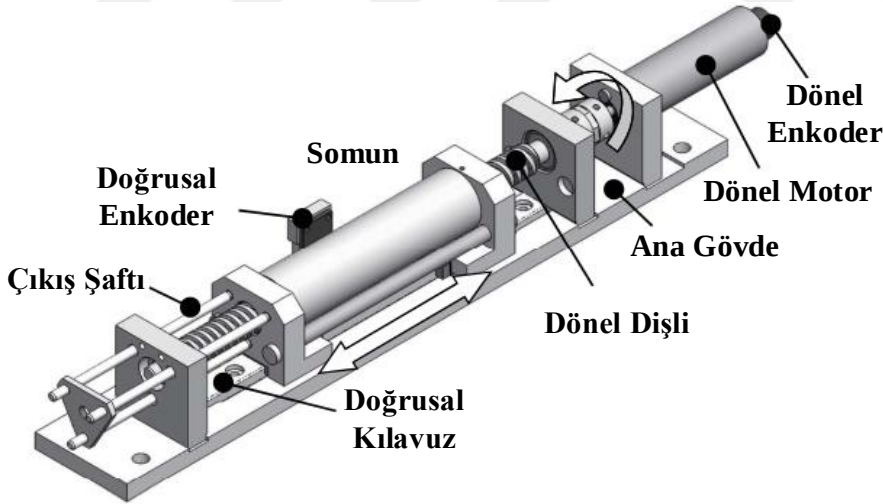
Keywords: Tubular permanent magnet linear motor, TPMLM, tubular linear motor, linear actuator, tubular permanent magnet motor



YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1.1 Literatür Özeti

Doğrusal motorlar, endüstriyel otomasyon, robotik sistemler, taşıma ekipmanları, medikal cihazlar ve havacılık-uzay sanayi gibi çeşitli alanlarda sıklıkla kullanılan önemli bir eyleyici teknolojisidir. Doğrusal motorların birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları dönel hareketi doğrusal harekete dönüştüren sistemlerdir. Bu sistemler dönel hareketi doğrusal harekete dönüştürmek için bazı kayış veya dişli mekanizmalarına sahiptir. Kullanılan mekanizmalar ile motorda üretilen rotasyonel hareket yüke doğrusal hareket şeklinde aktarılır. Fakat bu dönüşümde sürtünmeden kaynaklı enerji kayıpları, dişli mekanizmasının hareketli parçanın kütlesini artırması ve mekanik aşınma kaynaklı bakım maliyetleri verimliliği ciddi anlamda düşürmektedir. Buna rağmen dişli mekanizmalı bu sistemler hassas üretim yapılan metal işleme fabrikalarında CNC freze makinelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].



Şekil 1.1 Dişli mekanizmalı doğrusal eyleyici [2]

Bu sistemlerin başında vidalı mil mekanizmaları gelmektedir. Vidalı mil mekanizmaları endüstride en yaygın kullanılan doğrusal hareket mekanizmalarıdır. Vidalı mil mekanizması en basit şekilde sabit hatveli bir vida ve bu vida üzerinde gezen bir somundan oluşur. Yüke bu somuna takılır. Vidanın dönmesi somunu ileri ve geri yönde doğrusal şekilde hareket ettirir. Vida ile somun arasındaki sürtünmeyi

azaltmak için bilyalı mil ve uydu makaralı vida şeklinde mekanizmalar geliştirilmiştir. Bu sistemlerin en büyük dezavantajlarından biri doğrusal hareketin vidanın dış boyuna bağlı olması ve dolayısı ile doğrusal hareketin yavaş olmasıdır [3].

Geleneksel doğrusal motorlardan farklı olarak, doğrudan tahrik doğrusal motorlar doğrusal hareket ve kuvveti doğrudan yüke aktarır. Arada herhangi bir aktarma organı olmadan doğrusal hareket sağlayabilmektedirler. Ayrıca kayış veya dişli mekanizması olmadığından bakım maliyetleri nispeten daha düşük, verimlilikleri daha yüksektir.

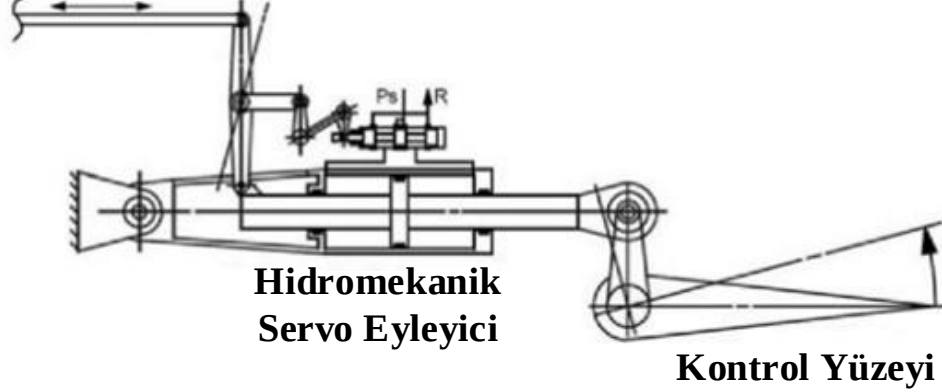
Endüstride yaygın olarak kullanılan 3 ana tip doğrudan tahrik doğrusal motor vardır. Bunlar hidrolik eyleyiciler, pnömatik eyleyiciler ve elektrik doğrusal motorlarıdır. Hidrolik sistemler genellikle yüksek güç uygulamalarında kullanılırken, pnömatik sistemler hızlı hareket gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

Hidrolik eyleyiciler genellikle buldozer, damperli kamyon ve traktör gibi ağır ekipman araçlarında, uçakların hareketli yüzeylerinin hareketinde, pres makinelerinde, kısacası yüksek güç gerektiren alanlarda tercih edilir. Ancak hidrolik eyleyiciler yavaş çalışan hantal sistemlerdir ve hassas konumlandırma için uygun değildir.

Havacılık endüstrisinde uçakların hareket yüzeylerinin genelinde (slat, flap, spoiler, kargo kapılar ve iniş takımları gibi) hareketi sağlamak için hidrolik eyleyiciler kullanılmaktadır. Bu eyleyiciler hareket yüzeylerinin hareketleri için gerekli olan kuvveti ve torku sağlar. Ancak, bu eyleyicilerin en büyük dezavantajlarından biri hidrolik sızıntı sorunları ve bir diğeri mekanik sürtünmeden kaynaklanan aşınma sorunlarıdır. Aşınma sorunları da zaten sızıntı sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu nedenle uçaklara bakımda sıklıkla sızıntı kontrolü uygulanır ve sızıntı-kaçak olması durumlarında bakım dokümanına göre müdahale edilerek sızıntı-kaçak giderilir [4].

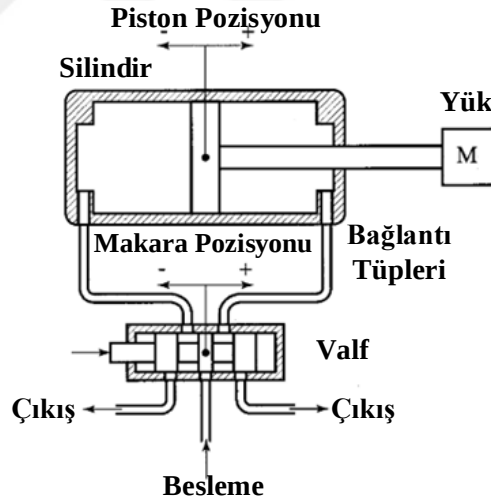
Uçaklarda hareket yüzeylerinin hareketi için nispeten yüksek kuvvetler ve torklar gerekmektedir. Örneğin Şekil 1.2’de görülen uçağın spoilerinin açılıp kapanmasını sağlayan uçak spoiler eyleyicisinin çıkış kuvveti 7 kN’dur. Bu eyleyicinin strok uzunluğu yaklaşık olarak 45 cm, hidrolik dolu ağırlığı ise 12 kg gelmektedir [5].

Uygulama Girişı



Şekil 1.2 Uçak spoiler doğrusal hidrolik eyleyicisi [6]

Örnekte de görüldüğü üzere hidrolik sistemler yüksek kuvvet yoğunluğuna sahiptir. Pnömatik eyleyiciler de hidrolik eyleyiciler kadar olmasa da nispeten yüksek güç yoğunluğuna sahiptir fakat elektrikli eyleyicilere göre hassasiyetleri daha düşüktür. Pnömatik robot manipülatörleri, iyi uyumluluk, yüksek yük-ağırlık ve yüksek yük-hacim oranları, yüksek hız ve kuvvet gibi avantajlara sahiptir [1].

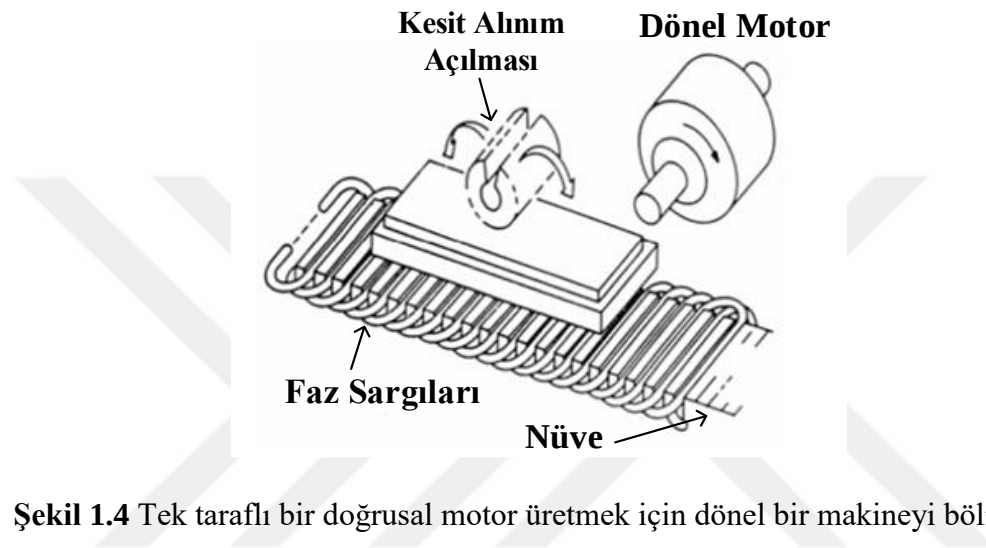


Şekil 1.3 Pnömatik eyleyici örneği [7]

Hidrolik ve pnömatik sistemlerde sızıntılar, enerji kayıpları ve bakım maliyetleri gibi sorunlar yaşanabilmektedir. Hidrolik ve pnömatik sistemlere kıyasla elektrikli doğrusal motorlar, daha yüksek hassasiyet, daha az bakım gereksinimi ve daha hızlı tepki süreleri sunar. Ayrıca hidrolik ve pnömatik sistemler hava veya hidrolik tankı ve kompresör gibi elemanlara sahiptir. Bu da bu sistemleri kompleks

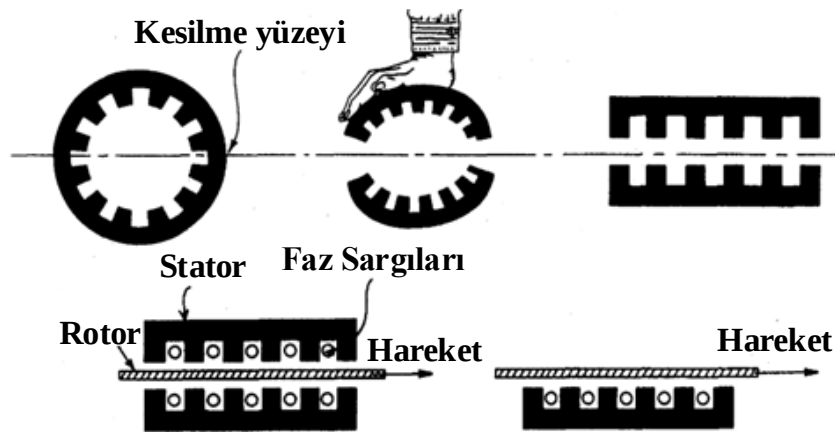
ve yüksek hacimli sistemler haline getirmektedir. Hidrolik ve pnömatik sistemlerin aksine elektriksel sistemler daha hafif ve kompakt sistemlerdir. Özellikle hassas kontrol gerektiren endüstriyel uygulamalarda doğrusal elektrik motorlarına duyulan ihtiyaç gittikçe artmaktadır.

Bugün mevcut olan elektriksel doğrusal motor tipleri, aslında dönel karşılıklarıyla neredeyse tam olarak örtüşmektedir. Bir dönel makine, bir radyal düzlemle kesilip açıldığında, Şekil 1.4'te görüldüğü gibi, düz tek taraflı bir topoloji elde edilir.



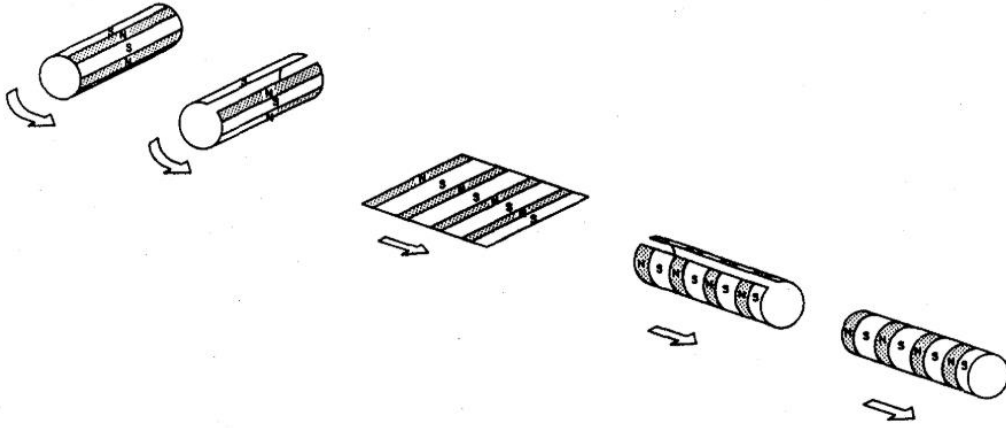
Şekil 1.4 Tek taraflı bir doğrusal motor üretmek için dönel bir makineyi bölme ve açma işleminin hayali süreci [8]

Eğer dönel motoru, Şekil 1.5'te gösterildiği gibi bir radyal düzlemle keser ve düzleştirirsek, düz çift taraflı bir doğrusal motor topolojisi elde etmiş oluruz.



Şekil 1.5 Çift taraflı bir doğrusal motor üretmek için döner bir makineyi kesme ve ezme işleminin hayali işlemi [9]

Son olarak, dönel motoru radyal bir düzlemle keser, açar ve sonrasında Şekil 1.6'daki gibi rulo biçimine getirirsek tübüler doğrusal motor topolojisi elde etmiş oluruz.



Şekil 1.6 Dönel elektrik motorundan düzlemsel doğrusal motora ve tübüler doğrusal motora geçiş aşamaları [9]

Görüldüğü üzere prensip olarak her doğrusal elektrik motoruna karşılık bir dönel elektrik motoru düşünülebilir.

Günümüzde kullanılan çok sayıda doğrusal elektrik motoru çeşidi vardır. Bunlar fırçalı dc doğrusal motorlar, doğrusal indüksiyon motorları, doğrusal solenoid motorları, sawyer motorları, doğrusal relüktans motorları, doğrusal adım motorları ve kalıcı mıknatıslı senkron motorlardır.

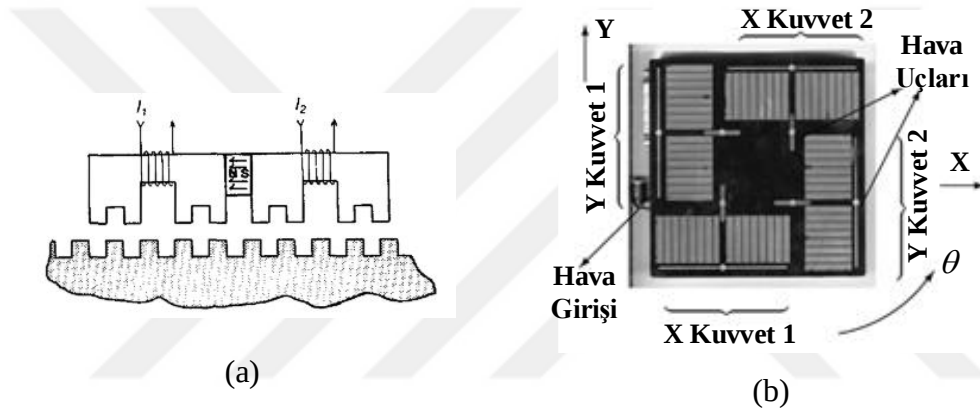
Solenoidler, eksenel olarak simetrik manyetik geçirgen demirden oluşan bir çekirdekten ve çekirdeği saran bobinden oluşur. Solenoidler kısa bir aralıkta doğrusal hareket oluşturabilirler. Ses bobinleri, demir çekirdeğin etrafında bir kabuk olarak kalıcı mıknatıslar kullanan solenoid türleridir.



Şekil 1.7 Ses bobini motoru [10]

Ses bobinleri yüksek bant genişliğine sahiptir ve yaklaşık bir santimetrelık bir aralıkta mikron altı konumlandırma kapasitesine sahiptir. Fakat bu sistemler çok küçük hareket aralıklarında çalışmaktadır [1].

Bir başka doğrusal elektrikli motor ise Sawyer motorudur. Sawyer motoru temel olarak iki fazlı darbeli kalıcı mıknatıslı doğrusal motordur. Her iki faz da aynı anda içlerinden geçen alternatif akımla çalışır. Konumlandırma için açık döngü veya kapalı döngü kontrolü kullanılabilir. İndüktörün (hareket ettiricinin) yüksek ataleti dolayısı ile hızlanması sınırlıdır. Kenar kutupları, merkez kutuplara göre daha az kuvvet ve itme üretir. Dolayısı ile titreşim ve gürültü seviyeleri oldukça yüksektir [9].



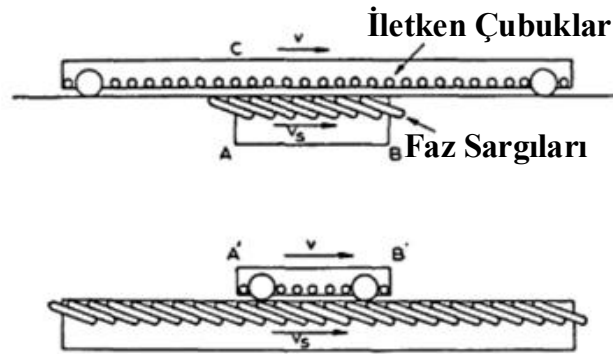
Şekil 1.8 (a) Sawyer motorunun şematik yapısı [11] (b) 2 fazlı Sawyer motorunun alttan görünümü [12]

Fırçalı doğrusal motorlarda rotorda demir çekirdekli bobinler bulunur. Bu bobinlere akım fırça vasıtasıyla aktarılır. Bir komütatör ile akımın bobinlere doğru şekilde yönlendirilmesi sağlanır. Bu akım rotorda bir manyetik alan oluşturur. Aynı şekilde motorun statorunda da sargılar bulunmaktadır. Bu sargılara uygulanan akımla birlikte de statorunda manyetik alan oluşur ve rotordaki manyetik alanla etkileşime girerek rotorda bir itme kuvveti oluşturur. Rotorun hangi yöne gideceği komütatör ile belirlenir. Fırçalı doğrusal motorlar doğrusal hareket gerektiren uygulamalarda hassas kontrol sağlamak amacıyla kullanılmaktadır fakat fırçaların sürtünmesi kaynaklı gürültü, aşınma ve bakım gereksinimleri dolayısı ile kullanımı pek yaygın değildir [11].



Şekil 1.9 Fırçalı doğrusal motor [12]

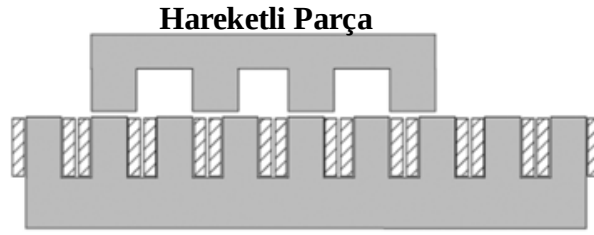
Bir diğer doğrusal motor türü ise doğrusal indüksiyon motorudur. Doğrusal indüksiyon motorlarında primer ve sekonder olmak üzere iki kısım vardır. Primerde 3 faz sargılar bulunmaktadır. Sekonderde ise sargı, sincap kafesi veya alüminyum/bakır levha bulunabilir. Primerde bulunan sargılara 3 faz akım uygulanır ve bu 3 faz akım doğrusal hareket eden bir manyetik alan oluşturur. Oluşan manyetik alan sekonderde bulunan kafes/sargı/levha üzerinde gerilim indükler ve indüklenen gerilim ile birlikte rotasyonel indüksiyon motorlarında olduğu gibi motor hareket eder. Doğrusal indüksiyon motorları kalıcı mıknatıslara sahip olmadıkları için düzenli bir manyetik alana sahip değildir. Özellikle uç noktalarda uç etkisi motorun verimini düşürmektedir [13], [14].



Şekil 1.10 Doğrusal indüksiyon motoru yapısı [13]

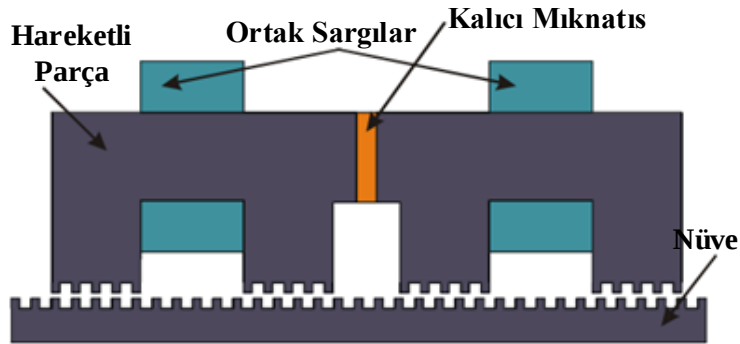
Doğrusal senkron relüktans motorlarında da diğer motorlarda olduğu gibi statorda 3 faz sargılar bulunur. Rotor ise genellikle manyetik geçirgen olan demir veya çelik sac paketinden oluşur. Rotor üzerinde stator tarafından oluşturulan manyetik alan ile etkileşime giren dişler veya çıkıntılı kutuplar bulunur. Doğrusal senkron

relüktans motorların kuvvet yoğunlukları da kalıcı mıknatıslı motorlara göre genellikle düşük yoğunluktadır [15].



Şekil 1.11 Doğrusal senkron relüktans motoru [16]

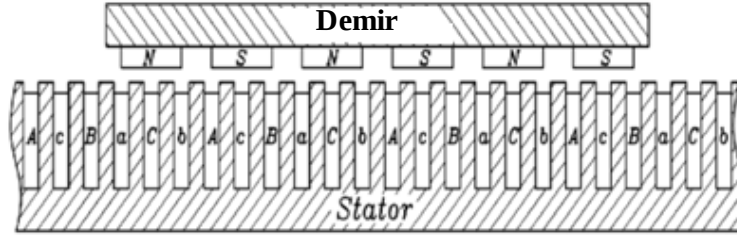
Doğrusal hibrit step motorlar sabit bir plaka(stator) üzerinde asılı bir taşıyıcıya sahip, değişken relüktanslı, kalıcı mıknatısla uyarılan senkron bir motordur. Plaka, yüksek geçirgenliğe sahip soğuk haddelenmiş çelikten yapılmış, üzerinde birbirine eşit uzaklıkta dişliler bulunan bir levhadır. Taşıyıcı, motoru sürmek üzere komut bobinlerine sahip iki elektromıknatıstan ve bunların arasında yüksek manyetik özelliklere sahip güçlü bir nadir toprak kalıcı mıknatıstan oluşur. Her elektromıknatısın iki kutbu vardır ve tüm kutuplar manyetik akıyı yoğunlaştırmak için aynı sayıda dişe sahiptir. Aynı anda yalnızca bir kutup plaka dişleriyle hizalanabilir [17], [18].



Şekil 1.12 Doğrusal hibrit adım motoru [17]

Projemizde tasarımını gerçekleştirdiğimiz motor türümüz ise kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motordur. Bu motor türünde de motor iki kısımdan oluşur. Statorda 3 faz sargılar bulunurken hareketli kısımda mıknatıslar bulunmaktadır. Statordaki sargılara uygulanan akım ile birlikte hareketli bir manyetik alan oluşur ve bu manyetik alan rotordaki mıknatısların manyetik alanı ile etkileşime girerek rotoru hareket ettirir. Temelde iki tip kalıcı mıknatıslı doğrusal motor yaygın olarak

kullanılmaktadır. Bunlar düz(flat) ve tübüler tip kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motorlardır [19].

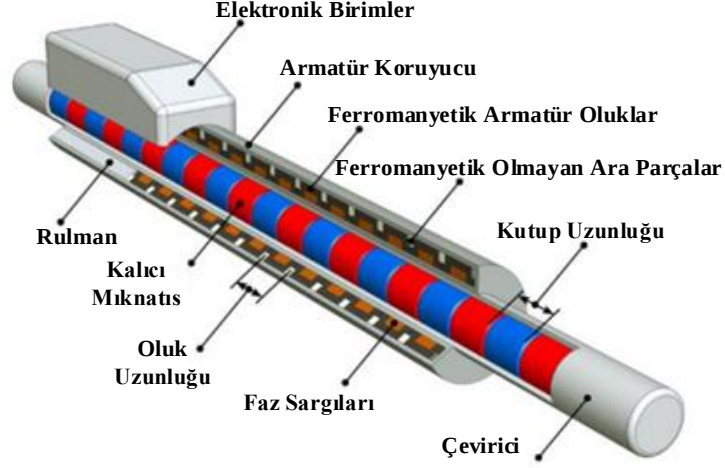


Şekil 1.13 Düz tip kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor yapısı [20]

Çeşitli uygulama alanlarında kullanımları farklı olsa da düz(flat) tip kalıcı mıknatıslı doğrusal motorlar kenarlardan akı sızıntılarına sahiptir. Bu da motorun verimini düşürmektedir. Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorlarda ise manyetik alan silindirik geometrinin içinde yoğunlaştırılır. Böylece akı sızıntıları azaltılır ve motorun verimi artar.

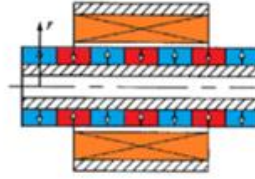
Mıknatıs materyallerinin gelişmesi ile elde edilen manyetik alan şiddetinin artması ve güç elektroniği cihazlarının da gelişmesi ile birlikte doğrusal senkron motorlar daha yüksek kuvvetler üretebilmeye başlamıştır. Bu nedenle bir çok uygulamada doğrusal endüksiyon ve anahtarlamalı relüktans motorlarının yerine doğrusal senkron motorların kullanımı yaygınlaşmıştır [21].

Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motor(TKMDM) kutupları alternatif veya zıt yönlerde hizalanmış kalıcı mıknatıslara sahip hareketli bir mil ve bu mili çevreleyen milin etrafına sarılmış bobinler topluluğudur. Bobinlerden geçen akım bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan rotor üzerindeki mıknatısların manyetik alanı ile etkileşime girerek kuvvet oluşturur. Geleneksel elektrik motorlarında, bobinlerden akım geçirildiğinde dönel bir manyetik alan oluşur ve rotordaki mıknatısların manyetik alanı ile etkileşime girerek rotorda bir dönme kuvveti oluşturur. TKMDM’lerde ise bobinler tarafından oluşan manyetik alan, rotorun eksenel hareket etmesini sağlar [22], [23].

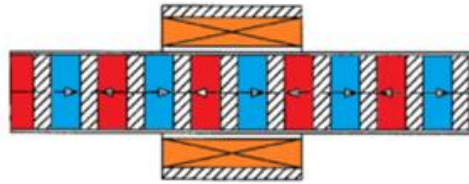


Şekil 1.14 Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorun yapısı [6]

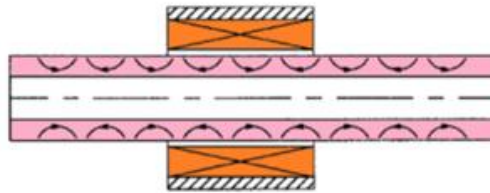
TKMDM'lerin mıknatıslanma yönlerine göre çeşitli varyasyonları bulunmaktadır. Mıknatısların mıknatıslanma yönleri TKMDM'nin manyetik alan şiddetini, manyetik kayıplarını ve çıkış gücünü etkiler. Mıknatıslanma topolojileri radyal, eksenel ve Halbach olmak üzere üç ana başlıkta incelenir. Bu üç topolojinin şematik görünüşleri Şekil 1.15'te gösterilmektedir [24].



a) Radyal Manyetizasyon



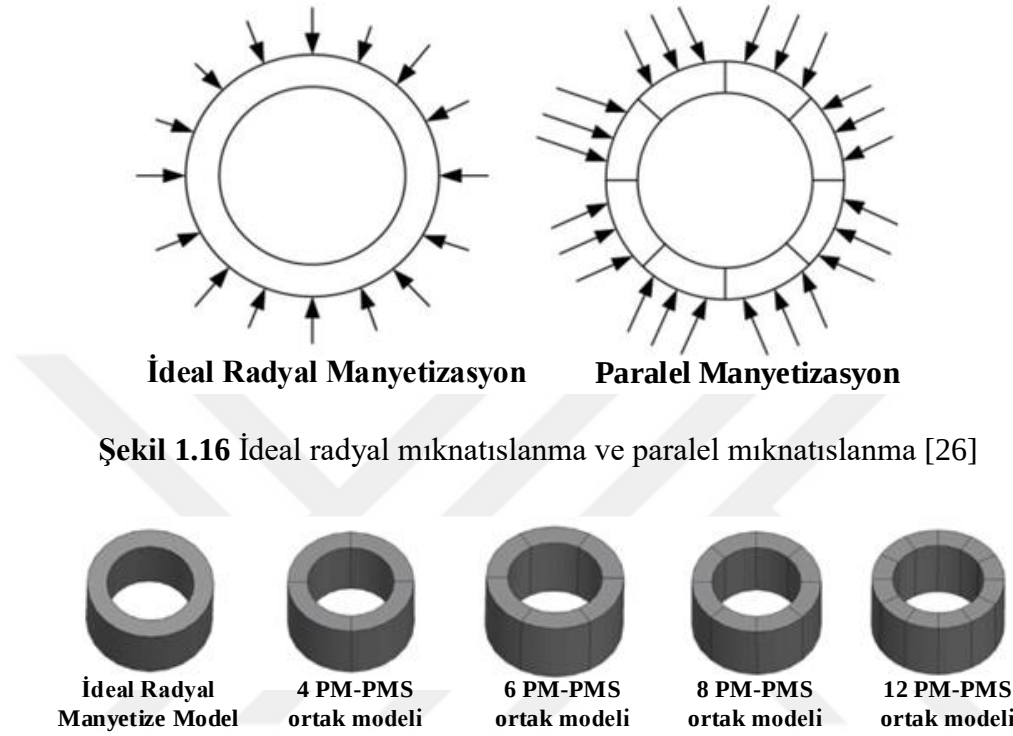
b) Eksenel Manyetizasyon



c) Halbach Manyetizasyon

Şekil 1.15 Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor topolojileri [24]

Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorlarda radyal mıknatıslanma, mıknatısların manyetik alanının hareket eksenine dik biçimde konumlandırılmasıdır. Mıknatısın manyetik alanı, mıknatısın merkezinden dışa doğru tüpün çevresinde dairesel olarak yönlendirilir [25].



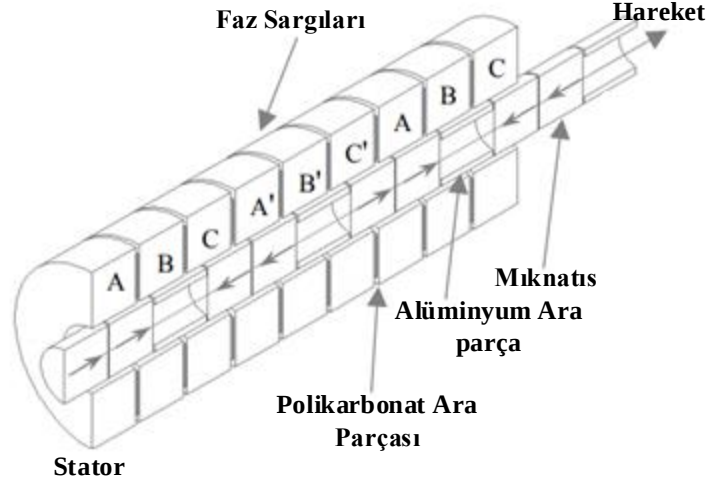
Şekil 1.16 İdeal radyal mıknatıslanma ve paralel mıknatıslanma [26]

Şekil 1.17 İdeal radyal mıknatıslanma ve bileşik mıknatıslanma [26]

İdeal radyal mıknatıslanmalı mıknatısların maliyetli ve üretiminin zor olması dolayısı ile 4, 6, 8, 12 veya daha fazla mıknatıstan oluşan bileşik radyal mıknatıslanma alternatifleri ile ideale yaklaşılmaya çalışılmaktadır.

Wang ve arkadaşları yüzeye monte radyal mıknatıslanmalı bir motor tasarlamıştır. Radyal mıknatıslanma ile az sayıda mıknatıs kullanarak maliyeti düşürmek hedeflense de radyal mıknatıslanmış mıknatısların üretim zorluğu sebebi ile maliyetleri yüksektir. Ayrıca tübüler doğrusal motorlarda mıknatıslanma yönleri dolayısı ile kullanımları zordur [27].

Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorlarda eksenel mıknatıslanma, mıknatısların manyetik alanının hareket eksenine paralel biçimde konumlandırılmasıdır. Eksenel mıknatıslanmalı doğrusal motorlarda mıknatıslar N-S—N-S şeklinde dizilmektedir. Fakat birçok uygulamada yüksek manyetik alan şiddeti oluşturması dolayısı ile N-S—S-N şeklindeki dizilim sıklıkla tercih edilmektedir [8].



Şekil 1.18 Eksenel mıknatıslı tübüler doğrusal motor [1]

Buren ve arkadaşları eksenel olarak mıknatıslanmış üç kalıcı mıknatıs kutbuna sahip doğrusal bir jeneratör tasarlamıştır. Tasarımda mıknatıslar arasında disk şeklinde ferromanyetik ara parçalar bulunmaktadır. Komşu mıknatısların mıknatıslanma yönleri zıttır ve ara parçalar burada akı yoğunlaştırıcı kutuplar gibi davranmaktadır. Bu da akı yoğunluğunu artırarak motorun verimini artırmaktadır [28].

Kim ve arkadaşları NS-NS-SN-SN şeklinde eksenel olarak mıknatıslanmış silindirik şeklinde mıknatıslara sahip bir motor tasarlamışlardır. Tasarımda 3 fazlı stator sargı modeli kullanılmıştır. Motorda mıknatıslar arası alüminyum ara parça tercih edilmiştir. Alüminyum ara parça kullanılması motorun verimini düşürmektedir [29].

Radyal ve Halbach mıknatıslanma tiplerine göre düşük manyetik alan şiddetine sahip olsalar da eksenel mıknatıslanmalı mıknatıslar üretimlerinin kolay olması, nispeten uygun fiyatlı ve kolay bulunabilmeleri sebebi ile tercih edilmektedirler [1].

Radyal ve eksenel mıknatıslanmalı motorlardaki N-S—S-N şeklindeki tipik mıknatıslanma konfigürasyonunun aksine Halbach tipi mıknatıslanmada ideal mıknatıslanma biçimi sinüzoidal şekildedir. Fakat mıknatıslanma vektörlerinin tamamen sinüzoidal bir dağılıma sahip şekilde üretilmesinin mümkün olmaması dolayısı ile genellikle Halbach dizilerinde Şekil 1.19’da görüldüğü gibi 4 bölümlü diziler kullanılmaktadır. Bu dizilimde her mıknatıs bir önceki mıknatısın mıknatıslanma yönünün 90 derece döndürülmüş hali şeklinde konumlandırılır. Bu

4 bölümlü diziler periyodik bir şekilde kullanılarak ideal duruma yaklaşılmaktadır [3].



Şekil 1.19 4 bölümlü Halbach dizilimi [30]

Mıknatıslanma vektörleri, alan kuvveti dizinin bir tarafında güçlü diğer tarafında zayıf olacak şekilde yönlendirilir. 4 bloklü dizinin güçlü tarafının manyetik alan şiddeti ideal durumdaki manyetik alan şiddetinin yaklaşık %90'ı kadardır.

Tablo 1.1 Mıknatıslanma çeşitlerinin kıyaslanması

Mıknatıslanma Çeşitleri	Avantajları	Dezavantajları
Eksenel Mıknatıslanma	-Basit yapı -Kolay kontrol -Kutup kenarlarında yüksek akı yoğunluğu -İmalatının kolay olması -Düşük maliyet	-Düşük kuvvet çıkışı -Düşük verimlilik
Radyal Mıknatıslanma	-Hassas konum kontrolü -Yüksek verim	-Yüksek maliyet
Halbach Mıknatıslanma	-Mıknatıs dizisinin bir tarafında yüksek manyetik akı yoğunluğu -Düzensiz manyetik alan dağılımı -Yüksek verim -İstenilen tarafa manyetik akı yoğunluğunun verilmesi ile kayıpların azaltılması	-Kompleks yapı -Yüksek maliyet

Teknolojinin de ilerlemesi ile birlikte özellikle hassas imalat endüstrisinde hassas konumlandırma yapabilen, daha küçük ve daha hızlı eyleyicilere ihtiyaç duyulmuştur. Örneğin entegre devre imalatında malzemenin lazerle kazınması aşamasında hassas konumlandırma büyük önem arz etmektedir. Burada çok serbestlik derecesine sahip, hızlı ve hassas hareket edebilen eyleyicilere ihtiyaç

duyulmaktadır. Bu eyleyiciler tablayı hızlı ve hassas biçimde konumlandırarak prosesin süresini kısaltmakta ve toleransını düşürmektedir. Bir diğer endüstriyel ihtiyaç ise robotik endüstrisinde kullanılmak üzere kompakt, güçlü doğrusal eyleyicilerdir. Özellikle robot kolların ucundaki tutucularda kullanılmak üzere hassas, kompakt eyleyicilere ihtiyaç duyulmaktadır [1].

Murphy çalışmasında robotik alanında elverişli tübüler tipte oluksuz kalıcı mıknatıslı doğrusal eyleyici tasarlamıştır. Eyleyicinin 10 cm strok uzunluğuna sahip ve 26,4 N güç ürettiğini belirtmiştir. Başlangıçta tasarım hassas konum kontrolü için önerilmiş olsa da motorun gürültüsü bu tip çalışmalar için dezavantaj teşkil etmektedir. Fakat eyleyicinin hassas konumlandırma, yüksek hız ve kompakt bir motordan nispeten yüksek kuvvet üretimi robotik uygulamaları için motoru elverişli kılmaktadır. Motorun oluksuz yapıda oluşu vuruş momentinin oluşmasını önlemektedir. Fakat rotorda mıknatıslar arasında alüminyum ara parça kullanımı motorun ürettiği kuvveti düşürmektedir [1].

Ilıca çalışmasında tarımsal ilaçlamada kullanılmak üzere tübüler tipte doğrusal senkron motor kullanmıştır. Burada eyleyicinin tarım ilacı püskürtücüsünün yüksekliğinin kontrolü için kullanılması hedeflenmiştir [31].

Yingjie ve arkadaşları Stirling tipi kriyo soğutucularda kullanılmak üzere tek fazlı tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor tasarlamıştır. Bu soğutucuların özellikle uzay uygulamalarında kullanılması sebebi ile uzun ömürlü, düşük kütleli, güvenilir ve yüksek verimli olmaları gerekmektedir. Sistemin ihtiyaç duyduğu basıncın üretilmesinde kullanılan kompresörde geleneksel krank mili yerine doğrusal eyleyici kullanılması, sistemde daha az aşınmaya sebep olacak ve verimi yükselterek sistemin daha stabil çalışması sağlanmıştır [32].

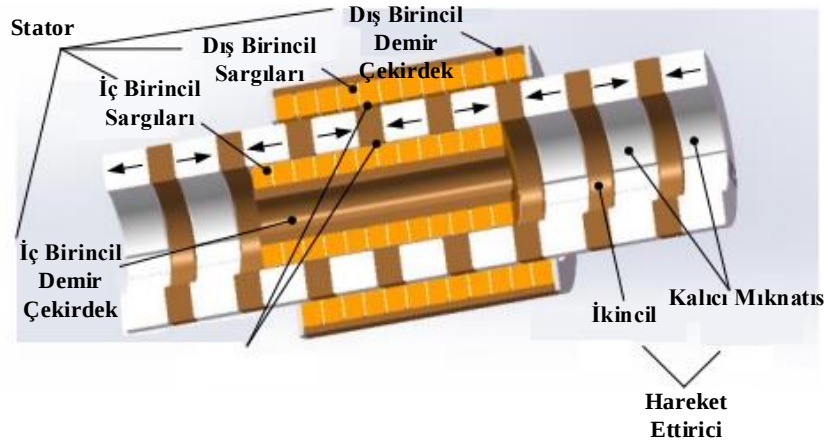
Gao ve arkadaşları plastik şekil verme makinesinde kullanılmak üzere oluklu tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor tasarlamıştır. Motor, plastik şekil verme makinesinde güç ve titreşim kaynağı olarak görev almaktadır. Motorun oluklu yapıda oluşu motorda itme dalgalanması oluşmasını sağlamaktadır. Çalışmada stator ve rotor uzunluklarının torka etkisi ile kutup ve oluk sayısının itme dalgalanmasına etkisi üzerinde durulmaktadır. Plastik şekil vermede kullanılacak olan titreşim motorun itme dalgalanmasından sağlanmaktadır. Bu nedenle motorda

itme dalgalanması frekansı ve itme gücü plastik şekil vermede kullanılmak üzere optimum şekilde tasarlanmıştır [33].



Şekil 1.20 Zhao ve arkadaşları tarafından tasarlanan oluklu tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor [33]

Hao ve arkadaşları çalışmalarında uçaklarda kullanılmak üzere çift statorlu kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor tasarlamıştır. Havacılık alanında yüksek kuvvet yoğunluğuna sahip motorlar gerekmektedir. Tübüler doğrusal motorlarda kuvvet yoğunluğunun artırılabilmesi için motorun çapının artması gerekmektedir. Bu da motorun hacminin oldukça artması anlamına gelmektedir. Hao ve arkadaşları mıknatıslardan maksimum verim alarak daha kompakt bir motor yapmak için motorun içinde ve dışında olmak üzere iki adet stator yapısı tasarlamıştır. Böylece sargılara verilen akımla kuvvet maksimize edilmektedir. Fakat bu uygulama motoru fazlasıyla kompleks hale getirmektedir ve imalatını zorlaştırmaktadır [34].



Şekil 1.21 Hao ve arkadaşlarının tasarlamış olduğu çift statorlu kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor yapısı [34]

Komijani ve arkadaşları petrol endüstrisinde sondaj uygulamalarında kullanılmak üzere tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motor tasarlamışlardır. Sondaj uygulamalarında tübüler kalıcı mıknatıslı senkron motor kullanımı sert kayaları

delmek için iki adet çekiç vazifesi gören gazlı amortisör ile elektrik gücünü doğrudan aktararak delme süresini kısaltmaktadır ve verimi artırmaktadır [35].

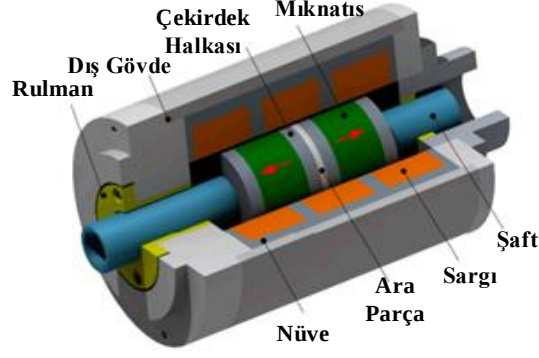
Woodroffe çalışmasında insanların kas sistemine benzeyen esnek bir tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor tasarlamıştır. Stator sargılarını stator ayırıcıları ile birlikte bir hortumun üzerinde sıralamıştır. Böylece motorun ana gövdesine esneklik kazandırılmıştır. Rotorda ise kalıcı mıknatısların arasına evrensel mafsalları yerleştirmiştir. Bu sayede rotor da stator ile birlikte esneyebilmektedir. Fakat sargılar ile mıknatıslar arasında bulunan hortum kalın bir malzeme olduğundan ve hava boşluğunu artırdığından motorun verimi düşmektedir [22].



Şekil 1.22 Woodroffe'nin esnek motor çalışması [22]

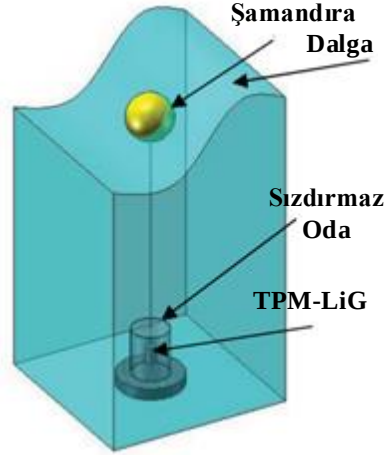
Dreishin de çalışmasında esnek tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor tasarlamıştır. Tasarlanan motor insan destek sistemlerindeki uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. İnsan vücuduna yakın bir noktaya monte edilen bu motor belirli bir noktaya kadar vücuttaki şekil değişikliklerine adapte olabilmektedir. Destek sistemleri vücuda entegre edildiğinden dolayı sistem olabildiğince hafif olmalı ve yüksek güç üretmelidir. Bu nedenle motor yapısı demirsiz tercih edilmiştir [36].

Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorlar aynı zamanda jeneratör olarak da kullanılabilir. Hu ve arkadaşları çalışmalarında serbest pistonlu motorlar için tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal jeneratör tasarlamışlardır. Bu jeneratörler elektrikli araçlarda kullanılabilir. Tasarlanan jeneratör 35 Hz frekansta 25 A akım üretecek şekilde test edilmiş ve verimliliği %91,4 olarak elde edilmiştir. Dişli seti vb. aktarma sistemleri olmadan doğrudan kuvvetin motora aktarılması verimi ciddi anlamda artırmaktadır [37].



Şekil 1.23 Hu ve arkadaşlarının tasarladığı jeneratör [37]

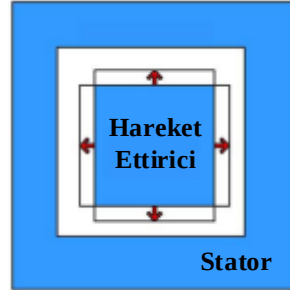
Pirisi ve arkadaşları denizlerdeki dalgalardan enerji üretimi için tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal dalga jeneratörü tasarlamıştır. Dalga jeneratörleri boyutlarına göre büyük santralleri besleyebileceği gibi küçük boyutlu elektronik cihazların enerji ihtiyaçlarını da karşılayabilmektedir. Pirisi ve arkadaşları çalışmalarında küçük boyutlu elektronik cihazlar için dalga jeneratörü tasarlamıştır. Uygulamada şamandıraya bağlı bir halat doğrudan jeneratörün miline bağlanmaktadır. Dalga ile birlikte şamandıranın yüksekliği değişmekte ve böylece jeneratörün mili yukarı aşağı hareket ederek stator sargılarında elektrik akımı oluşturmaktadır [38].



Şekil 1.24 Pirisi ve arkadaşlarının tasarladığı dalga jeneratörü [38]

Wang ve arkadaşları buzdolaplarında kullanılan geleneksel kompresörlerin yerine kısa strok uzunluğuna sahip tek fazlı tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor tasarlamışlardır. Motor, geleneksel kompresörlerde bulunan rotasyonel motor ve krank mili yerine geçerek sürtünmeyi ve enerji kayıplarını minimize ederek verimi artırmaktadır [39].

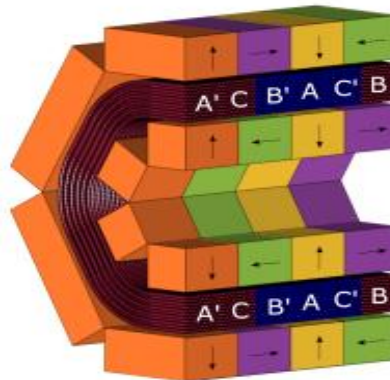
Boroujeni ve arkadaşları üretim maliyetinin düşük olması, lamine stator kullanımının verimliliği artırması ve vuruş momentini azaltma yöntemlerinin uygulanmasının kolay olması nedeni ile kare kesitli bir tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor tasarlamıştır [40].



Şekil 1.25 Boroujeni ve arkadaşlarının tasarladığı kare kesitli motor [40]

Bai ve arkadaşları serbest pistonlu içten yanmalı motordan elektrik enerjisi üretiminde enerji kayıplarını önlemek için tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor geliştirmiştir. Motorun performansını artırmak için yarı Halbach dizilimi kullanılmıştır. Rotorun kütlesi düşük tutularak ve Halbach dizilimi kullanılarak kayıplar azaltılmış, verim artırılmıştır [41].

Forbes ve arkadaşları çokgen topolojisine sahip bir tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor tasarlamıştır. Motor, kolay üretilebilirliği ve soğutmanın kolay olması nedeni ile altıgen olarak tasarlanmıştır. Motorun tek sıra sargı ve bu sargının iki yanında iki sıra yarı Halbach dizilimine sahip mıknatıstan oluşmaktadır. Böylece motordan yüksek kuvvet elde edilmesi amaçlanmıştır [42].



Şekil 1.26 Forbes ve arkadaşlarının tasarladığı çokgen topolojisine sahip motor [42]

Tomzcuk ve Waindok genelde tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen 3 fazlı motorların aksine 5 fazlı tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor tasarımlarıdır. Kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motorların en büyük dezavantajı hiç şüphesiz vuruntu momentidir. Vuruntu momenti beraberinde motorun hızında dalgalanmalar ve motor gürültüsünü beraberinde getirir. Tomzcuk ve Waindok motorun faz sayısını artırarak vuruntu momentini azaltmayı hedeflemiştir [43].

Yapılan çalışmalarda da görüldüğü üzere tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorlar yüksek verimlilikleri, doğrudan tahrik verebilmeleri, bakım maliyetlerinin düşük olması, üretim maliyetlerinin düşük olması gibi nedenlerle çeşitli alanlarda çeşitli şekillerde kullanılabilmektedir.

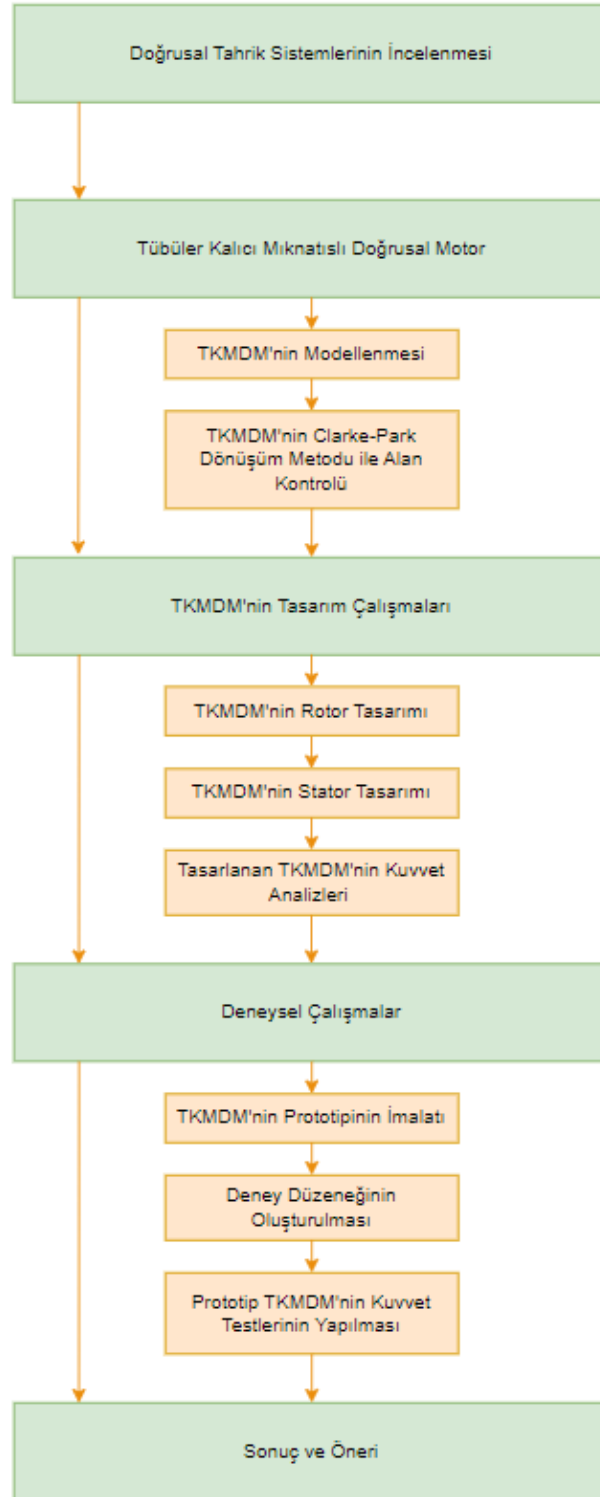
1.2 Tezin Amacı

Havacılık ve uzay endüstrisinde uzun süredir geleneksel hidrolik ve pnömatik eyleyiciler kullanılmaktadır. Fakat bu eyleyiciler sızıntı ve aşınma sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Sızıntı ve aşınma sorunları dolayısı ile bu eyleyiciler sıklıkla bakıma alınmaktadır. Hidrolik sistemleri ağır ve hantal sistemlerdir. Ayrıca hidrolik sistemleri bir hidrolik rezervuarına ve sistem içerisindeki hidrolik sıvısının temizlenmesi için filtre sistemine ihtiyaç duymaktadır. Pnömatik sistemler ise hızlı sistemlerdir fakat kompresör ve hava filtresi gibi yapıları içerdiğinden büyük hacimler kaplamaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sektörü gibi kütle ve hacmin öneminin büyük olduğu sektörlerde bu sistemler büyük dezavantajları beraberinde getirmektedir. Ek olarak her iki sistemde de kirlilik sorununa yol açmaktadır. Bu sorunlara bağlı olarak ortaya çıkan bakım maliyetleri ve kirlilik daha verimli, çevre dostu ve düşük hacimli alternatiflerin arayışını gerektirmiştir. TKMDM kompakt tasarımı, kullanım kolaylığı ve elektriksel sistemlere entegrasyonunun hidrolik ve pnömatik sistemlere göre kolay olması ile özellikle havacılık ve uzay endüstrisi gibi alanlarda bu sorunlara potansiyel bir çözüm olarak sunulmaktadır.

Bu tezde havacılık ve uzay sektöründe kullanılmak üzere hidrolik ve pnömatik sistemlere alternatif olarak tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor önerilmektedir. Önerilen TKMDM'nin rotor ve stator yapılarının tasarım çalışmaları yapılmıştır. Tasarlanan TKMDM'nin SEM ile kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir ve prototip TKMDM imal edilmiştir. İmal edilen TKMDM ile bir deney düzeneği

oluşturulmuştur. Ardından kuvvet testleri gerçekleştirilerek farklı akım değerlerine karşılık kuvvet çıkışları gözlemlenmiştir.

Tezde yapılacak çalışmalar ve işlem basamakları Şekil 1.27'deki akış diyagramında verilmiştir.



Şekil 1.27 Tez Akış Diyagramı

1.3 Hipotez

Bu çalışmada tasarlanan tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motor havacılık ve uzay endüstrisinde hidrolik ve pnömatik eyleyicilere alternatif olarak kullanılabilir. Verimli,  evre dostu ve düşük hacimli tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorlar tasarlanabilir. TKMDM'nin 2 ve 3 boyutlu SEM analizleri ile tasarımı ve kuvvet analizleri yapılabilir. Tasarımı ve kuvvet analizleri yapılan TKMDM'nin el ile imalatı gerçekleştirilebilir. İmalatı gerçekleştirilen TKMDM ile deney düzeneği oluşturularak farklı akım değerleri için kuvvet  ıkışları gözlemlenebilir.



2

TÜBÜLER KALICI MIKNATISLI DOĞRUSAL MOTOR

2.1 Çalışma Prensibi

Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motorlar'ın çalışma prensibi Ampere Yasası Lorentz Kuvvetine dayanmaktadır. Lorentz kuvveti, mıknatısların oluşturduğu manyetik alan ile bobinlerden akan akımın oluşturduğu manyetik alanın etkileşiminden oluşur [24].

$$F_L = \int_v J \times B_d dv \quad (2.1)$$

Burada B_d akı yoğunluğunu, J ise akım yoğunluğunu ifade etmektedir. Eğer akım Z eksenini yönünde ve hareket X yönünde ise sargı başına kuvvet aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [24].

$$F_L = -NI_c L_e B_{avg} \quad (2.2)$$

Burada L_e bobinin uzunluğunu, N sarım sayısını, I_c akımı ve B_{avg} manyetik alan şiddeti ifade etmektedir. Ayrıca B_{avg} [24]:

$$B_{avg} = \frac{1}{A_c} \left(\int_{a^+} B_y da - \int_{a^-} B_y da \right) \quad (2.3)$$

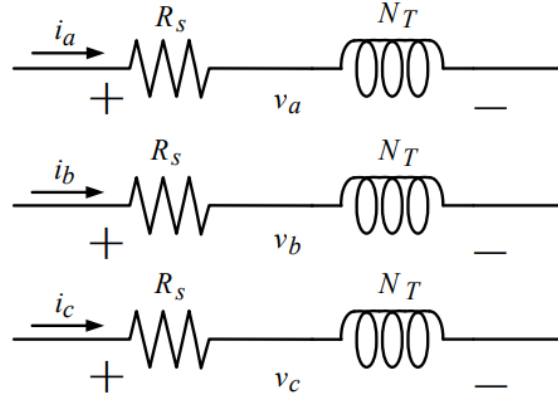
şeklinde de ifade edilebilir. Burada A_c bobin kesit alanını ifade etmektedir. Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti aşağıdaki şekilde ifade edilir [24]:

$$B = \frac{\Psi_m}{A_r} \quad (2.4)$$

2.2 Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motorun Modellenmesi

Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorun enerjilendirilmesi için faz sargılarına gerilim veya akım uygulanması gerekmektedir. Uygulanan gerilimin hesaplanması için sargı devresinin modellenmesi ve 3 faz sargı modelinin analizi için eş

devresinin çıkartılması gerekmektedir. Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorun 3 faz sargı modeli eşdeğer devresi aşağıda belirtildiği şekilde ifade edilebilir.



Şekil 2.1 3 fazlı sargı modeli eşdeğer devresi [44]

Şekil 2.1’de 3 fazlı modelin eş devresi verilmiştir. i_a , i_b , i_c faz akımlarını, R_s sargıların iç direncini, N_T ise bobinin oluşturduğu amper-turn değerini göstermektedir. v_a , v_b , v_c her faz için uygulanan akıma karşı oluşan gerilimi ifade etmektedir. Çalışmada statora ait manyeto-motor kuvvetinin yalnızca temel bileşeni dikkate alınmıştır. Motorun hava aralığında manyetik alan düzgün ve simetrik kabul edilmiştir. Oluk etkisi, doyumun endüktanslar üzerindeki etkisi, histerezis ve girdap akımı kayıpları ihmal edilmiştir. Histerezis ve girdap akımı kayıpları ihmal edildiğinden motorda herhangi bir çekirdek kaybı mevcut değildir. Tüm fazların öz indüktansları rotorun konumundan bağımsızdır. Stator direnci ve kalıcı mıknatıs akısı üzerindeki termal etki ihmal edilmiştir.

Şekil 2.1’deki eşdeğer devre ile temsil edilen TKMDM’nin stator sargısını tanımlayan dinamik denklem, matris biçiminde şu şekilde ifade edilir [44]:

$$v_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (2.5)$$

Burada v_{abc} 3 x 1 faz gerilim matrisini, i_{abc} 3 x 1 faz akım matrisini, λ_{abc} 3 x 1 faz akı bağı matrisini ve R_s 3 x 3 sargıların direncini belirten diyagonal matrisi ifade etmektedir [44].

$$v_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \lambda_{abc} = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix}, \text{ ve } R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Stator akı bağı vektörü, stator akımlarından kaynaklanan akı bağından (λ_{abcs}) ve kalıcı mıknatıs akı yoğunluğundan kaynaklanan akı bağından (λ_{pm}) oluşur ve şu şekilde yazılabilir [44]:

$$\lambda_{abc} = \lambda_{abcs} + \lambda_{pm} \quad (2.7)$$

λ_{abcs} , üç fazlı sargılardan akan akımlarla orantılıdır ve sargı endüktansları kullanılarak şu şekilde ifade edilir [44]:

$$\lambda_{abcs} = L_s + i_{abc} \quad (2.8)$$

Öz-indüktans, hareket ettiricinin konumuna göre sabittir ve şu şekilde ifade edilir [44]:

$$L_s = L_{ls} + L_A \quad (2.9)$$

Burada L_{ls} kaçak endüktanstır ve L_A 'ya kıyasla çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir. L_A ise geometriye bağlı endüktanstır ve şu şekilde ifade edilir [44]:

$$L_A = \left(\frac{N_T}{P}\right)^2 \frac{\pi \mu_0 D_g^2}{4l_g} \quad (2.10)$$

Denklemden μ_0 havanın manyetik geçirgenliğini, D_g bobin iç çapını, P kutup çifti sayısını, N_T faz sarım sayısını ve l_g bobin uzunluğunu ifade etmektedir.

Motora uygulanan gerilimin hesaplanması için karmaşık uzay vektörü kavramı kullanılabilir. Karmaşık uzay vektörü kavramının temel konsepti, makine faz değişkenlerinin (voltaj, akım veya akı bağlantısı) anlık değerlerinin, “karmaşık uzay vektörü” olarak anılacak karmaşık bir değişken tarafından ifade edilmesidir. Motor faz değişkenlerine karşılık gelen karmaşık uzay vektörü, büyüklükleri bu faz değişkenlerinin anlık değerlerine eşit olan ve 120 elektriksel derecelik yer değiştiren karmaşık bir düzlemden üç sabit vektörün vektör toplamından elde edilmektedir. Üç fazlı sinüs dalga biçimindeki gerilimler şu şekilde ifade edilir [44]:

$$\begin{aligned} v_a &= V_m \cos(\omega_s t + \varphi) \\ v_b &= V_m \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \\ v_c &= V_m \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Burada V_m faz gerilimi dalga formunun genliğini ve φ elektriksel faz açısını, ω_s elektriksel hızı, $f(\text{Hz})$ frekansı ifade etmektedir. ω_s şu şekilde gösterilir [44]:

$$\omega_s = 2\pi f \quad (2.12)$$

Üç fazlı gerilimin dengeli olabilmesi için aşağıdaki koşul geçerlidir [44]:

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (2.13)$$

Denklem 2.11'deki üç faz gerilimler denklem 2.13'te yerine konularak karmaşık uzay vektörü $\vec{V}_{abc}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır [44]:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{abc} &= \frac{2}{3}(v_a + av_b + a^2v_c) \\ a &= e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Motora gerilim uyarıtımı yerine akım uyarıtımı verildiğinde 3 faz akım şu şekilde ifade edilir [44]:

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega_s t + \gamma) \\ i_b &= I_m \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} + \gamma\right) \\ i_c &= I_m \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} + \gamma\right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Burada I_m faz gerilimi dalga formunun genliğini ve γ elektriksel faz açısını ifade etmektedir.

Üç faz akımın dengeli olabilmesi için aşağıdaki koşul geçerlidir [44]:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.16)$$

Akım uzay vektörü aşağıdaki şekilde gösterilebilir [44]:

$$\vec{I}_{abc} = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c) \quad (2.17)$$

Elektriksel açı(θ_r) ve gerçek konum(x) arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde ifade edilir [44]:

$$\theta_r = P \frac{\pi}{\tau} x \quad (2.18)$$

Burada τ kutuplar arası mesafeyi ve P kutup çifti sayısını ifade etmektedir.

Tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorun dinamik modeli aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [44]:

$$\vec{V}_{abc} = R_s \vec{I}_{abc} + \frac{d\vec{\lambda}_{abc}}{dt} \quad (2.19)$$

Denklem 2.18'in zamana göre türevi alındığında [44]:

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{d\theta_r}{dt} \\ v_m &= \frac{dx}{dt} \\ \omega_r &= P \frac{\pi}{\tau} v_m \end{aligned} \quad (2.20)$$

v_m rotorun mekanik hızını ve ω_r elektriksel hızı ifade etmektedir. Nihai 3 fazlı gerilim dinamik model denklemi şu şekilde ifade edilir [44]:

$$\vec{V}_{abc} = R_s \vec{I}_{abc} + L_s \frac{d\vec{I}_{abc}}{dt} + j\omega_r \vec{\lambda}_f \quad (2.21)$$

Burada λ_f kalıcı mıknatıs akı bağı genliğini ifade etmektedir.

2.3 Clarke-Park Dönüşüm Metodu ile Motorun Kontrolü

TKMDM'nin 3 faz akımları ile kontrolü sağlanabildiği gibi alan yönlendirmeli Clarke-Park dönüşümleri ile 2 fazlı motor modeli ile de kontrolü sağlanabilir. Bu çalışmada Clarke-Park modeli kullanılarak 2 fazlı motor modeli çıkartılmış ve 3 fazlı TKMDM'nin kontrolü yapılmıştır. Alan yönlendirmesi 3 faz gerçek sargı akımları Clarke-Park dönüşüm matrisi kullanılarak i_d ve i_q akımları arasında 90° elektriksel açı olacak şekilde dönüştürülmüştür. Dönüşüm matrisi şu şekilde ifade edilir:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120) & -\sin(\theta + 120) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

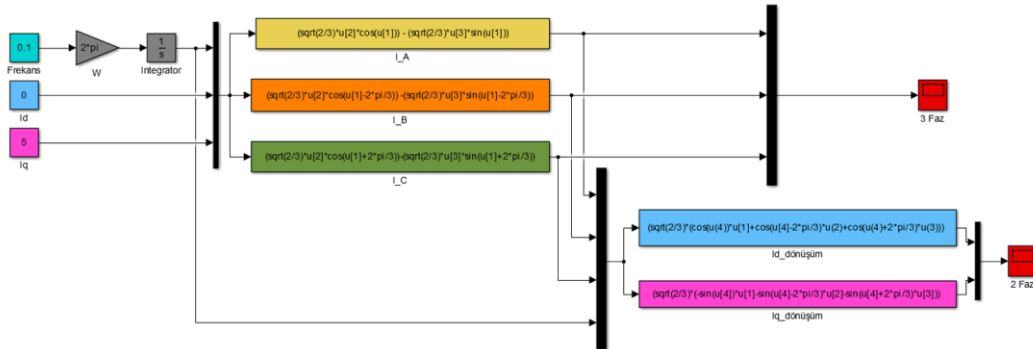
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = T * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Ters dönüşüm matrisi ise;

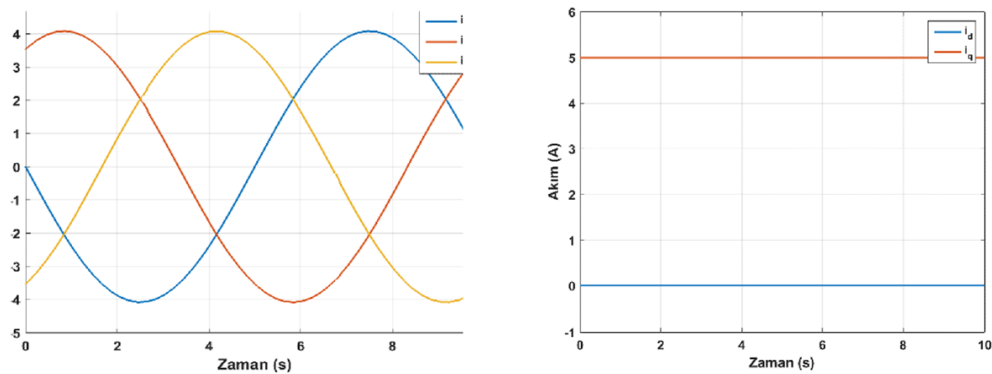
$$T' = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - 120) & -\sin(\theta - 120) \\ \cos(\theta + 120) & -\sin(\theta + 120) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = T' * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilir. 3 faz akımının dönüşüm-ters dönüşüm matrislerinin MATLAB'da gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir. Dönüşümü yapılan akımlara ait görsel Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.2 MATLAB TKMDM d-q dönüşümü benzetimi



Şekil 2.3 3 faz akımlarının d-q dönüşümü sonuçları

D (uyarma alanı) ve q (itki kuvvet alanı) eksenlerinin sargı gerilim denklemleri şu şekildedir:

$$\begin{aligned} v_d &= R_d i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau_p} \frac{dx}{dt} \lambda_q \\ v_q &= R_q i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau_p} \frac{dx}{dt} \lambda_d \end{aligned} \quad (2.24)$$

Burada v_d ve v_q d ve q eksen gerilimlerini, i_d ve i_q d ve q eksen akımlarını, R_d ve R_q d ve q eksen dirençlerini, λ_d ve λ_q d ve q eksen akılarını, x mıknatısın konumunu, dx/dt mıknatısın hızını ve τ_p kutuplar arası mesafeyi ifade etmektedir. d ve q eksen akıları ise şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} \lambda_q &= L_q i_q \\ \lambda_d &= L_d i_d + \lambda_m \\ \lambda_m &= \Phi_0 N \end{aligned} \quad (2.25)$$

Burada L_d ve L_q d ve q eksenlerinin endüktanslarını, λ_m mıknatıs akısını, N sarım sayısını ve Φ_0 başlangıç akısını ifade etmektedir. Eksen akıları 2.24 denkleminde yerine yazılır.

$$\begin{aligned} v_d &= R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau_p} v L_q i_q \\ v_q &= R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau_p} v (L_q i_q + \Phi_0 N) \end{aligned} \quad (2.26)$$

TKMDM'nin mıknatıslara uyguladığı itki kuvveti eksen akılarına göre şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} F_x &= K(\lambda_q i_q - \lambda_d i_d) \\ F_x &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} p (\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Doğrusal motorların dönel motorlara göre hava aralıkları 4-5 kat büyüktür. Bu nedenle $L_d \cong L_q$ olarak kabul edilmiştir. Denklem yeniden düzenlenerek şu şekilde ifade edilir:

$$F_x = \left(\frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} p \right) (\Phi_0 N) i_q \quad (2.28)$$

Burada p kutup sayısını ifade etmektedir. Denklemdaki tüm sabit sayılar toparlanarak K harfi ile ifade edilirse;

$$K = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} p \quad (2.29)$$

$$K_f = K \lambda_m$$

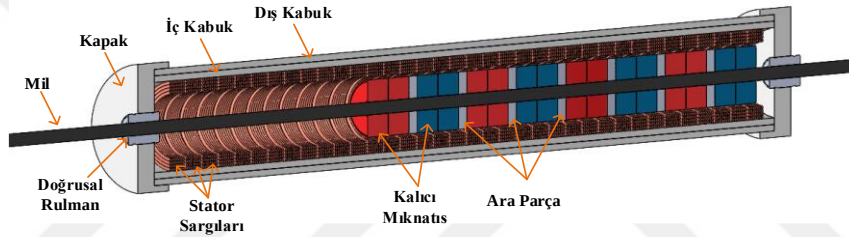
kuvvet denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_x = K_f i_q \quad (2.30)$$



TÜBÜLER MOTORUN TASARIMI

Bu bölümde önerilen TKMDM'nin tasarım çalışmaları anlatılmaktadır. Motor tasarımı belirli kıstaslar göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Kıstaslardan biri seçilen mıknatıstır. Farklı tiplerde ve boyutlarda, hatta projenin isterlerine göre özel tip ve boyutlarda üretim yapan firmalar vardır. Fakat temin süreleri ve maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda piyasada varolan kolay ulaşılabilir yüzük şeklinde bir mıknatıs seçilmiştir. Tasarım seçilen mıknatısın boyut ve özelliklerine göre yapılmıştır. Yapılan tasarım çalışmaları sezgisel tasarım metodu ile yapılmıştır. Tasarım çalışmalarında rotor tasarımı ve stator tasarımı yapılarak kuvvet analizleri incelenmiştir.



Şekil 3.1 TKMDM kesit görüntüsü

Şekil 3.1'de TKMDM'nin tasarımının kesit görüntüsü verilmiştir. Görüntüde motorun ana bileşenlerine yer verilmiştir. Kırmızı renkte olan kalıcı mıknatısın N kutbunu mavi renkte olan kalıcı mıknatısın S kutbunu ifade etmektedir. İki mıknatısın arasına ise gri renkle gösterilen ara parça yerleştirilmiştir. Yüzük şeklindeki mıknatıslar ve ara parçalar mil üzerine dizilerek yerleştirilmiştir. Milin yataklanması doğrusal rulman ile sağlanmıştır.

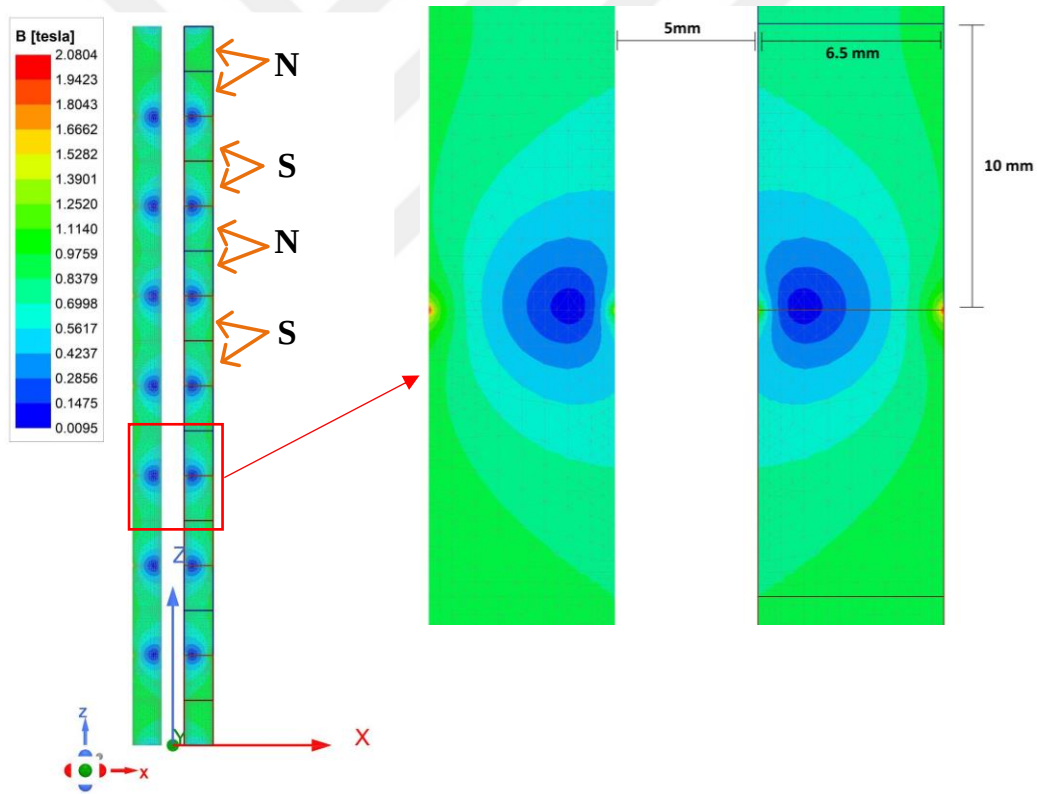
Sistemin matematik modeli göz önüne alınarak TKMDM için rotor tasarımına başlanmıştır. Öncelikle Halbach diziliminin uygulanmasının maliyetli ve üretiminin zor olması sebebi ile mıknatısların eksenel mıknatıslanma topolojisine uygun şekilde seçilmesine karar verilmiştir. Çalışmamızda kullanılan mıknatıslar manyetik özellikleri ve yüksek manyetik akı yoğunluğu nedeni ile Nd35 standartlarında Neodymium (NdFeB) mıknatıs tercih edilmiştir. Çalışmamızda iç çapı 5 mm, dış çapı 18 mm ve yüksekliği 10 mm olan yüzük şeklinde mıknatıslar tercih edilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan mıknatıslar boyutlarının küçük

olması ve bunun da kutuplar arası mesafeyi kısaltması nedeni ile çiftler halinde NS-NS—SN-SN şeklinde yerleştirilmiştir.

Bu bölümde motor tasarımı için ANSYS Maxwell analiz programı üzerinden çeşitli modellemeler yapılmıştır.

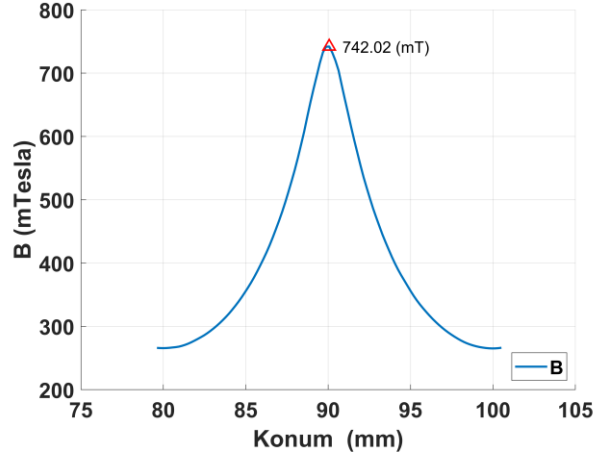
3.1 Rotor Tasarımı

İlk olarak mıknatıs çiftleri arasına ara parça yerleştirilmesine karar verebilmek için 2 boyutlu FEM analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde maksimum ağ uzunluğu 0,5 mm seçilmiştir. İlk analizde mıknatısların arasına ara parça yerleştirilmemiştir. Mıknatıslar ile arasında hava aralığı 1 mm olacak şekilde bir çizgi (polyline) çizilmiştir. Çizgi üzerindeki akı yoğunlukları incelenmiştir. Analiz sonucu oluşan akı yoğunluğu ve ağ yapısı görüntüleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



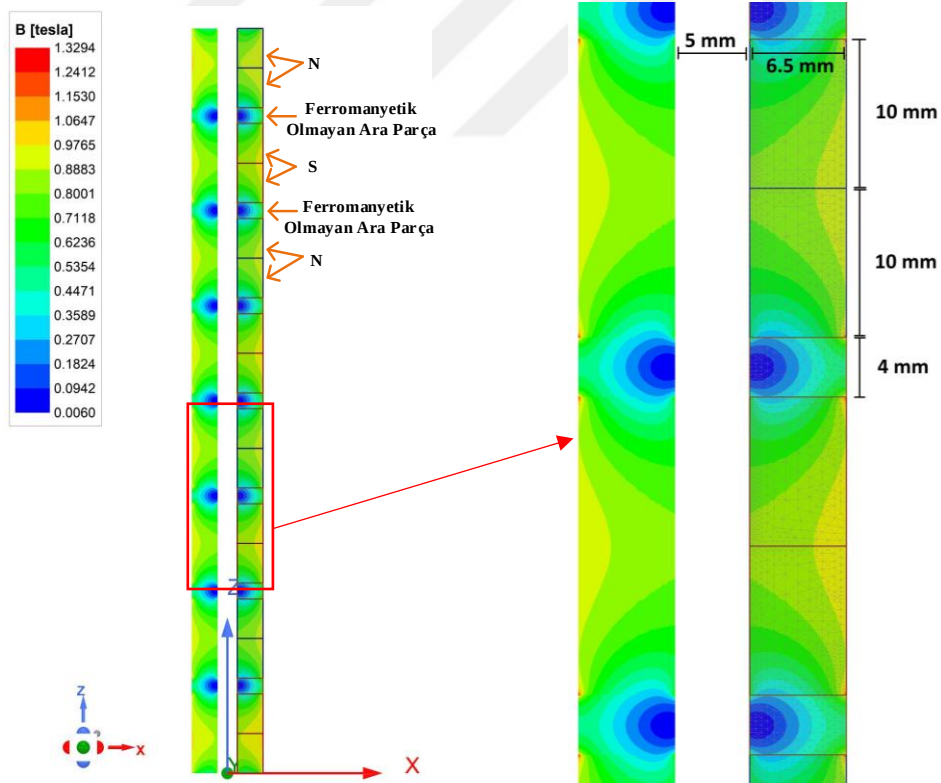
Şekil 3.2 Ara parçasız 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı

Analiz sonucunda mıknatısların çizgi üzerinde oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu grafiği Şekil 3.3’te verilmiştir.



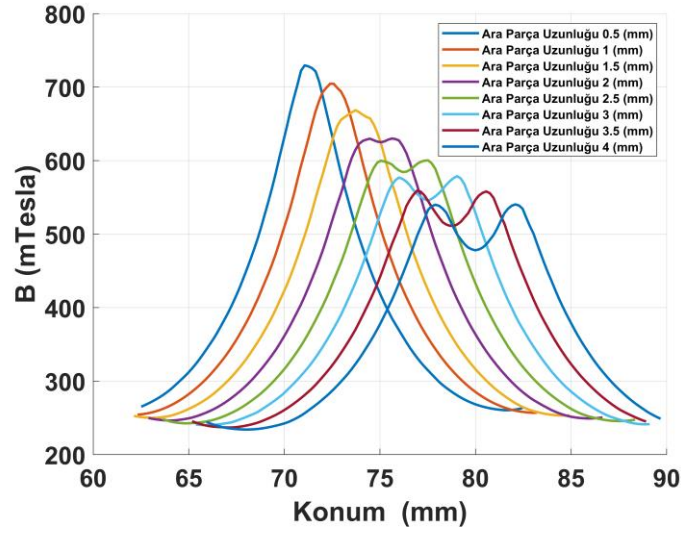
Şekil 3.3 Ara parçasız rotor MagB

İkinci analizde mıknatıs çiftleri arasına ferromanyetik olmayan malzemeden yapılmış ara parçalar konmuştur. Ara parça uzunluğuna 0,5 mm'den 4 mm'ye kadar 0,5 mm artan değerler verilmiştir. Maksimum ağ uzunluğu 0,5 mm seçilmiştir. Akı dağılımı ve ağ yapısı görüntüleri Şekil 3.4'te verilmiştir.



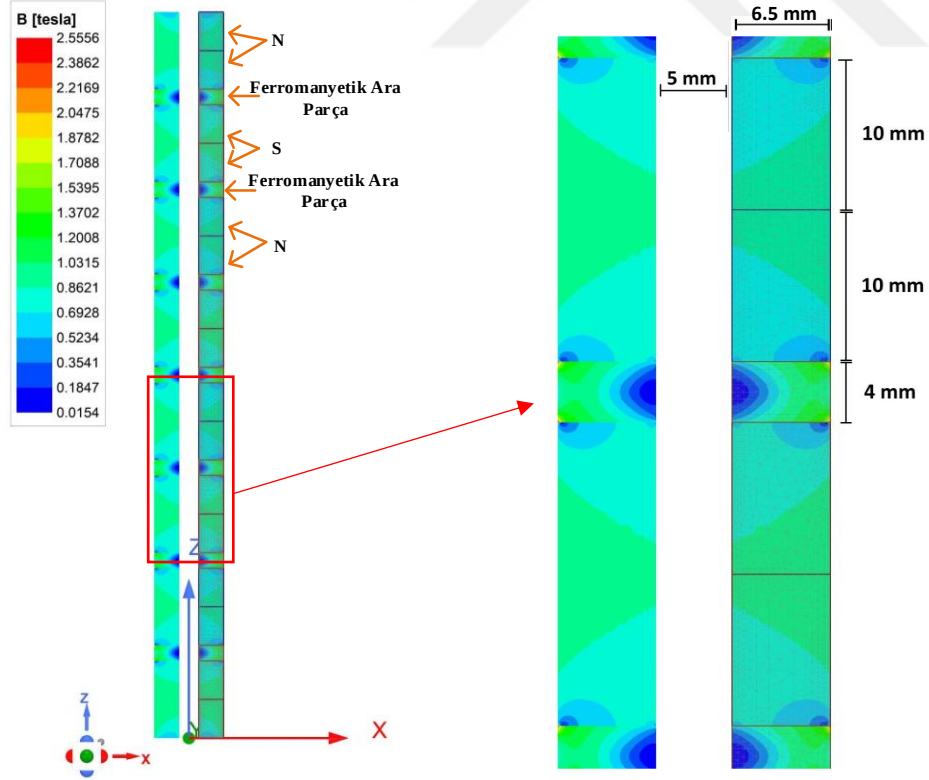
Şekil 3.4 Ferromanyetik olmayan ara parçalı 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı

Analiz sonucu çizgi üzerinde oluşan akı yoğunlu grafiği Şekil 3.5'te verilmiştir.



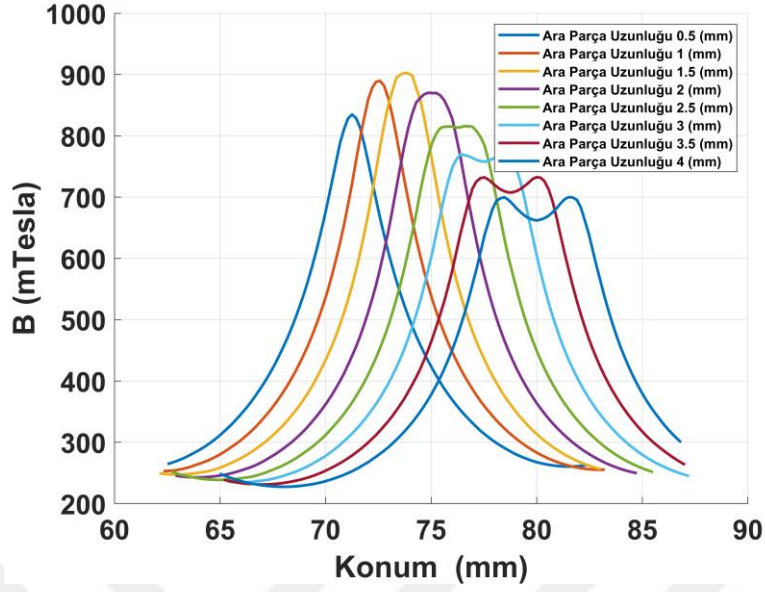
Şekil 3.5 Ferromanyetik olmayan malzemeden üretilmiş ara parçalı rotor MagB

Yapılan üçüncü analizde mıknatıs çiftleri arasında ferromanyetik malzemeden yapılmış ara parçalar konmuştur. Ara parça uzunluğu 0,5 mm'den 4 mm'ye kadar 0,5 mm artan değerler verilmiştir. Maksimum ağ uzunluğu 0,5 mm seçilmiştir. Akı dağılımı ve ağ yapısı görüntüleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Ferromanyetik ara parçalı 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı

Analiz sonucu çizgi üzerinde oluşan akı yoğunlu grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir.

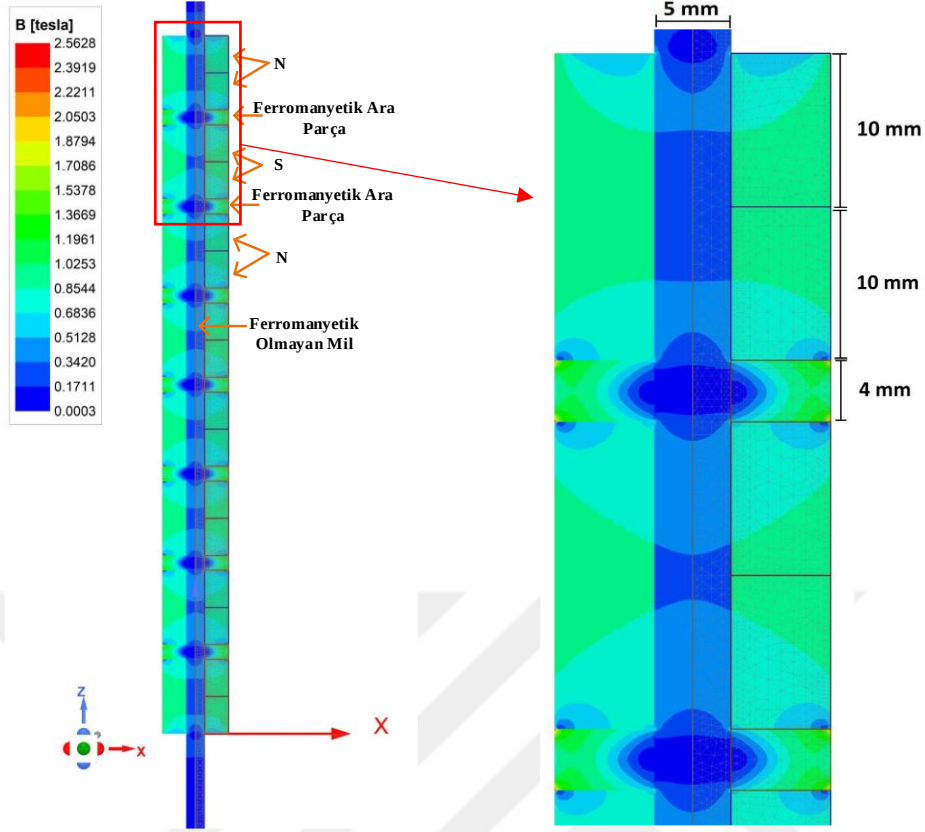


Şekil 3.7 Ferromanyetik malzemeden üretilmiş ara parçalı rotor MagB

3 analiz sonucunu incelendiğinde mıknatıslar arasında ferromanyetik malzemeden ara parça konulduğunda daha yüksek manyetik akı yoğunluğu elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple ara parçanın ferromanyetik malzemeden üretilmesine karar verilmiştir. Ara parçanın uzunluğunun artması ile manyetik akı yoğunluğu tepe değerinin düştüğü görülmektedir. Bu etkinin irdelenmesi ve en doğru ara parça uzunluğunun belirlenmesi için kuvvet analizleri yapılmıştır. Kuvvet analizleri bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.

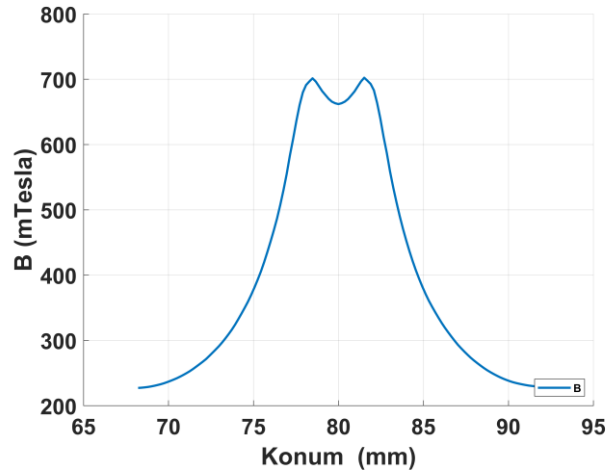
Ayrıca 3 analiz sonucunu incelendiğinde ara parça, mıknatısların arasında akının yoğunlaştığı bir bölge oluşturmaktadır. Bu bölge kutup vazifesi görmektedir.

Manyetik akı yoğunluğunu etkileyen bir diğer etken ise rotor milinin materyalidir. Milin üretileceği materyalin belirlenmesi için 2 farklı analiz yapılmıştır. Yapılan ilk analizde milin materyali ferromanyetik olmayan bir malzeme seçilmiştir. Maksimum ağ uzunluğu 0,5 mm seçilmiştir. Analiz sonucu oluşan akı dağılımı ve ağ yapısı görüntüleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



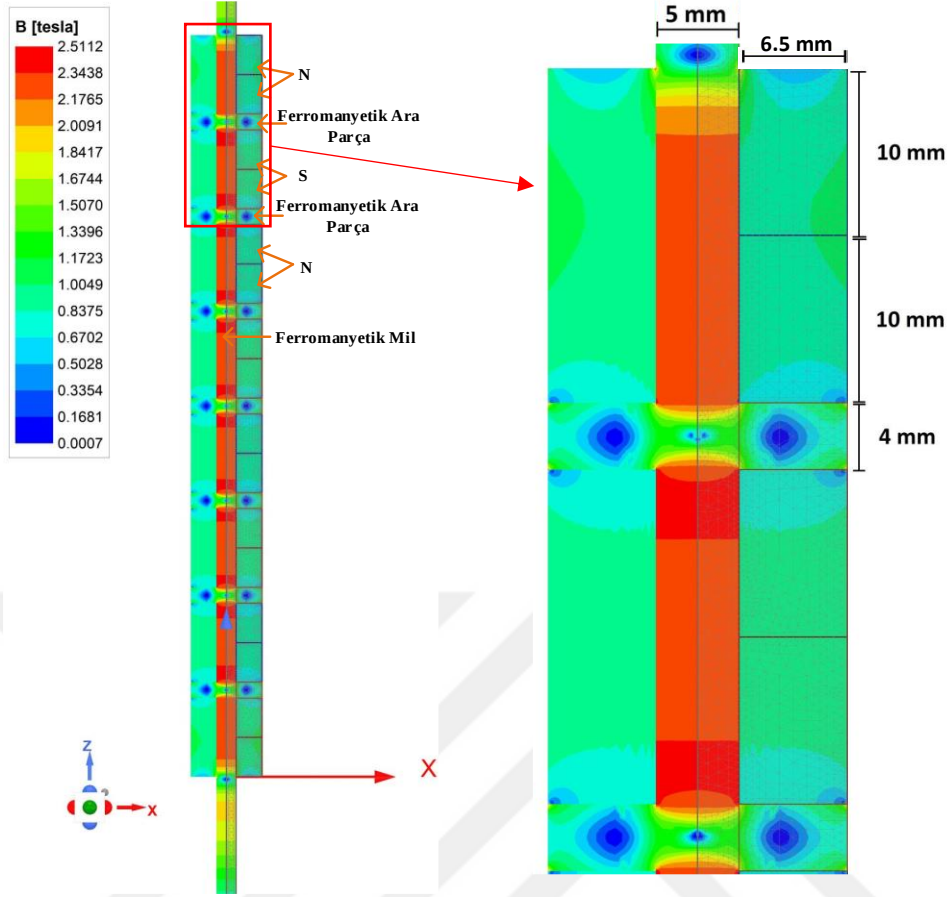
Şekil 3.8 Ferromanyetik olmayan malzemeden üretilmiş milli 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı

Analiz sonucu çizgi üzerinde oluşan akı yoğunlu grafiği Şekil 3.9’da verilmiştir.



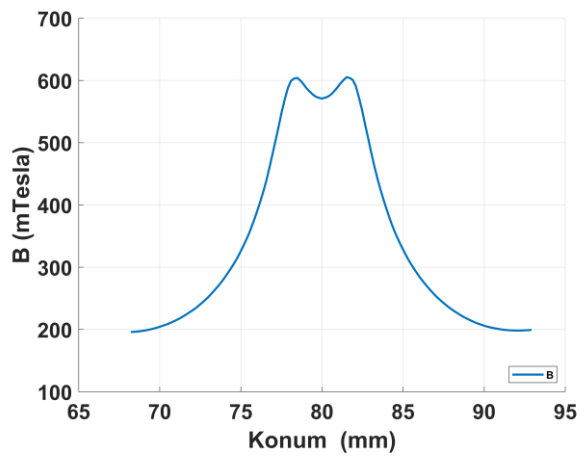
Şekil 3.9 Ferromanyetik olmayan malzemeden (karbon fiber) üretilmiş mil MagB

İkinci analizde milin materyali ferromanyetik malzeme olarak seçilmiştir. Maksimum ağ uzunluğu 0,5 mm seçilmiştir. Analiz sonucu oluşan akı dağılımı ve ağ yapısı görüntüleri Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10 Ferromanyetik malzemeden üretilmiş milli 2 boyutlu FEM analizi akı yoğunluğu ve ağ yapısı

Analiz sonucu çizgi üzerinde oluşan akı yoğunluğu grafiği Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11 Ferromanyetik malzemeden (çelik) mil MagB

Analiz sonuçları karşılaştırıldığında mil materyali ferromanyetik olmayan malzeme seçildiğinde daha yüksek akı yoğunluğu elde edildiği görülmüştür. Ayrıca akı

3.2 Stator Tasarımı

The diagram shows a 1D lattice of sites, each with a spin (represented by a yellow square) and a magnetic moment (represented by a blue square). The lattice is divided into two regions by a vertical line. The left region is labeled 'N' and the right region is labeled 'P'. A red arrow points upwards from the lattice, indicating a magnetic field. A blue arrow points to the right, indicating a spin current. A green arrow points to the left, indicating a charge current.

Motorun hava aralığının belirlenebilmesi için ANSYS Maxwell analiz programı üzerinden farklı hava aralıkları için analizler yapılmıştır. Analizlerde farklı hava aralığı değerleri için çizgiler(polyline) çizilmiş ve bu çizgiler üzerindeki akı yoğunlukları incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçları Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



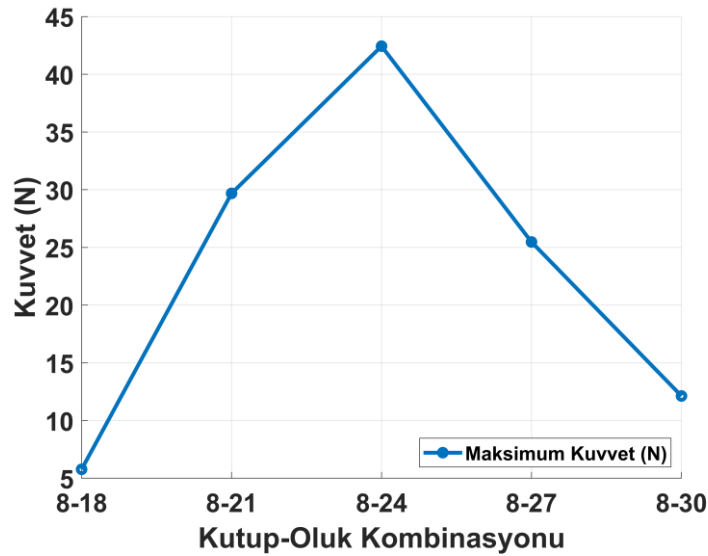
Hava aralığı küçültüldüğünde kalıcı mıknatısların stator sargılarında oluşturduğu akı yoğunluğu Şekil 3.13'te görüldüğü üzere artmaktadır. Fakat üretim toleransları ve prototipin deneysel koşullarda montajlanacağı göz önünde bulundurulduğunda 1 mm'nin altındaki hava aralığı değerlerinin gerçekleştirilemeyeceği öngörülerek 1 mm hava aralığında karar kılınmıştır. Aksi halde rotorun üzerindeki mıknatısların stator sargılarına sürtme ihtimali bulunmaktadır.

Motorun kutup-oluk kombinasyonu seçimi için 8-18, 8-21, 8-24, 8-27 ve 8-30 kombinasyonları karşılaştırılmıştır. Bu kombinasyonların seçilme nedeni oluk sayısının artırılması ve böylece motorun çözünürlüğünün artırılmasıdır.

Kutup-oluk kombinasyonlarının analiz edilebilmesi için ara parça uzunluğu 3 mm, bobinler arası mesafe 1 mm ve bobin dış çapı 28 mm kabul edilmiştir. Bobinlerin sarım sayısı denklem 2.31 ile hesaplanmış ve kabul edilmiştir. Uyartım akımı 3 faz sinüs 5 A olarak uygulanmış olup frekans 1 Hz'dir.

$$\text{sarım sayısı/bobin kesit alanı} = 1,2 \quad (2.31)$$

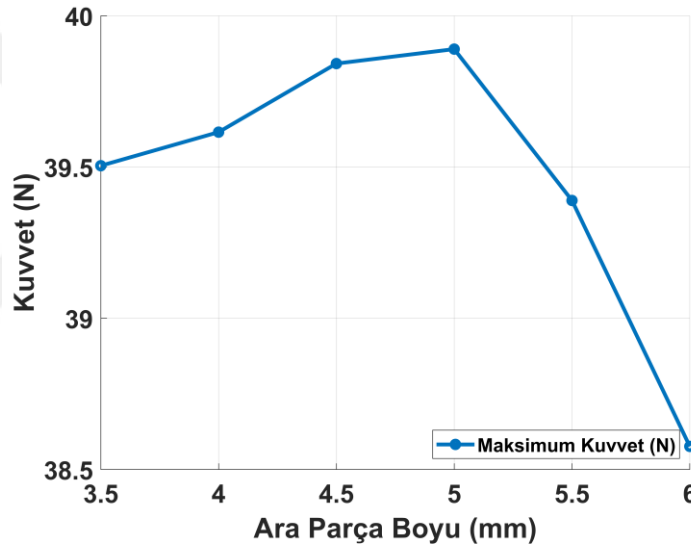
Yapılan kabuller öncülüğünde ANSYS Maxwell analiz programında transient analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde maksimum ağ uzunluğu 0,5 mm seçilmiştir. Belirtilen 4 adet kutup-oluk kombinasyonu için kuvvet çıktıları alınmıştır. Kombinasyonlara ait kuvvet çıktıları Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14 Kutup-oluk kombinasyonu kuvvet grafiği

Kutup-oluk kombinasyonlarına ait kuvvet grafikleri kıyaslandığında 8-24 kutup-oluk kombinasyonunun en yüksek kuvvet çıkışını verdiği görülmüştür. Bu nedenle motor tasarımında 8-24 kutup-oluk kombinasyonu tercih edilmiştir.

8-24 kutup-oluk kombinasyonu uygulanacak motorun ara parça boyunun seçilerek motorun nihai tasarımının elde edilebilmesi için ANSYS Maxwell analiz programından çeşitli ara parça boyları için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde bobinler arası mesafe 1 mm, bobin dış çapı 28 mm kabul edilmiştir. Bobinlerin sarım sayısı denklem 2.31 ile hesaplanmış ve kabul edilmiştir. Uyarım akımı 3 faz sinüs 5 A olarak uygulanmış olup frekans 1 Hz'dir. Ara parça boyları 3,5 mm'den 6 mm'ye kadar değerler verilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15 Ara parça boyu kuvvet grafiği

Grafikte görüldüğü üzere belirtilen ara parça boyları için kuvvet çıkış değişimleri oldukça küçüktür. Deneysel çalışmalar ve imalat koşulları göz önünde bulundurulduğunda, mıknatıslar ile ara parçaların birleştirilmesi için kullanılacak yapıştırıcı malzemenin de 1 mm boşluk oluşturacağı değerlendirilmiş ve bu nedenle ara parça uzunluğu 4 mm seçilmiştir.

Motorun strok uzunluğu 10 cm olarak belirlenmiştir. Rotor yapısının uzunluğu, motorun strok uzunluğu ve çalışma aralığı göz önünde bulundurularak statorun 36 adet bobinden oluşmasına karar verilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda motorun düşük voltaj ve düşük akım değerlerinde çalıştırılacağı ve bobinlerin el ile sarılacağı göz önünde bulundurulduğunda, bobin sarımı için 0.8 mm'lik bakır telin el sarımına elverişli olduğuna karar verilmiş ve bobin sarımı 0.8 mm'lik bakır tel ile yapılmıştır.

Motorun çalışacağı maksimum akım değeri belirlenirken Şekil 3.16'da belirtilen tablo esas alınmıştır. Stator sargısının kesit alanının 28 mm² ve iletken çapının 0.8 mm olduğu durumda motora uygulanabilecek akım 3,2 A olarak hesaplanmaktadır. Bu değer motorun kesintisiz sürekli çalışmada herhangi bir soğutma sisteminin bulunmadığı durum için geçerlidir. Motorun kesintili çalışacak bir motor olması ve tek bir iletkenin taşıma kapasitesinin 12,5 A olduğu göz önüne alındığında motor akımının 6 A'e kadar çıkabileceği öngörülmektedir. Tasarım çalışmalarında 6 A uyarım akımına göre çalışmalar yapılmıştır.

Tablo 3.1 Soğutma tiplerine göre akım yoğunluğu tablosu [45]

Soğutma tipi	Akım yoğunluğu, [A/mm ²]
Durağan hava soğutma	2-4
Üflemeli hava soğutma	4-8
Su ceketli stator soğutma	6-14
Doğrudan kablolu armatür soğutması	10-25
Doğrudan daldırma ve sprey sıvı soğutma	8-28

3.3 Motor Parametreleri ve Nihai Tasarım

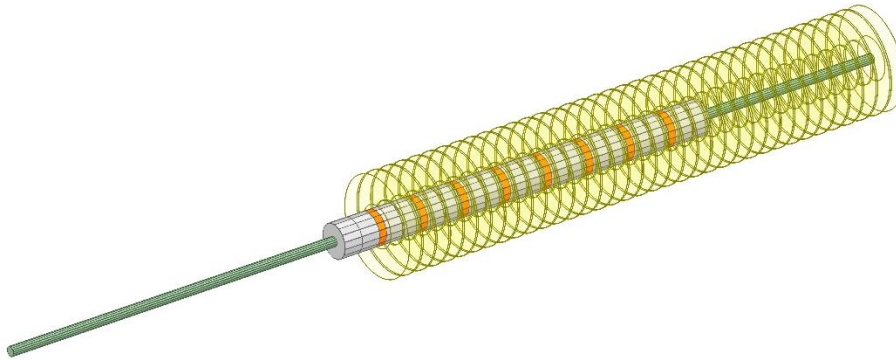
Yapılan analizler ve motorun çalışma alanı isterleri neticesinde motor parametreleri aşağıda belirtilen Tablo 3.1'deki şekilde belirlenmiştir. Belirlenen parametreler sonucunda motorun tasarımı aşağıda Şekil 3.17'de belirtildiği şekilde ANSYS Maxwell programında 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur.

Tablo 3.2 Motor dizayn parametreleri

Motor Dizayn Parametreleri	Değerler
Mıknatıs Dış Çapı	18 mm
Mıknatıs İç Çapı	5 mm
Mıknatıs Uzunluğu	10 mm
Ara Parça Dış Çapı	18 mm

Tablo 3.2 Motor dizayn parametreleri (devamı)

Ara Parça İç Çapı	5 mm
Ara Parça Uzunluğu	4 mm
Mil Çapı	5 mm
Mil Uzunluğu	350 mm
Hava Aralığı	1 mm
Bobin Dış Çapı	28 mm
Bobin İç Çapı	20 mm
Bobin Uzunluğu	7 mm
Bobin Sarım Sayısı	34 sarım
Bobin Sayısı	36 adet
Bobinler Arası Boşluk	1 mm
Mıknatıs Sayısı	16 adet

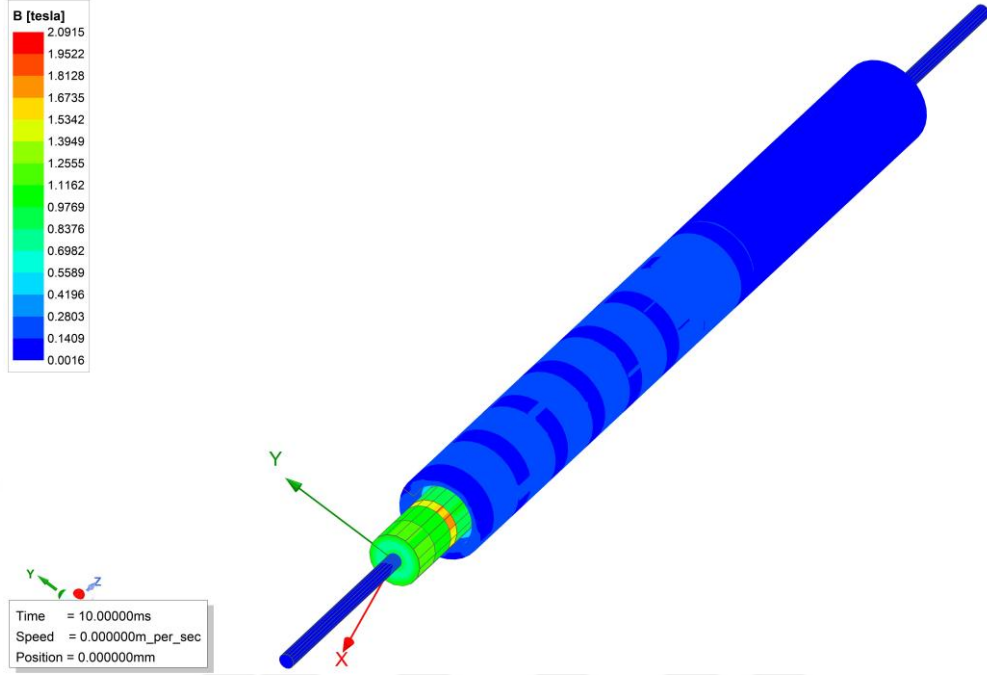


Şekil 3.16 TKMDM'nin Maxwell 3 boyutlu tasarımı

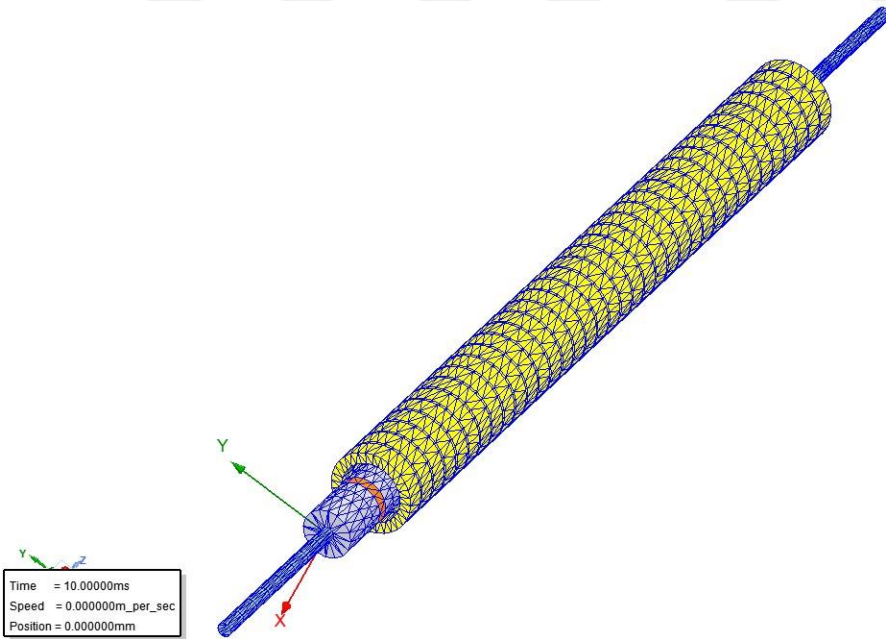
3.4 Kuvvet Analizleri

Parametreleri ve tasarımı netleşen TKMDM'nin kuvvet analizleri ANSYS Maxwell programı üzerinden yapılmıştır. Stator sargılarına 3 faz sinüs uyarım akımları uygulanmıştır. Frekans değeri 1 Hz, maksimum ağ uzunluğu 1 mm seçilmiştir. 2 farklı akım aralığı için 2 ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. İlk analizde akım 0,2 A'den 2 A'ye kadar 0,2 A artırılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu oluşan akı

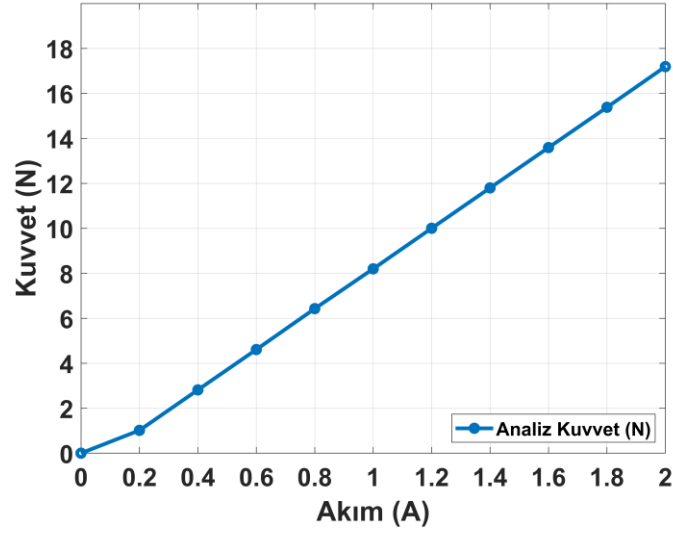
dağılımı görüntüleri Şekil 3.18’de ve ağ yapısı görüntüleri Şekil 3.19’da verilmiştir. Analiz sonucu oluşan akıma karşılık alınan kuvvet grafiği Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.17 Motorun FEM analizi akı yoğunluğu

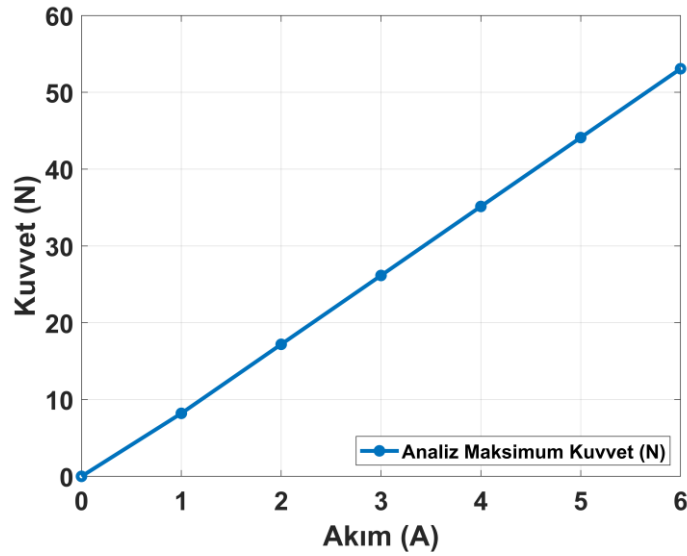


Şekil 3.18 Motorun FEM analizi ağ yapısı



Şekil 3.19 1 Hz’de motora uygulanan akıma karşılık alınan kuvvet değerleri

İkinci analizde akım 1 A’den 6 A’e kadar 1 A artırılarak analiz tekrarlanmıştır. Analiz sonucu oluşan kuvvet grafiği Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20 Sınır koşulları çerçevesinde alınabilecek maksimum kuvvet değeri

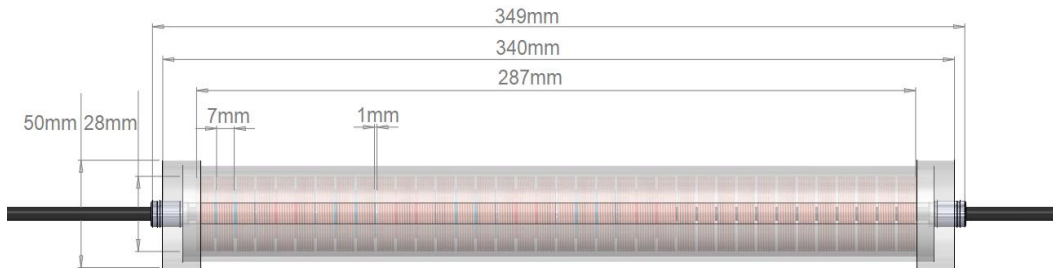
4 DENEY DÜZENEĞİ

Bu bölümde nihai tasarımı ve kuvvet analizleri gerçekleştirilen TKMDM'nin imalat aşamaları ve imalatı gerçekleştirilen TKMDM'nin kuvvet testlerinin gerçekleştirilebilmesi için deney düzeneğinin hazırlanması süreçleri anlatılmaktadır.

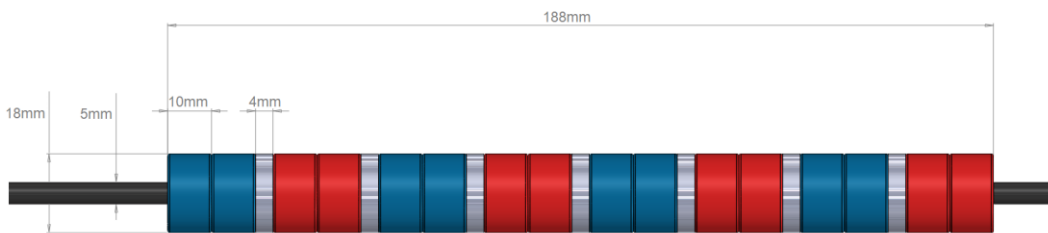
Parametreleri belirlenen motorun Solidworks programı üzerinden 3 boyutlu tasarımı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Motorun Solidworks programından 3 boyutlu tasarımı



Şekil 4.2 Motor gövdesinin ve stator sargılarının ölçüleri



Şekil 4.3 Kalıcı mıknatısların ve ara parçanın ölçüleri

4.1 Tübüler Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Motorun İmalatı

Bu bölümde TKMDM'nin imalat süreçleri anlatılmaktadır.

Öncelikle 4 mm'lik çelik sacdan 5 mm iç, 18 mm dış çapta ara parçalar lazerde kesilerek üretilmiştir.



Şekil 4.4 Ara parça

Üretilen ara parçalar mıknatıs çiftlerinin arasına gelecek şekilde 5 mm'lik karbon fiber mil üzerine dizilmiştir. Mıknatıs çiftleri birbirine aynı kutuplar bakacak şekilde dizilmiştir.



Şekil 4.5 Rotor yapısı

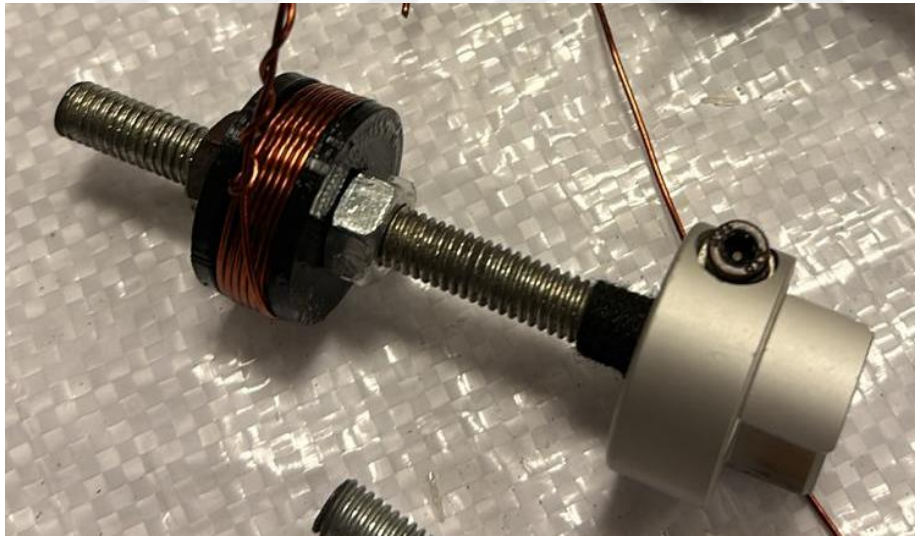
Mıknatıs çiftleri birbirlerine aynı kutupları bakacak şekilde yerleştirildiği için birbirlerini itmektedir. Mıknatısları ve ara parçaları birbirlerine sabitlemek ve mil üzerinde hareket etmelerini önlemek için Loctite AA 330 yapıştırıcı kullanılmıştır.

Bobinler için 0,8 mm bakır tel kullanılmıştır. 3 boyutlu yazıcıdan bobin üretimi için kullanılacak kalıplar üretilmiştir. Kalıplar Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Bobin sarımı için kullanılan kalıplar

Bobin sarımı elde yapılmış olup öncesinde kalıp motor yağı ile iyice yağlanmıştır. Ardından sarım yapılmıştır. Sarım yapılırken önce bir sıra sarım yapılmış ardından vernikle tellerin üzerinden geçilmiştir. Bu işlemler tekrarlanarak 34 sarım tamamlanmıştır. Sarım tamamlandıktan sonra bobinin dağılmaması için bobin uçları iyice birbirine bağlanmış ve ardından son kat vernik atılarak kurumaya bırakılmıştır. Bu şekilde 36 adet bobin üretilmiştir.



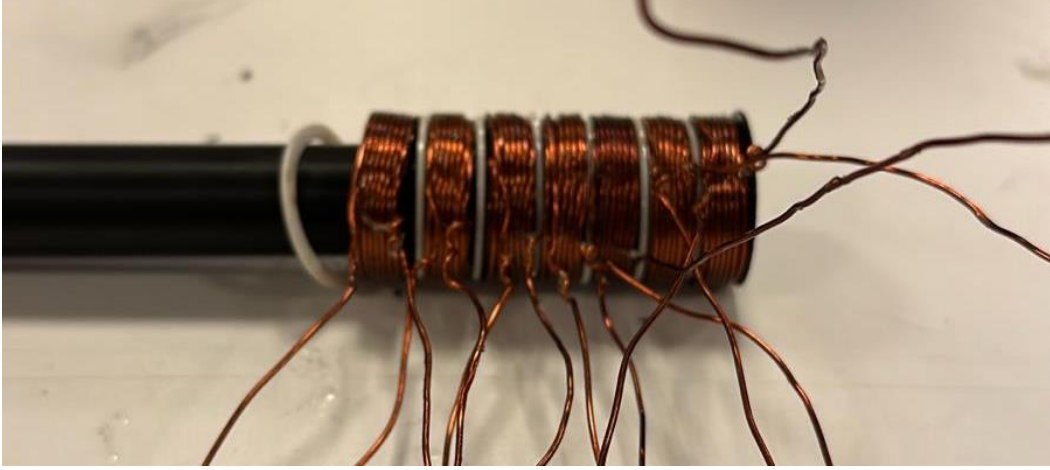
Şekil 4.7 Bobin sarımı son hali

Bobinler arasındaki 1 mm boşluğa PETG malzemenen 1 mm levha lazer ile kesilerek 22 mm iç çap 28 mm dış çap olacak şekilde yüzükler üretilmiştir. Bu yüzükler bobinler arasında tam olarak 1 mm mesafe olmasını sağlamıştır.

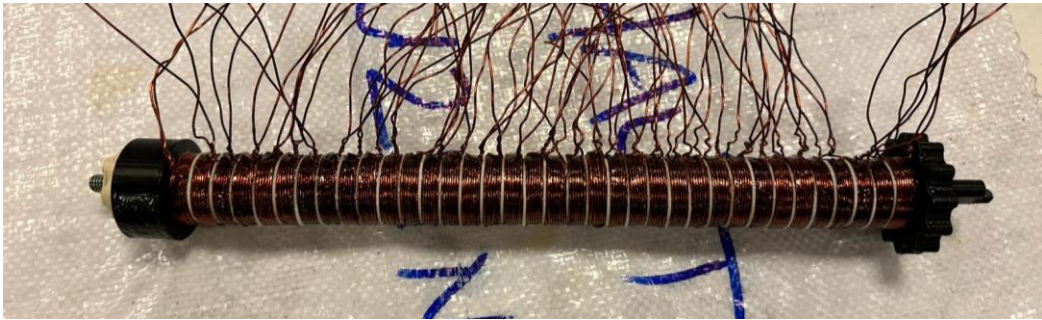


Şekil 4.8 PETG yüzük

Bobinler ve PETG yüzüklerin eş merkezlenerek dizilebilmesi için 3 boyutlu yazıcıdan 20 mm dış çapa sahip kalıp üretilmiştir. Bu kalıp üzerine bobinler ve PETG yüzükler sıralı şekilde dizilmiştir.



Şekil 4.9 Kalıba bobinlerin dizilmesi



Şekil 4.10 Kalıpta sıkıştırılan ve verniklenen stator

Kalıp iki tarafından sıkıştırılmış ve 2 kat vernik atılmıştır. Vernik kuruduktan sonra stator kalıptan çıkarılmıştır. Bobinlerin uçları birbirlerine lehimlenerek bağlanmış ve A+, C-, B+, A-, C+, B- sargı şekline getirilmiştir.



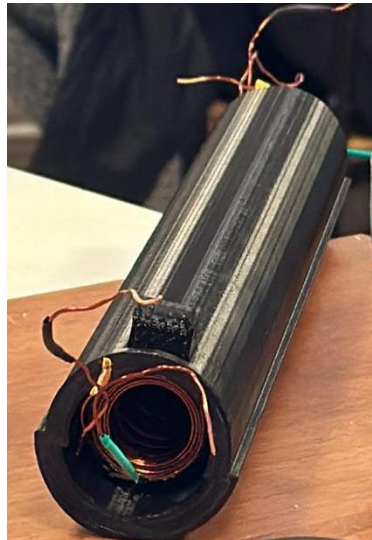
Şekil 4.11 Lehimleme ve makaronlama işlemi yapılan stator

Bobinler ve yüzüklerin birbirlerinden ayrılmaması için statorun yataklanması gerekmiştir. Yataklama işlemi için 28 mm iç çapa sahip bir pvc boru ortadan ikiye kesilmiştir. Stator ortadan ikiye kesilen boruya yataklanmış ve kumaş bant ile yapıştırılmıştır.



Şekil 4.12 Yataklanan ve kumaş bant ile sarılan stator

Sargıların dışarıdan gelebilecek darbelere karşı korunması ve sabit şekilde durabilmeleri için 3 boyutlu yazıcı kullanılarak motorun kabuğu üretilmiştir. Üretilen kabuğa stator sargıları yerleştirilmiştir.



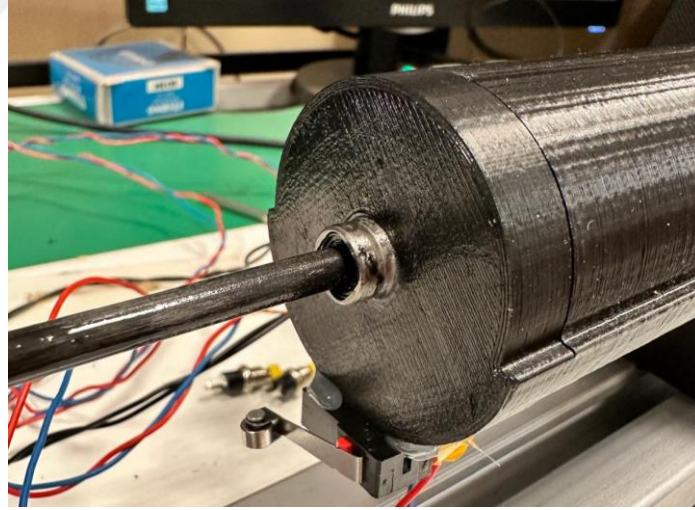
Şekil 4.13 Statorun kabuğun içerisine yerleştirilmesi

3 boyutlu yazıcı kullanarak kabuğun ön ve arka kısımları için 2 adet kapak üretilmiştir. Üretilen kapağın merkez noktasına 5 mm iç çapa sahip doğrusal rulman için boşluk açılmıştır.



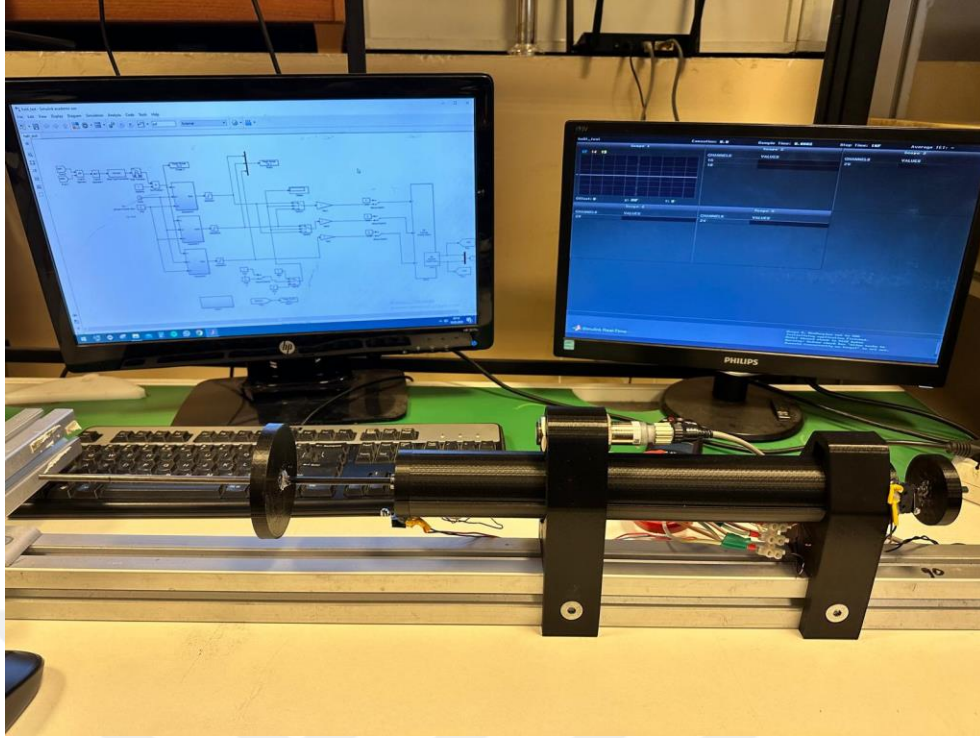
Şekil 4.14 Milin yataklanması için kullanılan 5 mm'lik doğrusal rulman

Rulmanlar kapaklara yapıştırılarak monte edilmiştir. Rotor motorun içine yerleştirilerek kapaklar kapatılmıştır. Motorun strok uzunluğu 10 cm'dir. Mıknatısların motorun iç yüzeyinde kapaklara çarpmasını önlemek için sınırlandırıcı anahtarlar kullanılmıştır. Anahtarlar motorun ön ve arka kapağına monte edilmiştir.



Şekil 4.15 Doğrusal rulman ile mil yataklanması ve sınırlandırıcı anahtar

Motorun bir düzleme sabitlenmesi için iki adet ayak tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Motor bu ayaklar ile 4,5 cm sigma profile monte edilmiştir.



Şekil 4.16 Motor prototipinin nihai hali

4.2 Deney Düzenekinin Oluşturulması

Bu bölümde deney düzenekinin oluşturulması aşamaları anlatılmaktadır.

Motorun pozisyonunun gözlemlenebilmesi için Omron E4C-DS100 ultrasonik mesafe sensörü kullanılmıştır. Sensör Şekil 4.16’da görüldüğü üzere motorun üzerinde konumlandırılmış, tasarlanan ayağa monte edilmiştir. Motorun miline mesafe sensörünün görebileceği şekilde disk yerleştirilmiştir. Böylece sensör bu diskin uzaklığı ile motorun pozisyonunu belirleyebilmektedir. Mile yerleştirilen diskler aynı zamanda sınırlandırıcı anahtarlara temas ederek motoru durdurmak için kullanılmıştır.



Şekil 4.17 Omron E4C-DS100 ultrasonik mesafe sensörü

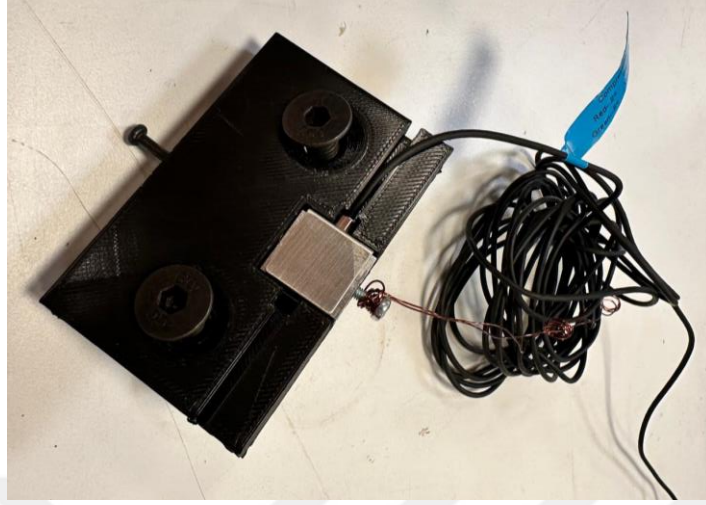


(b)

DA-DA Dönüştürücü Soğutma Fanı Kontaktör

51

Motorun ürettiği kuvvetin gözlemlenebilmesi için Forsentek firmasına ait FSSM-10N kuvvet sensörü kullanılmıştır.



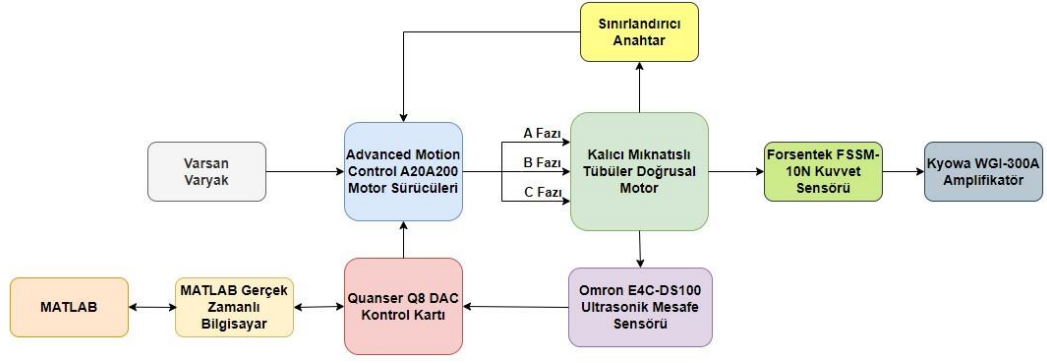
şekil 4.20 Forsentek FSSM-10N kuvvet sensörü

Ölçümlerin gözlemlenebilmesi için Kyowa WGI-300A amplifikatör kullanılmıştır.

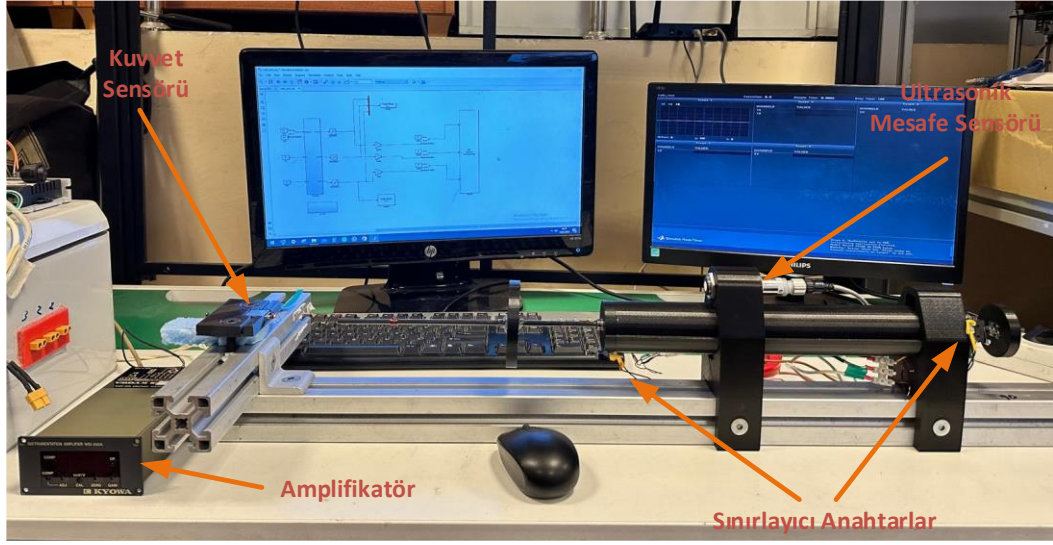


şekil 4.21 Kyowa WGI-300A amplifikatör

Deney düzeneğinin bağlantı diyagramı şekil 4.22'deki gibidir. Oluşturulan deney düzeneğinin nihai hali şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.22 Deney düzeneği bağlantı diyagramı



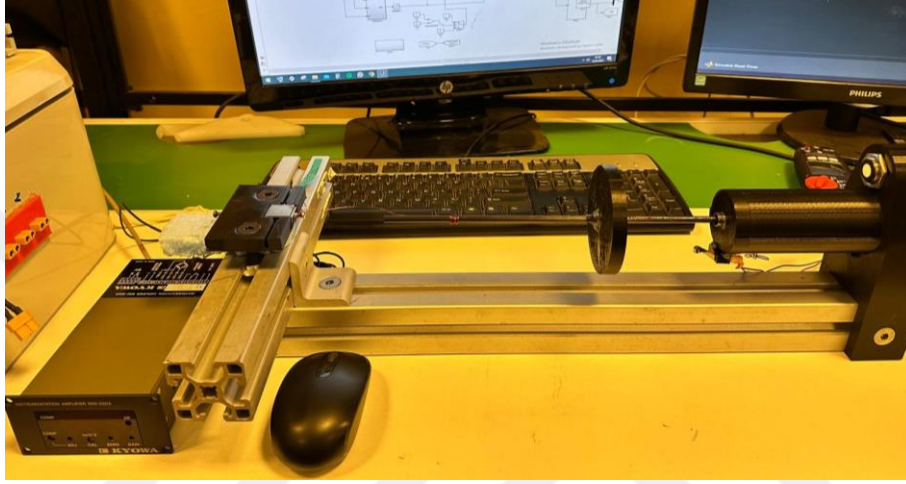
Şekil 4.23 Deney düzeneğinin nihai hali

5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

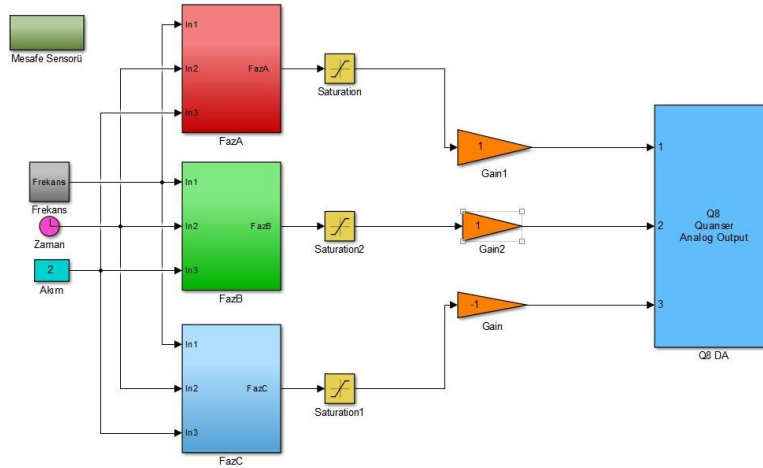
Bu bölümde tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorun çeşitli uyartım akımları ile çıkış kuvveti deneysel çalışmaları anlatılmıştır.

Kuvvet ölçümleri için deney düzeneği oluşturulmuştur. Motor mili ince bir bakır tel yardımı ile kuvvet sensörüne bağlanmıştır.



Şekil 5.1 Kuvvet ölçümü deney düzeneği

Quanser Q8 kontrol kartı MATLAB üzerinden programlanarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ana çalışmanın Simulink modeli Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Ana çalışma ekranında ultrasonik mesafe sensörü için Mesafe Sensörü alt bloğu ve frekans için Frekans alt bloğu bulunmaktadır.



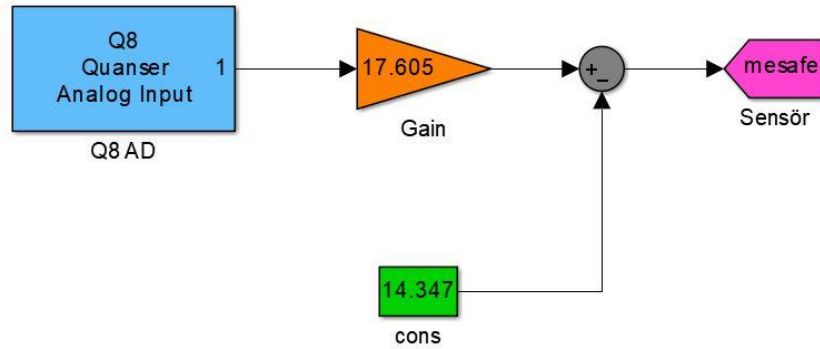
Şekil 5.2 Simulink ana çalışma ekranı

Mesafe Sensörü alt bloğu içerisinde sensörden alınan elektriksel sinyalin mesafeye dönüştürülmesi için gerekli kalibrasyon işlemi yapılmaktadır. Kalibrasyon için alınan gerçek değerler ve bu değerlere denk gelen gerilim değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Ultrasonik mesafe sensörü kalibrasyonu

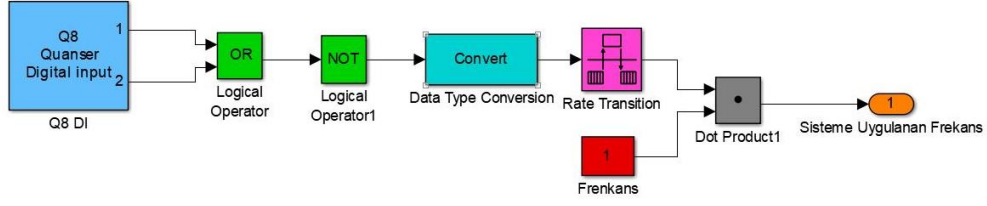
Gerçek Mesafe (cm)	Voltaj Değeri (V)
5	1,10
10	1,38
15	1,67
20	1,95

Tablo verileri kullanılarak kalibrasyon verileri elde edilmiş, ölçülen gerilim değeri 17.605 ile çarpılıp 14.347 değeri çıkartılarak kalibrasyon tamamlanmıştır.



Şekil 5.3 Mesafe Sensörü alt bloğu iç yapısı

Frekans alt bloğu içerisinde motorun frekans değeri girdisi ve sınırlandırıcı anahtar girdileri yer almaktadır. Sınırlandırıcı anahtar sistemi güvenlik amacı ile sisteme yerleştirilmiştir.

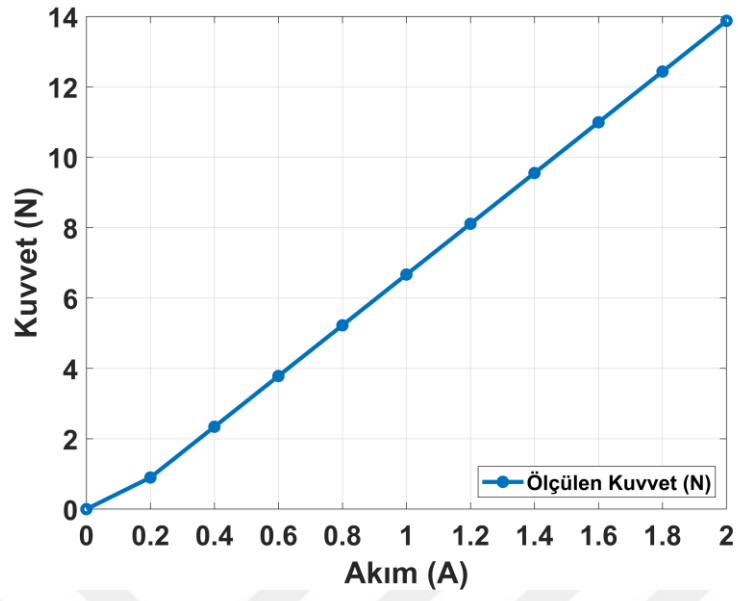


Şekil 5.4 Frekans alt bloğu iç yapısı

Farklı akım değerlerine karşılık kuvvet ölçümünün yapılabilmesi için 0.1 Hz frekansta sinüs dalga formunda 3 faz sırasıyla 0,2 A'dan 2 A'ya kadar akım değeri 0,2 A artırılarak verilmiş ve kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları aşağıda Tablo 5.2 ve Şekil 5.5'te belirtilmiştir.

Tablo 5.2 Akıma karşılık kuvvet gözlemleri

Akım (A)	Ölçülen Kuvvet (N)
0,2	0,9
0,4	2,34
0,6	3,78
0,8	5,22
1	6,66
1,2	8,11
1,4	9,55
1,6	11
1,8	12,43
2	13,88

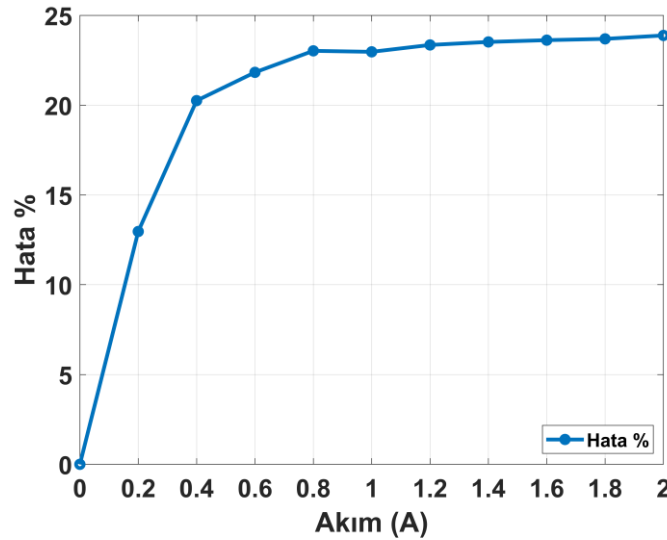


Şekil 5.5 Ölçülen kuvvet değerleri

6 SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında tübüler kalıcı mıknatıslı doğrusal motorun tasarlanması için 2 boyutlu ve 3 boyutlu SEM analizleri ile tasarım çalışması yapılmış, tasarım parametreleri belirlenen motorun prototipi üretilerek bir deney düzeneği oluşturulmuş ve oluşturulan deney düzeneğinde motorun kuvvet  ıkışları gözlemlenmiştir.

Yapılan analiz çalışmalarında gözlemlenen kuvvet değerleri ile deneysel çalışmalar sonucu elde edilen kuvvet değerleri karşılaştırıldığında şekil 6.1’de görüldüğü gibi yaklaşık %20-25’lik bir fark bulunmaktadır.



şekil 6.1 Analiz  alışmaları ile deneysel çalışmalar arasındaki hata

Deneysel çalışmalarda elde edilen kuvvet değerlerinin analiz çalışmalarında elde edilen kuvvet değerlerinden küçük olması da göz önünde bulundurulduğunda bu hatanın deneysel sistemdeki sürtünme ve enerji kayıplarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda elde edilen kuvvet değerleri incelendiğinde, maksimum kuvvetin aynı boyutlardaki hidrolik eyleyicilere kıyasla düşük kaldığı, pnömatik eyleyicilerle kıyaslandığında ise yakın değerlerin elde edilebildiği g r lm ştir. Fakat TKMDM’nin en büyük avantajlarından bir tanesi düşük hacimde bu kuvvet değerlerine erişebilmesidir. Hidrolik ve pnömatik eyleyicilerin aksine TKMDM herhangi bir hava veya hidrolik tankına, filtreye vb. ihtiyaç duymaz. Bu nedenle

TKMDM'ler düşük hacimli kompakt sistemlerdir. Elektrikli sistemler olduklarından kontrol sistemlerine entegrasyonu da hidrolik ve pnömatik sistemlere göre kolaydır. Ayrıca TKMDM'ler hassas pozisyon kontrolüne de imkan sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda prototip motorun ultrasonik mesafe sensörü ile pozisyon kontrolünün gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Çalışması gerçekleştirilen TKMDM, fonksiyonel yapısı itibarı ile çeşitli uygulamalarda kolayca kullanılabilir. Rotor yataklamasının daha düşük sürtünme katsayısına sahip doğrusal rulmanlarla yapılması ile sürtünme kayıpları azaltılabilir. Yüksek tork gerektiren uygulamalar için motora demir oluk yapısı eklenebilir. Böylece akı yoğunluğu artırılarak yüksek torklar elde edilebilir. Stator sargılarının yüksek uyartım akımlarında ısınmasının önlenmesi durumunda motor yüksek akım değerlerinde çalışarak yüksek tork değerlerine ulaşabilir. Mıknatıs teknolojisinin de gelişmesi ile birlikte daha yüksek manyetik karakteristiğe sahip mıknatıslar tercih edilebilir. Ayrıca kalıcı mıknatısların materyalleri ve boyutları, stator sargılarının boyutları ve sarım sayıları değiştirilerek çeşitli uygulamalar için uygun bir motor elde edilebilir.

- [1] B. C. Murphy, “Design and construction of a precision tubular linear motor and controller”, Msc. Thesis, Texas A&M University, 2004.
- [2] A. Heya, Y. Nakata, M. Sakai, H. Ishiguro, ve K. Hirata, “Force estimation method for a magnetic lead-screw-driven linear actuator”, *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 54, sy 11, ss. 1-5, 2018.
- [3] M. T. Berhan, “Implementation of a Halbach array in a tubular linear motor”, Msc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [4] P. Janker vd., “New actuators for aircraft and space applications”, içinde *Proceedings of the 11th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany*, 2008, ss. 9-11.
- [5] J. Li, Z. Yu, Y. Huang, ve Z. Li, “A review of electromechanical actuation system for more electric aircraft”, içinde *2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*, IEEE, 2016, ss. 490-497.
- [6] S. Wang, M. Tomovic, ve H. Liu, *Commercial Aircraft Hydraulic Systems: Shanghai Jiao Tong University Press Aerospace Series*. Academic Press, 2015.
- [7] E. Richer ve Y. Hurmuzlu, “A high performance pneumatic force actuator system: Part I—Nonlinear mathematical model”, *J. dyn. sys., meas., control*, c. 122, sy 3, ss. 416-425, 2000.
- [8] F. Milanese, “Design optimization and control strategies for PM Multiphase Tubular Linear Actuators”, PhD. Thesis, University of Bologna, 2009.
- [9] I. Boldea ve S. A. Nasar, “Linear electric actuators and generators”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 14, sy 3, ss. 712-717, 1999.
- [10] F. Baronti, A. Lazzeri, F. Lenzi, R. Roncella, R. Saletti, ve S. Saponara, “Voice coil actuators: From model and simulation to automotive application”, içinde *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, IEEE, 2009, ss. 1805-1810.
- [11] H. Yamada, *Handbook of linear motors*. Japan: Kogyo Chosakai Publish. Co., 1986.
- [12] “Brush Linear Motors”. H2W Technologies. Erişim Tarihi: 21 Nisan 2024. Erişim adresi: <https://www.h2wtech.com/product/brush-linear/BRA006-051019-LX>.
- [13] E. R. Laithwaite, “Linear induction motors”, *Proc. IEE A Power Eng. UK*, c. 104, sy 18, s. 461, 1957, doi: 10.1049/pi-a.1957.0115.
- [14] R. Palka ve K. Woronowicz, “Linear induction motors in transportation systems”, *Energies*, c. 14, sy 9, s. 2549, 2021.
- [15] N. C. Lenin, P. Sanjeevikumar, A. Iqbal, ve C. Mbohwa, “Linear Synchronous Reluctance Motor—A Comprehensive Review”, *Advances in Systems, Control and Automation*, c. 442, A. Konkani, R. Bera, ve S. Paul, Ed., Lecture

- Notes in Electrical Engineering, vol. 442. , Singapore: Springer Singapore, 2018, ss. 45-70. doi: 10.1007/978-981-10-4762-6_5.
- [16] A. Zaitsev, V. Shmatchenko, P. Plekhanov, D. Roenkov, ve V. Ivanov, *Magnetic Levitation Transport Systems*. 2020.
 - [17] L. Szabo, “Researches in the field of variable reluctance electrical machines in Technical University of Cluj”, program adi: Proceedings of the Symposia on Electrical Machines (SME '09), Bucharest, Oca. 2009.
 - [18] L. Szabó, “On the Optimal Teeth Geometry of a Hybrid Linear Stepper Motor”, *Analele Universităţii din Oradea*, ss. 109-114, 1998.
 - [19] L. Yu, S. Chang, J. He, H. Sun, J. Huang, ve H. Tian, “Electromagnetic Design and Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor”, *Energies*, c. 15, sy 15, s. 5441, 2022.
 - [20] N. R. Tavana ve V. Dinavahi, “Design of slotted permanent magnet linear synchronous motor for improved thrust density”, içinde *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, IEEE, 2013, ss. 1225-1228.
 - [21] R. Luis ve J. C. Quadrado, “On PM tubular linear synchronous motor modelling.”, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, c. 3, sy 9, ss. 1852-1857, 2004.
 - [22] J. A. Woodroffe, “Design and Construction of a Liquid-Cooled, Flexible, Permanent-Magnet Tubular Linear Motor Artificial Muscle”, Msc. Thesis, Northeastern University, 2020.
 - [23] N. H. Quang, N. P. Quang, ve N. Van Lanh, “A sensorless approach for tracking control problem of tubular linear synchronous motor”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2022
 - [24] N. Gargov, “Permanent Magnet Linear Generators for Marine Wave Energy Converters”, PhD. Thesis, University of Exeter (United Kingdom), 2013.
 - [25] J. Wang ve D. Howe, “Design optimization of radially magnetized, iron-cored, tubular permanent-magnet machines and drive systems”, *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 40, sy 5, ss. 3262-3277, 2004.
 - [26] J. Dai, S. Chang, ve L. Liu, “Optimization analysis of electromagnetic linear actuator’s radial array permanent magnets”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, c. 47, sy 2, ss. 441-451, 2015.
 - [27] J. Wang, G. W. Jewell, ve D. Howe, “Design optimisation and comparison of tubular permanent magnet machine topologies”, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, c. 148, sy 5, ss. 456-464, 2001.
 - [28] T. von Büren ve G. Tröster, “Design and optimization of a linear vibration-driven electromagnetic micro-power generator”, *Sensors and Actuators A: Physical*, c. 135, sy 2, ss. 765-775, 2007.
 - [29] W. Kim ve B. C. Murphy, “Development of a novel direct-drive tubular linear brushless permanent-magnet motor”, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, c. 2, sy 3, ss. 279-288, 2004.
 - [30] I. I. Abdalla, T. Ibrahim, ve N. B. Mohd Nor, “Development and optimization of a moving-magnet tubular linear permanent magnet motor for use in a reciprocating compressor of household refrigerators”, *International Journal*

of Electrical Power & Energy Systems, c. 77, ss. 263-270, May. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.020.

- [31] A. Ilıca, “Tarımsal İlaçlamada Tüp Tipi Lineer Senkron Motor ile Püskürtücü Yükseklik Kontrolü”, PhD. Thesis, Sakarya Üniversitesi, 2018.
- [32] Y. Huo, T. Wang, C. Yan, L. Dong, ve H. Chen, “Single phase, single slot tubular permanent magnet linear motor for Stirling cryocooler—design and operation”, içinde *2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, IEEE, 2013, ss. 747-750.
- [33] J. Gao vd., “Research and Design the Thrust Fluctuation of Slotted-Tubular Permanent Magnet Linear Motor: an application on low frequency plastic forming equipment”, 2021
- [34] Z. Hao, W. Zhou, T. Ji, X. Huang, ve C. Zhang, “Multi-objective optimization of double primary tubular permanent magnet synchronous linear motor in wide temperature range environment based on pareto front method”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 207193-207203, 2020.
- [35] H. Komijani, S. M. Kazraji, E. Baneshi, ve M. J. Lariche, “Modeling and state feedback controller design of tubular linear permanent magnet synchronous motor”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, c. 7, sy 4, 2016
- [36] F. Dreishing ve C. Kreischer, “Experimental and Analytical Analysis of a Compact Ironless Permanent-Magnet Tubular Linear Motor (PM-TLSM)”, içinde *Electromechanical Drive Systems 2021; ETG Symposium*, VDE, 2021, ss. 1-6.
- [37] Y. Hu, Z. Xu, Y. Sun, ve L. Liu, “Electromagnetic Characteristics Analysis of a Tubular Moving Magnet Linear Generator System”, *Applied Sciences*, c. 10, sy 11, s. 3713, 2020.
- [38] A. Pirisi, G. Gruosso, ve R. E. Zich, “Novel modeling design of three phase tubular permanent magnet linear generator for marine applications”, *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, IEEE, 2009, ss. 78-83.
- [39] J. Wang, Z. Lin, ve D. Howe, “Analysis of a short-stroke, single-phase, quasi-Halbach magnetised tubular permanent magnet motor for linear compressor applications”, *IET Electric Power Applications*, c. 2, sy 3, ss. 193-200, 2008.
- [40] S. T. Boroujeni, J. Milimonfared, ve M. Ashabani, “Design, prototyping, and analysis of a novel tubular permanent-magnet linear machine”, *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 45, sy 12, ss. 5405-5413, 2009.
- [41] Y. Wei, J. Bai, B. Yu, Z. Yin, ve P. Zheng, “Mover optimization and mechanical strength analysis of a tubular permanent-magnet linear motor”, içinde *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, IEEE, 2019, ss. 1-4.
- [42] M. Forbes, W. S. Robertson, A. C. Zander, ve J. J. Paulides, “Analytic magnetic field modelling approach for iron-less tubular permanent magnet linear synchronous motors”, içinde *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, 2019, ss. 3038-3045.

- [43] B. Tomczuk ve A. Waindok, “A coupled field-circuit model of a 5-phase permanent magnet tubular linear motor”, *Archives of Electrical Engineering*, c. 60, sy 1, ss. 5-14, 2011.
- [44] M. A. M. Cheema ve J. E. Fletcher, *Advanced Direct Thrust Force Control of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor*. içinde Power Systems. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-40325-6.
- [45] P. Ponomarev, “Tooth-coil permanent magnet synchronous machine design for special applications”, PhD. Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2013



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Uzuner, H., & Erkan, K. (2023). Tubular Permanent Magnet Linear Motor Design For Aircraft Actuator Instead Of Hydraulic Actuators. ICENTE'23, 165. Erişim adresi: https://icente.selcuk.edu.tr/uploads/files2/ICENTE23_Proceedings_Book_v2.pdf

